



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Αυτόνομο Αμάξι: Τεχνολογική Εξέλιξη, Δυσκολίες και

Προοπτικές

Συγγραφέας

Παναγιώτης Κρικέτος

Αριθμός Μητρώου: 71444988

Επιβλέπων

Δρ. Χρήστος Δρόσος

Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος, 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION

ENGINEERING

**Autonomous Car: Technological Development, Challenges and
Prospects**

Author

Panagiotis Kriketos

Registration Number: 71444988

Supervisor

Dr. Christos Drosos

Assistant Professor

Athens, June, 2024


Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Κρικέτος, με αριθμό μητρώου 71444988, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής 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».

Ο Δηλών


.....

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

α/α	Όνομα / Επώνυμο	Ψηφιακή Υπογραφή
1	ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ Επίκουρος Καθηγητής	
2	ΛΑΣΚΑΡΗΣ ΝΙΚΟΣ Επίκουρος Καθηγητής	
3	ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΕΔΙΠ	

Περίληψη

Με την ταχύτατη πρόοδο στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, τα αυτόνομα αυτοκίνητα υπόσχονται να επαναπροσδιορίσουν την κινητικότητα και να επηρεάσουν θεμελιωδώς τον τρόπο ζωής μας μειώνοντας τα ατυχήματα και την κυκλοφοριακή συμφόρηση, ενώ παράλληλα προσφέρει νέες ευκαιρίες για κινητικότητα σε άτομα με αναπηρίες και ηλικιωμένους. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάμε τις κύριες τεχνολογικές καινοτομίες που εμπλέκονται στην αυτόνομη οδήγηση, τις προκλήσεις που αντιμετωπίζονται, όπως η ασφάλεια, η νομοθεσία και η αποδοχή από το κοινό, καθώς και τις προοπτικές για το μέλλον της αυτοκινητοβιομηχανίας στο πλαίσιο των αυτόνομων οχημάτων.

Λέξεις κλειδιά:

Αυτόνομα Οχήματα, Τεχνητή Νοημοσύνη, Αισθητήρες, Κυβερνοασφάλεια, Νομοθεσία, Προηγμένα Συστήματα Υποβοήθησης Οδήγησης (ADAS), Οδική Ασφάλεια, V2X Επικοινωνία, Περιβαλλοντικά Οφέλη, Κοινωνικές Επιπτώσεις

Abstract

With the rapid advancement of the automotive industry, autonomous cars promise to redefine mobility and fundamentally impact our way of life by reducing accidents and traffic congestion, while offering new opportunities for mobility for the disabled and the elderly.. In the present. thesis we study the main technological innovations involved in autonomous driving, the challenges faced such as safety, legislation and public acceptance, and the outlook for the future of the automotive industry in the context of autonomous vehicles.

Keywords:

Autonomous Vehicles, Artificial Intelligence, Sensors, Cybersecurity, Legislation, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Road Safety, V2X Communication, Environmental Benefits, Social Impacts.

Πίνακας συντομογραφιών

Συντομογραφία	Επεξήγηση
AV	Autonomous Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
V2V	Vehicle to Vehicle
V2N	Vehicle to Network
ADAS	Προηγμένα Συστήματα Υποβοήθησης Οδήγησης
LIDAR	Light Detection and ranging
Radar	Radio Detection and ranging
SRR	Small Range Radar
MRR	Medium Range Radar
LRR	Long Range Radar
ACC	Adaptive Cruise Control
AV	Autonomous Devices/Αυτόνομα αυτοκίνητα
OEM/ΚΑΕ	Original Equipment Manufacturer - Κατασκευαστής αρχικού εξοπλισμού

