



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

«Η σημασία της σχεδίασης για την αντοχή θραύσης των
σκελετών των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων».

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: Βασιλική Μόττα

ΑΜ:21007

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Αντώνης Προμπονάς

ΤΙΤΛΟΣ: Καθηγητής

Αθήνα 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF HEALTH AND CARE SCIENCES

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES

DIVISION of DENTAL TECHNOLOGY

**«The importance of design principles for the fracture
resistance of the all-ceramic cores for dental prostheses»**

MASTER'S THESIS

CANDIDATE NAME: Vasiliki Mota

Candidate Number: 21007

SUPERVISOR: Anthony Prombonas

TITLE: Professor

ATHENS 2024

Σήμερα 20/4/2024 έγινε παρουσίαση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας του μεταπτυχιακού φοιτητή Μόττα Βασιλική με ΑΜ 21007 ενώπιον της κάτωθι εξεταστικής επιτροπής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ	ΒΑΘΜΟΣ (Ολογράφως)	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΠΡΟΜΠΟΝΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ		
ΓΙΑΝΝΙΚΑΚΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ		
ΓΑΛΙΑΤΣΑΤΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ		

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μόττα Βασιλική, με αριθμό μητρώου 21007 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Σύγχρονη Προσθετική Οδοντικής Τεχνολογίας του Τμήματος Βιοϊατρικών επιστημών της Σχολής Επιστημών Υγείας και Πρόνοιας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Βασιλική Μόττσα

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
SUMMARY.....	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	x
ΣΚΟΠΟΣ.....	ii
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΔΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	1
1.1. Τα στάδια της ψηφιακής σχεδίασης και κατασκευής.....	1
1.2. Οι μέθοδοι της ψηφιακής κατασκευής.....	5
1.2.1 Αφαιρετικές και προσθετικές μέθοδοι.....	5
1.2.2 Προσθετικές μέθοδοι	7
1.3 Σχεδιαστικά προγράμματα	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΚΙΝΗΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΣΕΩΝ	13
2.1. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών (γεωμετρικά δοκίμια)	13
2.2. Αντοχή των ακίνητων προσθέσεων (μη γεωμετρικά δοκίμια)	21
2.2.1. Αντοχή στη θραύση γεφυρών και στεφανών	22
2.2.2 Αντοχή στη κόπωση στεφανών και γεφυρών.....	22
2.3. Η πειραματική ανάλυση των τάσεων και η μηχανική των θραύσεων	23
2.3.1. Πειραματική ανάλυση τάσεων (Experimental stress analysis).....	24
2.3.2. Μηχανική των θραύσεων (Fracture Mechanics)	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΣΤΕΦΑΝΩΝ	59
4.1. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών στεφανών.....	59
4.2 Μελέτη της επίδρασης του σχεδιασμού στην αντοχή σε κόπωση των ολοκεραμικών στεφανών.....	81
4.3. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών στεφανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ	127

5.1. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών γεφυρών.....	127
5.2 Μελέτη της επίδρασης του σχεδιασμού στην αντοχή σε κάμψη των ολοκεραμικών γεφυρών.....	159
5.3. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών γεφυρών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	175
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	208
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	221
ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	228
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	229
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	237

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο "Η σημασία της σχεδίασης για την αντοχή θραύσης των σκελετών των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων" εξετάζει εκτενώς τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν οι αρχές σχεδιασμού στη βελτίωση της ανθεκτικότητας και της αντοχής σε θραύση των ολοκεραμικών πυρήνων στις οδοντιατρικές προσθέσεις. Η έρευνα αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που παρουσιάζουν τα παραδοσιακά υλικά και εστιάζει στην επίτευξη συνολικής κατανόησης σχετικά με το πώς ο σχεδιασμός μπορεί να ενισχύσει την απόδοση και την μακροζωία των οδοντιατρικών προσθετικών κατασκευών.

Η έρευνα αρχικά πραγματεύεται μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των σύγχρονων τεχνολογικών μέσων παραγωγής οδοντιατρικών αποκαταστάσεων αλλά και την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των ακίνητων προσθετικών αποκαταστάσεων

Στο ειδικό μέρος, η μελέτη επικεντρώνεται στη διερεύνηση της βιβλιογραφίας και παρουσιάζει τα ευρήματα αυτής της βιβλιογραφικής έρευνας. Εξετάζεται η λεπτή αλληλεπίδραση μεταξύ των αρχών σχεδιασμού και των ιδιοτήτων των ολοκεραμικών υλικών. Ειδικότερα, υπογραμμίζεται η σημασία των προσαρμοσμένων προσεγγίσεων σχεδιασμού για διάφορα κλινικά σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές όπως οι δυνάμεις μάσησης, το εύρος της αποκατάστασης, η αισθητική και η λειτουργικότητα. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται η αύξηση της διάρκειας ζωής των ολοκεραμικών προσθετικών αποκαταστάσεων προς όφελος των ασθενών.

SUMMARY

This thesis entitled "The importance of design for fracture resistance of all-ceramic restorative frameworks" extensively examines the critical role that design principles play in improving the durability and fracture resistance of all-ceramic cores in dental prostheses. The research addresses the challenges presented by traditional materials and focuses on achieving a comprehensive understanding of how design can enhance the performance and longevity of dental prostheses.

The research begins with a comprehensive review of modern technological means of producing dental restorations. It then delves into the analysis of the mechanical behavior of immobile prosthetic restorations, examining the mechanical properties of ceramic materials and their fracture and fatigue resistance. In addition, the methods for experimental analysis of stress and fracture mechanics are discussed.

In the specific part, the study focuses on the literature review and presents the findings of this literature survey. Throughout the research, the subtle interplay between design principles and properties of all-ceramic materials is examined. In particular, the importance of customized design approaches for different clinical scenarios is highlighted, taking into account variables such as chewing forces, range of restoration, aesthetics and functionality. In this way, the aim is to increase the lifespan of all-ceramic prosthetic restorations for the benefit of patients.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά τις προσπάθειες που γίνονται ώστε να διατηρηθεί η στοματική υγεία, παραμένει η ανάγκη κατασκευής προσθετικών εργασιών. Παράλληλα, οι απαιτήσεις των ασθενών όσο αφορά την αισθητική αυτών των προσθετικών αποκαταστάσεων αυξάνονται. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται μια ιδιαίτερη προτίμηση για αποκαταστάσεις που είναι εξ'ολοκλήρου κεραμικές σε σχέση με τις μεταλλοκεραμικές. Ωστόσο, οι ολοκεραμικές αποκαταστάσεις και ειδικότερα αυτές των οπίσθιων δοντιών ή αυτές που είναι μεγάλης έκτασης είναι πιο επιρρεπείς στη θραύση. Προκειμένου να ξεπεραστεί η ευθραυστότητα των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων έχουν εξελιχθεί τα υλικά που αποτελούν τους σκελετούς και υποστηρίζουν το πιο αδύναμο, συγκριτικά, κεραμικό επικάλυψης. Παρά την εξέλιξη των υλικών των κεραμικών σκελετών όμως, παραμένουν πιο εύθραυστοι και λιγότερο ελαστικοί από τους μεταλλικούς σκελετούς.

Συνεπώς, τόσο οι παρασκευές των δοντιών όσο και ο σχεδιασμός αλλά και η συγκόλληση της αποκατάστασης είναι πιο απαιτητικές. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή στη θραύση και την στεγανοποίηση της αποκατάστασης, πράγμα που συχνά αποτελεί την αχίλλειο πτέρνα των ακίνητων προσθετικών αποκαταστάσεων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ακολουθούνται πιστά οι οδηγίες παρασκευής και να λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές παράμετροι.

Όσο αφορά τις αποκαταστάσεις που έχουν κατασκευαστεί με την παραδοσιακή χειρωνακτική μέθοδο, οι αδυναμίες της σχεδίασης είναι δύσκολο να υπολογισθούν και να προβλεφθούν καθώς τα σχήματα και τα μεγέθη των κεραμικών επιστρώσεων εξαρτώνται εξ'ολοκλήρου από τον σχεδιαστή. Ωστόσο, οι παράμετροι των αποκαταστάσεων που σχεδιάζονται και παράγονται με τη βοήθεια υπολογιστή είναι διαθέσιμες και λόγω του ότι βρίσκονται ήδη σε ψηφιακή μορφή είναι πιο επιδεκτικές σε αναλύσεις δυνάμεων και σε προβλέψεις πιθανής αποτυχίας.

Το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η σημασία της σχεδίασης και η επίδρασή της στην αντοχή θραύσης των σκελετών των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων. Με άλλα λόγια, σε αυτή την εργασία μελετώνται οι βασικές αρχές σχεδίασης ακίνητων προσθετικών εργασιών ώστε να κατασκευαστούν αποκαταστάσεις

που είναι ανθεκτικές στην καταπόνηση από τα μασητικά φορτία. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται όλα τα απαιτούμενα στοιχεία και προδιαγραφές που πρέπει να έχει ένας κεραμικός σκελετός μιας γέφυρας δοντιών ώστε να είναι ικανός τόσο να υποστηρίξει το κεραμικό υλικό επικάλυψης όσο και να έχει τη μέγιστη δυνατή αντοχή ώστε να ανταπεξέλθει στην καταπόνηση από τις μασητικές δυνάμεις που ασκούνται στην προσθετική αποκατάσταση και να παραταθεί με αυτό τον τρόπο η μακροβιότητά της.

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει σε ποιο βαθμό η σχεδίαση των ολοκεραμικών οδοντοπροσθετικών εργασιών επηρεάζει την λειτουργική αντοχή της αποκατάστασης και αφετέρου να μελετήσει τις βασικές αρχές σχεδίασης που θα πρέπει να εφαρμόσει ο οδοντικός τεχνολόγος ώστε να κατασκευάσει μια ολοκεραμική αποκατάσταση με αυξημένη αντοχή στη θραύση. Ειδικότερα εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων της σχεδίασης όπως το μέγεθος των συνδέσμων, το εύρος των αποκαταστάσεων, ο τύπος του βάθρου του δοντιού στηρίγματος, το πάχος του κεραμικού επικάλυψης και ο σχεδιασμός του σκελετού ώστε να κατασκευάζονται ολοκεραμικές αποκαταστάσεις με την βέλτιστη λειτουργικότητα αλλά και μηχανική συμπεριφορά.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα κεραμικά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της οδοντιατρικής. Ξεκινούν να χρησιμοποιούνται το 1889 όταν ο Charles H. Land κατασκεύασε και πατεντάρισε τις στεφάνες τζάκετ. Σε αυτό το είδος αποκατάστασης έγιναν βελτιώσεις από το E.B. Spraulding. Παρά το γεγονός πως η στεφάνη τζάκετ δεν είχαν ιδιαίτερη αντοχή. Εξαιτίας της εσωτερικής μικρορωγμάτωσης χρησιμοποιήθηκαν αρκετά έως και το 1950 περίπου.¹

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, ο Abraham Weinstein εισάγει τις μεταλλοκεραμικές στεφάνες με σκοπό να μειωθεί η εσωτερική μικρορωγμάτωση κατά τη φάση της ψύξης του υλικού, καθώς ο μεταλλοκεραμικός δεσμός αποτρέπει τη δημιουργία ρωγμών τάσης.² Παρ' όλα αυτά. Ενώ οι μεταλλοκεραμικές στεφάνες πέτυχαν τη μείωση των αστοχιών του κεραμικού εξακολουθούσαν να έχουν το πρόβλημα της οριακής εφαρμογής, πράγμα που υπήρχε και στεφάνες τζάκετ. Επιπρόσθετα, η αισθητική των μέταλλο κεραμικών στεφανών ήταν μειωμένη λόγω του εσωτερικού διαφανούς στρώματος μετάλλου. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα οι W. Mclean και T.H. Hughes το 1965 παρουσίασαν μια νέα μέθοδο κατασκευής ολοκεραμικών στεφανών, κατά την οποία ο πυρήνας σκελετός της αποκατάστασης αποτελούνταν από πορσελάνη που περιείχε μέχρι 50% κρυστάλλους αλουμίνιας.³ Ωστόσο, παρά την καλύτερη αντοχή σε σύγκριση με τις στεφάνες, τζάκετ εξακολουθούσαν να υπάρχουν προβλήματα, όπως η υψηλή αδιαφάνεια και ο περιορισμός της χρήσης μόνο σε πρόσθια δόντια, καθότι πιο αδύναμες σε σύγκριση με τις μεταλλοκεραμικές στεφάνες.⁴

Τη δεκαετία του 1950, η εταιρεία Corning glass works παρουσιάζει το σύστημα DICOR. Το σύστημα αυτό ήταν παρόμοιο με τη διαδικασία της X της μεταλλικής στεφάνης, αλλά είχε ως αποτέλεσμα μια χυτή γυάλινη Στεφάνη, η οποία υποβαλλόταν σε θερμική επεξεργασία προκειμένου να κρυσταλλοποιηθεί. Να σχηματιστούν δηλαδή κρύσταλλοι υάλου στο εσωτερικό της με ομοιόμορφη κατανομή. Το είδος των κρυστάλλων που δημιουργούνταν εξαρτώταν κυρίως από τα συστατικά της πορσελάνης. Για παράδειγμα, δημιουργούνταν κρύσταλλοι λευκίτη, διπυριτικού λιθίου ή απατίτη.⁵ Με αυτόν τον τρόπο έγινε εφικτή η αύξηση της αντοχής και της δυσθραυστότητας. Όσο αφορά το υλικό DICOR η μονοχρωματική στεφάνη που πρόκυπτε χρωματιζόταν με ένα επιφανειακό στρώμα μακιγιάζ. Ωστόσο, το σύστημα αυτό εγκαταλείφθηκε λόγω της δύσκολης επεξεργασίας του και της υψηλής συχνότητας θραύσης.⁶ Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 εισήχθησαν

τα πρώτα πιεζόμενα κεραμικά υλικά, όπως παραδείγματος χάρη το Empress 1. Τα υλικά αυτά περιείχαν λευκίτη, ο οποίος είχε αρχικά προστεθεί στις πορσελάνες προκειμένου να αυξηθεί ο συντελεστής θερμικής διαστολής τους και έτσι να ταιριάζουν με τα μέταλλα τα οποία επένδυναν. Άλλη μια θετική ιδιότητα της προσθήκης λευκίτη στις πορσελάνες ήταν το γεγονός πως οι κρύσταλλοί του επιβράδυναν τη διάδοση των ρωγμών. Η διαδικασία κατασκευής αυτού του τύπου στεφανών ήταν παρόμοια με τα DICOR. Κατασκευαζόταν δηλαδή ένα κέρινο πρόπλασμα, αλλά αντί για φυγοκεντρική χύτευση, όπως γινόταν στα DICOR, θερμαινόταν ένα κεραμικό κυβάκι που ήταν ενισχυμένο με λευκίτη και πιεζόταν στο καλούπι με τη χρήση ενός ειδικά σχεδιασμένου κλιβάνου. Αυτός ο τρόπος κατασκευής έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής εξαιτίας του αισθητικού αποτελέσματος και της ευκολίας χρήσης. Ωστόσο, τα σπασίματα ήταν ακόμα αυξημένα όταν το σύστημα αυτό χρησιμοποιούνταν για αποκαταστάσεις οπίσθιων δοντιών.³

Έπειτα, η Vita παρουσίασε το σύστημα In-Ceram. Πρόκειται για ένα σύστημα κεραμικού πυρήνα εμπλουτισμένου με γυαλί και με αντοχή στην κάμψη στα 352 MPa. Προκειμένου η Vita να αυξήσει τη διαφάνεια. Και επομένως την αισθητική αντικατέστησε την αλουμίνα με σπινέλιο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη αισθητική, αλλά από την άλλη μειώθηκε η αντοχή στην κάμψη, καθιστώντας το υλικό κατάλληλο περισσότερο για δόντια στην πρόσθια περιοχή του φραγμού. Για αποκαταστάσεις οπίσθιων δοντιών και για γέφυρες η Vita παρουσίασε μια παραλλαγή χυτεύσιμου πυρήνα αναμειγνύοντας αλουμίνα με κρυστάλλους οξειδίου του ζirkονίου, αυξάνοντας έτσι την αντοχή στην κάμψη στα 700 MPa.⁷

Στα μέσα περίπου της δεκαετίας του 1990, η Νόμπελ Bioscare παρουσιάζει τον πρώτο πυρήνα που μπορεί να κατασκευαστεί με τη βοήθεια υπολογιστή, Το Procera All-Ceram. πρόκειται για ένα υλικό που είναι 99,9% αλουμίνα και επικαλύπτεται με πορσελάνη.

Με τη χρήση της τεχνολογίας CAD CAM άνοιξε μια νέα γενιά κεραμικών σκελετών. Που αποτελούνται από διοξείδιο του ζirkονίου. Από αρκετούς κατασκευαστές παρουσιάστηκαν σκελετοί τόσο στεφανών όσο και γεφυρών, κατασκευασμένοι από μπλοκ διοξειδίου του ζirkονίου, σταθεροποιημένου με ύτριο. Οι σκελετοί αυτοί ήταν υπερμεγέθεις και στη συνέχεια τοποθετούνταν σε κλιβάνους στους 1500 βαθμούς

Κελσίου για 11 ώρες προκειμένου να πυροσυσσωματωθούν. Η μέθοδος αυτή παρείχε εξαιρετική εφαρμογή και αντοχή στην κάμψη από 900 έως 1300 MPa. Παράλληλα, άλλοι κατασκευαστές πάλι με τη χρήση της τεχνολογίας CAD CAM φρεζάρισαν πλήρως συντηγμένα μπλοκ ζirkονίου, αφαιρώντας έτσι τον παράγοντα της συρρίκνωσης, τα οποία είχαν καλύτερη οριακή εφαρμογή. Και οι 2 τρόποι παρείχαν σκελετούς με επαρκή αντοχή στην κάμψη, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα το υλικό να χρησιμοποιηθεί και για γέφυρες πολλαπλών μονάδων και σε αποκαταστάσεις στην οπίσθια περιοχή.⁸

Το 1998, η Ivoclar παρουσιάζει το IPS Empress II. Ένα κεραμικό διπυριτικού λιθίου, το οποίο ήταν κατάλληλο για χρήση σε μία ή και περισσότερες στεφάνες της πρόσθιας περιοχής του οδοντικού φραγμού. Ο σκελετός αυτός επικαλυπτόταν με ένα ειδικό κεραμικό κατασκευασμένο ώστε να είναι συμβατό με το διπυριτικό λίθιο.⁹

Το 1998 επίσης κάνει την εμφάνισή του το Authentic. Πρόκειται για ένα κεραμικό δεύτερης γενιάς ενισχυμένο με γυαλί λευκίτη με χαμηλή σύντηξη και υψηλή διαστολή. Το υλικό δοκιμάστηκε να συμπιεστεί πάνω σε μεταλλικά κράματα με αντίστοιχους συντελεστές θερμικής διαστολής και έτσι δημιουργήθηκε η τεχνική Press-to-Metal. Αυτή η τεχνική αποτέλεσε τη βάση για να αντικατασταθεί ο μεταλλικός σκελετός της τεχνικής αυτής, με σκελετό ζirkονίου, για τον οποίο κατασκευάστηκαν ειδικά κεραμικά κυβάρια συμπίεσης με αντίστοιχο συμβατό συντελεστή θερμικής διαστολής.

Το 2006, το διπυριτικό λίθιο εμφανίζεται ξανά ως κυβάρια για συμπίεση και ως κυβάρια με μερικώς κρυσταλλωμένη μορφή για κοπή. Το υλικό αυτό είχε αντοχή στην κάμψη 170% υψηλότερη από οποιοδήποτε κεραμικό, ενισχυμένο με λευκίτη. Μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους: να κοπεί με πλήρη μορφολογία, να συμπιεστεί και στη συνέχεια να γίνει μακιγιάζ ή να γίνει μερική διαστρωμάτωση με ειδικά σχεδιασμένο κεραμικό γυαλί απατίτη. Ο κεραμικός αυτό σκελετός είχε τα ίδια βασικά συστατικά που περιέχει και το φυσικό σμάλτο των δοντιών. Η κοπή υλικών (μέταλλα ή ζirkόνια) με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την κατασκευή προσθετικών εργασιών άνοιξε τις πύλες στην αγορά της ψηφιακής επανορθωτικής οδοντιατρικής.

Οι κατασκευάστριες εταιρείες οδοντιατρικών υλικών τείνουν να απομακρύνονται από την κατασκευή αποκαταστάσεων που περιέχουν κράματα μετάλλων και

κατευθύνονται περισσότερο προς ολοκεραμικά συστήματα. Επιδιώκουν να πετύχουν τη βελτίωση της αντοχής αλλά και της αισθητικής των αποκαταστάσεων από διοξείδιο του ζιρκονίου με τη χρήση ενός μονολιθικού υλικού για κοπή από μηχανές με τη χρήση της CAD CAM τεχνολογίας.¹⁰

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΨΗΦΙΑΚΗ ΟΔΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

1.1. Τα στάδια της ψηφιακής σχεδίασης και κατασκευής

Η χρήση της τεχνολογίας σχεδιασμού και κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD-CAM) έχει φέρει επανάσταση σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της οδοντιατρικής. Οι οδοντικοί τεχνολόγοι, υπεύθυνοι για την κατασκευή οδοντιατρικών αποκαταστάσεων, έχουν βιώσει σημαντικές αλλαγές στην επαγγελματική τους ζωή λόγω της εφαρμογής της τεχνολογίας CAD-CAM.

I. Βελτιωμένη ροή εργασίας και αποτελεσματικότητα: Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας CAD-CAM στο οδοντοτεχνικό εργαστήριο είναι η βελτιωμένη ροή εργασίας που προσφέρει. Παραδοσιακά, οι οδοντοτεχνίτες κατασκεύαζαν χειρωνακτικά τις αποκαταστάσεις χρησιμοποιώντας τεχνικές που απαιτούσαν μεγάλης έντασης εργασία. Με την τεχνολογία CAD-CAM, η ψηφιακή διαδικασία σχεδιασμού επιτρέπει στους οδοντικούς τεχνολόγους να δημιουργούν τρισδιάστατα μοντέλα οδοντιατρικών αποκαταστάσεων χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο λογισμικό. Αυτή η ψηφιοποίηση ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για τον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοντιατρικών προσθετικών υλικών. ¹¹⁻¹³

II. Αυξημένη ακρίβεια και ποιότητα: Η τεχνολογία CAD-CAM παρέχει στους οδοντικούς τεχνολόγους υψηλό επίπεδο ακρίβειας κατά τη διαδικασία κατασκευής. Μέσω της ψηφιακής σάρωσης και μοντελοποίησης, κάθε λεπτομέρεια της οδοντικής ανατομίας μπορεί να αποτυπωθεί και να αναπαραχθεί με υψηλή ακρίβεια. Αυτή η ακριβής αναπαραγωγή οδηγεί σε βελτιωμένη εφαρμογή, λειτουργικότητα και αισθητική των οδοντιατρικών αποκαταστάσεων, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για προσαρμογές και ανακατασκευές. Εξασφαλίζοντας υψηλότερο επίπεδο ποιότητας, η τεχνολογία CAD-CAM αυξάνει την ικανοποίηση των ασθενών και μειώνει τα πιθανά σφάλματα και την ταλαιπωρία. ^{11,13}

III. Αυξημένη παραγωγικότητα και οικονομική αποδοτικότητα: Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας CAD-CAM έχει αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα των οδοντικών τεχνολόγων. Με την αυτοματοποίηση ορισμένων σταδίων της διαδικασίας κατασκευής, όπως η κοπή σκληρών υλικών, οι οδοντικοί τεχνολόγοι μπορούν να εργάζονται ταυτόχρονα σε πολλαπλά περιστατικά. Αυτή η βελτιωμένη αποδοτικότητα επιτρέπει ταχύτερους χρόνους διεκπεραίωσης, προς όφελος τόσο του οδοντοτεχνικού εργαστηρίου όσο και των ασθενών. Επιπλέον, η μείωση της χειρωνακτικής εργασίας και της σπατάλης υλικών συμβάλλει στην οικονομική αποδοτικότητα, καθιστώντας την τεχνολογία CAD-CAM μια οικονομικά βιώσιμη λύση για τα οδοντοτεχνικά εργαστήρια. ^{11,13}

IV. Επέκταση των τεχνικών δεξιοτήτων και γνώσεων: Ενώ η τεχνολογία CAD-CAM αυτοματοποιεί αρκετές πτυχές της κατασκευής οδοντικών αποκαταστάσεων, απαιτεί επίσης από τους οδοντικούς τεχνολόγους να αποκτήσουν νέες τεχνικές δεξιότητες και γνώσεις. Οι οδοντικοί τεχνολόγοι πρέπει να εξοικειωθούν με το εξειδικευμένο λογισμικό CAD και τον εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένων των ψηφιακών σαρωτών, των μηχανών κοπής και των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Αυτή η μετάβαση απαιτεί συνεχή εκπαίδευση και επαγγελματική ανάπτυξη για την προσαρμογή στο εξελισσόμενο τεχνολογικό τοπίο. Ως αποτέλεσμα, οι οδοντικοί τεχνολόγοι είναι πλέον σε θέση να εργάζονται με τεχνολογία αιχμής, διευρύνοντας την τεχνογνωσία τους και τις ευκαιρίες επαγγελματικής τους ανάπτυξης. ^{11,13}

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας CAD-CAM έχει επηρεάσει σημαντικά την εργασιακή ζωή των οδοντικών τεχνολόγων, φέρνοντας επανάσταση στον κλάδο των οδοντοτεχνικών εργαστηρίων. Μέσω βελτιωμένων ροών εργασίας, αυξημένης ακρίβειας, αυξημένης παραγωγικότητας και διευρυμένων τεχνικών δεξιοτήτων, οι οδοντικοί τεχνολόγοι έχουν βιώσει βελτιωμένη αποτελεσματικότητα, αποδοτικότητα και ποιότητα στην καθημερινή τους εργασία. Καθώς ο τομέας της οδοντιατρικής συνεχίζει να αγκαλιάζει τις τεχνολογικές εξελίξεις, οι οδοντικοί τεχνολόγοι διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη χρήση της τεχνολογίας CAD-CAM για την παροχή βέλτιστης φροντίδας των ασθενών και ανώτερων οδοντιατρικών αποκαταστάσεων.

11-13

Ωστόσο η ιδέα της πλήρως ψηφιακής οδοντιατρικής είναι μια σύγχρονη ιδέα που στοχεύει στη χρήση των τελευταίων τεχνολογικών εξελίξεων για την επίτευξη ανώτερων αισθητικών αποτελεσμάτων. Προκειμένου να μελετηθεί και να κατασκευαστεί μία προσθετική εργασία εξ'ολοκλήρου ψηφιακά ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Βήμα 1: Διάγνωση

Το πρώτο βήμα είναι η διάγνωση της κατάστασης των δοντιών του ασθενούς μέσω ακτινογραφιών, αξονικών τομογραφιών και αποτυπωμάτων. Ο οδοντίατρος θα χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες για να κάνει ακριβή διάγνωση και να καθορίσει την καλύτερη πορεία θεραπείας.¹²

- Βήμα 2: Δημιουργία ψηφιακού χαμόγελου

Γίνεται λήψη ενδοστοματικών φωτογραφιών με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής DSLR. Ακολουθεί η λήψη διαγνωστικού αποτυπώματος και καταγραφή της θέσης μέγιστης συγόμφωσης και της κάθετης διάστασης των γνάθων. Η τελευταία μπορεί να διανοιχτεί ψηφιακά με τη χρήση εικονικού αρθρωτήρα στο λογισμικό σχεδίασης. Γίνεται χρήση του λογισμικού ψηφιακής σχεδίασης χαμόγελου από το οποίο εξάγονται πληροφορίες για την κατασκευή διαγνωστικού κέρωματος που θα είναι απόλυτα εναρμονισμένο στις αναλογίες του προσώπου του ασθενούς. Αφού σχεδιαστεί ψηφιακά το διαγνωστικό κέρωμα ακολουθεί η εκτύπωση των ψηφιακών εκμαγείων που φέρουν το διαγνωστικό κέρωμα και κατασκευάζεται νάρθηκας μεταφοράς του διαγνωστικού κέρωματος (mock up).¹²

- Βήμα 3: Προετοιμασία του δοντιού

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την προετοιμασία του δοντιού για την αποκατάσταση. Αυτό περιλαμβάνει την αφαίρεση τυχόν κατεστραμμένων ή τερηδονισμένων περιοχών και την αναδιαμόρφωση του δοντιού ώστε να είναι έτοιμο για την αποκατάσταση.¹²

- Βήμα 4: Ψηφιακή σάρωση του δοντιού

Αφού προετοιμαστεί το δόντι, πραγματοποιείται ψηφιακή σάρωση του δοντιού με τη χρήση τρισδιάστατου ενδοστοματικού σαρωτή. Οι σαρωμένες πληροφορίες μεταφέρονται στο λογισμικό σχεδιασμού που χειρίζεται ο σχεδιαστής οδοντικός τεχνολόγος, όπου μπορεί να σχεδιάσει την αποκατάσταση.

[12, 13](#)

- Βήμα 5: Σχεδιασμός CAD

Η ψηφιακή σάρωση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός εικονικού τρισδιάστατου μοντέλου της οδοντικής αποκατάστασης στο λογισμικό CAD. Ο σχεδιαστής οδοντικός τεχνολόγος σχεδιάζει την αποκατάσταση σμιλεύοντας και διαμορφώνοντας το μοντέλο και το προσαρμόζει για τον ασθενή χρησιμοποιώντας το λογισμικό. Στη συνέχεια, το μοντέλο αποστέλλεται στο λογισμικό CAM για το φρεζάρισμα της αποκατάστασης. [12, 13](#)

- Βήμα 6: Φρεζάρισμα με CAM

Μόλις ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός, το αρχείο αποστέλλεται στη μηχανή φρεζαρίσματος CAM. Το μηχάνημα χρησιμοποιεί τις πληροφορίες του σχεδιασμού για να δημιουργήσει την αποκατάσταση από ένα μπλοκ υλικού που έχει επιλεγεί. [13](#)

- Βήμα 7: Επεξεργασία

Στη συνέχεια, η αποκατάσταση αφαιρείται από τη μηχανή φρεζαρίσματος και ελέγχεται για την ακρίβειά της. Ο οδοντικός τεχνολόγος θα κόψει τυχόν επιπλέον υλικό και θα επεξεργαστεί την αποκατάσταση για να της δώσει την τελική της μορφή.

[12](#)

- Βήμα 8: Τελική τοποθέτηση και συγκόλληση

Η αποκατάσταση τοποθετείται στη συνέχεια στο στόμα του ασθενούς και ελέγχεται για την εφαρμογή και τη λειτουργία της. Συγκολλάται στη θέση της και ο ασθενής ενημερώνεται για τη σωστή φροντίδα και συντήρηση της αποκατάστασης.

[12](#)

Συνοπτικά, η διαδικασία δημιουργίας μιας οδοντιατρικής προσθετικής αποκατάστασης με τη χρήση της τεχνολογίας CAD/CAM περιλαμβάνει διάγνωση,

προετοιμασία του δοντιού, ψηφιακή σάρωση, σχεδιασμό CAD, φρεζάρισμα CAM, επεξεργασία, φινιρίσμα και στίλβωση και τελική τοποθέτηση και συγκόλληση. Το λογισμικό σχεδιασμού (CAD) είναι ένα απαραίτητο εργαλείο, καθώς συναρμολογεί σε ένα εικονικό περιβάλλον όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και είναι υπεύθυνο για την καθοδήγηση των μηχανημάτων (CAM) που υλοποιούν τις προσθετικές αποκαταστάσεις.

1.2. Οι μέθοδοι της ψηφιακής κατασκευής

Στην ψηφιακή οδοντική τεχνολογία οι μέθοδοι παραγωγής διαχωρίζονται κυρίως σε αφαιρετικές και προσθετικές μεθόδους.

1.2.1 Αφαιρετικές και προσθετικές μέθοδοι

Κατά τις αφαιρετικές μεθόδους από ένα προκατασκευασμένο μπλοκ υλικού αποκόπτεται όσο υλικό χρειάζεται ώστε στο τέλος να παραμείνει η εργασία που είχε προηγουμένως σχεδιαστεί στο λογισμικό σχεδίασης. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη χρήση ειδικών εργαλείων (φρέζες) ή με λέιζερ. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της προσθετικής αποκατάστασης το αρχείο STL μεταφέρεται στο λογισμικό τοποθέτησης της εκάστοτε μηχανής αριθμητικού ελέγχου με υπολογιστή (CNC-Computerized Numerical Control) προκειμένου να υπολογιστεί η διαδρομή των ειδικών εργαλείων (φρεζών) και έτσι να φρεζαριστεί-κοπεί η εργασία [Εικόνες 1-3]. Αντίστοιχα κατά τη μέθοδο κοπής με χρήση λέιζερ τα κοπτικά εργαλεία αντικαθίστανται με δέσμη λέιζερ. Οι αφαιρετικές μέθοδοι παρέχουν πλεονεκτήματα όπως :

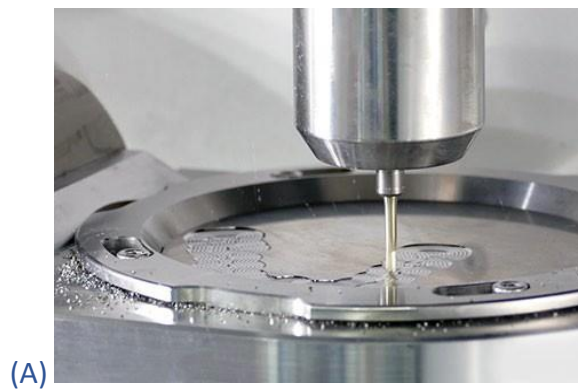
- η υψηλή ακρίβεια
- η γρήγορη και αυξημένη παραγωγή και
- η δυνατότητα χρήσης υλικών όπως το ζirkόνιο και το τιτάνιο

Ωστόσο πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη και τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου καθώς πρόκειται για μια μέθοδο που χαρακτηρίζεται από μεγάλη απώλεια υλικού, τα κοπτικά εργαλεία φθείρονται και έχουν αρκετό κόστος αντικατάστασης

ενώ τέλος η ακρίβεια του τελικού προϊόντος καθορίζεται από τη διάμετρο του μικρότερου κοπτικού εργαλείου.¹⁴



Εικόνα 1: Κοπτικό μηχανήμα (CNC) 5 αξόνων με χρήση φρεζών.



(A)



(B)

Εικόνα 2: (A) Κοπή μετάλλου (B) Κοπή ζirkονίου



Εικόνα 3: Κοπτικό μηχάνημα με χρήση λέιζερ αντί για φρέζες

1.2.2 Προσθετικές μέθοδοι

Η κατασκευή αποκαταστάσεων με τη χρήση των προσθετικών μεθόδων γίνεται με την επαναλαμβανόμενη εναπόθεση υλικού σε στρώσεις έως ότου να σχηματισθεί το τελικό προϊόν. Ουσιαστικά πρόκειται για την τρισδιάστατη εκτύπωση αντικειμένων. Οι τύποι των προσθετικών μεθόδων κατασκευής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη δομή του υλικού που χρησιμοποιείται:

- Στερεά
- Υγρά
- Σκόνες

Τεχνολογία	Δομή υλικού	Υλικό
Εναπόθεση τηγμένου υλικού (FDM Fusion Deposition Modeling)	Στερεό	Πολυμερή

Στερεολιθογραφία (SLA)	Υγρό	Ακρυλικά, Ρητίνες και Πολυμερή
Εκτόξευση ενός ή πολλών υγρών polyjet ή multi-jet	Υγρό	Ακρυλικά, Ρητίνες και Πολυμερή
Σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion-PBS)	Σκόνη	Μέταλλα
Επιλεκτική τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (Selective Electron Beam Melting-SEBM)	Σκόνη	Μέταλλα
Inkjet	Σκόνη	Γύψο

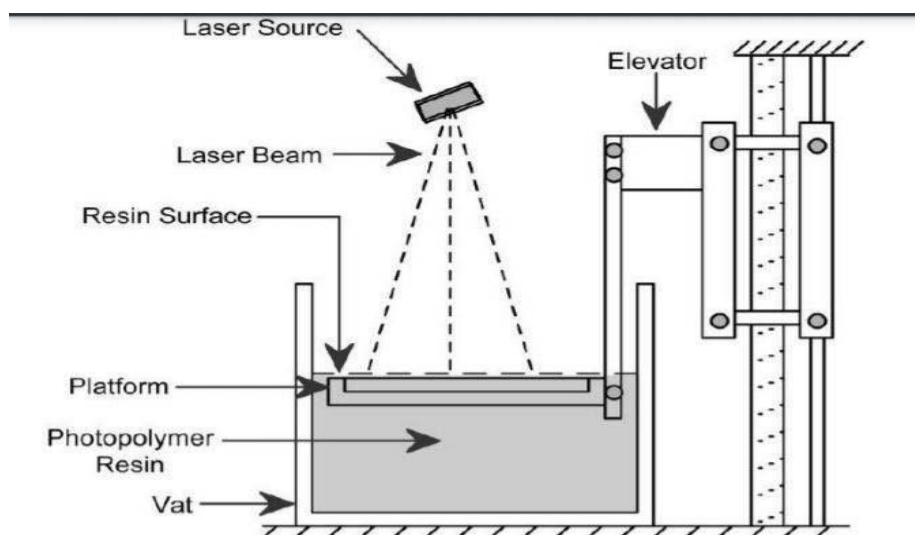
Πίνακας 1: Τεχνολογίες εκτυπωτών, δομή των υλικών και υλικό που χρησιμοποιείται



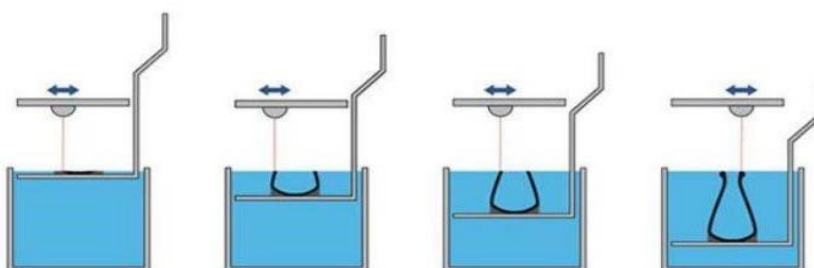
Εικόνα 4: Εκτυπωτής τεχνολογίας στερεολιθογραφίας (SLA).

Η παλαιότερη και πιο δημοφιλής τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οδοντιατρική είναι η στερεολιθογραφία (SLA). [Εικόνα 4] Με βάση την κινητικότητα της πλατφόρμας κατασκευής και την κίνηση του λέιζερ, αυτή η τεχνολογία μπορεί να διαφοροποιηθεί περαιτέρω. Η έννοια της SLA βασίζεται στη στρωματοποιημένη

δομή που σχηματίζεται κατά τη στερεοποίηση και την περιορισμένη κίνηση των ελεύθερων μονομερών. Η πλατφόρμα κατασκευής ανυψώνεται μετά από κάθε κύκλο για να διασφαλιστεί ότι η ρητίνη ρέει στο χώρο μεταξύ της πλατφόρμας και της δεξαμενής. Η κινητή πλατφόρμα κατασκευής τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή ρητίνης και καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα ρητίνης. [Εικόνα 5A] Μετά τη σάρωση του αρχικού στρώματος με λέιζερ, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει και τοποθετείται νέο στρώμα ρητίνης. Κάθε στρώμα περνάει ξανά από τον κύκλο μέχρι να ολοκληρωθεί το προς εκτύπωση αντικείμενο. [Εικόνα 5B] Η πλειονότητα των εκτυπωτών SLA που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο, καθώς έχει πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, η ενσωμάτωση του λέιζερ μειώνει τον κίνδυνο λάθους του χειριστή. Δεύτερον, το οξυγόνο δεν μπορεί να μπλοκάρει την αντίδραση πολυμερισμού καθώς η ρητίνη σκληραίνεται βαθιά μέσα στη δεξαμενή. Τρίτον, η ρητίνη ξαναγεμίζει αυτόματα και, τέταρτον, τα εκτυπωμένα στρώματα έχουν λεία επιφάνεια, καθώς η πλατφόρμα κατασκευής έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα της δεξαμενής. ^{14,15}



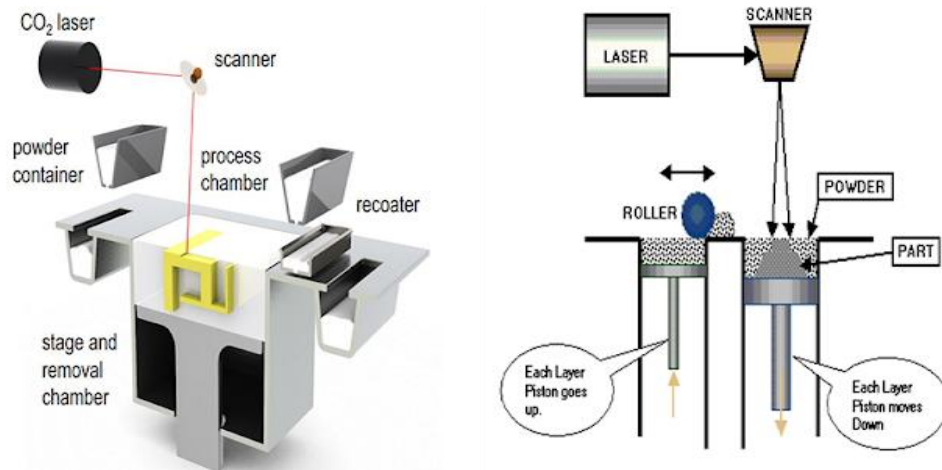
(A)



(B)

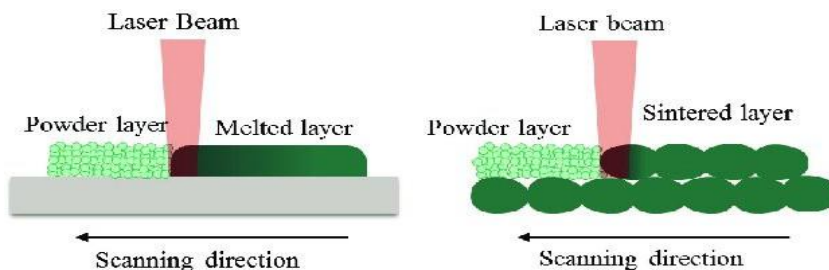
[Εικόνα 5](#): (A) Τα τμήματα ενός εκτυπωτή τεχνολογίας SLA. (B) Ο κύκλος διαστρωμάτωσης της ρητίνης.¹⁵

Η μέθοδος επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ ή τήξης με λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS/ Selective Laser Melting SLM) μπορεί γενικά να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε κονιοποιημένο υλικό που μπορεί να πυροσυσσωματωθεί ή να λιώσει με ακτινοβολία λέιζερ και να στερεοποιηθεί μετά την ψύξη. Το φάσμα των υλικών περιλαμβάνει κεραμικά, μεταλλικά και πλαστικά υλικά. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για μεταλλικά υλικά στην οδοντιατρική. Η δεξαμενή γεμάτη σκόνη προθερμαίνεται αρχικά σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξης του υλικού αλλά σε υψηλότερη από τη θερμοκρασία που είναι απαραίτητη για την ανακρυστάλλωση κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης. Λόγω της προθέρμανσης της σκόνης, το λέιζερ χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για τη σύντηξη ή τη συσσωμάτωση των μεμονωμένων σωματιδίων σκόνης μεταξύ τους, αποτρέποντας το σχηματισμό σημαντικών θερμικών αντιθέσεων που διαφορετικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε παραμόρφωση του αντικειμένου. Μετά από κάθε κύκλο, ο χώρος εγκατάστασης συρρικνώνεται κατά ένα πάχος στρώματος και ένα νέο λεπτό στρώμα σκόνης τοποθετείται στο προηγούμενο στρώμα με μια λεπίδα, τα σωματίδια σκόνης λιώνουν ή πυροσυσσωματώνονται τοπικά με λέιζερ CO₂ υψηλής ισχύος. Επειδή τα σωματίδια στη δεξαμενή δεν συμπιέζονται, το μέγεθος, το σχήμα και η πυκνότητα των σωματιδίων, καθώς και η θερμική συμπεριφορά, είναι σημαντικά στοιχεία κατά την επιλογή των υλικών. Η πυκνότητα των σφαιρικών σωματιδίων είναι υψηλότερη και η αντίστασή τους στην κύλιση είναι χαμηλότερη από εκείνη των ακανόνιστων σωματιδίων. Λόγω της υψηλής συνοχής ή των δυνάμεων ηλεκτροστατικής απώθησης, τα πολύ μικρά σωματίδια καθιστούν την επεξεργασία δύσκολη. Η θερμοκρασία προθέρμανσης της στρωματοποιημένης σκόνης είναι ένας τέτοιος παράγοντας που επηρεάζει την πυκνότητα των σωματιδίων σκόνης. [\[Εικόνα 6\]](#)



Εικόνα 6: Διαδικασία μεθόδου επιλεκτικής τήξης με λέιζερ

Υπάρχουν διαφορετικές ερμηνείες των λέξεων "πυροσυσσώματωση με λέιζερ" και "τήξη με λέιζερ". Οι δύο διεργασίες αναλύονται επιπλέον σε διάφορες υποκατηγορίες. Ωστόσο, το θεμελιώδες δομικό στοιχείο παραμένει το ίδιο. Η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ είναι η διαδικασία σύντηξης που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των μεμονωμένων σωματιδίων του υλικού, κατά ένα στρώμα κάθε φορά. Ως αποτέλεσμα, λαμβάνει χώρα μόνο μερική τήξη. Ωστόσο, στην επιλεκτική τήξη με λέιζερ, η σκόνη υλικού (κόκκοι σωματιδίων) τήκεται πλήρως τοπικά στη θέση επεξεργασίας (θέση πρόσκρουσης της δέσμης λέιζερ). Η διαδικασία είναι γνωστή ως τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων εάν χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων αντί για λέιζερ. Και οι δύο διαδικασίες μπορούν να γίνουν πιο αποτελεσματικά με την παρουσία αδρανούς αερίου. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε κράματα μετάλλων. Το τιτάνιο και το Cr-Co είναι τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μέταλλα.¹⁴ [Εικόνα 7]



Εικόνα 7: Η διαφορά των κόκκων μετάλλου μεταξύ των μεθόδων SLM (αριστερά) και SLS (δεξιά)



Εικόνα 8: Μηχανήματα τεχνολογίας πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS)

Η χρήση των προσθετικών μεθόδων παραγωγής πλεονεκτεί έναντι των αφαιρετικών ως προς την ταχύτητα και το κόστος παραγωγής ενώ δεν υπάρχει απώλεια υλικού. Από την άλλη πλευρά όμως μειονεκτεί ως προς το εύρος του φάσματος των προσφερόμενων υλικών και το κόστος αγοράς ενός εκτυπωτή (π.χ. εκτυπωτές σύντηξης μετάλλου) [Εικόνα 8]

Κάθε μέθοδος παραγωγής, είτε η αφαιρετική είτε η προσθετική, διαθέτει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσο αφορά την ταχύτητα, την ακρίβεια και το κόστος παραγωγής. Ωστόσο σήμερα για την κατασκευή προσθετικών εργασιών από κεραμικά υλικά χρησιμοποιείται η αφαιρετική μέθοδος με τη διαδικασία φρεζαρίσματος σε κοπτικά μηχανήματα CNC. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης κεραμικών υλικών βρίσκεται σε αναπτυσσόμενο στάδιο καθώς το τελικό προϊόν παρουσιάζει αρκετές ατέλειες που οφείλονται κατά κύριο λόγο στους περιορισμούς που διαθέτουν τα κεραμικά υλικά από τη φύση τους. Ωστόσο γίνονται έρευνες ώστε να αναπτυχθούν τόσο τα υλικά όσο και οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης και έτσι να εξαλειφθούν οι ατέλειες.^{14,15}

1.3 Σχεδιαστικά προγράμματα

Σημαντικό στοιχείο των συστημάτων CAD/CAM είναι το λογισμικό σχεδίασης. Το λογισμικό σχεδίασης είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των δεδομένων από τον ενδοστοματικό ή τον επιτραπέζιο σαρωτή και την μετέπειτα επεξεργασία τους ώστε να παραχθεί η τελική αποκατάσταση. Αφού γίνει η απαραίτητη επεξεργασία και ο

σχεδιασμός της αποκατάστασης το λογισμικό δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει και να εξάγει STL (Standard Tessellation or Triangulation Language) αρχεία. Τα αρχεία αυτά περιγράφουν ουσιαστικά τη γεωμετρία των αντικειμένων χωρίς επιπλέον πληροφορίες όπως το χρώμα ή το υλικό. Τα STL αρχεία είναι αυτά που χρησιμοποιούνται και αποδέχονται όλα τα συστήματα CAD/CAM στην ψηφιακή οδοντιατρική. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν τα μηχανήματα ψηφιακής οδοντιατρικής είτε αυτά είναι σαρωτές είτε μηχανές CAM διαθέτουν και κατασκευάζουν τα αντίστοιχα δικά τους λογισμικά σχεδίασης CAD. Με τον τρόπο αυτό η οδοντιατρική και οδοντοτεχνική καθημερινότητα γίνεται πιο εύκολη. Η επικοινωνία οδοντιάτρου και οδοντοτεχνίτη γίνεται πιο εύκολη και πιο γρήγορη καθώς είναι εφικτό να μεταφερθούν οι απαραίτητες πληροφορίες πέρα από την γεωμετρία των αντικειμένων που μας δίνει το αρχείο STL. Τα κυριότερα λογισμικά σχεδίασης είναι αυτά της 3Shape, της Dental Wings και της Exocad. [Εικόνα 9] ^{12, 13}



Εικόνα 9: Σχεδιαστικά λογισμικά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΚΙΝΗΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΣΕΩΝ

2.1. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών (γεωμετρικά δοκίμια)

Κατά τη λειτουργία του στοματογναθικού συστήματος οι οδοντικές προσθετικές αποκαταστάσεις καταπονούνται από επαναλαμβανόμενα φορτία, υπό

την επίδραση των δυνάμεων του στοματογναθικού συστήματος κατά τους διάφορους κύκλους μάσησης της τροφής.¹⁶ Με σκοπό οι αποκαταστάσεις αυτές να ανταπεξέλθουν στις εξωτερικές δυνάμεις, χωρίς να παραμορφωθούν σημαντικά ή να υποστούν θραύση θα πρέπει να είναι κατασκευασμένες από το κατάλληλο υλικό και να έχουν τις κατάλληλες διαστάσεις και σχήμα για τη συγκεκριμένη οδοντιατρική εφαρμογή.^{16,17} Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη επιλογή υλικού για την κατασκευή μιας προσθετικής αποκατάστασης κρίνεται αναγκαίο να είναι γνωστές οι μηχανικές του ιδιότητες.¹⁷ Γνωρίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού γίνεται μια εκτίμηση με μεγάλη προσέγγιση του μέτρου της αντίστασης που προβάλλει το υλικό, όταν ασκείται μια εξωτερική δύναμη. Συνήθως, οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων προσδιορίζονται σε επακριβώς καθορισμένα δοκίμια σύμφωνα με καθιερωμένες προδιαγραφές, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Γίνεται αντιληπτό ότι η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (αντοχή στον εφελκυσμό, αντοχή στην κάμψη, επιμήκυνση, όριο αναλογίας, μέτρο ελαστικότητας) παρέχουν μία σημαντική εκτίμηση της συμπεριφοράς του υλικού κάτω από την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Αυτό ονομάζεται αντοχή του υλικού. Όμως στην οδοντική τεχνολογία, όπως και σε άλλες επιστήμες (μηχανολογία, αεροναυπηγική, ναυπηγική και συν.), όταν ένα υλικό μορφοποιείται (και εδώ εισάγεται η σημασία της σχεδίασης), δηλαδή λαμβάνει συγκεκριμένο σχήμα και μέγεθος, τότε πρέπει να εκτιμηθεί η μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής (ολική οδοντοστοιχία, μερική οδοντοστοιχία), οπότε γίνεται λόγος για «αντοχή μορφής του υλικού».^{16,17}

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγούμενα και με σκοπό την κατασκευή προσθετικών εργασιών αξιόπιστων και με μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, είναι σημαντική η εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και η μηχανική συμπεριφορά της μορφοποιημένης-σχεδιασμένης προσθετικής εργασίας.¹⁶

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών προσδιορίζονται με τη βοήθεια δοκιμασιών οι οποίες γίνονται με τη χρήση ειδικών δοκιμίων (ειδικό σχήμα μέγεθος και αριθμός), σε ειδικές μηχανές δοκιμασιών οι οποίες καταπονούν-φορτίζουν τα δοκίμια σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη, διάτμηση ή κόπωση. Από αυτές τις δοκιμασίες θα προκύψει η αντοχή του υλικού στην αντίστοιχη καταπόνηση π.χ αντοχή στον εφελκυσμό, στην θλίψη κ.ο.κ. Οι προδιαγραφές για την εκτέλεση αυτών

των δοκιμασιών αντοχής των υλικών (σχήμα, διαστάσεις, πλήθος και τρόπος εκτέλεσης του πειράματος αντοχής) αντλούνται από ειδικούς οργανισμούς τυποποίησης όπως είναι τα ASTM, ADA, ISO, DIN, BS και συν.¹⁷

Η μηχανική συμπεριφορά των μορφοποιημένων οδοντικών προσθετικών αποκαταστάσεων (ολικών οδοντοστοιχιών, γεφυρών και συν.) γίνεται σε δοκίμια-προσθετικές εργασίες τα οποία είναι πανομοιότυπα και κατασκευάζονται με μεθοδολογία η οποία περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια. Εννοείται ότι για πειράματα αυτού του τύπου όπου κατασκευάζονται πανομοιότυπες προσθετικές εργασίες, δεν υπάρχουν προδιαγραφές αντίστοιχες αυτών για την αντοχή των υλικών. Σε αυτή την περίπτωση όπου εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά των προσθετικών εργασιών το δοκίμιο-προσθετική εργασία μπορεί να καταπονηθεί-φορτιστεί είτε με αυξανόμενο φορτίο μέχρι την τελική θραύση του είτε με επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση. Στην μεν πρώτη περίπτωση υπολογίζεται η καμπτική αντοχή της προσθετικής εργασίας, ενώ στην δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται η αντοχή της προσθετικής εργασίας στην καμπτική κόπωση.^{16,17}

Καθίσταται αυτονόητο ότι μίας θεμελιώδους διαφορά μεταξύ της αντοχής του υλικού και της αντοχής μορφής του υλικού (μηχανική συμπεριφορά των προσθετικών εργασιών) είναι ότι στην μεν πρώτη κατασκευάζονται γεωμετρικά δοκίμια ενώ στην δεύτερη κατασκευάζονται μη γεωμετρικά δοκίμια (προσθετικές εργασίες).

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών υλικών αφού είναι σημαντικές για τη συγκεκριμένη οδοντιατρική εφαρμογή και θα τονιστεί η κλινική και εργαστηριακή σημασία τους. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των σκελετών ολοκεραμικών αποκαταστάσεων οι μηχανικές ιδιότητες που παίζουν ρόλο στην αντοχή στη θραύση του κεραμικού σκελετού είναι (α) η αντοχή σε κάμψη (flexural strength), (β) το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity in bending), (γ) η δυσθραυστότητα (fracture toughness) και η αντοχή στην κόπωση (fatigue strength).^{18,19} Οι πρώτες δύο μηχανικές ιδιότητες μπορούν να μετρηθούν με τη δοκιμή κάμψης,¹⁸⁻²⁰ ενώ η δυσθραυστότητα μπορεί να μετρηθεί τόσο με τη μέθοδο κάμψης²⁰ όσο και μέσω της σκληρομέτρησης.¹⁸⁻²² Στον

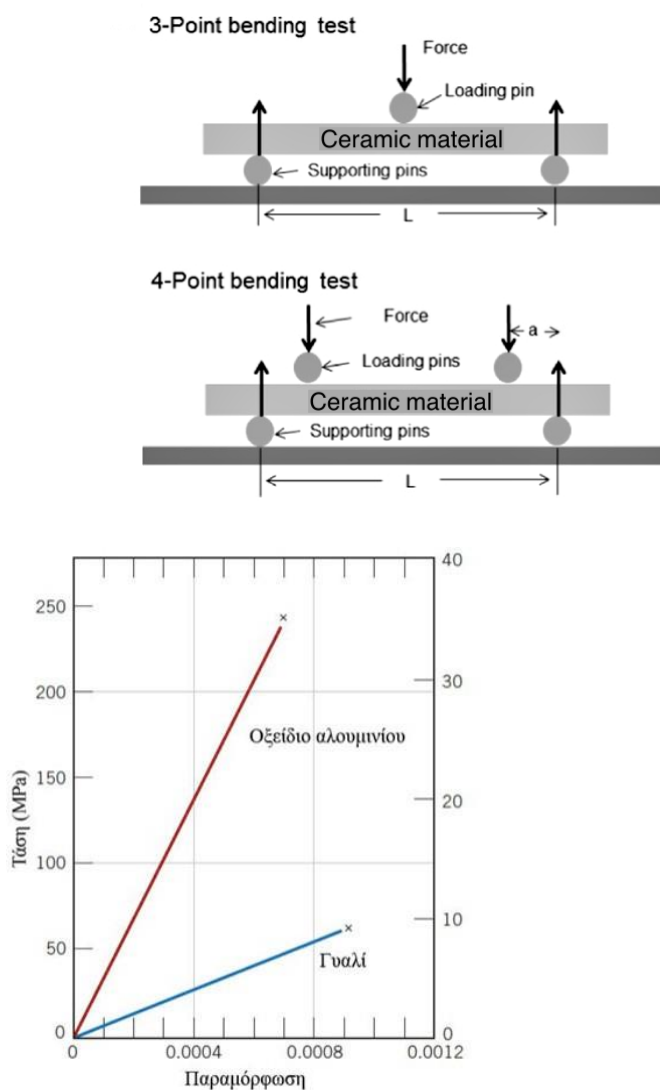
Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι μελέτης/μέτρησης των προαναφερθέντων μηχανικών ιδιοτήτων στην περίπτωση των γεωμετρικών δοκιμίων.

Μηχανική Ιδιότητα	Μέθοδος μέτρησης
Αντοχή σε κάμψη (Flexural Strength)	Κάμψη τριών σημείων Κάμψη τεσσάρων σημείων
Μέτρο ελαστικότητας (Modulus of Elasticity)	Κάμψη τριών σημείων
Δυσθραυστότητα (Fracture toughness)	Κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων
Σκληρότητα	Σκληρομέτρηση
Αντοχή κόπωσης (Fatigue strength)	Κάμψη Διαξονική κόπωση

Πίνακας 2: Μέθοδοι μελέτης/μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωμετρικών δοκιμίων.

Όταν σε ένα σώμα ασκηθεί μια εξωτερική δύναμη (φόρτιση) μέσα στη μάζα του προκαλείται παραμόρφωση η οποία με τη σειρά της προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια του φορτιζόμενου σώματος. Τάση είναι το αποτέλεσμα της εσωτερικής αντίδρασης της μάζας ενός σώματος απέναντι σε μια εξωτερική δύναμη που δρα πάνω σε αυτό.^{23,24} Στα κεραμικά υλικά συνήθως εφαρμόζεται η δοκιμασία κάμψης κατά την οποία ένα δοκίμιο κάμπτεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο φόρτισης τριών ή τεσσάρων σημείων.²⁴ [Εικόνα 10(A)] Ένα τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ενός

κεραμικού υλικού, παρουσιάζεται στην [Εικόνα 10 \(B\)](#). Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 10\(B\)](#), τα κεραμικά υλικά είναι ψαθυρά υλικά, δηλαδή δεν εμφανίζουν την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης πριν την τελική θραύση. Η διαδικασία της ψαθυρής θραύσης οφείλεται στο σχηματισμό και διάδοση ρωγμών σε μια συγκεκριμένη διατομή του υλικού με διεύθυνση κάθετη προς το εφαρμοζόμενο φορτίο.²⁴⁻²⁷ Η κάμψη τριών σημείων μπορεί να παρέχει τιμές για το μέτρο ελαστικότητας του κεραμικού υλικού και για την αντοχή σε κάμψη, τα οποία είναι μεγάλης σημασίας για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των κεραμικών υλικών.¹⁸



(A)

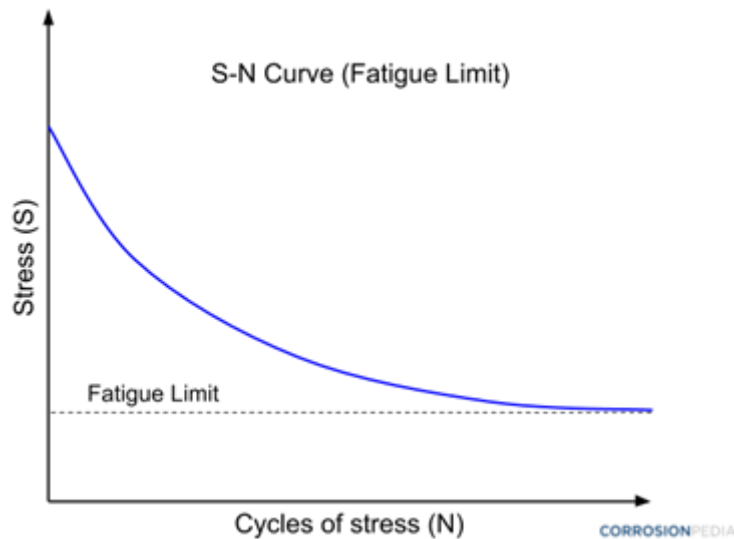
(B)

Εικόνα 10: (A) Δοκιμή κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων.²⁵ (B) Τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δύο κεραμικών υλικών.²⁶

Η αντοχή σε κάμψη (flexural strength) ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να αντισταθεί στην καμπτική παραμόρφωση υπό φορτίο.¹⁸ Το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού στην παραμόρφωση υπό συγκεκριμένη τάση^{18,19,28} μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής, η οποία εξαρτάται από τους ατομικούς δεσμούς και από τον αριθμό των δεσμών στη μονάδα όγκου.²⁹ Ειδικότερα είναι μέτρο της ακαμψίας ενός υλικού. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού τόσο πιο άκαμπτη αναμένεται να είναι η κατασκευή.^{18, 23}

Στην περίπτωση των σκελετών ολοκεραμικών αποκαταστάσεων τα οποία θα επικαλυφθούν με το αισθητικό κεραμικό υλικό, όταν ο σκελετός είναι κατασκευασμένος από υλικά τα οποία παρουσιάζουν υψηλές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και ιδιαίτερα του μέτρου ελαστικότητας (όπως τα κεραμικά ζirkονίας, > 220 GPa)^{18,19} τα υλικά αυτά προστατεύουν από πιθανή θραύση τόσο τον ίδιο το σκελετό όσο και το αισθητικό υλικό επικάλυψης το οποίο είναι επίσης ψαθυρό. Έτσι, χρησιμοποιώντας υλικά με υψηλό μέτρο ελαστικότητας μπορούμε και να περιορίσουμε την υπερβολική αφαίρεση της οδοντικής ουσίας, δίνοντας το ελάχιστο δυνατό πάχος στα όρια της αποκατάστασης το οποίο θα καλυφθεί με πορσελάνη.

Η αντοχή στην κόπωση (fatigue strength) του υλικού δηλώνει την αστοχία του η οποία εμφανίζεται κάτω από επίδραση επαναλαμβανόμενων κυκλικών φορτίων. Η τάση που μπορεί να «αντέξει» ένα υλικό για έναν δεδομένο αριθμό κύκλων φόρτισης χωρίς να υποστεί θραύση (χωρίς να σπάσει) ονομάζεται όριο κόπωσης. Το όριο κόπωσης (Fatigue Limit-Se) ενός υλικού ορίζεται ως η τάση κάτω από την οποία ένα υλικό μπορεί να αντέξει άπειρο αριθμό επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης χωρίς να παρουσιάσει αστοχία. Με άλλα λόγια, όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε τάση που είναι χαμηλότερη από το όριο αντοχής του, θεωρητικά θα πρέπει να μπορεί να αντέξει απεριόριστο αριθμό κύκλων φόρτισης.



Εικόνα 11: Διάγραμμα ορίου αντοχής

Αν και η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι αξονική (εφελκυσμό -θλίψη), καμπτική ή στρεπτική ανάλογα με τη φύση ή τη χρήση του υλικού, στην περίπτωση των κεραμικών υλικών συνήθως η εφαρμόζεται η καμπτική ή δοκιμασία αντοχής διαξονικής κόπωσης (biaxial fatigue strength tests by the staircase approach).^{30,31} Η κόπωση λαμβάνει χώρα με τον σχηματισμό και διάδοση ρωγμών. Η αντοχή στην κόπωση επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως παρουσία υγρασίας, μεταβολές θερμοκρασίας κλπ.^{24,27}

Όσον αφορά τους σκελετούς των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων τα οποία θα επικαλυφθούν με το αισθητικό κεραμικό υλικό, στοχεύοντας να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι κλινικές συνθήκες (παρουσία υγρασίας και επαναλαμβανόμενης κυκλικής/μηχανικής φόρτισης) τα κεραμικά αυτά υλικά συχνά υποβάλλονται σε in vitro ελέγχους αντοχής στην κόπωση (fatigue tests) με εφαρμογή κυκλικών φορτίσεων που προσομοιάζουν τους επαναλαμβανόμενους κύκλους μάσησης σε συνθήκες παρουσίας υγρασίας.^{30,31}

Μια άλλη μηχανική ιδιότητα η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στη θραύση του σκελετού ολοκεραμικών αποκαταστάσεων είναι η δυσθραυστότητα (fracture toughness), η οποία αφορά την αντίσταση ενός υλικού στη διάδοση μιας ρωγμής και τελικά στη θραύση του.^{18, 19,29,32} Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο ογκώδες είναι το υλικό τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες να εμφανιστούν ατέλειες στον όγκο του υλικού, οι

οποίες θα οδηγήσουν σε θραύση. Είναι αυτονόητο ότι, στην περίπτωση των σκελετών ολοκεραμικών αποκαταστάσεων μια χαμηλή τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας συνεπάγεται τη χαμηλή κλινική αξιοπιστία της προσθετικής αποκατάστασης αφού χαμηλή δυσθραυστότητα σημαίνει ότι εύκολα δημιουργείται και εύκολα διαδίδεται μία ρωγμή μέσα στο υλικό.^{18, 19} Η συγκεκριμένη μηχανική ιδιότητα μπορεί να υπολογιστεί είτε με τη μέθοδο κάμψης τριών/τεσσάρων σημείων (όπως αναφέρεται στο ISO 6872)²⁰ είτε με τη μέθοδο της σκληρομέτρησης.¹⁸⁻²² Στην περίπτωση των οδοντιατρικών κεραμικών υλικών, πολλές ερευνητικές ομάδες επιλέγουν τον υπολογισμό της συγκεκριμένης μηχανικής ιδιότητας με τη μέθοδο της σκληρομέτρησης για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με τις αντίστοιχες τιμές των σκληρών οδοντικών ιστών (τα οποία δεν μπορούν να υποβληθούν σε δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων, λόγω των διαστάσεων/σχήματος τους).

Οι προαναφερθείσες *in vitro* δοκιμές ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων (δοκιμή σε κάμψη και σκληρομέτρηση) πραγματοποιούνται σε γεωμετρικά δοκίμια και μειονεκτούν στο γεγονός ότι απέχουν από τις πραγματικές κλινικές συνθήκες αφού δεν λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση του πραγματικού σχήματος της προσθετικής κατασκευής και τις συνθήκες της στοματικής κοιλότητας όπου (α) τα εφαρμοζόμενα μασητικά φορτία είναι διαρκώς μεταβαλλόμενα τόσο σε ένταση όσο και κατεύθυνση, (β) οι περιβαλλοντικές συνθήκες εμπεριέχουν την παρουσία υγρασίας και τη συνεχή μεταβολή θερμοκρασίας και pH.³² Όμως, αν και τιμές των διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών μας οδηγούν σε συμπεράσματα περιορισμένης μόνον αξίας, μας επιτρέπουν τη αρχική συγκριτική αξιολόγηση των κατασκευών και δίνουν ένα μέτρο για την αναμενόμενη αντοχή τους στις δυνάμεις της μάσησης.^{16, 31,33-35} Η αντοχή στην κόπωση, με τη σειρά της, που χρησιμοποιούν αρκετές ερευνητικές ομάδες για να αξιολογήσουν την αξιοπιστία του υλικού στο δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον στοματικής κοιλότητας, πλεονεκτεί έναντι των προαναφερθέντων *in vitro* δοκιμών ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων, στο γεγονός ότι τουλάχιστον ως προς τον τρόπο φόρτισης προσομοιάζει περισσότερο τις συνθήκες της στοματικής κοιλότητας (κυκλική μηχανική φόρτιση και παρουσία υγρασίας).³⁶⁻⁴³

Τα τελευταία χρόνια, η έννοια της διεπιστημονικότητας έχει βοηθήσει στη μελέτη της καταλληλότητας των υλικών για συγκεκριμένες κλινικές εφαρμογές, με τη

χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όπου λαμβάνονται υπόψη, ταυτόχρονα τόσο οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών προς μελέτη όσο και οι πραγματικές συνθήκες του περιβάλλοντος προς εμφύτευση (για παράδειγμα στοματική κοιλότητα). Περισσότερες λεπτομέρειες της συγκεκριμένης μεθόδου θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.⁴⁷⁻⁴⁹

2.2. Αντοχή των ακίνητων προσθέσεων (μη γεωμετρικά δοκίμια)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες μελετήθηκαν με τη χρήση γεωμετρικών δοκιμίων. Οι οδοντικές προσθέσεις, όπως οι γέφυρες, οι ολικές και μερικές οδοντοστοιχίες και τα εμφυτεύματα, είναι σώματα ακανόνιστου σχήματος που υφίστανται φορτία όταν χρησιμοποιούνται στο στόμα ως αποτέλεσμα της δράσης των μασητικών δυνάμεων που παράγονται.⁴⁹⁻⁵⁰ Τα σώματα αυτά παραμορφώνονται ως αποτέλεσμα της φόρτισης, η οποία προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων στο εσωτερικό τους, στην επιφάνειά τους, στο εσωτερικό των δοντιών του φορέα και στο οστό με το οποίο έρχονται σε επαφή.⁴⁰⁻⁴⁵ Επειδή οι οδοντιατρικές προσθέσεις είναι ακανόνιστα σώματα -δηλαδή σώματα χωρίς συμμετρία ή ομοιόμορφο πάχος σε όλη τους την έκταση- είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών τεχνικών και εξοπλισμού για την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρονται υπό πίεση. Οι τεχνικές αυτές αποτελούν την ειδικότητα της μηχανολογίας που είναι γνωστή ως «Πειραματική Ανάλυση Τάσεων» (Experimental Stress Analysis).⁵¹

Η μηχανική αντοχή των γεφυρών και των στεφανών καθορίζεται από την ικανότητά τους να αντιστέκονται στην παραμόρφωση και τη θραύση υπό φορτίο. Παράγοντες όπως το πάχος, το σχήμα και οι ιδιότητες του υλικού της αποκατάστασης παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της μηχανικής της αντοχής. Εκτός από την αντοχή, άλλες μηχανικές ιδιότητες όπως η σκληρότητα, η ελαστικότητα, η ανθεκτικότητα και η αντοχή στην κόπωση αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες.³²⁻³⁷ Η σκληρότητα αναφέρεται στην ικανότητα της αποκατάστασης να αντιστέκεται στην διείσδυση κάποιου σκληρού αντικειμένου (συνήθως διαμάντι), ενώ η ελαστικότητα αναφέρεται στην ικανότητά της να επανέρχεται στο αρχικό της σχήμα μετά από παραμόρφωση. Η ανθεκτικότητα μετρά την ικανότητα του υλικού να

απορροφά ενέργεια πριν από τη θραύση και η αντοχή σε κόπωση καθορίζει την ικανότητά του να αντέχει σε κυκλική φόρτιση από επαναλαμβανόμενα φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τελικά, οι μηχανικές ιδιότητες των οδοντικών αποκαταστάσεων είναι κρίσιμες για να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη επιτυχία τους και να αποτραπεί η αστοχία υπό κανονική φθορά.⁵¹

2.2.1. Αντοχή στη θραύση γεφυρών και στεφανών

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή σε θραύση μιας οδοντικής αποκατάστασης, όπως οι στεφάνες και οι γέφυρες. Μερικοί από τους κύριους παράγοντες περιλαμβάνουν τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση, το σχεδιασμό της αποκατάστασης, το πάχος της αποκατάστασης και το μέγεθος των δυνάμεων σύγκλισης που ασκούνται στην αποκατάσταση. Υλικά όπως η ζirkονία και το κεραμικό διπυριτικού λιθίου είναι γνωστό ότι έχουν υψηλότερη αντοχή σε θραύση από την παραδοσιακή πορσελάνη ή τα υλικά σύνθετης ρητίνης λόγω της υψηλότερης αντοχής τους σε κάμψη και της ανθεκτικότητάς τους.^{38,39} Ο σχεδιασμός της αποκατάστασης παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην αντοχή της σε θραύση. Οι στεφάνες και οι γέφυρες με πιο ανατομικό σχεδιασμό, ειδικά προς την περιοχή του αυχενικού ορίου, τείνουν να κατανέμουν την πίεση πιο ομοιόμορφα, μειώνοντας την πιθανότητα θραύσης.⁴⁰⁻⁴³ Επιπλέον το εύρος της αποκατάστασης καθώς και η θέση της στο οδοντικό τόξο επηρεάζουν την αντοχή της στη θραύση.^{40,41} Παράλληλα, το πάχος της αποκατάστασης, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται, επηρεάζει επίσης την αντοχή σε θραύση.^{38,42} Τέλος, το μέγεθος των δυνάμεων που ασκούνται στην αποκατάσταση παίζει κρίσιμο ρόλο στην αντοχή της σε θραύση. Το πάχος και το είδος της παρασκευής του δοντιού στηρίγματος καθώς και ο χώρος κονίας και η επεξεργασία από τον οδοντικό τεχνολόγο της προσθετικής εργασίας είναι παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος των δυνάμεων που συσσωρεύονται και ασκούνται στην αποκατάσταση.^{41,43-46}

2.2.2 Αντοχή στη κόπωση στεφανών και γεφυρών

Η αντοχή σε κόπωση μιας οδοντικής αποκατάστασης, όπως μια στεφάνη ή μια γέφυρα, μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες. Το υλικό που

χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση παίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της αντοχής της σε κόπωση. Για παράδειγμα, οι στεφάνες με μεταλλικό σκελετό μπορεί να έχουν καλύτερη αντοχή στην κόπωση σε σύγκριση με τις αποκαταστάσεις με κεραμικό σκελετό. Αυτό συμβαίνει γιατί πριν τη θραύση προηγείται η διάδοση των εσωτερικών ρωγμών, η οποία επιταχύνεται παρουσία νερού. Η διαδιδόμενη ρωγμή αποδυναμώνει το κεραμικό, προκαλώντας έτσι αστοχία κατά τη μασητική φόρτιση ενώ κανονικά δεν αναμένεται κάτι τέτοιο. Η υποβοηθούμενη από το νερό διάδοση της ρωγμής ενισχύεται από τη φθορά κόπωσης που προκαλεί η μάσηση.⁴⁷ Επιπλέον, ο σχεδιασμός της αποκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων του σχήματος, του είδους της παρασκευής και του πάχους της, μπορεί να επηρεάσει την αντοχή της σε κόπωση. Σε μια σωστά σχεδιασμένη αποκατάσταση οι δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα.^{48,49} Επιπρόσθετα, από τις δυνάμεις που ασκούνται από το μασητικό κύκλο είναι και οι δυνάμεις που φόρτισαν την πρόσθεση κατά την επεξεργασία της. Η σωστή επεξεργασία (αμμοβολή, τροχισμός) και ο αρμονικός συνδυασμός θερμικού συντελεστή του κεραμικού επικάλυψης με αυτόν του κεραμικού σκελετού παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συσσώρευση τάσεων και επομένως στην επιτάχυνση της καταπόνησης της πρόσθεσης.⁴⁶⁻⁴⁸ Τέλος, στο στοματικό περιβάλλον μπορεί επίσης να έχει αντίκτυπο στην αντοχή σε κόπωση των οδοντικών προσθέσεων, καθώς οι μεταβολές της θερμοκρασίας με την κατανάλωση ζεστών και κρύων τροφίμων σε συνδυασμό με την αναπνοή μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες του υλικού και έτσι να επιταχύνουν τη διαδικασία της κόπωσης της προσθετικής αποκατάστασης.⁴⁸

2.3. Η πειραματική ανάλυση των τάσεων και η μηχανική των θραύσεων

Είναι αυτονόητο ότι για την πλήρη εκτίμηση της αξιοπιστίας και της μακροβιότητας των οδοντοπροσθετικών εργασιών είναι απαραίτητη η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, σε συνδυασμό με την μηχανική συμπεριφορά των προσθέσεων και την ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται στις προσθετικές εργασίες κατά την φόρτισή τους στην στοματική κοιλότητα. Κατά την μελέτη της αντοχής των υλικών και της αντοχής μορφής του υλικού γίνονται καταστροφικές δοκιμασίες (είτε γεωμετρικών, είτε μη γεωμετρικών δοκιμίων) με φόρτισή τους μέχρι τελικής θραύσης. Κατά την ανάλυση των τάσεων στις προσθετικές εργασίες,

χρησιμοποιούνται μη γεωμετρικά δοκίμια ή οι ίδιες οι προσθετικές εργασίες οι οποίες υποβάλλονται σε μη καταστροφική φόρτιση, δηλαδή φόρτιση μέχρι του σημείου να προκληθεί παραμόρφωση και ανάπτυξη τάσεων χωρίς τελική θραύση.⁵⁰

⁵¹ Προκειμένου να διεξαχθεί μια έρευνα που θα μελετά την μηχανική συμπεριφορά μιας οδοντικής αποκατάστασης όπως μια γέφυρα ή μια οδοντοστοιχία, είναι αναγκαίο να κατασκευαστεί ένας αριθμός πανομοιότυπων προσθετικών εργασιών (δοκιμίων) με την ίδια ακριβώς μέθοδο. Η κατασκευή αυτών των μη γεωμετρικών δοκιμίων αφορά τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των οδοντοπροσθετικών εργασιών. Δύο μέθοδοι υπάρχουν για την κατασκευή μη γεωμετρικών δοκιμίων και ειδικότερα:

- Χρησιμοποιείται μέθοδος κατασκευής που έχει χρησιμοποιηθεί ξανά στο παρελθόν από άλλον ερευνητή και η έρευνα έχει δημοσιευτεί σε έγκριτο επιστημονικό περιοδικό.
- Δεν χρησιμοποιείται μέθοδος κατασκευής γνωστή από προηγούμενο ερευνητή και επομένως θα πρέπει να καταγραφεί και να περιγραφεί με κάθε λεπτομέρεια η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων ώστε να είναι διαθέσιμα για μελλοντική έρευνα από άλλο ερευνητή.⁵⁰

2.3.1. Πειραματική ανάλυση τάσεων (Experimental stress analysis)

Οι οδοντικές αποκαταστάσεις παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποκατάσταση της μορφής, της λειτουργίας και της αισθητικής των κατεστραμμένων ή ελλειπόντων δοντιών. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη επιτυχία και ανθεκτικότητα αυτών των αποκαταστάσεων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των καταπονήσεων που αντιμετωπίζουν στο στοματικό περιβάλλον. Για να διασφαλίσουν την αξιοπιστία και την απόδοση των οδοντικών αποκαταστάσεων, οι ερευνητές έχουν στραφεί σε πειραματικές τεχνικές ανάλυσης τάσεων. Η πειραματική ανάλυση τάσεων περιλαμβάνει την εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων και ειδικών διατάξεων για τη μέτρηση και την ανάλυση της κατανομής των τάσεων μέσα σε ένα υλικό ή μια κατασκευή. Στο πλαίσιο των οδοντικών αποκαταστάσεων, παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη μηχανική συμπεριφορά αυτών των αποκαταστάσεων

υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, βοηθώντας στον εντοπισμό πιθανών αδύναμων σημείων και στη βελτίωση του σχεδιασμού και της μακροζωίας τους. Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της πειραματικής ανάλυσης τάσεων είναι η αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας και της αντοχής τους στις μασητικές δυνάμεις κατά τη μάσηση. Υποβάλλοντας τις οδοντικές αποκαταστάσεις σε συνθήκες προσομοίωσης φόρτισης και μετρώντας τα μοτίβα καταπόνησης που προκύπτουν, οι ερευνητές μπορούν να αποκτήσουν μια ολοκληρωμένη κατανόηση του πώς αυτές οι αποκαταστάσεις ανταποκρίνονται σε τυπικές λειτουργικές καταπονήσεις.

Οι μέγιστες δυνάμεις στη φυσική οδοντοστοιχία κυμαίνονται από 200 έως 2440 N. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ενήλικες έδειξαν ότι η δύναμη δήξης μειώνεται από την περιοχή των γομφίων προς τους κεντρικούς τομείς. Σύμφωνα με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε άτομα με φυσιολογική και τροποποιημένη σύγκλειση, αποδείχτηκε ότι όταν η σύγκλειση ανυψωνόταν κατά 0,5 mm, οι δυνάμεις ήταν υψηλότερες, πλησιάζοντας τις διπλάσιες τιμές από αυτές που λαμβάνονταν με κανονική σύγκλειση. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η δύναμη στα δόντια καθορίζεται από τη μυϊκή προσπάθεια και η προσπάθεια αυτή ελέγχεται από το νευρικό σύστημα. Έτσι, συνάγεται το συμπέρασμα ότι λειτουργεί κάποιος ρυθμιστικός συγκλεισιακός μηχανισμός, ο οποίος ενεργοποιείται και επηρεάζει το μέγεθος των δυνάμεων σε περίπτωση κακής σύγκλεισης. Πρώτος και δεύτερος γομφίος - 390 έως 800 N , με το μέσο όρο να είναι 565 N, προγόμφιοι - 288 N, κυνόδοντες - 208 N, κεντρικοί τομείς 155 N.⁵⁰

Όταν σε ένα σώμα ασκείται μια δύναμη που τείνει να προκαλέσει παραμόρφωση, αναπτύσσεται μια αντίσταση στην εφαρμογή αυτής της εξωτερικής δύναμης. Η τάση είναι η εσωτερική αντίδραση στην εξωτερική δύναμη. Τάση = δύναμη / επιφάνεια. Η επιφάνεια στην οποία δρα η δύναμη είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ιδίως στις οδοντικές αποκαταστάσεις στις οποίες οι περιοχές που εφαρμόζεται η δύναμη είναι συχνά εξαιρετικά μικρές. Δεδομένου ότι η τάση σε σταθερή δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας, όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση και αντίστροφα. Ανάλογα με τη φύση της δύναμης, όλες οι τάσεις μπορούν να χωριστούν σε 3 βασικούς τύπους που αναγνωρίζονται ως:

- Εφελκυσμός: Προκαλείται από ένα φορτίο που τείνει να τεντώσει ή να επιμηκύνει ένα σώμα.
- Θλίψη: Προκαλείται από ένα φορτίο που τείνει να συμπιέσει το σώμα.
- Διάτμηση : Ένα φορτίο που τείνει να προκαλέσει μια στρεπτική κίνηση ή μια ολίσθηση ενός τμήματος του σώματος πάνω σε ένα άλλο.

Κάθε φορά που ασκείται δύναμη σε ένα σώμα, δημιουργούνται σύνθετες ή πολλαπλές τάσεις. Μπορεί να υπάρχει συνδυασμός εφελκυστικών, διατμητικών ή θλιπτικών τάσεων ακόμα και στρέψης (στρεπτικές τάσεις). Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού που χρησιμοποιείται σε μια οδοντική αποκατάσταση πρέπει να είναι ικανές να αντέχουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις επαναλαμβανόμενες δυνάμεις της μάσησης. Είναι απαραίτητο οι οδοντικές αποκαταστάσεις να σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην οδηγούνται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που υπερβαίνουν τις ιδιότητες αντοχής του υλικού υπό κλινικές συνθήκες.⁵⁰

Οι οδοντικές προσθετικές εργασίες είναι σώματα με ακανόνιστα σχήματα τα οποία κατά τη λειτουργία του στοματογναθικού συστήματος δέχονται δυνάμεις και επομένως παραμορφώνονται και αναπτύσσονται τάσεις τόσο στο εσωτερικό τους όσο και στα δόντια στα οποία εδράζονται και στο οστό της γνάθου. Εξαιτίας, λοιπόν, αυτής τους της ανομοιομορφίας η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση με δυνάμεις γίνεται με ειδικές μεθόδους και όργανα μέτρησης. Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής:

1. Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (Strain Gauges)

Αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την επιφανειακή τάση και παραμόρφωση των σωμάτων από ψαθυρά υλικά όπως η ακρυλική ρητίνη των ολικών οδοντοστοιχιών, που είναι πολύ εύκολο να έχουν επιφανειακές ατέλειες οι οποίες σε συνδυασμό με τις επιφανειακές τάσεις οδηγούν στην κόπωση και επομένως στη θραύση των προσθέσεων. [\[Εικόνα 12\]](#)



Εικόνα 12: Ηλεκτρομηκυνσιόμετρο

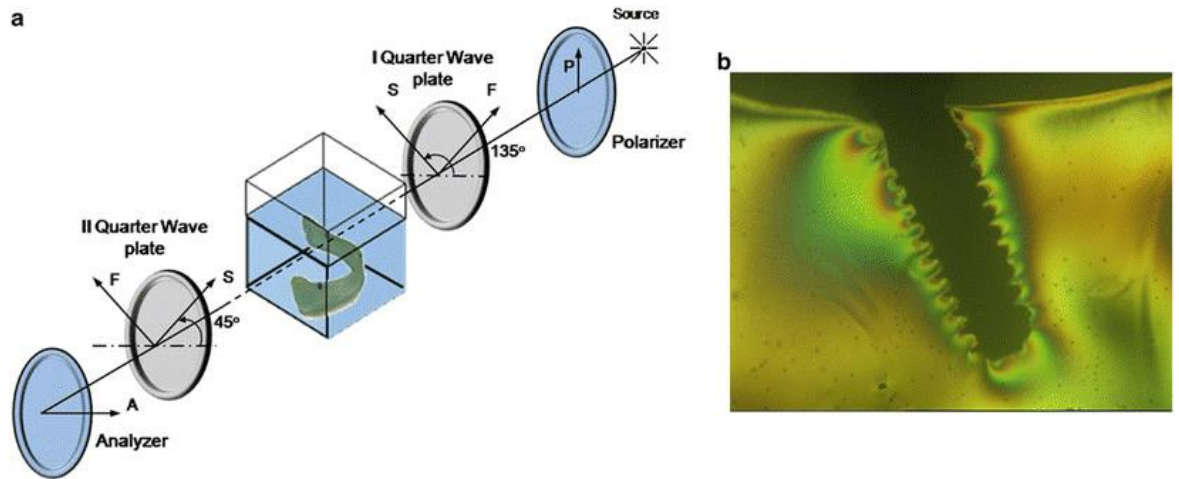
2. Ψαθυρές Επικαλύψεις (Brittle Coatings)

Στην υπό εξέταση προσθετική εργασία εφαρμόζεται ένα ειδικό ψαθυρό βερνίκι. Όταν η προσθετική εργασία φορτιστεί οι επιφανειακές παραμορφώσεις μεταφέρονται στο ψαθυρό υλικό επικάλυψης και από τις ρηγματώσεις που δημιουργούνται εξάγονται συμπεράσματα για το αν οι τάσεις ήταν εφελκυστικές ή θλιπτικές καθώς και για την διεύθυνση των τάσεων.⁵¹

- Φωτοελαστικότητα (Photoelasticity)

Η φωτοελαστικότητα περιγράφει τις αλλαγές στις οπτικές ιδιότητες ενός διαφανούς μη κρυσταλλικού υλικού υπό μηχανική παραμόρφωση. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων στο υλικό. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των σημείων καταπόνησης και συγκέντρωσης τάσεων. Χρησιμοποιώντας ένα διαφανές σώμα ακανόνιστου σχήματος που τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πολωτές εμφανίζονται χρώματα. Η θεωρία της φωτοελαστικότητας υποστηρίζει πως η κατανομή αυτών των χρωμάτων δίνει πληροφορίες για την ύπαρξη και την κατανομή παραμορφωτικών τάσεων στο προς εξέταση αντικείμενο. Οι τάσεις αυτές μπορεί να είναι αποτέλεσμα εξωτερικών δυνάμεων ή τάσεις που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής του εξεταζόμενου σώματος. Η μέθοδος της φωτοελαστικότητας έχει χρησιμοποιηθεί

κατά κύριο λόγο για τη μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων στην περιοχή του οστού που έχουν τοποθετηθεί εμφυτεύματα αλλά και για την μελέτη των επιφανειακών και εσωτερικών τάσεων στις προσθετικές εργασίες.⁵⁰⁻⁵² [Εικόνα 13 a-b]

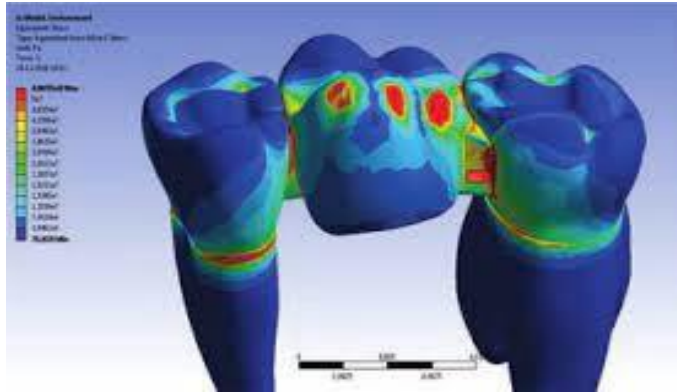


Εικόνα 13: a. Διαδικασία δοκιμής φωτοελαστικότητας b. Εφαρμογή της μεθόδου της φωτοελαστικότητας σε ένα εμφύτευμα

- Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis-F.E.A.)