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Σκοπός της έρευνας	15
1.2 Γενικά.....	16
1.2 Ορισμός των αυτόνομων οχημάτων.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	23
2.1 Ιστορική αναδρομή	23
2.2 Πως λειτουργεί ένα αυτόνομο όχημα	23
2.2.1 Τι είναι το Lidar	25
2.2.2 Η χρήση της τεχνολογίας RADAR στα αυτόνομα οχήματα	27
2.2.3 Κάμερες και οπτική αναγνώριση	28
2.2.4 Παγκόσμιο Σύστημα Τοποθεσίας (GPS).....	29
2.2.5 Προηγμένοι αλγόριθμοι και μηχανική μάθηση	30
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των AV	30
2.4 Ασφάλεια και ατυχήματα	31
2.5 Συμφόρηση	32
2.6 Ταξί και ιδιοκτησία αυτοκινήτου	32
2.7 AV και ηλεκτρικά οχήματα	34
2.8 Χωρητικότητα των δρόμων.....	35
2.9 Χρήση γης.....	35
2.10 Περιβάλλον (ενέργεια και εκπομπές).....	36
2.11 Πρόβλεψη ζήτησης	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	38
3.1 Τεχνικές προκλήσεις.....	38
3.2 Κοινωνικές και νομικές προκλήσεις	40
3.3 Οικονομικές προκλήσεις.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.....	43
4.1 Πώς τα AV θα μπορούσαν να μεταμορφώσουν την αγορά επιβατικών αυτοκινήτων	45
4.2 Υψηλότερα επίπεδα αυτοματοποίησης	46
4.3 Η νομική υποστήριξη και οι κανονισμοί είναι κρίσιμοι	50
4.3.1 Δημιουργία νέας στρατηγικής σε E&A	52
4.4 Ανάπτυξη στρατηγικών με κέντρο τον πελάτη go-to-market	52
4.4.1 Επιχειρηματικό πλάνο από την αρχή έως το τέλος.....	53
4.5 Επιπτώσεις για τους προμηθευτές	54
4.6 Υψηλό δυναμικό ανάπτυξης αλλά και υψηλή αβεβαιότητα και ρίσκο	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

Κατάλογος Εικόνων – Σχημάτων – Διαγραμμάτων

Εικόνα 1: Εσωτερικό από αυτόνομο αμάξι	11
Εικόνα 2: Αναμενόμενες προδιαγραφές αυτόνομων οχημάτων έως το έτος 2020 [12]....	16
Εικόνα 3: Αναπαράσταση των συνδεδεμένων οχημάτων και υποδομών [16]	19
Εικόνα 4: Επίπεδα αυτοματισμού SAE	20
Εικόνα 5: Επίπεδα αυτοματισμού NHTSA	21
Εικόνα 6: Επίπεδα αυτόνομης οδήγησης σύμφωνα με την SAE.....	22
Εικόνα 7: Λειτουργία Lidar	25
Εικόνα 8: Αναπαράσταση λειτουργίας Lidar	26
Εικόνα 9: Radar πάνω σε αυτόνομα οχήματα.....	27
Εικόνα 10: Πως η χρήση των αυτόνομων αυτοκινήτων μπορεί να δημιουργήσει 300-500 δισεκατομμύρια έσοδα μέχρι το 2035, Πηγή: McKinsey & Company.....	44
Εικόνα 11: Εκτιμώμενες πωλήσεις αυτόνομων αυτοκινήτων, Πηγή: McKinsey & Company	46
Εικόνα 12: Ενδιαφέρον για τη λειτουργία αυτόνομης οδήγησης κατά την αγορά του επόμενου αυτοκινήτου	48
Εικόνα 13: Δείκτες ενδιαφέροντος των καταναλωτών για την κατοχή πλήρως αυτόνομων οχημάτων	50
Εικόνα 14: Δεξαμενές υλικών αυτόνομων αυτοκινήτων, Πηγή: McKinsey Center of Mobility	55

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή



Εικόνα 1: Εσωτερικό από αυτόνομο αμάξι

Η αυτοκινητοβιομηχανία βρίσκεται σε μια από τις πιο ριζικές μεταβάσεις της ιστορίας της, καθώς η τεχνολογία των αυτόνομων αμαξιών προχωρά με ταχύτατους ρυθμούς. Τα αυτόνομα οχήματα, τα οποία ονομάζονται επίσης αυτοοδηγούμενα, αντιπροσωπεύουν μια καινοτομία που υπόσχεται να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε και χρησιμοποιούμε τις μεταφορές. Αυτή η τεχνολογία, που κάποτε φαινόταν σαν όνειρο επιστημονικής φαντασίας, τώρα είναι πολύ κοντά στο να γίνει καθημερινή πραγματικότητα.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των αυτόνομων αμαξιών έχει προχωρήσει με γοργούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια, καθοδηγούμενη από τις προόδους στην τεχνητή νοημοσύνη, τη μηχανική μάθηση και την επεξεργασία δεδομένων. Ο σκοπός της αυτονομίας στα οχήματα είναι να δημιουργηθεί ένα σύστημα οδήγησης που να μπορεί να εκτελεί όλες τις λειτουργίες ενός ανθρώπινου οδηγού χωρίς καμία παρέμβαση. Αυτά τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες που καταγράφουν συνεχώς το περιβάλλον τους και επεξεργάζονται αυτά τα δεδομένα μέσω προηγμένων αλγορίθμων για να λάβουν ασφαλείς και αποτελεσματικές αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο.

Η υιοθέτηση αυτόνομων οχημάτων έχει τη δυνατότητα να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις αστικές και αγροτικές κοινότητες. Μπορεί να μειώσει τα τροχαία ατυχήματα που οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος, να βελτιώσει την αποδοτικότητα της κυκλοφορίας, να προσφέρει αυξημένη κινητικότητα σε άτομα με αναπηρίες και ηλικιωμένους, και να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών. Παρά τα πλεονεκτήματα, η διαδρομή προς την ευρεία υιοθέτηση αυτόνομων αμαξιών

είναι γεμάτη με προκλήσεις και ανησυχίες, που κυμαίνονται από την ασφάλεια και την ηθική έως τη ρύθμιση και την κοινωνική αποδοχή.

Η αυτονομία στα οχήματα χωρίζεται σε πέντε επίπεδα, όπως ορίζονται από την Εταιρεία Αυτοκινήτου Μηχανικών (SAE). Στο επίπεδο 0, δεν υπάρχει αυτονομία και ο οδηγός έχει πλήρη έλεγχο του οχήματος. Στο επίπεδο 1, το όχημα μπορεί να εκτελεί μεμονωμένες εργασίες όπως η διατήρηση της ταχύτητας μέσω του συστήματος προσαρμοστικού cruise control. Στο επίπεδο 2, τα συστήματα μπορούν να ελέγχουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση ταυτόχρονα, αλλά ο οδηγός πρέπει να παραμένει σε εγρήγορση και έτοιμος να αναλάβει τον έλεγχο. Το επίπεδο 3 προσφέρει μεγαλύτερη αυτονομία, επιτρέποντας στον οδηγό να αποσπάται η προσοχή του για μικρά χρονικά διαστήματα, αν και πρέπει να είναι έτοιμος να παρέμβει όταν απαιτείται. Το επίπεδο 4 επιτρέπει την πλήρη αυτονομία υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως σε περιοχές χαμηλής ταχύτητας ή προκαθορισμένες διαδρομές. Τέλος, στο επίπεδο 5, τα οχήματα είναι πλήρως αυτόνομα και δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση σε καμία περίπτωση.

Η τεχνολογία των αυτόνομων αμαξιών βασίζεται σε ένα συνδυασμό αισθητήρων, όπως κάμερες, ραντάρ, lidar και υπερήχους, που παρέχουν μια συνολική εικόνα του περιβάλλοντος του οχήματος. Οι κάμερες καταγράφουν οπτικές πληροφορίες και βοηθούν στην αναγνώριση σημάτων και εμποδίων, το ραντάρ μετρά τις αποστάσεις και τις ταχύτητες των αντικειμένων γύρω από το όχημα, το lidar δημιουργεί τρισδιάστατους χάρτες του περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας λέιζερ, και οι υπερηχητικοί αισθητήρες βοηθούν στην ανίχνευση κοντινών εμποδίων.

Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση είναι οι κινητήριες δυνάμεις πίσω από τη λήψη αποφάσεων στα αυτόνομα οχήματα. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στα συστήματα να αναλύουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, να αναγνωρίζουν μοτίβα, να προβλέπουν πιθανές καταστάσεις και να επιλέγουν την καταλληλότερη αντίδραση. Οι αλγόριθμοι μάθησης μπορούν να βελτιώνονται συνεχώς καθώς συλλέγουν και αναλύουν νέα δεδομένα από το περιβάλλον τους.

Η επικοινωνία V2X (Vehicle-to-Everything) παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη των αυτόνομων αμαξιών. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στα οχήματα να ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλα οχήματα, υποδομές, πεζούς και δίκτυα, βελτιώνοντας έτσι την κατανόηση των κυκλοφοριακών συνθηκών και των επικείμενων κινδύνων. Η επικοινωνία V2V (Vehicle-to-Vehicle) επιτρέπει στα οχήματα να μοιράζονται πληροφορίες για την ταχύτητα, τη θέση και την κατεύθυνση, ενώ η επικοινωνία V2I (Vehicle-to-Infrastructure) επιτρέπει την επικοινωνία με φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες και άλλες υποδομές.

Η ανάπτυξη των Προηγμένων Συστημάτων Υποβοήθησης Οδήγησης (ADAS) έχει επίσης σημαντική επίδραση στην εξέλιξη της αυτονομίας. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν λειτουργίες όπως η αυτόματη πέδηση έκτακτης ανάγκης, η υποβοήθηση στη διατήρηση λωρίδας, η προσαρμοστική κρουαζιέρα και η αναγνώριση πινακίδων κυκλοφορίας. Τα ADAS είναι τα θεμέλια των αυτόνομων συστημάτων, παρέχοντας βασικές λειτουργίες που προωθούν την ασφάλεια και την άνεση των οδηγών.

Παρά τις σημαντικές προόδους στην τεχνολογία, η υιοθέτηση των αυτόνομων αμαξιών αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις. Μία από τις μεγαλύτερες είναι η ανάπτυξη ενός ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου που να επιτρέπει την ασφαλή και αποτελεσματική ενσωμάτωση αυτών των οχημάτων στους δημόσιους δρόμους. Οι κανονισμοί ποικίλλουν σημαντικά από χώρα σε χώρα και ακόμη και από πολιτεία σε πολιτεία, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο περιβάλλον για τους κατασκευαστές και τους φορείς εκμετάλλευσης.

Η ασφάλεια των αυτόνομων αμαξιών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα. Αν και τα αυτόνομα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τα τροχαία ατυχήματα, η απόλυτη αξιοπιστία τους είναι απαραίτητη. Επιπλέον, τα ηθικά διλήμματα που προκύπτουν από τις αποφάσεις των αυτόνομων συστημάτων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης αποτελούν σοβαρές προκλήσεις. Πολλοί ερευνητές και φορείς προσπαθούν να αναπτύξουν αλγόριθμους που να λαμβάνουν υπόψη ηθικούς παράγοντες κατά τη λήψη αποφάσεων.

Η κυβερνοασφάλεια είναι επίσης ένα κρίσιμο θέμα για τα αυτόνομα οχήματα. Δεδομένου ότι αυτά τα οχήματα βασίζονται σε δίκτυα και επικοινωνιακά συστήματα για τη λειτουργία τους, είναι ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις. Η προστασία αυτών των συστημάτων από κακόβουλες επιθέσεις είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των επιβατών και την αποφυγή πιθανών ατυχημάτων.

Η εισαγωγή αυτόνομων οχημάτων ενδέχεται να έχει σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι επαγγελματίες οδηγοί ενδέχεται να δουν τις θέσεις εργασίας τους να κινδυνεύουν, ενώ η κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στην υιοθέτηση. Επιπλέον, η ανάγκη για προσαρμογή της αστικής υποδομής και η αναδιοργάνωση των πόλεων θα απαιτήσει σημαντικές επενδύσεις και στρατηγικό σχεδιασμό.