Είναι μια σύγχρονη μέθοδος που απαιτεί τη χρήση Η/Υ και ειδικών λογισμικών και εφαρμόζεται τόσο σε δισδιάστατα μοντέλα όσο και σε τρισδιάστατα. Αρχικά με τη χρήση τρισδιάστατου σκάνερ εισάγεται η γεωμετρία του προς εξέταση μοντέλου (π.χ. οστό) στο ειδικό λογισμικό. Έπειτα με τη χρήση λογισμικών CAD σχεδιάζεται η προσθετική εργασία πάνω στο προς εξέταση μοντέλο (π.χ. οστό ή δόντι). Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της υπό μελέτη κατασκευής τοποθετείται πάνω της ένα πλέγμα μικρών τριγώνων. Το κάθε τρίγωνο είναι ένα στοιχείο (element) και ο αριθμός των τριγώνων είναι γνωστός, δηλαδή πεπερασμένος (finite). Έπειτα, με τη χρήση ειδικού λογισμικού η υπό μελέτη κατασκευή φορτίζεται και από το λογισμικό υπολογίζεται η παραμόρφωση και η τάση σε κάθε σημείο της. Ωστόσο, προκειμένου να γίνει όλη αυτή η διαδικασία στο λογισμικό δίνονται πληροφορίες όπως το μέτρο ελαστικότητας του κάθε στοιχείου της κατασκευής, ο τρόπος στήριξης της, το μέγεθος, το σημείο εφαρμογής και η διεύθυνση των δυνάμεων φόρτισης. Το ειδικό λογισμικό αυτής της μεθόδου διαθέτει χρωματικό χάρτη για την υπόδειξη του μεγέθους των τάσεων σε όλο το εύρος του μοντέλου όπου με μπλε χρώμα

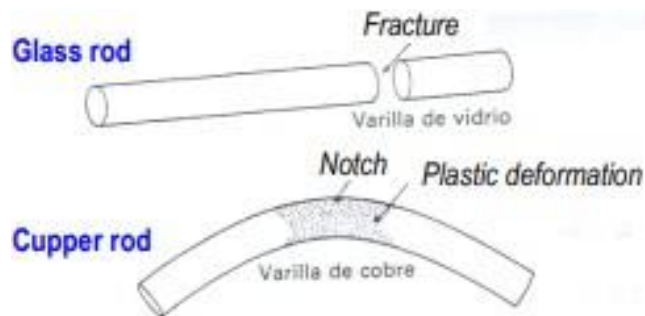
υποδεικνύονται τάσεις χαμηλού μεγέθους και μέχρι το κόκκινο υποδεικνύονται υψηλού μεγέθους τάσεις.⁵⁰⁻⁵³ [Εικόνα 14]



Εικόνα 14: Εφαρμογή της μεθόδου της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων σε μια γέφυρα τριών δοντιών

2.3.2. Μηχανική των Θραύσεων (Fracture Mechanics)

Θραύση είναι ο διαχωρισμός ενός αντικειμένου ή υλικού σε δύο ή περισσότερα κομμάτια υπό την επίδραση των τάσεων που αναπτύσσονται και προκαλούν την δημιουργία και διάδοση των ρωγμών. Η θραύση ενός στερεού συνήθως συμβαίνει λόγω της ανάπτυξης ορισμένων ασυνεχειών μέσα στο στερεό. Εάν μια ασυνέχεια αναπτύσσεται κάθετα στην επιφάνεια, ονομάζεται κανονική ρωγμή εφελκυσμού ή απλά ρωγμή. Εάν μια μετατόπιση αναπτύσσεται εφαπτομενικά, ονομάζεται διατμητική ρωγμή. Οι ψαθυρές θραύσεις συμβαίνουν χωρίς εμφανή παραμόρφωση πριν από το κάταγμα. Οι όλκιμες θραύσεις συμβαίνουν μετά από ορατή παραμόρφωση. Η αντοχή στην θραύση είναι το μέγεθος της δύναμης που απαιτείται έως ότου το αντικείμενο να σπάσει. Η λεπτομερής κατανόηση του τρόπου με τον οποίο δημιουργείται και διαδίδεται μια ρωγμή σε υλικά είναι το αντικείμενο της μηχανικής της θραύσης.⁵⁴⁻⁵⁵



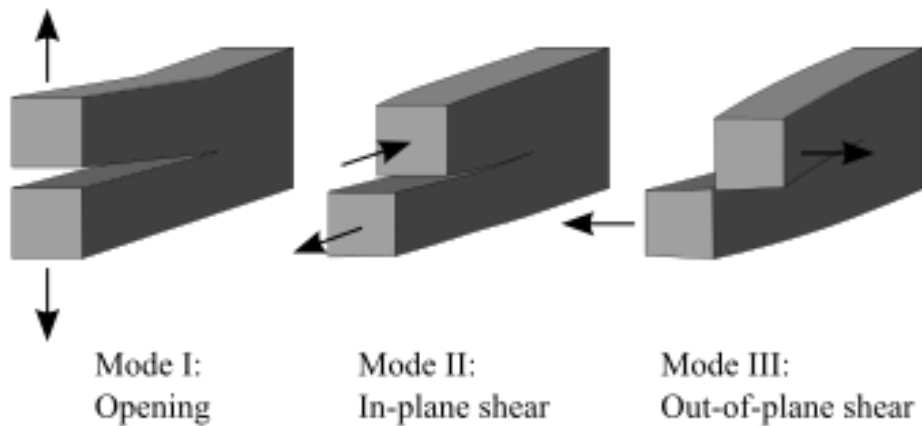
Εικόνα 15: Γυάλινη ράβδος= ψαθυρή θραύση (επάνω), Μεταλλική ράβδος= όλκιμη θραύση (κάτω).

Η μηχανική των θραύσεων είναι το πεδίο της μηχανικής που ασχολείται με τη μελέτη της διάδοσης ρωγμών σε υλικά. Χρησιμοποιεί μεθόδους αναλυτικής μηχανικής στερεών για τον υπολογισμό της κινητήριας δύναμης σε μια ρωγμή και αυτές της πειραματικής μηχανικής στερεών για να χαρακτηρίσει την αντοχή του υλικού στη θραύση.^{55, 56} Θεωρητικά, η τάση μπροστά από την κορυφή της ρωγμής γίνεται άπειρη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την κατάσταση γύρω από μια ρωγμή. Η μηχανική των θραύσεων χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των φορτίων σε μια ρωγμή, χρησιμοποιώντας συνήθως μια μόνο παράμετρο για να περιγράψει την πλήρη κατάσταση φόρτισης στο άκρο της ρωγμής. Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών παραμέτρων. Όταν η πλαστική ζώνη στο άκρο της ρωγμής είναι μικρή σε σχέση με το μήκος της ρωγμής, η κατάσταση τάσης στο άκρο της ρωγμής είναι αποτέλεσμα ελαστικών δυνάμεων μέσα στο υλικό και ονομάζεται γραμμική ελαστική μηχανική θραύσης (linear elastic fracture mechanics-LEFM). Αν και το φορτίο σε μια ρωγμή μπορεί να είναι αυθαίρετο, το 1957 ο G. Irwin βρήκε ότι οποιαδήποτε κατάσταση μπορούσε να μειωθεί σε έναν συνδυασμό τριών ανεξάρτητων μοντέλων έντασης της τάσης:

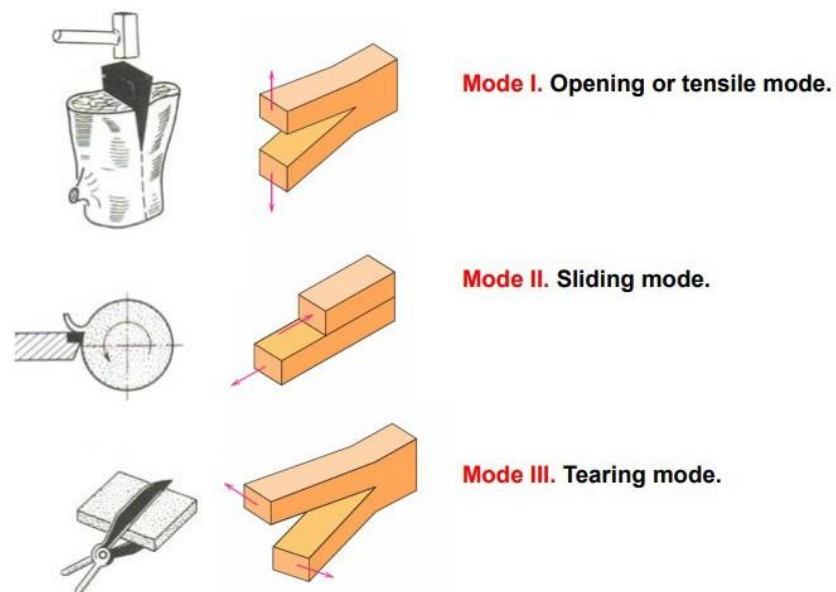
Μοντέλο I – Λειτουργία ανοίγματος (μια τάση εφελκυσμού κανονική στο επίπεδο της ρωγμής),

Μοντέλο II – Λειτουργία ολίσθησης (διατμητική τάση που δρα παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής και εντός του επιπέδου)

Μοντέλο III – Τρόπος σχίσσεως (διατμητική τάση που ενεργεί παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής και εκτός του επιπέδου).^{55,56} [Εικόνα 16]



Εικόνα 16: Τα τρία μοντέλα θραύσης. Mode I: Μοντέλο εφελκυστικής τάσης, Mode II: Μοντέλο διατμητικής τάσης εντός επιπέδου (in plane shear), Mode III: Μοντέλο διατμητικής τάσης εκτός επιπέδου (out of plane shear).⁵¹



Εικόνα 17: Τα τρία μοντέλα θραύσης.

Εξετάζοντας τα τρία μοντέλα θραύσης παρατηρείται ότι η διάδοση μίας ρωγμής μπορεί να επέλθει από εφελκυσμό και από διάτμηση. Παρατηρείται επίσης ότι η θλίψη είναι ανύπαρκτη και δεν συμμετέχει στον μηχανισμό διάδοσης μίας ρωγμής. Άρα μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι οι κατασκευές και μεταξύ

αυτών και οι προσθετικές εργασίες σπάνε από εφελκυσμό ή διάτμηση ή συνδυασμό των δύο. Η θραύση δεν μπορεί να επέλθει από θλίψη.⁵⁴⁻⁵⁶

Από όσα αναλυτικά αναφέρθηκαν προηγουμένως συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με τη χρήση γεωμετρικών δοκιμών μελετώνται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.
- Με τις μεθόδους της Πειραματικής Ανάλυσης των Τάσεων μελετώνται οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια και το εσωτερικό των οδοντοπροσθετικών εργασιών (μέγεθος, τύπος δηλαδή εφελκυσμός ή θλίψη και διεύθυνση) που είναι μη γεωμετρικά δοκίμια. Επιπλέον ανιχνεύονται σημεία της πρόσθεσης όπου μπορεί να υπάρχει συγκέντρωση τάσεων.
- Με το συνδυασμό των δύο προηγούμενων ανιχνεύονται περιοχές της προσθετικής εργασίας που μπορεί να αναπτύσσονται εφελκυστικές ή και διατμητικές τάσεις που είναι επιζήμιες για την προσθετική αποκατάσταση.

Από όλη αυτήν την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των οδοντοπροσθετικών εργασιών ο οδοντικός τεχνολόγος πραγματοποιεί αλλαγές στην σχεδίαση των προσθέσεων ώστε τα επικίνδυνα σημεία να αποφορτιστούν και έτσι να βελτιωθεί η πρόγνωση (διάρκεια ζωής) της προσθετικής εργασίας.⁵¹

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στη μηχανή αναζήτησης Google Scholar έγινε βιβλιογραφική έρευνα σε εύρος 22 ετών από το 2000 έως το 2022 και οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες: design principles, ceramic frameworks, fracture resistance, dentistry. Το αποτέλεσμα ήταν 17.300 άρθρα. Λόγω του ότι ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί έλεγχος της καταλληλότητας των άρθρων έγινε περαιτέρω αναζήτηση σε άλλες πλατφόρμες. Στην πλατφόρμα αναζήτησης Science Direct έγινε βιβλιογραφική έρευνα σε εύρος 22 ετών από το 2000 έως το 2022 και οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες: design principles, ceramic frameworks, fracture resistance. Το αποτέλεσμα ήταν 253 άρθρα. Ωστόσο χρησιμοποιήθηκε ως επιπλέον φίλτρο η αναζήτηση πιο συγκεκριμένα στον τομέα της Ιατρικής και της Οδοντιατρικής και το αποτέλεσμα ήταν 118 άρθρα. Στην πλατφόρμα αναζήτησης PubMed έγινε βιβλιογραφική έρευνα σε εύρος 22 ετών από το 2000 έως το 2022 και οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες: design, ceramic frameworks, fracture resistance. Το αποτέλεσμα ήταν 63 άρθρα. Εν τέλη για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν 30 άρθρα της πλέον πρόσφατης διεθνούς βιβλιογραφίας, τα οποία άπτονται απόλυτα του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Από την πλατφόρμα αναζήτησης Science Direct επιλέχθηκαν 19 άρθρα και από Google Scholar 10 άρθρα, ενώ από την πλατφόρμα αναζήτησης PubMed 1 άρθρο, δεδομένου ότι πολλά άρθρα ήταν κοινά στις τρεις πλατφόρμες αναζήτησης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα 30 άρθρα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία κατά αύξουσα χρονολογική σειρά.

Α/ Α	ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ	ΤΙΤΛΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
1	Oh W, Anusavice KJ Χρονολογία δημοσίευσης: 2002	Effect of connector design on the fracture resistance of all-ceramic fixed partial dentures	Κατασκευάστηκαν 40 κέρνα πρότυπα γέφυρας τριών μονάδων με τις ίδιες διαστάσεις και χωρίστηκαν σε 4 ομάδες των 10 δειγμάτων ανά ομάδα. Κάθε υπόδειγμα τροποποιήθηκε στη μασητική και την ουλική περιοχή των συνδέσμων. Χρησιμοποιήθηκε ένα κεραμικό πυρήνα θερμοσυμπίεσης, τα οποία κατά συνέπεια ακινητοποιήθηκαν σε εποξειδικές μήτρες με σύνθετο υλικό διπλού πολυμερισμού (Variolink II) και φορτίστηκαν μέχρι θραύσης σε μηχανή καθολικών δοκιμών.	Τα μέσα φορτία μέχρι την αστοχία για τις ομάδες I (μασητική και ουλική επιφάνεια συνδέσμου 0,90 mm) και III (μασητική επιφάνεια συνδέσμου 0,25 mm και ουλική επιφάνεια συνδέσμου 0,90 mm) ήταν σημαντικά υψηλότερα από εκείνα για τις ομάδες II (μασητική επιφάνεια συνδέσμου 0,90 mm και ουλική επιφάνεια συνδέσμου 0,25 mm) και IV (μασητική και ουλική επιφάνεια συνδέσμου 0,25 mm)	Καθώς η ακτίνα στην ουλοδοντική επιφάνεια αυξήθηκε από 0,25 σε 0,90 mm, το μέσο φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 140%. Η ακτίνα καμπυλότητας στη μασητική επιφάνεια είχε μικρή μόνο επίδραση στην ευαισθησία θραύσης των γεφυρών 3 μονάδων.
2	De Jager N, Pallav P, Feilzer AJ Χρονολογία δημοσίευσης: 2004	The influence of design parameters on the FEA-determined stress distribution in CAD-CAM produced all-ceramic dental crowns	Τα μοντέλα CAD των πολυστρωματικών ολοκεραμικών στεφανών για το οπίσθιο δόντι 46 τριών ασθενών που κατασκευάστηκαν με την τεχνολογία CAD-CAM μεταφράστηκαν σε τρισδιάστατο πρόγραμμα FEA.	Οι εφελκυστικές τάσεις στην στεφάνη με την παρασκευή με απόληξη χωρίς βάθρο οξύαιχμη (σαν μαχαίρι) μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των κεραμικών υλικών, ενώ ένα ανομοιομορφο στρώμα κωνίας μπορεί να οδηγήσει σε τάσεις που υπερβαίνουν την αντοχή του δεσμού.	Για αποκαταστάσεις μακράς διάρκειας στην οπίσθια περιοχή είναι σκόπιμο να γίνεται παρασκευή με βάθρο, το στρώμα κωνίας όσο το δυνατόν πιο ομοιομορφο και η διαφορά θερμικής διαστολής για τα δύο κεραμικά όσο το δυνατόν μικρότερη

			Διερευνήθηκε η κατανομή των τάσεων που οφείλονται στις συνδυασμένες επιδράσεις των δυνάμεων δαγκώματος, των παραμενουσών τάσεων που προκαλούνται από τη διαφορά του συντελεστή θερμικής διαστολής των δύο κεραμικών στρωμάτων και την επίδραση της συρρίκνωσης της κονιάς.		
3	Komine F, Gerds T, Witkowski S, Strub JR Χρονολογία δημοσίευσης: 2005	Influence of framework configuration on the marginal adaptation of zirconium dioxide ceramic anterior four-unit frameworks	Σαράντα οκτώ τυποποιημένοι σκελετοί ζirkονίας γεφυρών τεσσάρων μονάδων κατασκευάστηκαν με τη χρήση τριών διαφορετικών συστημάτων CAD/CAM: Cercon Smart Ceramics (ομάδα CE), Vita YZ/Cerec In-Lab (ομάδα YZ/CL) και Xawex (ομάδα ΧΑ). Για κάθε ομάδα κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις σκελετού (ευθεία και καμπύλη). Η οριακή εφαρμογή των σκελετών μετρήθηκε σε 60 διαφορετικά σημεία σε ολόκληρη την περίμετρο με τη χρήση	Εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ του ευθύγραμμου (τα δόντια κατασκευάστηκαν χωρίς να σχηματίζουν τόξο αλλά σε ευθεία το ένα δίπλα στο άλλο) και του καμπύλου σχεδιασμού (τα δόντια κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο σχηματίζοντας καμπύλη) για τις ομάδες CE (p=0,001) και ΧΑ (p=0,003), αλλά όχι για την ομάδα YZ/CL (p=0,225). Και για τους δύο σχεδιασμούς, οι οριακές αποκλίσεις ήταν σημαντικά μικρότερες στην ομάδα YZ/CL από ό,τι στην ομάδα ΧΑ. Για τον κυρτό σχεδιασμό, οι οριακές αποκλίσεις	Η διαμόρφωση του σκελετού επηρεάζει την οριακή εφαρμογή των σκελετών πρόσθιων γεφυρών τεσσάρων τεμαχίων που κατασκευάζονται από ζirkονία ανεξάρτητα από το σύστημα CAD/CAM.

			στερεομικροσκοπία υ.	στην ομάδα ΥΖ/CL ήταν επίσης σημαντικά μικρότερες από εκείνες στην ομάδα CE.	
4	Larsson C, Holm L, Lövgren N, Kokubo Y, Vult Von Steyern P. Χρονολογία δημοσίευσης: 2007	Fracture strength of four-unit Y- TZP FPD cores designed with varying connector diameter. An in-vitro study	Κατασκευάστηκαν συνολικά 40 πυρήνες γεφυρών τεσσάρων μονάδων που υποστηρίζονταν από ακραία κολοβώματα και είχαν δύο ενδιάμεσα από Procera Zirconia. Κατασκευάστηκαν πέντε ομάδες πυρήνων με διαστάσεις συνδέσμων 2x0, 2x5, 3x0, 3x5 και 4x0 mm. Όλοι οι πυρήνες υποβλήθηκαν σε πρόγραμμα όπτησης σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή για την πορσελάνη επικάλυψης, σε κυκλική προφόρτιση, σε θερμικό κύκλο φόρτισης και, τέλος, σε φόρτιση μέχρι θραύσης.	Η αντοχή σε θραύση ήταν σημαντικά υψηλότερη για κάθε αύξηση της διαμέτρου του συνδέσμου, εκτός από τις διαμέτρους 2,0 mm και 2,5 mm, όπου όλες οι θραύσεις εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της προφόρτισης. Όλοι οι πυρήνες έσπασαν στην περιοχή του συνδέσμου.	Εντός των περιορισμών αυτής της in-vitro μελέτης, συνιστάται ελάχιστη διάμετρος 4,0 mm για ολοκεραμικούς σκελετούς με βάση την ζirkονία με μεγάλο εύρος ή για την αντικατάσταση γομφίων.
5	Taskonak B, Yan J, Mecholsky JJ, Sertgöz A, Koçak A. Χρονολογία δημοσίευσης: 2008	Fractographic analyses of zirconia-based fixed partial dentures	Ανακτήθηκαν και αναλύθηκαν πέντε κλινικά αποτυχημένες γέφυρες τεσσάρων μονάδων με βάση το Y-TZP. Οι επιφάνειες θραύσης εξετάστηκαν με	Τα πρωτογενή κατάγματα ξεκίνησαν από τις ουλικές επιφάνειες των συνδέσμων στις επιφάνειες των κεραμικών επικαλύψεων σε τέσσερα από τα πέντε δείγματα.	Ο σχεδιασμός και η διάσταση των συνδέσμων καθώς και το εύρος της αποκατάστασης μπορεί να είναι οι βασικοί παράγοντες πρόκλησης καταγμάτων σε σχετικά χαμηλά μασητικά

			τεχνικές φρακτογραφίας, χρησιμοποιώντας τόσο οπτικό όσο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Η ποσοτική θραυσματογραφία και οι αρχές της μηχανικής της θραύσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των τάσεων αστοχίας.	Παρατηρήθηκαν αποκολλήσεις μεταξύ κεραμικής επικάλυψης και πυρήνα ζirkονίας και μια δευτερεύουσα θραύση ξεκίνησε από τον πυρήνα ζirkονίας.	φορτία αλλά υψηλές τάσεις θραύσης.
6	Kohorst P, Marc Philipp Ditmer, Borchers L, Meike Stiesch-Scholz Χρονολογία δημοσίευσης: 2008	Influence of cyclic fatigue in water on the load-bearing capacity of dental bridges made of zirconia	Συνολικά 60 σκελετοί από ζirkονία με δόντια στηρίγματα τον πρώτο προγόμφιο της άνω γνάθου (24) και τον δεύτερο γομφίο της άνω γνάθου (27) και με ενδιάμεσα γεφυρώματα τον δεύτερο προγόμφιο (25) και τον πρώτο γομφίο (26) της άνω γνάθου κατασκευάστηκαν και χωρίστηκαν σε έξι ομοιογενείς ομάδες. Μετά την όπτηση με το κεραμικό επικάλυψης, υποβλήθηκαν σε θερμική και μηχανική κόπωση - με εξαίρεση τις ομάδες ελέγχου.	Η φέρουσα ικανότητα των δοκιμών μειώθηκε σημαντικά από την τεχνητή γήρανση. Σε σύγκριση με τα μη παλαιωμένα δοκίμια, η αντοχή σε θραύση μειώθηκε κατά περίπου 40%.	Ο σχεδιασμός των οδοντικών αποκαταστάσεων θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί για να επιτευχθεί μια ομαλότερη κατανομή των τάσεων και, παράλληλα, υψηλότερη φέρουσα ικανότητα
7	Plengsombut K, Brewer JD, Monaco EA, Davis EL	Effect of two connector designs on the fracture	Δοκιμάστηκαν τρία υλικά: (1) διτυριτικό λίθιο θερμικής συμπίεσης (IPS	Η στατιστική ανάλυση έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές (P <005) για το υλικό	Η αντοχή σε θραύση των υλικών κεραμικού πυρήνα επηρεάζεται από την τεχνική

	Χρονολογία δημοσίευσης: 2009	resistance of all-ceramic core materials for fixed dental prostheses	e.max Press (Press)), (2) διπυριτικό λίθιο φρεζαρισμένο (IPS e.max CAD (CAD)) και (3) φρεζαρισμένη σταθεροποιημένη με ύπτριο τετραγωνική ζirkονία (Y-TZP) (IPS e.max ZirCAD (ZirCAD)). Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε ράβδους 30 x 4 x 4 mm για να αντιπροσωπεύουν 3 μονάδες. Μελετήθηκαν δύο σχέδια συνδέσμων, στρογγυλός και αιχμηρός, με διατομή 3,00 ±0,05 mm για κάθε σύνδεσμο (n=5). Κάθε δοκίμιο φορτίστηκε μέχρι θραύσης σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών.	και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Υψηλότερα μέγιστα φορτία αστοχίας βρέθηκαν για το σχεδιασμό στρογγυλού συνδέσμου σε σύγκριση με το σχεδιασμό αιχμηρού συνδέσμου, για το ZirCAD και το CAD. Ωστόσο, η διαφορά αυτή δεν ήταν στατιστικά σημαντική για τις ομάδες Press. Η υποκειμενική αξιολόγηση των θραυσμένων δειγμάτων με SEM αποκάλυψε ότι η θραύση ξεκίνησε από την επιφάνεια των ούλων (εφελκυσμός) του συνδέσμου προς το ενδιάμεσο (κεντρικό σημείο φόρτισης).	κατασκευής και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο σχεδιασμός του συνδέσμου επηρέασε την αντοχή σε θραύση του φρεζαρισμένου κεραμικού, αλλά όχι του θερμοσυμπιεσμένου κεραμικού.
8	Ohlmann B, Marienburg K, Gabbert O, Hassel A, Gilde H, Rammelsberg P Χρονολογία δημοσίευσης: 2009	Fracture-Load Values of All-Ceramic Cantilevered FPDs with Different Framework Designs	Κατασκευάστηκαν 50 σκελετοί ζirkονίου γέφυρας τριών τεμαχίων με δύο στηρίγματα και πρόβολο έναν γομφίο. Χωρίστηκαν σε 5 ομάδες με διαφοροποιημένο σχεδιασμό ανά ομάδα. Έπειτα όλα τα δοκίμια φορτίστηκαν κυκλικά, θερμικά και μηχανικά.	Η ενίσχυση του σκελετού είτε με την κατασκευή αυχενικού σιριτιού είτε με την αύξηση του πάχους του σκελετού δεν βελτίωσε την αντοχή στη θραύση.	Δεν ενδείκνυται η χρήση προβόλου σε ολοκεραμικές αποκαταστάσεις για τη αντικατάσταση ενός γομφίου.
9	Quinn GD, Studart AR,	Fatigue of zirconia and	Μια απλή ποσοτική περιγραφή της	Το μέγεθος της συγκέντρωσης τάσεων	Συνοψίζοντας, το ζirkόνιο μπορεί να

	<p>Hebert C, VerHoef JR, Arola D Χρονολογία δημοσίευσης: 2010</p>	<p>dental bridge geometry: Design implications</p>	<p>γεωμετρίας του συνδέσμου σε έναν ολοκεραμικό σχεδιασμό γέφυρας 4 μονάδων χρησιμοποιείται με δημοσιευμένα διαγράμματα συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων για την εκτίμηση του βαθμού συγκέντρωσης τάσεων και της μέγιστης τάσης.</p>	<p>που εκτιμάται για κλινικά σχετικές γεωμετρίες συνδέσμων κυμαίνεται από 2 έως 3. Χρησιμοποιώντας προηγούμενες δημοσιευμένες συστάσεις για τον σχεδιασμό συνδέσμων, παρουσιάζονται προσαρμοσμένες εκτιμήσεις για την ελάχιστη διάμετρο συνδέσμου που απαιτείται για την επίτευξη 20 ετών κλινικής λειτουργίας.</p>	<p>χρησιμεύσει ως κατάλληλο υλικό για την κατασκευή ολοκεραμικών οπίσθιων γεφυρών πολλαπλών μονάδων, αλλά είναι κρίσιμο ο σχεδιασμός της γέφυρας να λαμβάνει υπόψη τη σημασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη μέγιστη τάση και τη πιθανότητα αστοχίας.</p>
10	<p>Thompson M, Field C, Swain M Χρονολογία δημοσίευσης: 2010</p>	<p>The all-ceramic, inlay supported fixed partial denture. Part 2. Fixed partial denture design: a finite element analysis</p>	<p>Με τη χρήση ενός ιδανικού σχεδιασμού παρασκευής ένθετων και μιας μορφής πρόσθεσης που κατανέμει καλύτερα τις εφελκυστικές τάσεις, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ένθετο ως στήριγμα για μια ολοκεραμική ακίνητη αποκατάσταση. Με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται άμεση σύγκριση της γέφυρας που υποστηρίζεται από ολοκεραμικό ένθετο έναντι της παραδοσιακής γέφυρας που υποστηρίζεται από</p>	<p>Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι μέγιστες τάσεις στη γέφυρα με ένθετο είναι περίπου 20% υψηλότερες από ό,τι στη γέφυρα που στηρίζεται σε πλήρη στεφάνη με τη μέγιστη τιμή να φτάνει περίπου στα 730 MPa, όταν υποβάλλεται σε θεωρητική μέγιστη δύναμη δαγκώματος στην περιοχή του γομφίου των 700 N, η οποία είναι παρόμοια με τις αντοχές εφελκυσμού των σημερινών κεραμικών με βάση τη ζirkονία.</p>	<p>Η FEM που παρουσιάστηκε παραπάνω καταδεικνύει ότι με τη χρήση μιας εξιδανικευμένης μορφής παρασκευής ενθέματος και ενός βελτιστοποιημένου σχεδιασμού γέφυρας με έμφαση στην στη διεύρυνση του ουλοδοντικού χείλους, οι δυνάμεις που προέρχονται από τη μάσηση μπορούν να κατανεμηθούν επαρκώς σε επίπεδα που βρίσκονται εντός της αντοχής σε θραύση των σημερινών κεραμικών</p>

			ολοκεραμική πλήρη στεφάνη.		
11	Jalalian E, Aletaha NS Χρονολογία δημοσίευσης: 2010	The effect of two marginal designs (chamfer and shoulder) on the fracture resistance of all ceramic restorations, Inceram: An in vitro study	Σε έναν εξαχθέντα πρώτο προγόμφιο της άνω γνάθου παρασκευάστηκε ένα όριο με απόληξη χωρίς βάθρο οξύαιχμη (σαν μαχαίρι chamfer 0,7 mm.) Ελήφθησαν δέκα αποτυπώματα με χρήση πολυβινυλοσιλοξάνης. Τα αποτυπώματα εκχύθηκαν με εποξειδική ρητίνη για την κατασκευή κολοβωμάτων. Το ίδιο δόντι ανασύρθηκε και το όριο μετατράπηκε σε βάθρο 1 mm. Ελήφθησαν δέκα αποτυπώματα και κατασκευάστηκαν άλλες δέκα μήτρες από εποξειδική ρητίνη. Τα αποτυπώματα κάθε μήτρας εποξειδικής ρητίνης λήφθηκαν με χρήση υλικού αποτύπωσης πολυβινυλοσιλοξάνης και εκχύθηκαν με γύψο. Πυρήνες αλουμίνας πάχους 0,5 mm κατασκευάστηκαν στις μήτρες με γύψο σε οδοντοτεχνικό εργαστήριο. Οι πυρήνες αλουμίνας στερεώθηκαν στη	Η μέση τιμή της αντοχής σε θραύση για τα δείγματα με απόληξη χωρίς βάθρο 0,7 mm ήταν 58,79N και 105,83N για τα δείγματα με 1mm.	Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης υποδεικνύει μια σχέση μεταξύ του οριακού σχεδιασμού των πυρήνων αλουμίνας και της αντοχής τους σε θραύση. Ένα όριο με απόληξη χωρίς βάθρο - chamfer θα μπορούσε να βελτιώσει τη εμβιομηχανική απόδοση των οπίσθιων αποκαταστάσεων αλουμίνας μονής στεφάνης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ισχυρή ένωση στο όριο.

			<p>συνέχεια στις μήτρες εποξειδικής ρητίνης και υποβλήθηκαν σε δοκιμή θραύσης με μηχανή καθολικών δοκιμών και τα δείγματα διερευνήθηκαν από την άποψη της προέλευσης της αστοχίας.</p>		
12	<p>KOKUBO Y, TSUMITA M, KANO T, FUKUSHIMA S. Χρονολογία δημοσίευσης: 2011</p>	<p>The influence of zirconia coping designs on the fracture load of all-ceramic molar crowns</p>	<p>Σχεδιάστηκαν τέσσερα είδη επικαλύψεων από ζirkονία για ένα πρώτο δεξί γομφίο της κάτω γνάθου με παρασκευή με βάθος πάχους 1,5 mm (α: συμβατικός σκελετός ζirkονίας με επίπεδη μασητική επιφάνεια: το πάχος κάθε σκελετού είναι ομοιόμορφο 0,6 mm και στην περιοχή του αυχενικού ορίου, ο σκελετός προσαρμόζεται απότομα ώστε να ταιριάζει στο όριο παρασκευής, β: συμβατικός σκελετός ζirkονίας με το πάχος κάθε σκελετού να είναι ομοιόμορφο 0,6 mm και υπάρχει κολάρο 0,6 mm από το όριο, γ: σκελετός από ζirkονία με κοίλη μασητική ανατομία: δύο κεκλιμένα επίπεδα</p>	<p>Στην παρούσα μελέτη, όλα τα κατάγματα προέκυψαν από το σημείο φόρτισης προς το παρειακό αυχενικό όριο και την εγγύς περιοχή και η αστοχία συνάφειας με την επικάλυψη της πορσελάνης παρατηρήθηκε, πράγμα που σημαίνει ότι οι τρόποι αστοχίας δεν ήταν διαφορετικής μορφής από τον σχεδιασμό του σκελετού. Δεν υπήρχαν κατάγματα στο σκελετό κατά τη διάρκεια της δοκιμής.</p>	<p>Ο σχεδιασμός του σκελετού επηρεάζει το φορτίο θραύσης της ολοκεραμικής στεφάνης ζirkονίας. 2. Η διαμόρφωση της ακρολοφίας για την εκτέλεση ομοιόμορφου πάχους της πορσελάνης εμφάνισε το υψηλότερο φορτίο θραύσης.</p>

			<p>φυμάτων και στην περιοχή του αυχενικού ορίου, ο σκελετός προσαρμόζεται απότομα ώστε να ταιριάζει στο όριο παρασκευής, και δ: σκελετός από ζirkονία με επίπεδη μασητική επιφάνεια: διαμόρφωση στήριξης έναντι της μασητικής δύναμης και στην περιοχή του αυχενικού ορίου ο σκελετός προσαρμόζεται απότομα ώστε να ταιριάζει στο όριο παρασκευής. Οι σκελετοί επικαλύφθηκαν με πορσελάνη. Η κατακόρυφη και η πλευρική φόρτιση πραγματοποιήθηκαν μέχρι τη θραύση.</p>		
13	<p>Belli R, Monteiro S, Baratieri LN, Kate H, Petschelt A, Lohbauer U. Χρονολογία δημοσίευσης: 2012</p>	<p>A Photoelastic Assessment of Residual Stresses in Zirconia-Veneer Crowns</p>	<p>Δύο πορσελάνες με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής χρησιμοποιήθηκαν για την επικάλυψη σκελετού ζirkονίας, ώστε να δημιουργηθούν υψηλές ή χαμηλές θερμικές αναντιστοιχίες. Οι στεφάνες ψύχθηκαν σύμφωνα με πρωτόκολλο ταχείας ή αργής ψύξης. Η επιβράδυνση των πολωμένων</p>	<p>Ενώ η θερμική αναντιστοιχία ήταν ένας σημαντικός παράγοντας που επηρέασε την ανάπτυξη της μέγιστης τάσης στην επικάλυψη, ο ρυθμός ψύξης είχε δευτερεύοντα ρόλο. Οι καμπύλες επιφάνειες ήταν προτιμώμενες θέσεις συγκέντρωσης τάσεων, ανεξάρτητα από τη θερμική αναντιστοιχία ή το ρυθμό ψύξης.</p>	<p>Η διαφορά θερμικού συντελεστή μεταξύ κεραμικού πυρήνα και επικάλυψης παίζει ρόλο στην επιτυχία της αποκατάστασης,</p>

			φωτεινών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μεγέθους και της κατανομής των υπολειπόμενων τάσεων σε όλη την επιφάνεια του επιστρώματος, σύμφωνα με την αρχή της φωτοελαστικότητας , σε τομές στεφάνης πάχους 1,0 mm.		
14	Salimi H, Mosharraf R, Savabi O. Χρονολογία δημοσίευσης: 2012	Effect of framework design on fracture resistance of zirconium oxide posterior fixed partial dentures.	Κατασκευάστηκαν τριάντα δύο σκελετοί πυρήνα από ζirkονία για την αντικατάσταση ενός δεύτερου προγομφίου. Τα δείγματα χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες: I: σύνδεσμος 3 mm ύψος × 3 mm εύρος και τυπικός σχεδιασμός, II: σύνδεσμος 3mm ύψος × 3mm εύρος και τροποποιημένος σχεδιασμός (κατασκευή αυχενικού υπερώιου κολλάρου πάχους 1mm και ύψους 2mm) , III: διάσταση συνδέσμου 4mm ύψος × 4mm εύρος και τυπικός σχεδιασμός και IV: διάσταση συνδέσμου 4mm ύψος × 4mm εύρος και τροποποιημένος σχεδιασμός	Η μέση αντοχή σε θραύση των ομάδων με σύνδεσμο 4mm ύψος × 4mm εύρος ήταν σημαντικά υψηλότερη από τις ομάδες με σύνδεσμο 3 mm ύψος × 3 mm εύρος . Παρόλο που, η αντοχή σε θραύση των τροποποιημένων σκελετών ήταν αυξημένη στην παρούσα μελέτη δεν διέφεραν σημαντικά από τα ανατομικά δείγματα.	Η αντοχή σε θραύση των οπίσθιων ολοκεραμικών αποκαταστάσεων από ζirkονία επηρεάστηκε σημαντικά από το μέγεθος του συνδέσμου- δεν επηρεάστηκε από την τροποποίηση του σκελετού.

			(κατασκευή αυχενικού υπερώιου κολλάρου πάχους 1mm και ύψους 2mm). Μετά την αποθήκευση για μία εβδομάδα σε τεχνητό σάλιο και τη θερμοκυκλική διαδικασία τα δοκίμια φορτίστηκαν σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών.		
15	Ha SR, Kim SH, Han JS, Yoo SH, Jeong SC, Lee JB, et al. Χρονολογία δημοσίευσης: 2013	The influence of various core designs on stress distribution in the veneered zirconia crown: a finite element analysis study.	Τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αναπαριστούσαν γομφίους της κάτω γνάθου, αποτελούμενα από ένα παρασκευασμένο δόντι, στρώμα κονίας, πυρήνα ζirkονίας και πορσελάνη επικάλυψης, σχεδιάστηκαν σε λογισμικό υπολογιστή. Οι παραλλαγές του αυχένα στον πυρήνα ήταν σταδιακές αυξήσεις 1 mm, 2 mm και 3 mm στο εγγύς και γλωσσικό ύψος και στο πρόσθιο ύψος αντίστοιχα. Για την προσομοίωση της μασητικής δύναμης, εφαρμόστηκαν φορτία 280 N από τρεις κατευθύνσεις	Κατά τη δοκιμή προσομοίωσης της μέγιστης δύναμης δαγκώματος, οι μέγιστες κύριες τάσεις σε όλες τις στεφάνες παρατηρήθηκαν γύρω από την περιοχή του αυχενικού ορίου και τα σημεία φόρτισης. Οι συμπιεστικές τάσεις εντοπίστηκαν στην περιοχή του σιριτιού στη διεπιφάνεια επικάλυψης -ζirkονίας και στην μασητική περιοχή. Στη δοκιμή προσομοίωσης της μασητικής δύναμης, οι μέγιστες κύριες τάσεις συγκεντρώθηκαν γύρω από τα σημεία φόρτισης και οι θλιπτικές τάσεις εντοπίστηκαν στη γλωσσική περιοχή του σιριτιού ύψους 3 mm, όταν το φορτίο εφαρμόστηκε οριζόντια. Η μέγιστη κύρια τάση αυξήθηκε στην περιοχή του σιριτιού καθώς	Η μελέτη αυτή υπέδειξε ότι η ενίσχυση με σιρίτι παίζει ουσιαστικό ρόλο στην επιτυχία της αποκατάστασης από ζirkονία και ότι το κάταγμα του επιστρώματος λόγω της μασητικής φόρτισης μπορεί να αποφευχθεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό του πυρήνα.

			(κάθετα, υπό γωνία 45° και οριζόντια).	αυξανόταν το ύψος του.	
16	Corazza PH, Feitosa SA, Borges ALS, Della Bona A. Χρονολογία δημοσίευσης: 2013	Influence of convergence angle of tooth preparation on the fracture resistance of Y-TZP-based all-ceramic restorations.	Πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσεων με πεπερασμένα στοιχεία (FEA) για να εξεταστεί η κατανομή των τάσεων. Ογδόντα δείγματα YZ κατασκευάστηκαν με τη χρήση συστήματος CAD-CAM και χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες (n = 20), ανάλογα με τη γωνία της κωνικότητας της παρασκευής : G6 - 6°, G12 - 12°, G20 - 20° και G20MOD - 20° με τροποποιημένο σκελετό. Όλα τα δείγματα επικαλύφθηκαν με VM9, συγκολλήθηκαν σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένης με ίνες και φορτίστηκαν μέχρι αστοχίας.	Η μεγαλύτερη μέση τιμή φορτίου έως τη θραύση βρέθηκε για το G20MOD, το οποίο προβλέφθηκε από τη FEA. Η κυκλική κόπωση δεν επηρέασε σημαντικά το φορτίο θραύσης. Η καταστροφική αστοχία που προερχόταν από την εσωτερική μασητική επιφάνεια του τροποποιημένου σκελετού ήταν ο επικρατέστερος τρόπος αστοχίας, εκτός από την ομάδα G20MOD	Παρά την παρόμοια κατανομή των τάσεων, οι τιμές ήταν διαφορετικές για τα μοντέλα FEA, επιβεβαιώνοντας την πρώτη υπόθεση της μελέτης. Η χαμηλότερη τιμή δημιουργήθηκε στο τροποποιημένο σκελετό του μοντέλου FEA G20MOD, υποδηλώνοντας μια ανώτερη μηχανική συμπεριφορά, η οποία επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κυκλική κόπωση δεν είχαν σημαντική επίδραση στο φορτίο θραύσης των αποκαταστάσεων του ίδιου σχεδιασμού, απορρίπτοντας τη δεύτερη υπόθεση της μελέτης. Η γωνία της παρασκευής και ο σχεδιασμός τροποποιημένου σκελετού επηρέασαν το φορτίο θραύσης των κεραμικών αποκαταστάσεων με βάση το Y-TZP, επιβεβαιώνοντας την τρίτη υπόθεση της μελέτης. Οι αποκαταστάσεις από την ομάδα G20MOD εμφάνισαν το μεγαλύτερο φορτίο θραύσης. Ανεξάρτητα από τη γωνία

					παρασκευής, οι YZ-VM9 αποκαταστάσεις παρουσίασαν μεγαλύτερο φορτίο σε θραύση από τις αναφερόμενες φυσιολογικό φορτίο σύγκλεισης.
17	Della Bona Á, Borba M, Beneti P, Duan Y, Griggs JA. Χρονολογία δημοσίευσης: 2013	Three-dimensional finite element modelling of all-ceramic restorations based on micro-CT.	Μια στεφάνη και μια γέφυρα τριών μονάδων κατασκευασμένη από κεραμικό σκελετό (Y-TZP) και επένδυση πορσελάνης (VM9) σαρώθηκαν με τη χρήση μικρο-ΤΚ σαρωτή ακτίνων Χ με μέγεθος εικονοστοιχείου 6,97 mm. Δημιουργήθηκαν εικόνες τομής και από τις δύο δομές ανά 0,034 mm και επεξεργάστηκαν από ένα διαδραστικό σύστημα ελέγχου εικόνας (Mimics). Εξήχθησαν διάφορες μάσκες των κολοβωμάτων, του σκελετού και του φατνίου με τη χρήση εργαλείων κατωφλίωσης και ανάπτυξης περιοχών με βάση τη φωτεινότητα και την αντίθεση της εικόνας ακτίνων Χ. Τα τρισδιάστατα αντικείμενα κάθε μοντέλου ενσωματώθηκαν σε	Τα μοντέλα FEA έδειξαν μεγάλη ομοιότητα σχήματος με τις κατασκευές. Η χρήση της μη πολλαπλής συναρμολόγησης εξασφάλισε την αντιστοίχιση των επιφανειών και τη σύμπτωση των κόμβων μεταξύ των διαφόρων δομικών μερών. Για το μοντέλο της στεφάνης, οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώθηκαν στην εσωτερική επιφάνεια του πυρήνα, κοντά στο εφαρμοζόμενο φορτίο. Για το μοντέλο της γέφυρας, οι υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις εντοπίστηκαν στο σκελετό, στην αυχενική περιοχή των συνδέσμων και του ενδιαμέσου.	Έγκυρα τρισδιάστατα μοντέλα οδοντικής στεφάνης και γέφυρας μπορούν να παραχθούν με το συνδυασμό σάρωσης microCT και λογισμικού Mimics, υπογραμμίζοντας τη σημασία του ως εργαλείο σχεδιασμού στην οδοντιατρική έρευνα. Η μέθοδος 3D FEA που περιγράφεται στην παρούσα εργασία αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την πρόβλεψη της κατανομής των τάσεων, βοηθώντας στον δομικό σχεδιασμό των οδοντικών αποκαταστάσεων.

			μη πολλαπλή συναρμολόγηση και δικτυώθηκαν ταυτόχρονα. Τα πλέγματα όγκου εξήχθησαν στο λογισμικό FEA (ABAQUS) και αναλύθηκε η κατανομή των τάσεων που δημιουργούνται από το φορτίο		
18	Altamimi A, Tripodakis AP, Eliades G, Hirayama H. Χρονολογία δημοσίευσης: 2014	Comparison of fracture resistance and fracture characterization of bilayered zirconia/fluorapatite and monolithic lithium disilicate all ceramic crowns.	Τριάντα δείγματα στεφάνης τοποθετήθηκαν σε ένα μεταλλικό αντίγραφο του δεξιού πρώτου γομφίου της κάτω γνάθου. Χωρίστηκαν σε 3 ομάδες (Α: Ζιρκόνιο-φθοριοαπατίτης μη ανατομικού σχεδιασμού και ομοιόμορφου πάχους Β: ζιρκόνιο-φθοριοαπατίτης ανατομικού σχεδιασμού & C: μονολιθικές στεφάνες διπυριτικού λιθίου). Τα δείγματα φορτίστηκαν δυναμικά κάτω από νερό και στη συνέχεια φορτίστηκαν στατικά έως τη θραύση προκειμένου να προσδιοριστεί η ολική αντοχή της στεφάνης.	Καταστροφικές θραύσεις εμφανίστηκαν στα δοκίμια της ομάδας C ενώ στις ομάδες Α και Β οι θραύσεις αφορούσαν το υλικό επικάλυψης.	Οι στεφάνες διπυριτικού λιθίου έδειξαν μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση από τις στεφάνες ζιρκονίου-φθοριοαπατίτη. Ανάμεσα στις ομάδες ζιρκονίου-φθοριοαπατίτη, η ομάδα με τον ανατομικό σκελετό ζιρκονίου έδειξε αυξημένη αντοχή στη θραύση του κεραμικού επικάλυψης.

19	Zhang Y, Mai Z, Barani A, Bush M, Lawn B. Χρονολογία δημοσίευσης: 2015	Fracture-resistant monolithic dental crowns.	Πραγματοποιήθηκαν πειράματα θραύσης σε ανατομικά σωστές μονολιθικές στεφάνες που συγκολλήθηκαν σε τυποποιημένες μήτρες συνθετικής ρητίνης, με αξονική φόρτιση από μία σκληρή σφαίρα που τοποθετήθηκε μεταξύ των φυμάτων.	Οι στεφάνες από ζirkονία εμφάνισαν τα υψηλότερα φορτία θραύσης, το διπυριτικό λίθιο τα ενδιάμεσα και τα οδοντιατρικά νανοσύνθετα τα χαμηλότερα. Οι οδοντιατρικές νανοσύνθετες στεφάνες έχουν συγκρίσιμη αντοχή σε θραύση με τη φυσική αδαμαντίνη.	Η ζirkονία έχει επιβεβαιωθεί ότι είναι η πιο ανθεκτική στη διάσπαση και το οδοντιατρικό νανοσύνθετο το λιγότερο, με ενδιάμεσο το διπυριτικό λίθιο. Οι σκληρότερες και ισχυρότερες στεφάνες από ζirkονία και διπυριτικό λίθιο παρέχουν ανώτερη θωράκιση του εσωτερικού του δοντιού από τις τάσεις και εμποδίζουν την έναρξη ρωγμών. Ταυτόχρονα, προειδοποιείται ότι η ακεραιότητα της μονολιθικής δομής της στεφάνης μπορεί εύκολα να τεθεί σε κίνδυνο από ελαττώματα κατασκευής και σφάλματα παρασκευής ή τοποθέτησης και από κόπωση
20	Lakshmi RD, Abraham A, Sekar V, Hariharan A. Χρονολογία δημοσίευσης: 2015	Influence of connector dimensions on the stress distribution of monolithic zirconia and lithium-di-silicate inlay retained fixed dental prostheses – A 3D finite element analysis.	Κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα τριών μονάδων ακίνητης οδοντικής πρόσθεσης με στήριξη σε επένθετα πτερύγια που αντικαθιστά τον κάτω δεξιό πρώτο γομφίο, το καθένα με διαστάσεις συνδέσμου 3 mm ύψος x 3 mm εύρος και 4 mm ύψος x 4 mm εύρος. Χρησιμοποιώντας	Με την αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου σε 4 mm ύψος x 4 mm εύρος, και τα δύο υλικά είναι ικανά να αντέξουν μια δύναμη έως και 500 N, που προσομοιάζει τη μέγιστη οπίσθια μασητική δύναμη. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη, η μονολιθική ζirkονία και το διπυριτικό λίθιο μπορούν να	Η αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου σε 4mm ύψος x 4 mm εύρος, έχει σημαντική βελτίωση στην κατανομή των τάσεων μεταξύ των δύο υλικών, καθιστώντας το κατάλληλο ως οπίσθιο αποκαταστατικό υλικό σε όλες τις κεραμικές γέφυρες με στήριξη σε επένθετα πτερύγια.

			<p>τριδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, προστέθηκαν ο λόγος Poisson και το μέτρο ελαστικότητας Young για μονολιθική ζirkονία και μονολιθικό διπυριτικό λίθιο σε κάθε μία από αυτές τις ομάδες. Στη συνέχεια, αυτές υποβλήθηκαν σε κατακόρυφο φορτίο 500 N και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν.</p>	<p>χρησιμοποιηθούν ως υλικό αποκατάστασης.</p>	
21	<p>Dibner AC, Kelly JR. Χρονολογία δημοσίευσης: 2016</p>	<p>Fatigue strength of bilayered ceramics under cyclic loading as a function of core veneer thickness ratios.</p>	<p>Κατασκευάστηκαν δοκίμια του συστήματος πορσελάνης Ivoclar (IPS) e.max από διπυριτικό λίθιο με πάχος πυρήνα και επικάλυψης 0,5/1,0 mm, 0,75/0,75 mm, 1,0/0,5 mm και 1,5/0,0 mm. Όλα τα δείγματα συγκολλήθηκαν σε βάσεις από υλικό που μοιάζει με οδοντίνη. Κάθε δοκίμιο φορτίστηκε κυκλικά σε νερό.</p>	<p>Ο μέσος όρος και οι τυπικές αποκλίσεις των φορτίων κόπωσης για τα διάφορα πάχη πυρήνων ήταν: πυρήνας 0,5 mm 610,94 N ±130,11, πυρήνας 0,75 mm 600,0 N ±132,80, πυρήνας 1,0 mm 537,50 N ±41,67, πυρήνας 1,5 mm 501,14 N ±70,12. Η ρωγμάτωση του κώνου παρατηρήθηκε μόνο στις 2 ομάδες με λεπτότερο πυρήνα.</p>	<p>Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη πορσελάνης επικάλυψης σε πυρήνες διπυριτικού λιθίου αυξάνει την αντοχή σε κόπωση του δικεραμικού συστήματος.</p>
22	<p>Partiyan A, Osman E, Rayyan MM, Aboushelib M, Ibrahim A, Jimbo R. Χρονολογία δημοσίευσης: 2016</p>	<p>Fracture resistance of three-unit zirconia fixed partial denture with modified framework.</p>	<p>Κατασκευάστηκαν με τις ακόλουθες δύο τεχνικές τρεις γέφυρες από ζirkονία που αντικαθιστούσαν τους γομφίους της κάτω γνάθου: τεχνολογία</p>	<p>Η στατιστική ανάλυση αποκάλυψε σημαντικές διαφορές στην αντοχή στη θραύση μεταξύ του συμβατικού και του τροποποιημένου σχεδιασμού του σκελετού και για τις</p>	<p>Η τροποποίηση του σχεδιασμού του σκελετού από ζirkονία παρουσίασε σημαντική βελτίωση της αντοχής σε θραύση σε σύγκριση με τον συμβατικό σχεδιασμό.</p>

			<p>CAD/CAM και χειροκίνητο φρεζάρισμα αντιγράφων. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με τις προαναφερθείσες μεθόδους τροποποιημένοι σκελετοί (τα ακόλουθα μέρη του σκελετού κατασκευάστηκαν σε πλήρες πάχος χωρίς κεραμικό επικάλυψη: οι σύνδεσμοι που εκτείνονται στο μεσαίο τριτημόριο του κάθε κολοβώματος, η ουλική επιφάνεια του ενδιαμέσου γεφυρώματος, και η αυχενική περιοχή σε εύρος 2 mm από το αυχενικό όριο) με ακάλυπτους συνδέσμους πλήρους πάχους και συμβατικοί σκελετοί. Οι συμβατικοί σκελετοί (πάχους 0,5 mm με στρογγυλεμένους συνδέσμους 3 mm) χρησίμευσαν ως ομάδα ελέγχου (N = 20). Μετά την συγκόλληση σε εποξειδικές μήτρες, τα πλαίσια</p>	<p>δύο τεχνικές κατασκευής που εξετάστηκαν. Η εξέταση SEM έδειξε ότι η κρίσιμη ρωγμή προερχόταν από την επιφάνεια εφελκυσμού των συνδέσμων για τους συμβατικούς σκελετούς. Η κρίσιμη ρωγμή για τους τροποποιημένους σκελετούς εμφανίστηκε στο αξονικό τοίχωμα των κολοβωμάτων.</p>	
--	--	--	--	--	--

			φορτίστηκαν μέχρι θραύσης σε μηχανή καθολικών δοκιμών. Οι επιφάνειες θραύσης προετοιμάστηκαν για εξέταση με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπικής σάρωσης .		
23	Hamza TA, Atia MA, Hossary MMK, Mosleh IE, Shokry TE, Wee AG. Χρονολογία δημοσίευσης: 2016	Flexural strength of small connector designs of zirconia-based partial fixed dental prostheses.	Για την προσομοίωση μιας γέφυρας 3 μονάδων, κατασκευάστηκαν 20 ορθογώνια δοκίμια σε σχήμα ράβδου με διαστάσεις 4 ±0,05 mm (Υ)×4 ±0,05 mm (Π)×30 0,5 mm (Μ). Κάθε δοκίμιο ράβδου είχε 2 συρρικνωμένα τμήματα και στις δύο πλευρές, τα οποία αντιπροσώπευαν τον σύνδεσμο και όριζαν ένα κεντρικό ενδιάμεσο μήκος 10 ±0,10 mm. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε 4 ομάδες ανάλογα με τη διάμετρο και το σχεδιασμό του συνδέσμου, ως εξής: SR: 2 mm (Υ)×3 mm (Π) στρογγυλή ακτίνα καμπυλότητας 0,6 mm SS: 2 mm (Υ)×3 mm (Π) αιχμηρή ακτίνα καμπυλότητας 0,1 mm, CR: 3 mm (Υ)×3	Η μέση αντοχή σε κάμψη για το SR 2 mm (H)×3 mm (W) στρογγυλής ακτίνας καμπυλότητας 0,6 mm (583,6 ±49,7 MPa) ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη του SS, η οποία ήταν 2 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρής ακτίνας καμπυλότητας 0,1 mm (502,8 ±23,3 MPa). Ομοίως, η μέση αντοχή σε κάμψη για την CR ήταν 3 mm (H)×3 mm (W) στρογγυλή 0,6 mm ακτίνα καμπυλότητας (682,9 ±36,8), η οποία ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη της CC, 3 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρή 0,1 mm ακτίνα καμπυλότητας (486,7 ±35,6 MPa).	Η αντοχή σε κάμψη των κεραμικών πολυκρυσταλλικής τετραγωνικής ζιρκονίας σταθεροποιημένης με ύτριο επηρεάστηκε από τη διάσταση και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο σχεδιασμός στρογγυλού συνδέσμου ήταν πιο ικανός να αντέξει τις δυνάμεις σε σχέση με τον αιχμηρό σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός συνδέσμων με ελάχιστη διατομή 2×3 mm συνιστάται για πρόσθιες ακίνητες οδοντικές προσθέσεις, εφόσον έχει στρογγυλή καμπυλότητα.

			mm (Π) στρογγυλή 0,6 mm ακτίνα καμπυλότητας- και CS: 3 mm (Υ)×3 mm (Π) αιχμηρή ακτίνα καμπυλότητας 0,1 mm. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντοχής σε κάμψη 3 σημείων σε μηχανή καθολικών δοκιμών. Για την εξέταση των επιφανειών θραύσης χρησιμοποιήθηκαν εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και φωτομικρογραφίας.		
24	Øilo M, Kvam K, Gjerdet NR. Χρονολογία δημοσίευσης: 2016	Load at fracture of monolithic and bilayered zirconia crowns with and without a cervical zirconia collar.	Τριάντα στεφάνες από ζirkονία κατασκευάστηκαν για μια ρηχή παρασκευή γομφίου με λοξοτόμηση, 10 με κανονικό σχεδιασμό πυρήνα-επένδυσης, 10 με σχεδιασμό πυρήνα-επένδυσης με πρόσθετο αυχενικό κολάρο από ζirkονία και 10 με μονολιθικό σχεδιασμό ανατομικού περιγράμματος. Στα πρώτα 20 δείγματα εφαρμόστηκε κεραμικό όπτησης για τη δημιουργία ανατομικής μορφής. Όλες οι στεφάνες	Βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στο φορτίο κατά τη θραύση και στους τρόπους θραύσης μεταξύ των ομάδων δοκιμής (P<0,001) Όλα τα κατάγματα, εκτός από ένα, ξεκίνησαν στο όριο της στεφάνης, κυρίως στην εγγύς περιοχή. Το μέσο φορτίο κατά τη θραύση ήταν 4091 N για τον κανονικό σχεδιασμό με πυρήνα-επένδυση, 4712 N για τον σχεδιασμό με κολάρο και 6517 N για τον μονολιθικό, ανατομικού περιγράμματος σχεδιασμό.	Ο μονολιθικός, ανατομικός σχεδιασμός περιγράμματος έδωσε υψηλότερα φορτία κατά τη θραύση σε σχέση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό πυρήνα - επικάλυψης. Οι στεφάνες με αυχενικό κολάρο ζirkονίας είχαν υψηλότερο φορτίο κατά τη θραύση από τον σχεδιασμό με πυρήνα - επικάλυψη, αλλά χαμηλότερο από τις μονολιθικές στεφάνες.

			συγκολλήθηκαν σε εποξειδικά στηρίγματα και φορτίστηκαν μέχρι πλήρους θραύσης. Καταγράφηκαν οι τρόποι θραύσης και το φορτίο κατά τη θραύση.		
25	Fardin VP, de Paula VG, Bonfante EA, Coelho PG, Bonfante G. Χρονολογία δημοσίευσης: 2016	Lifetime prediction of zirconia and metal ceramic crowns loaded on marginal ridges.	Κατασκευάστηκαν ογδόντα στεφάνες γομφίων στεφανών που κολλήθηκαν σε αντίγραφα σύνθετης ρητίνης και χωρίστηκαν (n=20/κάθε μία), στις ακόλουθες ομάδες: μεταλλικά-κεραμικά με ομοιόμορφο πάχος (MCev) ή με τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού (MC, γλωσσικό κολάρο)-πορσελάνη ενωμένη με ζirkονία με ομοιόμορφο πάχος (PFZev) ή με τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού (PFZm). Κάθε οριακή ακμή υποβλήθηκε σε κυκλική φόρτιση μέχρι θραύσης.	Το διάγραμμα 2 παραμέτρων Weibull έδειξε σημαντικά υψηλότερη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης για το PFZev σε σύγκριση με το MC και συγκρίσιμη με το PFZm. Τα φρακτογραφικά σημάδια έδειξαν μια συνεπή προέλευση θραύσης και κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής. Η αξιοπιστία ήταν υψηλότερη για τις στεφάνες από πορσελάνη που έχει συγκολληθεί σε ζirkονία από ό,τι για τις μεταλλοκεραμικές στεφάνες, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό του σκελετού.	Διαφορετικοί σχεδιασμοί σκελετού δεν θα βελτίωναν τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης των μεταλλοκεραμικών και Y-TZP. Ωστόσο, διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά όταν συγκρίθηκαν συστήματα, όπου η ομάδα PFZev παρουσίασε αυξημένη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης σε σύγκριση με τις ομάδες μεταλλοκεραμικών.
26	Badran N, Abdel Kader S, Alabbassy F. Χρονολογία δημοσίευσης: 2019	Effect of Incisal Porcelain Veneering Thickness on the Fracture Resistance of CAD/CAM Zirconia All-Ceramic	Οι ολοκεραμικές και μεταλλοκεραμικές στεφάνες ζirkονίας CAD/CAM κατασκευάστηκαν στις προετοιμασμένες μήτρες με τυποποιημένες διαστάσεις και σχέδια	Πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντοχή στη θραύση της ομάδας των μεταλλικών κεραμικών νικελίου-χρωμίου ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη της ομάδας των ολοκεραμικών	Τα δείγματα της παρούσας μελέτης κατέδειξαν υψηλές τιμές φορτίου αστοχίας, οι οποίες υποδηλώνουν επαρκή αντοχή του πάχους της κοπτικής επικάλυψης και στα δύο συστήματα στεφάνης για να αντέξουν τις κλινικές

		Anterior Crowns.	χρησιμοποιώντας τυποποιημένες μεθόδους σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, όλες οι στεφάνες συγκολλήθηκαν με κονία με βάση τη ρητίνη, υποβλήθηκαν σε θερμικό κύκλο και κυκλική φόρτιση και φορτίστηκαν μέχρι θραύσης με τη χρήση της μηχανής καθολικών δοκιμών για την ένδειξη της αντοχής σε θραύση για κάθε υλικό στεφάνης σε κάθε πάχος όψης.	ζirkονίας CAD/ CAM. Επίσης, η αντοχή σε θραύση των στεφανών με πάχος κοπτικής επένδυσης 1,5 mm ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνες με πάχος κοπτικής επένδυσης 3 mm και στις δύο ομάδες. Επιπλέον, δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στον τρόπο θραύσης των δύο ομάδων, όπου το 50% του συνόλου των δειγμάτων παρουσίασε τρόπο αποκόλληση, ενώ το 35% παρουσίασε ορατή ρωγμή και μόνο το 15% παρουσίασε θραύση.	εφαρμογές- ωστόσο, τα μοτίβα θραύσης εξακολουθούν να υπογραμμίζουν την απαίτηση ενός σχεδιασμού πυρήνα που να υποστηρίζει ένα σταθερό πάχος του κεραμικού επικάλυψης και συνιστάται η διεξαγωγή μακροπρόθεσμων προοπτικών κλινικών μελετών για την επιβεβαίωση των ευρημάτων που αναφέρονται στην παρούσα μελέτη.
27	Hafezeqoran A, Koodaryan R, Hemmati Y Akbarzadeh A. Χρονολογία δημοσίευσης: 2020	Effect of connector size and design on the fracture resistance of monolithic zirconia fixed dental prosthesis.	Δύο ομάδες είκοσι μονολιθικών γεφυρών ζirkονίας 3 μονάδων (Sirona inCoris TZI, Sirona Dental Systems GmbH), που εκτείνονταν από τον πρώτο προγόμφιο της κάτω γνάθου έως τον πρώτο γομφίο με διαφορετικά μεγέθη συνδέσμων (9 mm ² και 12 mm ²), χωρίστηκαν σε δύο υποομάδες με διαφορετικά σχέδια συνδέσμων (στρογγυλό και αιχμηρό). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν στη δοκιμή κάμψης	Το ελάχιστο φορτίο αστοχίας σχετιζόταν με την ομάδα με μέγεθος συνδέσμου 9 mm ² και σχεδιασμό αιχμηρού ανοίγματος, ενώ η υψηλότερη μέση τιμή ανήκε στην ομάδα με μέγεθος συνδέσμου 12 mm ² και σχεδιασμό στρογγυλού ανοίγματος.	Ο σχεδιασμός αιχμηρής κόγχης δεν συνιστάται για περιοχές με υψηλή πίεση και περιορισμένο ύψος κάθετης σιάστασης. Το μέγεθος του συνδέσμου 9 mm ² για μονολιθική οδοντική πρόθεση 3 μονάδων από ζirkονία, το οποίο συνιστάται από τον κατασκευαστή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη προσοχή.

			τριών σημείων για να ληφθεί το φορτίο που φέρει θραύση.		
28	Ahmed M, Reddy K, Shastry Ym, Aditya Sv, Babu Pj. Χρονολογία δημοσίευσης: 2020	Evaluation of flexural strength of Zirconia using three different connector designs: An in vitro study.	Για την προσομοίωση της ακίνητης μερικής πρόθεσης από ζirkονία, σχεδιάστηκε ένα δοκίμιο με τρεις οκταγωνικούς κυλίνδρους συνδεδεμένους μεταξύ τους. Κάθε όψη του οκταγώνου ήταν $3,75 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ και το συνολικό πλάτος ήταν $9 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ με τυπική επιφάνεια σύνδεσης 10 mm^2 στη διατομή. Φρεζάρονται τρία διαφορετικά σχέδια συνδέσμων, δηλαδή στρογγυλό, οβάλ και τριγωνικό. Χρησιμοποιήθηκε μηχανή καθολικών δοκιμών για τη δοκιμή της αντοχής σε κάμψη με κατακόρυφες και πλάγιες δυνάμεις	Η υψηλότερη αντοχή σε κάμψη παρατηρήθηκε στον τριγωνικό σύνδεσμο με κατακόρυφες δυνάμεις και η χαμηλότερη με λοξές δυνάμεις.	Ο σχεδιασμός του τριγωνικού συνδέσμου αποδείχθηκε καλύτερος από τους στρογγυλούς και οβάλ συνδέσμους κατά την εφαρμογή κατακόρυφων φορτίων. Ο σχεδιασμός στρογγυλού συνδέσμου αποδείχθηκε καλύτερος από τον τριγωνικό και τον οβάλ σύνδεσμο κατά την εφαρμογή πλάγιων φορτίων.
29	Oyar P, Durkan R, Deste G. Χρονολογία δημοσίευσης: 2021	The effect of the design of a mandibular implant-supported zirconia prosthesis on stress distribution.	Σχεδιάστηκε πρόσθεση για την κάτω γνάθο η οποία είναι πλήρους τόξου και στηρίζεται μόνο σε τέσσερα εμφυτεύματα (all-on-four) κατασκευασμένα από υπερκατασκευή από ζirkονία και υαλοκεραμικό	Η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος από 15 έως 30 μοίρες οδήγησε σε μείωση των τιμών της μέγιστης κύριας τάσης κατά περίπου 4 έως 7 MPa στο φλοιώδες οστό γύρω από όλα τα εμφυτεύματα εκτός από το δεξιό πρόσθιο εμφύτευμα. Η αύξηση του μήκους του	Σε κεραμικές αποκαταστάσεις ζirkονίας με χρήση ενός σχεδιασμού πλήρους τόξου στηριζόμενου σε 4 εμφυτεύματα (all-on-four) με υπερκατασκευή, οι κοντοί βραχίονες μπορεί να είναι προτιμότεροι, επειδή οδηγούν σε

			<p>διπυριτικό λίθιο (LDGC) με μήκος προβόλου 5 mm ή 9 mm και οπίσθια εμφυτεύματα με άπω κλίση 15 ή 30 μοιρών. Οι τάσεις αξιολογήθηκαν με προσομοίωση εφαρμογής στατικού φορτίου 600 N.</p>	<p>προβόλου από 5 έως 9 mm είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών της ελάχιστης κύριας τάσης κατά περίπου 3 έως 13 MPa στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει όλα τα οπίσθια εμφυτεύματα. Στα σχέδια με τον μακρύ ακρολοφία, οι τιμές αυξήθηκαν κατά περίπου 3 έως 4 MPa στο σπογγώδες οστό που γειτνιάζει με το δεξί οπίσθιο εμφύτευμα. Η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε επίσης σε υψηλότερες τιμές στην πρώτη και τη δεύτερη εγκοπή του εμφυτεύματος στο δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα στο σχεδιασμό με την κλίση του εμφυτεύματος κατά 15 μοίρες. Η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος στο σχεδιασμό με το κοντό πρόβολο οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές στην κορυφή και σε όλες τις αύλακες του αριστερού οπίσθιου εμφυτεύματος, ενώ στο σχεδιασμό με το μακρύ πρόβολο, η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές τάσης στην πρώτη και τη δεύτερη αύλακα του ίδιου εμφυτεύματος. Η</p>	<p>ευνοϊκότερη κατανομή της τάσης από ό,τι οι μακρινοί βραχίονες. Η αύξηση της γωνίας του εμφυτεύματος από 15 σε 30 μοίρες μείωσε τις τιμές στο φλοιώδες οστό.</p>
--	--	--	--	--	--

				αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε σε αύξηση των τιμών στη δομή του πυρήνα.	
30	Schriwer C, Gjerdet NR, Arola D, Øilo M. Χρονολογία δημοσίευσης: 2021	The effect of preparation taper on the resistance to fracture of monolithic zirconia crowns.	Παρασκευάστηκε ένα πρότυπο δόντι με κωνικότητα 15° και ρηχή περιμετρική λοξότομηση (0,5 mm). Δύο πρόσθετα μοντέλα κατασκευάστηκαν με βάση το κύριο μοντέλο με κωνικότητα 10° και 30° χρησιμοποιώντας λογισμικό σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή. Για κάθε μοντέλο κατασκευάστηκαν είκοσι μονολιθικές ημιδιαφανείς στεφάνες ζirkονίας 3ης γενιάς με προκαθορισμένο διάστημα κόνιας που ορίστηκε είτε στα 30 μm είτε στα 60 μm. Οι συγκολλημένες στεφάνες φορτίστηκαν μασητικά έως τη θραύση.	Οι στεφάνες με κωνικότητα 30° θραύτηκαν σε χαμηλότερα φορτία από εκείνες με κωνικότητα 10° και 15°, ανεξάρτητα από το διάστημα κόνιας. Η προέλευση του κατάγματος για 47/60 στεφάνες (78%) ήταν στην αυχενική περιοχή, κοντά στην κορυφή της καμπυλότητας στο μεσολόβιο ή στο άπω περιθώριο της στεφάνης. Τα υπόλοιπα κατάγματα ξεκίνησαν από την εσωτερική επιφάνεια της αποφρακτικής περιοχής και διαδόθηκαν αυχενικά	Η μεγάλη κωνικότητα παρασκευής μείωσε το φορτίο κατά τη θραύση των μονολιθικών στεφανών ζirkονίας. Ένας μεγαλύτερος προκαθορισμένος χώρος κόνιας βελτίωσε την έδραση αλλά δεν επηρέασε το φορτίο κατά τη θραύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΣΤΕΦΑΝΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν εργασίες που τα δοκίμια ήταν μονήρης στεφάνες. Πιο συγκεκριμένα θα παρατεθούν οι εργασίες που μελετούν την επίδραση της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης, στην αντοχή σε κόπωση και στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών στεφανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

4.1. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών στεφανών.

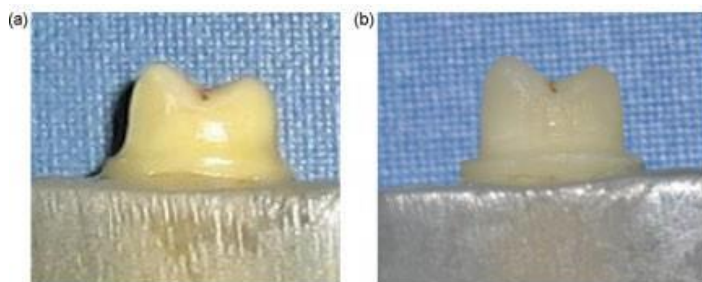
Οι ολοκεραμικές οδοντικές στεφάνες χρησιμοποιούνται ευρέως στην επανορθωτική προσθετική οδοντιατρική λόγω της βιοσυμβατότητας, της φυσικής τους εμφάνισης και της ικανότητάς τους να συνδέονται με τους οδοντικούς ιστούς. Ωστόσο η αντοχή τους σε θραύση αποτελεί κλινική πρόκληση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένα η αντοχή σε θραύση αφορά την φόρτιση της προσθετικής αποκατάστασης από το μηδενικό φορτίο μέχρι το ανώτατο φορτίο θραύσης της στεφάνης οπότε και επέρχεται η καταστροφή της στεφάνης από συντριπτικό

κάταγμα. Η αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών στεφανών επηρεάζεται από πολυάριθμα στοιχεία. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλα αυτά τα στοιχεία του σχεδιασμού που επηρεάζουν την αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών στεφανών.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών στεφανών διάφοροι ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Jajalian και συν. (2010) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να συγκρίνουν την επίδραση 2 τύπων οριακών παρασκευών (με βάρθο και οξύαιχμη λοξοτόμηση χωρίς βάρθο σαν μαχαίρι) στην αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων.⁵⁷ Οι Kokubo και συν. στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να μελετήσουν την επιρροή που έχει ο σχεδιασμός του πυρήνα ζirkονίου για την αντοχή στη θραύση μιας ολοκεραμικής στεφάνης.⁵⁸ Ο Altamimi και συν.(2014) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να συγκρίνουν την αντοχή στη θραύση των στεφανών ζirkονίας/ φθοριοαπατίτη και των μονολιθικών στεφάνων θερμοσυμπιεσμένου διπυριτικού λιθίου καθώς και να χαρακτηρίσουν τον τρόπο αστοχίας της θραύσης.⁴² Οι Oilo και συν. (2016) στην μελέτη τους είχαν ως στόχο να συγκρίνουν το φορτίο θραύσης των πλήρως ανατομικών μονολιθικών στεφανών ζirkονίας και των στεφανών διαστρωματομένης ζirkονίας με και χωρίς αυχενικό σιρίτι.⁵⁹ Οι Badran και συν.(2019) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν την επίδραση δύο διαφορετικών παχών πορσελάνης κοπτικής επένδυσης στην αντοχή σε θραύση του πρόσθιου ολοκεραμικού συστήματος στεφάνης ζirkονίας σε σύγκριση με το συμβατικά χρησιμοποιούμενο σύστημα μεταλλοκεραμικής στεφάνης.⁶⁰ Οι Schiwer και συν. στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν κατά πόσο ο προκαθορισμένος χώρος κόνιας ή η κωνικότητα και συνεπώς το πάχος του τοιχώματος της αποκατάστασης επηρεάζουν την αντοχή στη θραύση των μονολιθικών στεφανών ζirkονίας.⁶¹

Στη μελέτη των Jajalian και συν. (2010)⁵⁷ ένας πρώτος προγόμφιος της άνω γνάθου εξήχθη για ορθοδοντικούς λόγους. Το δόντι παρασκευάστηκε με λοξοτόμηση χωρίς βάρθο οξύαιχμο οξύαιχμη (σαν μαχαίρι) με εύρος 0,7 mm. Προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή στη θραύση η μασητική επιφάνεια παρασκευάστηκε έτσι ώστε να έχει σχήμα φυμάτων. Δημιουργήθηκαν 10 αποτυπώματα με τη χρήση

πολυβινιλοσυλοξάνης. Ύστερα στα αποτυπώματα εκχύθηκε εποξική ρητίνη προκειμένου να κατασκευαστούν 10 πανομοιότυπα κολοβώματα. Έπειτα ο εξαχθέντας προγόμφιος παρασκευάστηκε εκ νέου με παρασκευή με βάθρο με εύρος 1 mm. [Εικόνα 18] Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η διαδικασία αποτύπωσης με πολυβινιλοσυλοξάνη και έκχυσης με εποξική ρητίνη για την κατασκευή 10 πανομοιότυπων κολοβωμάτων.⁵⁷



EIKONA 18: A. παρασκευασμένος προγόμφιος με λοξοτόμηση χωρίς βάθρο οξύαιχμο σαν μαχαίρι με εύρος 0,7 mm B. παρασκευασμένος προγόμφιος με λοξοτόμηση με βάθρο με εύρος 1 mm⁵⁷

Εν συνεχεία για κάθε κολόβωμα εποξικής ρητίνης κατασκευάστηκε αποτύπωμα πολυβινιλοσυλοξάνης το οποίο εκχύθηκε με την κατάλληλη γύψο. Έπειτα τα γύψινα κολοβώματα προετοιμάστηκαν και εστάλησαν σε οδοντοτεχνικό εργαστήριο όπου κατασκευάστηκαν πυρήνες αλουμίνας πάχους 0,5 mm. Κάθε πυρήνας ακινητοποιήθηκε στα κολοβώματα εποξικής ρητίνης με τη χρήση ρητινούχου παράγοντα συγκόλλησης και τοποθετήθηκαν σε διάλυμα τεχνητού σάλιου σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με μηχανήμα καθολικών δοκιμών με ελάχιστο φορτίο 5 N με σφαίρα από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 5 mm. Το φορτίο ασκήθηκε κάθετα στη μασητική επιφάνεια μέχρι τη θραύση.⁵⁷

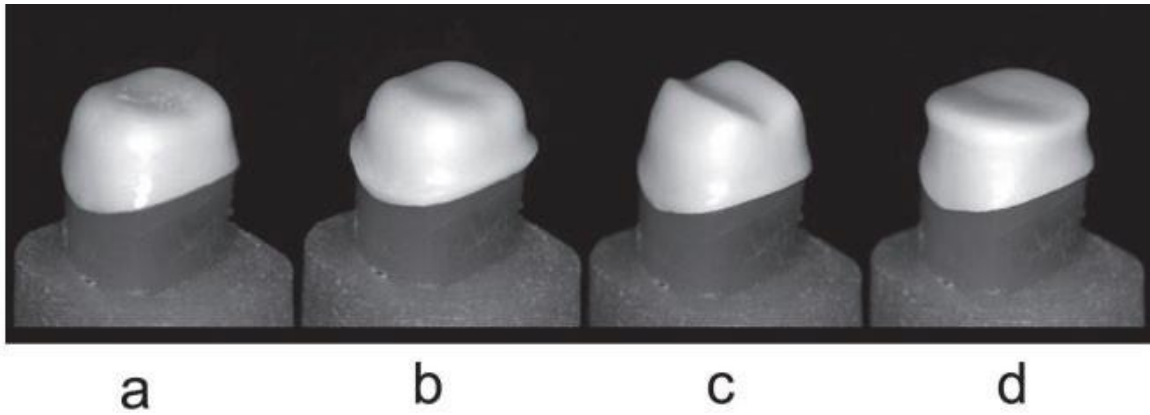
Για την μελέτη των Kokubo και συν.(2011)⁵⁸ ο δεξιός πρώτος γομφίος της κάτω γνάθου κατασκευάστηκε από αυτοπολυμεριζόμενη ρητίνη ως αντικατάσταση ολοκεραμικής στεφάνης. Το εγγύς και άπω ύψος της παρασκευής ήταν 3 mm αντίστοιχα το παρειακό ύψος 5,5 mm και το γλωσσικό 4 mm. Κατασκευάστηκε το όριο της παρασκευής με βάθρο εύρους 1,5 mm και γωνίωση 6,5°. [Εικόνα 19]



EIKONA 19: παρασκευασμένο μοντέλο του γομφίου⁵⁸

Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ως κύριο μοντέλο και αντιγράφηκε και χυτεύθηκε με κράμα κοβαλτίου προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως κολόβωμα για τα δοκίμια. Στο χυτευμένο μοντέλο κατασκευάστηκε από κεριά ένα μοντέλο δόντι πλήρους ανατομίας και καταγράφηκε με σιλικόνη. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν 4 είδη μοντέλων με χρήση αυτοπολυμεριζόμενης ρητίνης ως εξής:

- Συμβατικός πυρήνας ζirkονίας με ισοπεδωμένη μασητική επιφάνεια. Κάθε πυρήνας είχε ομοιόμορφο πάχος 0,6 mm και στην αυχενική περιοχή ο πυρήνας εφαρμόζεται αυστηρά ώστε να ταιριάζει στο όριο της παρασκευής.
- Συμβατικός πυρήνας ζirkονίας με αυχενικό σιρίτι 1 mm: κάθε πυρήνας έχει ομοιόμορφο πάχος 0,6 mm και υπάρχει αυχενικό σιρίτι εύρους ενός mm και ύψους 0,6 mm από το αυχενικό όριο.
- Πυρήνας ζirkονίου με διαμόρφωση φυμάτων: δημιουργήθηκαν μασητικά 2 επικλινή επίπεδα σαν φυμάτια και ο πυρήνας εφαρμόζεται αυστηρά ώστε να ταιριάζει στην οριακή παρασκευή.
- Πυρήνας ζirkονίου με υποστηρικτική διαμόρφωση της μασητικής επιφάνειας: η μασητική επιφάνεια διαμορφώνεται ώστε να παρέχει υποστήριξη έναντι της μασητικής δύναμης και ο πυρήνας εφαρμόζεται αυστηρά ώστε να ταιριάζει στο όριο της παρασκευής.⁵⁸ [Εικόνα 20]



EIKONA 20: a. Συμβατικός πυρήνας ζirkονίας με ισοπεδωμένη μασητική επιφάνεια. b. Συμβατικός πυρήνας ζirkονίας με αυχενικό σιρίτι ενός mm c. Πυρήνας ζirkονίου με διαμόρφωση φυμάτων d. Πυρήνας ζirkονίου με υποστηρικτική διαμόρφωση της μασητικής επιφάνειας⁵⁸

Όλοι οι πυρήνες ελέγχθηκαν στην οριακή εφαρμογή με τη χρήση φωτοσκοπίου και ολοκληρώθηκαν με επικάλυψη πορσελάνης σε ένα οδοντοτεχνικό εργαστήριο ακολουθώντας το πρόγραμμα όπτησης. Οι στεφάνες συγκολλήθηκαν στο κολόβωμα με ρητινώδη κονία συγκόλλησης. Όλα τα συγκολλημένα δείγματα βυθίστηκαν σε απεσταγμένο νερό για 24 ώρες πριν τη φόρτιση. Κάθε ομάδα στεφάνων χωρίστηκε σε 2 υποομάδες με 5 δείγματα ελέγχου σε καθεμία 5 δείγματα για κάθετη φόρτιση και 5 δείγματα για φόρτιση υπό γωνία 45 μοιρών. Για την κάθετη φόρτιση η ράβδος φόρτισης διαμέτρου 2 mm τοποθετήθηκε στην κορυφή του παρειακού φύματος ενώ για την υπό κλίση φόρτιση η ράβδος φόρτισης τοποθετήθηκε στο επικλινές επίπεδο του παρειακού φύματος. Τα δοκίμια φορτίστηκαν έως τη θραύση.