Η επιτυχής υιοθέτηση των αυτόνομων αμαξιών μπορεί να επιφέρει πολλαπλά οφέλη. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι η μείωση των τροχαίων ατυχημάτων, τα οποία συχνά οφείλονται σε ανθρώπινα λάθη. Με την εξάλειψη του ανθρώπινου παράγοντα, οι δρόμοι μπορούν να γίνουν πιο ασφαλείς, μειώνοντας τον αριθμό των τραυματισμών και των θανάτων.

Τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την κυκλοφοριακή ροή και να μειώσουν τη συμφόρηση. Μέσω της συνεχούς επικοινωνίας και του συντονισμού μεταξύ των οχημάτων, η

κίνηση στους δρόμους μπορεί να γίνει πιο ομαλή και αποδοτική, εξοικονομώντας χρόνο και καύσιμα. Επιπλέον, η αποδοτικότερη διαχείριση της κυκλοφορίας μπορεί να μειώσει τις εκπομπές ρύπων, συμβάλλοντας στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Η αυξημένη κινητικότητα είναι ένα άλλο σημαντικό όφελος των αυτόνομων αμαξιών. Άτομα που δεν μπορούν να οδηγήσουν, όπως οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με αναπηρίες, θα μπορούν να απολαμβάνουν μεγαλύτερη ανεξαρτησία και πρόσβαση σε υπηρεσίες και ευκαιρίες. Αυτό θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα ζωής αυτών των ατόμων, προσφέροντάς τους μεγαλύτερη αυτονομία.

Η ανάπτυξη των αυτόνομων αμαξιών αντιπροσωπεύει μια επαναστατική αλλαγή στον τομέα των μεταφορών, με τεράστιες προοπτικές για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας, τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και την ενίσχυση της κινητικότητας για όλους. Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, όπως η ανάγκη για κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο, η ασφάλεια των συστημάτων και η αντιμετώπιση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων. Η επιτυχής ενσωμάτωση των αυτόνομων αμαξιών στην καθημερινή ζωή απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, βιομηχανίας και κοινωνίας για την επίλυση αυτών των προκλήσεων και την αξιοποίηση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία των αυτόνομων αμαξιών προσφέρει μια συναρπαστική ματιά στο μέλλον των μεταφορών, με την προοπτική να μεταμορφώσει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο ζούμε και μετακινούμαστε. Η πρόοδος προς την υιοθέτηση αυτών των οχημάτων θα συνεχίσει να αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια, αλλά οι δυνατότητες που προσφέρει είναι απεριόριστες. Με την κατάλληλη ανάπτυξη, ρύθμιση και κοινωνική αποδοχή, τα αυτόνομα αμάξια μπορούν να οδηγήσουν σε έναν ασφαλέστερο, πιο αποδοτικό και περιβαλλοντικά φιλικό κόσμο.

1.1 Σκοπός της έρευνας

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εξέταση της τεχνολογικής εξέλιξης, των δυσκολιών και των προοπτικών που σχετίζονται με τα αυτόνομα αμάξια. Η εμφάνιση αυτών των οχημάτων προβάλλεται ως πηγή επαναστατικών αλλαγών στον τομέα των μεταφορών, ενώ παράλληλα θέτει ερωτήματα και προκλήσεις που απαιτούν λεπτομερή ανάλυση και έρευνα. Στόχος της είναι η προσδιορισμός των τεχνολογικών καινοτομιών που καθιστούν δυνατή την αυτονομία των οχημάτων, η ανάλυση των βασικών προκλήσεων που αντιμετωπίζει η υιοθέτησή τους, καθώς και η διερεύνηση των μελλοντικών προοπτικών και των επιπτώσεών τους στην κοινωνία και την οικονομία.

Η τεχνολογία των αυτόνομων αμαξιών βασίζεται σε ποικίλες καινοτομίες στους τομείς της τεχνητής νοημοσύνης, της ρομποτικής και της επεξεργασίας δεδομένων. Ο στόχος είναι η ανάλυση των τεχνολογικών στοιχείων που επιτρέπουν την αυτονομία στα οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων όπως οι κάμερες, τα ραντάρ και τα συστήματα lidar, και η ανάλυση του πώς τα δεδομένα από αυτούς τους αισθητήρες χρησιμοποιούνται από τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης για τη λήψη αποφάσεων.

Επιπλέον, η εργασία εξετάζει την πρόοδο στην τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση που επιτρέπουν στα αυτόνομα αμάξια να αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, να αναγνωρίζουν μοτίβα και να προβλέπουν καταστάσεις. Εξετάζονται επίσης οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των συστημάτων λήψης αποφάσεων.

Μία από τις μεγαλύτερες τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα αυτόνομα αμάξια είναι η εξασφάλιση της ασφάλειάς τους, η οποία απαιτεί αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων αισθητήρων και αποφάσεων. Επιπλέον, η προστασία από κυβερνοεπιθέσεις, η ανάπτυξη ενός ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου.

Συνεχίζοντας, η προστασία από κυβερνοεπιθέσεις, η ανάπτυξη ενός ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου και η επίλυση ηθικών διλημάτων αποτελούν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προτού τα αυτόνομα οχήματα γίνουν ευρέως διαδεδομένα.

Εκτός από τις τεχνικές προκλήσεις, υπάρχουν και οι κοινωνικοοικονομικές πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η μετάβαση στα αυτόνομα αμάξια μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απασχόληση, καθώς ορισμένες επαγγελματικές κατηγορίες, όπως οι οδηγοί φορτηγών ή ταξί, ενδέχεται να μειωθούν. Επίσης, ανοίγουν νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες στους τομείς της τεχνολογίας, της ασφάλειας και των υπηρεσιών μεταφορών.

Η έρευνα σχετικά με τα αυτόνομα αμάξια ανοίγει επίσης νέες προοπτικές για την ανάπτυξη βιώσιμων και έξυπνων πόλεων. Με τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και των ατυχημάτων, μπορεί






να επιτευχθεί καλύτερη ποιότητα ζωής για τους κατοίκους των πόλεων. Ωστόσο, αυτή η μετάβαση πρέπει να συνοδεύεται από προσεκτικό σχεδιασμό και πολιτικές που να εξασφαλίζουν την ισότιμη πρόσβαση στη μεταφορά και την ασφάλεια.

Τέλος, η έρευνα για τα αυτόνομα αμάξια μπορεί να διαμορφώσει το μέλλον της μεταφοράς και να επηρεάσει την κοινωνία όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Απαιτείται διεπιστημονική προσέγγιση και συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, μηχανικών, κοινωνιολόγων, και πολιτικών προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες και να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που εμφανίζονται με την εισαγωγή αυτών των νέων τεχνολογιών στον κοινωνικό ιστό.

1.2 Γενικά

Οι νέες τεχνολογίες στον τομέα της επικοινωνίας και της ρομποτικής έχουν επηρεάσει σημαντικά τον καθημερινό μας τρόπο ζωής, από τον οποίο οι μεταφορές δεν αποτελούν εξαίρεση. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν δημιουργήσει την προοπτική της τεχνολογίας αυτόνομων οχημάτων (AV), η οποία στοχεύει στη μείωση των ατυχημάτων, της κατανάλωσης ενέργειας, της ρύπανσης και της συμφόρησης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την προσβασιμότητα στις μεταφορές. Αν και η ιδέα των οχημάτων χωρίς οδηγό υπάρχει εδώ και δεκαετίες, το υπερβολικό κόστος εμπόδισε την παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα [1]. Παρ' όλα αυτά, την τελευταία δεκαετία υπήρξε επιτάχυνση των προσπαθειών έρευνας και ανάπτυξης για την υλοποίηση της ιδέας των AV. Για παράδειγμα, η εμφάνιση του αυτοκινήτου της Google έφερε τα AV στο προσκήνιο [2, 3]. Επιπλέον, η αυτοκινητοβιομηχανία ξοδεύει περίπου 77 δισεκατομμύρια ευρώ παγκοσμίως για E&A προκειμένου να καλλιεργήσει την καινοτομία και να παραμείνει ανταγωνιστική [4, 5].