Για την μελέτη των Altamimi και συν.(2014)⁴² κατασκευάστηκε ένα μεταλλικό κολόβωμα από βασικό κράμα αντιγράφοντας έναν παρασκευασμένο πρώτο δεξί γομφίο της κάτω γνάθου. Εν συνεχεία κατασκευάστηκαν στεφάνες και χωρίστηκαν σε ομάδες των 10 δοκιμίων η καθεμία. Οι ομάδες ελέγχου ήταν οι εξής:⁴²

- Ομάδα A: στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη που είχε συμπιεστεί πάνω από τον πυρήνα ζirkονίου. Ο πυρήνας ζirkονίου είχε ενιαίο πάχος 0,7 mm παντού και καθόλου ανατομία.

- Ομάδα Β: στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη όπου ο πυρήνας ζirkονίου είχε ανατομικά στοιχεία και η επικάλυψη φθοριοαπατίτη είχε πάχος 1 mm κατά προσέγγιση.

- Ομάδα C: μονολιθικές στεφάνες θερμοσυμπιεσμένου διπυριτικού λιθίου

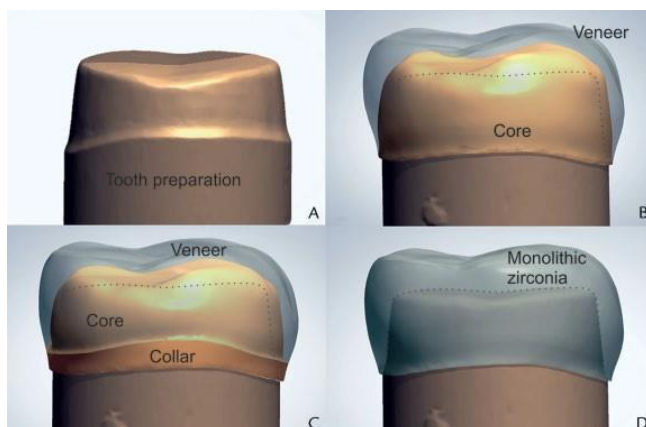
Οι στεφάνες ακινητοποιήθηκαν στα κολοβώματα με τη χρήση ρητινώδους κονίας τροποποιημένης με ιονομερές γυαλί. Συνέχεια τα δοκίμια φορτίστηκαν δυναμικά υπό νερό για 100.000 κύκλους με μέγιστο φορτίο 250 N με ρυθμό 1000 N/sec. και συχνότητα 2Hz. Η φόρτιση πραγματοποιήθηκε με μια ατσάλινη σφαίρα διαμέτρου 5 mm η οποία ερχόμενη σε επαφή με το δοκίμιο το φόρτιζε στη μέγιστη φόρτιση παρέμενε για 0,2 sec. αποφόρτιζε και απομακρυνόταν για 0,5 mm. Έπειτα τα δοκίμια ελέγχθηκαν οπτικά σε στερεό μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος για την παρουσία ρωγμών ή θραύσεων. Έπειτα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών και φορτίστηκαν έως τη θραύση.⁴²

Για την μελέτη των Oilo και συν.(2016)⁵⁹ κατασκευάστηκε ένα κυλινδρικό μοντέλο με παρασκευή ρηχής οξύαιχμης λοξοτόμησης (σαν μαχαίρι) και κωνικότητας 5°. Για αυτό το μοντέλο κατασκευάστηκαν με τη χρήση υπολογιστή 30 στεφάνες ζirkονίας. Οι στεφάνες αυτές χωρίστηκαν σε 3 ομάδες:

A.10 πυρήνες χωρίς ανατομία

B.10 πυρήνες χωρίς ανατομία αλλά με αυχενικό σιρίτι

C.10 μονολιθικές στεφάνες πλήρους ανατομίας [Εικόνα 21]



ΕΙΚΟΝΑ 21: a. μοντέλο με παρασκευή ρηχής οξύαιχμης λοξοτόμησης (σαν μαχαίρι) b. πυρήνας για το διαστρωματομένο σχεδιασμό πυρήνα-επικάλυψης c. σιρίτι για το σχεδιασμό πυρήνα χωρίς ανατομία αλλά με αυχενικό σιρίτι d. Μονολιθική στεφάνη πλήρους ανατομίας⁵⁹

Όλες οι στεφάνες εφαρμόστηκαν στο κολόβωμα-μοντέλο και οι πυρήνες επικαλύφθηκαν με κεραμικό επικάλυψης μέχρι την πλήρη ανατομία. Ελήφθησαν εικόνες μεγέθυνσης x10 από την οριακή περιοχή των στεφανών για τον εντοπισμό ατελειών. Οι στεφάνες κολλήθηκαν στο μοντέλο ρητίνης με τη χρήση κονίας φωσφορικού ψευδαργύρου. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε απεσταγμένο νερό στους 37°C για 20 ώρες. Έπειτα, οι στεφάνες φορτίστηκαν κεντρικά στη μασητική επιφάνεια με τη χρήση ασάλινης σφαίρας διαμέτρου 30mm η οποία υποστηριζόταν από ένα ελαστικό δίσκο πάχους 3mm για την αποφυγή βλάβης λόγω επαφής. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε μηχανή καθολικών δοκιμών με ταχύτητα 0,5mm/min έως τη θραύση. Οι στεφάνες βυθίζονταν σε νερό 37 °C κατά τη διάρκεια της δοκιμής και καταγραφόταν το φορτίο ως τη θραύση. Οι στεφάνες που είχαν υποστεί θραύση αναλύθηκαν με φρακτογραφικές μεθόδους για την αξιολόγηση των τρόπων θραύσης και τον προσδιορισμό της προέλευσης των θραύσεων.⁵⁹

Για την μελέτη των Badran και συν.(2019)⁶⁰ κατασκευάζεται μια ειδικά σχεδιασμένη μεταλλική μήτρα για να προσομοιάσει το κολόβωμα του κεντρικού τομέα της άνω γνάθου. Έπειτα, κατασκευάστηκαν 20 αντίγραφα της μεταλλικής μήτρας με εποξειδική ρητίνη με το ίδιο μέτρο ελαστικότητας με της οδοντίνης. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες:

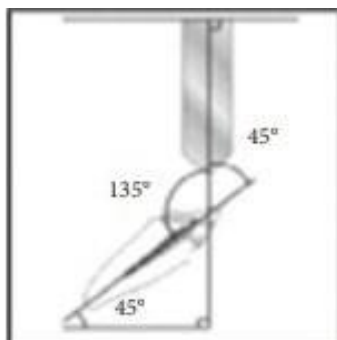
- Ομάδα 1: ολοκεραμικές στεφάνες ζirkονίου με πάχος 0,5 mm

- Ομάδα 2: μεταλλοκεραμικές στεφάνες νικελίου-χρωμίου με πάχος στεφάνης 0,5 mm

Κάθε ομάδα είχε δύο υποομάδες:

- Ομάδα 1α : 5 στεφάνες ζirkονίας με πάχος κεραμικού επικάλυψης στο κοπτικό άκρο 1,5 mm
- Ομάδα 1β : 5 στεφάνες ζirkονίας με πάχος κεραμικού επικάλυψης στο κοπτικό άκρο 3 mm
- Ομάδα 2α : 5 μεταλλοκεραμικές στεφάνες με πάχος κεραμικού επικάλυψης στο κοπτικό άκρο 1,5 mm
- Ομάδα 2β : 5 μεταλλοκεραμικές στεφάνες με πάχος κεραμικού επικάλυψης στο κοπτικό άκρο 3 mm

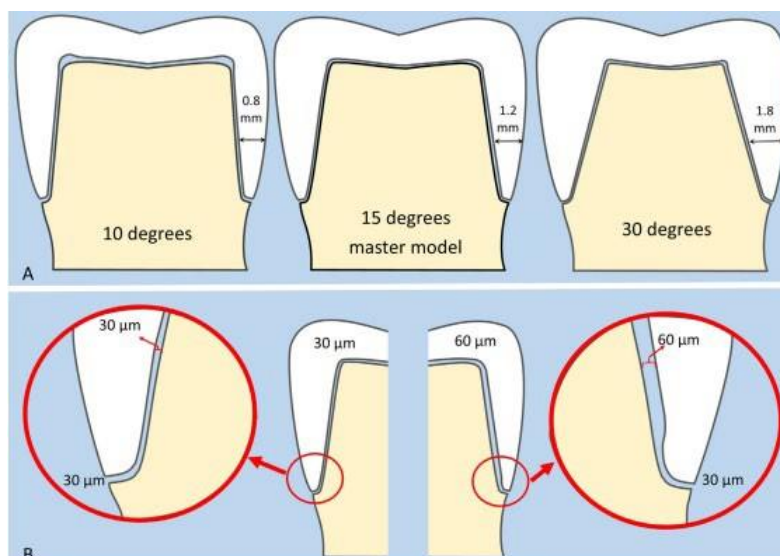
Αφού ακινητοποιήθηκαν όλες οι στεφάνες με τη χρήση αυτοπολυμεριζόμενης ρητινώδους κονίας ξεκίνησαν οι δοκιμές. Αρχικά, οι στεφάνες υποβλήθηκαν σε θερμική κυκλική δοκιμασία που μιμείται τις θερμοκρασιακές αλλαγές του στόματος. Οι στεφάνες υπέστησαν 300 θερμικούς κύκλους που αντιστοιχούν σε 6 μήνες στη στοματική κοιλότητα. Έπειτα, υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση. Οι στεφάνες υπέστησαν 120.000 μηχανικούς κύκλους που αντιστοιχούν επίσης σε 6 μήνες στη στοματική κοιλότητα. Το φορτίο ασκήθηκε στην υπερώια επιφάνεια του τομέα 2,5 mm από το κοπτικό άκρο προκειμένου να προσομοιαστεί η πρώτη συγκλεισιακή τάξη σε σχέση με τον ανταγωνιστή.⁶⁰ [Εικόνα 22]



ΕΙΚΟΝΑ 22: Σχηματική αναπαράσταση της φόρτισης σε γωνία 135° προς τον επιμήκη άξονα της ρίζας (45° στο οριζόντιο επίπεδο).⁶⁰

Στη συνέχεια, προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή στη θραύση, οι στεφάνες υποβλήθηκαν σε δοκιμές σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών. Εφαρμόστηκε κάθετο φορτίο με ταχύτητα 0,5 mm/min. Το φορτίο ασκήθηκε ως τη θραύση.⁶⁰

Για την μελέτη των Schiwer και συν.(2021)⁶¹ Αρχικά, ένας συνθετικός δεύτερος προγόμφιος της κάτω γνάθου (#45) παρασκευάστηκε με ρηχή οξύαιχμη λοξοτόμηση (σαν μαχαίρι) εύρους 0,5 mm και κωνικότητας 45°. Χρησιμοποιήθηκε αποτύπωμα σιλικόνης για την παραγωγή γύψινου εκμαγείου. Το εκμαγείο σαρώθηκε ψηφιακά για την παραγωγή τρισδιάστατου μοντέλου. Ελέγχθηκε ώστε η κωνικότητα να είναι 15° και δύο επιπλέον μοντέλα με κωνικότητα 10° και 30° σχεδιάστηκαν ψηφιακά με βάση το κύριο μοντέλο. Η τελική γραμμή και το βάθος της παρασκευής ήταν πανομοιότυπα σε όλες τις ομάδες. Ο χώρος κωνίας ρυθμίστηκε ψηφιακά σε 30μm ή 60μm και στα τρία μοντέλα. Δέκα πανομοιότυπες μονολιθικές στεφάνες ζirkονίας παρασκευάστηκαν για κάθε μία από τις 6 ομάδες με αποτέλεσμα να προκύψουν συνολικά 60 στεφάνες.⁶¹ [Εικόνα 23]

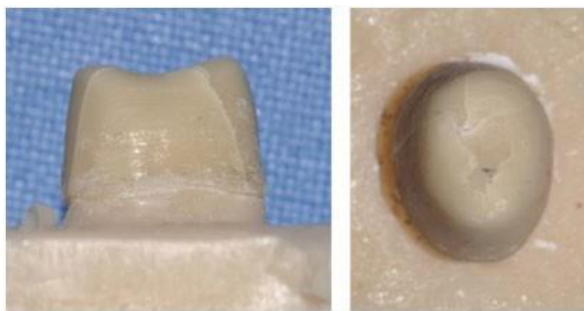


ΕΙΚΟΝΑ 23: Επισκόπηση των ομάδων μελέτης. **A:** Τα τρία διαφορετικά μοντέλα με κωνικότητα 10°, 15° και 30°. **B:** Είκοσι στεφάνες παράχθηκαν από κάθε μοντέλο- δέκα με χώρο κωνίας

30 μm (αριστερά) και δέκα με 60 μm (δεξιά). Το εξωτερικό όριο των στεφανών παρέμεινε αμετάβλητο για όλες τις ομάδες. ⁶¹

Για κάθε σχέδιο παρήχθησαν 20 πανομοιότυπα εποξειδικά μοντέλα, ένα για κάθε μία από τις στεφάνες. Οι στεφάνες ακινητοποιήθηκαν στο αντίστοιχο μοντέλο με τη χρήση υαλοϊονομερούς κονίας. Έπειτα, οι στεφάνες τοποθετήθηκαν σε απεσταγμένο νερό στους 37°C για 24 ώρες. Εν συνεχεία, οι στεφάνες φορτίστηκαν κεντρικά στη μασητική επιφάνεια με έναν οριζόντιο χαλύβδινο κύλινδρο διαμέτρου 13mm χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό σύστημα δοκιμής υλικών με ταχύτητα 0,5mm/min μέχρι θραύσης. Κάθε στεφάνη επιθεωρήθηκε με στερεομικροσκόπιο για να εκτιμηθεί ο τρόπος θραύσης και η προέλευση. ⁶¹

Τα αποτελέσματα των in vitro ερευνών που προαναφέρθηκαν κατέληξαν ότι: Από τη μελέτη των Jajalian και συν. (2010) που είχε ως στόχο να συγκριθεί η επίδραση 2 τύπων οριακών παρασκευών (με βάρθο και οξύαιχμη λοξοτόμηση χωρίς βάρθο σαν μαχαίρι) στην αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων προέκυψε πως το μέσο φορτίο για την αντοχή στη θραύση για την παρασκευή με οξύαιχμη λοξοτόμηση (σαν μαχαίρι) ήταν $\pm 58,79$ N και για την παρασκευή με βάρθο ήταν $\pm 105,83$ N. Το t-test αποκάλυψε μια στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των 2 ομάδων ελέγχου. ⁵⁷

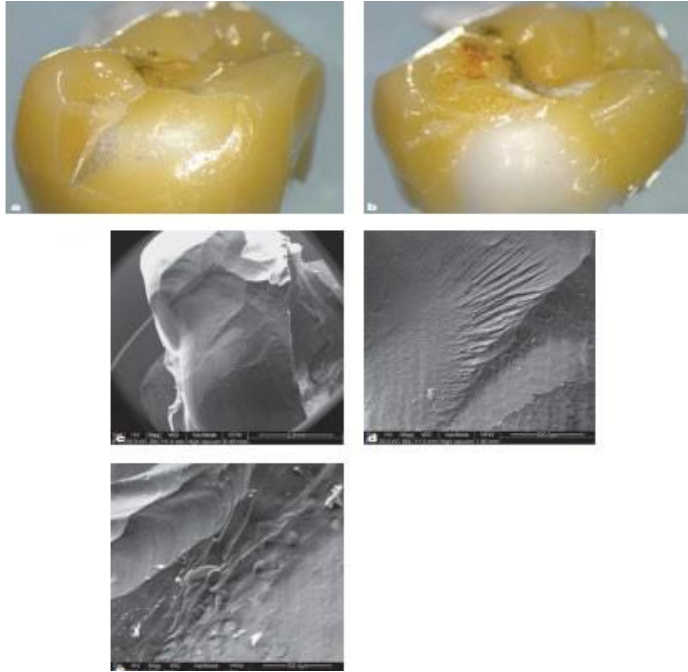


EIKONA 24: θραυσμένες περιοχές του πυρήνα αλουμίνιας μετά τη φόρτιση⁵⁷

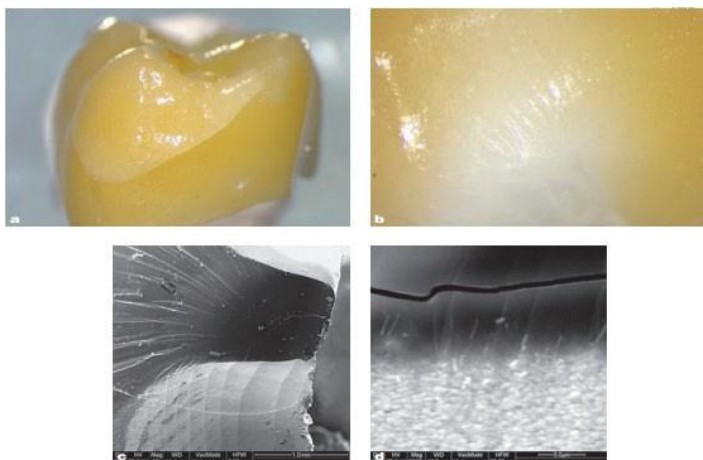
Τα δεδομένα καταγράφηκαν και οι μέσες τιμές για κάθε ομάδα ελέγχου αναλύθηκαν στατιστικά με τη χρήση ανάλυσης διακύμανσης μονής κατεύθυνσης. Κατά την εφαρμογή της κάθετης φόρτισης η ομάδα C παρουσίασε την υψηλότερη τιμή και υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ της ομάδας C και της Α. (Ομάδα

Α: στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη που είχε συμπιεστεί πάνω από τον πυρήνα ζirkονίου. Ο πυρήνας ζirkονίου είχε ενιαίο πάχος 0,7 mm παντού και καθόλου ανατομία. Ομάδα C: μονολιθικές στεφάνες θερμοσυμπιεσμένου διπυριτικού λιθίου). Επιπλέον κατά την εφαρμογή της πλάγιας φόρτισης η ομάδα C έδειξε σημαντικά υψηλότερο φορτίο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ομάδες. Στην παρούσα μελέτη όλα τα κατάγματα προέκυψαν από το σημείο φόρτισης προς το παραλιακό όριο και την εγγύς περιοχή. Επίσης παρατηρήθηκε αστοχία συνάφειας με την επικάλυψη πορσελάνης. Αυτό σημαίνει ότι οι αστοχίες δεν προήλθαν από τη διαφορετική μορφή του πυρήνα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν υπήρξε καμία θραύση πυρήνα.⁵⁸

Ο Altamimi και συν.(2014) στη μελέτη τους⁴² που αφορούσε την μέτρηση της αντοχής στη θραύση των στεφανών ζirkονίας/ φθοριοαπατίτη και των μονολιθικών στεφανών θερμοσυμπιεσμένου διπυριτικού λιθίου καθώς και να χαρακτηρίσουν τον τρόπο αστοχίας της θραύσης έδειξαν ότι κανένα δοκίμιο δεν απέτυχε κατά την κυκλική φόρτιση. Κάποια δοκίμια των ομάδων A (στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη που είχε συμπιεστεί πάνω από τον πυρήνα ζirkονίου. Ο πυρήνας ζirkονίου είχε ενιαίο πάχος 0,7 mm παντού και καθόλου ανατομία) και B (στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη όπου ο πυρήνας ζirkονίου είχε ανατομικά στοιχεία και η επικάλυψη φθοριοαπατίτη είχε πάχος 1 mm κατά προσέγγιση) παρουσίασαν επιφανειακές ρωγμές ή άλλες ατέλειες. Η μεγαλύτερη τιμή αντοχής καταγράφηκε για τις μονολιθικές στεφάνες διπυριτικού λιθίου (ομάδα C) έπειτα για τις στεφάνες με ανατομικό σχεδιασμό πυρήνα (ομάδα B) και τέλος η χαμηλότερες τιμές για την ομάδα α με τις στεφάνες ζirkονίου χωρίς ανατομικό πυρήνα. Όσο αφορά τον χαρακτηρισμό των θραύσεων οι ομάδες A και B παρουσίασαν ρωγμές και θραύσεις συνοχής στην επικάλυψη του φθοριοαπατίτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο πυρήνας ζirkονίου έμεινε άθικτος και καλυμμένος με μια λεπτή στρώση επικάλυψης.⁴² [Εικόνα 25-26]



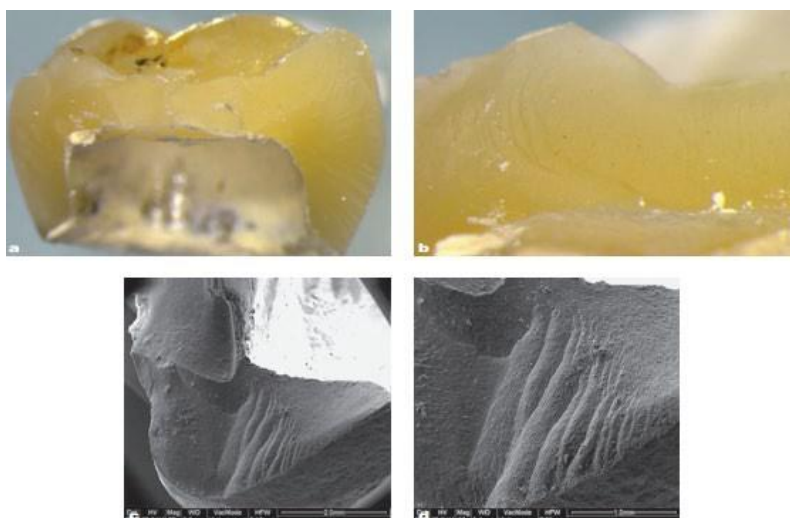
EIKONA 25: θραυσμένα δοκίμια της ομάδας Α. (στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη που είχε συμπιεστεί πάνω από τον πυρήνα ζirkονίου. Ο πυρήνας ζirkονίου είχε ενιαίο πάχος 0,7 mm παντού και καθόλου ανατομία) **a.** Θραύση της επικάλυψης φθοριοαπατίτη χωρίς έκθεση του πυρήνα ζirkονίας **b.** Θραύση της επικάλυψης φθοριοαπατίτη με έκθεση του πυρήνα ζirkονίας **c.** Δευτερεύουσα ηλεκτρονική εικόνα από το δοκίμιο με τη θραύση της επικάλυψης φθοριοαπατίτη με έκθεση του πυρήνα ζirkονίας. Τα σημεία εφαρμογής του φορτίου είναι εύκολα ορατά στην επιφάνεια του πυρήνα ζirkονίας. Η αποφλοίωση της επικάλυψης είναι πιο ξεκάθαρη στην εγγύς μασητική επιφάνεια από ότι στο εγγύς αυχενικό όριο **d.** Λεπτομέρεια από τη θραύση συνοχής στην επικάλυψη το φθόριο-απατίτη **e.** Δευτερεύουσα ηλεκτρονική φωτογραφία από τη διεπιφάνεια πυρήνα/επικάλυψης μετά τη θραύση, που δείχνει μια συνεχή μεταβατική ζώνη. ⁴²



EIKONA 26: θραυσμένα δοκίμια της ομάδας Β. (στεφάνες ζirkονίου/ φθοριοαπατίτη όπου ο πυρήνας ζirkονίου είχε ανατομικά στοιχεία και η επικάλυψη φθοριοαπατίτη είχε πάχος 1 mm κατά

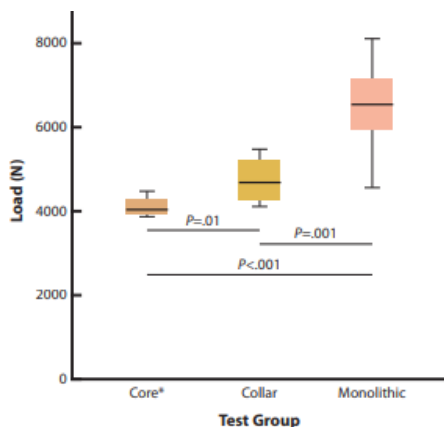
προσέγγιση) **a.** Θραύση της επικάλυψης φθοριοαπατίτη χωρίς αποφλοΐωση **b.** Αποφλοΐωση της επικάλυψης φθοριοαπατίτη με έκθεση του πυρήνα ζirkονίας **c.** Δευτερεύουσα ηλεκτρονική εικόνα από την οριακή περιοχή που αποκαλύπτει αποφλοΐωση του πυρήνα ζirkονίας. Να σημειωθεί ότι η ρωγμή του πυρήνα επεκτείνεται στο υλικό επικάλυψης και στο ακτινωτό συνεκτικό επίπεδο θραύσης του τελευταίου. **d.** Δευτερεύουσα ηλεκτρονική φωτογραφία από τη διεπιφάνεια πυρήνα/επικάλυψης μετά τη θραύση, με συνεκτική ρωγμή στο υλικό επικάλυψης, γεγονός που καταδεικνύει μια διεπιφανειακή επίδραση σκλήρυνσης του κεραμικού του φθοριοαπατίτη από το υλικό του πυρήνα ζirkονίας. ^[42]

Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ρωγμές στον πυρήνα που επεκτάθηκαν στην επικάλυψη. Η κύρια διαφορά που παρατηρήθηκε μεταξύ των ομάδων A και B ήταν ότι η αποκόλληση πυρήνα περιορίστηκε στην οριακή περιοχή για την ομάδα B σε αντίθεση με την ομάδα A που το φαινόμενο παρατηρήθηκε κυρίως στη μαθητική περιοχή. Ωστόσο και στις 2 ομάδες αυτές παρατηρήθηκε μια ισχυρή και συνεχής διεπαφή μεταξύ του πυρήνα ζirkονίου και της επικάλυψης. Όσο αφορά την ομάδα C (μονολιθικές στεφάνες διπυριτικού λιθίου) όλες οι θραύσεις ήταν καταστροφικής φύσης. Βρέθηκαν να εντοπίζονται κυρίως σε ένα επίπεδο με μεγάλες ρωγμές να εντοπίζονται στη μαθητική επιφάνεια κάτω από το σημείο φόρτισης. Παρατηρήθηκαν πολλές μικρές γραμμές ρωγμών με ακτινωτή κατανομή από το εσωτερικό όριο προς την εξωτερική επιφάνεια. Η συγκέντρωση αυτών των ρωγμών παρατηρήθηκε γύρω από τις εσωτερικές γωνίες. Φαίνεται πως η μεγαλύτερη αντοχή του εσωτερικού ορίου λόγω της παρουσίας του κολοβώματος μετέτρεψε την ακτινωτή κατεύθυνση σε μία σχεδόν παράλληλη. ⁴²[Εικόνα 27]



ΕΙΚΟΝΑ 27: Θραυσμένα δοκίμια της ομάδας C. (μονολιθικές στεφάνες διπυριτικού λιθίου) **a.** Θραύση κυρίως σε ένα πλάνο, με μεγάλες ρωγμές να εντοπίζονται στη μασητική επιφάνεια και πολλές μικρές γραμμές ρωγμών με ακτινωτή κατανομή από το εσωτερικό όριο προς την εξωτερική επιφάνεια. Να σημειωθεί πως η συγκέντρωση των μικρών ρωγμών γύρω από τις εσωτερικές γωνίες **b.** Λεπτομέρεια από το μασητικό τμήμα της προηγούμενης εικόνας, με μία χαρακτηριστική απόκλιση των ρωγμών ακτινωτά από το σημείο φόρτισης μέχρι το εσωτερικό αυχενικό όριο. **c.** Δευτερεύουσα ηλεκτρονική εικόνα ενός μονολιθικού θραυσμένου δοκιμίου από διπυριτικό λίθιο **d.** Λεπτομέρεια της προηγούμενης φωτογραφίας με μεγαλύτερη μεγέθυνση. ⁴²

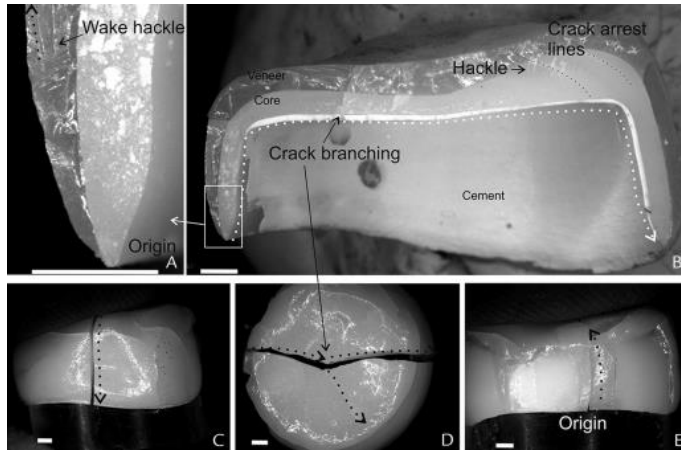
Από την μελέτη των Oilo και συν.(2016) ⁵⁹ που είχαν ως στόχο να συγκρίνουν το φορτίο θραύσης των πλήρως ανατομικών μονολιθικών στεφανών ζirkονίας και των στεφανών διαστρωματομένης ζirkονίας με και χωρίς αυχενικό σιρίτι, βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων δοκιμής. (ομάδα 1:πυρήνες, ομάδα 2:πυρίνες με σιρίτι, ομάδα 3: μονολιθικές στεφάνες) [Εικόνα 28]



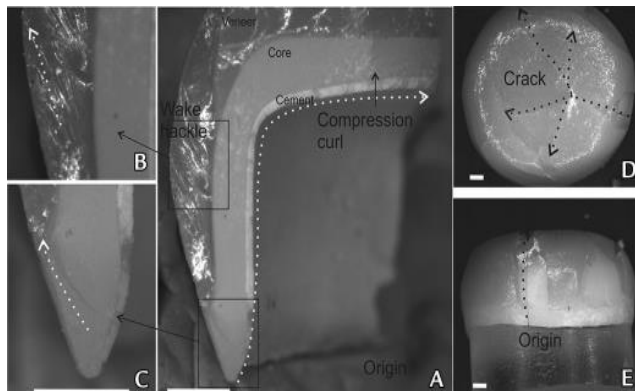
ΕΙΚΟΝΑ 28: διάγραμμα boxplot του φορτίου κατά

τη θραύση. Τα πλαίσια αντιπροσωπεύουν το 25ο και 75ο εκατοστημόριο των ευρημάτων, οι οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές και οι γραμμές σφάλματος αντιπροσωπεύουν τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές. Διαπιστώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων. Οι τιμές στις οριζόντιες ράβδους υποδεικνύουν στατιστικές διαφορές μεταξύ των ομάδων. ⁵⁹

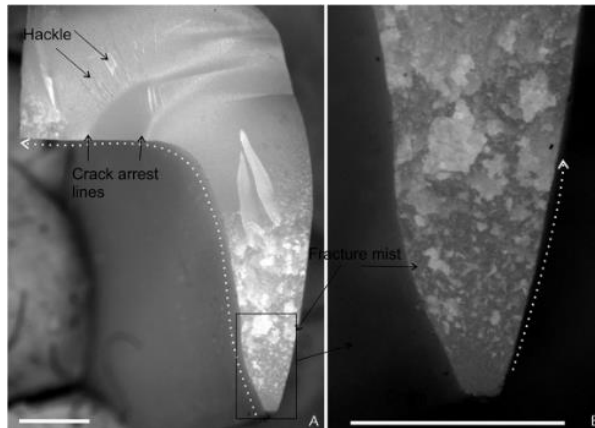
Οι φρακτογραφικές αναλύσεις αποκάλυψαν ότι η προέλευση του κατάγματος ήταν κατά κύριο λόγο στο αυχενικό όριο της εγγύς περιοχής και ήταν παρόμοια με τα κλινικά κατάγματα.



EIKONA 29: A, B, Οι τρόποι θραύσης στην ομάδα πυρήνα (A) εμφάνιζαν συνήθως 1 κύρια γραμμή θραύσης από την εγγύς προς την άπω πλευρά της στεφάνης. Οι ρωγμές συχνά διακλαδίζονται σε 1 ή 2 μερικές ή πλήρεις πρόσθετες γραμμές θραύσης. Τυπικά χαρακτηριστικά θραύσης, όπως οι γραμμές hackle και arrest που παρατηρήθηκαν τόσο στην επικάλυψη όσο και στον πυρήνα. Η κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής υποδεικνύεται με διακεκομμένα βέλη. C, D και E Επανασυναρμολογημένη στεφάνη μετά από θραύση. Προέλευση θραύσης στην στεφάνη και διάδοση της ρωγμής σε όλη την επιφάνεια της σύγκλεισης όπου διακλαδίζεται σε 2 γραμμές θραύσης. Η μία διακλάδωση σταμάτησε στην μασητική επιφάνεια, ενώ ο άλλη συνέχισε στην άλλη επιφάνεια. Κάποια επικάλυψη αποκόπηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής.⁵⁹

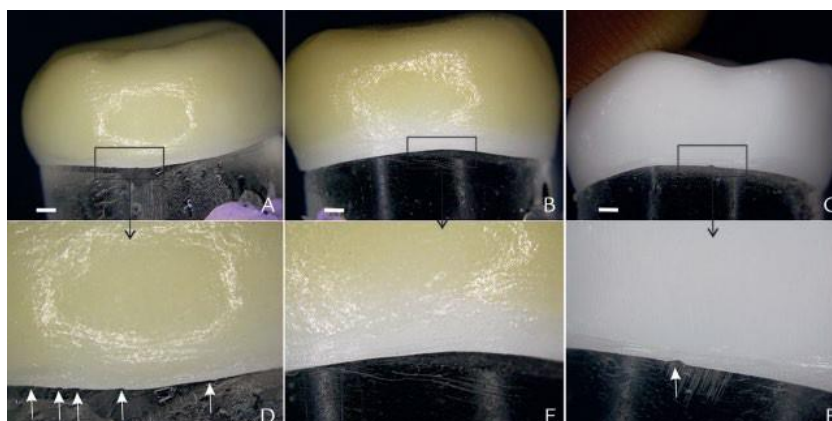


EIKONA 30: Τρόποι θραύσης στην ομάδα με σιρίτι (B) παρόμοιοι με την ομάδα πυρήνα. Οι ρωγμές θραύσης συχνά διακλαδίζονται σε περισσότερες γραμμές θραύσης από ό,τι στην ομάδα πυρήνα. Θραύση ορατή τόσο στον πυρήνα όσο και στην επικάλυψη. A, Καμπύλη συμπίεσης εμφανής εκεί όπου οι ρωγμές διακλαδίζονται. B, C, Περιοχές στα πλαίσια της εικόνας A σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, όπου φαίνεται η κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής με διακεκομμένα βέλη. D, E, Επανασυναρμολογημένη θραυσμένη στεφάνη. Η προέλευση του σπασίματος εντοπίζεται στην υπερώια αυχενική περιοχή της στεφάνης. Σε μασητική άποψη, η κύρια γραμμή θραύσης διακλαδίζεται σε 4 γραμμές θραύσης.⁵⁹



EΙΚΟΝΑ 31: A, Οι μονολιθικές στεφάνες συνήθως θραύστηκαν σε διάφορα κομμάτια και η επανασυναρμολόγηση ήταν δύσκολη. Οι εικόνες δείχνουν το κομμάτι όπου τα χαρακτηριστικά του καταγματος είναι ξεκάθαρα δείχνουν διάδοση της ρωγμής (διακεκομμένα βέλη) από το αυχενικό όριο προς τη μασητική επιφάνεια . B, Περιοχή με πλαίσιο σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στη συνδεδεμένη εικόνα. Περιοχή προέλευσης επίπεδη και κανονική (καθρέφτης), ακολουθούμενη από περιοχή με αποφλοίωση και ανωμαλίες (ομίχλη), ενώ οι υπόλοιπες επιφάνειες θραύσης αξιοσημείωτα λείες. ⁵⁹

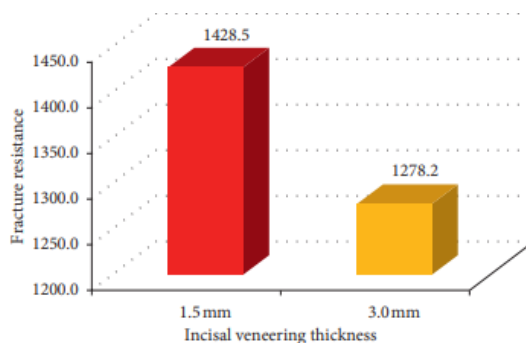
Μια μονολιθική στεφάνη είχε θραύση μασητικής προέλευσης. Παρατηρήθηκαν φρακτογραφικά χαρακτηριστικά τόσο στον πυρήνα όσο και στο κεραμικό επικάλυψη. Η προέλευση των καταγμάτων ήταν συνήθως μια επίπεδη ομαλή περιοχή στο υλικό του πυρήνα ακολουθούμενη από μια τραχιά επιφάνεια με αποφλοίωση του πυρήνα ζirkονίας. Οι μονολιθικές στεφάνες θραύστηκαν σε περισσότερα κομμάτια από αυτές που ήταν πυρήνας με κεραμική επικάλυψη. Οι περισσότερες από τις στεφάνες της ομάδας A (πυρήνες χωρίς ανατομία) θραύστηκαν σε 2 ή 3 κομμάτια ενώ οι στεφάνες της ομάδας B (πυρήνες με σιρίτι) παρουσίασαν περισσότερες από τρεις γραμμές θραύσης. 26 από τις 30 στεφάνες είχαν μικρές ατέλειες ή αποφλοίωση στο οριακό αυχενικό άκρο πριν τη δοκιμή. ⁵⁹[Εικόνες 29-31]



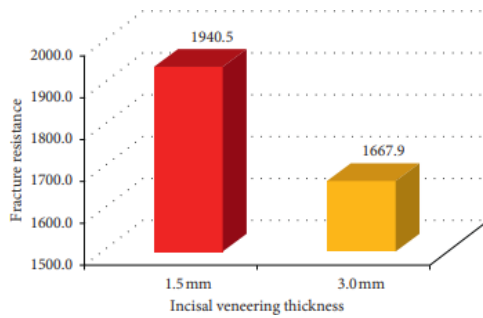
ΕΙΚΟΝΑ 32: Η ποιότητα των αυχενικών ορίων της στεφάνης ποικίλλει, αλλά δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων δοκιμής. Μόνο 4 στεφάνες άψογες. **A**, στεφάνη πυρήνα/επικάλυψη με πολλαπλά ελαττώματα (βέλη). **B**, στεφάνη με επικάλυψη πυρήνα και σιρίτι χωρίς ελαττώματα στο αυχενικό όριο. **C**, στεφάνη ανατομικού περιγράμματος με ένα ελάττωμα στο αυχενικό όριο (βέλος). **D**, Αντιπροσωπεύει την περιοχή με πλαίσιο στην εικόνα **A**. **E**, Αναπαριστά την περιγεγραμμένη περιοχή στην εικόνα **B**. **F**, Αναπαριστά την περιγεγραμμένη περιοχή στην εικόνα **C**.⁵⁹

Σε 10 στεφάνες το κάταγμα προήλθε από προϋπάρχουσα ατέλεια του αυχενικού ορίου ενώ στα υπόλοιπα 20 δείγματα δεν εντοπίστηκαν ελαττώματα σε αυτή την περιοχή πριν τη δοκιμή. [Εικόνα 32] Η κεραμική επικάλυψη δεν διαχωρίστηκε από τον πυρήνα πριν από την πλήρη θραύση σε καμία στεφάνη.⁵⁹

Από την μελέτη των Badran και συν.(2019) , όπου μετρήθηκε η αντοχή σε θραύση δύο διαφορετικών παχών πορσελάνης κοπτικής επένδυσης για ένα κεντρικό τομέα της άνω γνάθου κατασκευασμένο είτε με το ολοκεραμικό σύστημα (ζirkόνιο/πορσελάνη) είτε με το συμβατικά χρησιμοποιούμενο σύστημα μεταλλοκεραμικής στεφάνης αποκαλύφθηκε ότι υπήρχε σημαντική διαφορά στην αντοχή στη θραύση μεταξύ των δύο μεγεθών κεραμικών κοπτικών επιστρώσεων και στις δύο ομάδες (ολοκεραμικές και μεταλλοκεραμικές στεφάνες). Για την ομάδα 1 ολοκεραμικής ζirkονίας τα δοκίμια της υποομάδας 1α (στεφάνες ζirkονίας με πάχος κεραμικού επικάλυσης στο κοπτικό άκρο 1,5mm) παρουσίασαν υψηλότερες μέσες τιμές από εκείνα της υποομάδας 1β (στεφάνες ζirkονίας με πάχος κεραμικού επικάλυσης στο κοπτικό άκρο 3mm). Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και για την ομάδα 2 με τα μεταλλοκεραμικά δοκίμια.⁶⁰ [Εικόνα 33-34]

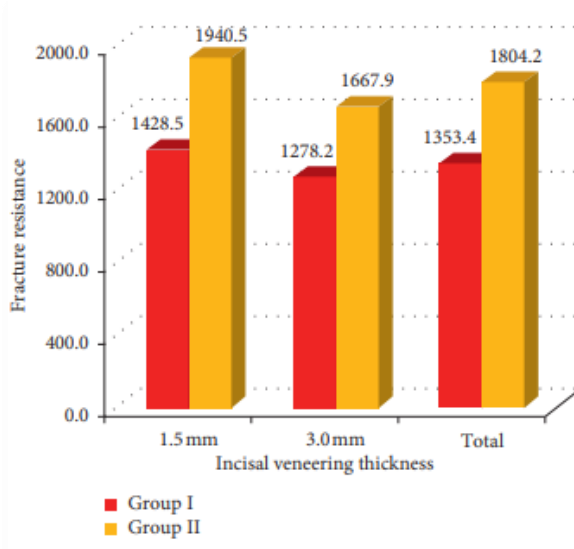


ΕΙΚΟΝΑ 33: Ραβδόγραμμα που δείχνει την αντοχή σε θραύση των δύο κοπτικών παχών επίστρωσης σε ομάδες ολοκεραμικής ζirkονίας CAD/CAM.⁶⁰



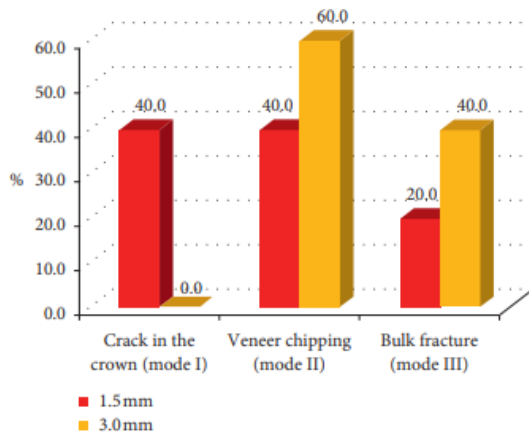
ΕΙΚΟΝΑ 34: Ραβδόγραμμα που δείχνει την αντοχή σε θραύση δύο παχών επίστρωσης σε ομάδες μέταλλο/κεραμικό νικελίου-χρωμίου.⁶⁰

Ωστόσο τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι υπήρχε διαφορά στην αντοχή στη θραύση μεταξύ των δύο ομάδων. Η ομάδα 2 των μεταλλοκεραμικών παρουσίασε υψηλότερη μέση τιμή από τη μέση τιμή της ομάδας των ολοκεραμικών.⁶⁰ [Εικόνα 35]



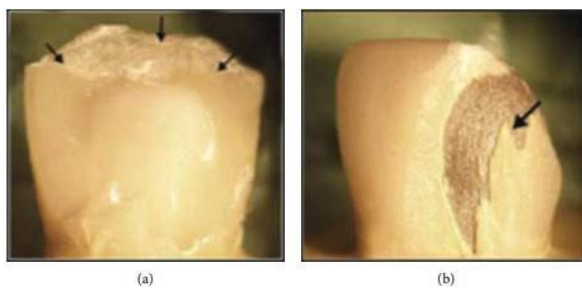
ΕΙΚΟΝΑ 35: Ραβδόγραμμα που δείχνει την αντοχή σε θραύση των δύο μελετώμενων ομάδων.⁶⁰

Όσο αφορά τους τρόπους θραύσης διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε σημαντική διαφορά στις δύο ομάδες και στις υποομάδες τους. Το 50% του συνόλου υπέδειξε αποφλοίωση, το 35% ορατή ρωγμή και το 15% θραύση όγκου.⁶⁰ [Εικόνα 36-39]



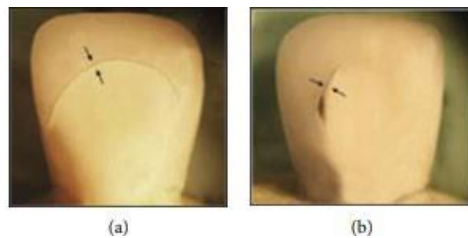
ΕΙΚΟΝΑ 36: Ραβδόγραμμα που δείχνει

τον τρόπο θραύσης κάθε πάχους επικάλυψης και στις δύο ομάδες.⁶⁰



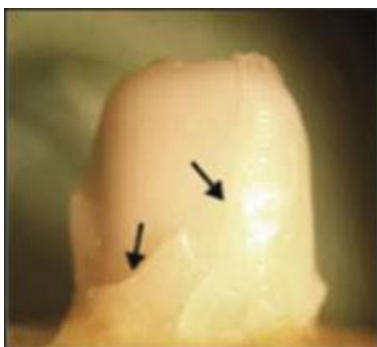
ΕΙΚΟΝΑ 37: Τρόπος θραύσης II

(αποκόλληση επικάλυψης) στο στερεομικροσκόπιο: (a) ολοκεραμικό- (b) μεταλλοκεραμικό.⁶⁰



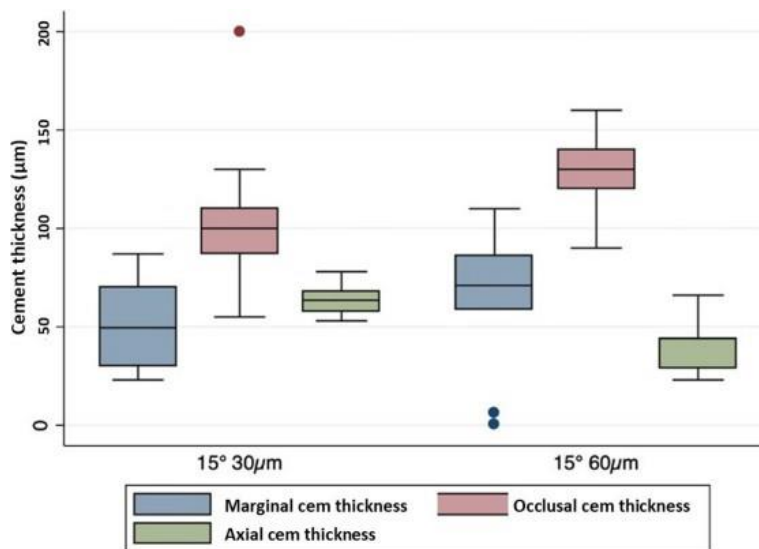
ΕΙΚΟΝΑ 38: Τρόπος θραύσης I (ορατή ρωγμή) που ανιχνεύεται στο στερεομικροσκόπιο: (a)

ολοκεραμικό (b) μέταλλο – κεραμικό⁶⁰



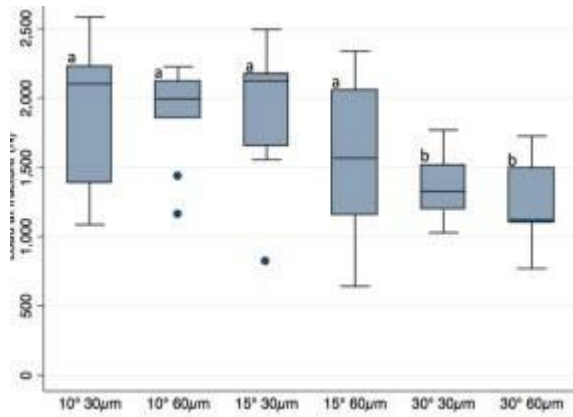
ΕΙΚΟΝΑ 39: Τρόπος θραύσης III (θραύση όγκου) σε ολοκεραμικό δοκίμιο.⁶⁰

Από τη μελέτη των Schiwer και συν.(2021) ⁶¹ που αφορά την μέτρηση της αντοχής στη θραύση μονολιθικών στεφανών ζirkονίας και κατά πόσο ο προκαθορισμένος χώρος κονίας ή η κωνικότητα και συνεπώς το πάχος του τοιχώματος της αποκατάστασης την επηρεάζουν, αναφέρεται στα αποτελέσματα σχετικά με το πάχος κονίας, πως δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στο πάχος κονίας της μασητικής ή αυχενικής περιοχής μεταξύ των ομάδων με διαφορετικό χώρο κονίας. Η ομάδα με χώρο κονίας 60μm είχε σημαντικά μειωμένο πάχος κονίας σε σύγκριση με την ομάδα με χώρο κονίας 30μm. [Εικόνα 40]



EIKONA 40: Boxplot του Tukey για τα πάχη κονίας με τα διάφορα προκαθορισμένα διαστήματα κονίας. Δεν υπήρξε σημαντική διαφορά του πάχους κονίας μεταξύ των ομάδων ($p > 0,05$). Η ομάδα με διάστημα κονίας 60μm είχε σημαντικά μειωμένο αξονικό πάχος κονίας σε σχέση με την ομάδα με διάστημα κονίας 30 μm ($p < 0,05$). ⁶¹

Όσο αφορά το φορτίο κατά τη θραύση υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των εξεταζόμενων ομάδων. [Εικόνα 41]

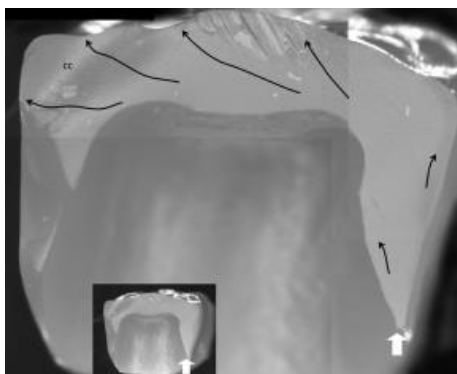


ΕΙΚΟΝΑ 41: Βοχplot του Tukey του φορτίου κατά τη θραύση των διαφορετικών κωνικοτήτων και πάχους κωνίας. Οι ομάδες με τα ίδια υπερθητικά γράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ($p > 0,05$).⁶¹

Το εύρος για τις διάφορες ομάδες ήταν:

- 10° -> 1087 N - 2583 N
- 15° -> 642 N -2495 N
- 30° -> 771 N – 1769 N

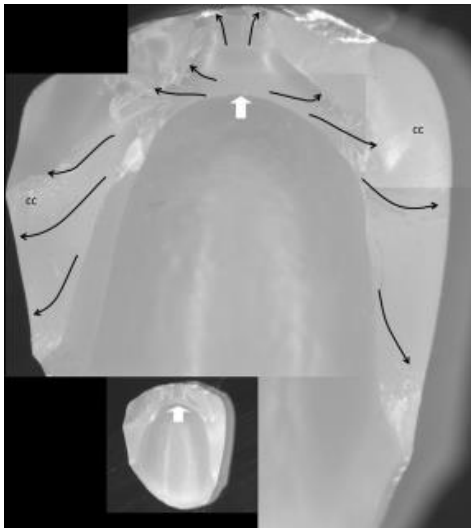
Τα δοκίμια με κλίση 30° είχαν σημαντικά χαμηλότερο φορτίο κατά τη θραύση από τις άλλες ομάδες. Δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές στο φορτίο κατά τη θραύση μεταξύ των ομάδων με διαφορετικό χώρο κωνίας και ίδια κωνικότητα. Όσο αφορά τον τρόπο θραύσης, τα αποτελέσματα των φρακτογραφικών αναλύσεων έδειξαν ότι η προέλευση της θραύσης για 47 από τις 60 στεφάνες ήταν στην αυχενική περιοχή. Το κάταγμα ξεκινούσε κοντά στη κορυφή της καμπυλότητας στην εγγύς ή άπω αυχενική περιοχή της στεφάνης.⁶¹ [Εικόνα 42]



ΕΙΚΟΝΑ 42: Ένας φρακτογραφικός χάρτης για μια αντιπροσωπευτική στεφάνη (30°, 60 μm).

Η προέλευση του κατάγματος εντοπίστηκε στην αυχενική περιοχή. (λευκό βέλος). Η προέλευση περιβάλλεται από ένα επίπεδο ομαλή περιοχή ("ομιχλώδες κάταγμα"). Τα λεπτά μαύρα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση των γραμμών που εκτείνονται από το κάταγμα. και το CC δείχνει τις καμπύλες συμπίεσης που σηματοδοτούν το μακρινό άκρο της διαδρομής θραύσης όπου η δύναμη τάσης μετατρέπεται σε δύναμη συμπίεσης.⁶¹

Στη συνέχεια η ρωγμή διαδόθηκε προς και μέσω της μασητικής επιφάνειας ακολουθώντας τη διαδρομή της μικρότερης αντίστασης προς την απέναντι αυχενική περιοχή. Συγκεκριμένα, αυτά τα κατάγματα ξεκίνησαν από την εσωτερική επιφάνεια προς την εγγύς αυχενική περιοχή και στις δύο πλευρές.⁶¹ [Εικόνα 43]



ΕΙΚΟΝΑ 43: Φρακτογραφικός χάρτης που απεικονίζει τη θραύση μιας αντιπροσωπευτικής στεφάνης (15°, 30 μm). Η προέλευση της θραύσης εντοπίστηκε στην εσωτερική επιφάνεια της μασητικής περιοχής (λευκό βέλος). Τα λεπτά μαύρα βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση, και το CC δείχνει την καμπύλη συμπίεσης.⁶¹

Τα αποτελέσματα των in vitro ερευνών που προαναφέρθηκαν κατέληξαν ότι:

Και τα δύο είδη παρασκευής (συνδυασμός μικρής ή μεγαλύτερης κωνικότητας κολοβώματος με χώρο κονίας 30μm ή 60μm) έχουν ισχυρή αντοχή στη θραύση μεγαλύτερη από τις δυνάμεις δήξης οπότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο. Βεβαίως λόγω της μεγαλύτερης αντοχής της παρασκευής με βάθρο συνιστάται η χρήση του καθώς θα μπορούσε να βελτιώσει την εμβιομηχανική απόδοση των οπίσθιων στεφάνων από αλουμίνα.⁶¹ Ο σχεδιασμός

του πυρήνα ζirkονίας επηρέασε το φορτίο θραύσης της ολοκεραμικής στεφάνης και η διαμόρφωση της ακρολοφίας για την επίτευξη ομοιόμορφου πάχους της πορσελάνης επικάλυψης παρουσίασε μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση.⁵⁸ Η αστοχία των στεφανών ζirkονίου/επικάλυψης περιλήφθηκαν κυρίως στην θερμοσυμπιεσμένη υαλοκεραμική επικάλυψη η οποία αποτέλεσε τον αδύναμο κρίκο στο σύμπλεγμα της στεφάνης. Επίσης, όταν ο πυρήνας ζirkονίου παρέχει επαρκή υποστήριξη στην επικάλυψη η αντοχή της αποκατάστασης ήταν βελτιωμένη. Επιπλέον, ο τρόπος θραύσης των στεφανών διπυριτικού λιθίου ήταν πλήρως καταστροφικός ενώ η αντοχή του στη θραύση παρατηρήθηκε να είναι υψηλότερη από αυτή των επικαλυμμένων στεφανών.⁴² Το πάχος του τοιχώματος της στεφάνης και ο οριακός σχεδιασμός (με σιρίτι ή χωρίς) επηρεάζουν το φορτίο κοντά στη θραύση. Ο μονολιθικός ανατομικός σχεδιασμός έδωσε υψηλότερα φορτία κατά τη θραύση από το σχεδιασμό πυρήνα με κεραμική επικάλυψη. Οι στεφάνες ζirkονίας με αυχενικό σιρίτι παρουσίασαν υψηλότερο φορτίο κατά τη θραύση (υψηλότερη αντοχή θραύσης) από τις απλές στεφάνες ζirkονίας με κεραμικό επικάλυψης αλλά χαμηλότερο από τις μονολιθικές στεφάνες.⁵⁹ Τα χαρακτηριστικά θραύσης εξακολουθούν να υπογραμμίζουν την απαίτηση ενός σχεδιασμού πυρήνα που υποστηρίζει ένα σταθερό ομοιόμορφο πάχος του κεραμικού επικάλυψης.⁶⁰ Η μεγάλη κωνικότητα παρασκευής μείωσε το φορτίο κατά τη θραύση των στεφανών από μονολιθική ζirkονία. Ένας μεγαλύτερος προκαθορισμένος χώρος κόνιας βελτίωσε την έδραση αλλά δεν επηρέασε το φορτίο κατά τη θραύση.⁶¹

4.2 Μελέτη της επίδρασης του σχεδιασμού στην αντοχή σε κόπωση των ολοκεραμικών στεφανών.

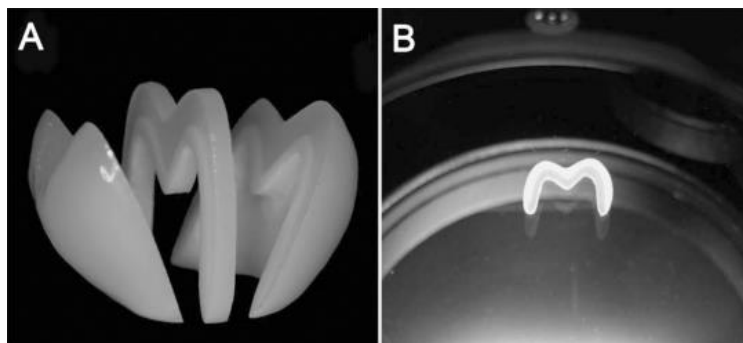
Το στοματικό περιβάλλον εκθέτει τις οδοντικές αποκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των ολοκεραμικών στεφανών, σε ένα δυναμικό εύρος δυνάμεων κατά τη μάσηση, την ομιλία και άλλες λειτουργικές δραστηριότητες. Αυτές οι δυνάμεις είναι κυκλικής φύσης και μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβη με την πάροδο του χρόνου. Τα κεραμικά υλικά, παρά τις εξαιρετικές αισθητικές τους ιδιότητες και τη βιοσυμβατότητά τους, είναι εύθραυστα και επιρρεπή στην έναρξη και τη διάδοση ρωγμών υπό κυκλική φόρτιση. Η διαδικασία κόπωσης στις ολοκεραμικές στεφάνες αρχίζει συνήθως με το σχηματισμό μικρορωγμών στο

εσωτερικό του υλικού. Αυτές οι μικρορωγμές αρχικά είναι μικροσκοπικές και μη ανιχνεύσιμες αλλά με τη πάροδο του χρόνου μπορούν να πολλαπλασιαστούν και να διαδοθούν και τελικά να οδηγήσουν σε ορατές ρωγμές ή θραύσεις.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του σχεδιασμού στην αντοχή σε κόπωση των ολοκεραμικών στεφανών διάφοροι ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Belli και συν.(2012) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να προσδιορίσουν τον συντελεστή φωτοελαστικότητας δύο διαφορετικών κεραμικών επικαλύψεων που χρησιμοποιούνται για επικάλυψη σκελετών ζirkονίας και να μετρήσουν τη χωρική κατανομή και το μέγεθος των υπολειπόμενων τάσεων που δημιουργούνται σε όλη την κεραμική επικάλυψη σε στεφάνες ζirkονίας που ψύχονται, ακολούθησαν δύο διαφορετικά πρωτόκολλα ψύξης.⁶² Οι Dibner και συν.(2016) στη μελέτη τους είχαν στόχο να εξετάσουν την υπόθεση ότι το πάχος του κεραμικού πυρήνα έχει ελάχιστη επιρροή στην αντοχή κόπωσης ενός διαστρωματωμένου κεραμικού σε σταθερό συνολικό πάχος.⁶³ Οι Fardin και συν.(2016) στη μελέτη τους είχαν στόχο τη διερεύνηση της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης και των τρόπων αστοχίας ολοκεραμικών (πορσελάνη/ζirkονία) και μεταλλοκεραμικών στεφανών με ομοιόμορφο πάχος ή τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού.⁶⁴

Οι Belli και συν.(2012) στη μελέτη τους⁶² χρησιμοποίησαν κεραμικές επικαλύψεις με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής για τη δημιουργία υψηλής ή χαμηλής θερμικής αναντιστοιχίας με τον πυρήνα ζirkονίας. Ένας δεύτερος προγόμφιος παρασκευάστηκε και σαρώθηκε για την κατασκευή 12 πυρήνων ζirkονίας πάχους 0,7 mm. Οι πυρήνες επικαλύφθηκαν με τα δύο διαφορετικά κεραμικά επικάλυψης (Lava Ceram και VM9) για να δημιουργηθεί υψηλή ή χαμηλή αναντιστοιχία με τον πυρήνα ζirkονίου και στο τελευταίο κύκλο όπτησης της πορσελάνης οι στεφάνες ψύχθηκαν ακολουθώντας αργό ή γρήγορο τρόπο ψύξης. Η γρήγορη ψύξη αποτελούνταν από το άμεσο άνοιγμα του φούρνου μετά την όπτηση, εκθέτοντας έτσι τη στεφάνη στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος (23 °C). Μετά το τέλος του προγράμματος όπτησης, στο πρόγραμμα της αργής ψύξης, η πόρτα του φούρνου άνοιξε μόνο κατά 10%, ανοίγοντας εντελώς μόλις η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φούρνου έφθανε στους 200 °C. Ένα θερμοστοιχείο τύπου K

χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ρυθμών ψύξης σύμφωνα με τα προγράμματα ταχείας ή αργής ψύξης στην ίδια θέση που πυροσυσσωματώθηκαν οι στεφάνες μέσα στο φούρνο. Καταγράφηκαν οι ρυθμοί ψύξης των 600 °C/min και 30°C/min για τα πρωτόκολλα ταχείας και αργής ψύξης αντίστοιχα. Έπειτα οι στεφάνες κόπηκαν σε φέτες πάχους 1mm από τη μέση τους. Για τον υπολογισμό της φωτοελαστικότητας κατασκευάστηκαν 3 δίσκοι από κάθε κεραμικό επικάλυψης, που χρησιμοποιήθηκε στις στεφάνες, και πυροσυσσωματώθηκαν και ψύχθηκαν με αργό πρόγραμμα ψύξης ώστε να μην εγκλωβίσουν τάσεις στο εσωτερικό τους. Οι δίσκοι τοποθετήθηκαν σε μία μηχανή γενικών δοκιμών και υποβλήθηκαν σε δοκιμή διαμήκους εφελκυσμού ενώ φωτίζονταν από δέσμη πολωμένου φωτός σε ένα πολωσισκόπιο το οποίο κατέγραφε τη σχετική καθυστέρηση των κυμάτων στο κέντρο των δίσκων κατά την εφαρμογή φορτίου σε διαστήματα 50N έως 500N.⁶² [Εικόνα 44]



EIKONA 44: Κατασκευή του δείγματος και μέτρηση της διπλοθλαστικότητας της τάσης. (A)

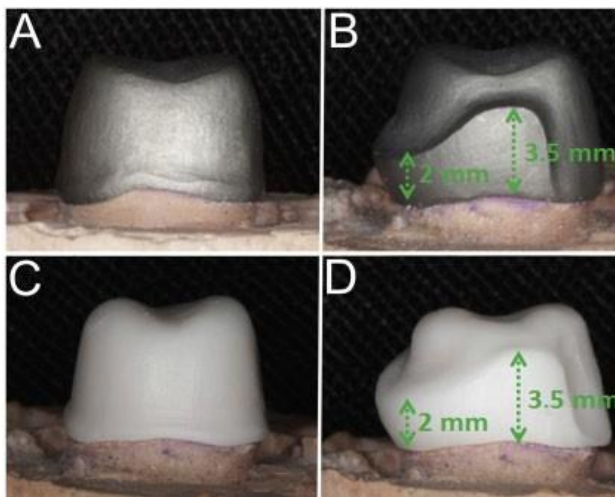
Δύο παράλληλες τομές πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος του συγκλεισιακού επιπέδου των στεφανών για τη λήψη τομών πάχους ~1,0 mm. (B) ένα δείγμα διαφωτίζεται με πολωμένο φως για τη μέτρηση της διπλοθλαστικότητας τάσης.⁶²

Για τη μέτρηση του μεγέθους της παραμένουσας τάσης και της χωρικής κατανομής μέσω της μέτρησης της διπλοθλαστικότητας, χρησιμοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης με απεικόνιση, το οποίο αποτελείται από ένα αυτόματο πολωσίμετρο ή πολωσισκόπιο συνδεδεμένο με έναν υπολογιστή όπου τα δεδομένα αναλύονται από λογισμικό. Η συσκευή του πολωσιμέτρου αποτελούνταν από μια πηγή φωτός, έναν ανιχνευτή, 2 πολωτές και μια πλάκα τεταρτοκυματικής ακτινοβολίας. Όταν ένα γραμμικά πολωμένο φως μεταδίδεται μέσω ενός ισότροπου υλικού, το διάνυσμα του πεδίου που προκύπτει είναι ένας κύκλος. Όταν όμως το πολωμένο φως διέρχεται μέσα από ένα διπλοθλαστικό υλικό, η καθυστέρηση φάσης

σχηματίζει μια έλλειψη. Προσδιορίζοντας τον λόγο μεταξύ των αξόνων της έλλειψης, μπορεί κανείς να προσδιορίσει την καθυστέρηση. Η πλάκα τεταρτοκυματικής πόλωσης, που τοποθετείται μεταξύ του δείγματος και του δεύτερου πολωτή (που ονομάζεται "αναλυτής"), μετατρέπει το ελλειπτικά πολωμένο φως πίσω σε γραμμικά πολωμένο φως. Η γωνία ελλειπτικότητας προσδιορίζεται με την περιστροφή του αναλυτή.⁶²

Οι Dibner και συν.(2016) στη μελέτη τους⁶³ που αφορούσε τη μέτρηση της αντοχής σε κόπωση ενός διαστρωματωμένου κεραμικού σε σταθερό συνολικό πάχος, χρησιμοποίησαν ελαφρώς υπερμεγέθη δείγματα διπυριτικού λιθίου κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια υπολογιστή/(CAD/CAM) για να δημιουργηθούν πυρήνες με πάχη 0,5, 0,75, 1,0, και 1,5 mm. Αυτοί οι πυρήνες στάλθηκαν στη συνέχεια στον κατασκευαστή για να επικαλυφθούν με κεραμικό επικάλυψης (IPS e.maxCeram) με πάχη πυρήνα/κεραμικού επικάλυψης 0,5/1,0 mm (n=29), 0,75/0,75 mm (n=42), 1,0/0,5 mm (n=40) και 1,5/0,0 mm (n=48). Διασφαλίστηκε ότι το συνολικό πάχος ήταν 1,5 mm για όλα τα δείγματα. Οι βάσεις κατασκευάστηκαν από ένα υλικό από εποξειδικές ίνες γυαλιού, το οποίο παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή της ενυδατωμένης οδοντίνης. Τα δείγματα ακινητοποιήθηκαν στις βάσεις. Τα δείγματα εξετάστηκαν μετά από αποθήκευση 2 εβδομάδων σε απιονισμένο νερό στους 37°C. Χρησιμοποιήθηκε ένα στατιστικό πρωτόκολλο κλιμακωτής ευαισθησίας. Η κυκλική φόρτιση έγινε με σερβοϋδραυλικό μηχάνημα υπό έλεγχο φορτίου. Τα ακινητοποιημένα δοκίμια ήταν στερεωμένα σε μια βάση στήριξης στον πυθμένα ενός φρεατίου από ανοξείδωτο χάλυβα που περιείχε απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία δωματίου. Οι δίσκοι φορτίζονταν κεντρικά χρησιμοποιώντας το έμβολο G10 διαμέτρου 2 mm. Εφαρμόστηκε ημιτονοειδής κυκλική φόρτιση σε κεραμικά δοκίμια με συχνότητα 20 Hz από 10 N έως το φορτίο-στόχο για 500.000 κύκλους. Αφού ολοκληρώθηκε η κυκλική φόρτιση, τα δοκίμια εξετάστηκαν για υποεπιφανειακό σχηματισμό ρωγμών με διαφώτιση. Σχεδόν σε όλα τα δοκίμια, οι ρωγμές κόπωσης ήταν υποεπιφανειακές ακτινικές ρωγμές, και μόνο αυτές χρησιμοποιήθηκαν για στατιστική ανάλυση.⁶³

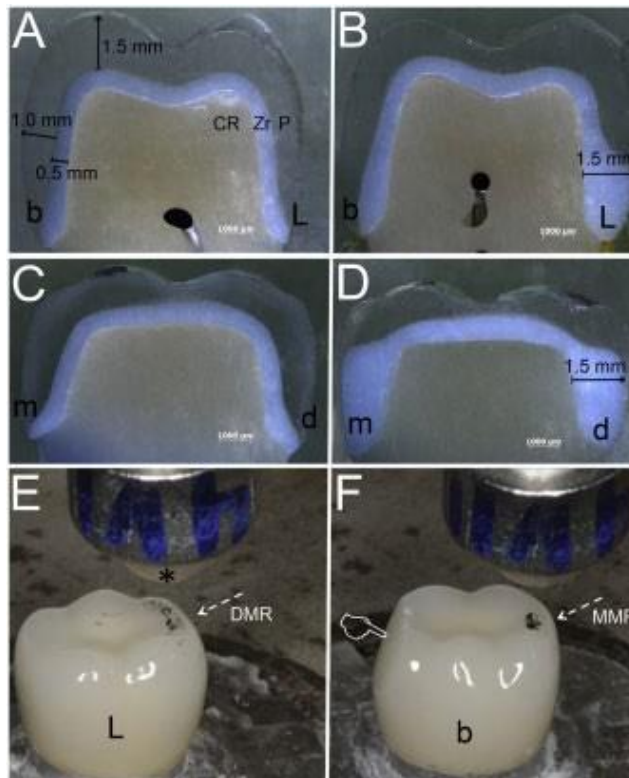
Οι Fardin και συν.(2016) στη μελέτη τους ⁶⁴ που διερευνούσε τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης και τους τρόπους αστοχίας ολοκεραμικών (πορσελάνη/ζirkονία) και μεταλλοκεραμικών στεφανών με ομοιόμορφο πάχος ή τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού, χρησιμοποίησαν ένα τεχνητό πρώτο γομφίο της κάτω γνάθου που τοποθετήθηκε σε ομοίωμα κεφαλής ανθρώπου (fantom) για την πλήρη παρασκευή στεφάνης. Τα αντίγραφα του παρασκευασμένου δοντιού (n= 40) ελήφθησαν με αποτύπωμα με υλικό πολυβινυλοσιλοξάνης, ακολουθούμενο από φωτοσκλήρυνση σύνθετης ρητίνης. Αυτά τα αντίγραφα αποθηκεύτηκαν σε υποδοχεία αποσταγμένου νερού για 30 ημέρες για να παρέχουν υγρασκοπική διαστολή και να ελαχιστοποιήσουν την αλλοίωση των διαστάσεων. Τα αντίγραφα κατανεμήθηκαν τυχαία σε δύο ομάδες (n= 20 εκάστη) ανάλογα με το σύστημα στεφάνης που χρησιμοποιήθηκε: μεταλλικό-κεραμικό (A) ή ζirkονία- πορσελάνη (B). Στη συνέχεια, κάθε ομάδα υποδιαιρέθηκε (n= 10 η κάθε μία) ανάλογα με το σχεδιασμό του σκελετού που περιλάμβανε είτε πυρήνα με ομοιόμορφο πάχος (A και B) είτε τροποποιημένο σχεδιασμό (A1 και B1). Οι ομάδες με ομοιόμορφο πάχος παρουσίαζαν ένα κάλυμμα πάχους 0,5 mm και ο τροποποιημένος σχεδιασμός πυρήνα περιλάμβανε ομοιόμορφο πάχος 0,5 mm με γλωσσικό σιρίτι πάχους 1 mm και ύψος 2,0 mm, που συνδεόταν με εγγύς επεκτάσεις ύψους 3,5 mm. ⁶⁴ [Εικόνα 45]



EIKONA 45: Προσεγγιστική άποψη μεταλλοκεραμικού σκελετού ομοιόμορφου πάχους (A) και τροποποιημένου σχεδίου μεταλλοκεραμικού σκελετού (B) και πυρήνα ζirkονίας ομοιόμορφου πάχους (C) και τροποποιημένος σχεδιασμός πυρήνα ζirkονίου ομάδες και οι αντίστοιχες διαστάσεις τους. (D) ⁶⁴

Για την κατασκευή των στεφανών A, ένα αποτύπωμα κάθε αντιγράφου σύνθετης ρητίνης κατασκευάστηκε με υλικό πολυαιθέρα και χυτεύθηκε, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν συνολικά 20 γύψινες μήτρες. Οι ομοιόμορφου πάχους και τροποποιημένοι μεταλλικοί πυρήνες (κοβάλτιο-χρώμιο) κατασκευάστηκαν με κεριά και χυτεύτηκαν σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Η κεραμική επικάλυψη τοποθετήθηκε και ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του κατασκευαστή για το πρόγραμμα. Η διαφάνεια του κεραμικού επικάλυψης επιλέχθηκε για να διευκολύνει την επιθεώρηση των ρωγμών κατά τη διάρκεια των κύκλων κόπωσης. Οι πυρήνες Y-TZP κατασκευάστηκαν με σύστημα CAD/CAM. Το παρασκευασμένο δόντι έλαβε ένα στρώμα αντίθεσης για να επιτραπεί η ψηφιακή σάρωσή του. Με το λογισμικό δημιουργήθηκε πυρήνας με πάχος 0,5 mm (B1). Η ομάδα B1 κατασκευάστηκε αντιγράφοντας την ομάδα A1 με τη χρήση επιτραπέζιου σαρωτή. Η κεραμική επικάλυψη τοποθετήθηκε και ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του κατασκευαστή για το πρόγραμμα. Κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε σε αρθρωτήρα η μασητική επιφάνεια ενός γομφίου, προκειμένου να τυποποιηθεί η ανατομία της σύγκλεισης κατά την όπτηση πορσελάνης. Το πάχος της πορσελάνης ήταν 1,0 mm στα αξονικά τοιχώματα και 1,5 mm στην μασητική επιφάνεια. Όλες οι στεφάνες συγκολλήθηκαν στα αντίγραφα σύνθετης ρητίνης με κονία ρητίνης. Τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε απεσταγμένο νερό στους 37°C μεταξύ 24-48h πριν από τη δοκιμή.

⁶⁴ Ο εξοπλισμός κόπωσης παρείχε κυκλική φόρτιση χωρίς πλευρική μετακίνηση σε εύρος φορτίου 30-300 N για 106 κύκλους στα 2 Hz έως την αστοχία, υπό απεσταγμένο νερό στους 37°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). Η φόρτιση εφαρμόζοταν στη μασητική επιφάνεια με σφαιρικό γυαλισμένο μονολιθικό ενθέτη από διπυριτικό λίθιο διαμέτρου 3,18 mm, ο οποίος αντικαθίστατο κάθε 500.000 κύκλους. Η φόρτιση κόπωσης εφαρμόστηκε στην εγγύς μασητική επιφάνεια μέχρι την αστοχία και στη συνέχεια με την ίδια μεθοδολογία στην άπω μασητική επιφάνεια. ⁶⁴ [Εικόνα 46]

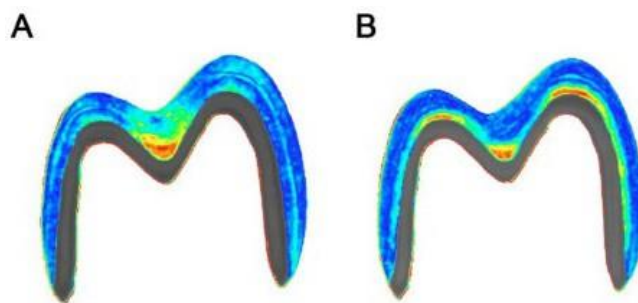


ΕΙΚΟΝΑ 46: Μικροφωτογραφίες που δείχνουν τις διαστάσεις του πυρήνα και της πορσελάνης επικάλυψης σε μια πάρειο-γλωσσική τομή ενός δείγματος ζirkονίας-κεραμικού με ομοιόμορφο πάχος (A) και με τροποποιημένο σκελετό όπου η κύρια διαφορά είναι η παρουσία του γλωσσικού σιριτιού (B). Εικόνες C και D είναι εγγύς τομές στεφανών ζirkονίας-κεραμικού με ομοιόμορφο πάχος και τροποποιημένο σκελετό, αντίστοιχα, όπου η φαίνεται η διάσταση του εγγύς σκέλους. Για την τυποποίηση της θέσης επαφής του ενθέτη, χρησιμοποιήθηκε χαρτί δείξης και το φορτίο εφαρμόστηκε στην άνω οριακή περιοχή (DMR, διακεκομμένο βέλος) (E) μέχρι τη θραύση (F), η οποία σε αυτό το σενάριο, λόγω της επέκτασης του κατάγματος, επέτρεψε την περιστροφή του ενσωματωμένου συγκροτήματος στεφάνης και την κόπωση της εγγύς οριακής περιοχής (MMR).⁶⁴

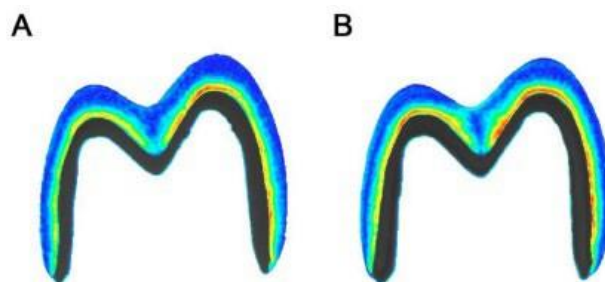
Κάθε 125.000 κύκλους η δοκιμή κόπωσης διακόπηκε για την επιθεώρηση των στεφανών και της επιφανειακής βλάβης του κεραμικού επικάλυψης υπό στερεομικροσκόπιο που φωτιζόταν από εξωτερική πηγή φωτός. Ως κριτήρια αστοχίας χρησιμοποιήθηκαν η θραύση της συνοχής της πορσελάνης ή η αποκόλληση του κεραμικού επικάλυψης ή η θραύση του πυρήνα σε όγκο. Χρησιμοποιήθηκε ένα διάγραμμα Weibull για την απεικόνιση της κατανομής των δεδομένων σε συνάρτηση με τους πραγματοποιημένους κύκλους.⁶⁴

Τα αποτελέσματα των in vitro ερευνών που προαναφέρθηκαν κατέληξαν ότι:

Στη μελέτη των Belli και συν.(2012)⁶² όπου μελετήθηκε ο συντελεστής φωτοελαστικότητας δύο διαφορετικών κεραμικών επικαλύψεων που χρησιμοποιούνται για επικάλυψη σκελετών ζirkονίας και να μετρήθηκε η χωρική κατανομή και το μέγεθος των υπολειπόμενων τάσεων που δημιουργούνται σε όλη την κεραμική επικάλυψη σε στεφάνες ζirkονίας που ψύχονται, οι συντελεστές φωτοελαστικότητας που υπολογίστηκαν για Lava Ceram και M9 ήταν 9,25 1/TPa και 10,4 1/TPa, αντίστοιχα.⁶²



ΕΙΚΟΝΑ 47: Χάρτης παραμενουσών τάσεων των στεφανών με επένδυση Lava Ceram. Το σκούρο γκρι αντιπροσωπεύει το πυρήνα ζirkονίας. Αναπαρίσταται το μέγεθος και η χωρική κατανομή των υπολειπόμενων τάσεων (σε MPa) με χρωματικές διαβαθμίσεις ως αντανάκλαση της έντασης της επιβράδυνσης. Lava Ceram- επικαλυμμένες στεφάνες παρουσίασαν μέγιστη παραμένουσα τάση της τάξης των 1,8 MPa για γρήγορη ψύξη και 1,4 MPa για αργή ψύξη.⁶² (A) Αντιπροσωπεύει μια στεφάνη που υποβλήθηκε σε πρωτόκολλο ταχείας ψύξης. Η μέγιστη τάση των 1,6 MPa συγκεντρώθηκε στη μασητική κοιλότητα. (B) Αντιπροσωπεύει μια στεφάνη που υποβλήθηκε σε πρωτόκολλο αργής ψύξης. Η μέγιστη τάση των 1,5 MPa συγκεντρώθηκε στις καμπύλες επιφάνειες κοντά στη διεπιφάνεια.⁶²

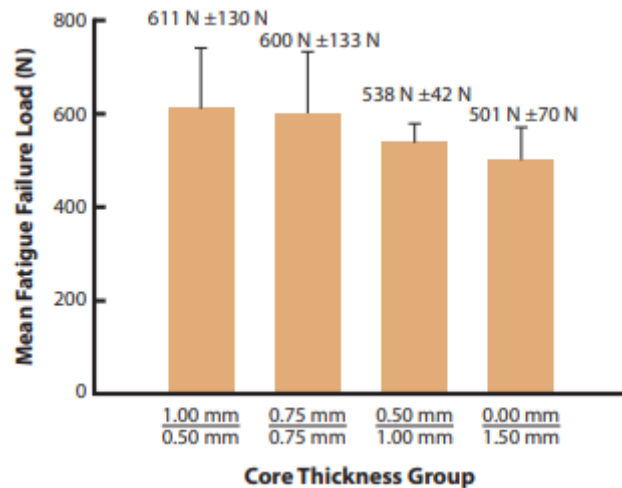


ΕΙΚΟΝΑ 48: Χάρτης παραμενουσών τάσεων σε στεφάνες με VM9. Το σκούρο γκρι αντιπροσωπεύει τη ζirkονία πυρήνα. Το μέγεθος και η χωρική κατανομή των παραμενουσών τάσεων (σε MPa) αναπαρίστανται με χρωματικές διαβαθμίσεις ως αντανάκλαση της έντασης της επιβράδυνσης. Οι τάσεις στις στεφάνες με επικάλυψη VM9 κατανέμονται ομοίως και για τα δύο πρωτόκολλα ψύξης.(A) Αντιπροσωπεύει μια στεφάνη που υποβλήθηκε σε πρωτόκολλο ταχείας ψύξης. Οι τάσεις αυξήθηκαν από 0,5 mm από την επιφάνεια και έφτασαν στο μέγιστο σε απόσταση περίπου

0,1 mm από τη διεπιφάνεια. Η μέγιστη τάση των 7,1 MPa ήταν συγκεντρωμένη στην καμπυλότητα του παρειακού φύματος, με περιοχές υψηλής τάσης στην καμπυλότητα της υπερώιας και της παρειακής επιφάνειας. Η μασητική κοίλανση δεν ανέπτυξε υπολειμματική τάση. (B) Αντιπροσωπεύει μια στεφάνη που υποβλήθηκε σε πρωτόκολλο αργής ψύξης. Η διαβάθμιση των τάσεων σε όλο το πάχος της επικάλυψης και η κατανομή των τάσεων είναι πολύ παρόμοιες με εκείνες της στεφάνης ταχείας ψύξης, με ελαφρώς χαμηλότερη τιμή μέγιστης τάσης (5,9 MPa).⁶²

Οι εικόνες 47 και 48 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εικόνας για το μέγεθος της παραμένουσας τάσης και χωρική κατανομή για το Lava Ceram και το VM9, αντίστοιχα. Στο Σχ. 45α και 46α απεικονίζονται τα δοκίμια που ψύχθηκαν γρήγορα, ενώ στα 45β και 46β εκείνα που υποβλήθηκαν σε αργή ψύξη. πρωτόκολλο. Λόγω της σχετικά χαμηλής διαφάνειας της ζirkονίας, η επικάλυψη εμφανίζεται σε σκούρο γκρι χρώμα, ενώ οι όψεις είναι χρωματισμένες. Για το λεπτομερείς περιγραφές των τιμών της υπολειπόμενης τάσης και των κλίσεων της τάσης κατά μήκος του όψεως, ανατρέξτε στους λεζάντες των εικόνων 45 και 46.⁶² [Εικόνα 47-48]

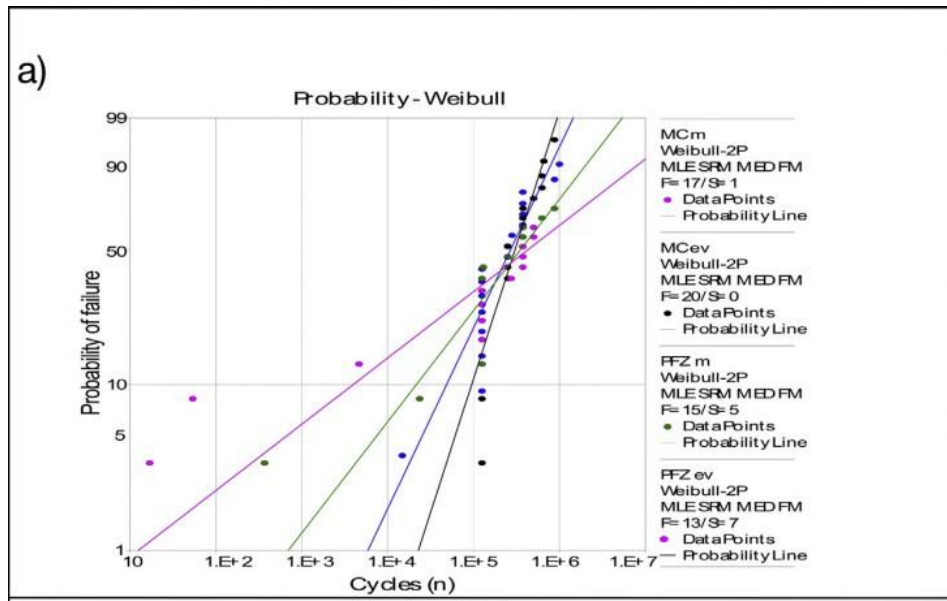
Στη μελέτη των Dibner και συν.⁶³ που αφορούσε τη μέτρηση της αντοχής σε κόπωση ενός διαστρωματωμένου κεραμικού σε σταθερό συνολικό πάχος, αφού ολοκληρώθηκε η κυκλική φόρτιση, τα δοκίμια εξετάστηκαν για υποεπιφανειακό σχηματισμό ρωγμών με διαφώτιση. Σχεδόν σε όλα τα δοκίμια, οι ρωγμές κόπωσης ήταν υποεπιφανειακές ακτινικές ρωγμές, και μόνο αυτές χρησιμοποιήθηκαν για στατιστική ανάλυση. Περιορισμένες κωνικές ρωγμές παρατηρήθηκαν μόνο στις 2 λεπτότερες ομάδες πυρήνων, με βάση το συνολικό μέγεθος του ενδεχομένως υποδεικνύοντας υπολειπόμενη εφελκυστική τάση στην κεραμική επικάλυψη και θλίψη στον πυρήνα. Μόνο υποεπιφανειακές ακτινικές ρωγμές αναμένονταν με βάση τις αναλύσεις ελαστικών τάσεων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ομάδα πυρήνων 0,5 mm μειώθηκε σε αριθμό λόγω ρωγμών κατά τη διάρκεια της κατεργασίας. Οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις για την ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.⁶³ [Εικόνα 49]



ΕΙΚΟΝΑ 49: Μέσο φορτίο αστοχίας λόγω κόπωσης (N) και τυπικές αποκλίσεις για κάθε ομάδα πάχους πυρήνα, χρησιμοποιώντας δοκιμή ευαισθησίας κλιμακωτής διαδικασίας.⁶³

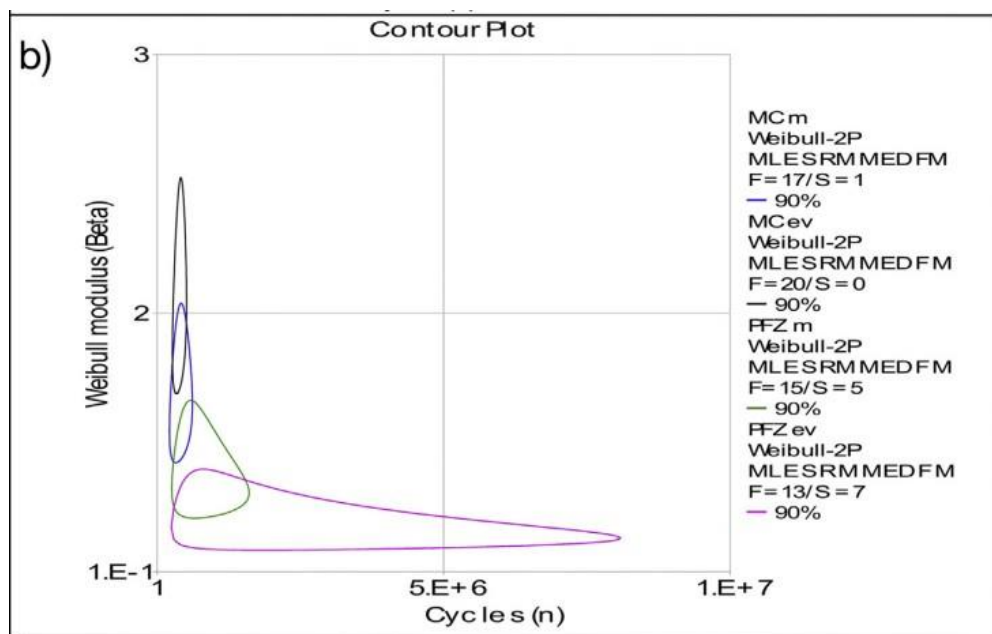
Όλες οι ομάδες με κεραμική επικάλυψη ήταν σημαντικά ισχυρότερες από τις ομάδα πλήρους πάχους.⁶³

Στη μελέτη των Fardin και συν.(2016)⁶⁴ που διερευνούσε τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης και τους τρόπους αστοχίας ολοκεραμικών (πορσελάνη/ζirkονία) και μεταλλοκεραμικών στεφανών με ομοιόμορφο πάχος ή τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού, χρησιμοποίησαν ένα τεχνητό πρώτο γομφίο της κάτω γνάθου που τοποθετήθηκε σε ομοίωμα κεφαλής ανθρώπου (fantom), το διάγραμμα πιθανότητας Weibull δείχνει μικρότερη διασπορά στα δεδομένα για τις ομάδες μεταλλικών-κεραμικών (A) σε σχέση με την πορσελάνη/ζirkονία (B) με αποτέλεσμα μια πιο απότομη γραμμή εμπιστοσύνης για την πρώτη.⁶⁴ [Εικόνα 50]

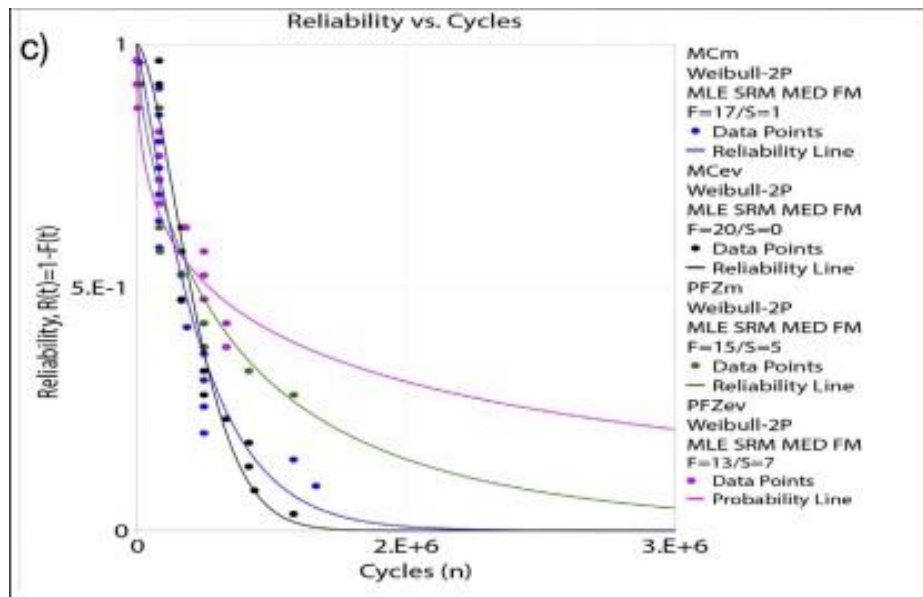


ΕΙΚΟΝΑ 50: (α) Διάγραμμα πιθανότητας Weibull που δείχνει τη γραμμή πιθανότητας για MCm (A1), MCev(A), PFZm (B1) και PFZev (B) και τη διασπορά των δεδομένων ως συνάρτηση των κύκλων.⁶⁴

Το διάγραμμα περιγράμματος, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 50, απεικονίζει τον αριθμό των κύκλων σε σχέση με το συντελεστή Weibull (ο οποίος υποδεικνύει τον αριθμό των κύκλων στο οποίο θα αστοχούσε το 63,2% των δοκιμών κάθε ομάδας) για τη σύγκριση των ομάδων.⁶⁴ [Εικόνα 51]



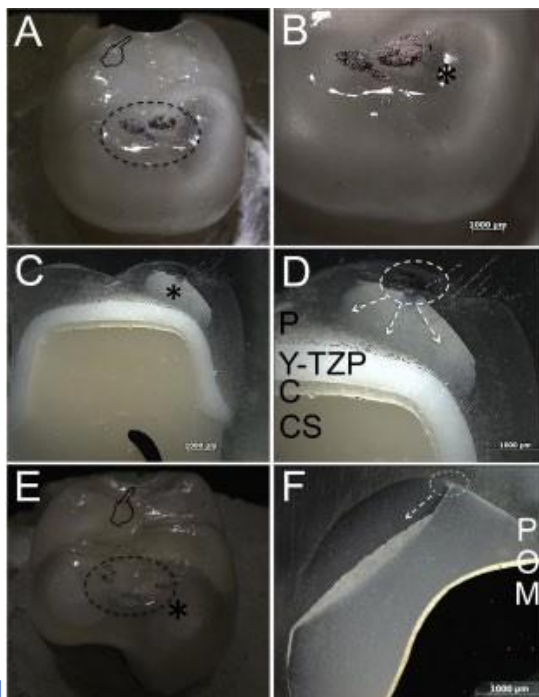
ΕΙΚΟΝΑ 51: (b) Διάγραμμα περιγράμματος (συντελεστής Weibull σε σχέση με τους κύκλους για συγκρίσεις ομάδων) δείχνει την απουσία στατιστικής διαφοράς στα σημεία όπου τα διαγράμματα περιγράμματος επικαλύπτονται. ⁶⁴



ΕΙΚΟΝΑ 52: (c) Η πιθανότητα επιβίωσης ως συνάρτηση των κύκλων απεικονίζει μια επικαλυπτόμενη διάρκεια ζωής μεταξύ των ομάδων μέχρι περίπου 1 εκατομμύριο κύκλους και από τότε και μετά μια αυξημένη διάρκεια ζωής για τις στεφάνες από πορσελάνη συντηγμένη με ζirkονία. ⁶⁴

Σημειώνεται ότι, παρόλο που η ομάδα B (πυρήνας ζirkονίου χωρίς σιρίτι με κεραμική επικάλυψη) παρουσίασε την ευρύτερη κατανομή κύκλων, το περίγραμμά της συμπίπτει με αυτό της ομάδας B1 (πυρήνας ζirkονίου με αυχενικό σιρίτι και κεραμική επικάλυψη) και επομένως δεν διέφεραν στατιστικά. Οι ομάδες A (μεταλλικός σκελετός χωρίς σιρίτι με κεραμική επικάλυψη) και A1 (μεταλλικός σκελετός με σιρίτι με κεραμική επικάλυψη) επικαλύπτονταν επίσης, αλλά μόνο η τελευταία επικαλυπτόταν με τη B1 (πυρήνας ζirkονίου με αυχενικό σιρίτι και κεραμική επικάλυψη). Για το λόγο αυτό, έγινε λεπτομερής χαρακτηρισμός της πιθανότητας επιβίωσης για να εντοπιστεί το διάστημα του κύκλου στο οποίο άρχισαν να εμφανίζονται διαφορές μεταξύ των ομάδων. Σημαντική μείωση της πιθανότητας επιβίωσης μεταξύ των ομάδων άρχισε να εμφανίζεται στους 625.000 κύκλους και παρατηρήθηκε μόνο για την ομάδα A (9,84%) σε σύγκριση με τη B (43,69%). Στα διαστήματα των 750.000, 875.000 και 1 εκατομμυρίου κύκλων, η A παρουσίασε

σημαντικά χαμηλότερη πιθανότητα επιβίωσης σε σύγκριση με τις δύο ομάδες B, ενώ η A1 παρουσίασε ενδιάμεσες τιμές. Δεδομένου ότι η πιθανότητα επιβίωσης ήταν μικρότερη από 10% σε 1 εκατομμύριο κύκλους και για τις δύο ομάδες μεταλλοκεραμικών, οι προβλέψεις σε 1,5 και 2 εκατομμύρια κύκλους έγιναν μόνο για τις στεφάνες της ομάδας B, οι οποίες παρουσίασαν μη σημαντική μείωση ούτε ως συνάρτηση των κύκλων ούτε του σχεδιασμού του σκελετού (επικάλυψη ορίων εμπιστοσύνης). Το διάγραμμα αξιοπιστίας [Εικόνα 52] απεικονίζει τη πιθανότητα επιβίωσης να μειώνεται διαδοχικά για τις ομάδες B, B1, A1 και A, αντίστοιχα. Οι ομάδες B παρουσίασαν κατάγματα (n= 13 από τη B και n= 15 από τη B1), αλλά περισσότερες αναστολές σε σύγκριση με τις μεταλλοκεραμικές στεφάνες και, συνεπώς, γυαλίστηκαν για τον χαρακτηρισμό βλαβών.⁶⁴ Όλες οι ακρολοφίες των μεταλλοκεραμικών στεφανών αστόχησαν πριν από τη συμπλήρωση 106 κύκλων.⁶⁴



[Εικόνα 53]

ΕΙΚΟΝΑ 53: Αντιπροσωπευτικές μικροφωτογραφίες στεφανών από τις δύο ομάδες B και A.