Traffic Ahead Many carmakers are developing prototype vehicles that are capable of driving autonomously in certain situations. The technology is likely to hit the road around 2020.

	 BMW	 Mercedes-Benz	 Nissan	 Google	 General Motors
VEHICLE	5 Series (modified)	S 500 Intelligent Drive Research Vehicle	Leaf EV (modified)	Prius and Lexus (modified)	Cadillac SRX (modified)
KEY TECHNOLOGIES	<ul style="list-style-type: none"> Video camera tracks lane markings and reads road signs Radar sensors detect objects ahead Side laser scanners Ultrasonic sensors Differential GPS Very accurate map 	<ul style="list-style-type: none"> Stereo camera sees objects ahead in 3-D Additional cameras read road signs and detect traffic lights Short- and long-range radar Infrared camera Ultrasonic sensors 	<ul style="list-style-type: none"> Front and side radar Camera Front, rear, and side laser scanners Four wide-angle cameras show the driver the car's surroundings 	<ul style="list-style-type: none"> LIDAR on the roof detects objects around the car in 3-D Camera helps detect objects Front and side radar Inertial measuring unit tracks position Wheel encoder tracks movement Very accurate map 	<ul style="list-style-type: none"> Several laser sensors Radar Differential GPS Cameras Very accurate map

Εικόνα 2: Αναμενόμενες προδιαγραφές αυτόνομων οχημάτων έως το έτος 2020 [12]

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας επικοινωνιών και η ανάγκη εξυπηρέτησης του γηράσκοντος πληθυσμού στις ανεπτυγμένες χώρες έχουν καταστήσει τα ΑΤ μια αναγκαιότητα και ένα ζωτικό επιχειρηματικό παράδειγμα [6]. Υπό το πρίσμα των διαφαινόμενων νέων ιδεών και τεχνολογιών, όπως τα κοινωνικά δίκτυα, τα έξυπνα τηλέφωνα και τα AVs, ορισμένοι μελετητές έχουν προειδοποιήσει εμφατικά ότι το τοπίο των μεταφορών αλλάζει ραγδαία [7-9]. Ένα παράδειγμα είναι η Uber που σαρώνει τις πόλεις σε βαθμό που οι εταιρείες ταξί αγωνίζονται να διατηρήσουν τις επιχειρήσεις τους και να παραμείνουν ανταγωνιστικές. Οι Manjika et al. [10] περιλαμβάνουν την αυτοματοποίηση των οχημάτων στον κατάλογο των δέκα κορυφαίων ανατρεπτικών τεχνολογιών του μέλλοντος.

Ως αποτέλεσμα του έντονου ανταγωνισμού μεταξύ των κατασκευαστών αυτοκινήτων, το έτος 2020 έχει οριστεί ως έτος ορίζοντα για την προσφορά εμπορικών οχημάτων AV στη γενική αγορά [1, 11]. Η εικόνα 2 παρέχει μια επισκόπηση του ανταγωνισμού μεταξύ των γιγάντιων κατασκευαστών αυτοκινήτων [12]. Ίσως, τα μέσα του τρέχοντος αιώνα να είναι τα χρόνια ωρίμανσης της αγοράς AV. Με βάση την ανάπτυξη και την υιοθέτηση προηγούμενων τεχνολογιών έξυπνων οχημάτων (όπως το αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων και η υβριδική-ηλεκτρική κίνηση) [13], η πρόβλεψη είναι ότι τα AV αναμένεται να αποτελούν περίπου το 50 % των πωλήσεων οχημάτων, το 30 % των οχημάτων και το 40 % του συνόλου των μετακινήσεων με οχήματα μέχρι το 2040. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά σημαντικό να είμαστε προετοιμασμένοι για τέτοια ενδεχόμενα και να κατανοήσουμε τις προκλήσεις που βρίσκονται μπροστά μας, ενώ παράλληλα να αγκαλιάσουμε και να καλωσορίσουμε τις επακόλουθες ευκαιρίες. Τα AV σχετίζονται με μια σειρά θετικών κοινωνικών επιπτώσεων, όπως ένα ασφαλέστερο σύστημα μεταφορών, χαμηλότερο κόστος μεταφορών, καθώς και με τη δυνατότητα να αποκτήσουν μια μικρή κινητικότητα τα άτομα με αναπηρία, καθώς και τα νοικοκυριά με χαμηλότερο εισόδημα. Τέτοιες θετικές επιπτώσεις είναι οι κινητήριες δυνάμεις πίσω από την εμφάνιση της τεχνολογίας AV, καθιστώντας την ένα βιώσιμο, οικονομικό μοντέλο στο εγγύς μέλλον και πέραν αυτού.