(A) Η επέκταση της θραύσης της πορσελάνης στην άπω οριακή περιοχή μιας στεφάνης πορσελάνης-ζirkονίας τροποποιημένου σχεδιασμού (B1(B) Μια μεγεθυμένη άποψη της οδοντωτής περιοχής (κύκλος) που απεικονίζεται στο A (C). Η φωτοπολωμένη μικρογραφία δείχνει την εσωτερική κωνική ρωγμή (αστερίσκος) σε μεγέθυνση στο (D) που απεικονίζει την προέλευσή της ακριβώς κάτω από τη πλαστική ζώνη και επεκτείνεται προς το σκελετό ζirkονίας (βέλη). P = πορσελάνη συντηγμένη με ζirkονία, Y-TZP = πυρήνας ζirkονίας, C = γραμμή κόνιας, CS = σύνθετο υπόστρωμα. (E) στεφάνη του τροποποιημένου μεταλλοκεραμικού (A1) που δείχνει ένα συνεκτικό κάταγμα πορσελάνης

περιορισμένο στην εγγύς ακρολοφία (δείκτης), το οποίο επέτρεψε τη δοκιμή της άπω ακρολοφίας. Ήταν η μόνη στεφάνη αυτής της ομάδας και παρουσίασε ρωγμή εσωτερικού κώνου που ξεκίνησε από την περιοχή της εσοχής (κύκλος που φαίνεται στο E) και διαδόθηκε προς το εγγύς περιοχές χωρίς να οδηγήσει σε τελική θραύση (αστερίσκος). (ΣΤ) Μετά τη στίλβωση, απεικονίζεται η ρωγμή του εσωτερικού κώνου με την προέλευσή της στην επαφή με την εσοχή (κύκλος) και διάδοση προς τις εγγύς (βέλος) χωρίς να φτάνει στο σκελετό. P = πορσελάνη λιωμένη με μέταλλο, O = αδιαφανής, M = μεταλλοκεραμικός σκελετός.⁶⁴

Ο αριθμός των αντιστοιχισμένων ζευγών που συμπεριλήφθηκαν στα στατιστικά συμπεράσματα ήταν $n=20$ για όλες τις ομάδες, με εξαίρεση την ομάδα A1, η οποία οδήγησε σε 18 δοκιμές, καθώς δύο στεφάνες παρουσίασαν επέκταση θραύσης που εμπόδισε τη δοκιμή στη δεύτερη πλευρά. Γενικά, η επέκταση των θραύσεων των όψεων πορσελάνης, που συχνά οδηγούσε σε αποκόλληση, ήταν πιο έντονη στην ομάδα A σε σύγκριση με την ομάδα A1. Τέτοια διαφορά στο μέγεθος του θραύσματος της πορσελάνης δεν παρατηρήθηκε μεταξύ των B παρά τον σχεδιασμό του σκελετού. Η ποιοτική θραυσματογραφία που διενεργήθηκε σε μικροσκόπιο πολωμένου φωτός και SEM έδειξε την παρουσία πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της εσοχής, η οποία έγινε εμφανής κατά την πρώτη επιθεώρηση (125.000 κύκλοι). Τόσο στην ομάδα A όσο και στην ομάδα B εντοπίστηκαν μαρτυρικά θραυσματογραφικά σημάδια που υποδηλώνουν την κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής από την περιοχή της εσοχής. Οι στεφάνες της ομάδας A1 παρουσίασαν ρωγμή εσωτερικού κώνου περιορισμένη στην πορσελάνη που ξεκίνησε από την μασητική επιφάνεια και επεκτάθηκε στην εγγύς περιοχή χωρίς να φθάσει στη διεπιφάνεια πυρήνα/επικάλυψης. Αντίθετα, από τις ακρολοφίες της ομάδας B, που παρουσίασαν ρωγμές εσωτερικού κώνου που εκτείνονταν στη διεπιφάνεια πυρήνα/πορσελάνης. Οι στεφάνες B1 παρουσίασαν λιγότερες ρωγμές εσωτερικού κώνου που έφτασαν μέχρι τη διεπιφάνεια πυρήνα/πορσελάνης ($n=1$), ενώ οι υπόλοιπες περιορίστηκαν εντός της επικάλυψης πορσελάνης.⁶⁴

Δείχθηκε ότι η συγκέντρωση τάσεων και οι μέγιστες τιμές τάσεων εμφανίστηκαν, γενικά, σε καμπύλες επιφάνειες της επικάλυψης και για τις δύο πορσελάνες και για τα δύο πρωτόκολλα ψύξης, υποδεικνύοντας τη σημασία της γεωμετρίας στην κατανομή των τάσεων. Οι μέγιστες τάσεις στις ταχείας ψύξης Lava Ceram-ήταν συγκεντρωμένες στην μασητική κοιλότητα. Η αργή ψύξη των στεφανών

από Lava Ceram είχε ως αποτέλεσμα μέγιστες τάσεις στο περίγραμμα των καμπύλων επιφανειών. Οι μέγιστες τάσεις στις ταχείας ψύξης Lava Ceram-ήταν συγκεντρωμένες στην μασητική κοιλότητα. Η αργή ψύξη των στεφανών από Lava Ceram είχε ως αποτέλεσμα μέγιστες τάσεις στο περίγραμμα των καμπύλων επιφανειών. Ξεκινώντας από τα 0,5 mm από την επιφάνεια, η παραμένουσα τάση στην επικάλυψη αυξήθηκε προς τον πυρήνα, με μέγιστες τάσεις που εντοπίζονται 0,1 mm από τη διεπιφάνεια κατά μήκος ολόκληρης της έκτασης του πυρήνα, εκτός από τη μασητική κοιλότητα. Ελαφρώς υψηλότερες τάσεις μετρήθηκαν εντός VM9 όταν οι στεφάνες ήταν ταχέως ψυχόμενες (6,9 MPa) από ό,τι όταν ήταν αργά ψυχόμενες (5,8 MPa), με τη μέγιστη τάση να εντοπίζεται στη παρειακή ακρολοφία και για τα δύο πρωτόκολλα ψύξης. Ο προσανατολισμός του διανύσματος των τάσεων παρουσίασε μια απότομη αλλαγή (~180°) στην άκρη των ακρολοφιών στο πάρειο-γλωσσικό επίπεδο, υποδεικνύοντας μια πιο σύνθετη συμπεριφορά τάσεων πάνω σε καμπύλες επιφάνειες, η οποία επιδεινώνεται στις ακρολοφίες λόγω της μικρής ακτίνας και της δισδιάστατης κυρτότητας. Παρ' όλα αυτά, η μελέτη αυτή έδειξε τετραπλάσια έως πενταπλάσια κλιμάκωση του μεγέθους της τάσης, με αύξηση της θερμικής αναντιστοιχίας από +0,3 ppm/°C σε +1,4 ppm/°C για την αναλογία πυρήνα/πορσελάνης που χρησιμοποιήθηκε, αποδεικνύοντας τον κύριο ρόλο της θερμικής αναντιστοιχίας στην αύξηση της τάσης.⁶² Η προσθήκη επικάλυψης κεραμικού σε πυρήνες διυριτικού λιθίου αυξάνει την αντοχή σε κόπωση του δικεραμικού συστήματος. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι για αυτό το σύστημα, η αύξηση του πάχους του κεραμικού επικάλυψης, παρά του κεραμικού του πυρήνα, μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στη συνολική αντοχή σε κόπωση.⁶³ Οι διαφορετικοί σχεδιασμοί σκελετού δεν βελτίωσαν τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης των μεταλλοκεραμικών και των ολοκεραμικών στεφανών. Ωστόσο, διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά κατά τη σύγκριση των διαφορετικών συστημάτων (μέταλλο-πορσελάνη και ζirkόνιο-πορσελάνη), όπου η ομάδα ζirkόνιο-πορσελάνη παρουσίασε αυξημένη διάρκεια ζωής σε κόπωση σε σύγκριση με τις ομάδες μέταλλο-κεραμικό.⁶⁴

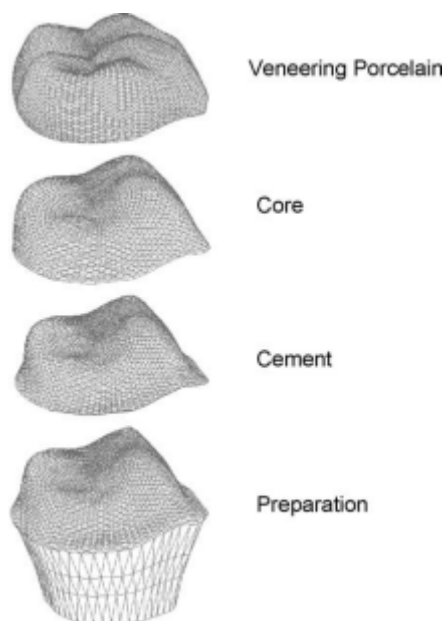
4.3. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών στεφανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όπως αναφέρθηκε προηγουμένα είναι μία καθαρά υπολογιστή μέθοδος όπου δημιουργείται ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο της υπό εξέταση κατασκευής και αυτό εισάγεται σε ειδικό λογισμικό όπου με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και αφού εισαχθούν διάφορες παράμετροι της κατασκευής (μέτρο ελαστικότητας, τρόπος στήριξης, τρόπος φόρτισης κ.α.) γίνεται εικονική καταπόνηση μέχρι την τελική θραύση.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών στεφανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διάφοροι ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Jager και συν.(2004) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, την επιρροή του σχήματος της παρασκευής και του στρώματος κονιάς, στην κατανομή των τάσεων στις ολοκεραμικές στεφάνες που παράγονται με CAD-CAM.⁶⁵ Οι Ha SR και συν.(2013) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της κατανομής των τάσεων και των μέγιστων κύριων τάσεων (MKT) εντός των οπίσθιων στεφανών από ζirkονία ως συνάρτηση του σχεδιασμού του πυρήνα υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης και θέσης με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.⁶⁶ Οι Corazza και συν.(2013) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να διερευνήσουν την επίδραση της ολικής σύγκλισης της οδοντικής παρασκευής (Συνολική Μασητική Γωνίωση) και της κυκλικής κόπωσης στο φορτίο θραύσης πυρήνα με βάση το Y-TZP, επικαλυμμένο με πορσελάνη, δοκιμάζοντας τις υποθέσεις ότι (1) η μέγιστη κύρια τάση ποικίλλει ανάλογα με τη συνολική μασητική γωνίωση των μοντέλων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, (2) η κυκλική κόπωση μειώνει το φορτίο θραύσης των αποκαταστάσεων και (3) η συνολική μασητική γωνίωση της παρασκευής και ο σχεδιασμός του πυρήνα των αποκαταστάσεων επηρεάζουν το φορτίο θραύσης.⁶⁷ Οι Zhang και συν.(2015) με τη μελέτη τους είχαν ως στόχο τη ποσοτικοποίηση της αντίστασης στη διάσπαση μονολιθικής ζirkονίας, διπυριτικού λιθίου και σύνθετων οδοντικών στεφανών με νανοσωματίδια.³⁹

Οι Jager και συν. (2004) στη μελέτη τους ⁶⁵ που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, την επιρροή του σχήματος της παρασκευής και του στρώματος κονίας, στην κατανομή των τάσεων στις ολοκεραμικές στεφάνες που παράγονται με CAD-CAM

χρησιμοποίησαν τα μοντέλα CAD των στεφανών τριών ασθενών με στεφάνες για το οπίσθιο δόντι 46 που κατασκευάστηκαν με CAD-CAM, επιλέχθηκαν για να μεταφραστούν σε ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Οι στεφάνες αποτελούνταν από έναν πυρήνα κατασκευασμένο από θερμοσυμπιεσμένη πορσελάνη υψηλής αντοχής, με βάση την αλουμίνα-επικαλυμμένο με υαλοκεραμικό χωρίς λευκίτη. Η πρώτη στεφάνη είχε μια λοξοτόμηση οξύαιχμη (σαν μαχαίρι) και ένα στρώμα κονίας με ομοιόμορφο πάχος 0,140 mm εκτός από το περίγραμμα όπου το πάχος ήταν 0,025 mm. Η δεύτερη στεφάνη είχε παρασκευή με βάθρο και το ίδιο πάχος στρώματος κονίας. Η τρίτη στεφάνη είχε παρασκευή με βάθρο και στρώμα κονίας που κυμαινόταν από 0,025 έως 0,140 mm. Σε αυτή την στεφάνη η στρώση ήταν λεπτή στο περίγραμμα και στις οριζόντιες επιφάνειες για να δώσει τη μέγιστη δυνατή στήριξη στην στεφάνη σε αυτές τις επιφάνειες. Αυτή η στεφάνη αναλύθηκε επίσης με σχεδιασμό ομοιόμορφου πάχους κονίας. Το τελικό μοντέλο αποτελούνταν από δύο κεραμικές στρώσεις (επικάλυψης και πυρήνα), μια στρώση κονίας και το παρασκευασμένο δόντι και αποτελούνταν από 50.000-65.000 στερεά στοιχεία παραβολικής σφήνας και παραβολικού τετραέδρου όλα μαζί. ⁶⁵ [Εικόνα 54]



EIKONA 54: Τα επίπεδα που συνθέτουν το μοντέλο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. ⁶⁵

Η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία και η μετεπεξεργασία πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό FEMAP, ενώ η ανάλυση έγινε με το λογισμικό CAEFEM. Για την απλούστευση των υπολογισμών έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Το υλικό των στρώσεων της κεραμικής στεφάνης, η οδοντίνη του δοντιού και η κονία στερέωσης μετά την πήξη θεωρήθηκαν ομοιογενή, γραμμικά ελαστικά και ισότροπα.

2. Η χρονοεξαρτώμενη διαδικασία πήξης της κονίας τοποθέτησης μιμήθηκε από μια ανεξάρτητη από το χρόνο ελαστική-πλαστική ιδιότητα του υλικού, αν και αυτό το μοντέλο έχει καθορισμένες ιδιότητες μόνο για ομοιόμορφο πάχος στρώματος κονίας και το πάχος στρώματος κονίας για τα διάφορα μοντέλα κυμαινόταν από 0,025 έως 0,140 mm.

3. Η επίδραση του περιοδοντικού συνδέσμου στις τάσεις στην στεφάνη είναι αμελητέα.

4. Η επίδραση του πολφικού θαλάμου στην παρασκευή στις τάσεις στην στεφάνη είναι αμελητέα.

5. Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά την επεξεργασία της στεφάνης είναι ομοιόμορφη.

6. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης δημιουργεί μια κατάσταση χωρίς τάσεις στα κεραμικά.

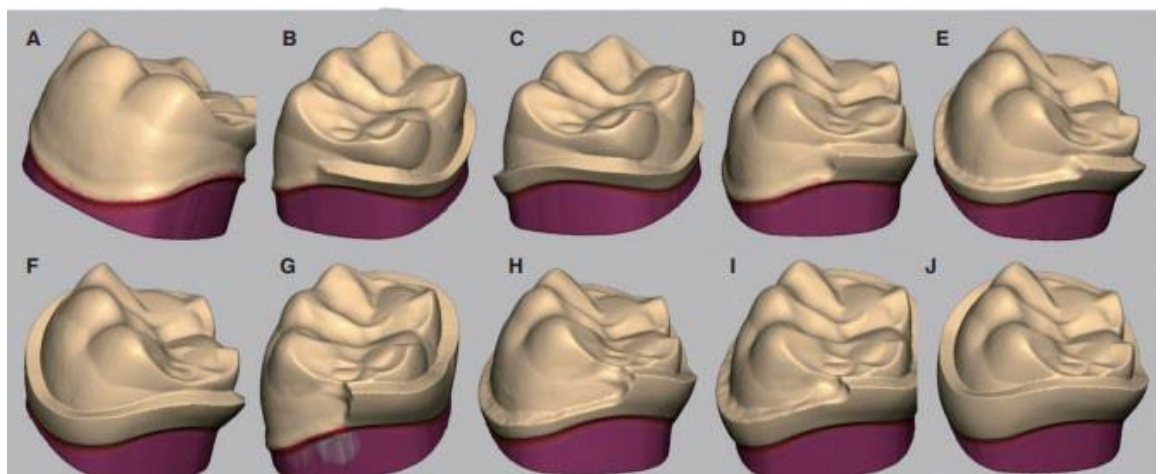
7. Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson είναι σταθερά κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της στεφάνης.⁶⁵

Όλοι οι κόμβοι στο επίπεδο x-y, το οποίο αντιστοιχεί στο τμήμα της ρίζας του παρασκευασμένου δοντιού, θεωρήθηκαν σταθεροί δηλαδή δεν επιτράπηκε καμία μετατόπιση ή περιστροφή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Υπήρχαν τρία είδη τάσεων: τάσεις λόγω δυνάμεων δήξης, παραμένουσες τάσεις λόγω της διαφοράς του συντελεστή διαστολής των δύο στρωμάτων που σχηματίζουν τη στεφάνη και η επίδραση της συρρίκνωσης της κονίας. Οι τάσεις που προκαλούνται από τις επιδράσεις υπολογίστηκαν χωριστά, στη συνέχεια τα τρία είδη τάσεων συνδυάστηκαν χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα γραμμικού συνδυασμού του FEMAP. Πραγματοποιήθηκε υπολογισμός με τις δυνάμεις δήξης ως φορτίο. Η μελέτη αυτή υπέθεσε ότι η δύναμη δήξης σε αυτούς τους γομφίους είναι 665 N, η οποία είναι περίπου η μέγιστη κανονική δύναμη δήξης. Η δύναμη δήξης κατανεμήθηκε ομοιόμορφα στα σημεία της στεφάνης που βρίσκονται σε επαφή σε σύγκλιση κάθετα στην επιφάνεια. Η προκύπτουσα κάθετη (z) συνιστώσα έγινε 665 N. Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων μετά τη διαδικασία παραγωγής της στεφάνης, που προκαλούνται από τις διαφορές στο συντελεστή διαστολής των δύο υλικών που αποτελούν τη στεφάνη, χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα θερμοκρασίας-διαστολής των υλικών αυτών σύμφωνα με τον προμηθευτή για τον υπολογισμό της διαστολής. Χρησιμοποιήθηκε η διαφορά των συντελεστών θερμικής διαστολής και όχι των δύο στρώσεων χωριστά, ώστε να αποφευχθεί κατά το δυνατόν η κατανομή των τάσεων που οφείλονται στον υπολογισμό αυτό στις μη κεραμικές στρώσεις. Η θερμοκρασία στο σημείο υαλώδους μετάβασης της πορσελάνης επένδυσης είναι χαμηλότερη από εκείνη του πυρήνα. Για τον υπολογισμό των τάσεων χρησιμοποιήθηκε μόνο η διαφορά της γραμμικής διαστολής των δύο υλικών από τη θερμοκρασία στο σημείο υαλώδους μετάβασης της πορσελάνης επένδυσης

σε θερμοκρασία δωματίου. Η πήξη των σύνθετων ρητινών είναι μια σύνθετη χρονοεξαρτώμενη διαδικασία, κατά την οποία οι ιδιότητες του υλικού μεταβάλλονται δραματικά σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Για τον προσδιορισμό των τάσεων που οφείλονται στη συρρίκνωση της κονίας κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης του σύνθετου υλικού ρητίνης χρησιμοποιήθηκε ένα χρονικά ανεξάρτητο μη γραμμικό ελαστικό-πλαστικό μοντέλο υλικού πάχους στρώματος 0,140 mm.⁶⁵

Οι Ha SR και συν. (2013) στη μελέτη τους⁶⁶ που είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της κατανομής των τάσεων και των μέγιστων κύριων τάσεων (ΜΚΤ) εντός των οπίσθιων στεφανών από ζirkονία ως συνάρτηση του σχεδιασμού του πυρήνα υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης και θέσης με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποίησαν παρασκευή στεφάνης πλήρους κάλυψης στον δεξιό πρώτο γομφίο της κάτω γνάθου. Διαμορφώθηκε η λοξοτόμηση με βάθος 1,2 mm και γωνίωση 8°. Η στεφάνη υλοποιήθηκε με ψηφιοποίηση του παρασκευασμένου και μη παρασκευασμένου μοντέλου ρητίνης του δεξιού πρώτου γομφίου της κάτω γνάθου. Στη συνέχεια, ο πυρήνας και η πορσελάνη επικάλυψης σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο ρητίνης του μη προετοιμασμένου δοντιού για το εξωτερικό σχήμα της στεφάνης με CAD και εξήχθησαν αρχεία STL.

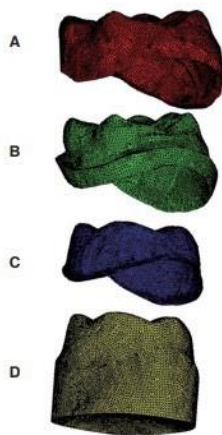
[Εικόνα 55]



ΕΙΚΟΝΑ 55: Σχηματική αναπαράσταση των παραλλαγών του σιριτιού στον πυρήνα ζirkονίας που δημιουργήθηκε σε λογισμικό CAD. Το σιρίτι (πλάτος 1 mm) στον πυρήνα είχε σταδιακές αυξήσεις ύψους 1 mm, 2 mm και 3 mm στο εγγύς και γλωσσικό (PL) τμήμα του πυρήνα, και στο παρειακό (B) ύψος αντίστοιχα. A: χωρίς σιρίτι, B: PL 1 mm, C: PL 1 mm και B 1 mm, D: PL 2 mm, E: PL

2 mm και B 1 mm, F: PL 2 mm και B 2 mm, G: PL 3 mm, H: PL 3 mm και B 1 mm, I: PL 3 mm και B 2 mm και J: PL 3 mm και B 3 mm. ⁶⁶

Οι παραλλαγές του σιριτιού (πλάτος 1 mm) στον πυρήνα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν σταδιακές αυξήσεις 1 mm, 2 mm και 3 mm στο εγγύς και γλωσσικό ύψος και στο παρειακό ύψος αντίστοιχα. Κατά τη διαδικασία αυτή, υλοποιήθηκαν δέκα διαφορετικά μοντέλα σύμφωνα με τα σχέδια πυρήνων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα στερεά μοντέλα ενός στρώματος επικάλυψης (πορσελάνη επικάλυψης πάχους 1 mm), ενός στρώματος πυρήνα (ζirkονία πάχους 0,5 mm), ενός στρώματος κονιάς (κονία ρητίνης πάχους 100 μm) και ενός παρασκευάσματος δοντιού (οδοντίνη) μιμούμενα τις σαρωμένες εικόνες με λογισμικό CAD. ⁶⁶ [Εικόνα 56]

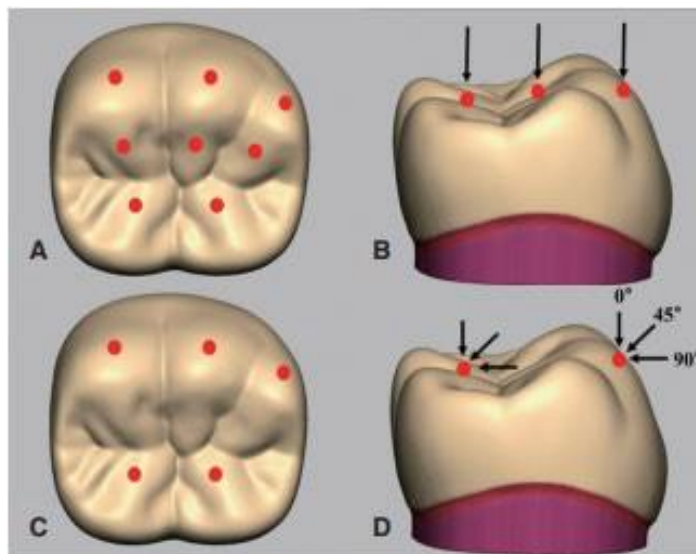


EIKONA 56: CAD σχεδιασμένο δόντι/επικαλυμμένη στεφάνη ζirkονίας συστατικά του συστήματος. A: πορσελάνη, B: πυρήνας, C: στρώματα κονιάς και D: δόντι. ⁶⁶

Στο τελικό μοντέλο συναρμολογήθηκαν η επικάλυψη της στεφάνης από ζirkονία, το στρώμα κονιάς και το δόντι του κολοβώματος. Τα συναρμολογημένα στερεά μοντέλα εισήχθησαν σε ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, το στερεό μοντέλο έγινε πλέγμα με γραμμικά τετραεδρικά στοιχεία 4 κόμβων. Έτσι, κατασκευάστηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελούμενο από στοιχεία και κόμβους που αναπαριστούν την επιστρωμένη στεφάνη από ζirkονία στον δεξιό πρώτο γομφίο της κάτω γνάθου. Έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές με στόχο την απλούστευση των υπολογισμών: (1) όλα τα στερεά θεωρήθηκαν ομογενή, ισότροπα και γραμμικά ελαστικά καθ' όλη τη διάρκεια της παραμόρφωσης, (2) δεν υπάρχουν συνθήκες ολίσθησης μεταξύ των συστατικών

(απόλυτη συγκόλληση), (3) το στρώμα κονιάς έχει ομοιόμορφο πάχος (πάχος 100 μm), (4) ο πυρήνας έχει ομοιόμορφο πάχος (πάχος 0,5 mm) εκτός από το σιρίτι, (5) δεν υπάρχουν ατέλειες σε όλα τα συστατικά, (6) όλοι οι βαθμοί ελευθερίας περιορίζονται στην επιφάνεια του συστατικού της ρίζας. Προσομοιώθηκαν δύο διαφορετικές καταστάσεις: μια δοκιμή κατακόρυφης (αξονικής) διεύθυνσης συμπίεσης που προσομοιώνει τη μέγιστη δύναμη δήξης και μια δοκιμή συμπίεσης τριών διευθύνσεων που προσομοιώνει την επαφή με το αντίθετο δόντι κατά τη λειτουργία. Σε αυτές τις προσομοιώσεις, το παρασκευασμένο μοντέλο δοντιού έπρεπε να περιοριστεί ακρορριζικά στη γραμμή παρασκευής. Ένα φορτίο 700 N, που προσομοιώνει τη μέγιστη δύναμη δήξης, εφαρμόστηκε ταυτόχρονα στα ακόλουθα σημεία φόρτισης σε κατακόρυφη κατεύθυνση : τρία σημεία στις εξωτερικές κλίσεις κάθε φατνιακής ακρολοφίας, τρία σημεία στις εσωτερικές κλίσεις κάθε φατνιακής ακρολοφίας και δύο σημεία στις εσωτερικές κλίσεις κάθε γλωσσικής ακρολοφίας.⁶⁶

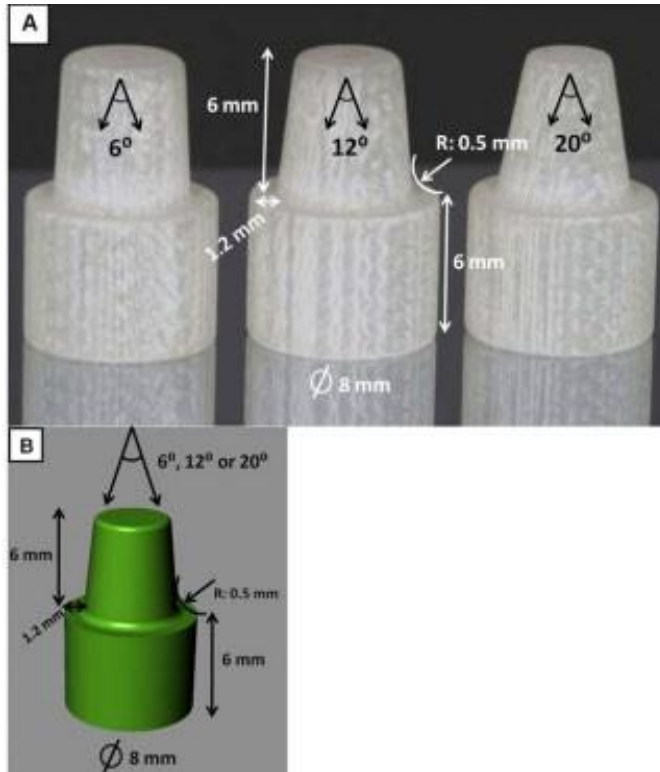
[Εικόνα 57]



ΕΙΚΟΝΑ 57: Σημεία φόρτισης και κατευθύνσεις προσομοίωσης μέγιστης δύναμης δαγκώματος (A και B) και μασητική δύναμη (C και D). **A:** Τρία σημεία στις εξωτερικές κλίσεις των παρειακών φυμάτων, τρία σημεία στις εσωτερικές κλίσεις των παρειακών φυμάτων, και δύο σημεία στις εσωτερικές κλίσεις των γλωσσικών φυμάτων φορτίστηκαν. **B:** Συνολικό φορτίο 700 N από την αξονική (κατακόρυφη) κατεύθυνση. **C:** Τρία σημεία στις εξωτερικές κλίσεις των παρειακών ακρολοφιών και δύο σημεία στις εσωτερικές κλίσεις των γλωσσικών ακρολοφιών φορτίστηκαν. **D:** Εφαρμόστηκε συνολικό φορτίο 280 N από τρεις κατευθύνσεις.^[66]

Ένα φορτίο 280 N, προκειμένου να προσομοιωθεί η μασητική δύναμη, εφαρμόστηκε ταυτόχρονα στα ακόλουθα σημεία φόρτισης: τρία σημεία στις εξωτερικές κλίσεις των παρειακών ακρολοφιών και δύο σημεία στις εσωτερικές κλίσεις των γλωσσικών ακρολοφιών. Το φορτίο εφαρμόστηκε από τρεις κατευθύνσεις: κατακόρυφη κατεύθυνση (στις 0° ως προς τον άξονα του δοντιού), γωνιακή κατεύθυνση (στις 45° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς το γλωσσικό περιθώριο) και οριζόντια κατεύθυνση (στις 90° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς τη γλωσσική επιφάνεια).⁶⁶

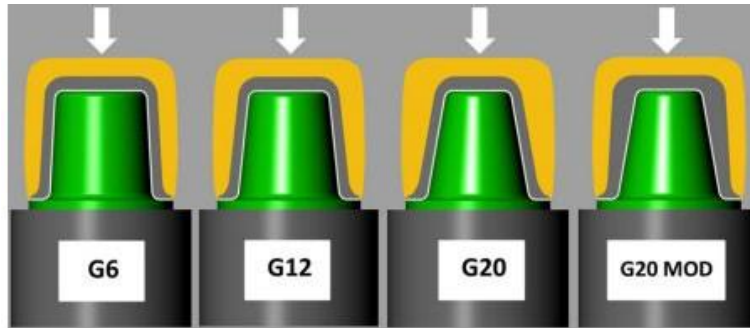
Οι Corazza και συν. (2013) στη μελέτη τους⁶⁷ που είχαν ως στόχο να διερευνήσουν την επίδραση της ολικής σύγκλισης της οδοντικής παρασκευής (Συνολική Μασητική Γωνίωση) και της κυκλικής κόπωσης στο φορτίο θραύσης πυρήνα με βάση το Υ-TZP, επικαλυμμένο με πορσελάνη, δοκιμάζοντας τις υποθέσεις ότι (1) η μέγιστη κύρια τάση ποικίλλει ανάλογα με τη συνολική μασητική γωνίωση των μοντέλων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, (2) η κυκλική κόπωση μειώνει το φορτίο θραύσης των αποκαταστάσεων και (3) η συνολική μασητική γωνίωση της παρασκευής και ο σχεδιασμός του πυρήνα των αποκαταστάσεων επηρεάζουν το φορτίο θραύσης, κατασκεύασαν μοντέλα που προσομοίαζαν τις πειραματικές δοκιμές και είχαν τις ακόλουθες παραμέτρους: βάση 8mm (διάμετρος) × 6mm (ύψος), παρασκευάσμα ύψους 6mm, στρογγυλεμένη γραμμή τελειώματος ώμου (ακτίνα = 0,5mm) και γωνίες συνολικής μασητικής γωνίωσης (ΣΜΓ) που διέφεραν ανάλογα με τα μοντέλα (πειραματικές ομάδες). Τα μοντέλα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με την ονομασία G6, G12 και G20 είχαν παρασκευάσματα με γωνίες 6°, 12° και 20° συνολικής μασητικής γωνίωσης, αντίστοιχα.⁶⁷ [Εικόνα 58]



ΕΙΚΟΝΑ 58: (Α) Μήτρες κατασκευασμένες με το ανάλογο υλικό οδοντίνης. Τα παρασκευάσματα έχουν 6°, 12° και 20° συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ). Η μήτρα 20° ΣΜΓ χρησιμοποιήθηκε για τις ομάδες G20 και G20MOD. (Β) Εφαρμόστηκαν οι ίδιες πειραματικές παράμετροι στα μοντέλα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. [67]

Το πάχος του σκελετού ήταν ομοιόμορφο, 0,5 mm στα αξονικά τοιχώματα και 0,7 mm στην μασητική επιφάνεια, και για τα τρία μοντέλα. Το μοντέλο G20MOD προσομοίωσε μια τροποποιημένη πυρήνα ακινητοποιημένο σε ένα παρασκεύασμα 20° συνολικής μασητικής γωνίωσης. Ο στόχος του τροποποιημένου μοντέλου G20MOD πυρήνα ήταν να αντισταθμίσει τη γωνία σύγκλισης, με αποτέλεσμα ένα στρώμα πορσελάνης παρόμοιο με το μοντέλο G6. Το πάχος της κονίας ορίστηκε στα 100μm για όλα τα μοντέλα και ο εξωτερικός σχεδιασμός των αποκαταστάσεων ήταν πανομοιότυπος, ανεξάρτητα από τη γωνία συνολικής μασητικής γωνίωσης των παρασκευασμάτων. Τα μοντέλα δημιουργήθηκαν και εξήχθησαν σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης όπου εισήχθησαν οι ιδιότητες των υλικών. Θεωρήθηκε ότι όλα τα στερεά ήταν ομογενή, ισότροπα και γραμμικά ελαστικά. Τα εξαρτήματα θεωρήθηκαν τέλεια συνδεδεμένα και αψεγάδιαστα. Ένα πλέγμα αποτελούμενο από τετραεδρικά κυρίαρχα στοιχεία δημιουργήθηκε μετά τη δοκιμή σύγκλισης, η οποία έγινε με την αλλαγή του μεγέθους των στοιχείων ώστε να επιτευχθεί λιγότερο από 10%

διακύμανση. Η βάση στήριξης περιορίστηκε στους τρεις άξονες (x, y και z) και η τάση δημιουργήθηκε από φορτίο 1000 N που εφαρμόστηκε στο κέντρο της μασητικής επιφάνειας της αποκατάστασης στη διεύθυνση του κάθετου άξονα. ⁶⁷ [Εικόνα 59]



EIKONA 59: Σχηματική αναπαράσταση των πειραματικών ομάδων: G6, G12, G20 και G20MOD. Ο εξωτερικός σχεδιασμός SB του G20MOD είναι παρόμοιος με τον G6, με στόχο την αντιστάθμιση της γωνίας σύγκλισης. Τα λευκά βέλη υποδεικνύουν τη θέση και κατεύθυνση της εφαρμογής του φορτίου (στο κέντρο των αποκαταστάσεων, παράλληλα με τον επιμήκη άξονα του παρασκευάσματος). Κεραμικός πυρήνας (γκρι)- πορσελάνη (κίτρινο)- παρασκευάσμα (πράσινο). ⁶⁷

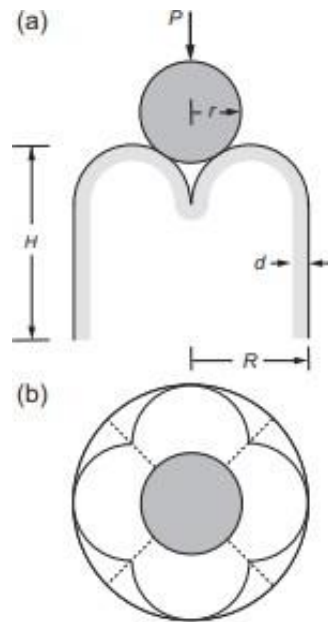
Η ανάλυση της μέγιστης κύριας τάσης (MKT) χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση της κατανομής των τάσεων στα υλικά. Οι μήτρες κατασκευάστηκαν με υλικό ανάλογο της οδοντίνης (εποξειδική ρητίνη γεμισμένη με ίνες γυαλιού). Το υλικό αυτό έχει ιδιότητες ελαστικότητας και πρόσφυσης παρόμοιες με την ενυδατωμένη οδοντίνη . Οι αποκαταστάσεις κατασκευάστηκαν με το σύστημα In-Ceram YZ, το οποίο είναι ένα κεραμικό (YZ) με βάση το ζirkόνιο με επένδυση από πορσελάνη με (VM9). Οι πειραματικές ομάδες χωρίστηκαν (n = 20) ανάλογα με τη γωνία συνολικής μασητικής γωνίωσης (ΣΜΓ) του παρασκευάσματος: G6 - 6° συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) παρασκευής και πυρήνα με ομοιόμορφο πάχος (0,5 mm για τα αξονικά τοιχώματα και 0. 7mm για τα μασητικά τοιχώματα), G12 - 12° συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) παρασκευής και πάχος πυρήνα όπως περιγράφεται για το G6, G20 - 20° συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) παρασκευής και πάχος πυρήνα όπως περιγράφεται για το G6, G20MOD - 20° συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) παρασκευής και τροποποιημένο πυρήνα που αντισταθμίζει τη μασητική επιφάνεια, με αποτέλεσμα εξωτερικό σχεδιασμό πυρήνα παρόμοιο με τον G6. Στην [Εικόνα 59](#) φαίνεται σχηματικά η προετοιμασία και ο σχεδιασμός της πυρήνα καθώς και η θέση

και η κατεύθυνση εφαρμογής του φορτίου για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και τα εργαστηριακά πειράματα. Μια αντιπροσωπευτική μήτρα από κάθε πειραματική ομάδα αντιγράφηκε σε γύψο υψηλής αντοχής τύπου IV. Οι μήτρες από γύψο σαρώθηκαν από το σύστημα CAD-CAM και οι πυρήνες δημιουργήθηκαν από το λογισμικό. Ο σχεδιασμός του G20MOD πυρήνα τροποποιήθηκε ώστε να αυξηθεί το αξονικό πάχος του τοιχώματος αντισταθμίζοντας τη γωνία σύγκλισης και οδηγώντας σε έναν σχεδιασμό εξωτερικού τοιχώματος παρόμοιο με τον G6 πυρήνα. Μετά την κατεργασία, όλοι οι σκελετοί καθαρίστηκαν σε απεσταγμένο νερό και εμβαπτίστηκαν σε υγρό χρωματισμού για 2 λεπτά, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Αφού πυροσυσσωματώθηκαν ένας οδοντικός τεχνολόγος εφάρμοσε την πορσελάνη (VM9). Πρώτα εφαρμόστηκε ένα λεπτό στρώμα πορσελάνης (wash) και έγινε πυροσυσσωμάτωση, στη συνέχεια εφαρμόστηκε το κύριο στρώμα πορσελάνης (body) για την επίτευξη του εξωτερικού σχεδιασμού της αποκατάστασης, το οποίο πυροσυσσωματώθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η τυποποίηση του εξωτερικού τοιχώματος των αποκαταστάσεων επιτεύχθηκε με τη χρήση λειαντικών φρεζών και ελεγχόμενων μετρήσεων, ακολουθούμενη από έναν κύκλο υάλωσης. Όλες οι αποκαταστάσεις είχαν τελικό πάχος 1,8 mm στην επιφάνεια σύγκλισης (πυρήνας - 0,7 mm, επικάλυψη - 1,1 mm) και 1,6 mm στη γραμμή τελείωσης (πυρήνας - 0,5 mm, επικάλυψη - 1,1 mm). Το πάχος της αποκατάστασης στο αξονικό τοίχωμα κυμαινόταν όπως περιγράφεται παραπάνω. Οι ακινητοποιημένες αποκαταστάσεις αποθηκεύτηκαν σε απεσταγμένο νερό 37°C για 24 ώρες και χωρίστηκαν τυχαία σε δύο υποομάδες (n = 10): κυκλική κόπωση (c) ή αποθήκευση σε νερό. Για την κυκλική κόπωση των αποκαταστάσεων, οι μήτρες συγκρατήθηκαν από τη βάση τους και υποβλήθηκαν σε 106 κύκλους στα 4 Hz και φορτίο 88 N σε απεσταγμένο νερό 37 °C για να προσομοιωθεί 1 έτος χρήσης στο στόμα. Οι αποκαταστάσεις με κυκλική κόπωση επιθεωρήθηκαν για επιφανειακές βλάβες στο στερεομικροσκόπιο. Τα μη δοκιμασμένα δοκίμια αποθηκεύτηκαν σε απεσταγμένο νερό 37°C, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική κόπωση (περίπου 7 ημέρες). Όλες οι αποκαταστάσεις υποβλήθηκαν σε θλιπτικό φορτίο που εφαρμόστηκε με ένα έμβολο από ανοξείδωτο χάλυβα σε σχήμα σφαίρας (1,5 mm) στο κέντρο της μασητικής επιφάνειας. Η δοκιμή διεξήχθη σε υδάτινο περιβάλλον 37 °C με χρήση μηχανής καθολικών δοκιμών με ταχύτητα 0,5 mm/min. Για την

αξιολόγηση των θραυσμένων επιφανειών χρησιμοποιήθηκαν οι αρχές της θραυσματογραφίας υπό στερεομικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

67

Οι Zhang και συν. (2015) στη μελέτη τους ³⁹ που είχαν ως στόχο τη ποσοτικοποίηση της αντίστασης στη διάσπαση διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται για στεφάνες πλήρους ανατομίας, επέλεξαν τρία υποψήφια υλικά αποκατάστασης για μονολιθικές οδοντικές στεφάνες: (i) ζirkονία υψηλής διαφάνειας (ii) διπυριτικό λίθιο και (iii) σύνθετο υλικό με βάση τη ρητίνη και κεραμικά νανοσωματίδια. Έξι μπλοκ από κάθε υλικό κατασκευάστηκαν σε ανατομικά ορθές στεφάνες πρώτου γομφίου της κάτω γνάθου. Το προκύπτον πάχος της στεφάνης ήταν 1,0 mm για τη ζirkονία και 2,0 mm για το διπυριτικό λίθιο και το νανοσύνθετο, με κοινό πάχος εγγύς τοιχώματος 1,5 mm. Σε όλες τις περιπτώσεις λήφθηκε υπόψη πάχος κόνιας 50μm. Οι μήτρες κατασκευάστηκαν ώστε να παρέχουν κοινές εξωτερικές διαστάσεις στεφάνης για όλα τα υλικά. Οι συνθετικές μήτρες παλαιώθηκαν σε απεσταγμένο νερό για τουλάχιστον 21 ημέρες και στη συνέχεια ξηράθηκαν στον αέρα για την συγκόλληση των στεφανών. Οι τοποθετημένες στεφάνες των δοκιμών αποθηκεύτηκαν σε απεσταγμένο νερό στους 37 °C για τουλάχιστον 5 ημέρες, ώστε να επιτραπεί ο πλήρης πολυμερισμός και η ενυδάτωση του στρώματος κόνιας πριν από τις μηχανικές δοκιμές. Στη συνέχεια, οι στεφάνες υποβλήθηκαν σε δοκιμή αστοχίας με αξονική φόρτιση με σφαίρα καρβιδίου του βολφραμίου τοποθετημένη κεντρικά. Επιλέχθηκε μια σφαίρα ακτίνας 3,2 mm απλώς και μόνο επειδή ήταν βολικό να τη χειριστεί κανείς στα πειράματα. Το φορτίο εφαρμόστηκε σε μηχανή μηχανικών δοκιμών με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 0,1mm/min. Τοποθετήθηκε βιντεοκάμερα για την παρατήρηση των πλευρικών τοιχωμάτων της στεφάνης κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ώστε να μπορεί να παρακολουθείται επιτόπου η εξέλιξη της αστοχίας. Η ανάλυση της εξέλιξης της αστοχίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός εκτεταμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο περιλαμβάνει πρόβλεψη για τη σταδιακή εξέλιξη μιας ενσωματωμένης ρωγμής. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. ³⁹ [Εικόνα 60]



ΕΙΚΟΝΑ 60: Γεωμετρικό μοντέλο για θραύση γομφίου: (α) πλευρική και (β) άνω όψη. Η μασητική βρίσκεται πάνω σε μια κυλινδρική βάση ακτίνας R και καθαρού ύψους H , με τέσσερις ημισφαιρικούς κροσσούς ακτίνας $R/2$ και πάχους d . Οι κροσσοί φορτίζονται αξονικά με μια σκληρή σφαίρα ακτίνας r , δημιουργώντας πλευρικές δυνάμεις σφήνωσης σε γειτονικούς κροσσούς και οδηγώντας σε σχισμές διάσπασης κατά μήκος των ενδιάμεσων κοιλοτήτων μεταξύ επικαλυπτόμενων γειτονικών κροσσών (διακεκομμένες γραμμές). ^[39]

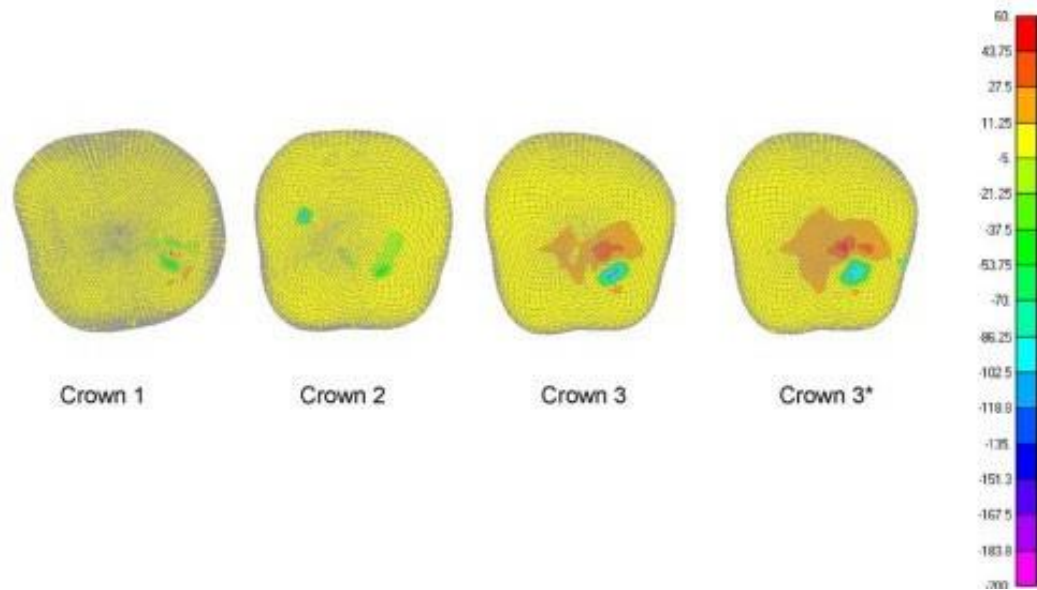
Αποτελείται από μια δομή κελύφους με τέσσερις αποκομμένους ημισφαιρικούς κάλυκες ακτίνας $R/2$ και ομοιόμορφου πάχους $d = 1\text{mm}$ (ζιρκονία) ή 2mm (διπυριτικό λίθιο και οδοντιατρικό νανοσύνθετο υλικό) σε μια κυλινδρική βάση ακτίνας $R = 5,0\text{mm}$ και συνολικού ύψους $H = 7,0\text{mm}$ από την μασητική έως το αυχενικό όριο, δηλ. στενά αντιπροσωπευτικό των ανατομικά ορθών στεφανών. Το κέλυφος είναι πλήρως συνδεδεμένο με ένα εσωτερικό υπόστρωμα που μοιάζει με οδοντίνη. Η παρουσία ενός ενδιάμεσου στρώματος κονίας θεωρείται ότι έχει αμελητέα επίδραση στη μηχανική θραύσης, λόγω της λεπτότητάς του ($\sim 50\ \mu\text{m}$) και του συγκρίσιμου μέτρου ελαστικότητας και ανθεκτικότητας σε σχέση με το εσωτερικό που μοιάζει με οδοντίνη, και ως εκ τούτου παραλείφθηκε από τους περισσότερους υπολογισμούς. Παρόλα αυτά, για επιβεβαίωση εκτελέστηκε ένας απλός συγκριτικός υπολογισμός με τη συμμετοχή του στρώματος κονίας. Ένα κατακόρυφο φορτίο εφαρμόζεται αξονικά σε μια άκαμπτη σφαίρα ακτίνας $r = 3,2\ \text{mm}$ σε επαφή, έτσι ώστε να ασκούνται οριζόντιες δυνάμεις σε όλα τα επίπεδα των

σχισμών συμμετρίας (διακεκομμένες γραμμές στην [Εικόνα 60](#)).³⁹ Ο αλγόριθμος XFEM περιλαμβάνει πρόβλεψη για προοδευτική σταθερή ανάπτυξη μιας ενσωματωμένης πρόδρομης ρωγμής εκκίνησης με αυξανόμενο φορτίο, μέχρι και πέραν του σημείου τελικής αστοχίας που αντιστοιχεί στην ολική διάσπαση του συνόλου στεφάνης/υποστρώματος. Η τοποθέτηση της αρχικής ρωγμής σε επίπεδο σχισμής και αμέσως δίπλα στα σημεία επαφής παρακάμπτει τις περιπλοκές του πλέγματος στην περιοχή έναρξης της ρωγμής και ισοδυναμεί με την παραδοχή ότι η δομή του δοντιού περιέχει προϋπάρχουσες ρωγμές. Τα πειραματικά δεδομένα του κρίσιμου φορτίου διάσπασης αναλύθηκαν με τη μέθοδο ANOVA. Ο ανεξάρτητος παράγοντας ήταν η ομάδα υλικών (ζirkονία, διπυριτικό λίθιο, νανοσύνθετο). Το μέσο κρίσιμο φορτίο και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% υπολογίστηκαν για κάθε ομάδα στεφάνης. Πραγματοποιήθηκε η δοκιμή Post Hoc Tukey HSD για πολλαπλές συγκρίσεις για να προσδιοριστεί ποιες συγκεκριμένες ομάδες διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε $p \leq 0,05$ για όλες τις αναλύσεις.

39

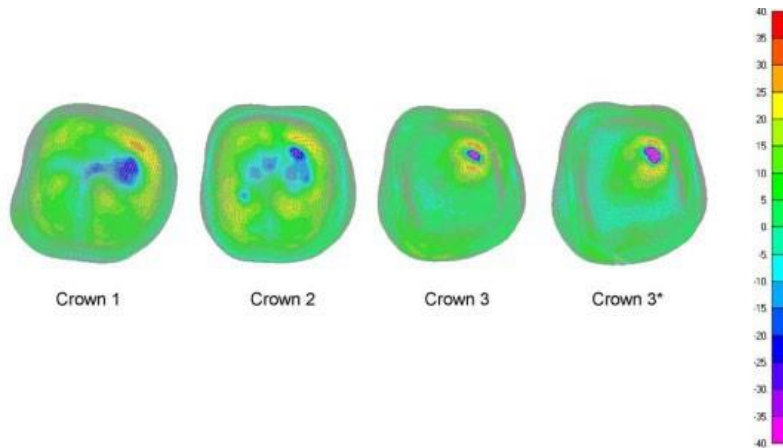
Τα αποτελέσματα των in vitro ερευνών που προαναφέρθηκαν κατέληξαν ότι:

Από τη μελέτη των Jager και συν.(2004) που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, την επιρροή του σχήματος της παρασκευής και του στρώματος κονίας, στην κατανομή των τάσεων στις ολοκεραμικές στεφάνες που παράγονται με CAD-CAM, η στεφάνη 3 (παρασκευή με βάθρο και μη ομοιόμορφο σχεδιασμό στρώματος κονίας) απέτυχε λίγο μετά την τοποθέτηση στην άπω-γλωσσική πλευρά, όπου ένα τμήμα της στεφάνης αποσπάστηκε. Η στεφάνη αντικαταστάθηκε επιτυχώς με νέα στεφάνη του ίδιου σχεδιασμού. Οι τρεις στεφάνες έχουν συμπληρώσει 1 έτος χρήσης. Αν και υπάρχουν υπολογισμένες τάσεις για κάθε στοιχείο και κάθε κατάσταση φόρτισης, παρουσιάζονται μόνο τα συνολικά αποτελέσματα. Στην [\[Εικόνα 61\]](#) παρουσιάζονται οι μέγιστες κύριες τάσεις των συνδυασμένων τάσεων λόγω των δυνάμεων δήξης, της διαφοράς του συντελεστή διαστολής των δύο κεραμικών και της συρρίκνωσης της κονίας στις μασητικές επιφάνειες των τριών στεφανών. Οι τάσεις στη στεφάνη 3 με ομοιόμορφο στρώμα κονίας (στεφάνη 3*) διαφέρουν ελαφρώς από τις τάσεις στη στεφάνη 3. Αυτό οφείλεται κυρίως σε μια μικρή διαφορά στα σημεία σύγκλισης.⁶⁵



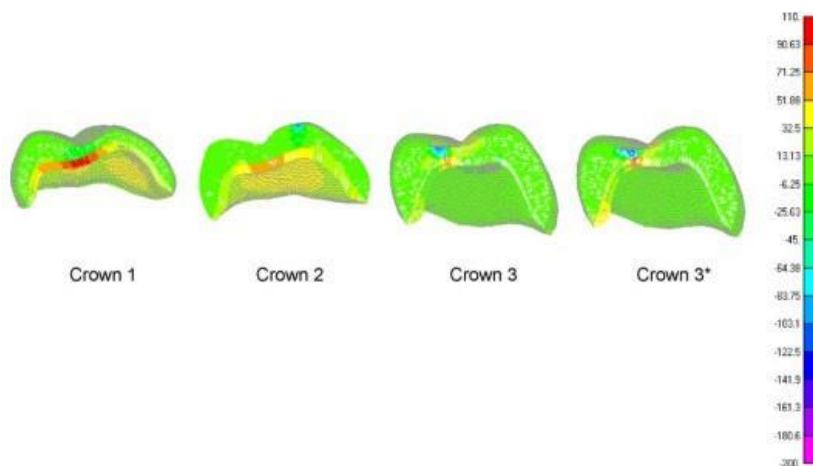
EIKONA 61: Οι δυνάμεις στο κεραμικό επικάλυψης στη μασητική περιοχή⁶⁵

Οι δυνάμεις δήξης αποτελούν την κύρια συνιστώσα των κύριων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων των αναπτυσσόμενων τάσεων. Στην [Εικόνα 62] παρουσιάζεται η μέγιστη κύρια τάση στη διεπιφάνεια πυρήνα-επικάλυψης. Οι δυνάμεις δήξης αποτελούν σημαντική συνιστώσα της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης στη διεπιφάνεια πυρήνα-επικάλυψης, η οποία αυξάνεται στις στεφάνες 1 και 2 λόγω της αναντιστοιχίας θερμικής συστολής των δύο κεραμικών. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι το ανομοιόμορφο στρώμα κονίας μειώνει αυτές τις τάσεις. Στην επιφάνεια του πυρήνα (διεπιφάνεια κονίας-πυρήνα) οι δυνάμεις δήξης αποτελούν σημαντική συνιστώσα της μέγιστης κύριας εφελκυστικής τάσης των συνδυασμένων τάσεων- η τάση αυτή αυξάνεται στη στεφάνη 1 και 2 λόγω της αναντιστοιχίας θερμικής συστολής των δύο κεραμικών.⁶⁵



ΕΙΚΟΝΑ 62: Οι τάσεις (σε MPa) στη διεπιφάνεια της πορσελάνης επικάλυψης και του πυρήνα.⁶⁵

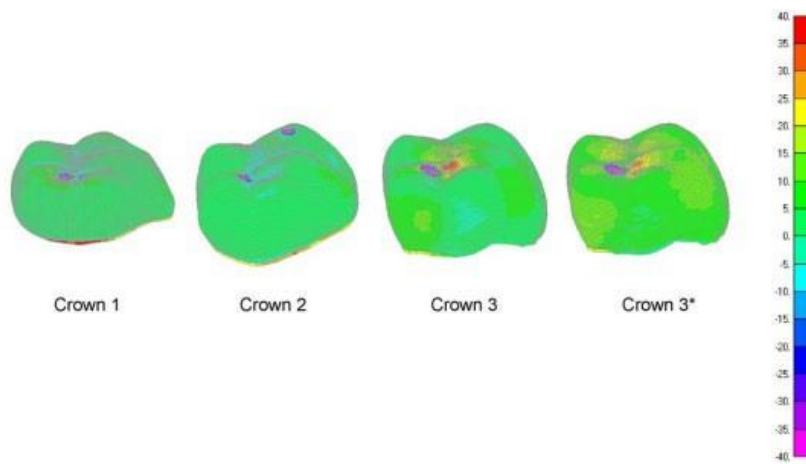
Στην [Εικόνα 63] παρουσιάζεται τομή των τριών στεφανών σε άπω-εγγύς όψη. Τα πάχη αποφλοιώσης στη διατομή με την υψηλότερη εφελκυστική τάση είναι 2.3, 2.2 και 1.2 mm για τις στεφάνες 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Προφανώς, δεν υπάρχει καμία σχέση μεταξύ της μέγιστης εφελκυστικής τάσης στον πυρήνα στη διεπιφάνεια κονιάς-πυρήνα και του πάχους αποφλοιώσης ή μεταξύ αυτών των τάσεων και του σχήματος του στρώματος κονιάς.⁶⁵



ΕΙΚΟΝΑ 63: Οι τάσεις (σε MPa) στα δύο κεραμικά στρώματα σε τομή που κόπηκε σε άπω-εγγύς όψη.⁶⁵

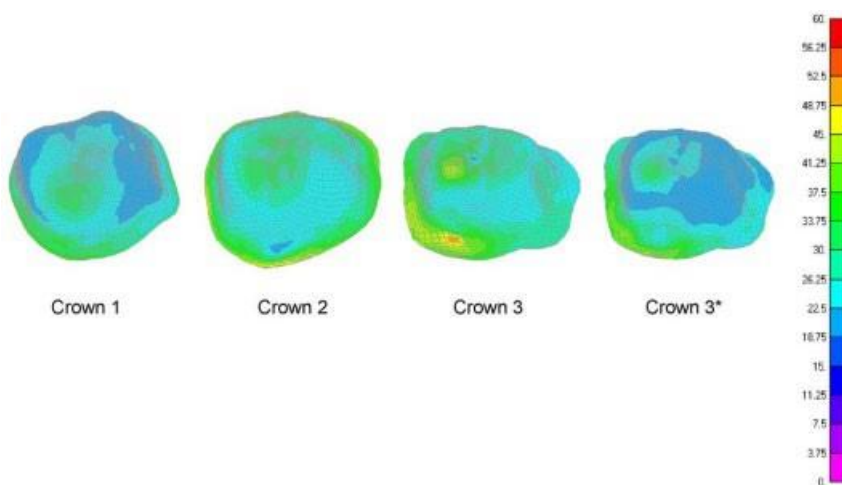
Η [Εικόνα 64] παρουσιάζει τις στεφάνες σε άπω-εγγύς όψη, δείχνοντας ότι η υψηλότερη τάση στην αυχενική επιφάνεια εντοπίζεται στην άπω-γλωσσική πλευρά.

Η σχετικά υψηλή κύρια εφελκυστική τάση στην αυχενική επιφάνεια του πυρήνα οφείλεται σε διάφορες επιδράσεις.⁶⁵



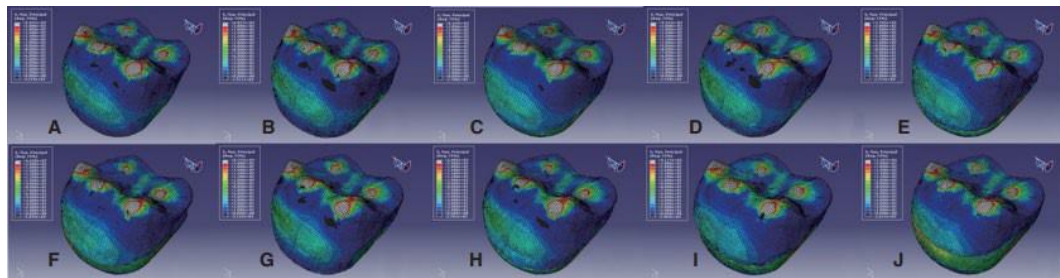
ΕΙΚΟΝΑ 64: Οι τάσεις (σε MPa) στην αυχενική επιφάνεια σε άπω-εγγύς όψη.⁶⁵

Στην [Εικόνα 65] παρουσιάζεται η μέγιστη διατμητική τάση στη στρώση κονιάς των συνδυασμένων τάσεων, η οποία προκαλείται από το συνδυασμό των δυνάμεων δήξης και της συρρίκνωσης της κονιάς. Η επίδραση της θερμικής αναντιστοιχίας των δύο κεραμικών είναι αμελητέα. Η τάση στη μη ομοιόμορφη στρώση κονιάς είναι σημαντικά υψηλότερη από ό,τι στις ομοιόμορφες στρώσεις κονιάς. Στη στεφάνη 3 με ομοιόμορφο στρώμα κονιάς, η μέγιστη διατμητική τάση των συνδυασμένων τάσεων είναι 35 MPa σε σύγκριση με 55 MPa στην κλινικά εφαρμοζόμενη στεφάνη.

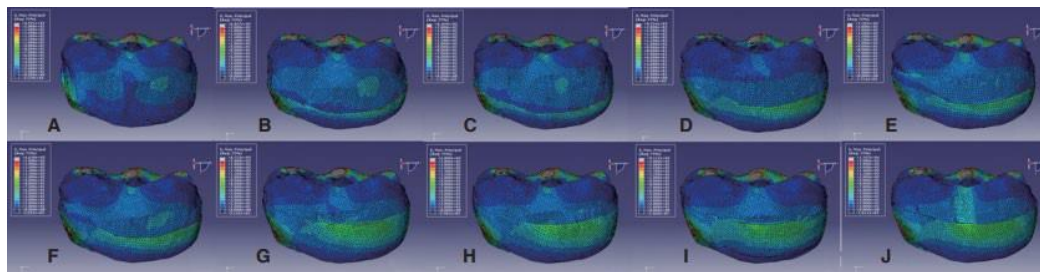


ΕΙΚΟΝΑ 65: Οι τάσεις (σε MPa) στην στρώση κονιάς.⁶⁵

Από την μελέτη των Ha SR και συν.(2013) που είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της κατανομής των τάσεων και των μέγιστων κύριων τάσεων (ΜΚΤ) εντός των οπίσθιων στεφανών από ζirkονία ως συνάρτηση του σχεδιασμού του πυρήνα υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης και θέσης με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στις [Εικόνα 66]και [Εικόνα 67] παρουσιάζεται η μέγιστη κύρια τάση (ΜΚΤ) που αξιολογήθηκε για τα δέκα μοντέλα υπό τη μέγιστη δύναμη δήξης.⁶⁶



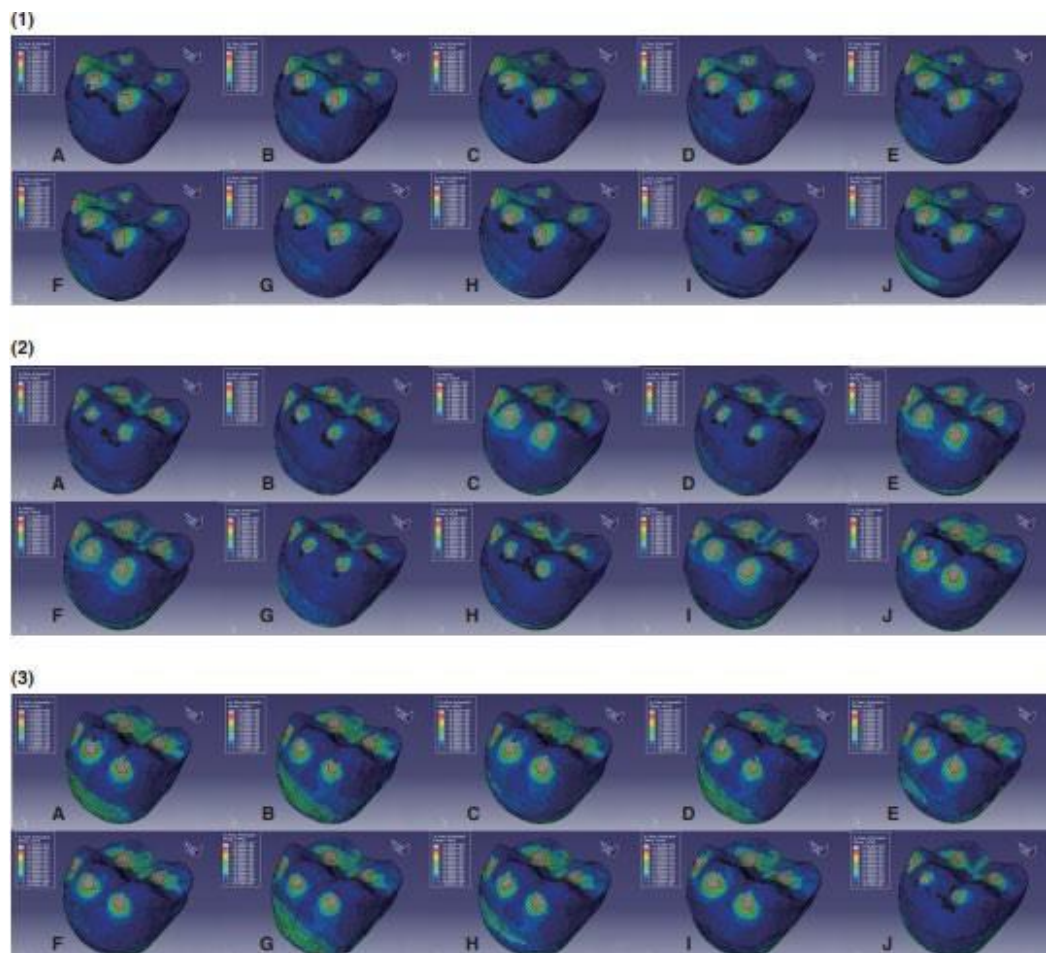
ΕΙΚΟΝΑ 66: Κατανομές μέγιστων κύριων τάσεων 10 μοντέλων που υποβλήθηκαν σε μέγιστη δύναμη δαγκώματος. Μέγιστη κύρια τάση συγκεντρώνεται στις περιοχές γύρω από τα σημεία φόρτισης στην επιφάνεια της στεφάνης. Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10.⁶⁶



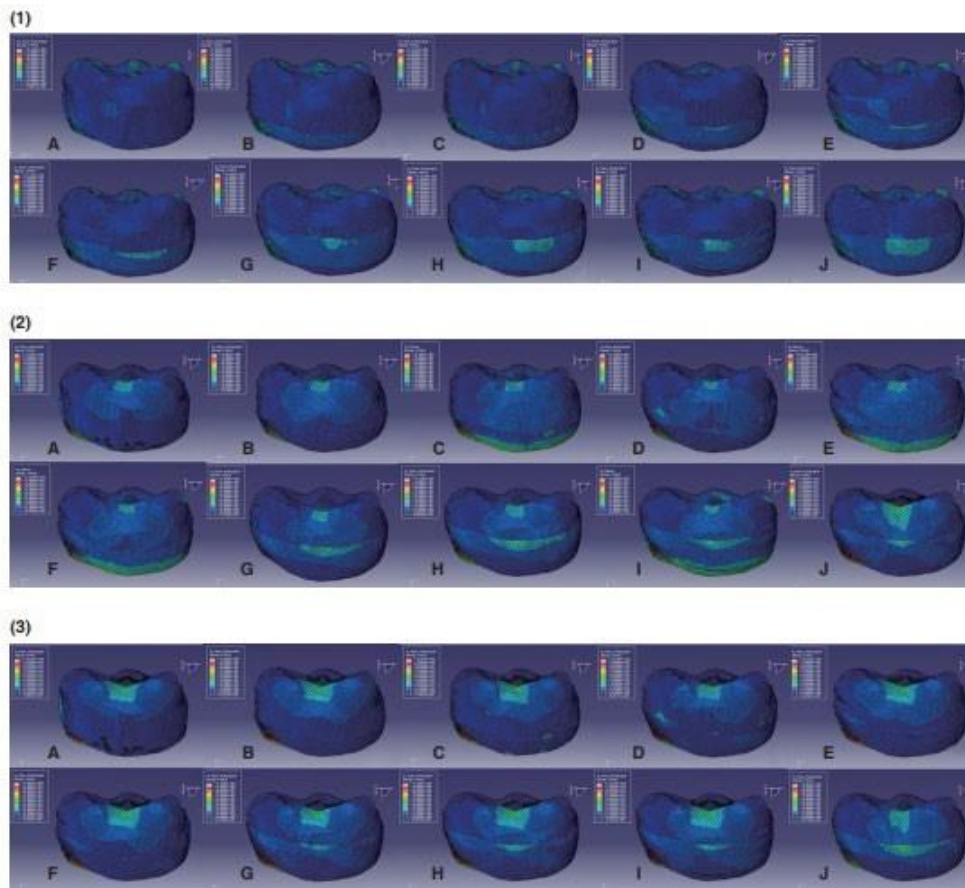
ΕΙΚΟΝΑ 67: Γλωσσική πλευρική όψη των κατανομών μέγιστης κύριας τάσης 10 μοντέλων που υποβλήθηκαν σε μέγιστη δύναμη δαγκώματος. Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10.⁶⁶

Τα δέκα μοντέλα είχαν διαφορετική κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης (ΜΚΤ). Αυτό απεικονίζει τη σχετική μείωση των επιπέδων της μέγιστης κύριας τάσης (ΜΚΤ) σε συνάρτηση με την αύξηση του σιριτιού στην περιοχή του κεραμικού πυρήνα του αυχένα. Παρατηρήθηκε ότι η περιοχή της μέγιστης κύριας τάσης (ΜΚΤ) στο παρειακό σιρίτι αυξήθηκε και ότι στην παρειακή επικάλυψη μειώθηκε καθώς το ύψος του παρειακού σιριτιού αυξανόταν έως και 3 mm από το αυχενικό όριο. Το φαινόμενο αυτό ήταν δραματικό στο μοντέλο 10 (J) που είχε το υψηλότερο παρειακό

σιρίτι. Ωστόσο, η μείωση της μέγιστης κύριας τάσης (ΜΚΤ) στην επικάλυψη ήταν μικρή ακόμη και όταν το ύψος του σιριτιού αυξανόταν σταδιακά, εκτός από το μοντέλο 10. Καθώς αυξανόταν το ύψος του γλωσσικού σιριτιού, η μέγιστη κύρια τάση (ΜΚΤ) στο γλωσσικό σιρίτι αυξανόταν και η μέγιστη κύρια τάση (ΜΚΤ) στην γλωσσική επικάλυψη μειωνόταν. Είναι ενδιαφέρον ότι η μέγιστη κύρια τάση (ΜΚΤ) στην εγγύς περιοχή ήταν υψηλή σε όλα τα μοντέλα. Τα μοντέλα που είχαν γλωσσικό σιρίτι ύψους 3 mm παρουσίασαν υψηλή μέγιστη κύρια τάση (ΜΚΤ) στο γλωσσικό σιρίτι. ⁶⁶



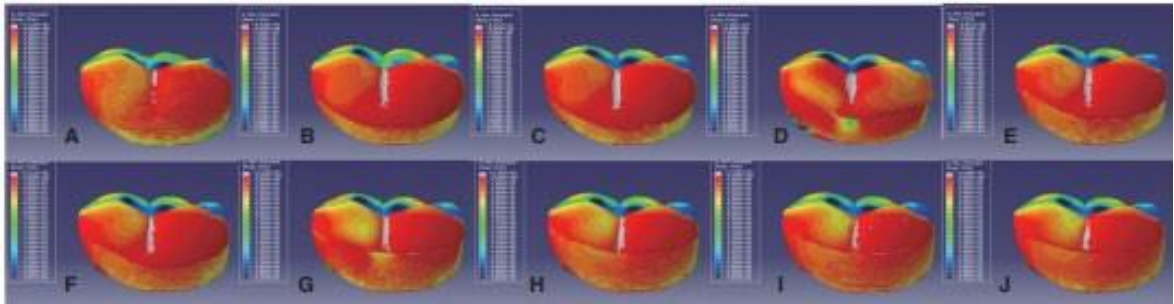
ΕΙΚΟΝΑ 68: Κατανομές μέγιστων κύριων τάσεων 10 μοντέλων που υποβάλλονται σε μασητική δύναμη (υπό την εφαρμογή φορτίων από τρεις κατευθύνσεις). (1) φορτίο 280 N σε 0° ως προς τον άξονα των δοντιών (κατακόρυφη κατεύθυνση), (2) φορτίο 280 N σε 45° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς το γλωσσικό περιθώριο, και (3) φορτίο 280 N στις 90° προς τον άξονα του δοντιού, προς τη γλωσσική επιφάνεια (οριζόντια κατεύθυνση). Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10. ⁶⁶



ΕΙΚΟΝΑ 69: Γλωσσική πλευρική όψη των κατανομών μέγιστης κύριας τάσης 10 μοντέλων που υποβλήθηκαν σε μασητική δύναμη. (1) φορτίο 280 N σε 0° ως προς τον άξονα του δοντιού (κατακόρυφη κατεύθυνση), (2) φορτίο 280 N σε 45° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς το γλωσσικό περιθώριο, και (3) φορτίο 280 N στις 90° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς τη γλωσσική επιφάνεια (οριζόντια κατεύθυνση). Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10.⁶⁶

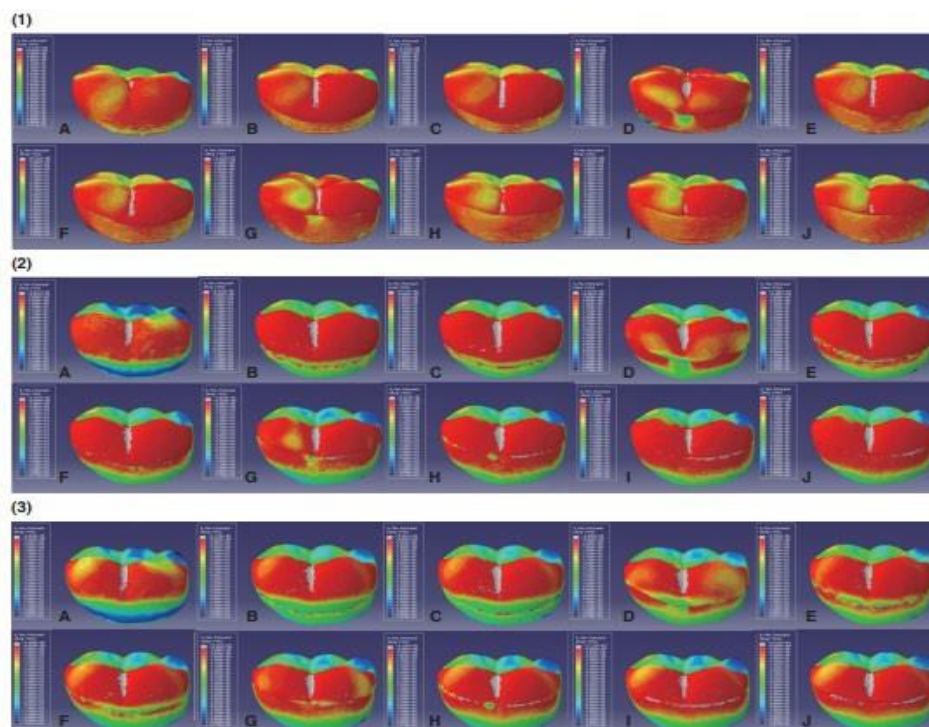
Οι κατανομές MKT σε δέκα μοντέλα που υποβλήθηκαν σε μασητική δύναμη σε τρεις κατευθύνσεις παρουσιάζονται στις [Εικόνα 68] και [Εικόνα 69]. Παρατηρήθηκε ότι η MKT στον παρειακό και γλωσσικό σιρίτι ήταν υψηλή στα μοντέλα που είχαν σιρίτι ύψους 3 mm και ελαφρώς υψηλή στα μοντέλα που είχαν σιρίτι ύψους 2 mm, όταν το φορτίο εφαρμόστηκε στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Όταν το φορτίο εφαρμόζοταν σε γωνιακή κατεύθυνση, η MKT στο παρειακό περιθώριο ήταν υψηλή ανεξάρτητα από την ύπαρξη παρειακού σιριτιού, ενώ εκείνη στο γλωσσικό περιθώριο ήταν υψηλή στα μοντέλα που είχαν παρειακό σιρίτι.⁶⁶ Η γωνιακή φόρτιση είχε ως αποτέλεσμα τη γενική αύξηση του MKT σε σύγκριση με την κάθετη φόρτιση στον γλωσσικό σιρίτι. Η υποστηρικτική επίδραση του γλωσσικού σιριτιού αυξανόταν καθώς η κατεύθυνση της φόρτισης άλλαζε από κάθετη σε

γωνιακή. Όταν το φορτίο εφαρμόστηκε σε οριζόντια κατεύθυνση, η ΜΚΤ επικεντρώθηκε στη φατνιακή αυχενική επικάλυψη στα μοντέλα χωρίς σιρίτι. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην περιοχή καταπόνησης στο γλωσσικό σιρίτι, εκτός από το σιρίτι ύψους 3 mm. Στην [Εικόνα 70] παρουσιάζεται η γλωσσική πλευρική όψη των κατανομών της ελάχιστης κύριας τάσης εντός των δέκα μοντέλων υπό τη μέγιστη δύναμη δήξης. ⁶⁶



ΕΙΚΟΝΑ 70: Γλωσσική πλευρική όψη των κατανομών της ελάχιστης κύριας τάσης στα 10 μοντέλα που υποβλήθηκαν σε μέγιστη δύναμη δαγκώματος. Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10. ⁶⁶

Οι κατανομές ελάχιστων κύριων τάσεων εντός των δέκα μοντέλων που υποβάλλονται σε μασητική δύναμη σε τρεις κατευθύνσεις παρουσιάζονται στο [Εικόνα 71]



EΙΚΟΝΑ 71: Γλωσσική πλευρική όψη των κατανομών της ελάχιστης κύριας τάσης 10 μοντέλων που υποβλήθηκαν σε μασητική δύναμη (υπό εφαρμογή φορτίων από τρεις κατευθύνσεις). (1) φορτίο 280 N σε 0° ως προς τον άξονα των δοντιών (κατακόρυφη κατεύθυνση), (2) φορτίο 280 N στις 45° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς το γλωσσικό περιθώριο, και (3) φορτίο 280 N στις 90° ως προς τον άξονα του δοντιού, προς το γλωσσική επιφάνεια (οριζόντια κατεύθυνση). Μοντέλο A-J=Μοντέλο 1-10. ⁶⁶

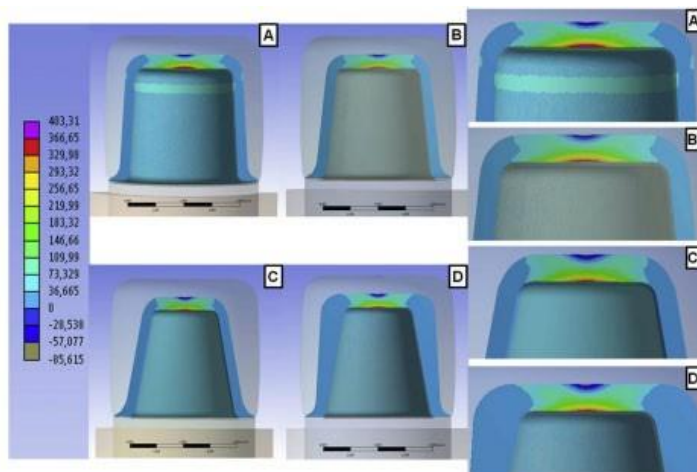
Συνολικά, τα επίπεδα θλιπτικών τάσεων εντός του κεραμικού πυρήνα εντοπίστηκαν σε 2 διαφορετικές περιοχές σε συνάρτηση με το ύψος του σιριτιού και τη θέση στον πυρήνα. Οι θέσεις αυτές ήταν η περιοχή των ακρολοφιών γύρω από τα σημεία φόρτισης και η περιοχή του σιριτιού, καθώς όλο το ύψος του σιριτιού αυξανόταν έως και 3 mm από το περιθώριο. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι περιοχές εφελκυστικών τάσεων γύρω από τα σημεία φόρτισης στην επιφάνεια του επικάλυψης μειώθηκαν καθώς το ύψος όλων των ώμων αυξανόταν από 0 έως 3 mm. Κατά την προσομοίωση της μέγιστης δύναμης δήξης, οι υψηλότερες θλιπτικές τάσεις εντοπίστηκαν στην περιοχή της σύγκλεισης γύρω από τα σημεία φόρτισης στην επιφάνεια του επικάλυψης. Οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώνονταν επίσης στις περιοχές γύρω από τα σημεία φόρτισης στην επιφάνεια της στεφάνης. Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή του σιριτιού. Οι θλιπτικές τάσεις ήταν υψηλές στην περιοχή του αυχενικού σιριτιού του κεραμικού πυρήνα. ⁶⁶ Καθώς αυξανόταν το ύψος του σιριτιού, οι θλιπτικές τάσεις αυξάνονταν στην περιοχή του σιριτιού και οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονταν γύρω από τα σημεία φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό ήταν δραματικό στο μοντέλο 10. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην περιοχή των τάσεων στην περιοχή της παρειακής ακρολοφίας, καθώς το ύψος του γλωσσικού σιριτιού αυξήθηκε χωρίς το παρειακό σιρίτι. Στην περιοχή του σιριτιού, οι τάσεις ήταν υψηλές στην κορυφή του σιριτιού και μειώνονταν σταδιακά από την κορυφή προς το περιθώριο. Κατά την προσομοίωση της μασητικής δύναμης, οι θλιπτικές τάσεις εντοπίστηκαν στα σημεία φόρτισης και στην περιοχή του σιριτιού. Η γωνιακή φόρτιση είχε ως αποτέλεσμα μια γενική αύξηση των θλιπτικών τάσεων στην περιοχή του σιριτιού καθώς το ύψος του γλωσσικού σιριτιού αυξανόταν έως 3 mm από 2 mm. Η υποστηρικτική επίδραση του γλωσσικού σιριτιού ήταν μικρή στα μοντέλα εκείνα που είχαν γλωσσικό σιρίτι ύψους 1 mm και εκείνα που είχαν γλωσσικό σιρίτι ύψους 2 mm χωρίς παρειακό σιρίτι. Η

οριζόντια φόρτιση έδειξε την υποστηρικτική επίδραση του γλωσσικού σιριτιού στα μοντέλα που είχαν γλωσσικό σιρίτι ύψους 3 mm ανεξάρτητα από το παρειακό σιρίτι.

66

Από τη μελέτη των Corazza και συν.(2013) που είχαν ως στόχο να διερευνήσουν την επίδραση της ολικής σύγκλισης της οδοντικής παρασκευής (Συνολική Μασητική Γωνίωση) και της κυκλικής κόπωσης στο φορτίο θραύσης πυρήνα με βάση το Υ-TZP, επικαλυμμένο με πορσελάνη, φάνηκε πως η προέλευση της θραύσης και οι τρόποι αστοχίας προσδιορίστηκαν ως θραύση (θραύση της πορσελάνης) ή καταστροφική αστοχία (θραύση της πορσελάνης και του σκελετού).

67 [Εικόνα 72]

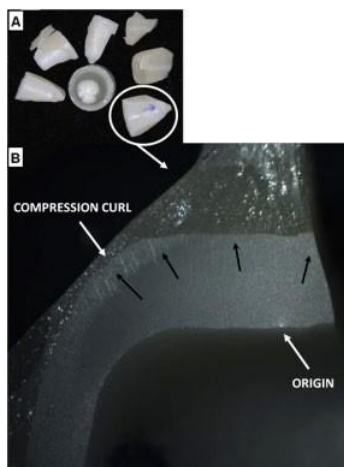


ΕΙΚΟΝΑ 72: Κατανομή τάσεων στο κεραμικό πυρήνα (A: G6- B: G12- C: G20- D: G20MOD).

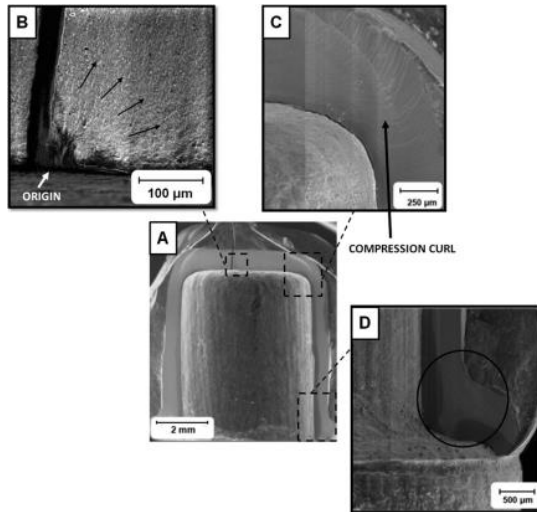
Τα Α', Β', C' και D' είναι κοντινές απόψεις της περιοχής με τη μέγιστη τάση (επιφάνεια κονιάς) των G6, G12, G20 και G20MOD, αντίστοιχα. ⁶⁷

Η μεγαλύτερη τιμή μέγιστης κύριας τάσης στην πορσελάνη βρέθηκε για το μοντέλο G12 (μοντέλο με μασητική γωνίωση 12°)(4839 MPa), ακολουθούμενη από τα μοντέλα G20(μοντέλο με μασητική γωνίωση 20°)(4267 MPa), G20MOD (τροποποιημένο μοντέλο με μασητική γωνίωση 20°)(3981 MPa) και G6 (μοντέλο με μασητική γωνίωση 6°)(3353 MPa). Η εικόνα της κατανομής των τάσεων στην πορσελάνη ήταν παρόμοια για όλα τα μοντέλα που αξιολογήθηκαν. Η G6 μετέδωσε τις υψηλότερες τιμές εφελκυστικής τάσης στο πυρήνα (403 MPa) μεταξύ όλων των ομάδων (G12 - 389 MPa, G20 - 363 MPa, G20MOD - 351 MPa). Η κατανομή των

τάσεων στο πυρήνα έδειξε σημαντική συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στην εσωτερική μασητική επιφάνεια (επιφάνεια κονιάς) για όλα τα μοντέλα. Όλες οι αποκαταστάσεις δεν παρουσίασαν ορατή βλάβη μετά από κυκλική κόπωση. Μετά τη φόρτιση, οι αποκαταστάσεις αστόχησαν με αποκόλληση της πορσελάνης ή καταστροφικά. Δεν υπήρξε καμία περίπτωση θραύσης της μήτρας. Οι μέσες τιμές N και MPa για τις αποκαταστάσεις της ομάδας G20MOD (τροποποιημένο μοντέλο με μασητική γωνίωση 20°) ήταν στατιστικά μεγαλύτερες από τις μέσες τιμές των άλλων ομάδων.⁶⁷ Η κυκλική κόπωση δεν έδειξε καμία στατιστική επίδραση για κάθε πειραματικό μοντέλο. Οι χαμηλότερες μέσες τιμές N και MPa βρέθηκαν για τις ομάδες G12 και G6(μοντέλο με μασητική γωνίωση 12° και 6° αντίστοιχα), οι οποίες δεν παρουσίασαν στατιστική διαφορά μεταξύ τους. Όλες οι θραύσεις αποκόλλησης (22,5%) ξεκίνησαν κοντά στην περιοχή εφαρμογής του φορτίου, δημιουργώντας υπόγειες κωνικές ρωγμές. Όταν εμφανίστηκαν καταστροφικές αστοχίες (77,5%), η προέλευση εντοπίστηκε στην εσωτερική μασητική επιφάνεια (επιφάνεια κονιάς) του σκελετού.⁶⁷ [Εικόνα 73-74]



ΕΙΚΟΝΑ 73: (A) Θραύσματα από καταστροφική θραύση (B) εικόνα στερεομικροσκοπίας του δείγματος από το G20 σπασμένης επιφάνειας που περιέχει το κρίσιμο ελάττωμα (λευκό βέλος). Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής. Η καμπύλη συμπίεσης (λευκό βέλος) υποδεικνύει την περιοχή της θλιπτικής τάσης.⁶⁷



ΕΙΚΟΝΑ 74: Φωτομικρογραφίες μιας σπασμένης αποκατάστασης (G6). (μοντέλο με μασητική γωνίωση 6°) (A) Σφαιρική άποψη ενός θραύσματος που έχει υποστεί θραύση στη μήτρα, (B) προέλευση του κατάγματος σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής, (C) μαύρο βέλος υποδεικνύει την καμπύλη συμπίεσης, (D) ο μαύρος κύκλος περιέχει μερικά σπασίματα που επιβεβαίωσαν την dcp.⁶⁷

Ο παρακάτω πίνακας [Εικόνα 75] παρουσιάζει τον αριθμό των καταστροφικών αστοχιών και των αστοχιών αποκόλλησης ανά πειραματική ομάδα και το μέσο φορτίο κατά τη θραύση ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας. Τα δοκίμια G6 (μοντέλο με μασητική γωνίωση 6°) παρουσίασαν τον μεγαλύτερο αριθμό καταστροφικών αστοχιών (95%), ο οποίος επικράτησε και στις αποκαταστάσεις των G12 και G20. (μοντέλο με μασητική γωνίωση 12° και 20° αντίστοιχα)⁶⁷

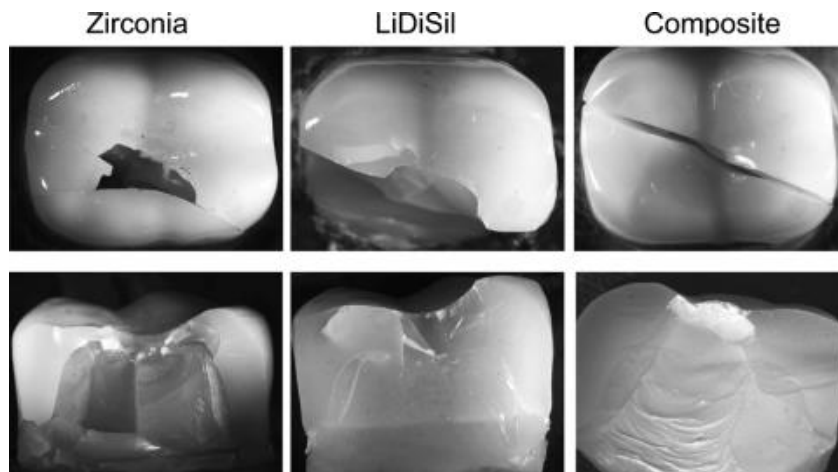
	Chipping		Catastrophic	
	Failures	L (N)	Failures	L (N)
G6	0	-	10	1395 (75)
G6c	1	1594	9	1471 (143)
Total		5%		95%
G12	1	1385	9	1291 (151)
G12c	2	1246 (193)	8	1414 (172)
Total		15%		85%
G20	3	1643 (40)	7	1714 (181)
G20c	0	-	10	1694 (152)
Total		15%		85%
G20MOD	5	2576 (326)	5	1974 (243)
G20MODc	6	2712 (127)	4	1710 (195)
Total		55%		45%

EIKONA 75: Ταξινόμηση ανάλογα με τον τύπο θραύσης (θραύση ή καταστροφική αστοχία) σε κάθε πειραματική ομάδα, η μέση τιμή και τυπική απόκλιση του φορτίου κατά τη θραύση (L, σε N).

67

Παρά την παρόμοια κατανομή των τάσεων, παρουσιάστηκαν διαφορετικές τιμές μέγιστης κύριας τάσης για τα μοντέλα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, επιβεβαιώνοντας την πρώτη υπόθεση της μελέτης. Η χαμηλότερη τιμή μέγιστης κύριας τάσης δημιουργήθηκε στο σκελετό του μοντέλου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων G20MOD (τροποποιημένο μοντέλο με μασητική γωνίωση 20°), γεγονός που υποδηλώνει ανώτερη μηχανική συμπεριφορά, η οποία επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κυκλική κόπωση δεν είχαν σημαντική επίδραση στο φορτίο θραύσης των αποκαταστάσεων του ίδιου σχεδιασμού, απορρίπτοντας τη δεύτερη υπόθεση της μελέτης. Η συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) του παρασκευάσματος και ο σχεδιασμός του σκελετού επηρέασαν το φορτίο θραύσης των κεραμικών αποκαταστάσεων με βάση το ζirkόνιο, επιβεβαιώνοντας την τρίτη υπόθεση της μελέτης. Οι αποκαταστάσεις από την ομάδα G20MOD παρουσίασαν το μεγαλύτερο φορτίο θραύσης. Ανεξάρτητα από την παρασκευή, οι αποκαταστάσεις YZ-VM9 εμφάνισαν μεγαλύτερο φορτίο θραύσης από το αναφερόμενο φυσιολογικό φορτίο σύγκλεισης.⁶⁷

Από την μελέτη των Zhang και συν.(2015)³⁹, που είχαν ως στόχο τη ποσοτικοποίηση της αντίστασης στη διάσπαση διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται για στεφάνες πλήρους ανατομίας, επέλεξαν τρία υποψήφια υλικά αποκατάστασης για μονολιθικές οδοντικές στεφάνες: (i) ζirkονία υψηλής διαφάνειας (ii) διπυριτικό λίθιο και (iii) σύνθετο υλικό με βάση τη ρητίνη και κεραμικά νανοσωματίδια, αντιπροσωπευτικές άνω και πλαϊνές όψεις αστοχιών σε κάθε μονολιθικό σύστημα στεφάνης παρουσιάζονται στην [\[Εικόνα 76\]](#)



EIKONA 76: Ρωγμές που προκαλούνται από την επαφή για στεφάνες από ζirkονία (Y-TZP), διπυριτικό λίθιο CAD και κεραμικά νανοσύνθετα με βάση τη ρητίνη. Οι πλευρικές όψεις λαμβάνονται μετά τον διαχωρισμό των θραυσμάτων που έχουν διασπαστεί. ³⁹

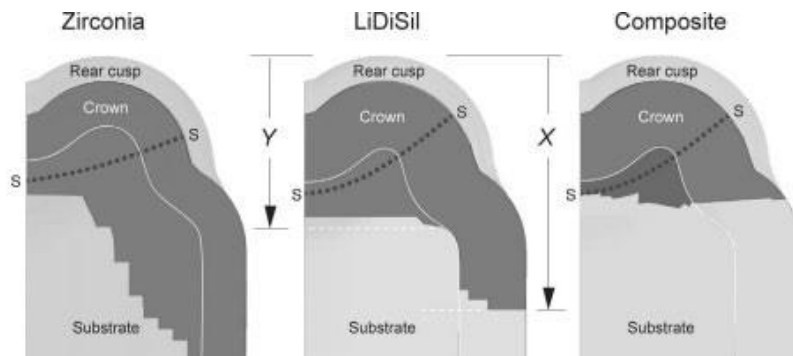
Σε όλες τις περιπτώσεις η τελική θραύση επήλθε με διάσπαση μέσω της οδοντίνης στη βάση της στεφάνης σε δύο και μερικές φορές σε περισσότερα τμήματα. Οι διασπάσεις παρέκκλιναν ελαφρώς από το επίπεδο της σχισμής συμμετρίας μεταξύ των ακρολοφιών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θραύση μπορεί εξίσου καλά να βρει μια διαδρομή μέσα από μιας ακρολοφία, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη διάταξη φόρτισης σφαίρας σε τέσσερις ακρολοφίες που διερευνήθηκε εδώ. Σε όλες τις περιπτώσεις, η αστοχία εμφανίστηκε απότομη στο κρίσιμο φορτίο, χωρίς πτώση φορτίου ή ορατά σημάδια πρόδρομης, διαμήκους ή άλλης σταθερής ρωγμής πριν από τη διάσπαση κατά την επιτόπια εξέταση του πλευρικού τοιχώματος. Αυτό είναι ενδεικτικό των σχετικά απαλλαγμένων από ελαττώματα υλικών στεφάνης, όπου, σε αντίθεση με το σμάλτο, πρέπει πρώτα να ξεκινήσουν οι αρχικές ρωγμές πριν ακολουθήσει οποιαδήποτε θραύση. Ενώ οι τομές των σχισμών στις στεφάνες από ζirkονία και διπυριτικό λίθιο είναι "καθαρές" εκείνες στη νανοσύνθετη στεφάνη παρουσιάζουν σημαντική πλαστική παραμόρφωση στο υπόστρωμα κάτω από τις μασητικές επαφές, ενδεικτική της μειωμένης ικανότητας του σύνθετου υλικού να παρέχει επαρκή στήριξη υπό υψηλά φορτία. Η προσεκτικότερη φρακτογραφική επιθεώρηση των σπασμένων τμημάτων της στεφάνης επιβεβαίωσε ότι οι θέσεις έναρξης της ρωγμής βρίσκονται στην μασητική περιοχή εντός του κελύφους της στεφάνης, μεταξύ των ακρορριζικών σημείων φόρτισης. Τα πειραματικά μετρούμενα

κρίσιμα φορτία για την πρόκληση πλήρους διάσπασης σε κάθε μονολιθικό σύστημα στεφάνης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα [Εικόνα 77], μαζί με τις μέσες τιμές και την τυπική απόκλιση ($n = 6$).³⁹

Material	Experiment		XFEM	
	P_S (kN)	C_S	P_S (kN)	C_S
Zirconia	5.78 ± 1.05	3.37 ± 0.61	5.20 ± 1.30	3.03 ± 0.76
Lithium disilicate	3.64 ± 0.33	2.12 ± 0.19	3.65 ± 0.93	2.13 ± 0.54
Dental composite	2.86 ± 0.47	1.67 ± 0.27	2.65 ± 0.66	1.55 ± 0.39

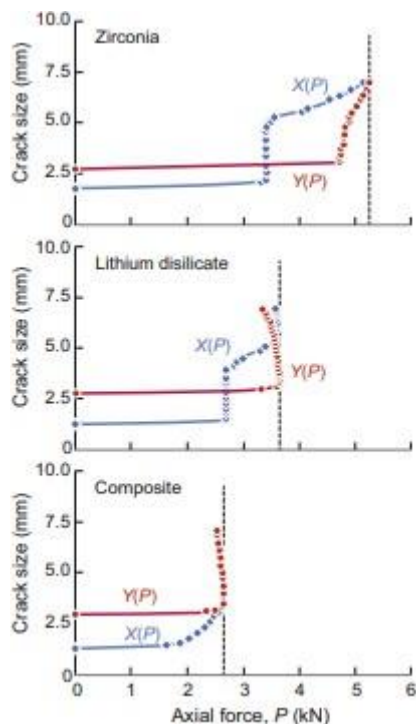
ΕΙΚΟΝΑ 77: Κρίσιμα φορτία διάσπασης P_S για ανατομικά σωστές μονολιθικές στεφάνες γομφίων. Τα πειραματικά δεδομένα από τις δοκιμές διάσπασης *ex vivo* είναι μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις, $n = 6$ σε κάθε περίπτωση. Τα δεδομένα XFEM είναι προβλεπόμενες τιμές με όρια αβεβαιότητας λόγω της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του υλικού.³⁹

Τα μεμονωμένα πειραματικά σύνολα δεδομένων σε αυτόν τον πίνακα ακολουθούν κανονική κατανομή. Η μονόδρομη ANOVA στα δεδομένα εντός των επιμέρους ομάδων δείχνει ότι η ζirkονία είναι σημαντικά ισχυρότερη από τα άλλα δύο υλικά αλλά το διπυριτικό λίθιο δεν είναι σημαντικά ισχυρότερο από το οδοντιατρικό νανοσύνθετο. Τα κρίσιμα φορτία είναι όλα υψηλά σε σχέση με τις πιο σοβαρές δυνάμεις δήξης, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη διαμόρφωση φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές. Οι υπολογισμοί XFEM (extended finite element model- διευρυμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) πραγματοποιήθηκαν σε συστήματα στεφάνης με ρωγμές εκκίνησης χρησιμοποιώντας παραμέτρους, για ακτίνα σφαίρας εσοχής $r = 3,2\text{mm}$. Ο αλγόριθμος επέτρεψε να ακολουθηθεί βήμα προς βήμα η επέκταση από τις ρωγμές εκκίνησης κατά μήκος του επιπέδου της ρωγμής συμμετρίας μέσω του κελύφους της στεφάνης και του εσωτερικού του σύνθετου υλικού, μέχρι και πέρα από το σημείο στο οποίο η θραύση έγινε ασταθής.³⁹ Στην [Εικόνα 78] φαίνονται σε ημιτομή τα προφίλ των ρωγμών που δημιουργήθηκαν στα επίπεδα ρωγμών μεταξύ των ακρολοφιών για κάθε υλικό κατά την αστοχία.



ΕΙΚΟΝΑ 78: Προβλέψεις XFEM (extended finite element model- διευρυμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) για τη διάσπαση της στεφάνης για το πρότυπο σύστημα της [εικόνας 75](#), όπου φαίνονται οι ημιτομές στο σημείο αστοχίας.³⁹

Η [Εικόνα 78](#) αντικατοπτρίζει τη διακριτή διαμόρφωση του πλέγματος. Σε κάθε περίπτωση, οι τομές δείχνουν την ανάπτυξη της ρωγμής από τα μέτωπα ρωγμών SS, με επέκταση προς τα κάτω που μετράται με τις συντεταγμένες ρωγμής X και Y από την κορυφή της κορυφής της ακρολοφίας έως το μέγιστο βάθος στην στεφάνη και το υπόστρωμα αντίστοιχα. Τα καθορισμένα με XFEM (extended finite element model- διευρυμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) κρίσιμα φορτία για κάθε σύστημα στεφάνης περιλαμβάνονται στην [Εικόνα 77](#), με όρια αβεβαιότητας που εκτιμώνται από τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, οι στεφάνες ζirkονίας έχουν τα υψηλότερα φορτία αστοχίας, ενώ οι οδοντιατρικές νανοσύνθετες τα χαμηλότερα. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή της ακολουθίας ρηγμάτωσης δίνεται στην [\[Εικόνα 79\]](#), όπου απεικονίζονται οι συντεταγμένες X και Y σε συνάρτηση με το εφαρμοζόμενο φορτίο P.³⁹



ΕΙΚΟΝΑ 79: Προβλέψεις XFEM (extended finite element model- διευρυμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) για το βάθος ρωγμής X στο κέλυφος της στεφάνης και Y στο εσωτερικό πληρωτικό υλικό από το ύψος της κορυφής. Σταθερή επέκταση της ρωγμής πριν από την αστοχία υποδεικνύεται τόσο στη στεφάνη όσο και στο υπόστρωμα στην κάθε περίπτωση. Οι κάθετες διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν το φορτίο αστάθειας, δηλ. θραύση διάσπασης³⁹

Σε κάθε περίπτωση η επέκταση της ρωγμής στο υπόστρωμα προβλέπεται να υστερεί σε σχέση με εκείνη στο κέλυφος της στεφάνης. Αυτό συμβαίνει μέχρι το φορτίο αστοχίας, που σημειώνεται με τις κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές. Για το διπυριτικό λίθιο και το νανοσύνθετο, οι καμπύλες περνούν από ένα μέγιστο, που υποδηλώνει αστάθεια σε ένα μέρος του τοιχώματος του δοντιού. (Η αρνητική κλίση πέρα από το σημείο αστάθειας στις τελευταίες περιπτώσεις αντικατοπτρίζει τον έλεγχο της μετατόπισης στον αλγόριθμο φόρτισης). Επιλεγμένες συγκρίσιμες εκτελέσεις XFEM (extended finite element model- διευρυμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) για το σύστημα στεφάνης ζirkονίας με ένα στρώμα κονίας, δεν έδειξαν σημαντική διαφορά στο τελικό κρίσιμο φορτίο εντός των δηλωμένων ορίων υπολογιστικής αβεβαιότητας.³⁹

Με τη βελτιωμένη αντοχή των σύγχρονων υλικών του πυρήνα, οι αναλύσεις δείχνουν ότι οι τάσεις στον πυρήνα δεν θα πρέπει να επηρεάζουν σημαντικά τη

μακροζωία της αποκατάστασης.⁶⁵ Σε πολλές διαμορφώσεις, τα πιο κρίσιμα σημεία θα είναι στην πορσελάνη επικάλυψης κοντά στη διεπιφάνεια με τον πυρήνα και στις άπω-γλωσσικές θέσεις στην αυχενική επιφάνεια. Η θερμική αναντιστοιχία των δύο κεραμικών μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στην πορσελάνη επικάλυψης- επομένως, συνιστάται η διαφορά θερμικής διαστολής των δύο κεραμικών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Το περίγραμμα είναι κρίσιμο για την πορσελάνη επικάλυψης, ιδίως όταν καταλήγει σε παρασκευή οξύαιχμη (σαν μαχαίρι)- επομένως, συνιστάται μια παρασκευή με βάθρο. Το ανομοιόμορφο στρώμα κονιάς δεν μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στην πορσελάνη επικάλυψης στη διεπιφάνεια μεταξύ της πορσελάνης επικάλυψης και του πυρήνα, αλλά μπορεί να αυξήσει τις μέγιστες διατμητικές τάσεις στο στρώμα κονιάς στις επιφάνειες συγκόλλησης σε τιμές που υπερβαίνουν την αντοχή συγκόλλησης του στρώματος κονιάς με την αποκατάσταση και την παρασκευή. Επομένως, το πάχος της στρώσης κονιάς πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφο και λεπτό. Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι η τήρηση αυτών των συγκεκριμένων κανόνων σχεδιασμού για ολοκεραμικές στεφάνες μπορεί να αυξήσει τη μακροζωία αυτών των αποκαταστάσεων.⁶⁵

Με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δείχθηκε ότι η στήριξη της πορσελάνης επικάλυψης είναι σημαντική για την ακεραιότητα των οπίσθιων στεφανών ζirkονίας και ότι η στήριξη των σιριτιών είναι κρίσιμος παράγοντας. Η αύξηση του ύψους του σιριτιού λειτούργησε ως απορροφητής τάσεων σε περιοχές κοντά στα όρια της στεφάνης, γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιοχή αυτή μπορεί να είναι κρίσιμο σημείο για τη στήριξη της πορσελάνης επικάλυψης κατά τη λειτουργία.⁶⁶ Παρά την παρόμοια κατανομή των τάσεων, παρουσιάστηκαν διαφορετικές τιμές μέγιστης κύριας τάσης για τα μοντέλα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, επιβεβαιώνοντας την πρώτη υπόθεση της μελέτης. Η χαμηλότερη τιμή μέγιστης κύριας τάσης δημιουργήθηκε στο σκελετό του μοντέλου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων G20MOD, γεγονός που υποδηλώνει ανώτερη μηχανική συμπεριφορά, η οποία επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κυκλική κόπωση δεν είχαν σημαντική επίδραση στο φορτίο θραύσης των αποκαταστάσεων του ίδιου σχεδιασμού,

απορρίπτοντας τη δεύτερη υπόθεση της μελέτης. Η γωνία ΣΜΓ του παρασκευάσματος και ο σχεδιασμός του σκελετού επηρέασαν το φορτίο θραύσης των κεραμικών αποκαταστάσεων με βάση το ζirkόνιο, επιβεβαιώνοντας την τρίτη υπόθεση της μελέτης. Οι αποκαταστάσεις από την ομάδα G20MOD παρουσίασαν το μεγαλύτερο φορτίο θραύσης. Ανεξάρτητα από την συνολική μασητική γωνίωση (ΣΜΓ) της παρασκευής, οι αποκαταστάσεις YZ-VM9 (ζirkόνιο-πορσελάνη) εμφάνισαν μεγαλύτερο φορτίο θραύσης από το αναφερόμενο φυσιολογικό φορτίο μάσησης.⁶⁷ Η ζirkονία είναι η πιο ανθεκτική στη θραύση και τα οδοντιατρικά νανοσύνθετα τα λιγότερο ανθεκτικά, με μέση το διπυριτικό λίθιο. Οι σκληρότερες και ισχυρότερες στεφάνες από ζirkονία και διπυριτικό λίθιο παρέχουν ανώτερη θωράκιση των τάσεων στο εσωτερικό του δοντιού και εμποδίζουν την έναρξη ρωγμών. Ταυτόχρονα, επισημαίνεται ότι η ακεραιότητα της μονολιθικής δομής της στεφάνης μπορεί εύκολα να τεθεί σε κίνδυνο από ελαττώματα κατασκευής και ατέλειες προετοιμασίας ή τοποθέτησης, από ακούσια αποκόλληση, υπερβολική αμμοβολή και φινίρισμα με φρέζα, καθώς και από κόπωση.³⁹

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

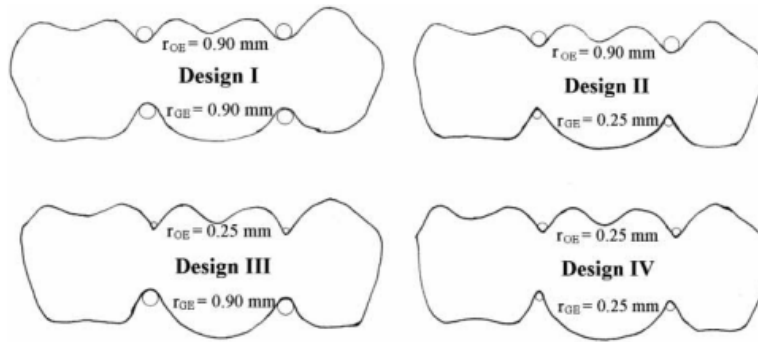
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν εργασίες που τα δοκίμια ήταν ολοκεραμικές γέφυρες. Πιο συγκεκριμένα θα παρατεθούν οι εργασίες που μελετούν την επίδραση της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης, στην αντοχή σε κόπωση και στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών γεφυρών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

5.1. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών γεφυρών.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή θραύσης των ολοκεραμικών γεφυρών διάφοροι ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Won-Suck Oh και συν.(2002) με τη μελέτη τους⁶⁸ είχαν στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι οι ακτίνες καμπυλότητας στον σύνδεσμο επηρεάζουν την αντοχή σε θραύση των γέφυρας 3 μονάδων. Οι Larsson και συν.(2007) με την μελέτη τους⁶⁹ είχαν σκοπό να συγκρίνουν την αντοχή σε θραύση γεφυρών πυρήνων ζirkονίας τεσσάρων μονάδων

σχεδιασμένων με διαφορετικές διαμέτρους συνδέσμων. Οι Burak Taskonak και συν.(2008) στην μελέτη τους⁷⁰ είχαν στόχο να προσδιοριστεί η θέση της ρωγμής έναρξης και τα αίτια της θραύσης σε κλινικά αποτυχημένες κεραμικές γέφυρες με βάση τη ζirkονία. Οι Kwansiri Plengsombut και συν.(2009) στην μελέτη τους⁷¹ είχαν ως στόχο να προσδιοριστεί η επίδραση 2 σχεδίων συνδέσμων στην αντοχή σε θραύση των υλικών του πυρήνα που χρησιμοποιούνται για ολοκεραμικές γέφυρες. Οι Ohlmann και συν.(2009) με την μελέτη τους⁷² είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν τις τιμές των φορτίων θραύσης για γέφυρες με πρόβολο κατασκευασμένες με σκελετό ζirkονίας και να δοκιμάσουν την επιρροή του σχεδιασμού του σκελετού σχετικά με τις τιμές του φορτίου θραύσης. Οι Salimi και συν. (2012) στην μελέτη τους⁷³ είχαν ως στόχο να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις του σχεδιασμού του σκελετού στην αντοχή σε θραύση οπίσθιων γεφυρών από ζirkονία. Οι Partiyari και συν.(2016) στη μελέτη τους⁷⁴ είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν κατά πόσον η τροποποίηση του σχεδιασμού των συνδέσμων από διαφορετικές πλευρές θα βελτίωνε την αντοχή σε θραύση του σκελετού από ζirkονία σε σύγκριση με τον συμβατικά σχεδιασμένο σκελετό με τη χρήση 2 διαφορετικών τεχνικών κατασκευής. Οι Hafezeqorani και συν.(2020) στη μελέτη τους⁷⁵ είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους και του σχεδιασμού του συνδέσμου στην αντοχή σε θραύση των μονολιθικών ακίνητων οδοντικών προσθέσεων από ζirkονία.

Οι Won-Suck Oh και συν.(2002)⁶⁸ είχαν στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι οι ακτίνες καμπυλότητας στον σύνδεσμο επηρεάζουν την αντοχή σε θραύση των γέφυρας 3 μονάδων και για τη μελέτη τους κατασκεύασαν δέκα ολοκεραμικά δείγματα γέφυρας 3 μονάδων για καθένα από τα 4 σχέδια συνδέσμων, από ένα πειραματικό υλικό πυρήνα από υαλοκεραμικό υλικό με βάση το διπυριτικό λίθιο. Η μασητική εσοχή (OE) και η ουλική εσοχή (GE) των συνδέσμων σχεδιάστηκαν με δύο ακτίνες (r) καμπυλότητας: 0,90 mm και 0,25 mm. Δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές ομάδες: Σχεδιασμός I = OE και GE 0,90 mm, σχεδιασμός II = OE 0,90 mm και GE 0,25 mm, σχεδιασμός III = OE 0,25 mm και GE 0,90 mm και σχεδιασμός IV = OE και GE 0,25 mm. [\[Εικόνα 80\]](#)



ΕΙΚΟΝΑ 80: Τέσσερις διαφορετικοί σχεδιασμοί γέφυρας 3 μονάδων. Κάθε σχέδιο είχε διαφορετικό συνδυασμό ακτινών σε μασητική εσοχή (rOE) και ουλική εσοχή (rGE).⁶⁸

Ο δεύτερος προγόμφιος και ο δεύτερος γομφίος προετοιμάστηκαν για έναν τυπικό σχεδιασμό γέφυρας 3 μονάδων με ενδιάμεσο έναν πρώτο γομφίο. Τα ποσά της μασητικής μείωσης και της αξονικής μείωσης ήταν 2,0 mm και 1 mm, αντίστοιχα. Η παρασκευή του σχεδιάστηκε με βάθρο για την ελαχιστοποίηση των συγκεντρώσεων τάσης. Χρησιμοποιήθηκε υλικό αποτύπωσης βινυλοπολυσιλοξάνης για την κατασκευή δείκτη πλήρους ανατομίας σε κερί. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία τυποποιημένων προτύπων κεριού με τις ίδιες διαστάσεις για τα υπόλοιπα δοκίμια. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε 4 ομάδες σχεδιασμού των 10 μονάδων η καθεμία και τελειοποιήθηκαν περαιτέρω ώστε να αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα σχέδια στην περιοχή του συνδέσμου. Οι σύνδεσμοι είχαν ύψος 4 mm και πλάτος 5 mm, και το ενδιάμεσο σχεδιάστηκε σε μορφή υγιεινού ενδιάμεσου. Μετά την προετοιμασία των κολοβωμάτων, έγιναν 40 αποτυπώματα με αποτυπωτικό υλικό βινυλοπολυσιλοξάνης για την κατασκευή μήτρας ρητίνης στήριξης για τα κεραμικά δοκίμια γέφυρας. Για την προσομοίωση του μέτρου ελαστικότητας της οδοντίνης, παρασκευάστηκε υλικό εποξειδικής ρητίνης σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε για την προσομοίωση των κλινικών συνθηκών. Οι συγκολλημένες προσθέσεις αποθηκεύτηκαν σε απιονισμένο νερό για μία εβδομάδα στους 37°C πριν από τη δοκιμή. Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θραύση υπό θλίψη, τα δοκίμια φορτίστηκαν αξονικά μέχρι θραύσης σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών. Κάθε συγκολλημένο κεραμικό δοκίμιο στηριζόταν σε βάση από ανοξείδωτο χάλυβα και φορτιζόταν κεντρικά στο ενδιάμεσο. Το φορτίο μεταφερόταν μέσω μιας χαλύβδινης

σφαίρας διαμέτρου 14,3 mm με ταχύτητα 0,5 mm/min.⁶⁸ Η φόρτιση συνεχίστηκε μέχρι το σημείο θραύσης και τα φορτία αστοχίας καταγράφηκαν με λογισμικό υπολογιστή. Το σημείο έναρξης της ρωγμής για την ολοκεραμική γέφυρα προσδιορίστηκε από μια απότομη μείωση στην καμπύλη φόρτισης και επιβεβαιώθηκε με έναν ήχο. Η μεταβλητή που εξετάστηκε ήταν η διαφορά στο μέσο φορτίο μέχρι την αστοχία που σχετίζεται με την ακτίνα καμπυλότητας στις περιοχές OE και GE του συνδέσμου με τις ίδιες γωνίες στην κάθε εσοχή. Η διαδρομή διάδοσης της ρωγμής εντός του κεραμικού δοκιμίου εντοπίστηκε αρχικά με μικροσκόπιο φωτός χαμηλής ισχύος. Αρκετά αντιπροσωπευτικά δοκίμια εκτέθηκαν σε διεισδυτική χρωστική για να διερευνηθεί, υπό υπεριώδες φως, ο προσανατολισμός των διαδρομών των ρωγμών. Στη συνέχεια, τα κεραμικά υλικά διαχωρίστηκαν απαλά από τις μήτρες εποξειδικής ρητίνης με ένα δίσκο για τη διερεύνηση της επιφάνειας θραύσης και τον προσδιορισμό του τρόπου αστοχίας. Οι επιφάνειες θραύσης καθαρίστηκαν σε λουτρό υπερήχων και επικαλύφθηκαν με παλλάδιο και ο τρόπος αστοχίας εξετάστηκε με οπτικό μικροσκόπιο. Οι λεπτομέρειες των μοτίβων θραύσης διερευνήθηκαν περαιτέρω σε διάφορα αντιπροσωπευτικά δοκίμια με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM). Στα δεδομένα εφαρμόστηκε ανάλυση διακύμανσης μονής κατεύθυνσης (ANOVA) για να αποκαλυφθούν τυχόν σημαντικές διαφορές στα μέσα φορτία αστοχίας ως συνάρτηση του σχεδιασμού του συνδέσμου.

68

Για τη μελέτη των Larsson και συν.(2007)⁶⁹ που είχαν σκοπό να συγκρίνουν την αντοχή σε θραύση γεφυρών πυρήνων ζirkονίας τεσσάρων μονάδων σχεδιασμένων με διαφορετικές διαμέτρους συνδέσμων κατασκευάστηκαν συνολικά 40 ολοκεραμικοί πυρήνες γεφυρών τεσσάρων μονάδων που στηρίζονταν σε κολοβώματα και δύο ενδιάμεσα. Αυτά χωρίστηκαν σε πέντε ομάδες, οκτώ δοκίμια σε κάθε ομάδα, με διαφορετικές διαστάσεις συνδέσμων 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm και 4,0 mm. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ζirkονία. Σύμφωνα με τις πληροφορίες του κατασκευαστή το υλικό αυτό έχει αντοχή σε κάμψη 1100-1200 MPa, αντοχή σε θραύση 10 MPa m^{1/2}, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και σκληρότητα 1250 HV10. Οι γέφυρες κατασκευάστηκαν με τη δημιουργία ενός κύριου μοντέλου σε γύψο που μοιάζει με κάτω γνάθο, με τα δόντια 34 και 37 να χρησιμεύουν ως

δόντια στηρίγματα και τα δόντια 35 και 36 να λείπουν. Τα δόντια 34 και 37 διαμορφώθηκαν με γωνία σύγκλισης 15° και σχεδιασμό αυχενικής παρασκευής με λοξοτόμηση οξύαιχμη (σαν μαχαίρι) 120° , σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Το ελάχιστο πάχος ορίστηκε σε 0,7 mm και η κατασκευή διαμορφώθηκε ανατομικά. Η απόσταση των συνδέσμων από τα ούλα ορίστηκε σε 0,6 mm σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Το κύριο μοντέλο, με το κερί, στάλθηκε στον κατασκευαστή, όπου σαρώθηκε και κατασκευάστηκαν 40 πυρήνες γεφυρών τεσσάρων μονάδων. Οι διαστάσεις του συνδέσμου προσαρμόστηκαν με τη χρήση της λειτουργίας διάστασης του συνδέσμου στο λογισμικό CAD. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές διαστάσεις συνδέσμων που κυμαίνονταν από 2,0 έως 4,0 mm. Δύο πυρήνες γεφυρών, ένας με τις μικρότερες και ένας με τις μεγαλύτερες διαστάσεις, απεικονίζονται στην [Εικόνα 81].⁶⁹



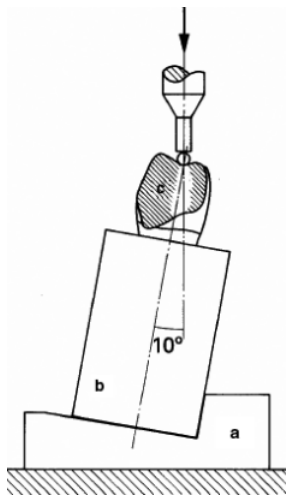
ΕΙΚΟΝΑ 81: Δύο πυρήνες γεφυρών με σύνδεσμο διαμέτρου 2 mm (πάνω) και 4 mm (κάτω)

69

Για να κατασκευαστούν δύο ακραία κολοβώματα που μοιάζουν με δόντια και πάνω στα οποία θα μπορούσαν να ακινητοποιηθούν και να στερεωθούν οι πυρήνες, τα κολοβώματα του αρχικού εκμαγείου, 34 και 37, αναπαράχθηκαν με τη χρήση αποτυπώματος σιλικόνης, το οποίο στη συνέχεια εκχύνεται με ρητίνη ενθέτων δημιουργώντας έτσι το τελικό μοντέλο της δοκιμής. Κατασκευάστηκαν συνολικά 80 αντίγραφα, 40 προγόμφιοι και 40 γομφίοι. Οι πυρήνες τοποθετήθηκαν πάνω στα κολοβώματα και συγκολλήθηκαν. Οι πυρήνες τοποθετήθηκαν σε ένα πλαστικό δοχείο με νερό που κάλυπτε την κάτω επιφάνεια και ένα καπάκι, το οποίο

δημιουργούσε ένα υγρό περιβάλλον για να αποφευχθεί η ξήρανση της κονίας μέχρι την έναρξη των μηχανικών δοκιμών την επόμενη ημέρα. Στο πρώτο στάδιο της δοκιμής - προφόρτιση - όλοι οι πυρήνες υποβλήθηκαν σε κυκλική προφόρτιση που περιλάμβανε 10.000 κύκλους σε φορτία μεταξύ 30 και 300 N και προφίλ φορτίου με τη μορφή ημιτονοειδούς κύματος στα 1 Hz. Η δύναμη εφαρμόστηκε με μια σφαίρα από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 2,5 mm, η οποία τοποθετήθηκε κεντρικά στην μασητική επιφάνεια του γομφίου. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί η ολίσθηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η οποία θα μπορούσε να συμβεί εάν το φορτίο είχε εφαρμοστεί στις ακρολοφίες. Όλοι οι πυρήνες φυλάσσονταν σε απεσταγμένο νερό κατά τη διάρκεια της προφόρτισης και τοποθετούνταν με κλίση 10° σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο. Η διάταξη της δοκιμής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

⁶⁹ [Εικόνα 82]



EIKONA 82: Ειδική πλατφόρμα και εφαρμογή του φορτίου στις δοκιμές προφόρτισης και φόρτισης. (a) Βάση από ορείχαλκο. (b) Ακρυλικό μπλοκ. (c) Το ενδιάμεσο ⁶⁹

Στο δεύτερο στάδιο της δοκιμής - θερμοκυκλοφορία - όλοι οι πυρήνες υποβλήθηκαν σε 5000 θερμικούς κύκλους σε ειδικά κατασκευασμένη συσκευή θερμικών κύκλων με τη χρήση δύο υδατόλουτρων σε θερμοκρασίες 5°C και 55°C . Στο τρίτο στάδιο της δοκιμής - φόρτιση μέχρι θραύσης - οι πυρήνες τοποθετήθηκαν σε ένα δοκιμαστικό εργαλείο με κλίση 10° και υποβλήθηκαν σε φόρτιση που εφαρμόστηκε από μια μηχανή γενικής δοκιμής. Η ταχύτητα της εγκάρσιας κεφαλής ήταν $0,255 \text{ mm/min}$, και το φορτίο εφαρμόστηκε με μια σφαίρα από ανοξείδωτο

χάλυβα διαμέτρου 2,5 mm, η οποία τοποθετήθηκε και πάλι κεντρικά στην μασητική επιφάνεια του γομφίου. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου δοκιμής, όποτε οι πυρήνες δεν ελέγχονταν ενεργά, φυλάσσονταν σε νερό θερμοκρασίας 37°C. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, οι πυρήνες φορτίζονταν μέχρι να επέλθει κάταγμα και καταγράφονταν τα φορτία κατά το κάταγμα. Ως θραύση ορίστηκε η ορατή θραύση σε ολόκληρη την κατασκευή. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ των ομάδων ελέγχθηκε ως προς τη σημαντικότητά της με το t-test του Student.⁶⁹

Οι Burak Taskonak και συν.(2008) στην μελέτη τους⁷⁰ που είχαν στόχο να προσδιοριστεί η θέση της ρωγμής έναρξης και τα αίτια της θραύσης σε κλινικά αποτυχημένες κεραμικές γέφυρες με βάση τη ζirkονία, χρησιμοποιήθηκε η ποσοτική φρακτογραφία ή θραυστογραφία για τον προσδιορισμό των τάσεων αστοχίας πέντε ολοκεραμικών γεφυρών τεσσάρων μονάδων με βάση το ζirkόνιο. Οι αναλύσεις περιθλασης ακτινών X έδειξαν ότι το κεραμικό επικάλυψης αποτελείται από άμορφο γυαλί. Οι κλινικά αποτυχημένες γέφυρες ανακτήθηκαν από κλινική μελέτη. Το πρώτο και κύριο στοιχείο μιας καλής φρακτογραφικής ανάλυσης είναι μια καθαρή επιφάνεια. Οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων καθαρίστηκαν με αιθυλική αλκοόλη σε λουτρό υπερήχων. Μετά την απομάκρυνση από το λουτρό, τα δοκίμια ξεπλύθηκαν με απεσταγμένο νερό. Μετά τον καθαρισμό, οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων επικαλύφθηκαν με ένα φιλμ άνθρακα ή παλλαδίου χρυσού (πάχους περίπου 10-15 nm) για την καλύτερη παρατήρηση. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένας φακός χειρός (6x) για την παρατήρηση των επιφανειών θραύσης πριν από κάθε ποσοτικό χαρακτηρισμό με τη χρήση οπτικών μικροσκοπίων ή ηλεκτρονικών μικροσκοπίων σάρωσης (SEM). Σε πολλές περιπτώσεις, στις επιφάνειες θραύσης των επικαλύψεων διακρίνονταν εύκολα χαρακτηριστικά μοτίβα ψαθυρής θραύσης (π.χ. μακροσκοπικό twist hackle). Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος για τη συνολική εξέταση και την επιβεβαίωση της προέλευσης των θραύσεων. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο υψηλής ισχύος για την ποσοτική μέτρηση των διαστάσεων της ρωγμής έναρξης της θραύσης. Χρησιμοποιήθηκε επίσης SEM για την επιβεβαίωση της προέλευσης της ρωγμής και τη μέτρηση των διαστάσεων της ρωγμής. Επιπλέον, μετρήθηκαν οι διαστάσεις των συνδέσμων των αποτυχημένων γεφυρών κατά τις διευθύνσεις πάρειο-γλωσσικά (BL) και μασητικό-αυχενικά (OG)

στην επιφάνεια θραύσης με και χωρίς τα στρώματα της επικάλυψής τους.⁷⁰ Το πρώτο βήμα στην ανάλυση αστοχίας των γεφυρών ήταν να εντοπιστεί η προέλευση αναζητώντας μια σχετικά επίπεδη περιοχή που συχνά αποτελεί καλή ένδειξη της θέσης της προέλευσης του θραύσματος. Χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηριστικές σημάνσεις για να εντοπιστεί η προέλευση του θραύσματος. Πρόκειται για σημάδια στην επιφάνεια του θραύσματος τα οποία μπορούν να κατευθύνουν τον παρατηρητή στην προέλευση της αστοχίας. Τα πιο συνηθισμένα σημάδια είναι τα σημάδια wake hackle σε πόρους ή εγκλείσματα (που ονομάζονται επίσης ουρές θραύσης) τα οποία βρίσκονται στην πλευρά μακριά από την προέλευση της θραύσης. Αυτά τα σημάδια wake hackle συνήθως απλώνονται μακριά από την προέλευση της θραύσης λόγω της διάδοσης της ρωγμής. Οι γραμμές Wallner είναι μοτίβα παρεμβολής της ρωγμής που διαδίδεται με κύματα τάσης και είναι περίπου κάθετες στη γενική διεύθυνση διάδοσης. Τα σημάδια Twist hackle (που ονομάζονται επίσης σημάδια ποταμού) είναι άλλα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται συχνά στην επιφάνεια θραύσης των κεραμικών. Τα σημάδια αυτά εμφανίζονται λόγω μιας μικρής τοπικής διατμητικής τάσης ή δομικής ανομοιογένειας επιπλέον της κύριας εφελκυστικής τάσης που ελέγχει τη γενική κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής. Η προέλευση της θραύσης παρατηρείται στο κέντρο περίπου όλων αυτών των σημάνσεων. Μόλις βρεθεί η θέση της προέλευσης, μπορούν να γίνουν ποσοτικές μετρήσεις του κρίσιμου μεγέθους της ρωγμής με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου ή SEM. Προσδιορίστηκε η προέλευση της ρωγμής εξετάζοντας την επιφάνεια της ρωγμής και εντοπίζοντας τις χαρακτηριστικές σημάνσεις μέχρι τη θέση έναρξης. Τα σημάδια αυτά περιλάμβαναν το twist hackle (σημάδια ποταμού), το wake hackle (ουρές θραύσης), τις γραμμές Wallner και τις θέσεις διακλάδωσης. Ελήφθησαν εικόνες SEM των επιφανειών θραύσης και μεγεθύνθηκαν οι περιοχές προέλευσης των θραύσεων για να χαρακτηριστούν τα μοτίβα θραύσης. Μετρήθηκαν τα ελαττώματα που προκαλούν ρωγμές για να προσδιοριστεί η τάση αστοχίας κάθε δοκιμίου. Παρασκευάστηκαν δοκίμια κάμψης τεσσάρων σημείων από πυρήνα με βάση το Y-TZP και επικάλυψη με βάση το γυαλί για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας θραύσης (KC) των μονολιθικών κεραμικών πυρήνων και επικάλυψης. Οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων δοκού ήταν 3mm (ύψος) × 4mm (πλάτος) × 25mm (μήκος). Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν έξι δοκίμια για κάθε ομάδα για τις μετρήσεις της αντοχής σε θραύση. Έτσι, στη μελέτη

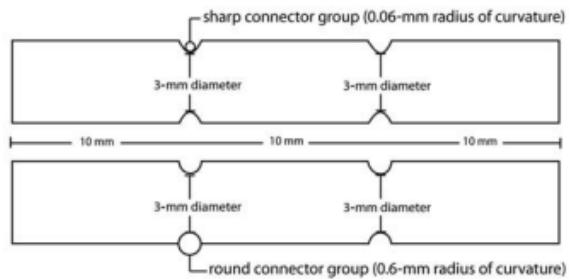
χρησιμοποιήθηκαν 12 δοκίμια δοκού. Τα δοκίμια πιέστηκαν στην επιφάνεια της επένδυσης με ένα δείκτη Vickers για την παραγωγή ελεγχόμενων ρωγμών. Φορτίστηκαν έως τη θραύση στον αέρα με ταχύτητα 0,5 mm/min με τη βοήθεια ενός εξαρτήματος κάμψης τεσσάρων σημείων σε μια μηχανή γενικών δοκιμών. Τα πειράματα κάμψης πραγματοποιήθηκαν με ένα εξάρτημα με εξωτερικό άνοιγμα 20 mm και εσωτερικό άνοιγμα 10 mm. Η αντοχή (f) των δοκιμών δοκού υπολογίστηκε σύμφωνα με τη θεωρία της απλής δοκού.⁷⁰

Για την μελέτη των Kwansiri, Plengsombut και συν.(2009)⁷¹ που είχαν ως στόχο να προσδιοριστεί η επίδραση 2 σχεδίων συνδέσμων στην αντοχή σε θραύση των υλικών του πυρήνα που χρησιμοποιούνται για ολοκεραμικές γέφυρες, όλα τα υλικά που αξιολογήθηκαν ανήκουν στο σύστημα IPS e.max. Τα δοκίμια ζirkονίας αλέστηκαν, ενώ τα δοκίμια κεραμικών από διπυριτικό λίθιο είτε αλέστηκαν είτε υποβλήθηκαν στην τεχνική κεριού και θερμοσυμπίεσης. Συνολικά 30 κεραμικά δοκίμια σε σχήμα ράβδου χωρίστηκαν σε 6 ομάδες δοκιμών (n=5), όπως συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. [Εικόνα 83]

Fabrication Technique	Material Used	Connector Design
Simulated CAD/CAM technique	IPS e.max ZirCAD (yttrium-stabilized zirconia) (batch no. 596826)	round connector (ZirCAD-R)
		sharp connector (ZirCAD-S)
	IPS e.max CAD (lithium disilicate ceramic) (batch no. H19073)	round connector (CAD-R)
		sharp connector (CAD-S)
Heat-pressing technique	IPS e.max Press (lithium disilicate ceramic) (batch no. H23547)	round connector (Press-R)
		sharp connector (Press-S)

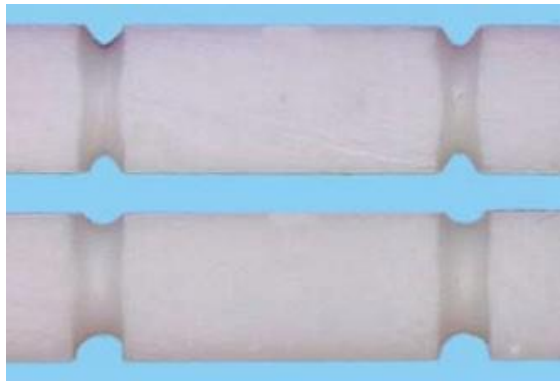
ΕΙΚΟΝΑ 83: αξιολογούμενα υλικά⁷¹

Τα τελικά δοκίμια ήταν ορθογώνιες ράβδοι με διαστάσεις 4 ±0,05 mm (Υ) x 4 ±0,05 mm (Π) x 30 ±0,5 mm (Μ), δηλαδή γεωμετρικές προσομοιώσεις των γεφυρών τριών τεμαχίων. Για την προσομοίωση μιας ακίνητης οδοντικής πρόθεσης 3 μονάδων, παρασκευάστηκαν 2 σύνδεσμοι, διαμέτρου 3 ±0,05 mm ο καθένας, ώστε να οριστεί ένα κεντρικό ενδιάμεσο μήκους 10 ±0,10 mm. [Εικόνα 84]



ΕΙΚΟΝΑ 84: διαμορφώσεις δοκιμών που αξιολογήθηκαν ⁷¹

Δημιουργήθηκαν δύο σχέδια συνδέσμων. Οι αιχμηροί σύνδεσμοι παρουσίαζαν ακτίνα καμπυλότητας $0,06 \pm 0,001$ mm, ενώ οι στρογγυλοί σύνδεσμοι παρουσίαζαν ακτίνα καμπυλότητας $0,60 \pm 0,01$ mm. [Εικόνα 85]



ΕΙΚΟΝΑ 85: Αντιπροσωπευτικά δείγματα για την απεικόνιση των αιχμηρών (επάνω) και στρογγυλά (κάτω) σχέδια συνδέσμων. ⁷¹

Για τα δοκίμια IPS e.max ZirCAD χρησιμοποιήθηκε μερικώς πυροσυσσωματωμένη τεμάχια ζirkονία. Προβλέποντας μια συρρίκνωση 20-25% μετά τη συρρίκνωση, οι ορθογώνιες ράβδοι αυτής της ομάδας κόπηκαν από το μπλοκ με πριόνι αργής ταχύτητας με χρήση ψυκτικού νερού σε μια δοκό διαστάσεων 5 mm (Υ) x 5 mm (Π) x 36 mm (Μ). Μερικώς κρυσταλλωμένα μπλοκ από διπυριτικό λίθιο επιλέχθηκαν ως το δεύτερο υλικό δοκιμής για τα δοκίμια IPS e.max CAD. Καθώς η διαδικασία κρυστάλλωσης δεν προκαλεί αλλαγές στις διαστάσεις, όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν από τα κεραμικά μπλοκ στο τελικό επιθυμητό μέγεθος 4 mm (Υ) x 4 mm (Π) x 30 mm (Μ), με τον ίδιο τρόπο όπως και για την ομάδα ZirCAD. Μια τελική ορθογώνια ράβδος από την ομάδα CAD με προετοιμασμένους σύνδεσμος χρησιμοποιήθηκε ως κύριο μοντέλο για τα δοκίμια IPS e.max Press. Το μοντέλο

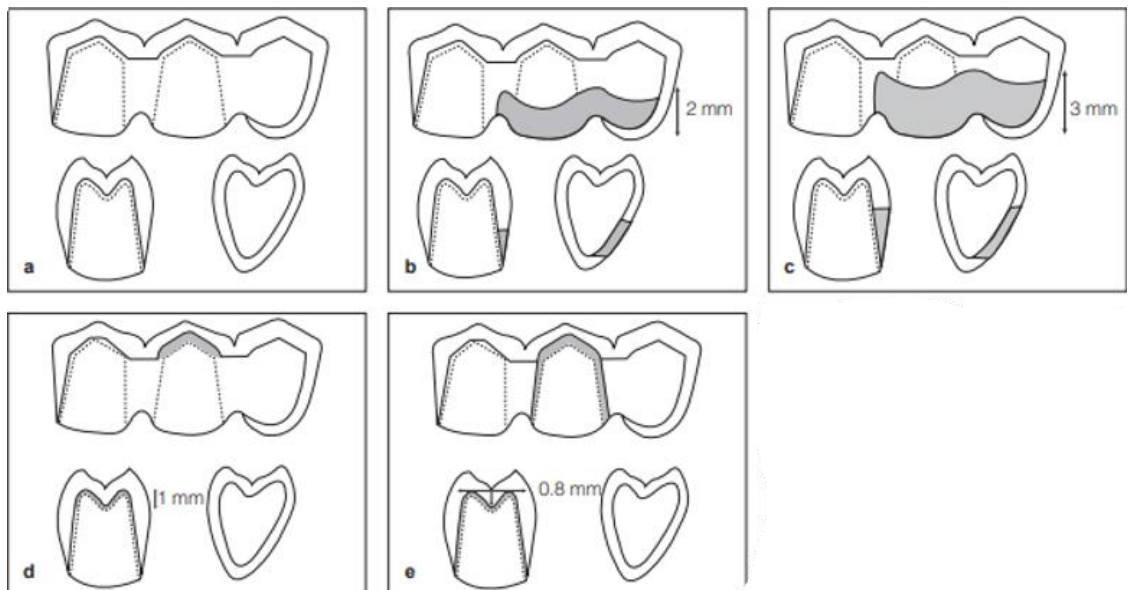
προσαρτήθηκε σε μεταλλική ράβδο και έγινε αποτύπωμα με χρήση υλικού αποτύπωσης αντιγραφής. Κάθε δοκίμιο μετρήθηκε και σημειώθηκε το μέσο των κολοβωμάτων και του ενδιάμεσου, και στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε για δοκιμή. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε μηχανή γενικής δοκιμής με ταχύτητα φόρτισης 0,1 mm/min έως ότου επιτευχθεί το μέγιστο φορτίο αστοχίας. Τα δεδομένα καταγράφηκαν με τη χρήση λογισμικού υπολογιστή και το φορτίο αστοχίας καταγράφηκε σε Newton. Αντιπροσωπευτικά θραυσμένα δοκίμια από όλες τις ομάδες δοκιμών επιλέχθηκαν για ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Οι επιφάνειές τους ήταν ανθρακωμένες και αξιολογήθηκαν με χρήση SEM με λογισμικό συστήματος ψηφιακής εικόνας.⁷¹

Για την μελέτη τους οι Ohlmann και συν.(2009)⁷² που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν τις τιμές των φορτίων θραύσης για γέφυρες με πρόβολο κατασκευασμένες με σκελετό ζirkονίας και να δοκιμάσουν την επιρροή του σχεδιασμού του σκελετού σχετικά με τις τιμές του φορτίου θραύσης κατασκευάστηκαν 50 σκελετοί ζirkονίας γεφυρών τριών μονάδων αντικαθιστώντας δύο προγομφίους και με πρόβολο έναν γομφίο της κάτω γνάθου μήκους 7 mm και με εμβαδό επιφάνειας συνδέσμου 12mm² και επικαλύφθηκαν με το κατάλληλο κεραμικό επικάλυψης. Τα παρασκευασμένα δόντια αναπαράχθηκαν 50 φορές με τη χύτευση κράματος χρωμίου-κοβαλτίου, ενώ προκειμένου να προσομοιωθεί η φυσιολογική κινητικότητα των δοντιών τα μεταλλικά δόντια καλύφθηκαν με θερμοσυρρικνούμενο σωλήνα (heat-shrink tubing) και ενσωματώθηκαν σε ρητίνη PMMA με χρήση προκατασκευασμένης μήτρας αυτοπολυμεριζόμενης ακρυλικής ρητίνης για την ακριβή τοποθέτηση. Δημιουργήθηκαν 50 ξεχωριστά αποτυπώματα για την αντιγραφή των μεταλλικών μοντέλων και την κατασκευή αντίστοιχων γύψινων μοντέλων, στα οποία κατασκευάστηκαν οι γέφυρες. Τα μοντέλα των γεφυρών χωρίστηκαν σε 5 ομάδες (n=10) ανάλογα με το σχεδιασμό του σκελετού:

- Ομάδα 1 (ομάδα ελέγχου) : απλός σκελετός με πάχος 0,7 παντού
- Ομάδα 2: απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 2 mm και πλάτους

1 mm

- Ομάδα 3: απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 3 mm και πλάτους 1 mm
- Ομάδα 4: σκελετός με πάχος 1 mm στη μασητική επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος.
- Ομάδα 5: σκελετός με ενιαίο πάχος 0,8 mm σε όλη την επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος.⁷² [Εικόνα 86]



ΕΙΚΟΝΑ 96: a) ομάδα 1 (ελέγχου): πάχος σκελετού 0,7 mm b) ομάδα 2: απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 2 mm και πλάτους 1 mm c) Ομάδα 3: απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 3 mm και πλάτους 1 mm d) Ομάδα 4: σκελετός με πάχος 1 mm στη μασητική επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος. e) Ομάδα 5: σκελετός με ενιαίο πάχος 0,8 mm σε όλη την επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος.⁷²

Αφού οι γέφυρες ολοκληρώθηκαν πάνω στα γύψινα μοντέλα, ακινητοποιήθηκαν στα αντίστοιχα μεταλλικά με τη χρήση υβριδικής κονίας. Οι γέφυρες υπεβλήθησαν 10.000 θερμικούς κύκλους μεταξύ 6 και 60°C και 600.000 κύκλους μηχανικής καταπόνησης με 50 N και 1,8 Hz στην άπω επιφάνεια του προβόλου. Μετά την μηχανική καταπόνηση οι γέφυρες αξιολογήθηκαν με τη χρήση στερεομικροσκοπίου για να εντοπιστούν ρωγμές στην επικάλυψη. Τα φορτία θραύσης καθορίστηκαν ύστερα από τη φόρτιση των γεφυρών μέχρι τη θραύση τους σε μία μηχανή καθολικών δοκιμών. Σε όλα τα δείγματα τα φορτία εφαρμόστηκαν

στην άπω επιφάνεια του προβόλου με ταχύτητα 0,5 mm/min ενώ παρεμβαλλόταν

αλουμινόχαρτο πάχους 0,3 mm μεταξύ εμβόλου και προβόλου ώστε να αποφευχθούν τοπικές αιχμές δύναμης. Οι επιφάνειες των καταγμάτων αξιολογήθηκαν μακροσκοπικά.⁷²

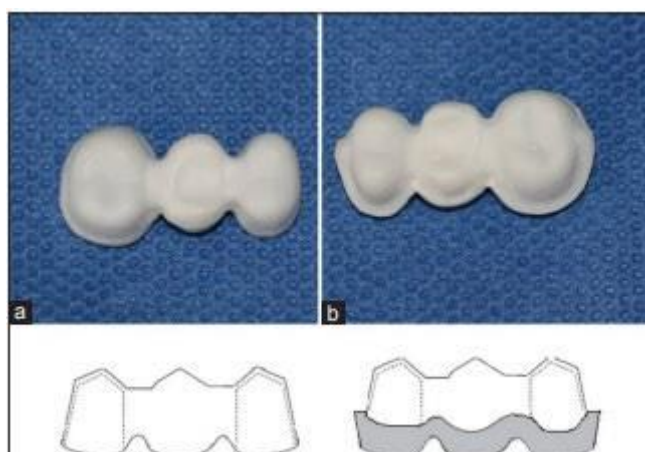
Για την μελέτη των Salimi και συν.(2012)⁷³ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις του σχεδιασμού του σκελετού στην αντοχή σε θραύση οπίσθιων γεφυρών από ζirkονία, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο άνω γνάθου για την κατασκευή μιας κύριας μήτρας από νικέλιο-χρώμιο. Παρασκευάστηκαν ο δεξιός πρώτος προγόμφιος και ο πρώτος γομφίος με ενδιάμεσο το δεύτερο προγόμφιο. Το αποτύπωμα αυτού του μοντέλου έγινε με τη χρήση υλικού αποτύπωσης πολυβινυλοσιλοξάνης και εγχύθηκε με οδοντιατρική γύψο τύπου IV για τη δημιουργία εκμαγείου εργασίας. Τα εκμαγεία σαρώθηκαν και παρασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά σχέδια σκελετού με τη χρήση λογισμικού ως εξής:

Ομάδα I: καλύπτρες με διάσταση συνδέσμου 3 × 3 και τυπικό σχεδιασμό

Ομάδα II: καλύπτρες με διάσταση συνδέσμου 3 × 3 και τροποποιημένο σχέδιο

Ομάδα III: καλύπτρες με διάσταση συνδέσμου 4 × 4 και τυπικό σχεδιασμό

Ομάδα IV: καλύπτρες με διάσταση συνδέσμου 4 × 4 και τροποποιημένο σχεδιασμό.⁷³ [Εικόνα 87]



ΕΙΚΟΝΑ 87: Δείγματα με ανατομικό (a) και τροποποιημένο σχεδιασμό (b) α. παρειακή και β. γλωσσική σχηματική άποψη⁷³

Ο τυπικός σχεδιασμός ήταν ένας ομοιόμορφος πυρήνας με ομοιόμορφο πάχος 0,7 mm. Ο τροποποιημένος σχεδιασμός περιλάμβανε έναν τυπικό πυρήνα πάχους 0,7 mm με αυξημένο πάχος με την προσθήκη ενός γλωσσικού σιριτιού πάχους 1 mm και ύψους 2,0 mm, το οποίο συνδεόταν με πλήρους περιγράμματος εγγύς στηρίγματα ύψους 3,5 mm. Σε όλα τα σχέδια προετοιμάστηκε μια εσοχή βάθους και πλάτους 0,2 mm × 3 mm στο κέντρο της περιοχής του ενδιαμέσου για να χρησιμοποιηθεί στο βήμα εφαρμογής της δύναμης. Τέλος, παρασκευάστηκαν 32 σκελετοί γεφυρών από ζirkονία σύμφωνα με τέσσερα διαφορετικά σχέδια (n = 8). Οι κατασκευασμένοι σκελετοί ελέγχθηκαν για να διαπιστωθεί η εφαρμογή τους στα όρια. Αφού αποθηκεύτηκαν για μία εβδομάδα σε τεχνητό σάλιο στους 37°C, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θερμοκυκλοφορία για 2000 κύκλους σε θερμοκρασίες εναλλασσόμενες μεταξύ 5 και 55°C για 30 s έκαστος, με ενδιάμεση παύση 15 s. Πριν από τη φόρτιση των δοκιμών, ένας κύλινδρος από τεφλόν (διαμέτρου 3 mm και ύψους 3 mm) τοποθετήθηκε στο κέντρο κάθε ενδιαμέσου με τη βοήθεια κυανοακρυλικής κόλλας. Ο κύλινδρος αυτός τοποθετήθηκε για να αποτραπεί οποιαδήποτε ζημία επαφής κατά τη διάρκεια της φόρτισης και για να εξασφαλιστεί ομοιογενής κατανομή του φορτίου στη μονάδα του ενδιαμέσου. Τα δοκίμια φορτίστηκαν σε μια καθολική μηχανή δοκιμών με σταθερή ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 0,5 mm/min έως ότου επέλθει αστοχία. Η μέγιστη δύναμη θραύσης καταγράφηκε σε Newton.⁷³

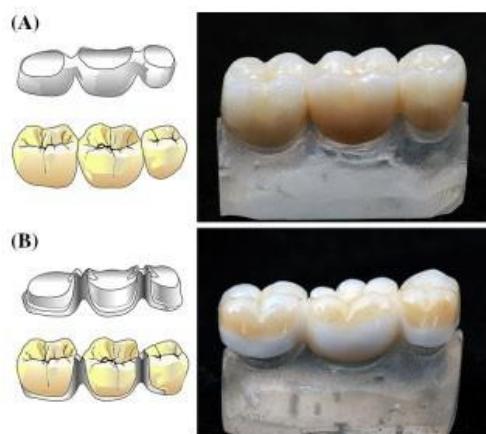
Στη μελέτη των Partiyani και συν.(2016)⁷⁴ που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν κατά πόσον η τροποποίηση του σχεδιασμού των συνδέσμων από διαφορετικές πλευρές θα βελτίωνε την αντοχή σε θραύση του σκελετού από ζirkονία σε σύγκριση με τον συμβατικά σχεδιασμένο σκελετό με τη χρήση 2 διαφορετικών τεχνικών κατασκευής, οι κλινικά υγιείς δεύτεροι προγόμφιοι και δεύτεροι γομφίοι της κάτω γνάθου τοποθετήθηκαν σε βάση ακρυλικής ρητίνης και προετοιμάστηκαν για να λάβουν αποκατάσταση πλήρους κάλυψης από ζirkονία. Κατασκευάστηκαν εποξειδικά αντίγραφα των παρασκευασμένων δοντιών. Κατασκευάστηκαν συνολικά σαράντα ολοκεραμικές γέφυρες τριών μονάδων, οι οποίες χωρίστηκαν ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής σε δύο ομάδες (n = 20): Ομάδα I (MAD/MAM) και Ομάδα II

(CAD/CAM). Κάθε ομάδα υποδιαιρέθηκε περαιτέρω ανάλογα με το σχεδιασμό του σκελετού σε δύο υποομάδες (n = 10). [Εικόνα 88]

Group (n = 20)	Method of fabrication	Sub group (n = 10)	Framework design
I	MAD/MAM	IA	Conventional (control)
		IB	Innovative
II	CAD/CAM	IIA	Conventional (control)
		IIB	Innovative

EIKONA 88: ομάδες και υποομάδες δοκιμών ⁷⁴

Τα ακόλουθα μέρη του σκελετού κατασκευάστηκαν σε πλήρες πάχος χωρίς κεραμική επικάλυψη: οι σύνδεσμοι (στρογγυλό σχήμα 4,5 mm) που εκτείνονται στη μεσαία επιφάνεια κάθε κολοβώματος, η επιφάνεια τοποθέτησης του ενδιαμέσου και η αυχενική περιοχή με σιρίτι 2 mm . Ο συμβατικός σχεδιασμός του σκελετού χρησίμευσε ως έλεγχος: αξονικά τοιχώματα πάχους 0,5 mm με σύνδεσμος στρογγυλού σχήματος 4,5 mm. Οι σκελετοί ζirkονίας κατασκευάστηκαν με δύο τεχνικές: σχεδιασμός με χειροκίνητη υποβοήθηση - φρεζάρισμα με χειροκίνητη υποβοήθηση (MAD/MAM) με φρεζάρισμα μερικώς πυροσυσσωματωμένων σκελετών ζirkονίας χρησιμοποιώντας ως οδηγό τη χειροκίνητη ανίχνευση των προτύπων ρητίνης. Για την κατασκευή του άλλου μισού των αποκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος CAD/CAM (Computer Assisted Design-computer Assisted Milling). Μετά την πυροσυσσωμάτωση των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική τοποθέτηση των μεμονωμένων σκελετών στις εποξειδικές μήτρες. Στη συνέχεια, οι σκελετοί επικαλύφθηκαν με χρήση πορσελάνης. Για τον συμβατικό σχεδιασμό, το κεραμικό επικάλυψης εφαρμόστηκε γύρω από την εξωτερική επιφάνεια των συνδέσμων και μεταξύ των συγκρατητικών και του ενδιαμέσου, ενώ οι τροποποιημένοι σκελετοί επικαλύφθηκαν μερικώς μόνο στις επιφάνειες cut back.⁷⁴ [Εικόνα 89]



EIKONA 89: A. Σχηματική απεικόνιση της

συμβατικής ροής εργασίας του σκελετού και της πραγματικής κατασκευής της γέφυρας. B. Σχηματική απεικόνιση της τροποποιημένης ροής εργασιών του σκελετού και της πραγματικής κατασκευής της γέφυρας. Οι περιοχές με λευκό χρώμα αντιπροσωπεύουν μονολιθική ζirkονία, ενώ οι περιοχές κίτρινου χρώματος αντιπροσωπεύουν την επικαλυμμένη ζirkονία.⁷⁴

Για την σταθεροποίηση όλων των αποκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκε υαλοϊονομερής κονία. Όλα τα δείγματα αποθηκεύτηκαν σε απεσταγμένο νερό σε θερμοκρασία δωματίου για 72 h. Σε όλα τα δείγματα πραγματοποιήθηκε θερμική ανακύκλωση για 1000 κύκλους μεταξύ 5°C και 55°C με χρόνο παραμονής 30 s σε κάθε θερμοκρασία. Κάθε δείγμα τοποθετήθηκε με ασφάλεια σε μηχανή γενικής δοκιμής. Το θλιπτικό φορτίο εφαρμόστηκε αξονικά στην κεντρική μοίρα του ενδιαμέσου. Το φορτίο μεταφερόταν μέσω μιας χαλύβδινης σφαίρας (διαμέτρου 8 mm) με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 2 mm/min. Ένα σκληρό φύλλο καουτσούκ από νεοπρένιο λειτούργησε ως διακόπτης τάσεων. Η φόρτιση συνεχίστηκε μέχρι το σημείο θραύσης και καταγράφηκαν τα φορτία αστοχίας. Οι επιφάνειες θραύσης καθαρίστηκαν, στη συνέχεια επιχρυσωθήκαν και παρατηρήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τα φορτία θραύσης στις διάφορες ομάδες εμφανίστηκαν ως μέσος όρος \pm τυπική απόκλιση. Η σύγκριση των φορτίων θραύσης μεταξύ των δύο υποομάδων του συμβατικού σχεδιασμού και των δύο υποομάδων του τροποποιημένου σχεδιασμού έγινε με τη χρήση t test. Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των διαφορών στα μέσα φορτία θραύσης μεταξύ των ομάδων μελέτης. Ακολούθησε πολλαπλή σύγκριση κατά ζεύγη post hoc με τη χρήση της δοκιμής Tukey. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ανάλυση

παλινδρόμησης για την ταυτόχρονη εξέταση της επίδρασης του σχεδιασμού του συνδέσμου και του τύπου του προϊόντος στα φορτία θραύσης.⁷⁴

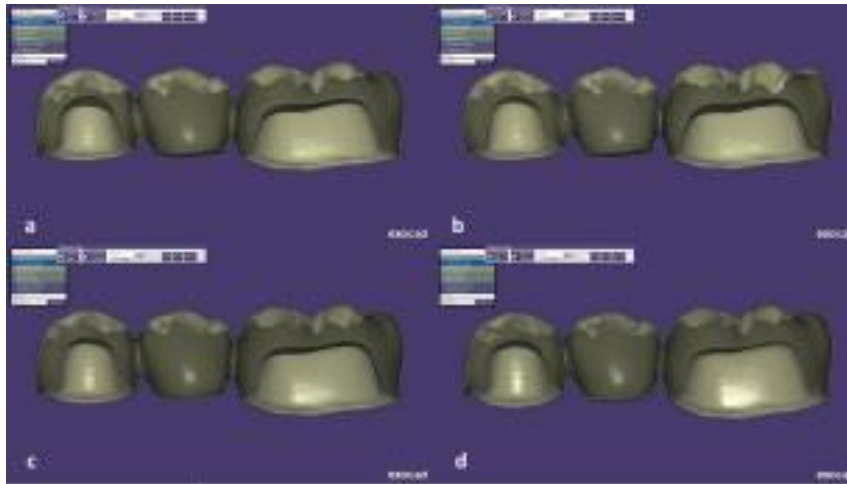
Οι Hafezeqoran και συν.(2020)⁷⁵ που είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους και του σχεδιασμού του συνδέσμου στην αντοχή σε θραύση των μονολιθικών ακίνητων οδοντικών προσθέσεων από ζirkονία, κατασκεύασαν σαράντα οπίσθιες γέφυρες 3 μονάδων, που εκτείνονταν από τον πρώτο προγόμφιο της κάτω γνάθου έως τον πρώτο γομφίο, φρεζάρωνταν από ημιδιαφανείς προβαμμένους μερικώς πυροσυσσωματωμένους κεραμικούς δίσκους ζirkονίας. Τα δείγματα χωρίστηκαν σε δύο κύριες ομάδες με βάση την επιφάνεια των συνδέσμων και κάθε ομάδα ταξινομήθηκε σε δύο υποομάδες με βάση την ακτίνα της καμπυλότητας. Τα δόντια των κολοβωμάτων (πρώτος προγόμφιος και πρώτος γομφίος της κάτω γνάθου) παρασκευάστηκαν σε τυποποιημένο πλαστικό μοντέλο γνάθου. Αντίστοιχα, από το κύριο μοντέλο κατασκευάστηκε αποτύπωμα με πρόσθετη σιλικόνη και χύθηκε με οδοντιατρική γύψο για να κατασκευαστούν γύψινα αντίγραφα του κύριου μοντέλου για τη διαδικασία σάρωσης. Κάθε γύψινο μοντέλο σαρώθηκε με εργαστηριακό σαρωτή και οι γέφυρες σχεδιάστηκαν με τη χρήση λογισμικού CAD. Οι αποκαταστάσεις είχαν πάχος 1 mm στην κεντρική αύλακα και πάχος 0,8 mm στα αξονικά τοιχώματα. Επιπλέον, το διάκενο κονίας ορίστηκε στα 45 μm και το πάρειο-γλωσσικό πλάτος των ενδιάμεσων ήταν 8 mm. Σχεδιάστηκαν τέσσερις τύποι συνδέσμων για τέσσερις ομάδες μελέτης ως εξής [Εικόνα 90]:

Ομάδα Α: Δέκα γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 9 mm² και σχεδιασμό στρογγυλεμένου περιθωρίου με ακτίνα καμπυλότητας 0,9 mm.

Ομάδα Β: Δέκα γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 9 mm² και σχεδιασμό αιχμηρού περιθωρίου με ακτίνα καμπυλότητας 0,25 mm.

Ομάδα Γ: Δέκα γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 12 mm² και στρογγυλεμένο σχεδιασμό εσοχής με ακτίνα καμπυλότητας 0,9 mm.

Ομάδα Δ: Δέκα γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 9 mm² και σχεδιασμό αιχμηρού περιθωρίου με ακτίνα καμπυλότητας 0,25 mm.



ΕΙΚΟΝΑ 90: a) ομάδα Α b) ομάδα Β c) ομάδα Γ d) ομάδα Δ ⁷⁵

Στο επόμενο στάδιο, οι σχεδιασμένες γέφυρες φρεζάρονταν με μονάδα CAM. Μετά τη διαδικασία φρεζαρίσματος, όλα τα δοκίμια διαχωρίστηκαν από τους δίσκους και τα υπολείμματα καθαρίστηκαν με πεπιεσμένο αέρα σύμφωνα με τη σύσταση του κατασκευαστή για να αποφευχθούν τυχόν υπολείμματα φρεζαρίσματος. Στη συνέχεια, οι αποκαταστάσεις πυροσυσσωματώθηκαν σε κατάλληλο κλίβανο σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Όλες οι φρεζαρισμένες αποκαταστάσεις γυαλίστηκαν κατάλληλα και ελέγχθηκαν για την οριακή ακεραιότητα. Τα αποτυπώματα κατασκευάστηκαν από γύψινα μοντέλα με πρόσθετη σιλικόνη και εκχύθηκαν με εποξειδική ρητίνη για την κατασκευή ενός τελικού μοντέλου για τη διαδικασία δοκιμής. Στη συνέχεια, κάθε δείγμα συγκολλήθηκε σε ένα μοντέλο ρητίνης με κονία ρητίνης σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Όλες οι αποκαταστάσεις εμβαπτίστηκαν σε απεσταγμένο νερό στους 37°C για 24 ώρες πριν από την εκτέλεση της δοκιμής. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων με χρήση μηχανής καθολικής δοκιμής. Φορτίστηκαν κάθετα με μια χαλύβδινη σφαίρα 6 mm με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 1 mm/min στο κέντρο του ενδιαμέσου. Το μέγιστο φορτίο καταγράφηκε μετά από απότομη μείωση της δύναμης, ως φορτίο θραύσης. Η δοκιμή Kolmogorov-Smirnov χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της κανονικής κατανομής των δεδομένων. Το τεστ Mann-Whitney U χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά σε κάθε σχέδιο για τη σύγκριση του φορτίου θραύσης σε δύο διαστάσεις του συνδέσμου. Οι ίδιες δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση του φορτίου θραύσης σε

στρογγυλεμένους και αιχμηρούς σχεδιασμούς ξεχωριστά για κάθε διάσταση του συνδέσμου. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του SPSS 17 σε επίπεδο σημαντικότητας $P < 0,05$.⁷⁵

Τα αποτελέσματα των *in vitro* ερευνών που προαναφέρθηκαν έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Από τη μελέτη των Suck Oh και συν.(2002)⁶⁸ που είχαν στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι οι ακτίνες καμπυλότητας στον σύνδεσμο επηρεάζουν την αντοχή σε θραύση των γέφυρας 3 μονάδων και για τη μελέτη τους κατασκεύασαν δέκα ολοκεραμικά δείγματα γέφυρας 3 μονάδων για καθένα από τα 4 σχέδια συνδέσμων, από ένα πειραματικό υλικό πυρήνα από υαλοκεραμικό υλικό με βάση το διπυριτικό λίθιο, τα μέσα φορτία αστοχίας ήταν μεγαλύτερα για τον σχεδιασμό I (0,90 mm OE και GE μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα) και χαμηλότερα για τον σχεδιασμό IV (0,25 mm OE και GE μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα). Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις είχαν ως εξής: Σχεδιασμός I (OE και GE 0,90 mm, μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα), 943 ± 150 N, σχεδιασμός II (OE 0,90 mm και GE 0,25 mm μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα), 746 ± 106 N, σχεδιασμός III (OE 0,25 mm και GE 0,90 μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα), 944 ± 144 N και σχεδιασμός IV (OE και GE 0,25 mm μασητική εσοχή και ουλική εσοχή αντίστοιχα), 673 ± 55 N. Η ANOVA αποκάλυψε σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων φορτίων θραύσης ανάλογα με τον τύπο του σχεδιασμού του συνδέσμου. Τα μέσα φορτία αστοχίας για τα σχέδια I και III ήταν σημαντικά υψηλότερα από εκείνα των σχεδίων II και IV. Ωστόσο, δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων φορτίων αστοχίας των σχεδίων I και III ή των σχεδίων II και IV.⁶⁸ [Εικόνα 91]

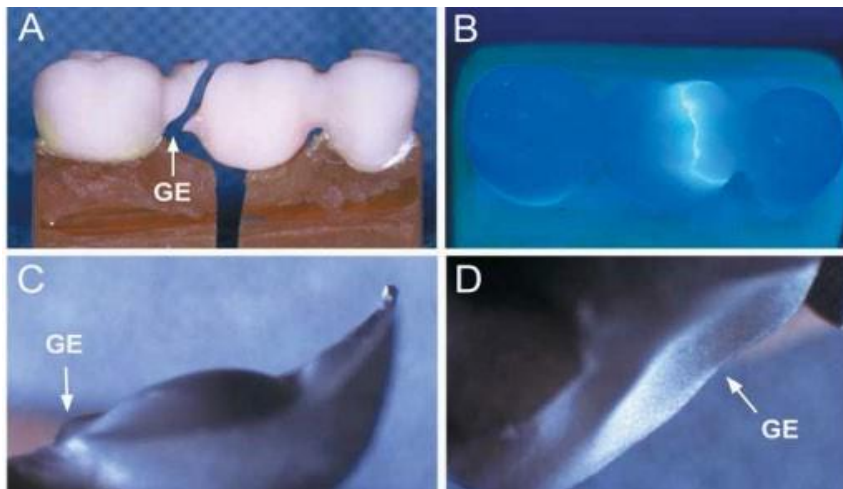
Designs	No	MFL (N)	SD (N)	Location of breakage		Statistical	Description
				Mesial	Distal		
I	10	943	150	4	6	A	
II	10	746	105	5	5		B
III	10	944	145	6	4	A	
IV	10	673	55	5	5		B

MFL = mean failure load.

Designs marked with different alphabet letters were significantly different (Duncan's test, $\alpha = 0.01$).

ΕΙΚΟΝΑ 91: Μέσο φορτίο αστοχίας και τυπικές αποκλίσεις για τα τέσσερα σχέδια συνδέσμων και αριθμός δοκιμίων που έσπασαν στις εγγύς και άπω περιοχές του συνδέσμου ⁶⁸

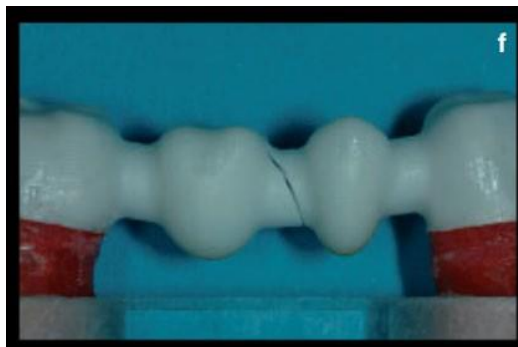
Οι οδοί διάδοσης της ρωγμής ήταν λοξές ουλικά-μασητικά μέσω του συνδέσμου και του ενδιαμέσου και παράλληλες πάρειο-γλωσσικά προς την επιφάνεια σύγκλεισης κατά μήκος της ΟΕ. Η θέση του κατάγματος εμφανίστηκε εξίσου στη μεσότητα και την άπω περιοχή του ενδιαμέσου. Η επιφάνεια του κατάγματος ήταν λεία και γυαλιστερή με τις άνω και κάτω περιοχές να χωρίζονται από μια οριοθετική γραμμή. Οι κυρτότητες κυριαρχούσαν στην πλευρά του κολοβώματος- μια κυρτότητα με μεγαλύτερη ακτίνα παρατηρήθηκε στο ουλικό τμήμα και μια κυρτότητα μικρότερης ακτίνας στο μασητικό τμήμα. Αντίστοιχα, αναπτύχθηκε κοίλανση με μεγαλύτερη ακτίνα στην περιοχή των ούλων και κοίλανση μικρότερης ακτίνας στο μασητικό τμήμα. [Εικόνα 92] Αυτά τα μοτίβα υποδηλώνουν σημαντική αλλαγή στην κατανομή της τάσης κατά τη θραύση. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν στην περιοχή του συνδέσμου και του ενδιαμέσου. ⁶⁸



ΕΙΚΟΝΑ 92: Πορεία ρωγμής και επιφάνεια θραύσης, χειλική άποψη. **A:** λοξός προσανατολισμός της διαδρομής του κατάγματος που εκτείνεται από το ουλικό χείλος (GE) έως την μασητική περιοχή (σχέδιο I). **B:** Παράλληλη διαδρομή ρωγμής μασητική στην επιφάνεια κατά μήκος. **C:** Παρειακή όψη των κυρτωμάτων στην πλευρά του κολοβώματος. **D:** κάθετη άποψη των κοίλων στο γεφύρωμα. ⁶⁸

Στη μελέτη των Larsson και συν. (2007), όπου μελετήθηκε η αντοχή σε θραύση γεφυρών πυρήνων ζirkονίας τεσσάρων μονάδων σχεδιασμένων με διαφορετικές διαμέτρους συνδέσμων και κατασκευάστηκαν συνολικά 40

ολοκεραμικοί πυρήνες γεφυρών τεσσάρων μονάδων που στηρίζονταν σε κολοβώματα και δύο ενδιάμεσα, όλοι οι πυρήνες υπέστησαν κάταγμα στις περιοχές των συνδέσμων. Η αντοχή σε θραύση αυξήθηκε σημαντικά για κάθε αύξηση της διαμέτρου του συνδέσμου, εκτός από τα 2 και 2,5 mm. Πέντε πυρήνες διαμέτρου 2,0 mm και ένας πυρήνας διαμέτρου 2,5 mm έσπασαν τόσο στον κεντρικό όσο και στον άπω σύνδεσμο κατά τη διάρκεια της προφόρτισης. Όλοι οι άλλοι πυρήνες έσπασαν στον κεντρικό σύνδεσμο, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 93].⁶⁹



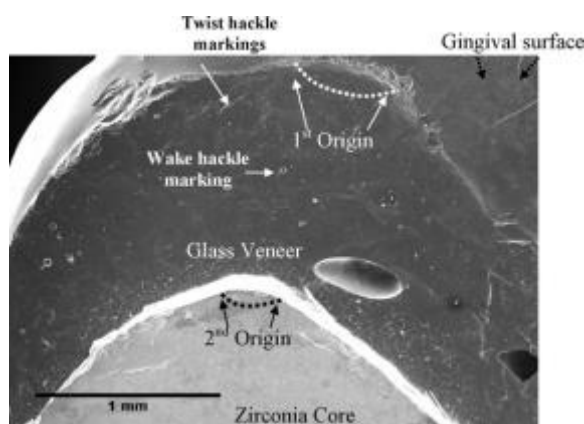
EIKONA 93: Σπασμένος πυρήνας που δείχνει τη θέση μιας τυπικής θραύσης.⁶⁹

Δεν παρατηρήθηκε επιφανειακή βλάβη σε καμία από τις γέφυρες που δοκιμάστηκαν. Δύο πυρήνες, ένας με σύνδεσμο 2,5 mm και ένας με σύνδεσμο 3,0 mm, έχασαν τη συγκράτηση σε ένα από τα κολοβώματα μετά από θερμοκυκλοφορία-η δοκιμή συνεχίστηκε χωρίς επαναφορά. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. [Εικόνα 94]

FPD core no.	Load at fracture (N)				
	2·0 mm*	2·5 mm*	3·0 mm	3·5 mm	4·0 mm
1	300 [†]	300**	450	617	838
2	300 [†]	300	402	561	759
3	300	300	450	572	896
4	300	300	425	549	860
5	300	300	392	779	783
6	300 [†]	300 [†]	395	563	1098
7	300 [†]	300	461 [‡]	536	982
8	300 [†]	300	450	638	963
Mean	300	300	428	602	897
SD	0	0	28	79	113

EIKONA 94: Φορτίο θραύσης για τους πυρήνες γεφυρών με διαφορετική διάμετρο συνδέσμου⁶⁹

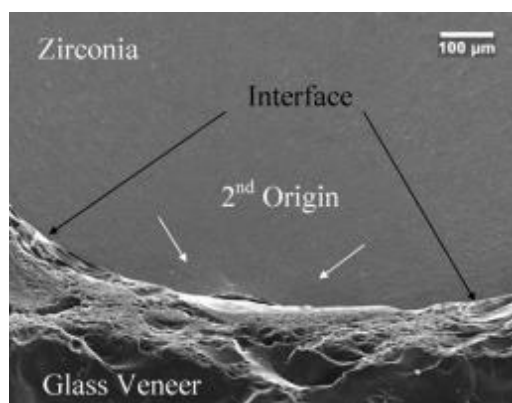
Από τη μελέτη των Taskonak και συν. (2008)⁷⁰ που είχαν στόχο να προσδιοριστεί η θέση της ρωγμής έναρξης και τα αίτια της θραύσης σε κλινικά αποτυχημένες κεραμικές γέφυρες με βάση τη ζirkονία και χρησιμοποιήθηκε η ποσοτική φρακτογραφία ή θραυστογραφία για τον προσδιορισμό των τάσεων αστοχίας πέντε ολοκεραμικών γεφυρών τεσσάρων μονάδων με βάση το ζirkόνιο φάνηκε πως οι κλινικά αποτυχημένες κεραμικές γέφυρες είχαν λιγότερο σαφή επιφανειακά σημάδια θραύσης λόγω της πολύπλοκης μικροδομής τους και της πολυκατευθυντικής και επαναλαμβανόμενης ενδοστοματικής φόρτισης. Επιπλέον, δεν είχαν όλα τα κλινικά ανακτηθέντα δείγματα άθικτες επιφάνειες θραύσης για τη διενέργεια της φρακτογραφικής ανάλυσης. Τα θραύσματα που περιείχαν την προέλευση του κατάγματος στις επικαλύψεις δύο δειγμάτων έλειπαν. Ως εκ τούτου, η προέλευση του κατάγματος τους δεν μπορούσε να προσδιοριστεί. Οι καταβολές θραύσης των γεφυρών με βάση το ζirkόνιο εντοπίστηκαν στην επιφάνεια των ούλων των συνδέσμων σε τέσσερα από τα πέντε δείγματα.⁷⁰



ΕΙΚΟΝΑ 95: Επιφάνεια θραύσης μιας κλινικά αποτυχημένης γέφυρας με βάση το Y-TZP. Τα σημάδια wake hackle χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των σημείων αναφοράς για τον προσδιορισμό της προέλευσης του σπασίματος στο γυάλινο περίβλημα. Παρατηρήθηκαν επίσης σημάδια wake hackle στους πόρους ως αποτέλεσμα της διέλευσης θραύσης γύρω από τους πόρους. Τα σημάδια υποδεικνύουν τη προέλευση της θραύσης στο στρώμα της επικάλυψης.⁷⁰

Το υπόλοιπο ένα δείγμα απέτυχε λόγω θραύσης που ξεκινούσε από το όριο του οπίσθιου στηρίγματος. Τα σημάδια Wake hackle που εξέρχονταν ακτινωτά από τους πόρους ήταν τα κύρια καθοδηγητικά χαρακτηριστικά που καθόρισαν την προέλευση των καταγμάτων. [Εικόνα 95] Επιπλέον, συχνά παρατηρήθηκαν σημάδια

από twist hackle, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση της κατεύθυνσης διάδοσης του κατάγματος. Σε αυτό το σημείο προκειμένου να γίνουν κατανοητοί οι λόγοι θραύσεις των δοκιμών κρίνεται απαραίτητο να αποσαφηνιστούν κάποιιοι όροι. Η γραμμή ανάσχεσης (arrest line) είναι μια σαφώς καθορισμένη γραμμή που δημιουργείται όταν η ρωγμή σταματάει, πριν συνεχίσει τη διάδοσή της, συχνά σε ελαφρώς διαφορετική κατεύθυνση. Οι γραμμές ανάσχεσης (arrest lines) είναι επίσης δείκτες της κατεύθυνσης διάδοσης, καθώς η αρχή ενός γεγονότος ρωγμής βρίσκεται πάντα στην κοίλη πλευρά της πρώτης γραμμής ανάσχεσης. Οι γραμμές ανάσχεσης είναι γραμμές στην επιφάνεια της ρωγμής που διατρέχουν την τοπική διεύθυνση της ρωγμής. Διαχωρίζουν παράλληλα τμήματα της ρωγμής διάδοσης που βρίσκονται σε ελαφρώς διαφορετικά επίπεδα. Οι γραμμές hackle σχηματίζονται συνήθως όταν η ρωγμή κινείται γρήγορα. Το κυματώδες ραγίσμα (wake hackle) είναι ένα στίγμα (wake) που προέρχεται από έναν πόρο (ή άλλη ανωμαλία) και δημιουργείται από το μέτωπο της ρωγμής που προχωρά κατά μήκος των πλευρών του πόρου πριν συνεχίσει σε ελαφρώς διαφορετικά επίπεδα. Έτσι, τα κυματοειδή ραγίσματα είναι δείκτες της κατεύθυνσης διάδοσης της ρωγμής. Η καμπύλη συμπίεσης είναι το κυρτό χείλος λίγο πριν από την ολική θραύση ενός σώματος που φορτίζεται σε κάμψη.^{41, 70} Η θραύση διαδόθηκε προς τον πυρήνα ζirkονίου αφού ξεκίνησε από την επιφάνεια της επικάλυψης. Ωστόσο, η αρχική θραύση σταμάτησε στη διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα ζirkονίου και της γυάλινης επικάλυψης, όπως αποδεικνύεται από την αποκόλληση και τις επίπεδες διαφορές της επιφάνειας θραύσης της επικάλυψης και του πυρήνα στη διεπιφάνεια.⁷⁰ [Εικόνα 95-96]



EΙΚΟΝΑ 96: Επιφάνεια θραύσης μιας κλινικά αποτυχημένης γέφυρας με βάση το Y-TZP.

Παρατηρήθηκαν αποκολλήσεις μεταξύ του γυάλινου επιστρώματος και του πυρήνα Y-TZP.⁷⁰

Για ένα διμερές κεραμικό σύνθετο υλικό, εάν η θραύση ξεκινά από τη μία πλευρά και διέρχεται από τη διεπιφάνεια με καταστροφικό τρόπο (γρήγορη θραύση), συνήθως δεν υπάρχει επίπεδη διαφορά μεταξύ των επιφανειών θραύσης των δύο στρώσεων που γειτνιάζουν με τη διεπιφάνεια. Ωστόσο, εάν η συγκόλληση μεταξύ των δύο στρώσεων είναι ασθενής ή, η δεύτερη στρώση είναι πολύ πιο σκληρή από την πρώτη στρώση (όπου ξεκινά η θραύση), μπορεί να συμβεί αποκόλληση και η ρωγμή τείνει να σταματήσει στη διεπιφάνεια, να περάσει κατά μήκος της διεπιφάνειας και στη συνέχεια να ξεκινήσει εκ νέου σε ορισμένη περιοχή συγκέντρωσης τάσεων της δεύτερης στρώσης κατά την περαιτέρω φόρτιση. Παρατηρήθηκε μια δεύτερη θέση έναρξης θραύσης εντός της στρώσης πυρήνα κάθε γέφυρας με βάση το ζirkόνιο. Ως αποτέλεσμα, η δεύτερη θραύση που ξεκίνησε εντός της στρώσης πυρήνα ήλεγχε την τελική αστοχία. Με βάση τη γνωστή ανθεκτικότητα θραύσης και τα εκτιμώμενα κρίσιμα μεγέθη ρωγμών, οι τάσεις αστοχίας των επικαλύψεων (αρχικές ρωγμές) ήταν μεταξύ 31 και 38 MPa και οι τάσεις αστοχίας των πυρήνων Y-TZP κυμάνθηκαν από 379 έως 501 MPa.⁷⁰

Από τη μελέτη των Plengsombut και συν.(2009)⁷¹ που είχαν ως στόχο να προσδιοριστεί η επίδραση 2 σχεδίων συνδέσμων στην αντοχή σε θραύση των υλικών του πυρήνα που χρησιμοποιούνται για ολοκεραμικές γέφυρες και κατασκεύασαν κεραμικά δοκίμια σε σχήμα ράβδου, οι μέσες τιμές μέγιστου φορτίου αστοχίας για όλες τις ομάδες δοκιμών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.⁷¹ [Εικόνα 97]

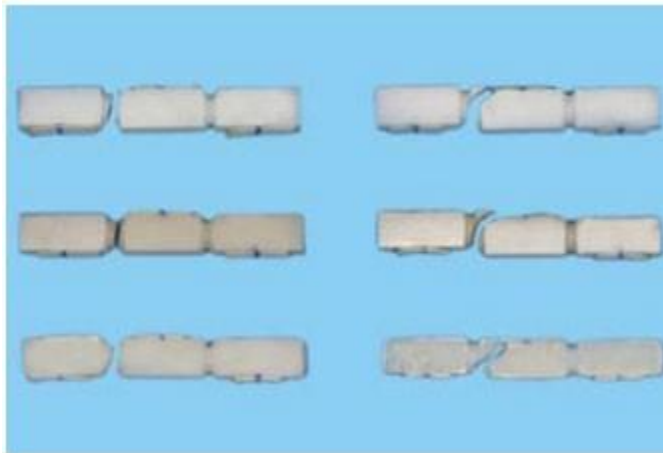
Material	Mean Failure Load	Test Groups	Mean Failure Load
ZirCAD	535.3 (167.4)	ZirCAD-R	684.2 (70.1)
		ZirCAD-S	386.3 (51.5)
CAD	174.0 (94.3) ^a	CAD-R	260.0 (37.8)
		CAD-S	87.9 (7.0)
Press	149.1 (36.0) ^a	Press-R	172.9 (35.5) ^b
		Press-S	125.1 (15.1) ^b

R, rounded; S, sharp

Groups with same lowercase letter were not significantly different ($P > .05$).

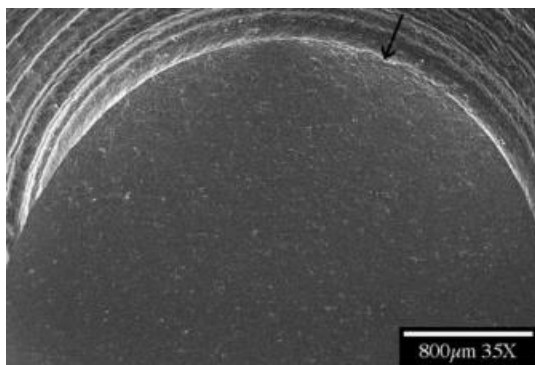
EΙΚΟΝΑ 97: Μέση φόρτιση αστοχίας σε N ⁷¹

Η ανάλυση ANOVA έδειξε σημαντικές διαφορές ανά υλικό και σχεδιασμό συνδέσμου, καθώς και σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ υλικού και σχεδιασμού συνδέσμου. Οι επακόλουθες συγκρίσεις έδειξαν ότι, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό του συνδέσμου, το ZirCAD παρουσίασε σημαντικά υψηλότερο μέγιστο φορτίο αστοχίας σε σύγκριση με τα CAD και Press. Δεν διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά στο μέγιστο φορτίο αστοχίας μεταξύ CAD και Press. Το ZirCAD και το CAD παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερα μέγιστα φορτία αστοχίας για το σχεδιασμό στρογγυλού συνδέσμου σε σύγκριση με το σχεδιασμό αιχμηρού συνδέσμου. Δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στο μέγιστο φορτίο αστοχίας μεταξύ των σχεδίων συνδέσμων για τις ομάδες Press. Επιπλέον, κατά τη σύγκριση των τεχνικών κατασκευής για το διπυριτικό λίθιο (CAD έναντι Press), το CAD επέδειξε σημαντικά υψηλότερο μέγιστο φορτίο αστοχίας για το σχεδιασμό στρογγυλού συνδέσμου, αλλά δεν υπήρχε σημαντική διαφορά για τις ομάδες σχεδιασμού αιχμηρού συνδέσμου. Οι οπτικές υποκειμενικές αξιολογήσεις των θραυσμένων δοκιμών έγιναν από έναν μόνο συγγραφέα. Αντιπροσωπευτικά θραυσμένα δοκίμια από κάθε ομάδα δοκιμών παρουσιάζονται στην [\[Εικόνα 98\]](#). ⁷¹

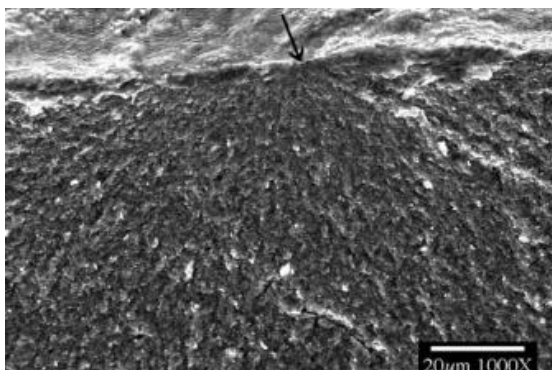


EΙΚΟΝΑ 98: Αντιπροσωπευτικά θραυσμένα δοκίμια από όλες τις ομάδες δοκιμών: δοκίμια αιχμηρού συνδέσμου στην αριστερή στήλη, δοκίμια στρογγυλού συνδέσμου στη δεξιά στήλη. Τα δοκίμια ZirCAD, CAD και Press εμφανίζονται από την επάνω έως την κάτω σειρά, αντίστοιχα. ⁷¹

Τα δοκίμια με στρογγυλούς σύνδεσμος για όλα τα υλικά έδειξαν ένα σταθερό μοτίβο θραύσης. Η θραύση επεκτάθηκε από έναν σύνδεσμο προς το μέσον του ενδιάμεσου. Τα δοκίμια με αιχμηρούς σύνδεσμος θραύτηκαν εντός ενός συνδέσμου, με μικρότερη επέκταση μέσω του ενδιάμεσου. Επιπλέον, για όλα τα υλικά με στρογγυλούς σύνδεσμος, οι γραμμές θραύσης των δειγμάτων ZirCAD και CAD ήταν κοίλες, ενώ οι γραμμές θραύσης των δειγμάτων Press είχαν σχήμα S (τόσο κοίλες όσο και κυρτές). Η υποκειμενική αξιολόγηση του μοτίβου θραύσης με SEM από την άποψη εγκάρσιας τομής αποκάλυψε ότι η θραύση ξεκινούσε από την επιφάνεια των ούλων του συνδέσμου προς το ενδιάμεσο. [Εικόνα 99-100] ⁷¹



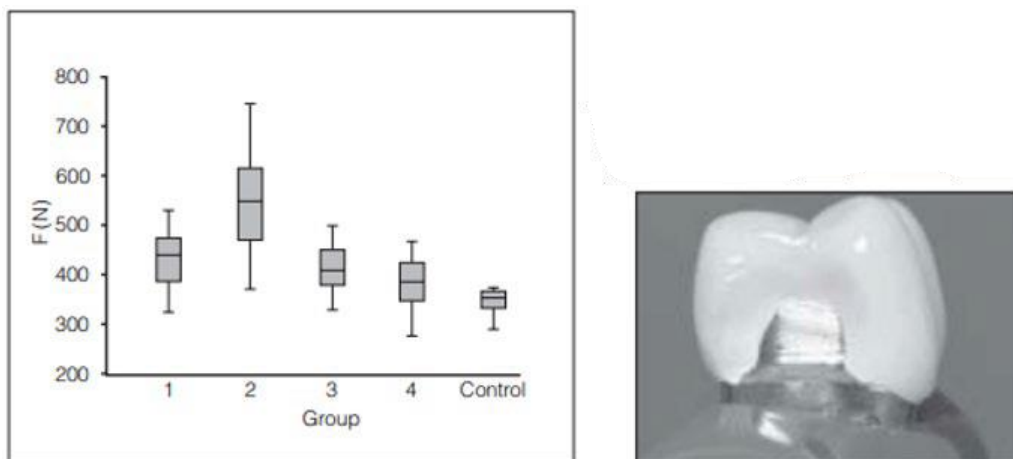
EIKONA 99: SEM θραυσμένου δοκιμίου IPS e.max ZirCAD σε διατομή συνδέσμου. Το βέλος υποδεικνύει την προέλευση της θραύσης ⁷¹



EIKONA 100: SEM θραυσμένου δείγματος IPS e.max ZirCAD σε διατομή συνδέσμου. Το βέλος υποδεικνύει την προέλευση της θραύσης. ⁷¹

Στη μελέτη των Ohlmann και συν. (2009)⁷² που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν τις τιμές των φορτίων θραύσης για γέφυρες τριών μονάδων αντικαθιστώντας δύο προγομφίους και με πρόβολο έναν γομφίο κατασκευασμένες

με σκελετό ζirkονίας, από τις γέφυρες δεν αποκολλήθηκε μετά τη θερμική ή τη μηχανική φόρτιση και δεν παρατηρήθηκε καμία ρωγμή στην επικάλυψη. Στην ομάδα 1 (απλός σκελετός με πάχος 0,7 mm παντού) οι τιμές του φορτίου θραύσης κυμάνθηκαν μεταξύ 291 και 376N με M.O. $346 \pm 27N$, για την ομάδα 2 (απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 2 mm και πλάτους 1 mm) $441 \pm 65 N$, για την ομάδα 3 (απλός σκελετός με γλωσσικό σιρίτι ύψους 3 mm και πλάτους 1 mm) $548 \pm 113N$ και για την ομάδα 4 (σκελετός με πάχος 1 mm στη μασητική επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος.) $417 \pm 52N$. Ο M.O. των τιμών του φορτίου θραύσης των ομάδων 2,3 και 4 ήταν στατιστικά υψηλότερες από αυτές της ομάδας ελέγχου (ομάδα 1). Αντιθέτως, ο M.O. τιμής φορτίου θραύσης για την ομάδα 5 ($385 \pm 55N$) δεν ήταν σημαντικά υψηλότερος από αυτόν της ομάδας ελέγχου (ομάδα 1). Οι περισσότερες γραμμές θραύσης ($n=43$) εντοπίστηκαν στην άπω επιφάνεια του τελευταίου δοντιού στηρίγματος. [Εικόνα 101] ⁷²



EIKONA 101: (αριστερά) Επίδραση του σχεδιασμού του σκελετού στις τιμές του φορτίου θραύσης. (δεξιά) θραύση της στεφάνης του άπω δοντιού στηρίγματος.⁷²

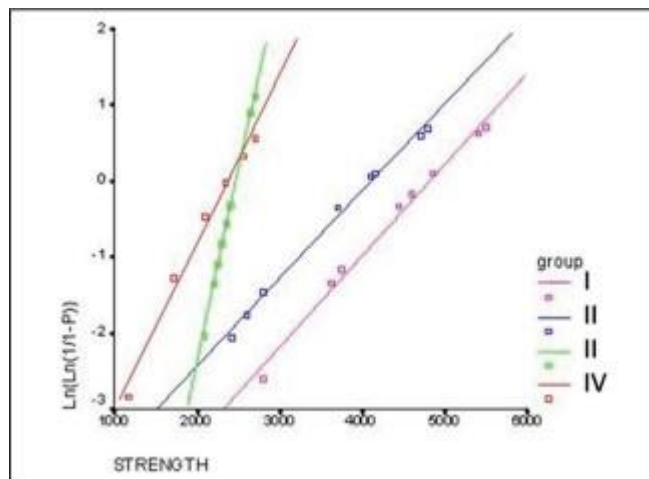
Οι Salimi και συν.(2012) στην μελέτη τους ⁷³ έδειξαν ότι ο μέσος όρος και οι τυπικές αποκλίσεις του φορτίου μέχρι τη θραύση των δοκιμών οπίσθιων γεφυρών από οξείδιο του ζirkονίου παρουσιάζονται στον πίνακα της [Εικόνα 102]. ⁷³ Επειδή οι ομάδες δεν πληρούσαν την υπόθεση της ομοιογένειας των διαφορών, η επίδραση του σχεδιασμού του σκελετού στην αντοχή σε θραύση αξιολογήθηκε με τη δοκιμασία Kruskal-Wallis. Αυτή η στατιστική δοκιμή αποκάλυψε ότι υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ όλων των πειραματικών ομάδων. [Εικόνα 102]

Framework design	Mean(SD) ^a	Min	Max	F_{σ} (N)	M
Group I (3x3)	2127.50 (490.03) A	1170	2700	2350.74	4.06
Group II (3x3 modified)	2366.35 (214.07) A	2080	2700	2462.76	12.04
Group III (4x4)	3658.75 (942.43) B	2420	4800	4043.97	3.99
Group IV (4x4 modified)	4371.25 (928.84) B	2800	5500	4759.93	4.90

^aThe groups with similar letters did not have any significant difference (Mann-Whitney test, $p < 0.05$)

ΕΙΚΟΝΑ 102: Μέσες τιμές φορτίου θραύσης για τις γέφυρες ζirkονίας⁷³

Το τεστ Mann-Whitney έδειξε ότι η μέση αντοχή σε θραύση της ομάδας IV ήταν σημαντικά υψηλότερη από την ομάδα I και την ομάδα II, αλλά δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ της ομάδας IV και της ομάδας III. Η μέση τιμή του φορτίου έως τη θραύση των δοκιμών οπίσθιων γεφυρών από οξειδίο του ζirkονίου επηρεάστηκε σημαντικά από το μέγεθος του συνδέσμου, αλλά δεν επηρεάστηκε από την τροποποίηση του σκελετού. Η υψηλότερη φέρουσα ικανότητα παρατηρήθηκε στους σκελετούς της ομάδας IV και η χαμηλότερη στους σκελετούς της ομάδας I. Οι σκελετοί της ομάδας II ήταν οι πιο αξιόπιστοι, παρουσιάζοντας τη μικρότερη διασπορά των μετρούμενων φερουσών ικανοτήτων. Άλλες ομάδες σκελετών υπέφεραν από μία ευρύτερη διασπορά φορτίου που φάνηκε από τις χαμηλότερες τιμές των συντελεστών Weibull. ⁷³ [Εικόνα 103]



ΕΙΚΟΝΑ 103: Διάγραμμα Weibull ⁷³

Στη μελέτη των Partiyana και συν.(2016) η στατιστική ανάλυση αποκάλυψε μια σημαντική διαφορά στην αντοχή στη θραύση, που παρατηρήθηκε μεταξύ του συμβατικού και του τροποποιημένου σχεδίου σκελετού ζirkονίας.⁷⁴ Η σύγκριση των μέσων φορτίων θραύσης μεταξύ των τεσσάρων ομάδων μελέτης: KAVO (CAD/CAM) συμβατικός, KAVO (CAD/CAM) τροποποιημένος, Amann Girrbach (MAD/MAM) συμβατικός και Amann Girrbach (MAD/MAM) τροποποιημένος σύνδεσμος ήταν $2331,84 \pm 359,82$, $3713,08 \pm 452,21$, $1956,11 \pm 310,85$ και $3963,24 \pm 549,69$, αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ των τεσσάρων ομάδων ήταν στατιστικά σημαντική. Η τεχνική κατασκευής δεν είχε σημαντική επίδραση στην αντοχή σε θραύση των κατασκευασμένων αποκαταστάσεων, και για τα δύο σχέδια σκελετού.⁷⁴ [Εικόνα 104]

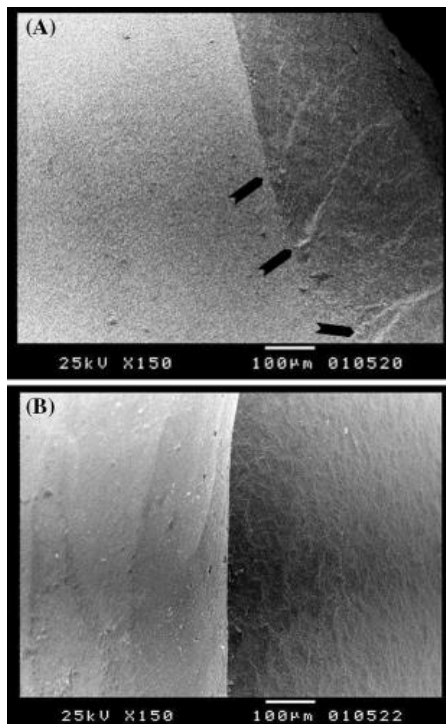
	KAVO (CAD/CAM)		AMANN GIRRBACH (MAD/MAM)	
	Conventional connector design	Modified connector design	Conventional connector design	Modified connector design
Mean \pm SD	2331.84 \pm 359.82	3713.08 \pm 452.21	1956.11 \pm 310.85	3963.24 \pm 549.69
F test	54.08			
P value	<0.0001*			

* Statistically significant

EIKONA 104: Σύγκριση μεταξύ τεσσάρων ομάδων μελέτης όσον αφορά την αντοχή σε θραύση (N) του σχεδιασμού του σκελετού και της τεχνικής κατασκευής του.⁷⁴

Οι post hoc πολλαπλές συγκρίσεις για τις διαφορές μεταξύ των τεσσάρων ομάδων μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Οι διαφορές μεταξύ όλων των ζευγών των τεσσάρων ομάδων ήταν στατιστικά σημαντικές, εκτός από τις διαφορές μεταξύ των συμβατικών σχεδίων συνδέσμων KAVO (CAD/CAM) και Amann Girrbach (MAD/MAM) και των τροποποιημένων σχεδίων συνδέσμων KAVO (CAD/CAM) και Amann Girrbach (MAD/MAM). Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, οι διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές.⁷⁴ Η επίδραση της τεχνικής κατασκευής δεν ήταν στατιστικά σημαντική, ενώ η επίδραση του σχεδιασμού του σκελετού ήταν στατιστικά σημαντική. Σε σύγκριση με τον καινοτόμο σχεδιασμό του σκελετού, ο συμβατικός σχεδιασμός είχε μικρότερο φορτίο θραύσης κατά $1694,19$ N. Κατά την εφαρμογή του φορτίου, παρατηρήθηκε αρχική ρωγμή του κεραμικού επικάλυψης για τον συμβατικό σχεδιασμό κάτω από την εγκοπή φόρτισης. Με την περαιτέρω φόρτιση, η θραύση επήλθε λόγω διάδοσης της κρίσιμης ρωγμής, η οποία προέρχεται από την εφελκυστική επιφάνεια του συνδέσμου, με λοξή κατεύθυνση προς την επιφάνεια

φόρτισης. Για τον τροποποιημένο σχεδιασμό, η θραύση οφείλεται σε θραύση του αξονικού τοιχώματος του κολοβώματος στο σημείο όπου ενώνεται με την περιοχή του συνδέσμου. Η επιφάνεια θραύσης εκτράπηκε προς το ενδιάμεσο καθώς εξαπλώθηκε προς την επιφάνεια φόρτισης. Η παρατήρηση της εικόνας SEM αποκάλυψε την ακριβή θέση και το μέγεθος της κρίσιμης ρωγμής. Οι συμβατικοί σκελετοί έσπασαν από την εφελκυστική επιφάνεια του συνδέσμου με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του κολοβώματος. Η ρωγμή παρέκκλινε από το ενδιάμεσο καθώς εξαπλωνόταν προς τη μασητική επιφάνεια με αποτέλεσμα να δημιουργείται καμπύλη επιφάνεια θραύσης. Η κρίσιμη ρωγμή του τροποποιημένου σκελετού εντοπίστηκε στη συμβολή μεταξύ των συνδέσμων πλήρους πάχους και του αξονικού τοιχώματος του κολοβώματος (περιοχή αποκοπής).⁷⁴ [Εικόνα 105]



ΕΙΚΟΝΑ 105: (A) Εικόνα SEM που δείχνει τη ρωγμή που ξεκίνησε από τη διεπιφάνεια του πυρήνα-επικάλυψης στο συμβατικό σχεδιασμό σκελετού (μαύρα βέλη). Το κεραμικό του πυρήνα είναι το ανοιχτότερο υλικό (αριστερά) και η επικάλυψη είναι το σκουρότερο υλικό (δεξιά). (B) Εικόνα SEM που δείχνει την περιοχή σύνδεσης του τροποποιημένου σχεδιασμού του σκελετού χωρίς ρωγμές στη διεπιφάνεια. Πιο ανοιχτόχρωμο υλικό είναι ο πυρήνας (αριστερά)⁷⁴

Από τη μελέτη των Hafezeqoran και συν. (2020)⁷⁵ που είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης του μεγέθους και του σχεδιασμού του συνδέσμου στην

αντοχή σε θραύση των μονολιθικών ακίνητων οδοντικών προσθέσεων από ζirkονία, και ύστερα από την κατασκευή των δοκιμών τους (σαράντα οπίσθιες γέφυρες 3 μονάδων, που εκτείνονταν από τον πρώτο προγόμφιο της κάτω γνάθου έως τον πρώτο γομφίο), ο παρακάτω πίνακας [Εικόνα 106] παρουσιάζει τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με το φορτίο αστοχίας.⁷⁵ Το ελάχιστο φορτίο αστοχίας καταγράφηκε στην ομάδα Β (γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 9 mm² και σχεδιασμό αιχμηρού περιθωρίου με ακτίνα καμπυλότητας 0,25 mm)(1054,4±133,89 N) και η υψηλότερη μέση τιμή καταγράφηκε στην ομάδα Γ (γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 12 mm² και στρογγυλεμένο σχεδιασμό εσοχής με ακτίνα καμπυλότητας 0,9 mm.)(1599,8±167,09 N). Όπως φαίνεται, το μέσο φορτίο αστοχίας και στα δύο μεγέθη συνδέσμων ήταν υψηλότερο στο σχεδιασμό με στρογγυλό άνοιγμα σε σύγκριση με τον αιχμηρό. Και στους δύο σχεδιασμούς, το μέσο φορτίο αστοχίας στο μέγεθος συνδέσμου 9 mm² ήταν χαμηλότερο από τις ομάδες με μέγεθος συνδέσμου 12 mm². Επιπλέον, τα ελάχιστα και μέγιστα φορτία αστοχίας καταγράφηκαν στην ομάδα Β (878 N) και Γ (γέφυρες 3 μονάδων με μέγεθος συνδέσμου 12 mm² και στρογγυλεμένο σχεδιασμό εσοχής με ακτίνα καμπυλότητας 0,9 mm (1974 N), αντίστοιχα. Το τεστ Kolmogorov-Smirnov χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της κανονικής κατανομής των δεδομένων πριν από τη σύγκριση του φορτίου αστοχίας σε δύο σχεδιασμούς καμπυλότητας και δύο διαφορετικές διαστάσεις συνδέσμων. Με βάση τα αποτελέσματα, τα δεδομένα δεν ήταν κανονικά κατανεμημένα για τις τιμές του φορτίου αστοχίας (P<0,001)⁷⁵

Dimension	Design	Mean ± SD	Minimum	Maximum
9 mm ²	Round	1327.4±196.37	936	1587
	Sharp	1054.4±196.37	878	1250
12 mm ²	Round	1599.8±167.09	1380	1974
	Sharp	1440±159.05	1093	1672

EIKONA 106: Μέσες τιμές φορτίων αστοχίας⁷⁵

Δείχθηκε ότι η αντοχή σε θραύση των ολοκεραμικών γεφυρών 3 μονάδων επηρεάστηκε από την τροποποίηση της ακτίνας καμπυλότητας εντός του μασητικού χώρου στην περιοχή του συνδέσμου. Για τους σχεδιασμούς συνδέσμων που δοκιμάστηκαν, η ακτίνα καμπυλότητας του συνδέσμου στην ουλική επιφάνεια

επηρέασε έντονα την αντοχή σε θραύση των ολοκεραμικών γεφυρών. Καθώς η ακτίνα στην ουλική επιφάνεια αυξήθηκε από 0,25 έως 0,90 mm, το μέσο φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 140%. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης υποδηλώνουν ότι η μασητική επιφάνεια μπορεί να σχεδιαστεί τόσο αιχμηρή όσο είναι πρακτικά δυνατό για την αισθητική μιας ολοκεραμικής 3μελούς γέφυρας, υπό την προϋπόθεση ότι η ουλική περιοχή έχει μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας.⁶⁸ Συνιστάται ελάχιστη διάμετρος 4,0 mm για ολοκεραμική γέφυρα με βάση την ζirkονία με μεγάλο εύρος ενδιάμεσων ή αντικατάσταση γομφίων.⁶⁹ Η διεπιφανειακή αποκόλληση σε οδοντιατρικές κεραμικές δομές με πορσελάνη/πυρήνα ζirkονίας έλεγχε τις θέσεις έναρξης θραύσης και τις τάσεις αστοχίας του πυρήνα ζirkονίας. Ο σχεδιασμός και η διάσταση των συνδέσμων καθώς και το μέγεθος της γέφυρας μπορεί να είναι οι βασικοί παράγοντες πρόκλησης καταγμάτων σε σχετικά χαμηλά φορτία σύγκλισης αλλά υψηλές τάσεις θραύσης.⁷⁰ Οι ολοκεραμικές γέφυρες που δοκιμάστηκαν απέτυχαν λόγω καταγμάτων που ξεκίνησαν από την επιφάνεια των ούλων ενός συνδέσμου και διαδόθηκαν προς το ενδιάμεσο. Οι πολυκρυσταλλοί υτρίου-τετραγωνικής ζirkονίας παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε θραύση από τα υαλοκεραμικά διπυριτικού λιθίου. Η αντοχή σε θραύση των κεραμικών υλικών πυρήνα επηρεάζεται από την τεχνική κατασκευής και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο σχεδιασμός του συνδέσμου επηρεάζει την αντοχή σε θραύση των κατεργασμένων κεραμικών, αλλά όχι των πρεσαριστών κεραμικών. Μεταξύ των υλικών που είναι διαθέσιμα για CAD/CAM, η αντοχή σε θραύση των πολυκρυστάλλων υτρίου-τετραγωνικής ζirkονίας επηρεάζεται λιγότερο από το σχεδιασμό του συνδέσμου απ' ό,τι το κεραμικό διπυριτικού λιθίου.⁷¹ Οι γέφυρες από ζirkονία δεν μπορούν να συνιστώνται ανεπιφύλακτα για την αντικατάσταση ενός ελλείποντος οπίσθιου δοντιού.⁷² Η μέση αντοχή σε θραύση των ομάδων με σύνδεσμο 4 × 4 mm ήταν σημαντικά υψηλότερη από τις ομάδες με σύνδεσμο 3 × 3 mm. Παρόλο που η αντοχή σε θραύση των τροποποιημένων σκελετών αυξήθηκε στην παρούσα μελέτη (1,1 φορές) δεν διέφερε σημαντικά από τα ανατομικά δείγματα.⁷³ Η τροποποίηση του σχεδιασμού του σκελετού ζirkονίας παρουσίασε σημαντική βελτίωση της αντοχής στη θραύση σε σύγκριση με τον συμβατικό σχεδιασμό.⁷⁴ Η αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου σε μονολιθικές γέφυρες ζirkονίας αυξάνει την αντοχή σε θραύση. Δεύτερον, ο σχεδιασμός αιχμηρής καμπυλότητας του συνδέσμου δεν συνιστάται για

περιοχές υψηλής καταπόνησης με περιορισμένο μεσοφραγματικό ύψος. Η διάσταση του συνδέσμου 9 mm² για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας τριών μονάδων, η οποία συνιστάται από τον κατασκευαστή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη προσοχή. Μια διάσταση συνδέσμου 12 mm² είναι αρκετά ισχυρή για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας τριών μονάδων, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό της καμπυλότητας του συνδέσμου.⁷⁵

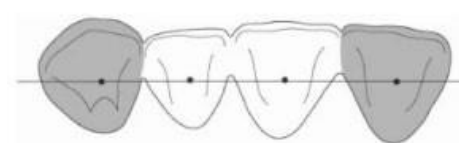
5.2 Μελέτη της επίδρασης του σχεδιασμού στην αντοχή σε κάμψη των ολοκεραμικών γεφυρών.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην αντοχή κόπωσης των ολοκεραμικών γεφυρών διάφοροι ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Komine και συν.(2005) στην μελέτη τους⁴⁰ είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση της διαμόρφωσης του σκελετού στην οριακή προσαρμογή των κεραμικών σκελετών ζirkονίας τεσσάρων πρόσθιων μονάδων. Οι Quinn και συν.(2010) στη μελέτη τους⁷⁶ είχαν ως στόχο την εκτίμηση της μέγιστης συγκέντρωσης τάσεων που δημιουργείται από τη γεωμετρία του συνδέσμου και να παράσχουν προσαρμοσμένες εκτιμήσεις της ελάχιστης διαμέτρου του συνδέσμου που απαιτείται για την επίτευξη 20 ετών λειτουργίας. Οι Hamza και συν.(2016) στη μελέτη τους⁷⁷ είχαν ως στόχο ήταν να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών συνδέσμων στην αντοχή σε κάμψη προσομοιωμένων ακίνητων οδοντικών προσθέσεων 3 μονάδων κατασκευασμένων από ζirkονία. Οι Ahmed και συν.(2020) στη μελέτη τους⁷⁸ είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η αντοχή σε κάμψη της ζirkονίας με τη χρήση τριών διαφορετικών σχεδίων συνδέσμων υπό κατακόρυφα και λοξά φορτία.

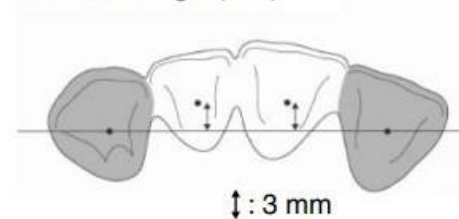
Για την μελέτη των Komine και συν.(2005)⁴⁰ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση της διαμόρφωσης του σκελετού στην οριακή προσαρμογή των κεραμικών σκελετών ζirkονίας τεσσάρων πρόσθιων μονάδων, χρησιμοποιήθηκε η άνω γνάθος ενός εικονικού μοντέλου για την αναπαραγωγή μιας κλινικής περίπτωσης, στην οποία κατασκευάστηκε μια πρόσθια γέφυρα τεσσάρων μονάδων για την αντικατάσταση ενός ελλείποντος κεντρικού και πλάγιου κοπήρα. Ο πλαστικός αριστερός κεντρικός κοπήρας και ο δεξιός κυνόδοντας προετοιμάστηκαν

για να λάβουν ολοκεραμικές στεφάνες πλήρους κάλυψης. Τα παρασκευασμένα δόντια τοποθετήθηκαν στις αντίστοιχες ανατομικές τους θέσεις στο ομοίωμα της άνω γνάθου και έγινε αποτύπωση των κολοβωμάτων με χρήση υλικού αποτύπωσης βινυλοπολυσιλοξάνης. Στο αποτύπωμα εκχύνεται ακρυλική ρητίνη για την αναπαραγωγή των κολοβωμάτων. Ακολούθως, το πρότυπο ρητίνης επενδύθηκε, κάηκε και χυτεύθηκε. Οι κύριες μήτρες κατασκευάστηκαν από κράμα νικελίου-χρωμίου προκειμένου να επιτευχθούν σταθερά και ομοιόμορφα σχήματα. Οι κύριες μήτρες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σκελετών και τη μέτρηση της οριακής προσαρμογής. Για την κατασκευή του κύριου μοντέλου κατασκευάστηκε αποτύπωμα ενός σταδίου με τη χρήση υλικού αποτύπωσης βινυλοπολυσιλοξάνης και ενός ειδικά κατασκευασμένου δίσκου αποτύπωσης. Στη συνέχεια, οι μήτρες κατασκευάστηκαν με τη χρήση οδοντιατρικής γύψου σύμφωνα με τις ειδικές απαιτήσεις κάθε συστήματος CAD/CAM. Κατασκευάστηκαν συνολικά 48 σκελετοί με τη χρήση τριών διαφορετικών συστημάτων CAD/CAM (16 δείγματα ανά ομάδα): το σύστημα Cercon Smart Ceramics (ομάδα CE), το σύστημα Vita YZ /Cerec inLab (ομάδα YZ/CL) και το σύστημα Xawex (ομάδα ΧΑ).⁴⁰ Όλα οι εξεταζόμενοι σκελετοί ζirkονίας κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, οι σκελετοί πυροσυσσωματώθηκαν σε ειδικούς κλιβάνους. Για κάθε ομάδα κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις σκελετών: ο ευθύς (ST) και ο καμπύλος σχεδιασμός (CU).⁴⁰ [Εικόνα 107]

Straight design (ST)



Curved design (CU)

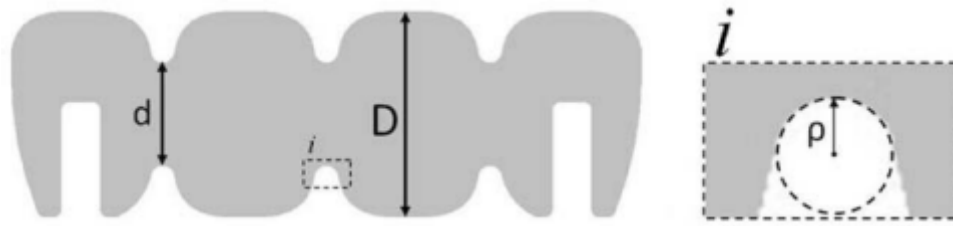


Στον σχεδιασμό ST, τα δύο στηρίγματα και τα ενδιάμεσα διατάσσονταν γραμμικά. Στον σχεδιασμό CU, τα ενδιάμεσα βρίσκονταν σε κάθετη θέση 3 mm από την ευθεία γραμμή. Κάθε υποομάδα αποτελούνταν από οκτώ δείγματα. Οι δύο διαφορετικοί σχεδιασμοί σκελετού κατασκευάστηκαν με πανομοιότυπες διαστάσεις χρησιμοποιώντας δείκτη σιλικόνης. Τα σκελετοί κατασκευάστηκαν από ένα υλικό πυρήνα με ομοιόμορφο πάχος 0,8 mm. Οι σύνδεσμοι μοντελοποιήθηκαν με ύψος 3,5 mm και πλάτος 2,5 mm. Η οριακή προσαρμογή των σκελετών μετρήθηκε απουσία επικάλυψης πορσελάνης. Οι σκελετοί τοποθετήθηκαν στα αντίστοιχα στηρίγματά τους και συγκρατήθηκαν στη θέση τους με δακτυλική πίεση. Πραγματοποιήθηκαν αποτυπώματα των οριακών περιοχών με χρήση υλικού αποτύπωσης βινυλοπολυσιλοξάνης και εκχύθηκαν αντίγραφα εποξειδικής ρητίνης. Αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της οριακής προσαρμογής. Ένα στερεομικροσκόπιο, μια κάμερα 3CCD και ένας προσωπικός υπολογιστής χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της οριακής προσαρμογής. Η φωτογραφική μηχανή αναπαρήγαγε εικόνες μεγέθυνσης r40 σε οθόνη υπολογιστή υψηλής ανάλυσης (800x600 pixel), έτσι ώστε να μπορεί να εξεταστεί μια εικόνα βίντεο της οριακής ασυμφωνίας με τη χρήση ειδικού προγράμματος λογισμικού. Οι μετρήσεις των οριακών αποκλίσεων γύρω από την περιφέρεια των κολοβωμάτων γίνονταν απευθείας στην οθόνη.⁴⁰ Η οριακή περιοχή των αντιγράφων προσανατολίστηκε κάθετα και ορθογώνια προς την κάμερα 3CCD, ώστε να μετρηθεί η απόσταση παράλληλα προς τον άξονα του κολοβώματος από το όριο του σκελετού έως τη γραμμή παρασκευής. Μετά τη σάρωση της επιλεγμένης περιοχής, τα δείγματα μετακινήθηκαν στην παρακείμενη περιοχή που ήταν ορατή στην οθόνη. Σε τέσσερις περιοχές κάθε αντιγράφου (εγγύς-άπω και πάρειο-γλωσσικά), 15 μετρήσεις κατανέμονταν ομοιόμορφα και πραγματοποιούνταν για κάθε αντίγραφο. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 60 μεμονωμένες μετρήσεις γύρω από την περιφέρεια κάθε κολοβώματος. Η γεωμετρική μέση τιμή κάθε αντιγράφου χρησιμοποιήθηκε ως σημείο δεδομένων για ένα δείγμα. Για κάθε σκελετό, πραγματοποιήθηκαν 10 μετρήσεις σε κάθε επιφάνεια (εγγύς-άπω και

πάρειο-γλωσσικά) των δύο κολοβωμάτων (κυνόδοντας και κεντρικός κοπτήρας). Για τη στατιστική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των 80 μετρήσεων οριακής ασυμφωνίας. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σχεδιάστηκαν διαγράμματα σκελετού (box plots). Μετά τον λογαριθμικό μετασχηματισμό, οι τιμές της οριακής απόκλισης φάνηκε να κατανέμονται κανονικά, οπότε χρησιμοποιήθηκε ο γεωμετρικός μέσος αντί του αριθμητικού μέσου. Η κεντρική υπόθεση για την παρούσα in vitro μελέτη ήταν ότι η συρρίκνωση των μερικώς πυροσυσσωματωμένων κεραμικών ζirkονίας κατά τη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης επηρεάζει την οριακή προσαρμογή των πρόσθιων τετραμερών σκελετών. ⁴⁰

Για την μελέτη των Quinn και συν.(2010) ⁷⁶ που είχαν ως στόχο την εκτίμηση της μέγιστης συγκέντρωσης τάσεων που δημιουργείται από τη γεωμετρία του συνδέσμου και να παράσχουν προσαρμοσμένες εκτιμήσεις της ελάχιστης διαμέτρου του συνδέσμου που απαιτείται για την επίτευξη 20 ετών λειτουργίας χρησιμοποίησαν μια απλή ποσοτική περιγραφή της γεωμετρίας του συνδέσμου σε ένα ολοκεραμικό σύστημα 4-τεμαχίων με δημοσιευμένα διαγράμματα συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων για την εκτίμηση του βαθμού συγκέντρωσης τάσεων και τη μέγιστη τάση. Τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας που είναι σημαντικά για τη συγκέντρωση τάσεων που αναπτύσσεται με τη συγκλεισιακή φόρτιση υποδεικνύονται στην [Εικόνα 108]. Η μασητική φόρτιση της γέφυρας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ροπής κάμψης (M) που δρα κατά μήκος της γέφυρας. Η απλοποίηση οδηγεί σε γραμμική κατανομή τάσεων γύρω από τον ουδέτερο άξονα και σε μέγιστη εφελκυστική τάση στην επιφάνεια του συνδέσμου. Ωστόσο, η απότομη μείωση του εμβαδού της διατομής στους σύνδεσμος προκαλεί συγκέντρωση τάσεων στη ρίζα του συνδέσμου και μέγιστη τάση που υπερβαίνει τη μέγιστη εφελκυστική τάση. Υπάρχει συμμετρία στην κατανομή των τάσεων γύρω από τον ουδέτερο άξονα, αλλά η περιοχή κρισιμότητας είναι σε εφελκυσμό. Αρκετές μελέτες 2D και 3D πεπερασμένων στοιχείων έχουν εντοπίσει ότι στην περιοχή του συνδέσμου αναπτύσσονται "υψηλές" συγκεντρώσεις τάσεων. Οι συγκεντρώσεις τάσεων που αναπτύσσονται στη ένωση των ενδιάμεσων μπορούν να περιγραφούν σύμφωνα με ορισμένα απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η διάμετρος του

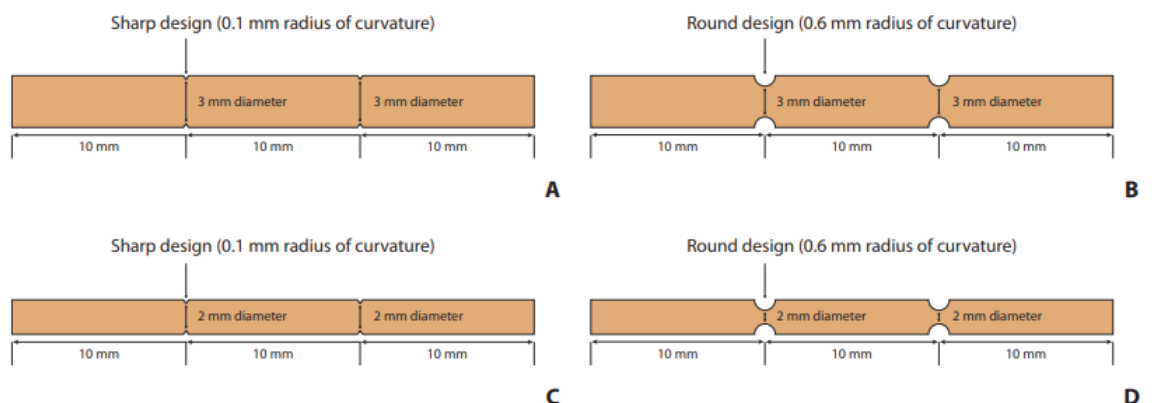
συνδέσμου (d), η διάμετρος στα ενδιάμεσα (D) και η ακτίνα καμπυλότητας στη ένωσή τους (ρ), όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.⁷⁶ [Εικόνα 108]



ΕΙΚΟΝΑ 108: Σχηματικό διάγραμμα μιας γέφυρας 4 μονάδων και διάκριση των σημαντικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν την τάση συγκέντρωση ενδιαφέροντος. Σημειώστε την υπογραμμισμένη ακτίνα της καμπυλότητας (ρ) στον σύνδεσμο στο ένθετο (i). d:ελάχιστη διάμετρος συνδέσμου D:διάμετρος ενδιάμεσου⁷⁶

Φρακτογραφικές αξιολογήσεις ολοκεραμικών γεφυρών έχουν αναφέρει ότι οι αστοχίες προέρχονται συνήθως από ατέλειες εντός της περιοχής του συνδέσμου λόγω της συγκέντρωσης τάσεων. Αποτελέσματα από πειραματικές μελέτες in vitro σε ολοκεραμικές γέφυρες έχουν επίσης υποστηρίξει αυτά τα ευρήματα.⁷⁶

Οι Hamza και συν. (2016) στη μελέτη τους⁷⁷ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών συνδέσμων στην αντοχή σε κάμψη προσομοιωμένων ακίνητων οδοντικών προσθέσεων 3 μονάδων κατασκευασμένων από ζirkονία, κατασκεύασαν 20 ορθογώνια δοκίμια σε σχήμα ράβδου, του ίδιου σχεδιασμού με διαστάσεις 4(Y)×4 mm (Π)×30 mm (Μ). Κάθε δοκίμιο ράβδου είχε 2 συρρικνωμένα τμήματα και στις δύο πλευρές που αντιπροσώπευαν τον σύνδεσμο και όριζαν ένα κεντρικό ενδιάμεσο μήκους 10 mm. [Εικόνα 109]



EIKONA 109: διαγράμματα που δείχνουν το σχήμα και τις διαστάσεις των δοκιμίων⁷⁷

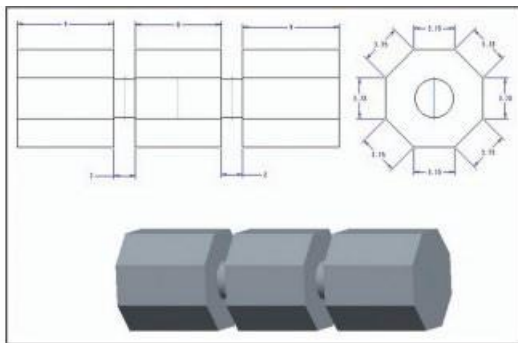
Επιπλέον 5 δοκίμια που κατασκευάστηκαν χωρίς στένωση χρησίμευσαν ως ομάδα ελέγχου. Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε 4 ομάδες ανάλογα με τη διάμετρο και το σχεδιασμό του συνδέσμου, ως εξής:

- μικρός στρογγυλός σύνδεσμος (SR): 2 mm (H)×3 mm (W) στρογγυλός 0,6 mm ακτίνα καμπυλότητας-
- μικρός αιχμηρός σύνδεσμος (SS): 2 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρός 0. 1 mm ακτίνα καμπυλότητας-
- συμβατικός στρογγυλός σύνδεσμος (CR): 3 mm (H)×3 mm (W) στρογγυλός 0,6 mm ακτίνα καμπυλότητας-
- συμβατικός αιχμηρός σύνδεσμος (CS): 3 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρός 0,1 mm ακτίνα καμπυλότητας.

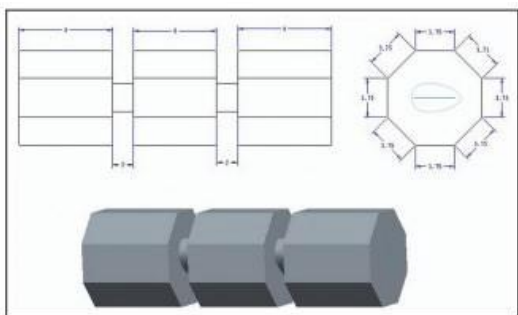
Το λογισμικό του συστήματος δημιούργησε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός δείγματος σε σχήμα ράβδου (4×4×30 mm) και η μηχανή ενεργοποιήθηκε για να φρεζάρει το απαιτούμενο σχέδιο. Τα δοκίμια φρεζαρίστηκαν και στη συνέχεια πυροσυσσωματώθηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Οι διαστάσεις των παραχθέντων δοκιμίων μετρήθηκαν και επαληθεύτηκαν με ηλεκτρονικό παχύμετρο με ακρίβεια 0,01 mm. Στη συνέχεια, όλα τα πυροσυσσωματωμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντοχής σε κάμψη 3 σημείων με χρήση μηχανής καθολικών δοκιμών. Τα δοκίμια φορτίστηκαν κάθετα μέσω μιας χαλύβδινης σφαίρας διαμέτρου 3 mm με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 0,5 mm ανά λεπτό, η οποία τοποθετήθηκε στο κέντρο του ενδιαμέσου. Το εύρος των κυλίνδρων στήριξης ήταν 25 mm, με τους συνδέσμους να είναι ισομερώς τοποθετημένοι γύρω από το κέντρο του σημείου φόρτισης. Δύο δείγματα από κάθε ομάδα επιλέχθηκαν για την εξέταση της διεπιφάνειας σπασμένου ενδιαμέσου-συνδέσμου σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Τα εν λόγω δείγματα καθαρίστηκαν με ατμό για 10 δευτερόλεπτα πριν από την απεικόνιση με SEM. Οι επιφάνειες των ράβδων ζirkονίας επικαλύφθηκαν με επικάλυψη με κράμα χρυσού-παλλαδίου υπό υψηλό κενό. Πραγματοποιήθηκαν

φωτομικρογραφίες σε μεγέθυνση $\times 200$ από διάφορες περιοχές για την αξιολόγηση των θραυσμένων επιφανειών. Τα δεδομένα παρουσιάστηκαν ως μέσες τιμές και τιμές τυπικής απόκλισης (SD). Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με λογισμικό.⁷⁷

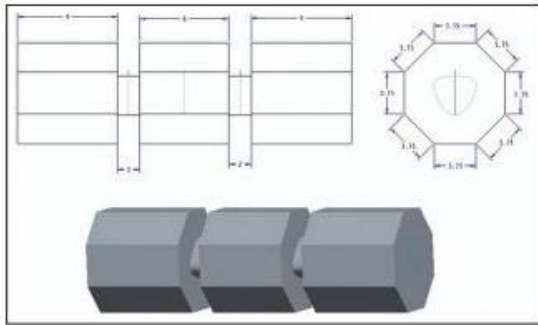
Οι Ahmed και συν.(2020) στη μελέτη τους⁷⁸ είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η αντοχή σε κάμψη της ζirkονίας με τη χρήση τριών διαφορετικών σχεδίων συνδέσμων υπό κατακόρυφα και λοξά φορτία. Για την προσομοίωση της ακίνητης μερικής πρόθεσης 3 μονάδων ζirkονίας, σχεδίασαν ένα οκταγωνικό δοκίμιο με τρεις κυλίνδρους συνδεδεμένους με διαφορετικές διαμορφώσεις συνδέσμων. Το οκταγωνικό σχήμα διευκολύνει την εφαρμογή λοξών φορτίων υπό 45° . Κάθε οκταγωνική επιφάνεια ήταν 3,75 mm και το πλάτος κάθε κυλίνδρου ορίστηκε στα 9 mm. Το μήκος του κυλίνδρου ήταν 26 mm. Κάθε σύνδεσμος που σχεδιάστηκε είχε τυπική επιφάνεια 10 mm^2 . Ο διαχωρισμός μεταξύ κάθε κυλίνδρου ήταν 2 mm λόγω περιορισμών φρεζαρίσματος. Επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά σχέδια συνδέσμων που χρησιμοποιούνται σε κλινικά σενάρια, δηλαδή στρογγυλός, οβάλ και τριγωνικός και προετοιμάστηκαν για φρεζάρισμα.⁷⁸ [Εικόνα 110-112]



EIKONA 110: σχηματικό διάγραμμα του δοκιμίου με τους στρογγυλούς συνδέσμους⁷⁸



ΕΙΚΟΝΑ 111: σχηματικό διάγραμμα του δοκιμίου με τους οβάλ συνδέσμους⁷⁸



ΕΙΚΟΝΑ 112: σχηματικό διάγραμμα του δοκιμίου με τους τριγωνικούς συνδέσμους⁷⁸

Δέκα δείγματα δοκιμάστηκαν για κατακόρυφα φορτία και 10 για πλάγια φορτία 45° για κάθε ένα από τα σχέδια συνδέσμων, συνολικά 60. Ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων χωρίστηκε έτσι στις ακόλουθες ομάδες:

- Ομάδα 1: Στρογγυλός σύνδεσμος για την αξιολόγηση των κατακόρυφων δυνάμεων (RV)
- Ομάδα 2: Οβάλ σύνδεσμος για την αξιολόγηση της κατακόρυφης δύναμης (OV)
- Ομάδα 3: Τριγωνικός σύνδεσμος για την αξιολόγηση της κατακόρυφης δύναμης (TV)
- Ομάδα 4: Στρογγυλός σύνδεσμος για την αξιολόγηση της λοξής δύναμης (RO)
- Ομάδα 5: Οβάλ σύνδεσμος για την αξιολόγηση της οβελιαίας δύναμης (OO)
- Ομάδα 6: Τριγωνικός σύνδεσμος για αξιολόγηση οβελιαίας δύναμης (TO).

Τα σχέδια των συνδέσμων φρεζάρονται από ζirkονία με τη χρήση μηχανής φρεζαρίσματος 5 αξόνων CAD/CAM. Μετά την άλεση, τα δοκίμια αποσπάστηκαν από το πλαίσιο στήριξης. Τα στηρίγματα λειαινόνταν προσεκτικά με ένα χειροκίνητο εργαλείο χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιώντας διαμαντένια φρέζα λεπτού κόκκου. Όλα τα δοκίμια πυροσυσσωματώθηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Τα δοκίμια επαληθεύτηκαν ως προς την ακρίβεια των διαστάσεων με ηλεκτρονικό διαβήτη σε όριο ακρίβειας 0,1 mm. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης 3 σημείων με τη χρήση μηχανής καθολικών δοκιμών. Στο σύνδεσμο σχήματος τριγώνου, η βάση του τριγώνου προσανατολίστηκε προς τα πάνω για κατακόρυφο φορτίο και στράφηκε με φορά ρολογιού για τη δοκιμή πλάγιου φορτίου 45°. Για τον σύνδεσμο σχήματος οβάλ, προσανατολίστηκε έτσι ώστε η μεγαλύτερη διάσταση του οβάλ να τοποθετείται κάθετα για κατακόρυφα φορτία και να στρέφεται με το ρολόι για να δοκιμαστεί το λοξό φορτίο 45°. Για τη δοκιμή του στρογγυλού συνδέσμου δεν απαιτήθηκε τέτοιος προσανατολισμός. Τα δοκίμια φορτίστηκαν με τη βοήθεια μιας ατράκτου πλάτους 6 mm με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 1 mm/min που τοποθετήθηκε στο κέντρο του οκταγωνικού κυλίνδρου.⁷⁸

Τα αποτελέσματα των *in vitro* ερευνών που προαναφέρθηκαν παρά το γεγονός ότι αφορούν υπολογισμό της αντοχής των γεφυρών σε κάμψη, δηλαδή φόρτιση γεωμετρικών ή φυσικών δοκιμών από μηδενικό φορτίο μέχρι το μέγιστο φορτίο θραύσης, αποτελούν σημαντική προσομοίωση των συνθηκών θραύσης των γεφυρών και κατέληξαν στα ακόλουθα χρήσιμα συμπεράσματα.

Από την έρευνα των Komine και συν.(2005)⁴⁰ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση της διαμόρφωσης του σκελετού στην οριακή προσαρμογή των κεραμικών σκελετών ζirkονίας τεσσάρων πρόσθιων μονάδων και για αυτό κατασκεύασαν δύο σχήματα γέφυρας (ευθύ και καμπύλο), τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των τιμών της οριακής ασυμφωνίας των διαφόρων τετραμερών σκελετών ζirkονίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. [Εικόνα 113]⁴⁰

Group	Design	No. of samples (n)	Minimum	Maximum	Median	IQR*
CE	Curved	8	97.3	147.0	121.5	[110.402; 129.046]
YZ/CL	Curved	8	75.4	112.2	96.4	[92.245; 106.55]
XA	Curved	8	115.6	172.6	153.6	[139.996; 157.284]
CE	Straight	8	80.7	105.8	85.8	[83.418; 89.769]
YZ/CL	Straight	8	77.6	97.2	87.6	[81.668; 91.012]
XA	Straight	8	97.2	128.9	113.4	[108.105; 121.817]

* Interquartile range.

CE: Cercon Smart Ceramic.

YZ/CL: Vita YZ/Cerec inLab.

XA: Xawex.

EΙΚΟΝΑ 113: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των οριακών τιμών ασυμφωνίας των διαφόρων σκελετών ZrO₂ τεσσάρων μονάδων⁴⁰

Οι γεωμετρικοί μέσοι όροι, τα τυπικά σφάλματα και τα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης για τις τιμές της οριακής ασυμφωνίας εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. ⁴⁰ [Εικόνα 114]

Group	Design	No. of samples (n)	Means*	SE†	CI 95%‡
CE	Curved	8	119.946	1.049	107.235–134.163
YZ/CL	Curved	8	86.761	1.046	87.049–107.556
XA	Curved	8	147.335	1.046	132.538–163.784
CE	Straight	8	88.050	1.032	81.672–94.926
YZ/CL	Straight	8	88.533	1.028	80.982–92.464
XA	Straight	8	113.406	1.033	104.954–122.539

* Geometric mean.

† Standard errors.

‡ 95% confidence interval.

CE: Cercon Smart Ceramic.

YZ/CL: Vita YZ/Cerec inLab.

XA: Xawex.

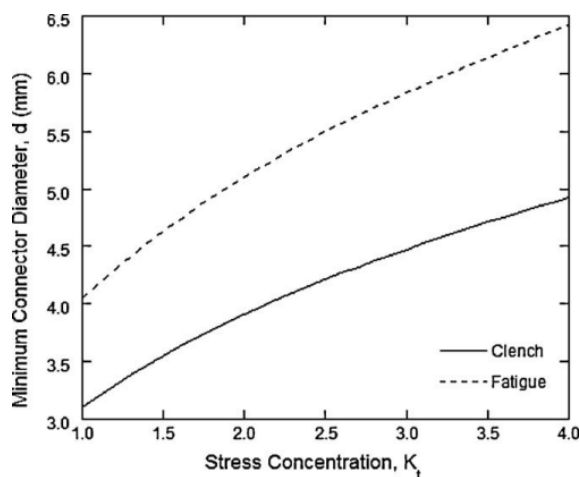
EIKONA 114: Γεωμετρικοί μέσοι όροι, τυπικά σφάλματα και 95% διαστήματα εμπιστοσύνης των τιμών οριακής απόκλισης των διαφόρων σκελετών τεσσάρων μονάδων ⁴⁰

Εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές στις οριακές αποκλίσεις μεταξύ του ευθύγραμμου και του καμπύλου σχεδιασμού του σκελετού για τις ομάδες CE ($p=0,0013$) και XA ($p=0,0033$), αλλά όχι για την ομάδα YZ/CL ($p=0,22$). Για τον καμπύλο σχεδιασμό, οι οριακές αποκλίσεις ήταν σημαντικά μικρότερες στην ομάδα XY/CL από ό,τι στις ομάδες XA ($p=0,00014$) και CE ($p=0,037$)- οι τιμές αυτές ήταν επίσης σημαντικά μικρότερες για την ομάδα CE σε σύγκριση με την ομάδα XA ($p=0,042$). Για τον ευθύγραμμο σχεδιασμό, οι οριακές αποκλίσεις ήταν σημαντικά μικρότερες στην ομάδα XY/CL σε σύγκριση με την ομάδα XA ($p=0,0003$) και στην ομάδα CE σε σύγκριση με την ομάδα XA ($p=0,0008$). Δεν διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των ομάδων XY/CL και CE ($p=0,7$). ⁴⁰

Από την έρευνα των Quinn και συν.(2010) ⁷⁶ που είχαν ως στόχο την εκτίμηση της μέγιστης συγκέντρωσης τάσεων που δημιουργείται από τη γεωμετρία του συνδέσμου και χρησιμοποίησαν μια απλή ποσοτική περιγραφή της γεωμετρίας του συνδέσμου σε ένα ολοκεραμικό σύστημα 4-τεμαχίων με δημοσιευμένα διαγράμματα συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων για την εκτίμηση του βαθμού συγκέντρωσης τάσεων και τη μέγιστη τάση. Με αυτήν τη μελέτη αναγνωρίστηκε η σημασία των συγκεντρώσεων τάσεων στο σχεδιασμό της γέφυρας και της μέγιστης

τάσης, είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι προσαρμογές που απαιτούνται στην ελάχιστη διάμετρο του συνδέσμου για την επίτευξη της επιθυμητής διάρκειας ζωής. Εκτίμησαν τις ελάχιστες διαμέτρους συνδέσμων για γέφυρες 3, 4 και 5 μονάδων για 20 χρόνια λειτουργίας με πιθανότητα αστοχίας 5%. Για την κόπωση, οι εκτιμήσεις αυτές βασίστηκαν σε μια μέγιστη κυκλική τάση 346 MPa, μια τιμή που εκτιμήθηκε απευθείας από το διάγραμμα Wöhler και μια συχνότητα μάρησης 1400 κύκλων/ημέρα. Χρησιμοποιώντας αυτό το μέγεθος ως ορισμό της αντοχής σε κόπωση, μια εκτίμηση της ελάχιστης διαμέτρου του συνδέσμου που απαιτείται για την αποφυγή αστοχίας λόγω κόπωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.⁷⁶

[Εικόνα 115]



ΕΙΚΟΝΑ 115: Η ελάχιστη διάμετρος

συνδέσμου για μια ολοκεραμική γέφυρα 4 μονάδων κατασκευασμένη από 3Y-TZP που είναι απαραίτητη για την επίτευξη διάρκειας ζωής 20 ετών με πιθανότητα αστοχίας 5%.⁷⁶

Η αναγκαία διάμετρος για την αποφυγή θραύσης υπό έναν μόνο κύκλο παρουσιάζεται για λόγους σύγκρισης, αλλά η κόπωση είναι σαφώς το κρίσιμο ζήτημα. Η απαιτούμενη ελάχιστη διάμετρος του συνδέσμου και για τους δύο τρόπους φόρτισης αυξάνεται σημαντικά. Ομολογουμένως, υπάρχουν δύο περιορισμοί σε αυτές τις εκτιμήσεις. Οι υπολογισμοί υποθέτουν ότι η κατανομή της αντοχής της ζιρκονίας παρουσία της εγκοπής είναι ισοδύναμη με εκείνη που παρουσιάζουν τα δοκίμια κάμψης. Διαφορές θα μπορούσαν να υπάρχουν, μεταξύ άλλων, λόγω του χαμηλότερου πληθυσμού ατελειών στην περιοχή της συγκέντρωσης τάσεων και λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας μεταξύ του συνδέσμου και των δοκιμίων. Τα θέματα αυτά, ιδίως η συμπεριφορά κόπωσης των

οδοντιατρικών κεραμικών και η συμβολή των ατελειών, απαιτούν περαιτέρω μελέτη. Παρ' όλα αυτά, οι εκτιμήσεις για την ελάχιστη διάμετρο του συνδέσμου, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι εγγενή στο σχεδιασμό γεφυρών, δείχνουν ότι οι εκτιμήσεις είναι πολύ μη συντηρητικές. Αντ' αυτού, οι ελάχιστες διαμέτροι συνδέσμων που παρουσιάζονται θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως συντηρητικές κατευθυντήριες γραμμές κατά την ανάπτυξη γεφυρών ζirkονίας 4 μονάδων για κλινικές εφαρμογές.⁷⁶

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Hamza και συν.(2016)⁷⁷ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών συνδέσμων στην αντοχή σε κάμψη προσομοιωμένων ακίνητων οδοντικών προσθέσεων 3 μονάδων κατασκευασμένων από ζirkονία και κατασκεύασαν 20 ορθογώνια δοκίμια σε σχήμα ράβδου, έδειξαν ότι η υψηλότερη μέση αντοχή σε κάμψη καταγράφηκε στην ομάδα ελέγχου (ενιαία δοκίμια χωρίς στένωση), 891,8 ±57,9MPa, ενώ η χαμηλότερη μέση αντοχή σε κάμψη καταγράφηκε στην ομάδα SS, 2 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρή ακτίνα καμπυλότητας 0,1 mm, 502,8 ±23,3MPa. Η SR 2 mm (H) ×3 mm (W) στρογγυλή ακτίνα καμπυλότητας 0,6 mm ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την CS 3 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρή ακτίνα καμπυλότητας 0,1 mm (583,6 ±49,7MPa, 502,8 ±23,3MPa). Τα αποτελέσματα της 2-way ANOVA έδειξαν ότι η διάμετρος του συνδέσμου, ο σχεδιασμός και η αλληλεπίδραση μεταξύ των 2 μεταβλητών είχαν στατιστικά σημαντική επίδραση στη μέση αντοχή σε κάμψη. [Εικόνα 116]

Connector Diameter	Connector Design	Mean	SD	Rank	P
3 mm	Round	682.9	36.8	B	.04*
	Sharp	502.8	23.3	D	
2 mm	Round	583.6	49.7	C	
	Sharp	486.7	35.6	E	
Control		891.8	57.9	A	

SD, standard deviation.

*Significant at $P \leq .05$. Different letters were statistically significant.

EIKONA 116: Μέσες τιμές ±SD των τιμών αντοχής σε κάμψη (N)⁷⁷

Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι ο SR 2 mm (H)×3 mm (W) στρογγυλής ακτίνας καμπυλότητας 0,6 mm ήταν σημαντικά υψηλότερος από αυτόν του SS 2 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρής ακτίνας καμπυλότητας 0,1 mm. Ομοίως, η CR 3 mm (H)×3

mm (W) στρογγυλή ακτίνα καμπυλότητας 0,6 mm ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη της CS 3 mm (H)×3 mm (W) αιχμηρή ακτίνα καμπυλότητας 0,1 mm.⁷⁷ [Εικόνα 117]

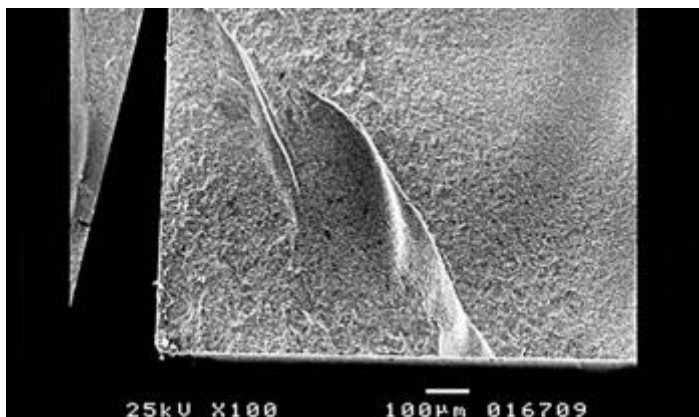
Source of Variation	SS	df	MS	F	Power	P
Connector diameter	16 643.9	1	16 643.9	9.3	1.000	<.001*
Connector design	95 962.4	1	95 962.4	53.4	1.000	<.001*
Connector diameter×connector design	8655.5	1	8655.5	4.8	0.990	<.001*
Error	644.2	20	32.2			

ANOVA, analysis of variance; SS, sum of squares; df, degree of freedom (n-1); MS, mean squares.

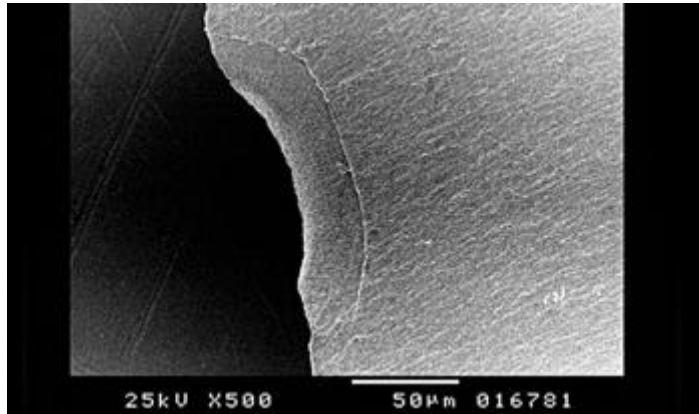
*Significant at $P \leq .05$.

ΕΙΚΟΝΑ 117: Αποτελέσματα ANOVA δύο κατευθύνσεων για την επίδραση των διαφόρων μεταβλητών στην αντοχή σε κάμψη⁷⁷

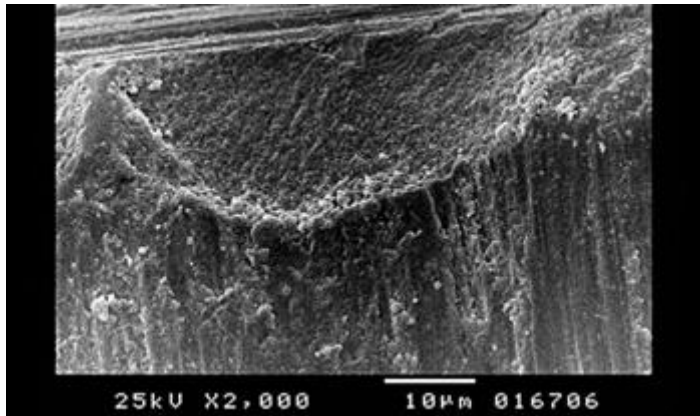
Η παρατήρηση του μοτίβου θραύσης με SEM από μια εγκάρσια τομή αποκάλυψε ότι η θραύση ξεκίνησε από την πλευρά των ούλων του συνδέσμου προς το ενδιάμεσο.⁷⁷ [Εικόνα 118-120]



ΕΙΚΟΝΑ 118 : SEM που καταδεικνύει την προέλευση της ρωγμής στο σημείο σύνδεσης⁷⁷



EIKONA 119: SEM που δείχνει την κρίσιμη θέση ρωγμής στην περιοχή του συνδετήρα. Η δευτερεύουσα γραμμή ρωγμής και το όριο είναι ορατά (λευκό βέλος) ⁷⁷

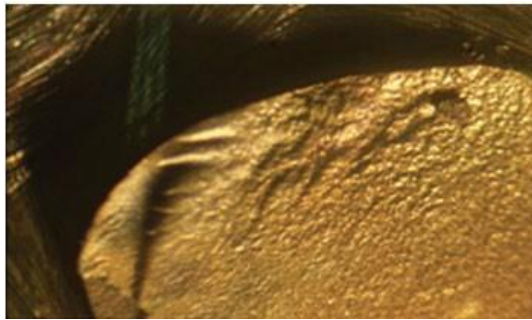


EIKONA 120: SEM με υψηλή μεγέθυνση του σημείου θραύσης σε στενό σχεδιασμό του συνδέσμου και γραμμές ίχνους κατεργασίας στην επιφάνεια (λευκό βέλος) ⁷⁷

Επιπλέον, οι φωτομικρογραφίες έδειξαν μοτίβα λοξής θραύσης σε όλα τα δοκίμια. ⁷⁷ [Εικόνα 121-122]



EIKONA 121: Φωτομικρογραφία που δείχνει την προέλευση της κρίσιμης ρωγμής στην επιφάνεια εφελκυσμού του στρογγυλού συνδέσμου 3 mm.⁷⁷



EIKONA 122: Φωτομικρογραφία που δείχνει την προέλευση της κρίσιμης ρωγμής στην επιφάνεια εφελκυσμού στρογγυλού συνδέσμου 2 mm⁷⁷

Από τη μελέτη των Ahmed και συν.(2020)⁷⁸ που είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η αντοχή σε κάμψη της ζιρκονίας με τη χρήση οκταγωνικών δοκιμών με τρεις κυλίνδρους συνδεδεμένους και τριών διαφορετικών σχεδίων συνδέσμων υπό κατακόρυφα και λοξά φορτία, όλες οι ομάδες βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές. Η υψηλότερη αντοχή βρέθηκε στον τριγωνικό σύνδεσμο με κατακόρυφα φορτία.⁷⁸

[Εικόνα 123-126]

	n	Mean	SD	SE	95% CI for mean		Minimum-maximum	P	Post hoc analysis
					Lower bound	Upper bound			
Round vertical	10	1438.00	235.94	74.61	1269.22	1606.78	1180-1960	<0.01	1, 2>3
Triangle vertical	10	1478.80	215.26	68.07	1324.81	1632.79	1053-1800		
Oval vertical	10	1095.60	133.44	42.20	1000.15	1191.05	928-1320		
Total	30	1337.47	260.24	47.51	1240.29	1434.64	928-1960		

SD: Standard deviation, SE: Standard error, CI: Confidence interval

EIKONA 123: στατιστική ανάλυση των κάθετων φορτίων, δοκιμή ANOVA ενός τρόπου και Bonferroni's post hoc⁷⁸

	n	Mean	SD	SE	95% CI for mean		Minimum-maximum	Significant	Post hoc analysis
					Lower bound	Upper bound			
Round oblique	10	1393.20	265.744	84.036	1203.10	1583.30	1018-1858	<0.01	1>2, 3
Triangle oblique	10	931.00	158.089	49.992	817.91	1044.09	705-1138		
Oval oblique	10	1119.10	243.325	76.946	945.04	1293.16	828-1468		
Total	30	1147.77	292.070	53.324	1038.71	1256.83	705-1858		

SD: Standard deviation, SE: Standard error, CI: Confidence interval

EIKONA 124: στατιστική ανάλυση των λοξών φορτίων, δοκιμή ANOVA ενός τρόπου και Bonferroni's post hoc⁷⁸

Table 3: Kruskal-Wallis ANOVA, Mann-Whitney post hoc tests for vertical loads

Vertical load	n	Minimum	Maximum	Mean	SD	P	Post hoc analysis
Round	10	1180	1960	1438	235.94	0.008	1, 2>3
Triangle (2)	10	1053	1800	1478	215.26		
Oval (3)	10	928	1320	1095	133.44		

SD: Standard deviation

EIKONA 125: Kruskal-Wallis ANOVA, Mann-Whitney post hoc tests για τα κατακόρυφα φορτία⁷⁸

Oblique load	n	Minimum	Maximum	Mean	SD	P	Post hoc analysis
Round	10	1018	1858	1348.10	265.74	0.033	1>2, 3
Triangle	10	705	1138	991.00	158.08		
Oval	10	828	1468	1119.10	243.32		

SD: Standard deviation

EIKONA 126: Kruskal-Wallis ANOVA, Mann-Whitney post hoc tests για πλάγια φορτία⁷⁸

Τα αποτελέσματα των in vitro ερευνών που προαναφέρθηκαν κατέληξαν ότι:

Η διαμόρφωση του σκελετού επηρεάζει την οριακή προσαρμογή των πρόσθιων τετραμερών μερικώς πυροσυσσωματωμένων κεραμικών σκελετών ζιρκονίας.⁴⁰ Το ζιρκόνιο μπορεί να χρησιμεύσει ως κατάλληλο υλικό για την κατασκευή ολοκεραμικών οπίσθιων γεφυρών πολλαπλών μονάδων, αλλά είναι κρίσιμο ο σχεδιασμός της γέφυρας να λαμβάνει υπόψη τη σημασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη μέγιστη τάση και την αντίστοιχη πιθανότητα αστοχίας.⁷⁶ Η αντοχή σε κάμψη των κεραμικών με βάση το Y-TZP επηρεάζεται από τη διάσταση και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο στρογγυλός σχεδιασμός του συνδέσμου μπορεί να αντέξει καλύτερα τις δυνάμεις σύγκλισης από τον αιχμηρό σχεδιασμό. Συνιστώνται σύνδεσμοι με ελάχιστη διατομή 2x3 mm² για πρόσθια γέφυρα, εφόσον έχουν στρογγυλή καμπυλότητα.⁷⁷ Η υψηλότερη αντοχή σε κάμψη παρατηρήθηκε σε δοκίμια με τριγωνικούς συνδέσμους όταν η δύναμη εφαρμόστηκε κάθετα. Ο σχεδιασμός στρογγυλού συνδέσμου αποδείχθηκε καλύτερος από τον τριγωνικό και τον οβάλ σύνδεσμο κατά την εφαρμογή σε πλάγια φορτία. Όλοι οι σχεδιασμοί συνδέσμων άντεξαν τόσο τις κάθετες όσο και τις οριζόντιες δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κανονικής μάσησης. Ο σχεδιασμός του συνδέσμου πρέπει να αποφασίζεται από τον κλινικό ιατρό/τεχνικό ανάλογα με το

κλινικό σενάριο. Το "ένα για όλα" δεν μπορεί να εφαρμοστεί στο σχεδιασμό του σχήματος και του μεγέθους του συνδέσμου.⁷⁸

5.3. Μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στην μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών γεφυρών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της σχεδίασης στη μηχανική συμπεριφορά των ολοκεραμικών γεφυρών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ερευνητές σχεδίασαν πειραματικές μελέτες. Οι Kohorst και συν.(2008) στη μελέτη τους⁴⁸ είχαν ως στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι η in vitro φέρουσα ικανότητα μιας οπίσθιας οδοντικής γέφυρας από ζirkονία μειώνεται λόγω γήρανσης σε τεχνητό στοματικό περιβάλλον. Επιπλέον, ελέγχθηκαν οι υποθέσεις ότι ένας αυξανόμενος αριθμός μηχανικών κύκλων ή ένα αυξανόμενο ανώτερο όριο φορτίου και μια καθορισμένη μηχανική βλάβη του σκελετού σε μια ευαίσθητη θέση προκαλεί μείωση της φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον, προσδιορίστηκε η θέση των υψηλότερων εφελκυστικών τάσεων εντός της γέφυρας από ζirkονία μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Σε ένα πλαστικό μοντέλο της άνω γνάθου, τα δόντια 24 και 27 προετοιμάστηκαν για να φιλοξενήσουν μια τετραμερή ολοκεραμική γέφυρα. Οι Thompson και συν.(2010) με τη μελέτη τους⁷⁹ είχαν σκοπό να μελετήσουν την ικανότητα των ενθέτων να αποτελέσουν στήριγμα για ακίνητες ολοκεραμικές προσθετικές αποκαταστάσεις. Με τη χρήση ενός εξιδανικευμένου σχεδίου παρασκευής ενθέτου και μιας μορφής πρόσθεσης που κατανέμει καλύτερα τις εφελκυστικές τάσεις, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ένθετο ως στήριγμα για μια ολοκεραμική ακίνητη προσθετική αποκατάσταση. Οι Bona και συν.(2013) με τη μελέτη τους⁸⁰ είχαν στόχο να περιγράψουν τη διαδοχική επεξεργασία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων των ολοκεραμικών στεφανών και της γέφυρας με βάση τις εικόνες που παρέχονται από τη σάρωση με μικρό-CT, προσομοιώνοντας την κατανομή των τάσεων των αποκαταστάσεων υπό φόρτιση. Οι Lakshmi και συν.(2015) με τη μελέτη τους³⁸ είχαν στόχο να αξιολογηθεί η κατανομή των τάσεων μεταξύ μονολιθικού διπυριτικού λιθίου και μονολιθικής ζirkονίας που συγκρατούνται με ένθετα από ακίνητες οδοντικές προθέσεις μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του

συνδέσμου με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Οι Ogar και συν.(2021) στη μελέτη τους ⁸¹ χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να αξιολογήσουν την κατανομή των τάσεων στον οστίτη ιστό, τα εμφυτεύματα και το προσθετικό σκελετό από ζirkονία που επικαλύπτεται με υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου μιας αποκατάστασης που στηρίζεται μόνο σε τέσσερα εμφυτεύματα χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά σχέδια, συμπεριλαμβανομένων 2 διαφορετικών άπω κλίσεων (15 και 30 μοίρες) και 2 μηκών προβόλου (5 και 9 mm). Η μηδενική υπόθεση ήταν ότι το μήκος του προβόλου και η οπίσθια κλίση του εμφυτεύματος δεν θα επηρέαζαν τις τάσεις στον ιστό του εμφυτεύματος και του οστού ή στο σκελετό της αποκατάστασης από ζirkονία.

Για την μελέτη των Kohorst και συν. ^[48] (2008)⁴⁸ που είχαν ως στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι η *in vitro* φέρουσα ικανότητα μιας οπίσθιας οδοντικής γέφυρας από ζirkονία μειώνεται λόγω γήρανσης σε τεχνητό στοματικό περιβάλλον παρασκευάστηκαν γύψινα εκμαγεία μέσω ατομικών αποτυπωμάτων των παρασκευασμένων δοντιών και χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την κατασκευή σκελετών γέφυρας από διοξείδιο του ζirkονίου. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης και των στατικών δοκιμών, οι γέφυρες συγκολλήθηκαν και υποστηρίχθηκαν από αντίγραφα των παρασκευασμένων αρχικών δοντιών των κολοβωμάτων. Τα αντίγραφα αυτά κατασκευάστηκαν από ενισχυμένη ρητίνη πολυουρεθάνης. Η φυσική περιοδοντική ελαστικότητα προσομοιώθηκε με την επικάλυψη των ριζών αυτών των κολοβωμάτων με ένα ελαστικό υλικό λατέξ. Οι ρίζες με επικάλυψη λατέξ ενσωματώθηκαν σε μια βάση από ρητίνη πολυουρεθάνης που έφτανε έως και 3 mm κάτω από το όριο της παρασκευής. Κατασκευάστηκαν συνολικά 60 σκελετοί από μερικώς πυροσυσσωματωμένη ζirkονία. Οι σκελετοί κατασκευάστηκαν με επαναλαμβανόμενη αντιγραφή ενός κύριου σκελετού σε μια μονάδα μηχανών υποβοηθούμενων από υπολογιστή (CAM) με επακόλουθη όπτηση στο φούρνο του συστήματος. Οι διαστάσεις όλων των σκελετών ήταν πρακτικά ίδιες. Οι διατομές των συνδέσμων είχαν ελλειπτικό σχήμα, με εμβαδά (από εγγύς προς άπω) 12.5 mm², 15.6 mm² και 11.6 mm² αντίστοιχα. Πριν από την επικάλυψη, επιλέχθηκαν τυχαία 20 σκελετοί και έγινε μια τομή σχήματος U πλάτους 180 μm και βάθους 60 μm στην

επιφάνεια των ούλων του συνδέσμου μεταξύ των δοντιών 25 και 26 (η υποτιθέμενη θέση της υψηλότερης εφελκυστικής τάσης κατά τη φόρτιση).⁴⁸ [Εικόνα 127]

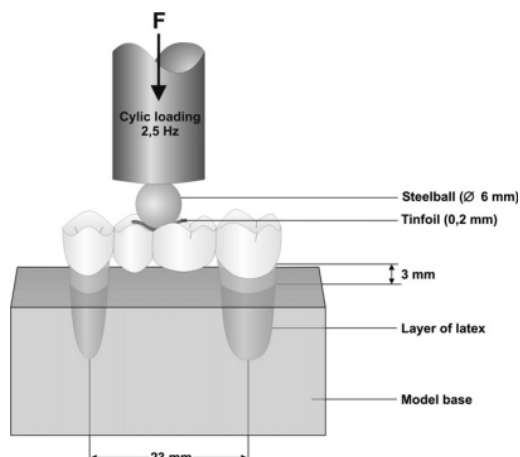


EIKONA 127: Εικόνα SEM της προκαταρκτικής βλάβης που δημιουργήθηκε στην ουλοδοντική εσοχή ενός σκελετού ζιρκονίας⁴⁸

Αυτό έγινε για να προσομοιωθεί πιθανή βλάβη στον πυρήνα κατά τη διαδικασία κατασκευής και για να ελεγχθεί η επίδραση στην ικανότητα ανάληψης φορτίου. Μετά την επικάλυψη, τα μη κατεστραμμένα δοκίμια τυχαιοποιήθηκαν επίσης και χωρίστηκαν σε ομοιογενείς ομάδες των 10 δοκιμίων η καθεμία, με αποτέλεσμα να προκύψουν συνολικά έξι ομάδες. Οι γέφυρες στερεώθηκαν πάνω στα κολοβώματα από ρητίνη πολυουρεθάνης με τη βοήθεια κονίας από υαλοϊονομερές. Με εξαίρεση δύο ομάδες (μη κατεστραμμένες/προκατεστραμμένες), οι γέφυρες υποβλήθηκαν σε θερμικό και μηχανικό κύκλο (TMC) κατά τη διάρκεια αποθήκευσης 200 ημερών σε απεσταγμένο νερό στους 36°C. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, εφαρμόστηκαν διαδοχικά 1×10^4 θερμικοί κύκλοι μεταξύ 5 και 55°C (χρόνος παραμονής 30 s σε κάθε θερμοκρασία) και μηχανική φόρτιση (συχνότητα φόρτισης 2,5 Hz) με ποικίλο αριθμό κύκλων (1×10^6 / 2×10^6) και ποικίλα ανώτερα όρια φόρτισης (100 N/200 N).⁴⁸ [Εικόνα 128-129]

Group	Predamage	Thermal cycles	Mechanical cycles	Upper load limit
Cer I	-	-	-	-
Cer II	+	-	-	-
Cer III	-	1×10^4	1×10^6	100 N
Cer IV	+	1×10^4	1×10^6	100 N
Cer V	-	1×10^4	2×10^6	100 N
Cer VI	-	1×10^4	1×10^6	200 N

EIKONA 128: Μεταβολές στις παραμέτρους κόπωσης και προκαταρκτική βλάβη⁴⁸



EIKONA 129: Σχηματική διάταξη κυκλικής φόρτισης⁴⁸

Μετά τη διαδικασία γήρανσης, τα δοκίμια φορτίστηκαν μέχρι θραύσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε σε μια μηχανή καθολικών δοκιμών με ταχύτητα εγκάρσιας κεφαλής 1 mm/min^{-1} με τη δύναμη να μεταφέρεται στην μασητική περιοχή του συνδέσμου μεταξύ των δοντιών 25 και 26 μέσω μιας σφαίρας καρβιδίου βολφραμίου (διάμετρος 6,0 mm) σε ένα ενδιάμεσο φύλλο κασσίτερου (πάχος 0,2 mm). Μια απότομη μείωση της δύναμης άνω των 15 N θεωρήθηκε ένδειξη αστοχίας και η μέγιστη δύναμη μέχρι το σημείο αυτό καταγράφηκε ως δύναμη κατά τη θραύση. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της δύναμης σε θραύση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ανάλυσης διακύμανσης μονής κατεύθυνσης (ANOVA) για την ανίχνευση της επιρροής της τεχνητής γήρανσης και ANOVA δύο παραγόντων για την ανίχνευση της επιρροής της προ-καταστροφής, με το επίπεδο σημαντικότητας να επιλέγεται στο 0,05. Πραγματοποιήθηκε άμεση σύγκριση των μέσων όρων των ομάδων με το post hoc Scheffe' test. Οι μηδενικές υποθέσεις ήταν ότι η φέρουσα ικανότητα δεν επηρεάζεται από την τεχνητή γήρανση και την προ-καταστροφή. Οι παράμετροι Weibull προσδιορίστηκαν για κάθε ομάδα δοκιμής με προσαρμογή μιας κατανομής Weibull στο αντίστοιχο σύνολο δεδομένων. Η παράμετρος F_0 (χαρακτηριστική δύναμη κατά την αστοχία) σχετίζεται με πιθανότητα αστοχίας 63,2%, ενώ το μέτρο Weibull, m , είναι ένα μέτρο της διασποράς της δύναμης κατά την αστοχία και της αξιοπιστίας του εξεταζόμενου υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή για το m , τόσο πιο απότομη είναι η μετάβαση από την επιβίωση στην αστοχία για την κατανομή

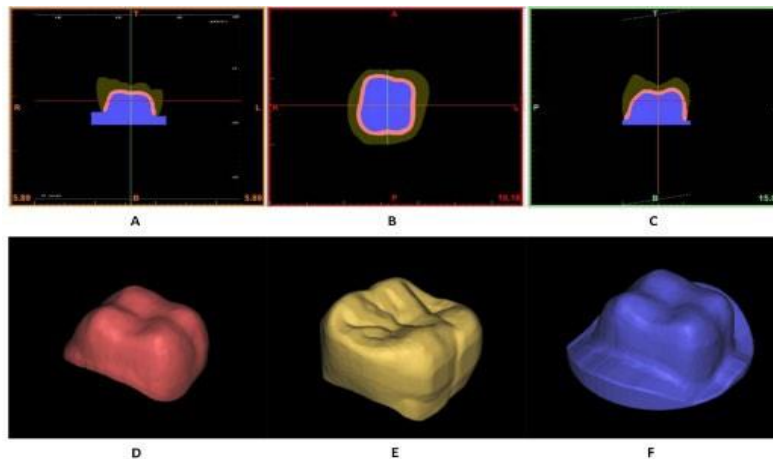
πιθανότητας έναντι της δύναμης κατά την αστοχία. Μία από τις εξεταζόμενες γέφυρες σαρώθηκε οπτικά πριν και μετά την επικάλυψη με την αρχή του τριγωνισμού. Με βάση τα πολυγωνικά πλέγματα που προέκυψαν, δημιουργήθηκαν δύο τρισδιάστατα μοντέλα όγκου με αντίστροφη μηχανική. Στη συνέχεια τα μοντέλα εισήχθησαν σε πρόγραμμα CAD. Με μια λειτουργία Boolean, ο σκελετός ζirkονίας αφαιρέθηκε εικονικά από τη γέφυρα με επικάλυψη, οπότε δημιουργήθηκε ένα ξεχωριστό μοντέλο του υλικού επικάλυψης. Σύμφωνα με το μοντέλο της in vitro μελέτης, τα δόντια του κολοβώματος, συμπεριλαμβανομένου του στρώματος κονίας και της ελαστικής στήριξης στο μπλοκ πολυουρεθάνης, σχεδιάστηκαν εικονικά μέσω του λογισμικού CAD. Στη συνέχεια, το μοντέλο μεταφέρθηκε σε ένα πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση τάσεων πεπερασμένων στοιχείων.⁴⁸

Οι Thompson και συν.(2010)⁷⁹ που με τη μελέτη τους είχαν σκοπό να μελετήσουν την ικανότητα των ενθέτων να αποτελέσουν στήριγμα για ακίνητες ολοκεραμικές προσθετικές αποκαταστάσεις, χρησιμοποίησαν τη γεωμετρία της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων η οποία βασίστηκε στην απεικόνιση με μικροαξονική τομογραφία (CT) μιας φυσικής τομής της κάτω γνάθου από το κάτω δεξιό οπίσθιο τμήμα όπου έλειπε ο πρώτος γομφίος. Η αξονική τομογραφία αποτύπωσε τις ανατομικές ακμές και αυτές ψηφιοποιήθηκαν για να αποτυπωθεί η γεωμετρία του φλοιώδους οστού, του κυτταρικού οστού και της οδοντίνης. Στη συνέχεια, η γεωμετρία (οστών και οδοντίνης) βελτιώθηκε. Οι γεωμετρίες εισήχθησαν στο Rhinoceros 3D v 4.0 και στη συνέχεια δημιουργήθηκε ο περιοδοντικός σύνδεσμος (0,3 mm) στις οδοντικές υποδοχές. Η γέφυρα δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τον εξιδανικευμένο σχεδιασμό ένθετου στοιχείου και το στήριγμα πλήρους στεφάνης με χρήση 1 mm παρειακά και γλωσσικά, και ελαφρώς στενότερα μεσοδόντια οριακά πλάτη. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων αναπτύχθηκε με το MSC Patran. Εισήχθησαν οι ελαστικοί συντελεστές και ο λόγος Poisson για το κεραμικό, το περιοδοντικό σύνδεσμο, την οδοντίνη, το φλοιώδες και το κυτταρικό οστό. Στο κέντρο του κολοβώματος του πρώτου γομφίου εφαρμόστηκε στατικό κανονικό φορτίο 200 N, που αντιστοιχεί σε χαλύβδινη σφαίρα περίπου 5 mm². Οι διεπιφάνειες γέφυρας-κολοβώματος δέθηκαν για να προσομοιωθεί η πλήρης

συγκόλληση με κονία. Οι άκρες του οστού της κάτω γνάθου στερεώθηκαν. Για το περιοδοντικό σύνδεσμο, τα κολοβώματα και τη γέφυρα θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικές, ομοιογενείς ιδιότητες υλικών. Για τις δομές του φλοιού και του κυτταρικού οστού εφαρμόστηκαν ετερογενείς ιδιότητες υλικών. Θεωρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας μάσησης ο περιοδοντικός σύνδεσμος φορτίζεται στην ελαστική του περιοχή και η συμπεριφορά του μπορεί να οριστεί περίπου γραμμικά. Οι 2 τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που προέκυψαν (ενθέματα και πλήρη κολοβώματα) αποτέλεσαν τη βάση για τη εμβιομηχανική ανάλυση. Τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν με τη χρήση τετραγωνικών τετραεδρικών στοιχείων 10 κόμβων με συνολικό μέγεθος στοιχείου 1 mm. Η προκύπτουσα γεωμετρία εισήχθη στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.6.1 για μετεπεξεργασία, με την ανάλυση να εμφανίζει τις κύριες τάσεις και τις τάσεις von Mises.⁷⁹

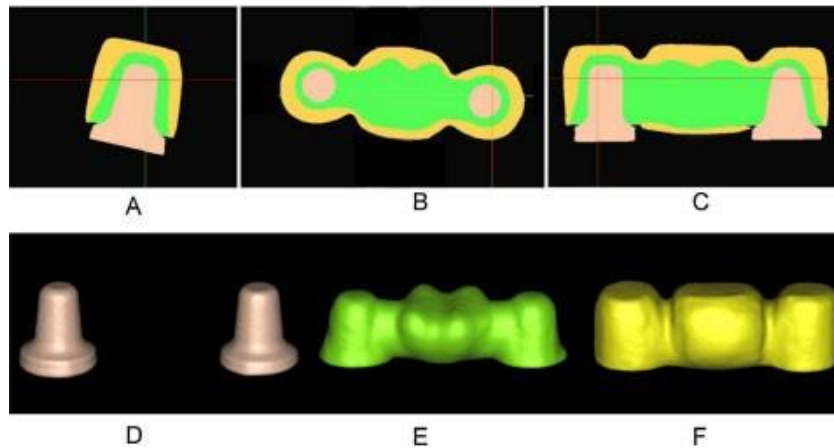
Οι Bona και συν. (2013)⁸⁰ για τη μελέτη τους που είχαν στόχο προσομοιώνοντας την κατανομή των τάσεων σε αποκαταστάσεις ολοκεραμικών στεφανών και γεφυρών υπό φόρτιση να περιγράψουν τη διαδοχική επεξεργασία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποίησαν σάρωση με τη χρήση μικρό-CT σαρωτή με κάμερα 10 megapixel. Για την παραγωγή του μοντέλου μίας μονάδας, σαρώθηκαν μια μονολιθική πορσελάνινη στεφάνη και ένας σκελετός από μια αριστερή στεφάνη άνω πρώτου γομφίου. Για την παραγωγή του μοντέλου της γέφυρας σαρώθηκαν χωριστά δύο μέρη: (1) μια μήτρα από ανοξείδωτο χάλυβα που προσομοιάζει τα παρασκευασμένα δόντια και (2) μία ολοκεραμική γέφυρα τριών μονάδων (διατομή συνδέσμου 9 mm²). Τόσο η στεφάνη όσο και η γέφυρα κατασκευάστηκαν από κεραμικό σκελετό με βάση τη ζirkονία μερικώς σταθεροποιημένη με ύτριο και από πορσελάνη. Οι προβολές των ακτίνων Χ ανακατασκευάστηκαν για να σχηματιστεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Οι τομογραφικές εικόνες των δομών δημιουργήθηκαν και επεξεργάστηκαν από ένα διαδραστικό σύστημα ελέγχου ιατρικών εικόνων. Το λογισμικό παρουσιάζει λειτουργίες τμηματοποίησης με βάση τα κατώτερα όρια πυκνότητας της εικόνας. Τα ψηφιακά μοντέλα του σκελετού και της επικάλυψης προέκυψαν με τη χρήση εργαλείων φωτεινότητας και αντίθεσης από απεικόνιση με

ακτίνες Χ. Το τρισδιάστατο αντικείμενο που αντιπροσωπεύει το σκελετό ζιρκονίας αφαιρέθηκε από το αντικείμενο της μονολιθικής πορσελάνινης στεφάνης για να ληφθεί ένα τέλεια προσαρμοσμένο τμήμα επικάλυψης. Η μάσκα της κύριας μήτρας δημιουργήθηκε με τη χρήση πράξεων Boolean προσθέτοντας δύο διαφορετικές μάσκες: τον εσωτερικό χώρο της στεφάνης (εργαλείο πλήρωσης κοιλότητας) και έναν κύλινδρο που σχεδιάστηκε στην κάτω επιφάνεια.⁸⁰ [Εικόνα 130]



ΕΙΚΟΝΑ 130: Εικόνες εγκάρσιας τομής των масκών από διαφορετικές οπτικές γωνίες (A-C). Δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα αντικείμενα για την αναπαράσταση του σκελετού (D), της επικάλυψης (E) και της μήτρας (F).⁸⁰

Τα αρχεία micro-CT που αντιστοιχούν στις μεταλλικές μήτρες και τη γέφυρα επεξεργάστηκαν χωριστά για να μειωθεί ο όγκος της χειροκίνητης εργασίας που απαιτείται για την κατασκευή τριών διαφορετικών масκών με το λογισμικό Mimics. Μια μάσκα των μητρών προέκυψε μέσω της προσαρμογής της φωτεινότητας και της αντίθεσης και δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο το οποίο μετατράπηκε σε αρχείο STL. Για τη γέφυρα χρησιμοποιήθηκε τμηματοποίηση βάσει κατώτερων ορίων πυκνότητας εικόνας διαφορετικών επιπέδων έντασης κλίμακας τιμών για τη δημιουργία δύο масκών, που αντιστοιχούσαν στο σκελετό και στο στρώμα επικάλυψης. Για το σκελετό και την επικάλυψη προέκυψαν τρισδιάστατα αντικείμενα. Το αρχείο STL της μεταλλικής μήτρας εισήχθη στο αρχείο της γέφυρας, δημιουργώντας ένα τελικό αρχείο τριών τμημάτων: μεταλλική μήτρα, σκελετός και επικάλυψη.⁸⁰ [Εικόνα 131]



ΕΙΚΟΝΑ 131: Εικόνες εγκάρσιας τομής μήτρας, σκελετού και μάσκας επικάλυψης από διαφορετικές οπτικές γωνίες (A-C) και τρισδιάστατα αντικείμενα που αναπαριστούν: (D) μεταλλικές μήτρες, (E) σκελετός και (F) επικάλυψη.⁸⁰

Οι μάσκες κάθε μέρους των μοντέλων μετατράπηκαν χωριστά σε αρχεία STL, τα οποία είναι ακατάλληλα για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων λόγω της ποσότητας και του σχήματος των τριγώνων. Έτσι, και για τα δύο μοντέλα (στεφάνη και γέφυρα), τα αρχεία των διαφορετικών μερών ενσωματώθηκαν σε συναρμολόγηση μη-μανδύα και επεξεργάστηκαν ταυτόχρονα. Τα εξαρτήματα ανακατασκευάστηκαν με μέγιστο γεωμετρικό σφάλμα 0,05%, διατηρώντας την αρχική γεωμετρία. Χρησιμοποιήθηκαν λειτουργίες περιτύλιξης και εξομάλυνσης για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων αιχμηρών ακμών. Η ποιότητα του πλέγματος καθορίστηκε με τον έλεγχο του μήκους των ακμών των τριγώνων, του λόγου μεταξύ ύψους και βάσης των τριγώνων και την αφαίρεση των αιχμηρών τριγώνων με τη χρήση φίλτρου τριγώνων, έτσι ώστε το αρχείο να μπορεί να εισαχθεί στο λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων χωρίς να δημιουργηθούν σφάλματα. Στη συνέχεια, τα αντικείμενα διαχωρίστηκαν σύμφωνα με τα αρχικά μέρη και δημιουργήθηκαν ογκομετρικά πλέγματα τα οποία εισήχθησαν από το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το τελικό μοντέλο αποτελούνταν από τετραεδρικά στοιχεία (συμβατά με τρισδιάστατη μοντελοποίηση) και τρία στρώματα: (1) μήτρα εποξειδικής ρητίνης, με ελαστική/πλαστική συμπεριφορά παρόμοια με την οδοντίνη- (2) πυρήνας ζirkονίας και (3) στρώμα πορσελάνης. Οι κόμβοι της κάτω επιφάνειας των πλεγμάτων των κολοβωμάτων ήταν περιορισμένοι (χωρίς μετατόπιση) στις τρεις χωρικές διαστάσεις. Οι διεπιφάνειες μεταξύ των πλεγμάτων

θεωρήθηκαν τέλεια συνδεδεμένες. Ένα αξονικό θλιπτικό φορτίο 100 N εφαρμόστηκε ομοιόμορφα σε 10 κόμβους (10 N ο καθένας) μιας περιοχής διαμέτρου 2 mm της ουλοδοντικής ακρολοφίας, προσομοιώνοντας την επαφή του αντίθετου δοντιού σε μια όψη φθοράς.⁸⁰ Το τελικό μοντέλο γέφυρας αποτελούνταν από τετραεδρικά στοιχεία και τρία στρώματα: (1) μεταλλικές μήτρες (ανοξειδωτος χάλυβας)- (2) κεραμικός σκελετός ζirkονίας σταθεροποιημένης με ύτριο (Y-TZP) και (3) στρώμα πορσελάνης (VM9). Δημιουργήθηκαν δύο διεπιφάνειες, μεταξύ των μεταλλικών μητρών και του σκελετού και μεταξύ του σκελετού και του στρώματος πορσελάνης. Το στρώμα κόνιας παραμελήθηκε. Οι κόμβοι στην κάτω επιφάνεια των μητρών ήταν σταθεροί προς όλες τις κατευθύνσεις- δεν επιτρεπόταν καμία περιστροφή ή μετατόπιση. Ένα συμπιεστικό φορτίο, κάθετο στον επιμήκη άξονα της αποκατάστασης, εφαρμόστηκε στο κέντρο της μασητικής επιφάνειας του ενδιάμεσου. Το φορτίο των 200 N κατανεμήθηκε ομοιόμορφα σε 20 κόμβους που βρίσκονταν σε κυκλική περιοχή διαμέτρου 3 mm. Για τη διευκόλυνση των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων έγιναν οι ακόλουθες εκτιμήσεις: (1) τα υλικά θεωρήθηκαν ισότροπα και ομογενή και ότι έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά- (2) δεν ελήφθησαν υπόψη οι επιδράσεις του περιοδοντικού συνδέσμου και του πολφικού θαλάμου- (3) το μέτρο ελαστικότητας (E)- και ο λόγος Poisson (ν) διατηρήθηκαν σταθερά. Οι κατανομές τάσεων από τις γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αξιολογήθηκαν σύμφωνα με τη θέση και το μέγεθος της μέγιστης πρώτης κύριας τάσης. Προκαθορισμένα σημεία επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση της διάστασης της στεφάνης και της γέφυρας και της διάστασης των μοντέλων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη μέτρηση των κατασκευών χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός μετρητής. Οι διαστάσεις των μοντέλων υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το εργαλείο μέτρησης του λογισμικού Mimics.⁸⁰ Η διαφορά μεταξύ της διάστασης της φυσικής δομής και του μοντέλου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στα προκαθορισμένα σημεία υπολογίστηκε για να προκύψει το μέγιστο σφάλμα διαστάσεων (%).⁸⁰

Για τη μελέτη των Lakshmi και συν.(2015)³⁸ που είχαν στόχο να αξιολογηθεί η κατανομή των τάσεων μεταξύ μονολιθικού διπυριτικού λιθίου και μονολιθικής ζirkονίας που συγκρατούνται με ένθετα από ακίνητες οδοντικές προθέσεις

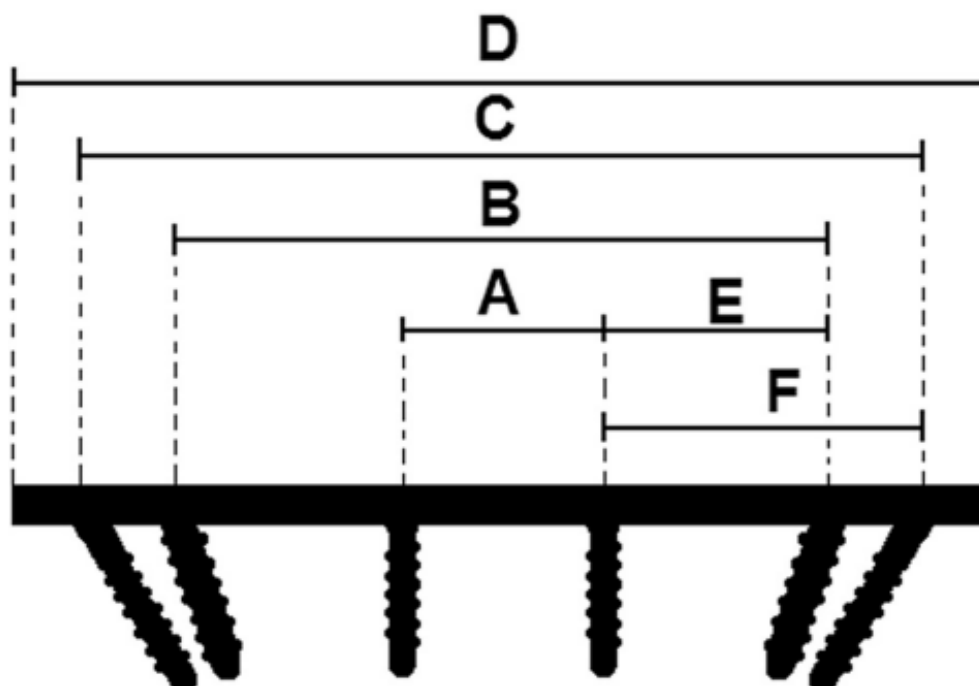
μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του συνδέσμου με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, κατασκευάστηκε κυλινδρική μήτρα ύψους περίπου 25 mm και πλάτους 16 mm. Στη μήτρα αναμίχθηκε αυτοπολυμεριζόμενη ρητίνη και τα παρασκευασμένα δόντια (45, 47) ενσωματώθηκαν μέχρι τη συμβολή κονίας και αδαμαντίνης, αφήνοντας ένα μέσο κενό περίπου 11 mm πάρειο-γλωσσικά και 10 mm εγγύς-άπω για τον πρώτο γομφίο. Με τη χρήση διαμαντένιας φρέζας επίπεδης απόληξης, παρασκευάστηκε ένα άπω ένθετο στο 45 και ένα εγγύς ένθετο στο 47. Έγινε βάθος κοιλότητας μεταξύ 1,5 και 2 mm, πλάτος κοιλότητας περίπου 2 mm. Η παρασκευή διασταυρώθηκε με τη χρήση δείκτη αποτυπώματος που ελήφθη πριν από την παρασκευή. Έγιναν αποτυπώματα και στάλθηκαν στο εργαστήριο για την κατασκευή προσθετικής εργασίας τόσο για μονολιθικό ένθετο από ζirkόνιο όσο και για ένθετο από διπυριτικό λίθιο. Το σκαναρισμένο μοντέλο παρατηρήθηκε ως προς τις διαστάσεις και τον δομικό σχηματισμό μέσω του οπτικού συγκριτή (DV 114®, Deltronic Optical Comparator, ΗΠΑ). Το μοντέλο του μεμονωμένου δοντιού προσομοίωσε τον δεύτερο προγόμφιο και τον δεύτερο γομφίο. Για λόγους απλότητας, το πάχος κονίας δεν συμπεριλήφθηκε στα μοντέλα. Όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα θεωρήθηκαν ισότροπα, ομοιογενή και γραμμικά ελαστικά. Τα τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την ανάλυση. Τα μοντέλα αυτά ήταν δικτυωμένα με τετραγωνικά τετραεδρικά στοιχεία 10 κόμβων. Στην παρούσα μελέτη, το ενδιαμέσο και τα κολοβώματα θεωρήθηκε ότι υποβάλλονται σε κατακόρυφο φορτίο 500 N, κατευθυνόμενο γλωσσικά, το οποίο αντιστοιχεί σε χαλύβδινη σφαίρα περίπου 5 mm². Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, η ανάλυση κατανομής των τάσεων μπορεί να καταγραφεί με τα κριτήρια von Mises ή τη μέγιστη κύρια τάση. Η ανάλυση τάσεων του von Mises δεν διαθέτει κατάλληλο κριτήριο αστοχίας για εύθραυστα υλικά. Ως εκ τούτου, μπορεί να υιοθετηθεί η μέγιστη κύρια τάση για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η προκύπτουσα γεωμετρία εισήχθη στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων RADIOSS® (Altair Engineering) για μετεπεξεργασία, με την ανάλυση να εμφανίζει τις κύριες τάσεις και τις τάσεις von Mises. ³⁸

Για τη μελέτη των Oyar και συν.(2021)⁸¹ που χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να αξιολογήσουν την κατανομή των τάσεων στον

οστίτη ιστό, τα εμφυτεύματα και το προσθετικό σκελετό από ζirkονία που επικαλύπτεται με υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου μιας αποκατάστασης που στηρίζεται μόνο σε τέσσερα εμφυτεύματα χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά σχέδια, συμπεριλαμβανομένων 2 διαφορετικών άπω κλίσεων (15 και 30 μοίρες) και 2 μηκών προβόλου (5 και 9 mm), κατασκευάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα με τη χρήση ενός προγράμματος λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Ελήφθησαν γραπτές συγκαταθέσεις μετά από ενημέρωση από τον ασθενή, ελήφθη έγκριση της επιτροπής δεοντολογίας από το Πανεπιστήμιο Afyon Kocatepe για τη μελέτη , και πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις με υπολογιστική τομογραφία. Μοντελοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σχέδια για αποκαταστάσεις που στηρίζονται σε τέσσερα εμφυτεύματα:

- μοντέλο 15-5: εμφύτευμα με άπω κλίση 15 μοιρών, πρόβολο 5 mm-
- μοντέλο 15-9: εμφύτευμα με άπω κλίση 15 μοιρών, πρόβολο 9 mm-
- μοντέλο 30-5: εμφύτευμα με άπω κλίση 30 μοιρών, πρόβολο 5 mm-
- μοντέλο 30-9: εμφύτευμα με άπω κλίση 30 μοιρών, πρόβολο 9 mm.

Τα 4 μοντέλα σχεδιάστηκαν με υπερκατασκευές που αποτελούνταν από έναν μονολιθικό κεραμικό πυρήνα ζirkονίας και μία υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου και εμφυτεύματα κράματος τιτανίου (NobelSpeedy Groovy, Nobel Biocare). Οι αποστάσεις μεταξύ των εμφυτευμάτων φαίνονται στην [\[Εικόνα 132\]](#).⁸¹



EIKONA 132: (A), απόσταση μεταξύ πρόσθιων εμφυτευμάτων 13,6 mm (B), απόσταση μεταξύ οπίσθιων εμφυτευμάτων 9 mm -μοντέλα προβόλου 40 mm (C), απόσταση μεταξύ οπίσθιων εμφυτευμάτων 5 mm -μοντέλα προβόλου 40,6 mm (D), μήκος τόξου 78 mm (E), απόσταση μεταξύ πρόσθιων και οπίσθιων εμφυτευμάτων 9 mm-μοντέλα προβόλου 19,6 mm (F), απόσταση μεταξύ πρόσθιων και οπίσθιων εμφυτευμάτων 5 mm-μοντέλα προβόλου 24,5 mm.⁸¹

Οι διαστάσεις εγγύς-άπω, πάρειο-γλωσσικά και το ύψος συνδέσμου ήταν 2 mm, 3 mm και 4 mm, αντίστοιχα. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο κατασκευάστηκε με τη χρήση ενός προγράμματος λογισμικού (Mesh VR Studio, Virtual Grid Inc). Στην παρούσα μελέτη, το κολόβωμα και το εμφύτευμα έγιναν δεκτά ως σύνολο. Η οστεοενσωμάτωση μεταξύ του εμφυτεύματος και του οστού θεωρήθηκε 100%. Τα υλικά σε όλα τα μοντέλα έγιναν δεκτά ως γραμμικά, ομογενή και ισότροπα. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Mesh VR Studio και του Algor Fempro (ALGOR, Inc.). Ένα στατικό φορτίο εφαρμόστηκε από τα δεξιά υπό γωνία 45 μοιρών και κατανέμεται ως εξής:

- κορυφή ακρολοφίας κυνόδοντα, 100 N-
- κορυφή παρειακής ακρολοφίας πρώτου προγομφίου, 150 N-
- κορυφή παρειακής ακρολοφίας δεύτερου προγομφίου, 150 N-

- κορυφή μεσοπαρειακής και διαπαρειακής ακρολοφίας πρώτου γομφίου, 200 N. ⁸¹

Τα αποτελέσματα των *in vitro* ερευνών που έγιναν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

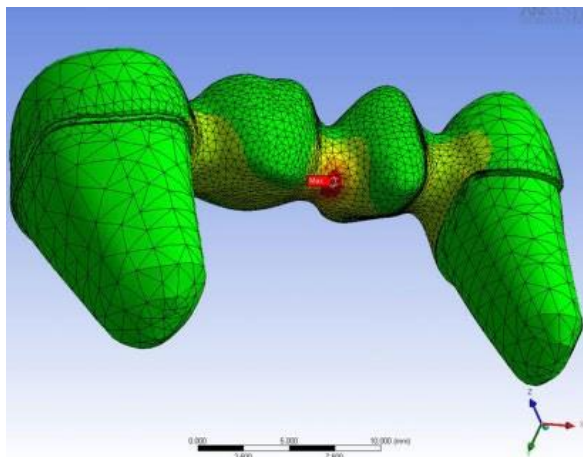
Από την μελέτη των Kohorst και συν(2008) ⁴⁸ που είχαν ως στόχο να ελεγχθεί η υπόθεση ότι η *in vitro* φέρουσα ικανότητα μιας οπίσθιας οδοντικής γέφυρας από ζirkονία μειώνεται λόγω γήρανσης σε τεχνητό στοματικό περιβάλλον, όλες οι γέφυρες που δοκιμάστηκαν επέζησαν από θερμικές και μηχανικές ανακυκλώσεις στο τεχνητό στοματικό περιβάλλον. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών φέρουσας ικανότητας. Μετά την εκπλήρωση του κριτηρίου αστοχίας (πτώση φορτίου 15 N), η οπτική επιθεώρηση αποκάλυψε ότι 57 από τις 60 γέφυρες (95%) είχαν αστοχήσει με αιφνίδια μαζική θραύση του σκελετού ζirkονίας. Δύο γέφυρες εμφάνισαν ρωγμές Hertzian κάτω από τον ενθέτη και μία γέφυρα εκτεταμένη αποκόλληση του κεραμικού επικάλυψης πριν από τη μαζική θραύση σε υψηλότερα επίπεδα δύναμης. Η τεχνητή γήρανση με θερμική και μηχανική ανακύκλωση αποδείχθηκε ότι επηρέασε σημαντικά την ικανότητα ανάληψης φορτίου τόσο των μη κατεστραμμένων όσο και των προ-καταστραμμένων γεφυρών από ζirkονία ($p < 0,001$). Σε σύγκριση με τις ομάδες ελέγχου, Cer I (1525 N) και Cer II (1335 N), τα γερασμένα δοκίμια παρουσίασαν ευρεία μείωση της μέσης δύναμης κατά τη θραύση. Ωστόσο, η μεταβολή των παραμέτρων μηχανικής ανακύκλωσης (αριθμός κύκλων/άνω όριο φορτίου) δεν εμφάνισε σημαντική επίδραση στην ικανότητα ανάληψης φορτίου. Οι μέσοι όροι ήταν 904 N (Cer III), 924 N (Cer V) και 952 N (Cer VI). Επιπλέον, η επίδραση της μηχανικής προκατάστασης δεν αποδείχθηκε στατιστικά σημαντική ($p = 0,213$) ούτε για τα μη παλαιωμένα (Cer II/1335 N) ούτε για τα παλαιωμένα (Cer IV/921 N) δοκίμια. Επομένως, η πρώτη διατυπωμένη υπόθεση μπορούσε να γίνει αποδεκτή, ενώ οι άλλες έπρεπε να απορριφθούν. Όπως προκύπτει από τις ιδιαιτερότητες της στατιστικής Weibull, οι χαρακτηριστικές δυνάμεις Weibull ήταν περίπου 6-8% υψηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες δυνάμεις κατά τη θραύση και παρουσίαζαν τις ίδιες τάσεις. Μεγαλύτερος αριθμός μηχανικών κύκλων συνδέθηκε με τη στατιστικά μη σημαντική

αύξηση του συντελεστή Weibull από 7,2 (Cer I) σε 8,0 (Cer III) σε 8,6 (Cer V). Ωστόσο, η αύξηση του ανώτερου ορίου φόρτισης δεν είχε το ίδιο αποτέλεσμα, με συντελεστή Weibull 7,2 (Cer VI), όπως και στην ομάδα ελέγχου (Cer I). Η μηχανική προκαταστροφή είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή Weibull m . Αυτό μπορούσε να παρατηρηθεί τόσο για τα μη παλαιωμένα (μείωση από 7,2 σε 5,4) όσο και για τα παλαιωμένα (μείωση από 8,0 σε 6,2) δοκίμια. ⁴⁸ [Εικόνα 133]

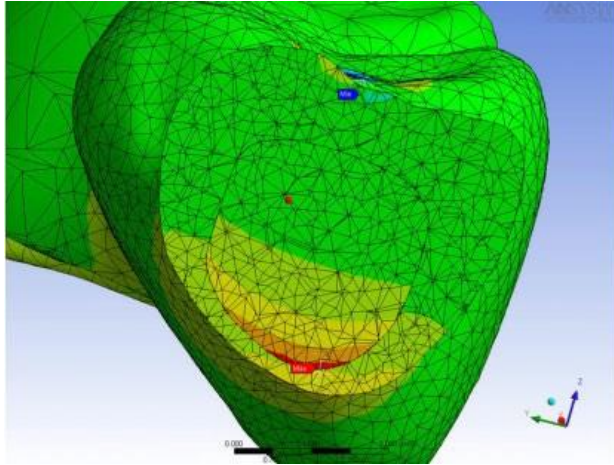
Group	Load at fracture (N)	F_0 (N)	95% confidence interval		m	95% confidence interval	
			Lower limit	Upper limit		Lower limit	Upper limit
Cer I	1525.0 (76.5)	1625.8	1580.3	1671.4	7.2	6.1	8.4
Cer II	1334.7 (89.4)	1445.9	1391.4	1500.3	5.4	4.6	6.3
Cer III	903.7 (40.8)	958.6	927.8	989.3	8.0	6.4	9.7
Cer IV	921.1 (55.6)	990.6	955.5	1025.8	6.2	5.1	7.2
Cer V	923.5 (40.3)	976.3	948.5	1004.1	8.6	6.9	10.3
Cer VI	952.4 (51.4)	1015.8	957.4	1074.1	7.2	4.7	9.8

ΕΙΚΟΝΑ 133: Μέση δύναμη κατά τη θραύση (SD) και παράμετροι Weibull F_0 και m , μαζί με τα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης τους⁴⁸

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποκάλυψε ότι η θέση των υψηλότερων εφελκυστικών τάσεων εντοπίζεται στο σκελετό ζirkονίας κοντά στην επιφάνειά του, στο ουλικό χείλος του συνδέσμου μεταξύ προγομφίου και γομφίου. [Εικόνα 134-135] ⁴⁸



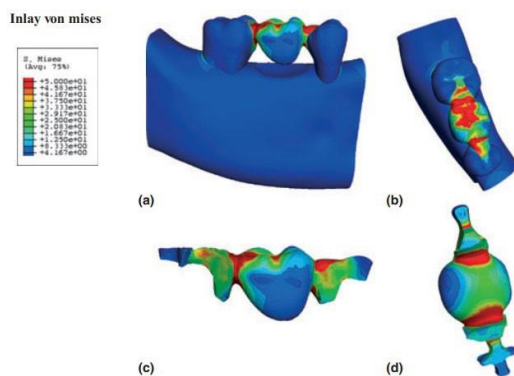
ΕΙΚΟΝΑ 134: Κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του σκελετού κατά τη διάρκεια της μασητικής φόρτισης σύμφωνα με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Η υψηλότερη εφελκυστική τάση εμφανίστηκε εντός του σκελετού στην περιοχή των ούλων του συνδέσμου. ⁴⁸



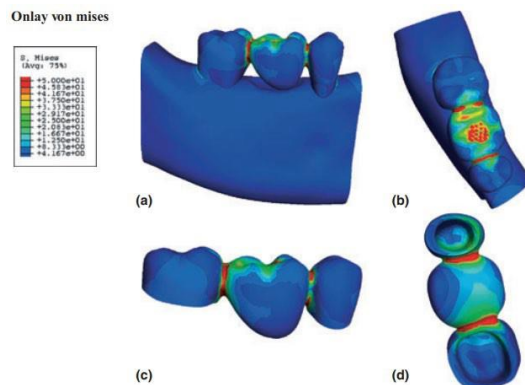
ΕΙΚΟΝΑ 135: Εμβαδόν διατομής του μοντέλου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Υψηλότερη εφελκυστική τάση εντός του σκελετού ζιρκονίας στη μετάβαση σε κεραμικό επικάλυψης.

48

Από τη μελέτη των Thompson και συν.(2010)⁷⁹ που με τη μελέτη τους είχαν σκοπό να μελετήσουν την ικανότητα των ενθέτων να αποτελέσουν στήριγμα για ακίνητες ολοκεραμικές προσθετικές αποκαταστάσεις και χρησιμοποίησαν τη γεωμετρία της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων η οποία βασίστηκε στην απεικόνιση με μικροαξονική τομογραφία (CT) μιας φυσικής τομής της κάτω γνάθου από το κάτω δεξιό οπίσθιο τμήμα όπου έλειπε ο πρώτος γομφίος ,στις [Εικόνες 135-136] απεικονίζονται τα περιγράμματα των τάσεων που προκύπτουν κατά von Mises (επίσης γνωστά ως θεωρία της ενέργειας παραμόρφωσης).⁷⁹

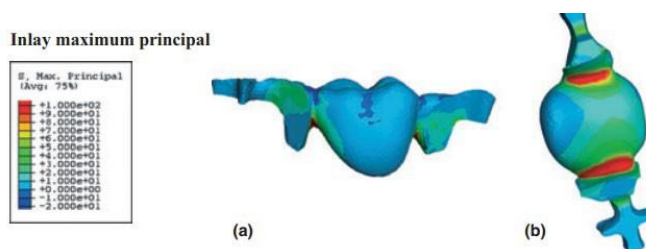


ΕΙΚΟΝΑ 135: τα περιγράμματα των τάσεων που προκύπτουν κατά von Mises για γέφυρες στηριζόμενες σε ενθέματα⁷⁹

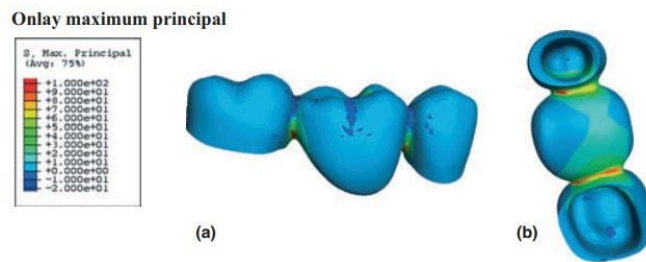


ΕΙΚΟΝΑ 136: τα περιγράμματα των τάσεων που προκύπτουν κατά von Mises για γέφυρες στηριζόμενες σε πλήρη κολοβωμάτα⁷⁹

Αυτά δείχνουν σαφώς ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις τάσεων υπάρχουν κοντά στις περιοχές των μεσοδόντιων τριγώνων μεταξύ του ενθέτου και του γεφυρώματος και στο σημείο επαφής με τη φόρτιση, με μέγιστο τα 209 MPa στο μοντέλο του ενθέτου και τα 174 MPa στο μοντέλο της στεφάνης. Η παραγωγή τάσεων Von Mises δεν ορίζει αυτές τις τάσεις ως εφελκυστικές (αρνητικές) ή θλιπτικές (θετικές), αλλά περιγράφει μόνο το μέγεθός τους. Για να προσδιοριστεί αν οι τάσεις είναι εφελκυστικές ή θλιπτικές, απαιτείται εξέταση των τιμών της κύριας τάσης του αντικειμένου. Αξιοσημείωτος είναι επίσης ο αυξημένος βαθμός τάσης σε όλο το σώμα του ενθέτου (όπως επισημαίνεται από τα θερμά σημεία), ιδίως στη γωνία της αξονικής γραμμής του σε αντίθεση με το σώμα της στεφάνης.⁷⁹ Η **Εικόνα 136** και **137** αποκαλύπτει τα προκύπτοντα περιγράμματα της μέγιστης κύριας τάσης της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.



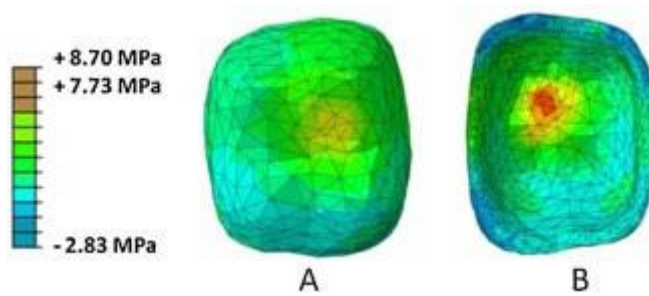
ΕΙΚΟΝΑ 136: Περιγράμματα μέγιστης κύριας τάσης για γέφυρες στηριζόμενες σε ενθέματα⁷⁹



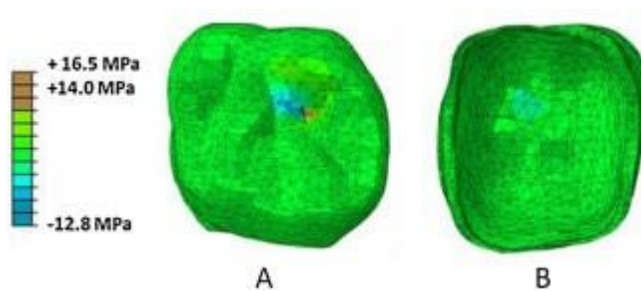
ΕΙΚΟΝΑ 137: Περιγράμματα μέγιστης κύριας τάσης για γέφυρες στηριζόμενες σε πλήρη κολοβώματα⁷⁹

Οι υψηλές εφελκυστικές τάσεις είναι εμφανείς στην ουλική πλευρά των συνδέσμων με μέγιστο τα 198 MPa στη γέφυρα με ένθετο και τα 177 MPa στη γέφυρα με πλήρη στεφάνη. Οι υψηλές θλιπτικές τάσεις είναι εμφανείς στην ουλική πλευρά των συνδέσμων με μέγιστο τα 177 MPa στη γέφυρα με ένθετο και τα 128 MPa στη γέφυρα με πλήρη στεφάνη.⁷⁹

Από τη μελέτη των Βονα και συν.(2013)⁸⁰ που είχαν στόχο προσομοιώνοντας την κατανομή των τάσεων σε αποκαταστάσεις ολοκεραμικών στεφανών και γεφυρών υπό φόρτιση να περιγράψουν τη διαδοχική επεξεργασία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, το τρισδιάστατο μοντέλο έδειξε μεγάλη φυσική ομοιότητα με τη δομή της στεφάνης και της γέφυρας. Οι συγκριτικές μετρήσεις έδειξαν ότι το σφάλμα διαστάσεων αυτού του μοντέλου με βάση τη μικρο-CT και την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δεν ξεπέρασε το 1,64%. Η χρήση της μη πολλαπλής συναρμολόγησης εξασφάλισε την ταύτιση των επιφανειών και τη σύμπτωση των κόμβων μεταξύ των διαφόρων τμημάτων. Για το μοντέλο της στεφάνης, οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώθηκαν κυρίως στην επιφάνεια της ενσφήνωσης (εσωτερική επιφάνεια) του πυρήνα, στην περιοχή που βρίσκεται ακριβώς απέναντι από τη θέση φόρτισης, και στην εξωτερική επιφάνεια της επικάλυψης, κοντά στην περιοχή φόρτισης. Η κατανομή των τάσεων στη στεφάνη μπορεί να παρατηρηθεί στις εικόνες. [Εικόνα 138-139]

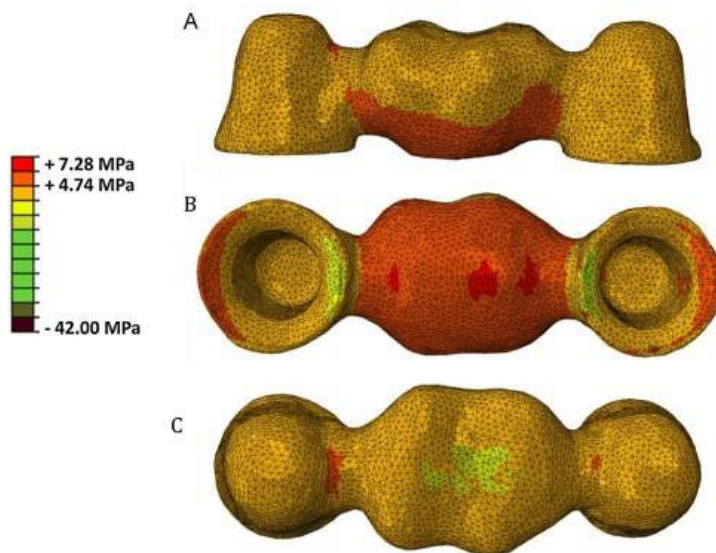


ΕΙΚΟΝΑ 138: Κατανομή τάσεων στον πυρήνα (A) από πάνω (B) εσωτερικά⁸⁰

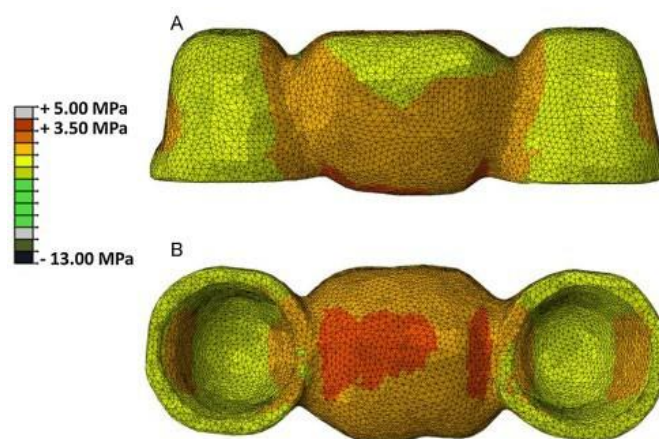


ΕΙΚΟΝΑ 139: Κατανομή τάσεων στην επικάλυψη (A) από πάνω (B) εσωτερικά⁸⁰

Για τη γέφυρα, οι υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις εντοπίστηκαν στην αυχενική περιοχή των συνδέσμων και του ενδιαμέσου εντός του στρώματος του σκελετού. Εφελκυστικές τάσεις μικρότερου μεγέθους εντοπίστηκαν επίσης στα αυχενικά όρια και στην μασητική επιφάνεια των συνδέσμων. [Εικόνα 140] Παρόμοια κατανομή τάσεων παρατηρήθηκε εντός της στρώσης πορσελάνης. ⁸⁰ [Εικόνα 140-141]



ΕΙΚΟΝΑ 140: κατανομή τάσεων στο σκελετό της γέφυρας (A) πλάγια (B) αυχενικά (C) μασητικά⁸⁰

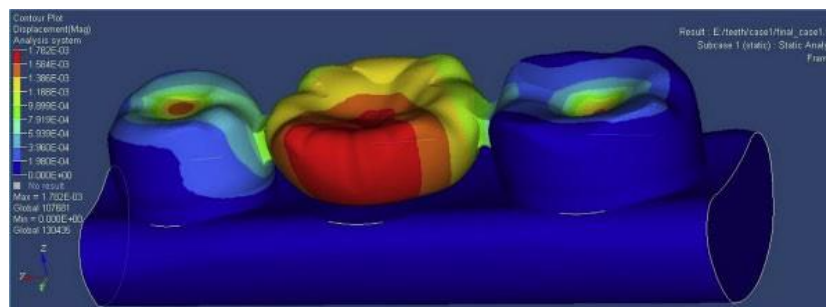


ΕΙΚΟΝΑ 141: κατανομή τάσεων στην επικάλυψη πορσελάνης της γέφυρας (A) πλάγια (B) αυχενικά⁸⁰

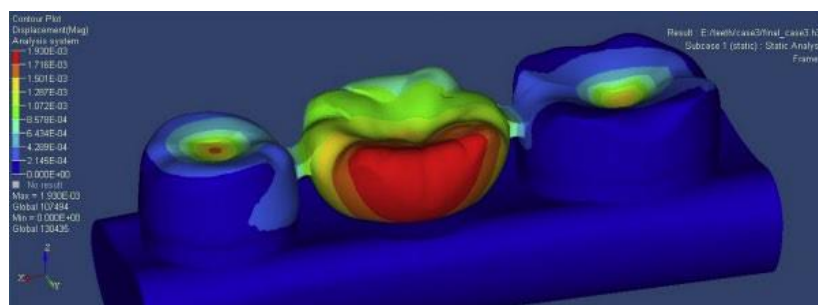
Μπορούν να δημιουργηθούν ανατομικά ακριβή τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μιας οδοντικής στεφάνης και μιας γέφυρας τριών τεμαχίων συνδυάζοντας τη σάρωση μικρο-CT και τα διαδραστικά εργαλεία του λογισμικού Mimics. Στη στεφάνη παρατηρήθηκαν εφελκυστικές τάσεις στην εγγύς περιοχή φόρτισης της επικάλυψης και στην εσωτερική επιφάνεια του πυρήνα. Επιπλέον, για το εφαρμοζόμενο φορτίο, η υψηλότερη συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στη

γέφυρα εντοπίστηκε στο υλικό του σκελετού, στην αυχενική περιοχή των συνδέσμων και του ενδιαμέσου.⁸⁰

Από τη μελέτη των Lakshmi και συν.(2015)³⁸ που είχαν στόχο να αξιολογηθεί η κατανομή των τάσεων μεταξύ μονολιθικού διπυριτικού λιθίου και μονολιθικής ζirkονίας που συγκρατούνται με ένθετα από ακίνητες οδοντικές προθέσεις μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του συνδέσμου με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στις [Εικόνες 142](#) και [143](#) παρουσιάζονται οι κύριες τάσεις του διπυριτικού λιθίου όταν το φορτίο είναι περίπου 500 N. Μπορούν να απεικονιστούν με σαφήνεια οι διαφορές στην τάση μεταξύ του συνδέσμου 9 mm² και του συνδέσμου 16 mm².

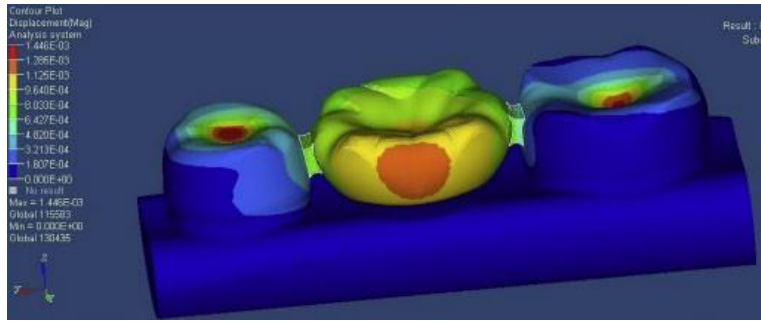


ΕΙΚΟΝΑ 142: κύριες τάσεις του διπυριτικού λιθίου-σύνδεσμος 9 mm²³⁸

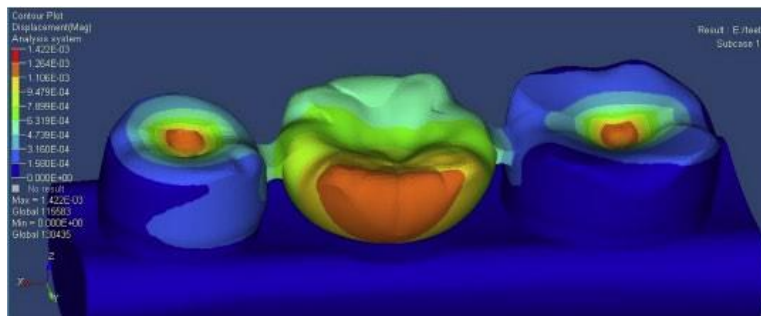


ΕΙΚΟΝΑ 143: κύριες τάσεις του διπυριτικού λιθίου-σύνδεσμος 16 mm²³⁸

Οι [\[Εικόνα 144\]](#) και [\[Εικόνα 145\]](#) αποκαλύπτουν τις κύριες τάσεις του ζirkονίου, οι οποίες επίσης μειώνονται με την αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου.



ΕΙΚΟΝΑ 144: κύριες τάσεις του ζιρκονίου-σύνδεσμος 9 mm² 38

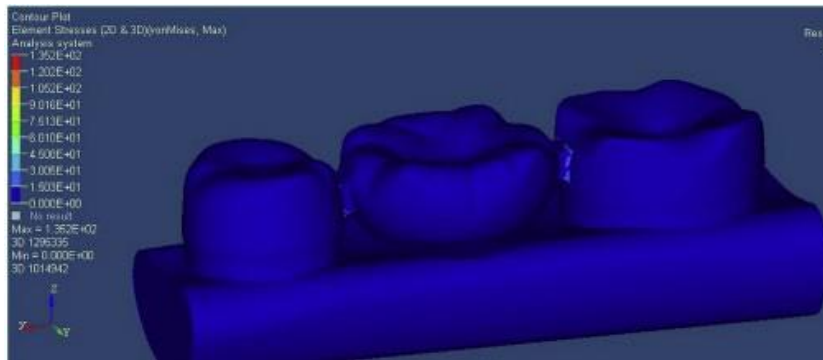


ΕΙΚΟΝΑ 145: κύριες τάσεις του ζιρκονίου-σύνδεσμος 16 mm² 38

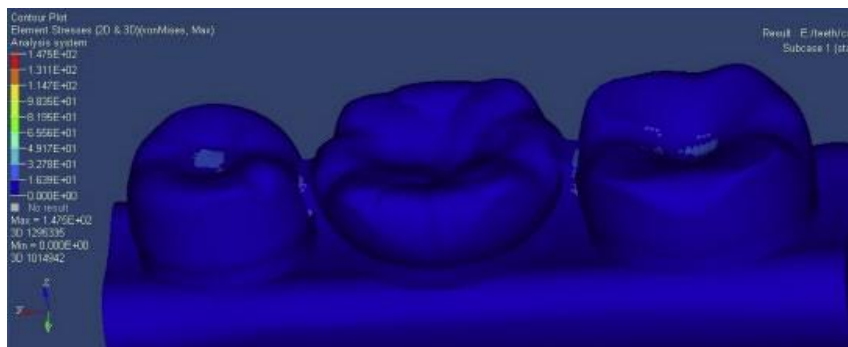
Στις [Εικόνα 146-149] απεικονίζονται τα περιγράμματα των τάσεων που προκύπτουν κατά von Mises (γνωστά και ως θεωρία της ενέργειας παραμόρφωσης). Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι η τάση Von Mises είναι ένα μέτρο του συνδυασμένου μεγέθους όλων των συνιστωσών της τάσης (εφελκυσμός, συμπίεση και διάτμηση) σε οποιοδήποτε σημείο, ενώ το όριο διαρροής είναι το μέγιστο ποσό της τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα αντικείμενο πριν αυτό παραμορφωθεί μόνιμα ή σπάσει. Σύμφωνα με τη θεωρία των τάσεων von Mises, το υλικό υποχωρεί όταν επιτευχθεί μια κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης. Συχνά αποκαλείται θεωρία Maxwell-Huber-Hencky-von Mises, θεωρία της ενέργειας παραμόρφωσης, θεωρία της διατμητικής ενέργειας ή θεωρία της οκταεδρικής διατμητικής τάσης. Βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Αυτά δείχνουν σαφώς ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις τάσεων υπάρχουν κοντά στις περιοχές των μεσοδόντιων τριγώνων μεταξύ του ενθέτου και του γεφυρώματος και στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι κορυφές τάσεων von Mises και μετατόπισης συγκεντρώνονται

γύρω από τις περιοχές σύνδεσης.

38

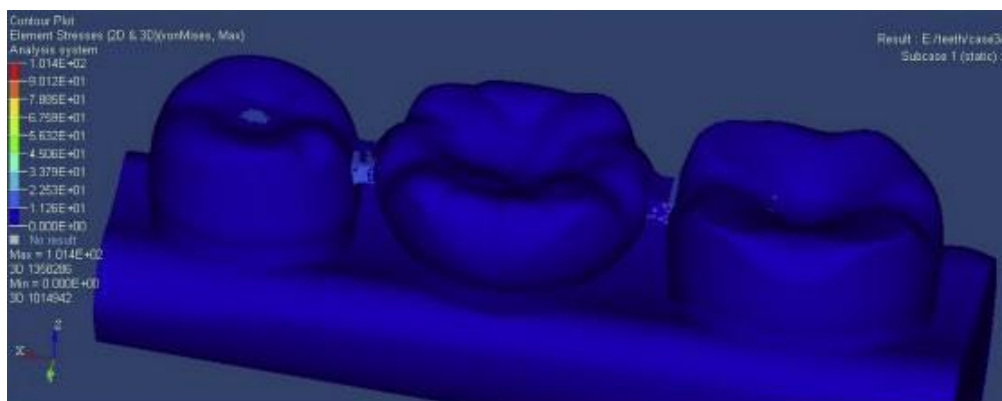


ΕΙΚΟΝΑ 146: Περιγράμματα τάσεων von Mises για διπυρρικό λίθο- σύνδεσμος 9 mm² 38

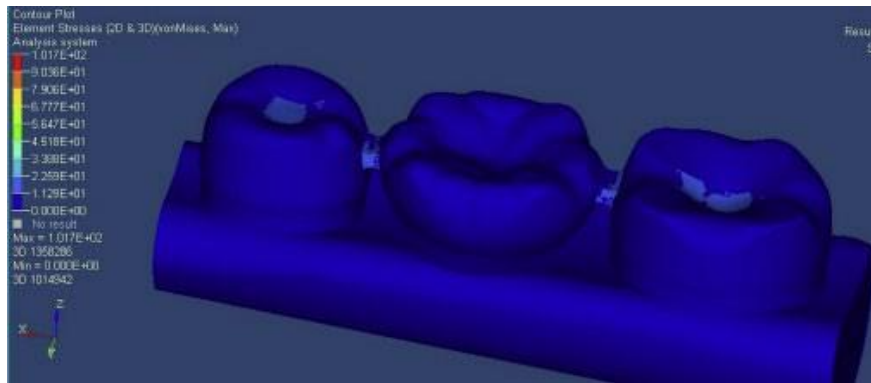


ΕΙΚΟΝΑ 147: Περιγράμματα τάσεων von Mises για ζιρκόνιο- σύνδεσμος 9 mm²

38

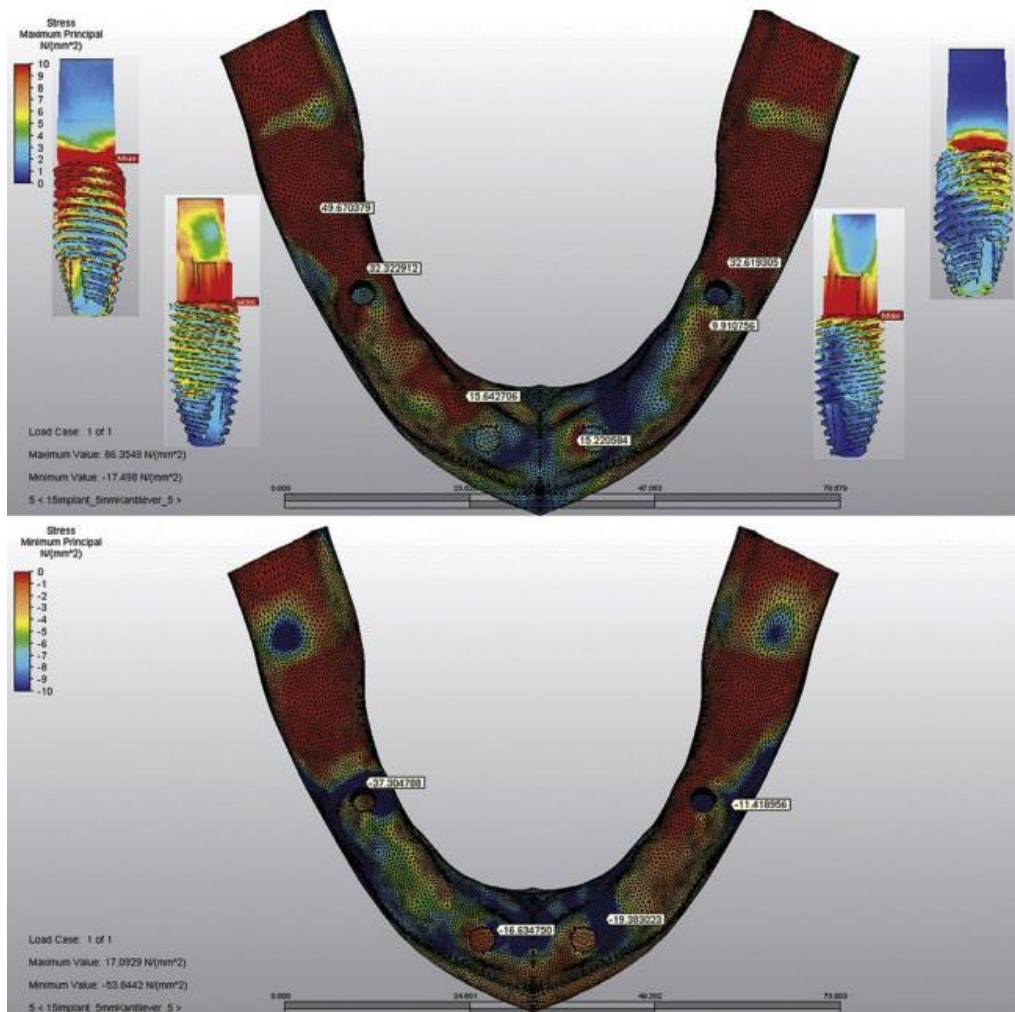


ΕΙΚΟΝΑ 148: Περιγράμματα τάσεων von Mises για διπυρρικό λίθο- σύνδεσμος 16 mm² 38

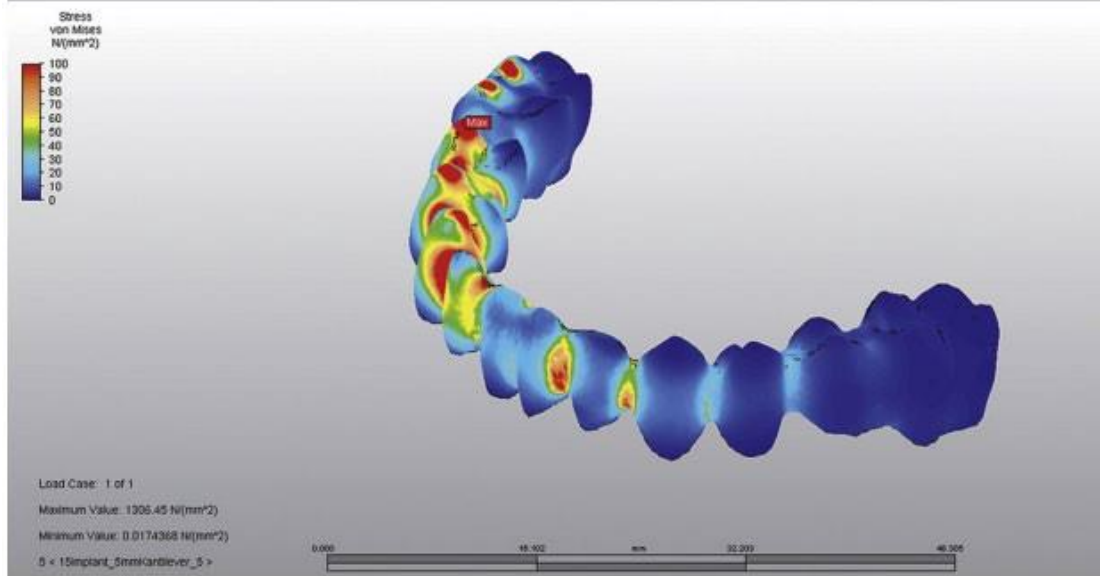
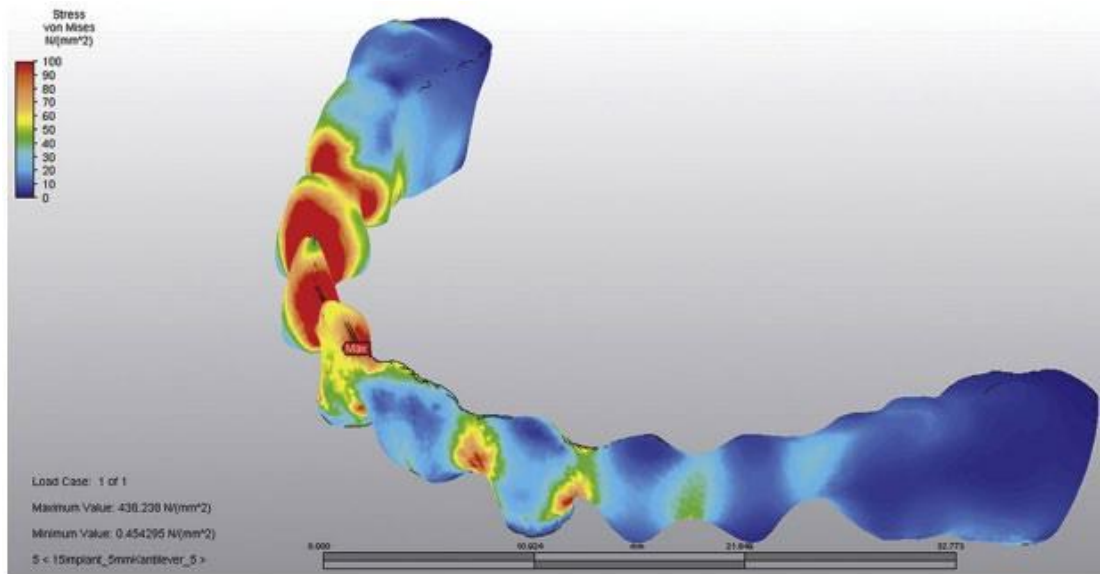


ΕΙΚΟΝΑ 149: Περιγράμματα τάσεων von Mises για ζirkόνιο- σύνδεσμος 16 mm² ³⁸

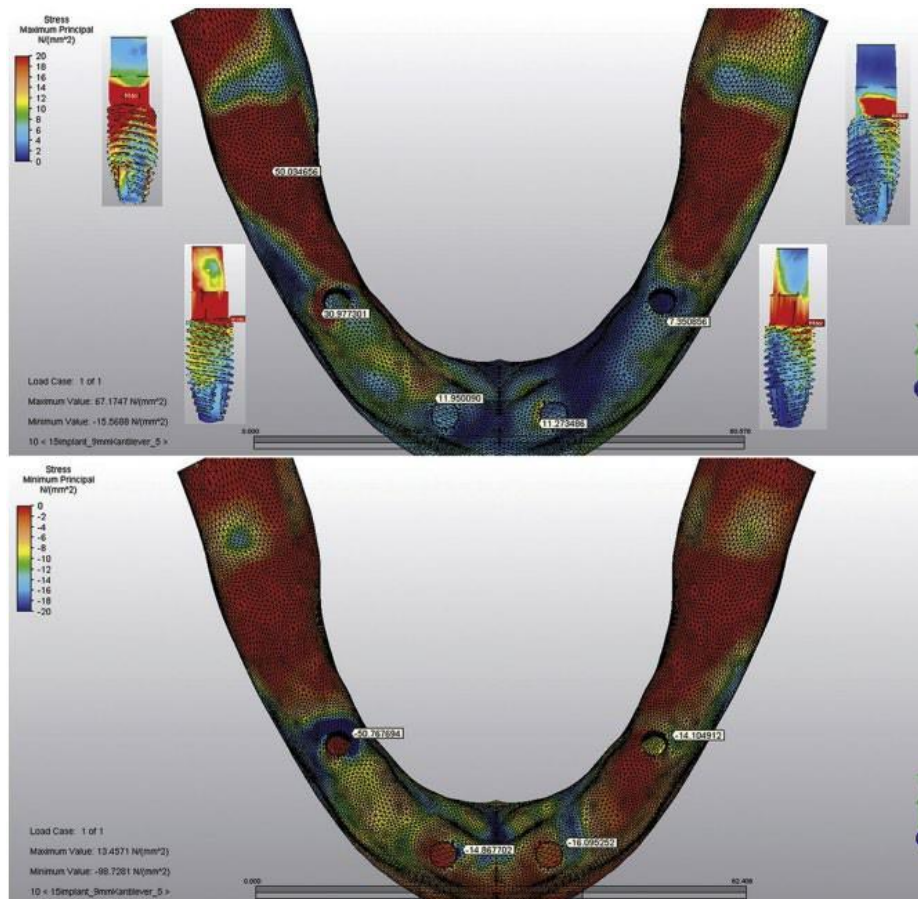
Από τη μελέτη των Oyar και συν.(2021) ⁸¹ που χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να αξιολογήσουν την κατανομή των τάσεων στον οστική ιστό, τα εμφυτεύματα και το προσθετικό σκελετό από ζirkονία που επικαλύπτεται με υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου μιας αποκατάστασης που στηρίζεται μόνο σε τέσσερα εμφυτεύματα χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά σχέδια, συμπεριλαμβανομένων 2 διαφορετικών άπω κλίσεων (15 και 30 μοίρες) και 2 μηκών προβόλου (5 και 9 mm) η κατανομή των τάσεων για τα 4 σχέδια παρουσιάζεται παρακάτω. [Εικόνα 150-157] ⁸¹



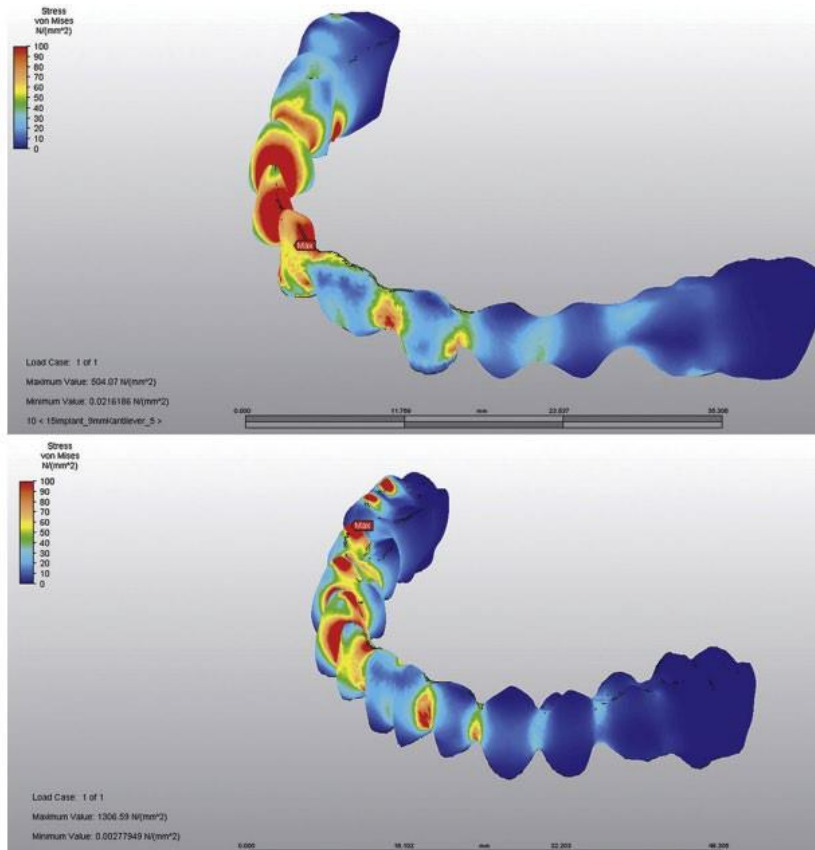
EΙΚΟΝΑ 150: Κατανομή των MaxPS και MinPS στο φλοιώδες οστό και κατανομή των vMS στα εμφυτεύματα (μοντέλα 15-5) ⁸¹



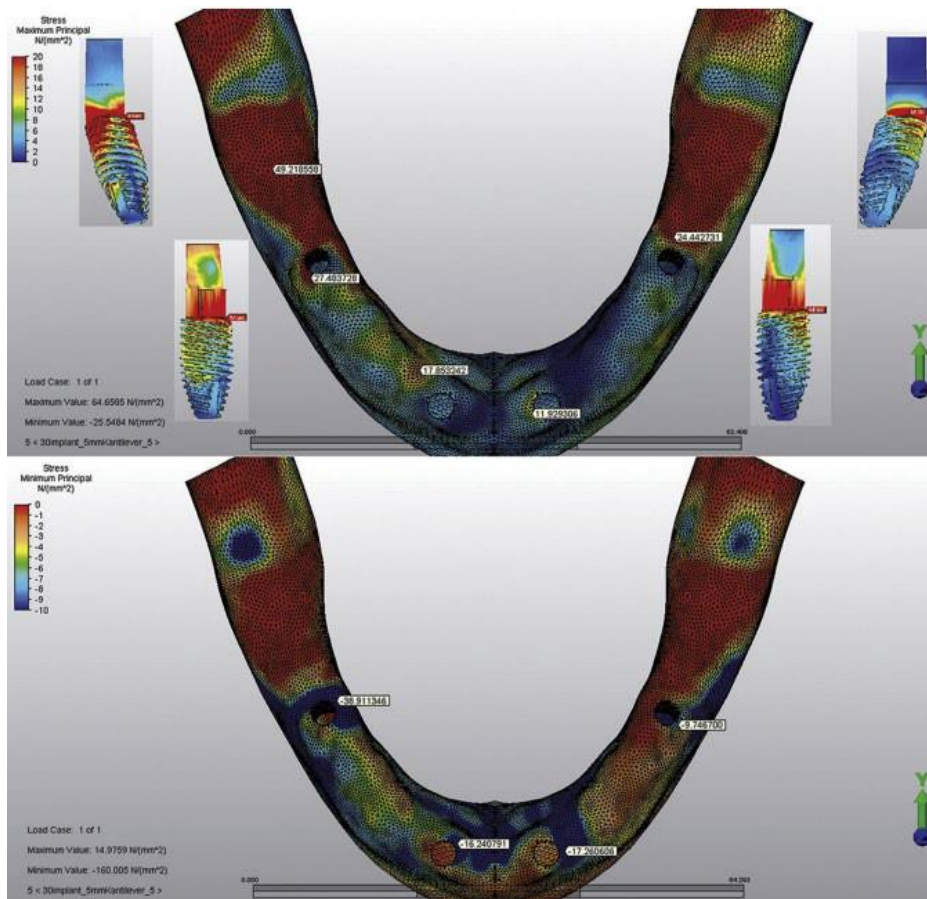
ΕΙΚΟΝΑ 151: Κατανομή των vMS (vonMises stress) στον πυρήνα ζιρκονίου (πάνω) και στην υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου (κάτω) (μοντέλα 15-5) ⁸¹



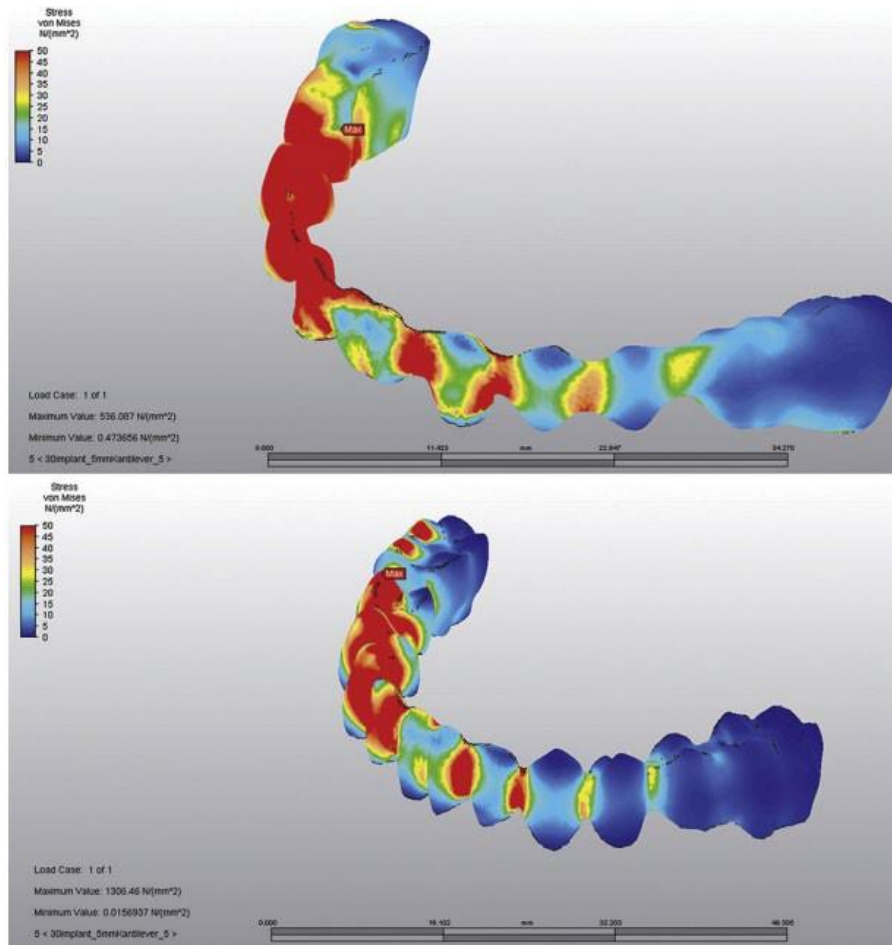
EIKONA 152: Κατανομή των MaxPS (Maximum Principal Stress) και MinPS (Minimum Principal Stress) στο φλοιώδες οστό και κατανομή των vMS (vonMises Stress) στα εμφυτεύματα (μοντέλα 15-9) ⁸¹



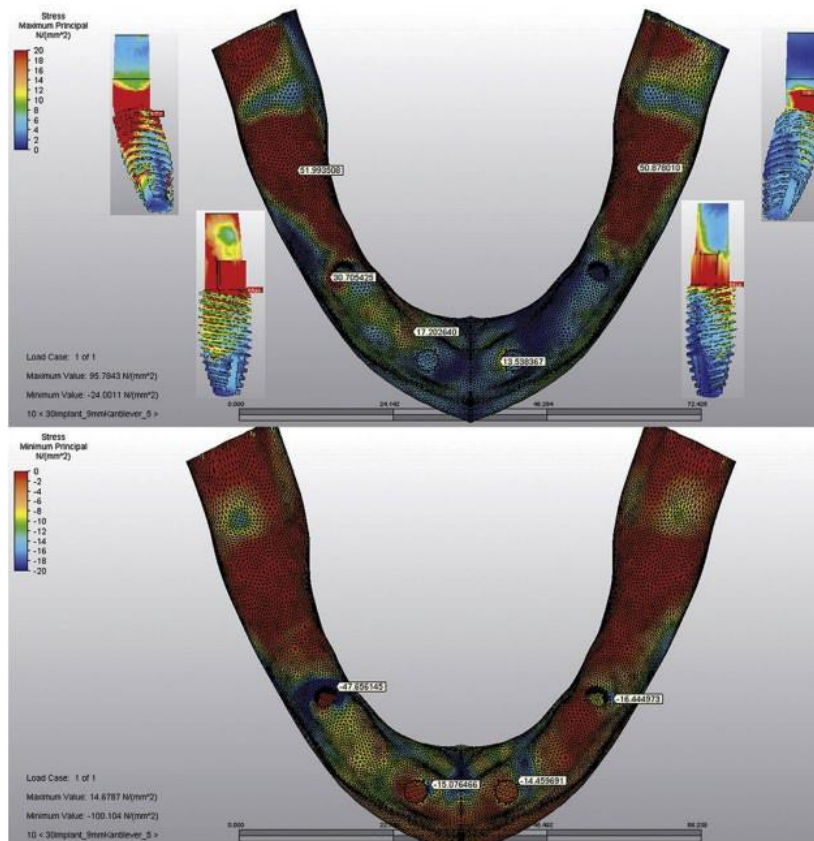
ΕΙΚΟΝΑ 153: Κατανομή των vMS (vonMises Stress) στον πυρήνα ζirkονίου (πάνω) και στην υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου (κάτω) (μοντέλα 15-9) ⁸¹



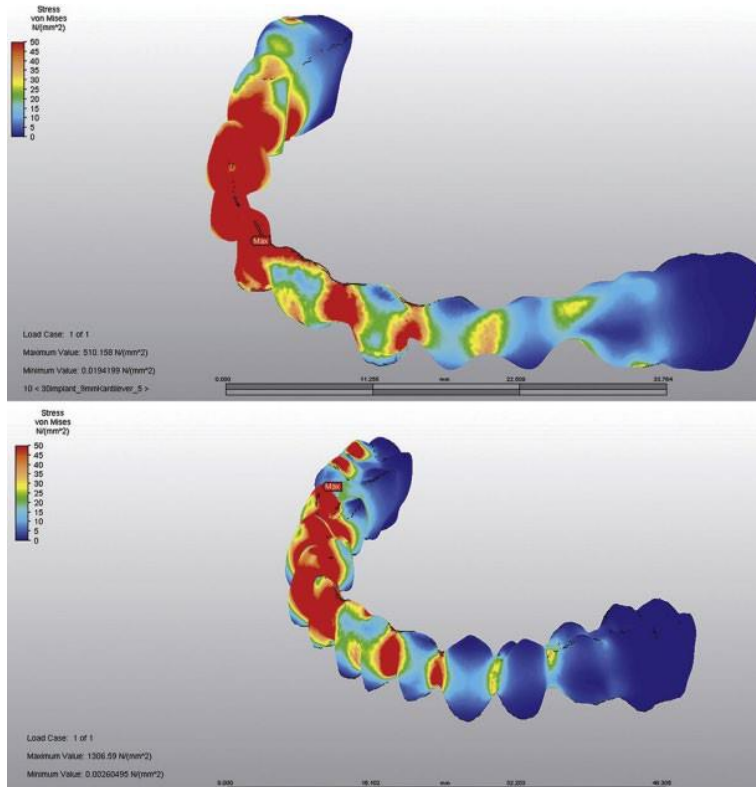
EΙΚΟΝΑ 154: Κατανομή των MaxPS (Maximum Principal Stress) και MinPS (Minimum Principal Stress) στο φλοιώδες οστό και κατανομή των vMS (vonMises Stress) στα εμφυτεύματα (μοντέλα 30-5) ⁸¹



ΕΙΚΟΝΑ 155: Διανομή των vMS (vonMisses Stress) στον πυρήνα ζιρκονίου (πάνω) και στην υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου (κάτω) (μοντέλα 30-5) ⁸¹



ΕΙΚΟΝΑ 156: Κατανομή των MaxPS (Maximum Principal Stress) και MinPS (Minimum Principal Stress) στο φλοιώδες οστό και κατανομή των vMS (vonMises Stress) στα εμφυτεύματα (μοντέλα 30-9) ⁸¹



ΕΙΚΟΝΑ 157: Διανομή των νMS (vonMisses Stress) στον πυρήνα ζιρκονίου (πάνω) και στην υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου (κάτω) (μοντέλα 30-9) ⁸¹

Οι μεταβολές στην κλίση και στο μήκος του προβόλου επηρέασαν τη μέγιστη κύρια τάση στο φλοιώδες οστό. Με την αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος από 15 έως 30 μοίρες, οι τιμές μέγιστης κύριας τάσης μειώθηκαν κατά περίπου 4 έως 7 MPa στο φλοιώδες οστό γύρω από όλα τα εμφυτεύματα εκτός από το δεξιό πρόσθιο εμφύτευμα στα σχέδια με τους κοντούς (5 mm) βραχίονες, αλλά αυξήθηκαν κατά περίπου 3 έως 19 MPa στα ίδια σημεία στα σχέδια με τους μακριούς (9 mm) βραχίονες. Η αύξηση του μήκους του βραχίονα από 5 σε 9 mm είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών μέγιστη κύριας τάσης (περίπου 2 MPa) στο φλοιώδες οστό γύρω από όλα τα εμφυτεύματα στα σχέδια με κλίση εμφυτεύματος 15 μοιρών και την αύξηση (περίπου 2 έως 3 MPa) στα σχέδια με κλίση εμφυτεύματος 30 μοιρών. Οι αλλαγές στο μήκος του προβόλου επηρέασαν επίσης την ελάχιστη κύρια τάση στο φλοιώδες οστό. Με την αύξηση του μήκους του προβόλου από 5 έως 9 mm, η ελάχιστη κύρια τάση στο φλοιώδες οστό μειώθηκε (περίπου 1 έως 3 MPa) γύρω από τα πρόσθια εμφυτεύματα και αυξήθηκε γύρω από τα οπίσθια εμφυτεύματα (περίπου 3 έως 13 MPa). Η ελάχιστη κύρια τάση στο φλοιώδες οστό δεν επηρεάστηκε από τις αλλαγές στην κλίση του εμφυτεύματος. Η αύξηση της κλίσης του

εμφυτεύματος δεν είχε ως αποτέλεσμα καμία αλλαγή στις τιμές μέγιστης κύριας τάσης ή ελάχιστης κύριας τάσης στο σπογγώδες οστό που περιβάλλει τα πρόσθια εμφυτεύματα- ωστόσο, στα σχέδια με τους κοντούς βραχίονες, η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε σε αύξηση των τιμών μέγιστης κύριας τάσης και ελάχιστης κύριας τάσης (περίπου 2 MPa) στο σπογγώδες οστό που περιβάλλει το αριστερό οπίσθιο εμφύτευμα. Η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε σε αλλαγές τόσο στις τιμές μέγιστης κύριας τάσης όσο και στις τιμές ελάχιστης κύριας τάσης στο σπογγώδες οστό στα σχέδια με τους μακριούς προβόλους, με τις τιμές μέγιστης κύριας τάσης να αυξάνονται (περίπου 3 έως 4 MPa) στο σπογγώδες οστό γύρω από το δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα και τις τιμές ελάχιστης κύριας τάσης να μειώνονται στο σπογγώδες οστό γύρω από το αριστερό οπίσθιο εμφύτευμα. Η αύξηση του μήκους του βραχίονα δεν είχε καμία επίδραση στη μέγιστη κύρια τάση ή την ελάχιστη κύρια τάση στα σχέδια με τους κοντούς βραχίονες. Η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε σε μείωση των τιμών von Misses στην πρώτη και τη δεύτερη αύλακα του δεξιού οπίσθιου εμφυτεύματος, ανεξάρτητα από το μήκος του προβόλου. Η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε επίσης σε μείωση των τιμών von Misses τόσο στην κορυφή όσο και σε όλες τις αυλακώσεις του αριστερού οπίσθιου εμφυτεύματος στον σχεδιασμό με τους κοντούς βραχίονες και στην πρώτη και τη δεύτερη αυλάκωση του αριστερού οπίσθιου εμφυτεύματος στον σχεδιασμό με τους μακριούς βραχίονες. Η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε επίσης σε υψηλότερες τιμές von Misses στην πρώτη και τη δεύτερη αυλάκωση του δεξιού οπίσθιου εμφυτεύματος στο σχεδιασμό με κλίση του εμφυτεύματος 15 μοιρών, ενώ η αύξηση του μήκους του προβόλου στο σχεδιασμό με κλίση του εμφυτεύματος 30 μοιρών δεν είχε καμία επίδραση στις τιμές von Misses για το δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα. Η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε σε συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή του αυχένα τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού οπίσθιου εμφυτεύματος στο σχεδιασμό με κλίση εμφυτεύματος 15 μοιρών, ενώ στο σχεδιασμό με κλίση 30 μοιρών, οι τάσεις κατανεμήθηκαν στη ρίζα, στην κορυφή και σε μέρος της περιοχής του αυχένα τόσο στο αριστερό όσο και στο δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα. Οι μεταβολές στην κλίση του εμφυτεύματος και στο μήκος του προβόλου δεν είχαν καμία επίδραση στις τιμές von Misses ή στην κατανομή των

τάσεων στα πρόσθια εμφυτεύματα. Στον παρακάτω πίνακα [Εικόνα 158] παρουσιάζονται οι τιμές von Misses στα εμφυτεύματα. [81]

Implants	Right				Left			
	Posterior		Anterior		Anterior		Posterior	
Cantilever length (mm)	5	9	5	9	5	9	5	9
15 Degrees	398	446	150	154	103	103	184	106
30 Degrees	432	401	152	157	103	102	161	111

ΕΙΚΟΝΑ 158: τιμές τάσεων von Misses (MPa) στα εμφυτεύματα [81]

Η αύξηση της κλίσης του εμφυτεύματος οδήγησε σε αύξηση των τιμών von Misses στο υλικό του πυρήνα του σκελετού από ζιρκονία για τις κατασκευές τόσο με τους κοντούς όσο και με τους μακριούς βραχίονες. Η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε επίσης σε αύξηση των τιμών von Misses στη δομή του πυρήνα ζιρκονίας του σχεδίου με την κλίση του εμφυτεύματος 15 μοιρών, αλλά όχι στο σχέδιο με την κλίση 30 μοιρών. [81]

Με βάση τα συλλεχθέντα δεδομένα, ο σχεδιασμός των οδοντιατρικών αποκαταστάσεων θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί ώστε να επιτευχθεί ομαλότερη κατανομή των τάσεων και, ταυτόχρονα, υψηλότερη φέρουσα ικανότητα. [48] Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκε παραπάνω καταδεικνύει ότι με τη χρήση μιας εξιδανικευμένης μορφής παρασκευής ενθέτου και ενός βελτιστοποιημένου σχεδιασμού γέφυρας που δίνει έμφαση στη διεύρυνση του ουλοδοντικού χώρου, οι δυνάμεις που προέρχονται από τη μάσηση μπορούν να κατανεμηθούν επαρκώς σε επίπεδα που βρίσκονται εντός της αντοχής θραύσης των σημερινών κεραμικών. [79] Μπορούν να δημιουργηθούν ανατομικά ακριβή τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μιας οδοντικής στεφάνης και μιας γέφυρας τριών τεμαχίων συνδυάζοντας τη σάρωση μικρο-CT και τα διαδραστικά εργαλεία του λογισμικού Mimics. Στη στεφάνη παρατηρήθηκαν εφελκυστικές τάσεις στην εγγύς περιοχή φόρτισης της επικάλυψης και στην εσωτερική επιφάνεια του πυρήνα. Επιπλέον, για το εφαρμοζόμενο φορτίο, η υψηλότερη συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στη γέφυρα εντοπίστηκε στο υλικό του σκελετού, στην αυχενική περιοχή των συνδέσμων και του ενδιάμεσου. [80] Η αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου μειώνει τα φορτία θραύσης. Τόσο το διπυριτικό λίθιο όσο και η

ζirkονία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το υλικό επιλογής για όλες τις κεραμικές οδοντιατρικές προσθέσεις που συγκρατούνται με ένθετα. Οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώνονται στην ουλική πλευρά του συνδέσμου και η συντριπτική πλειονότητα των κεραμικών αστοχιών ξεκινά σε αυτό το σημείο. Η ευκαμψία του σκελετού μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην οριακή προσαρμογή των συγκρατούμενων με ένθετα ακίνητων οδοντικών προσθέσεων και τα πιο άκαμπτα υλικά θα μπορούσαν να μεταφέρουν την τάση στο περιθώριο σε μικρότερο βαθμό από ό,τι τα εύκαμπτα υλικά. Επιμένουν μακροχρόνιες in vivo μελέτες για να αξιολογηθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται μπορούν να μεταφερθούν στην κλινική κατάσταση. ^[38] Με βάση τα ευρήματα αυτής της μελέτης in vitro, δείχθηκε ότι Οι τιμές της μέγιστης κύριας τάσης αυξήθηκαν στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει το αριστερό οπίσθιο εμφύτευμα στο μοντέλο με τον μακρύ βραχίονα όταν αυξήθηκε η κλίση του οπίσθιου εμφυτεύματος. Οι τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης αυξήθηκαν στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει το δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα όταν αυξήθηκε το μήκος του προβόλου. Οι τιμές von Misses αυξήθηκαν στο σκελετό ζirkονίας όταν αυξήθηκε η κλίση του εμφυτεύματος. ^[81]

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στοχεύοντας στη μελέτη της σημασίας της σχεδίασης αλλά και της επίδρασή της στην αντοχή σε θραύση των σκελετών των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων, στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν 30 άρθρα. Τα άρθρα αυτά αποτέλεσαν την βάση για την διερεύνηση των πλέον σύγχρονων δεδομένων της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά τις βασικές αρχές σχεδίασης των ακίνητων προσθετικών εργασιών ώστε να κατασκευαστούν αποκαταστάσεις που να είναι ανθεκτικές στην καταπόνηση από επαναλαμβανόμενους κύκλους μάζησης. Πιο

συγκεκριμένα, αναλύθηκαν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία και προδιαγραφές που πρέπει να ακολουθήσει ο Οδοντικός Τεχνολόγος κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενός κεραμικού σκελετού μιας γέφυρας με σκοπό να είναι ικανός ο σκελετός αυτός να υποστηρίξει το κεραμικό υλικό επικάλυψης και να αντέξει στο δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον της στοματικής κοιλότητας.

Στις ακίνητες προσθετικές αποκαταστάσεις, ανεξαρτήτως του υλικού κατασκευής του υποστρώματος/πυρήνα (κεραμικός ή μεταλλικός), οι οδοντικοί τεχνολόγοι σε συνδυασμό με τις εταιρείες κατασκευής των οδοντιατρικών βιοϋλικών προτείνουν ο σχεδιασμός του υποστρώματος/πυρήνα να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η κεραμική επικάλυψη να υποστηρίζεται (σε όλο το εύρος της) από τον υποκείμενο πυρήνα [64]. Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί (α) με τον σχεδιασμό των προσθετικών εργασιών διαμορφώνοντας ανατομικό σχεδιασμό του υποστρώματος (έτσι το κεραμικό υλικό επικάλυψης θα έχει παντού περίπου παρόμοιο πάχος) και (β) με τον σχεδιασμό γλωσσικού-υπερώιου σιριτιού. Βασιζόμενοι, λοιπόν, στην παραπάνω «θεωρία» ομάδες ερευνητών [42,58-60,66] μελέτησαν τη σημαντικότητα αλλά και την επίδραση του ανατομικού σχεδιασμού αλλά και διαμόρφωσης αυχενικού γλωσσικού-υπερώιου σιριτιού στην ενίσχυση της αντοχής μιας ολοκεραμικής στεφάνης. Οι ερευνητές κατέληξαν στο γενικό συμπέρασμα πως τόσο ο ανατομικός σχεδιασμός του πυρήνα όσο και η ύπαρξη αυχενικού σιριτιού προσφέρουν υποστήριξη και ομοιόμορφο πάχος στην αισθητική κεραμική επικάλυψη. Πιο συγκεκριμένα, οι Kokubo και συν.(2011) παρατήρησαν πως το φορτίο που απαιτείται για να υποστεί θραύση η κεραμική μάζα επικάλυψης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό (ή τη διαμόρφωση) του πυρήνα καθώς ένας ανατομικά διαμορφωμένος πυρήνας προσφέρει μια επικάλυψη πορσελάνινης ομοιόμορφου πάχους.⁵⁸ Σε μια άλλη μελέτη, οι Altamimi και συν.(2014), πραγματοποιώντας συνδυαστική δοκιμασία αρχικά στην κόπωση και έπειτα στην κάμψη μέχρι την τελική θραύση, ακινητοποίησαν τα κολοβώματα προς μελέτη με χρήση ρητινώδους κονίας και εφάρμοσαν δύναμη με μέγιστο φορτίο των 250 N (με ρυθμό 1000 N/sec, και συχνότητα 2Hz), στοχεύοντας να συγκρίνουν την αντοχή στη θραύση των στεφανών ζirkονίας/φθοριοαπατίτη και των μονολιθικών στεφανών θερμοσυμπιεσμένου διπυριτικού λιθίου. Διαπιστώσαν πως όταν ο

πυρήνας ζirkονίου παρέχει επαρκή υποστήριξη στην επικάλυψη, λόγω ανατομικού σχεδιασμού, η αντοχή της αποκατάστασης στη θραύση ήταν βελτιωμένη.⁴² Μία άλλη ομάδα ερευνητών, Oilo και συν.(2016) υποστηρίζουν πως παρόλο που ο σχεδιασμός του πυρήνα δεν ήταν ανατομικός αλλά υπήρχε αυχενικό σιρίτι η αντοχή της ολοκεραμικής στεφάνης ήταν σαφώς υψηλότερη (>4500 N fracture load) από την αντίστοιχη στεφάνη χωρίς σιρίτι (<4000 N fracture load).⁵⁹ Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Ha Sr και συν.(2013), οι οποίοι με τη βοήθεια των υπολογιστικών μεθόδων/πεπερασμένων στοιχείων παρατήρησαν πως παρόλο που ο σχεδιασμός του πυρήνα δεν ήταν ανατομικός αλλά η κεραμική επικάλυψη είχε ομοιόμορφο πάχος και υποστηριζόταν από αυχενικό σιρίτι η αντοχή της στεφάνης ήταν υψηλή. Το συγκεκριμένο εύρημα το δικαιολόγησαν αναφέροντας πως όσο μεγαλύτερο ήταν το ύψος του αυχενικού σιριτιού τόσο καλύτερα λειτουργούσε ως «απορροφητής» των τάσεων.⁶⁶

Μια άλλη παράμετρος η οποία ήταν απαραίτητο να μελετηθεί αφορά τη διαμόρφωση του φυσικού δοντιού στηρίγματος, καθώς κατά τη διάρκεια των μασητικών κύκλων η προσθετική αποκατάσταση εκτίθεται σε πραγματικές συνθήκες καταπόνησης (ύπαρξη υγρασία, αλλαγές pH, μεταβαλλόμενες μασητικές δυνάμεις, λειτουργικές/ παραλειτουργικές κινήσεις της κάτω γνάθου κλπ), οπότε ένα σωστά διαμορφωμένο στήριγμα μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στη μακροζωία της αποκατάστασης. Για παράδειγμα, σε αποκαταστάσεις οπίσθιων στεφάνων, οι Jajalian και συν.(2010) και Jager και συν.(2004) παρατήρησαν πως η οριακή διαμόρφωση με βάθρο παρέχει υψηλότερη αντοχή στη θραύση από ότι η διαμόρφωση χωρίς βάθρο.^{57,65} Το εύρημα αυτό δεν αποτελεί κανόνα, καθώς σύμφωνα με τους Schiwer και συν.(2021) μια οριακή διαμόρφωση χωρίς βάθρο αλλά με μικρότερη κωνικότητα του κολοβώματος μπορεί να αυξήσει την αντοχή στην θραύση. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω αυξημένης κωνικότητας του κολοβώματος το πάχος των αξονικών τοιχωμάτων του πυρήνα αυξάνεται προκειμένου να υποστηρίξει την κεραμική επικάλυψη. Έτσι αντισταθμίζεται η απουσία της οριακής διαμόρφωσης με βάθρο.⁶¹ Συμπερασματικά, μία διαμόρφωση με βάθρο αλλά με αρκετή κωνικότητα και ο σχεδιασμός του πυρήνα με ενισχυμένο αξονικό πάχος τοιχώματος αναμένεται να παρέχουν την υψηλότερη αντοχή⁶⁷ Ουσιαστικά ένας πυρήνας που

στηρίζεται σε ένα κολόβωμα με οριακή διαμόρφωση με βάθρο και με ικανό πάχος αξονικών τοιχωμάτων μπορεί να αντισταθμίσει την μεγάλη κωνικότητα και να αυξήσει έτσι την αντοχή στη θραύση.

Μία επιπλέον παράμετρος η οποία μελετήθηκε είναι το πάχος της κονιάς συγκόλλησης και κατά πόσο αυτό μπορεί να επηρεάσει την αντοχή στη θραύση της προσθετικής αποκατάστασης. Για παράδειγμα, οι Schiwer και συν.(2021) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν κατά πόσο ο προκαθορισμένος χώρος κονιάς ή η κωνικότητα και συνεπώς το πάχος του τοιχώματος της αποκατάστασης επηρεάζουν την αντοχή στη θραύση των μονολιθικών στεφανών ζirkονίας. Τα δοκίμια τους είχαν όλα τον ίδιο τύπο παρασκευής (λοξοτόμηση χωρίς βάθρο) και διαφορετικές κωνικότητες και πάχη στρώσης κονιάς. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως σε όλα τα δοκίμια της μελέτης τους η κατανομή του όγκου της κονιάς ήταν ομοιόμορφη. Η μελέτη τους έδειξε ότι ένα μεγαλύτερο πάχος κονιάς βελτίωσε την έδραση των στεφανών μονολιθικής ζirkονίας αλλά δεν επηρέασε το φορτίο κατά τη θραύση.⁶¹ Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν οι Jager και συν.(2004) οι οποίοι στην πειραματική τους μελέτη είχα ως στόχο να αξιολογήσουν, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, την επιρροή του σχήματος της παρασκευής και του στρώματος της κονιάς, την κατανομή των τάσεων στις ολοκεραμικές στεφάνες που παράγονται με τη μέθοδο CAD/CAM.⁶⁵ Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη τους αποκάλυψε πως ένα ανομοιόμορφο στρώμα κονιάς δεν μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις στην πορσελάνη επικάλυψης στη διεπιφάνεια μεταξύ της πορσελάνης επικάλυψης και του πυρήνα, αλλά μπορεί να αυξήσει τις μέγιστες διατμητικές τάσεις στο στρώμα κονιάς στις επιφάνειες συγκόλλησης σε τιμές που υπερβαίνουν την αντοχή συγκόλλησης του στρώματος κονιάς με την αποκατάσταση και την παρασκευή.⁶⁵ Επομένως, το πάχος του στρώματος της κονιάς δεν επηρεάζει την αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών στεφανών, είτε πρόκειται για μονολιθικές αποκαταστάσεις είτε για δι-κεραμικά συστήματα^{61,65}, αλλά μπορεί να επηρεάσει την αντοχή της συγκόλλησης της αποκατάστασης⁶⁵ και για αυτό πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα κατανεμημένο.

Μία ακόμη παράμετρος που πρέπει να λάβει υπόψη ο Οδοντικός Τεχνολόγος στην κατασκευή ολοκεραμικών αποκαταστάσεων είναι το συνολικό πάχος της

αποκατάστασης, γεγονός που επηρεάζει την μακροβιότητα της προσθετικής εργασίας ανεξαρτήτως του υλικού του πυρήνα. Οι Dibner και συν.(2016) στη μελέτη τους είχαν στόχο να εξετάσουν την υπόθεση ότι το πάχος του κεραμικού πυρήνα έχει ελάχιστη επιρροή στην αντοχή ενός διαστρωματωμένου κεραμικού σε σταθερό συνολικό πάχος. Τα δοκίμια τους (δοκίμια μονολιθικού διπυριτικού λιθίου είτε στο δικεραμικό σύστημα πυρήνας διπυριτικού λιθίου/οδοντιατρική πορσελάνη) κατασκευάστηκαν με τη βοήθεια της τεχνολογίας CAD/CAM (το πάχος των στεφανών ≤ 1.5 mm; πάχη πυρήνα/κεραμικού επικάλυψης 0.5/1.0 mm, 0.75/0.75 mm, 1.0/0.5 mm και 1.5/0.0 mm). Αποδείχθηκε πως οι μονολιθικές στεφάνες διπυριτικού λιθίου πλήρους πάχους αποδείχθηκαν ήταν πιο αδύναμες (μέσο φορτίο αστοχίας λόγω κόπωσης 501 N) από αυτές του δικεραμικού συστήματος. Επιπλέον, η μελέτη τους απέδειξε πως η προσθήκη επικάλυψης κεραμικού σε πυρήνες διπυριτικού λιθίου αυξάνει την αντοχή σε κόπωση του δικεραμικού συστήματος και πως περισσότερο η αύξηση του πάχους του κεραμικού επικάλυψης, παρά του κεραμικού του πυρήνα, μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στη συνολική αντοχή σε κόπωση. Το μέσο φορτίο αστοχίας λόγω κόπωσης για το σύστημα 0.5/1.00 mm ήταν υψηλότερο (611 N) σε σχέση με αυτό του συστήματος 1.00/0.50 mm (538 N).⁶³ Σχετικά με το συνολικό πάχος των ολοκεραμικών στεφανών και την επιρροή που έχει στη μακροβιότητά τους ασχολήθηκαν και οι Fardin και συν.(2016) με τη μελέτη τους που είχε στόχο τη διερεύνηση της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης και των τρόπων αστοχίας ολοκεραμικών (πορσελάνη/ζirkονία) και μεταλλοκεραμικών στεφανών με ομοιόμορφο πάχος ή τροποποιημένο σχεδιασμό σκελετού. Για τις ανάγκες της μελέτης κατασκεύασαν για κάθε σύστημα σκελετούς με ομοιόμορφο πάχος (0.5mm), με αυχενικό σιρίτι που αυξάνεται σε ύψος στις όμορες επιφάνειες και με κεραμική επικάλυψη πάχους 1.0 mm στα αξονικά τοιχώματα και 1.5 mm στη μασητική επιφάνεια.⁶⁴ Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως υπάρχουν διαφοροποιήσεις τόσο στο υλικό του πυρήνα όσο και στο πάχος του πυρήνα και της κεραμικής επικάλυψης σε σύγκριση με την μελέτη των Dibner και συν.(2016)⁶³. Οι Fardin και συν.(2016) καταλήγουν πως ο σχεδιασμός του πυρήνα δεν επηρέασε την αντοχή των στεφανών. Ωστόσο και στις δύο μελέτες αποτελεί κοινό παρανομαστή το

συνολικό πάχος της μασητικής επιφάνειας να είναι 1.5 mm με πάχος κεραμικής επικάλυψης 1 mm και πάχος πυρήνα 0.5 mm.⁶⁴

Ακόμη μία παράμετρος που μελετήθηκε αφορά την θερμική αντιστοιχία-συμβατότητα του κεραμικού πυρήνα και της κεραμικής επικάλυψης. Αυτή τη μελέτη πραγματοποίησαν οι Belli και συν.(2012) που είχαν ως στόχο να προσδιορίσουν τον συντελεστή φωτοελαστικότητας δύο διαφορετικών κεραμικών επικαλύψεων που χρησιμοποιούνται για επικάλυψη σκελετών ζirkονίας και να μετρήσουν τη χωρική κατανομή και το μέγεθος των υπολειπόμενων τάσεων που δημιουργούνται σε όλη την κεραμική επικάλυψη σε στεφάνες ζirkονίας που ψύχονται ακολουθώντας δύο διαφορετικά πρωτόκολλα ψύξης.⁶² Χρησιμοποιώντας κεραμικές επικαλύψεις με διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής για τη δημιουργία υψηλής ή χαμηλής θερμικής αναντιστοιχίας με τον πυρήνα ζirkονίας, απέδειξαν πως η αύξηση της θερμικής αναντιστοιχίας μεταξύ των δύο κεραμικών υλικών αυξάνει τις τάσεις στο εσωτερικό της στεφάνης και επομένως μειώνει την αντοχή στη θραύση.⁶² Επιπλέον τα ευρήματα της μελέτης τους απέδειξαν πως σημαντικό ρόλο παίζει και η γεωμετρία τόσο του πυρήνα όσο και της επικάλυψης για την αύξηση των τάσεων. Ο προσανατολισμός του διανύσματος των τάσεων παρουσίασε μια απότομη αλλαγή (~180°) στην άκρη των ακρολοφιών (δίεδρων γωνιών) στο πάρειο-γλωσσικό επίπεδο, υποδεικνύοντας μια πιο σύνθετη συμπεριφορά τάσεων πάνω σε καμπύλες επιφάνειες, η οποία επιδεινώνεται στις ακρολοφίες λόγω της μικρής ακτίνας και της δισδιάστατης κυρτότητας.⁶²

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών αποκαταστάσεων είναι το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Οι Zhang και συν.(2015) με την in-vitro μελέτη τους είχαν ως στόχο τη ποσοτικοποίηση της αντίστασης στη θραύση μονολιθικής ζirkονίας, διπυριτικού λιθίου και σύνθετων οδοντικών στεφανών με νανοσωματίδια.³⁹ Η σύγκριση των υλικών που χρησιμοποίησε η παραπάνω μελέτη απέδειξε πως για μονολιθικές στεφάνες η ζirkονία είναι η πρώτη σε ανθεκτικότητα, το διπυριτικό λίθιο δεύτερο και τρίτα τα νανοςύνθετα κεραμικά.³⁹ Οι σκληρότερες και ισχυρότερες στεφάνες από ζirkονία και διπυριτικό λίθιο παρέχουν ανώτερη θωράκιση των τάσεων στο εσωτερικό του δοντιού και εμποδίζουν την έναρξη διάδοσης ρωγμών. Ταυτόχρονα, επισημαίνεται

ότι η ακεραιότητα της μονολιθικής δομής της στεφάνης μπορεί εύκολα να τεθεί σε κίνδυνο από ελαττώματα κατασκευής και ατέλειες προετοιμασίας ή τοποθέτησης, από ακούσια αποκόλληση, υπερβολική αμμοβολή και φινίρισμα με φρέζα, καθώς και από κόπωση.³⁹

Οι παράγοντες που έως τώρα έχουν αναφερθεί παραπάνω έχουν μελετηθεί κατά κύριο λόγο χρησιμοποιώντας μη γεωμετρικά δοκίμια στεφανών. Ωστόσο στην καθημερινή οδοντιατρική και οδοντοτεχνική πράξη απαιτείται και η κατασκευή ολοκεραμικών γεφυρών που από τη φύση τους είναι πιο σύνθετες αποκαταστάσεις. Οπότε χρειάζεται να εξετασθούν και να μελετηθούν περισσότεροι παράγοντες όπως το είδος της παρασκευής του δοντιού στηρίγματος^{38,79}, η αντοχή στη θραύση του υλικού^{38,69,71,77,79}, η οριακή προσαρμογή της αποκατάστασης^{38,40}, ο σχεδιασμός και το μέγεθος των συνδέσμων^{38,68-71,73,75-78} καθώς και η κατανομή των τάσεων^{80,81} για τον επιτυχή σχεδιασμό μιας ολοκεραμικής γέφυρας.

Η προετοιμασία ενός δοντιού στηρίγματος για μια ολοκεραμική γέφυρα περιλαμβάνει προσεκτική διαμόρφωση για να εξασφαλιστεί η σωστή στήριξη, συγκράτηση και αισθητική. Οι ολοκεραμικές γέφυρες είναι γνωστές για τις αισθητικές τους ιδιότητες, αλλά η επιλογή του κεραμικού υλικού μπορεί να διαφέρει (π.χ. διπυριτικό λίθιο, ζirkονία). Η διαμόρφωση του δοντιού στηρίγματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις αντοχής και πάχους του επιλεγμένου υλικού. Μία ελαχιστοποιημένη διαμόρφωση των δοντιών στηριγμάτων δίνει την δυνατότητα να διατηρηθεί όσο το δυνατόν περισσότερη υγιή οδοντική δομή. Η έκταση όμως της παρασκευής εξαρτάται από το υλικό και το σχεδιασμό της γέφυρας. Οι Thompson και συν.(2010) είχαν σκοπό να μελετήσουν την ικανότητα των ενθέτων να αποτελέσουν στήριγμα για ακίνητες ολοκεραμικές προσθετικές αποκαταστάσεις. Χρησιμοποίησαν ένα εξιδανικευμένο σχέδιο παρασκευής ενθέτου σε έναν δεύτερο προγόμφιο και έναν δεύτερο γομφίο της κάτω γνάθου και κατασκεύασαν μια πρόσθεση που αποκαθιστά τον ελλείποντα πρώτο γομφίο και κατανέμει καλύτερα τις εφελκυστικές τάσεις προκειμένου να εξεταστεί με τη μέθοδο της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων το ενδεχόμενο να χρησιμοποιηθεί το ένθετο ως στήριγμα για μια ολοκεραμική προσθετική αποκατάσταση. Επίσης κατασκεύασαν μία αντίστοιχη γέφυρα η οποία στηριζόταν στα αντίστοιχα ιδανικά πλήρως

παρασκευασμένα κολοβώματα. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις τάσεων υπάρχουν κοντά στις περιοχές των μεσοδόντιων τριγώνων μεταξύ του ενθέτου και του γεφυρώματος και στο σημείο επαφής με τη φόρτιση (209 MPa στο μοντέλο του ενθέτου και τα 174 MPa στο μοντέλο της στεφάνης). Οι υψηλές εφελκυστικές τάσεις είναι εμφανείς στην ουλική πλευρά των συνδέσμων (198 MPa στη γέφυρα με ένθετο και τα 177 MPa στη γέφυρα με πλήρη στεφάνη) ενώ οι υψηλές θλιπτικές τάσεις είναι εμφανείς στην μασητική πλευρά των συνδέσμων (177 MPa στη γέφυρα με ένθετο και 128 MPa στη γέφυρα με πλήρη στεφάνη).⁷⁹ Επιπλέον άλλη μια ομάδα ερευνητών οι Lakshmi και συν.(2015) είχαν στόχο να αξιολογηθεί η κατανομή των τάσεων μεταξύ μονολιθικού διπυριτικού λιθίου και μονολιθικής ζirkονίας που συγκρατούνται με ένθετα από ακίνητες οδοντικές προθέσεις μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του συνδέσμου με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.³⁸ Η μελέτη τους αποκάλυψε πως οι υψηλότερες συγκεντρώσεις τάσεων υπάρχουν κοντά στις περιοχές των μεσοδόντιων τριγώνων μεταξύ του ενθέτου και του γεφυρώματος, από όπου ξεκινούν συνήθως οι αστοχίες⁷⁰, και στο σημείο επαφής της φόρτισης καθώς και ότι οι κύριες τάσεις τόσο του ζirkονίου όσο και του διπυριτικού λιθίου, μειώνονται με την αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου.³⁸ Και οι δύο μελέτες συμφωνούν πως οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώνονται στην ουλική πλευρά του συνδέσμου, από όπου ξεκινούν συνήθως και οι αστοχίες.^{38,79} Επίσης και οι δύο μελέτες συμφωνούν πως οι δυνάμεις που προέρχονται από τη μάσηση μπορούν να κατανεμηθούν επαρκώς σε επίπεδα που βρίσκονται εντός της αντοχής θραύσης των σημερινών κεραμικών όπως το διπυριτικό λίθιο και η ζirkονία, και επομένως να χρησιμοποιηθούν και σε αποκαταστάσεις που στηρίζονται σε ένθετα.^{38,79}

Όπως είδαμε και παραπάνω, στις στεφάνες η προσθήκη αυχενικού γλωσσικού-υπερωίου σιριτιού αυξάνει στην αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών στεφανών. Ισχύει όμως το ίδιο και στην περίπτωση των ολοκεραμικών γεφυρών; Αυτό μελέτησαν και οι Salimi και συν.(2012) οι οποίοι κατασκεύασαν μία γέφυρα που αντικαθιστά έναν δεύτερο προγόμφιο και συνέκριναν δύο είδη σχεδιασμού (με σιρίτι και χωρίς) και δύο μεγέθη συνδέσμων για κάθε σχεδιασμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως σπουδαιότερο ρόλο στην αντοχή στη θραύση έπαιξε το μέγεθος του συνδέσμου

παρά η χρήση αυχενικού σιριτιού.⁷³ Αντίστοιχα και οι Partijan και συν.(2016) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν κατά πόσον η τροποποίηση του σχεδιασμού των συνδέσμων από διαφορετικές πλευρές θα βελτίωνε την αντοχή σε θραύση του σκελετού από ζirkονία σε σύγκριση με τον συμβατικά σχεδιασμένο σκελετό. Κατασκευάστηκαν γέφυρες που αντικαθιστούσαν τον πρώτο γομφίο της κάτω γνάθου, από ζirkονία επικαλυμμένη με οδοντιατρική πορσελάνη. Στον τυπικό σχεδιασμό η πορσελάνη κάλυπτε όλο το σκελετό ζirkονίας, ενώ στο σχεδιασμό με το σιρίτι το τμήμα της γέφυρας που κάλυπτε το σιρίτι (2mm) έμεινε χωρίς επικάλυψη πορσελάνης. Τα αποτελέσματα της μελέτης των Partijan και συν.(2016) έδειξαν ότι η τροποποίηση του σχεδιασμού του σκελετού ζirkονίας παρουσίασε σημαντική βελτίωση της αντοχής στη θραύση σε σύγκριση με τον συμβατικό σχεδιασμό.⁷⁴ Τα δοκίμια των Salimi και συν. (2012) που αποδείχτηκαν πιο ανθεκτικά ήταν αυτά με το μεγαλύτερο σύνδεσμο 4 x 4 και το αυχενικό σιρίτι, ενώ και στη μελέτη των Partijan και συν.(2016) και για τους δύο σχεδιασμούς το μέγεθος του συνδέσμου ήταν ίδιο (διάμετρος 4.5mm). Επομένως και οι δύο μελέτες συμφωνούν πως η χρήση αυχενικού σιριτιού αύξησε την αντοχή στη θραύση των ολοκεραμικών γεφυρών από ζirkονία.⁷³⁻⁷⁴

Κατά το σχεδιασμό των οδοντικών γεφυρών, οι σύνδεσμοι παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σύνδεση του τεχνητού δοντιού (ή των τεχνητών δοντιών) με τα δόντια στηρίγματα. Ο σχεδιασμός των συνδέσμων μπορεί να επηρεάσει την αντοχή, τη σταθερότητα και την αισθητική της οδοντικής αποκατάστασης.^{38,68-71,73,75-78,80} Αρχικά οι διαστάσεις του συνδέσμου, συμπεριλαμβανομένου του πλάτους και του ύψους, είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της αντοχής και της μακροζωίας της γέφυρας. Ένας καλά σχεδιασμένος σύνδεσμος κατανέμει ομοιόμορφα τις δυνάμεις και ελαχιστοποιεί την καταπόνηση των δοντιών στηριγμάτων.^{38,73,74,79} Οι Larsson και συν.(2007) με την μελέτη τους είχαν σκοπό να συγκρίνουν την αντοχή σε θραύση γεφυρών πυρήνων ζirkονίας τεσσάρων μονάδων σχεδιασμένων με διαφορετικές διαμέτρους συνδέσμων (2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm και 4,0 mm). Τα ευρήματα της έρευνας αυτής δείχνουν πως η μεγαλύτερη διάσταση συνδέσμου που δοκιμάστηκε είχε και μεγαλύτερη αντοχή (897 N).⁶⁹ Άλλη μία ομάδα ερευνητών, οι Hafezeqorani και συν.(2020) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο την αξιολόγηση της

επίδρασης του μεγέθους και του σχεδιασμού του συνδέσμου στην αντοχή σε θραύση των μονολιθικών ακίνητων οδοντικών προσθέσεων από ζirkονία. Τα ευρήματα της μελέτης τους απέδειξαν πως η διάσταση του συνδέσμου 9 mm^2 (όπως συνιστάται συνήθως από τον κατασκευαστή) για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη προσοχή, ενώ μια διάσταση συνδέσμου 12 mm^2 είναι αρκετά ισχυρή για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας τριών μονάδων.⁷⁵

Το σχήμα του συνδέσμου θα πρέπει να σχεδιάζεται προσεκτικά ώστε να εξισορροπεί τις δομικές απαιτήσεις με τις αισθητικές πτυχές. Τα συνήθη σχήματα περιλαμβάνουν στρογγυλούς, ωοειδείς ή ορθογώνιους συνδέσμους. Οι Ahmed και συν.(2020) είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η αντοχή σε κάμψη της ζirkονίας με τη χρήση τριών διαφορετικών σχεδίων συνδέσμων υπό κατακόρυφα και λοξά φορτία. Τα ευρήματα της έρευνας αποκάλυψαν πως η υψηλότερη αντοχή σε κάμψη παρατηρήθηκε σε δοκίμια με τριγωνικούς συνδέσμους όταν η δύναμη εφαρμόστηκε κάθετα. Ο σχεδιασμός στρογγυλού συνδέσμου αποδείχθηκε καλύτερος από τον τριγωνικό και τον οβάλ σύνδεσμο κατά την εφαρμογή σε πλάγια φορτία.⁷⁸ Άλλη μια ομάδα ερευνητών οι Kwansiri Plengsombut και συν.(2009) είχαν ως στόχο να προσδιοριστεί η επίδραση 2 σχεδίων συνδέσμων στην αντοχή σε θραύση των υλικών του πυρήνα που χρησιμοποιούνται για ολοκεραμικές γέφυρες. Τα ευρήματα της μελέτης τους υπέδειξαν πως η αντοχή σε θραύση των κεραμικών υλικών πυρήνα επηρεάζεται από την τεχνική κατασκευής και το σχεδιασμό του συνδέσμου. Ο σχεδιασμός του συνδέσμου επηρεάζει την αντοχή σε θραύση των κατεργασμένων κεραμικών, αλλά όχι των πρεσαριστών κεραμικών. Μεταξύ των υλικών που είναι διαθέσιμα για CAD/CAM, η αντοχή σε θραύση της τετραγωνικής ζirkονίας σταθεροποιημένης με Y_2O_3 επηρεάζεται λιγότερο από το σχεδιασμό του συνδέσμου απ' ό,τι το κεραμικό διπυριτικού λιθίου.⁷¹ Ακόμη μια ομάδα ερευνητών οι Hamza και συν.(2016) στη μελέτη τους είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών συνδέσμων στην αντοχή σε κάμψη προσομοιωμένων ακίνητων οδοντικών προσθέσεων 3 μονάδων κατασκευασμένων από ζirkονία. Για την προσομοίωση μιας γέφυρας τριών μονάδων, κατασκευάστηκαν ορθογώνια δοκίμια σε σχήμα ράβδου και κάθε δοκίμιο ράβδου είχε 2 συρρικνωμένα τμήματα και έφεραν εντομές στις δύο πλευρές που αντιπροσώπευαν τον σύνδεσμο και όριζαν ένα

κεντρικό ενδιάμεσο μήκους 10 mm (μικρός στρογγυλός σύνδεσμος ,μικρός αιχμηρός σύνδεσμος, συμβατικός στρογγυλός σύνδεσμος, συμβατικός αιχμηρός σύνδεσμος) ενώ κατασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς στένωση που χρησίμευσαν ως ομάδα ελέγχου. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι η υψηλότερη μέση αντοχή σε κάμψη καταγράφηκε στην ομάδα ελέγχου (891 MPa) ενώ η χαμηλότερη μέση αντοχή σε κάμψη καταγράφηκε στην ομάδα του μικρού αιχμηρού συνδέσμου. Επομένως , δείχθηκε ότι η αντοχή σε κάμψη των κεραμικών με βάση το Y-TZP επηρεάζεται από τη διάσταση και το σχεδιασμό του συνδέσμου και ότι ο στρογγυλός σχεδιασμός του συνδέσμου μπορεί να αντέξει καλύτερα τις δυνάμεις σύγκλισης από τον αιχμηρό (γωνιώδη ή σχεδιασμό οξείας γωνίας) σχεδιασμό.⁷⁷ Οι εκτιμήσεις σχεδιασμού για τους συνδέσμους μπορεί να διαφέρουν στην πρόσθια και την οπίσθια περιοχή. Οι αισθητικές ανησυχίες μπορεί να είναι πιο έντονες στην πρόσθια περιοχή, επηρεάζοντας το σχήμα και την τοποθέτηση του συνδέσμου. Σίγουρα για αισθητικούς λόγους , όπως π.χ. για την κατασκευή μια αποκατάστασης πρόσθιων δοντιών, ένας σύνδεσμος με τριγωνικό σχήμα είναι καταλληλότερος από έναν με στρογγυλό σχήμα. Όμως ένας τριγωνικός σύνδεσμος για να είναι ανθεκτικός προϋποθέτει πως η αιχμηρότητά του στη μασητική περιοχή θα αντισταθμίζεται από την καμπυλότητα του στην ουλική- αυχενική περιοχή.^{68,77}

Η βελτιστοποίηση της κατανομής των τάσεων στις οδοντιατρικές αποκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των κεραμικών σκελετών, είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της μακροζωίας και της επιτυχίας της αποκατάστασης. Σε περιπτώσεις όπου οι κεραμικές αποκαταστάσεις περιλαμβάνουν τη διαστρωμάτωση διαφορετικών υλικών (π.χ. επικάλυψη πορσελάνης σε σκελετό ζirkονίας), η βελτιστοποίηση του δεσμού μεταξύ των στρωμάτων είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της αποκόλλησης και τη βελτίωση της κατανομής των τάσεων.⁴⁸ Ο σχεδιασμός του κεραμικού σκελετού παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή των τάσεων. Η εξασφάλιση του κατάλληλου περιγράμματος, πάχους και τοποθέτησης του σκελετού συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων σύγκλισης στην αποκατάσταση, η ακριβής οριακή προσαρμογή μεταξύ της κεραμικής αποκατάστασης και της παρασκευασμένης επιφάνειας του δοντιού είναι απαραίτητη για την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Η κακή οριακή προσαρμογή

μπορεί να οδηγήσει σε περιοχές αυξημένης καταπόνησης και πιθανή αποτυχία. Οι Komine και συν.(2005) είχαν ως στόχο να αξιολογηθεί η επίδραση της διαμόρφωσης του σκελετού στην οριακή προσαρμογή των κεραμικών σκελετών ζirkονίας τεσσάρων πρόσθιων μονάδων. Για αυτή τη μελέτη κατασκευάστηκαν γέφυρες 4 δοντιών που αντικαθιστούσαν τον κεντρικό και τον πλάγιο τομέα της άνω γνάθου ενώ κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις σκελετών: ο ευθύς και ο καμπύλος σχεδιασμός. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας υπέδειξαν πως η διαμόρφωση του σκελετού επηρεάζει την οριακή προσαρμογή των πρόσθιων κεραμικών σκελετών ζirkονίας και επομένως την κατανομή των τάσεων που ασκούνται κατά τη λειτουργία των γνάθων.⁴⁰ Οι Bona και συν.(2013) είχαν στόχο να περιγράψουν τη διαδοχική επεξεργασία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων των ολοκεραμικών στεφανών και της γέφυρας με βάση τις εικόνες που παρέχονται από τη σάρωση με μικρό-CT, προσομοιώνοντας την κατανομή των τάσεων των αποκαταστάσεων υπό φόρτιση. Τα ευρήματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι οι υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις εντοπίστηκαν στην αυχενική περιοχή των συνδέσμων και του ενδιαμέσου εντός του στρώματος του σκελετού.⁸⁰ Εφελκυστικές τάσεις μικρότερου μεγέθους εντοπίστηκαν επίσης στα αυχενικά όρια και στην μασητική επιφάνεια των συνδέσμων. Παρόμοια κατανομή τάσεων παρατηρήθηκε εντός της στρώσης πορσελάνης. Ωστόσο, σίγουρα στην ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων σε ψαθυρά υλικά όπως το ζirkόνιο δεν συμβάλλει η ύπαρξη προβόλου. Πράγμα που επιβεβαιώνει αρχικά η ομάδα ερευνητών των Ohlmann και συν.(2009) με την μελέτη τους που είχαν ως στόχο να αξιολογήσουν τις τιμές των φορτίων θραύσης για γέφυρες με πρόβολο κατασκευασμένες με σκελετό ζirkονίας και να δοκιμάσουν την επιρροή του σχεδιασμού του σκελετού σχετικά με τις τιμές του φορτίου θραύσης. Τα ευρήματα της έρευνας έδειξαν πως ανεξάρτητα από το σχεδιασμό της γέφυρα (τυπικός ή με αυχενικό σιρίτι) και το πάχος του σκελετού της γέφυρας δεν ενδείκνυται η χρήση προβόλου σε ολοκεραμικές αποκαταστάσεις για την αντικατάσταση ενός γομφίου.⁷² Το ίδιο ήρθαν να επιβεβαιώσουν με τη μελέτη τους και οι Ogar και συν.(2021). Οι τελευταίοι χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να αξιολογήσουν την κατανομή των τάσεων στον οστίτη ιστό, τα εμφυτεύματα και το προσθετικό σκελετό από ζirkονία που

επικαλύπτεται με υπερκατασκευή υαλοκεραμικού διπυριτικού λιθίου μιας αποκατάστασης που στηρίζεται μόνο σε τέσσερα εμφυτεύματα χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά σχέδια, συμπεριλαμβανομένων 2 διαφορετικών άπω κλίσεων (15 και 30 μοίρες) και 2 μηκών προβόλου (5 και 9 mm). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι οι τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης αυξήθηκαν στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει το δεξιό οπίσθιο εμφύτευμα όταν αυξήθηκε το μήκος του προβόλου καθώς και ότι η αύξηση του μήκους του προβόλου οδήγησε επίσης σε αύξηση των τιμών von Misses στη δομή του πυρήνα ζιρκονίας.⁸¹

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επειδή ο μεγάλος αριθμός των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη αφορά έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων και παραμέτρων σχεδίασης που επηρεάζουν την αντοχή των ολοκεραμικών προσθέσεων, τα συμπεράσματα παρατίθενται ομαδοποιημένα. Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής έρευνας στα οποία διεξήχθη η παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

A. Αναφορικά με το υλικό κατασκευής της αποκατάστασης:

- Το ζirkόνιο μπορεί να χρησιμεύσει ως κατάλληλο υλικό για την κατασκευή ολοκεραμικών οπίσθιων γεφυρών πολλαπλών μονάδων, αλλά είναι κρίσιμο ο σχεδιασμός της γέφυρας να λαμβάνει υπόψη τη σημασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη μέγιστη τάση και την αντίστοιχη πιθανότητα αστοχίας.
- Οι πολυκρύσταλλοι υτρίου-τετραγωνικής ζirkονίας παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε θραύση από τα υαλοκεραμικά διπυριτικού λιθίου.
- Οι ολοκεραμικές αποκαταστάσεις κατά σειρά αυξανόμενης αντοχής στην κόπωση είναι : νανοσύνθετα, διπυριτικό λίθιο και ζirkονία.
- Με τη βελτιωμένη αντοχή των σύγχρονων υλικών του πυρήνα, οι τάσεις στον πυρήνα δεν θα πρέπει να επηρεάζουν σημαντικά τη μακροζωία της αποκατάστασης.
- Η θερμική αναντιστοιχία των δύο κεραμικών μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στην πορσελάνη επικάλυψης- επομένως, συνιστάται η διαφορά θερμικής διαστολής των δύο κεραμικών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.
- Σε πολλές διαμορφώσεις, τα πιο κρίσιμα σημεία θα είναι στην πορσελάνη επικάλυψης κοντά στη διεπιφάνεια με τον πυρήνα.

- Η συγκέντρωση τάσεων και οι μέγιστες τιμές τάσεων εμφανίζονται, γενικά, σε οξύαιχμες επιφάνειες (π.χ. φύματα) της επικάλυψης ανεξάρτητα από τη θερμική αναντιστοιχία πυρήνα/κεραμικού επικάλυψης και το πρωτόκολλο ψύξης που χρησιμοποιείται, υποδεικνύοντας τη σημασία της γεωμετρίας στην κατανομή των τάσεων.

B. Αναφορικά με την παρασκευή των δοντιών στηριγμάτων της αποκατάστασης:

- Στα δύο είδη παρασκευής (με βάθρο και με λοξοτόμηση οξύαιχμη σαν μαχαίρι) και τα δύο έχουν ισχυρή αντοχή στη θραύση μεγαλύτερη από τις δυνάμεις δήξης οπότε θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο. Βεβαίως λόγω της μεγαλύτερης αντοχής της παρασκευής με βάθρο συνιστάται η χρήση του καθώς θα μπορούσε να βελτιώσει την εμβιομηχανική απόδοση των οπίσθιων στεφάνων από αλουμίνια.
- Με τη βελτιωμένη αντοχή των σύγχρονων υλικών του πυρήνα, οι τάσεις στον πυρήνα δεν θα πρέπει να επηρεάζουν σημαντικά τη μακροζωία της αποκατάστασης. Σε πολλές διαμορφώσεις, τα πιο κρίσιμα σημεία θα είναι στην πορσελάνη επικάλυψης κοντά στη διεπιφάνεια με τον πυρήνα.
- Το αυχενικό όριο είναι κρίσιμο για την πορσελάνη επικάλυψης, ιδίως όταν καταλήγει σε Παρασκευή οξύαιχμη (σαν μαχαίρι)- επομένως, συνιστάται μια Παρασκευή με βάθρο.
- Η χαμηλότερη τιμή μέγιστης κύριας τάσης δημιουργείται σε σκελετούς που αντισταθμίζουν την κωνικότητα της μασητικής επιφάνειας της παρασκευής αυξάνοντας το πάχος τοιχώματος του κεραμικού πυρήνα.
- Η κωνικότητα της παρασκευής μειώνει το φορτίο κατά τη θραύση των στεφανών από μονολιθική ζirkονία ενώ ένας μεγαλύτερος προκαθορισμένος χώρος κόνιας (-60μm) βελτιώνει την έδραση αλλά δεν επηρεάζει το φορτίο κατά τη θραύση.

Γ. Αναφορικά με τη χρήση αυχενικών σιριτιών:

- Οι διαφορετικοί σχεδιασμοί σκελετού (με χρήση σιριτιού ή χωρίς) δεν βελτιώνουν τη αντοχή στην κόπωση των μεταλλοκεραμικών και των ολοκεραμικών στεφανών. Όταν ο σχεδιασμός του πυρήνα είτε αυτός είναι μεταλλικός είτε κεραμικός παρέχει υποστήριξη και δίνει τη δυνατότητα να διατηρείται ένα σταθερό ομοιόμορφο πάχος (μέχρι 1,5 mm) στην πορσελάνη επικάλυψης αυξάνεται η αντοχή στη θραύση.
- Η στήριξη της πορσελάνης επικάλυψης είναι σημαντική για την ακεραιότητα των οπίσθιων στεφανών ζirkονίας ενώ η υποστήριξη με τη χρήση των σιριτιών είναι καθοριστικός παράγοντας.
- Η αύξηση του ύψους του σιριτιού λειτουργεί ως απορροφητής τάσεων σε περιοχές κοντά στα όρια της στεφάνης.
- Οι στεφάνες ζirkονίας με αυχενικό σιρίτι έχουν υψηλότερο φορτίο κατά τη θραύση από τις απλές στεφάνες ζirkονίας-κεραμικό επικάλυψης αλλά χαμηλότερο από τις μονολιθικές στεφάνες.

Δ. Αναφορικά με τους συνδέσμους:

- Οι ολοκεραμικές γέφυρες αποτυγχάνουν λόγω καταγμάτων που ξεκινούν από την επιφάνεια των ούλων ενός συνδέσμου και διαδίδονται προς το ενδιάμεσο. Η υψηλότερη συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων στις γέφυρες εντοπίζεται στο υλικό του σκελετού, στην αυχενική περιοχή (ή βλεννογόνια επιφάνεια) των συνδέσμων και του ενδιάμεσου.
- Ο σχεδιασμός και οι διαστάσεις των συνδέσμων καθώς και το μέγεθος της γέφυρας μπορεί να είναι οι βασικοί παράγοντες πρόκλησης καταγμάτων σε σχετικά χαμηλά φορτία σύγκλεισης αλλά υψηλές τάσεις θραύσης.
- Οι πολυκρύσταλλοι υτρίου-τετραγωνικής ζirkονίας παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε θραύση από τα υαλοκεραμικά διπυριτικού λιθίου.
- Η αντοχή σε θραύση των κεραμικών υλικών πυρήνα επηρεάζεται από την τεχνική κατασκευής και το σχεδιασμό του συνδέσμου.

- Η αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου σε μονολιθικές γέφυρες ζirkονίας αυξάνει την αντοχή στην καμπτική θραύση. Η θραύση των ολοκεραμικών γεφυρών 3 μονάδων επηρεάζεται από την τροποποίηση της ακτίνας καμπυλότητας του συνδέσμου εντός του μασητικού χώρου.
- Η μασητική επιφάνεια του συνδέσμου μπορεί να σχεδιαστεί τόσο αιχμηρή όσο είναι πρακτικά δυνατό για την αισθητική μιας ολοκεραμικής 3μελούς γέφυρας, υπό την προϋπόθεση ότι η ουλική περιοχή έχει μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας.
- Ο σχεδιασμός αιχμηρού σχήματος του συνδέσμου δεν συνιστάται για περιοχές υψηλής καταπόνησης με περιορισμένο μεσοφραγματικό ύψος. Συνιστάται ελάχιστη διάμετρος συνδέσμου 4,0 mm για ολοκεραμική γέφυρα με βάση την ζirkονία με μεγάλο εύρος ενδιαμέσων ή αντικατάσταση γομφίων. Η μέση αντοχή σε θραύση των γεφυρών με σύνδεσμο 4 × 4 mm είναι σημαντικά υψηλότερη από τις γέφυρες με σύνδεσμο 3 × 3 mm.
- Η διατομή του συνδέσμου 9 mm² για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας τριών μονάδων, η οποία συνιστάται από τον κατασκευαστή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη προσοχή καθώς δεν επαρκεί σε όλες τις περιπτώσεις. Μια διάσταση συνδέσμου 12 mm² είναι αρκετά ισχυρή για μια μονολιθική γέφυρα ζirkονίας τριών μονάδων, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό της καμπυλότητας του συνδέσμου.
- Η αντοχή σε κάμψη των κεραμικών με βάση το Y-TZP δεν επηρεάζεται μόνο από τη διάσταση αλλά και από το σχήμα του συνδέσμου. Ο στρογγυλός σχεδιασμός του συνδέσμου μπορεί να αντέξει καλύτερα τις δυνάμεις σύγκλισης από τον αιχμηρό σχεδιασμό.
- Συνιστώνται σύνδεσμοι με ελάχιστη διατομή 2×3=6 mm² για πρόσθια γέφυρα, εφόσον έχουν στρογγυλή καμπυλότητα. Η υψηλότερη αντοχή σε κάμψη παρατηρείται σε δοκίμια με τριγωνικούς συνδέσμους όταν η δύναμη εφαρμόζεται κάθετα.

- Ο σχεδιασμός στρογγυλού συνδέσμου αποδείχθηκε καλύτερος από τον τριγωνικό και τον οβάλ σύνδεσμο κατά την εφαρμογή σε πλάγια φορτία. Όλοι οι σχεδιασμοί συνδέσμων άντεξαν τόσο τις κάθετες όσο και τις οριζόντιες δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κανονικής μάσησης.

E. Αναφορικά με γενικότερες παραμέτρους σχεδίασης γεφυρών:

- Ο σχεδιασμός των οδοντιατρικών αποκαταστάσεων θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί ώστε να επιτευχθεί ομαλότερη κατανομή των τάσεων και, ταυτόχρονα, υψηλότερη φέρουσα ικανότητα.
- Η τροποποίηση του σχεδιασμού του σκελετού ζirkονίας με τη χρήση σιριτιού που εκτείνεται και στο ενδιάμεσο αλλά και στους συνδέσμους παρουσίασε σημαντική βελτίωση της αντοχής στη θραύση σε σύγκριση με τον συμβατικό σχεδιασμό.
- Οι γέφυρες από ζirkονία δεν μπορούν να συνιστώνται ανεπιφύλακτα για την αντικατάσταση ενός ελλείποντος δοντιού, παρά το γεγονός ότι η ζirkονία είναι πιο ανθεκτικό κεραμικό υλικό. Αυτό γιατί κανένα κεραμικό υλικό δεν μπορεί να υποστηρίξει την ύπαρξη προβόλου.
- Σε περιπτώσεις γέφυρας στηριζόμενης σε εμφυτεύματα η ύπαρξη προβόλου αυξάνει τις τιμές της μέγιστης κύριας τάσης στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει το οπίσθιο εμφύτευμα σε αποκαταστάσεις με μακρύ πρόβολο όταν αυξάνεται η κλίση του οπίσθιου εμφυτεύματος. Οι τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης αυξάνονται στο φλοιώδες οστό που περιβάλλει το οπίσθιο εμφύτευμα όταν αυξάνεται το μήκος του προβόλου. Οι τιμές von Misses αυξάνονται στο σκελετό ζirkονίας όταν αυξάνεται η κλίση του εμφυτεύματος.
- Η ευκαμψία του σκελετού μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην οριακή προσαρμογή των συγκρατούμενων με ένθετα ακίνητων οδοντικών προσθέσεων και τα πιο άκαμπτα υλικά θα μπορούσαν να μεταφέρουν την τάση στο περιθώριο (χώρο κονιάς) σε μικρότερο βαθμό από ό,τι τα εύκαμπτα υλικά.

- Τέλος, όσο αφορά τη διαμόρφωση της καμπυλότητας του σκελετού κατά την πάρειο-υπερώια διεύθυνση επί του οριζοντίου επιπέδου, το σχήμα του σκελετού (ευθύ ή καμπύλο) επηρεάζει την οριακή εφαρμογή των πρόσθιων τετραμερών κεραμικών σκελετών ζirkονίας. Πράγμα που με τη σειρά του επηρεάζει την μακροζωία της αποκατάστασης. Ένα πιο ευθύ σχήμα φαίνεται να εφαρμόζει καλύτερα από ένα κυρτό και επομένως να είναι πιο ανθεκτικό.

ΣΤ. Μονολιθικές vs κατασκευών με πυρήνα και επικάλυψη πορσελάνης:

- Ταυτόχρονα, επισημαίνεται ότι η ακεραιότητα της μονολιθικής δομής της στεφάνης μπορεί εύκολα να τεθεί σε κίνδυνο από ελαττώματα κατασκευής και ατέλειες προετοιμασίας ή τοποθέτησης, από ακούσια αποκόλληση, υπερβολική αμμοβολή και φινίρισμα με φρέζα, καθώς και από κόπωση.
- Η προσθήκη επικάλυψης κεραμικού σε πυρήνες διπυριτικού λιθίου αυξάνει την αντοχή σε κόπωση του δικεραμικού συστήματος. Για αυτό το σύστημα, η αύξηση του πάχους του κεραμικού επικάλυψης, παρά του κεραμικού του πυρήνα, μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στη συνολική αντοχή σε κόπωση.

Ζ. Ολοκεραμικές γέφυρες με συγκρατήματα ένθετα:

- Επιπλέον, όσο αφορά τη στήριξη ολοκεραμικών γεφυρών σε ένθετα, η αύξηση των διαστάσεων του συνδέσμου μειώνει τα φορτία θραύσης. Τόσο το διπυριτικό λίθιο όσο και η ζirkονία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το υλικό επιλογής για όλες τις κεραμικές οδοντιατρικές προσθέσεις που συγκρατούνται με ένθετα. Οι εφελκυστικές τάσεις συγκεντρώνονται στην ουλική πλευρά του συνδέσμου και η συντριπτική πλειονότητα των κεραμικών αστοχιών ξεκινά σε αυτό το σημείο.
- Με τη χρήση μιας εξιδανικευμένης μορφής παρασκευής ενθέτου και ενός βελτιστοποιημένου σχεδιασμού γέφυρας που δίνει έμφαση στη διεύρυνση των συνδέσμων οι δυνάμεις που προέρχονται από τη μάσηση μπορούν να κατανεμηθούν επαρκώς σε επίπεδα που βρίσκονται εντός της αντοχής θραύσης των σημερινών κεραμικών.

- Η ευκαμψία του σκελετού μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην οριακή προσαρμογή των συγκρατούμενων με ένθετα ακίνητων οδοντικών προσθέσεων και τα πιο άκαμπτα υλικά θα μπορούσαν να μεταφέρουν την τάση στο περιθώριο (χώρο κονίας) σε μικρότερο βαθμό από ό,τι τα εύκαμπτα υλικά.
- Τόσο το διπυριτικό λίθιο όσο και η ζirkονία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το υλικό επιλογής για όλες τις κεραμικές οδοντιατρικές προσθέσεις που συγκρατούνται με ένθετα.

ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Καθώς ο τομέας της οδοντιατρικής συνεχίζει να εξελίσσεται, η σημασία του σχεδιασμού για την ενίσχυση της αντοχής σε θραύση των ολοκεραμικών σκελετών παραμένει υψίστης σημασίας. Με βάση την υπάρχουσα έρευνα που διεξήχθη σε γεωμετρικά και μη γεωμετρικά δοκίμια για αντοχή σε κάμψη, αντοχή σε κόπωση και με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, αναδύονται διάφοροι πολλά υποσχόμενοι δρόμοι για περαιτέρω διερεύνηση.

Πρώτον, η ενσωμάτωση προηγμένων υλικών και τεχνικών κατασκευής, όπως η προσθετική κατασκευή ή νέες κεραμικές συνθέσεις, θα μπορούσαν να προσφέρουν καινοτόμες λύσεις για τη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης των ολοκεραμικών σκελετών. Η διερεύνηση της συμβατότητας αυτών των νέων υλικών και τεχνικών με τα υπάρχοντα κλινικά πρωτόκολλα θα ήταν απαραίτητη για την επιτυχή ενσωμάτωσή τους στην οδοντιατρική πρακτική. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της προσομοίωσης της μάσησης, θα μπορούσε να διευκολύνει την προγνωστική μοντελοποίηση και να βοηθήσει στην ανάπτυξη ακόμα πιο εξατομικευμένων σχεδιασμών σκελετών προσαρμοσμένων στις ατομικές ανάγκες των ασθενών.

Συμπερασματικά, η επιδίωξη περαιτέρω έρευνας στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των ολοκεραμικών σκελετών ενέχει τεράστιες δυνατότητες για την πρόοδο του τομέα της επανορθωτικής οδοντιατρικής. Αξιοποιώντας μεθοδολογίες αιχμής, οι ερευνητές μπορούν να ανοίξουν το δρόμο για την ανάπτυξη στιβαρών, αισθητικά ευχάριστων και μακράς διάρκειας οδοντιατρικών αποκαταστάσεων που ενισχύουν τη φροντίδα και την ικανοποίηση των ασθενών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Taylor JA. History of Dentistry: A Practical Treatise for the Use of ~~Dent~~ Students and Practitioners. Philadelphia, PA: Lea & Febiger; 1922: 142-156.
2. Asgar K. Casting metals in dentistry: past-present-future. Adv Dent Res 1998;2:33-43.
3. Kelly JR, Nishimura I, Campbell SD. Ceramics in dentistry: historical roots and current perspectives. J Prosthet Dent. 1996;75:18-32.
4. Leinfelder KF, Kurdziolek SM. Contemporary CAD/CAM technologies: the evolution of restorative systems. Pract Proced Aesthet Dent. 2004;16:224-231.
5. Krishna JV, Kumar VS, Savadi RC. Evolution of metal-free ceramics. J Indian Prosthodont Soc. 2009;9:70-75.
6. Powers JM, Sakaguchi RL. Craig's Restorative Dental Materials. St. Louis, MO: Mosby Elsevier; 2006:444-.
7. Wagner WC, Chu TM. Biaxial flexural strength and indentation fracture toughness of three new dental core ceramics. J Prosthet Dent. 1996;76:140-144.
8. Ariko K. Evaluation of marginal fitness of tetragonal zirconia polycrystal all-ceramic restorations. Kokubyo Gakkai Zasshi. 2003;70:114-123
9. Marquardt P, Strub JR. Survival rates of IPS Empress 2 all-ceramic crowns and fixed partial dentures: results of a 5-year prospective clinical study. Quintessence Int. 2006;37:253-259.
10. Gregg Harvey, DDS A History of Dental Ceramics. Compendium. May 2010 volume 31 Issue 4. [A History of Dental Ceramics | May 2010 | Compendium \(aegisdentalnetwork.com\)](http://aegisdentalnetwork.com)

11. M.Tatarciuc, D. Diaconu-Popa, A.Vitalariu, Digital Dentistry ,The Medical-Surgical Journal, 2019;123:735-738
12. M. Stanley, A.G. Paz, I. Miguel, C. Coachman Fully digital workflow, integrating dental scan, smile design and CAD-CAM: case report BMC Oral Health (2018) 18:134:2-8
13. M.Tatarciuc, D. Diaconu-Popa, A.Vitalariu, Digital Technologies in dental laboratory Rom J Oral Rehabil 2021;13:122-131.
14. A Kessler, R Hickel, M Reymus; 3D Printing in Dentistry—State of the Art. *Qr Dent.* 2019; 45: 30–40.
15. <https://www.anima.gr/sla-3dprinting-technology>.
16. Natali AN. Dental biomechanics. 1st ed., London; CRC Press; 2003 pp 88-213.
17. Sakaguchi RL, Ferracane J, Powers JM. Graig’s restorative dental materials. 14th ed. Philadelphia, PA: Elsevier; 2018, pp. 34-81, 84-197, 253-275.
18. Dimitriadis K, Sfikas AK, Kamnis S, Tsolka P, Agathopoulos S. Influence of heat treatment on the microstructure and the physical and mechanical properties of dental highly translucent zirconia. *J Adv Prosthodont.* 2022;14:96–107.
19. Dimitriadis K, Moschovas D, Agathopoulos S. Microstructure and mechanical properties of zirconia stabilized with increasing Y₂O₃, for use in dental restorations. *Int J Appl Ceram Technol.* 2023;20:350–359.
20. ISO 6872. Dentistry - Ceramic materials. 3rd ed., International Standards Organization (ISO); Geneva; Switzerland, 2008.
21. Sakar-Deliormanli A, Güden M. Microhardness and fracture toughness of dental materials by indentation method. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2006;76:257-64.
22. Žmak I, Ćorić D, Mandić V, Ćurković L. Hardness and indentation fracture toughness of slip cast alumina and alumina-zirconia ceramics. *Materials (Basel)* 2019;13:122.

23. Ηλιάδης Θ, Ζηνέλης Σ. Βιολογικά Υλικά-Εισαγωγή στη μηχανική των ιστών. 1^η έκδοση, Αθήνα; Π.Χ Πασχαλίδης; 2006:Σελ 20-25.
24. Βατάλης Α. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών. 1^η έκδοση. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη 2009:Σελ 103-241, 425-468.
25. Wang K, Abdalla AA, Khaleel MA, Hilal N, Khraisheh MK. Mechanical properties of water desalination and wastewater treatment membranes. Desalination. 2017;401:190-205.
26. [chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2114/%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%97_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%95%CE%99%CE%A3_%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%9F%CE%A3_2022/B2.%20Mihanikes_Idiotites_Metallon_Keramikon_Polymeron_2022.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2114/%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%97_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%95%CE%99%CE%A3_%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%9F%CE%A3_2022/B2.%20Mihanikes_Idiotites_Metallon_Keramikon_Polymeron_2022.pdf)
27. Παντελής Δ. Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά. 1^η έκδοση, Αθήνα; Παπασωτηρίου; 2008:107-135
28. Lee SK, Wilson PR. Fracture of all-ceramic crowns with varying core elastic moduli. Australian Dental Journal 2000;45:103-107.
29. Fischer H, Marx R. Fracture toughness of dental ceramics: comparison of bending and indentation method. Dent Mater 2002;18:12-9.
30. Lohbauer U, Krämer N, Petschelt A, Frankenberger R. Correlation of in vitro fatigue data and in vivo clinical performance of a glassceramic material. Dent Mater. 2008 Jan;24(1):39-44.
31. Nishioka G, Prochnow C, Firmino A, Amaral M, Botino MA, Valandro EF, Marques de MR. Fatigue strength of several dental ceramics indicated for CAD- CAM monolithic restorations. Braz Oral Res 2018;32:e53:1-8

32. Dimitriadis K, Moschovas D, Tulyaganov DU, Agathopoulos S. Glass-ceramics in the CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ system as potential dental restorative materials. *Int J Appl Ceram Technol.* 2021;18:1938–1949.
33. Fraga S, Pereira GK, Freitas M, Kleverlaan CJ, Valandro LF, May LG. Loading frequencies up to 20Hz as an alternative to accelerate fatigue strength tests in Y-TZP ceramic. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2016;61:79-86.
34. Villefort RF, Amaral M, Pereira GK, Campos TM, Zhang Y, Botino MA et al. Effects of two grading techniques of zirconia material on the fatigue limit of full-contour 3-unit fixed dental prostheses. *Dent Mater.* 2017;33(4):e155-164.
35. Zucuni CP, Guilardi LF, Fraga S, May LG, Pereira GK, Valandro LF. CAD/CAM machining Vs pre-sintering inlab fabrication techniques of Y-TZP ceramic specimens: effects on their mechanical fatigue behavior. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2017 Jul;71:201-208.
36. Venturini AB, Prochnow C, May LG, Kleverlaan CJ, Valandro LF. Fatigue failure load of feldspathic ceramic crowns after hydrofluoric acid etching at different concentrations. *J Prosthet Dent.* 2018;119:278-85.
37. Niihara K, Morena R, Hasselman DPH. Evaluation of KIC of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios. *J Mater Sci* 1982;1:13–16.
38. Lakshmi, R. D., Abraham, A., Sekar, V., & Hariharan, A. (2015). Influence of connector dimensions on the stress distribution of monolithic zirconia and lithium-di-silicate inlay retained fixed dental prostheses—A 3D finite element analysis. *Tanta Dental Journal*, 12, 56-64
39. Zhang, Y., Mai, Z., Barani, A., Bush, M., & Lawn, B. (2016). Fracture-resistant monolithic dental crowns. *Dent Mater*, 32, 442-449.
40. Komine F., Gerds T., Witkowski S., Strub JR. (2005) Influence of framework configuration on the marginal adaptation of zirconium dioxide ceramic anterior four-unit frameworks. *Acta Odontol Scand*, 2005, 63.6: 361-366.

41. Taskonak, B., Yan, J., Mecholsky Jr, J. J., Sertgöz, A., & Koçak, A. (2008). Fractographic analyses of zirconia-based fixed partial dentures. *Dent Mater*, 24:1077-1082.
42. Altamimi A., Tripodakis A., Eliadis G., Hirayama H. (2014) Comparison of fracture characterization of bilayered zirconia/fluorapatite and monolithic lithium disilicate all ceramic crowns. *Int J Esthet Dent* . 2014 9:98-110.
43. Schriwer, C., Gjerdet, N. R., Arola, D., & Øilo, M. (2021). The effect of preparation taper on the resistance to fracture of monolithic zirconia crowns. *Dent Mater*, 37, e427-e434.
44. Kim, J., Dhital, S., Zhivago, P., Kaizer, M. R., & Zhang, Y. (2018). Viscoelastic finite element analysis of residual stresses in porcelain-veneered zirconia dental crowns. *J Mech Behav Biomed* 2018,82:202-209.
45. Baldassarri, M., Stappert, C. F., Wolff, M. S., Thompson, V. P., & Zhang, Y. (2012). Residual stresses in porcelain-veneered zirconia prostheses. *Dent mater*, 28:873-879.
46. Belli, R., Frankenberger, R., Appelt, A., Schmit, J., Baratieri, L. N., Greil, P., & Lohbauer, U. (2013). Thermal-induced residual stresses affect the lifetime of zirconia–veneer crowns. *Dent mater*, 29:181-190.
47. Nicolaisen, M. H., Bahrami, G., Finlay, S., & Isidor, F. (2014). Comparison of fatigue resistance and failure modes between metal-ceramic and all-ceramic crowns by cyclic loading in water. *J Dent*, 42:1613-1620.
48. Kohorst, P., Ditmer, M. P., Borchers, L., & Stiesch-Scholz, M. (2008). Influence of cyclic fatigue in water on the load-bearing capacity of dental bridges made of zirconia. *Acta Biomater* 2008,4:1440-1447.
49. Heintze, S. D., Monreal, D., Reinhardt, M., Eser, A., Peschke, A., Reinshagen, J., & Rousson, V. (2018). Fatigue resistance of all-ceramic fixed partial dentures– Fatigue tests and finite element analysis. *Dent Mater*, 34:494-507.

50. Kaladevi, M.; Ramaprabha, B. Biomechanics in restorative dentistry. *Int. J. Appl Dent. Sci*, 2020, 6: 251-256.
51. Προμπονάς, Α. *Μεθοδολογία έρευνας στην οδοντική τεχνολογία: Βασικές αρχές* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. 2015:Σελ. 73-83, 105-136.
52. Αρχείο:Photoelasticity and color on a plastic plate.jpg - Βικιπαίδεια (wikipedia.org)
53. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων - Βικιπαίδεια (wikipedia.org)
54. Fracture - Wikipedia
55. Casado, José, et al. Topic6. Fast Fracture, Brittle Fracture and Toughness Materials This Work Is Published under a License: Creative Commons BYNC—SA 4.0.
56. Fracture mechanics - Wikipedia
57. Jalalian E, Aletaha NS. The effect of two marginal designs (chamfer and shoulder) on the fracture resistance of all ceramic restorations, Inceram: An in vitro study. *Journal of Prosthodontic Research*. 2011;55:121–5.
58. A Kokubo Y, Tsumita M, Kano T, Fukushima S. The influence of zirconia coping designs on the fracture load of all-ceramic molar crowns. *Dental Materials Journal*. 2011;30:281–5.
59. Øilo M, Kvam K, Gjerdet NR. Load at fracture of monolithic and bilayered zirconia crowns with and without a cervical zirconia collar. *The Journal of Prosthet Dent*. 2016;115:630–6.
60. Badran N, Abdel Kader S, Alabbassy F. Effect of Incisal Porcelain Veneering Thickness on the Fracture Resistance of CAD/CAM Zirconia All-Ceramic Anterior Crowns. *Int J Dent* 2019;1:1–12
61. Schriwer C, Gjerdet NR, Arola D, Øilo M. The effect of preparation taper on the resistance to fracture of monolithic zirconia crowns. *Dent Mater* 37:e427–34.

62. Belli R, Monteiro S, Baratieri LN, Kate H, Petschelt A, Lohbauer U. Photoelastic Assessment of Residual Stresses in Zirconia-Veneer Crowns. *J Dent Res.* 2012 91:16–20.
63. Dibner AC, Kelly JR. Fatigue strength of bilayered ceramics under cyclic loading as a function of core veneer thickness ratios. *J Prosthet Dent* 2016;115:335-340.
64. Fardin VP, de Paula VG, Bonfante EA, Coelho PG, Bonfante G. Lifetime prediction of zirconia and metal ceramic crowns loaded on marginal ridges. *Dent Mater* 2016;32:1543–1554.
65. De Jager N, Pallav P, Feilzer AJ. The influence of design parameters on the FEA-determined stress distribution in CAD–CAM produced all-ceramic dental crowns. *Dent Mater* 2005;21:242–251.
66. Ha SR, Kim SH, Han JS, Yoo SH, Jeong SC, Lee JB, et al. The influence of various core designs on stress distribution in the veneered zirconia crown: a finite element analysis study. *J Adv Prosthodont* 2013;52:187-191
67. Corazza PH, Feitosa SA, Borges ALS, Della Bona A. Influence of convergence angle of tooth preparation on the fracture resistance of Y-TZP-based all-ceramic restorations. *Dent Mater.* 2013;29:339–347.
68. Oh W, Anusavice KJ. Effect of connector design on the fracture resistance of all-ceramic fixed partial dentures. *J Prosthet Dent* 2002;87:536–542.
69. LARSSON C, HOLM L, LÖVGREN N, KOKUBO Y, VULT VON STEYERN P. Fracture strength of four-unit Y-TZP FPD cores designed with varying connector diameter. An in-vitro study. *J Oral Rehabil.* 2007;34:702–709.
70. Taskonak B, Yan J, Mecholsky JJ, Sertgöz A, Koçak A. Fractographic analyses of zirconia-based fixed partial dentures. *Dent Mater* 2008 24:1077–1082.
71. Plengsombut K, Brewer JD, Monaco EA, Davis EL. Effect of two connector designs on the fracture resistance of all-ceramic core materials for fixed dental prostheses. *J Prosthet Dent.* 2009;101:166–173.
72. Ohlmann B, Marienburg K, Gabbert O, Hassel A, Gilde H, Rammelsberg P. Fracture-Load Values of All-Ceramic Cantilevered FPDs with Different Framework Designs. *Int J Prosthodont.* 2009;22:49–52.

73. Salimi H, Mosharraf R, Savabi O. Effect of framework design on fracture resistance of zirconium oxide posterior fixed partial dentures. *Dental Res* 2012;9:764–769.
74. Partiyan A, Osman E, Rayyan MM, Aboushelib M, Ibrahim A, Jimbo R. Fracture resistance of three-unit zirconia fixed partial denture with modified framework. *Odontology*. 2016;105:62–67.
75. Hafezeqoran A, Koodaryan R, Hemmati Y, Akbarzadeh A. Effect of connector size and design on the fracture resistance of monolithic zirconia fixed dental prosthesis. *J Dent Res* 2020 144:218–222.
76. Quinn GD, Studart AR, Hebert C, VerHoef JR, Arola D. Fatigue of zirconia and dental bridge geometry: Design implications. *Dent Mater*. 2010;26:1133–1136.
77. Hamza TA, Atia MA, El-Hossary MMK, Mosleh IE, Shokry TE, Wee AG. Flexural strength of small connector designs of zirconia-based partial fixed dental prostheses. *J Prosthet Dent*. 2016;115:224–229.
78. Ahmed M, Reddy K, Shastry Ym, Aditya Sv, Babu Pj. Evaluation of flexural strength of Zirconia using three different connector designs: An in vitro study. *J Indian Prostho Society*. 2020;20:285-290.
79. Thompson M, Field C, Swain M. The all-ceramic, inlay supported fixed partial denture. Part 2. Fixed partial denture design: a finite element analysis. *Aust Dent J*. 2011;56:302–311.
80. Della Bona Á, Borba M, Beneti P, Duan Y, Griggs JA. Three-dimensional finite element modelling of all-ceramic restorations based on micro-CT. *J Dent*. 2013;41:412–419.
81. Oyar P, Durkan R, Deste G. The effect of the design of a mandibular implant-supported zirconia prosthesis on stress distribution. *J Prosthet Dent*. 2021;125:502.e1–11.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- EIKONA 1 www.amangirrbach.com
- EIKONA 2A www.amangirrbach.com
- EIKONA 2B How to find the dental milling machine for you - Bristol CadCam
- EIKONA 3 TruLaser Cell 3000 | TRUMPF
- EIKONA 4 Formlabs Announces Expansions Of Its Dental 3-D Printing Offerings (forbes.com)
- EIKONA 5 A KAI B SLA | 3D Printing Technology (anima.gr)
- EIKONA 6 Green Mechanic: SLS vs SLM: 6 Points Comparison between Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering (green-mechanic.com)
- EIKONA 7 (PDF) State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels (researchgate.net)
- EIKONA 8 TruPrint 2000 | TRUMPF
- EIKONA 9 Digital Dentistry | Digital Implant Technology Workflows (straumann.com)
- Dental laboratory scanners — features and benefits (3shape.com)
- For dental technicians - exocad
- EIKONA 10 A (PDF) Mechanical properties of water desalination and wastewater treatment membranes (researchgate.net)
- EIKONA10 B
Mihanikes_Idiotites_Metallon_Keramikon_Polymeron_2022.pdf
- EIKONA 11 What is an Endurance Limit (Se)? - Definition from Corrosionpedia
- EIKONA 12 (PDF) The impact of frenulum height on strains in maxillary denture bases (researchgate.net)

- EIKONA 13 (PDF) Contact Zone Evaluation of Dental Implants Using Digital Photoelasticity (researchgate.net)
- EIKONA 14 2335-02451702069G.pdf (ceon.rs)
- EIKONA 15 Fracture Mechanics[4458].pdf
- EIKONA 16 Fracture mechanics - Wikipedia
- EIKONA 17 Fracture Mechanics[4458].pdf