Ορισμένοι πιστεύουν ότι τα AV πρέπει να εξεταστούν μέσα από έναν ευρυγώνιο φακό, ως μια διεπιστημονική τεχνολογία. Οι Maddox κ.ά. [14] απεικόνισαν τα AV σε ένα σχήμα με δύο πρόσθετα στοιχεία για να εξασφαλίσουν ένα επιτυχημένο λειτουργικό παράδειγμα AV: "Connected" και "Big Data". Κατά συνέπεια, οι όροι "Connected" ή "Connected Vehicle" αναφέρονται στις τεχνολογίες που εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ όλων των συμμετεχόντων παραγόντων ή ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των πεζών, των αρχών και των οχημάτων, καθώς και των υποδομών. Η εικόνα 3 απεικονίζει μια εννοιολογική αναπαράσταση ενός συνδεδεμένου συστήματος. Η συνδεδεμένη συνιστώσα θα απαιτήσει τεράστιο όγκο δεδομένων από διάφορες πηγές. Ως αποτέλεσμα, ο όρος "Big Data" χρησιμοποιείται για να τονίσει τη σημασία του χειρισμού ενός τέτοιου πρωτοφανούς

όγκου πληροφοριών, για τον οποίο θα απαιτηθούν ειδικές διατάξεις, συμπεριλαμβανομένου του λογισμικού και του υλικού. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αποτελεί ή αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας σε διάφορους τομείς. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία των AV θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στο σταυροδρόμι πολλών επιστημονικών κλάδων, όπως η επιστήμη των μεταφορών, η ηλεκτρική μηχανική, τεχνολογία της πληροφορικής, μηχανική λογισμικού και εξαρτημάτων, δίκαιο, ηθική και φιλοσοφία. Σε αυτό το άρθρο, εξετάζουμε την τεχνολογία των AV από την άποψη των μεταφορών. Στόχος μας είναι να ρίξουμε φως στις γενικότερες επιπτώσεις της τεχνολογίας AV για τους μελετητές, τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους σχεδιαστές και τους επαγγελματίες που ασχολούνται με τον τομέα των μεταφορών. Ειδικότερα, αναλύουμε τα χαρακτηριστικά που αφορούν άμεσα το σχεδιασμό των μεταφορών, όπως η ασφάλεια, η κατανάλωση καυσίμων, η τιμολόγηση των δρόμων και οι απαιτήσεις στάθμευσης, η χρήση γης και η πρόβλεψη της ζήτησης. Αναφερόμαστε επίσης σε άλλα συναφή ζητήματα, όπως η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, η νομοθεσία/ρύθμιση, καθώς και σε ηθικά ζητήματα.

Στόχος είναι να αναδειχθούν οι ευκαιρίες και οι δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν από την εισαγωγή και την εφαρμογή των AVs. Αρχικά θα εξετάσουμε τα AV στο πλαίσιο των υφιστάμενων συστημάτων μεταφορών και της κοινωνίας γενικότερα, καθώς και θα ορίσουμε ορισμένες σχετικές ορολογίες. Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να δείξουμε τον αντίκτυπο των AVs για το βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο μέλλον με βάση προηγούμενες μελέτες. Για να το επιτύχουμε αυτό, εξετάσαμε πάνω από 118 αναφορές που σχετίζονται με την τεχνολογία AV οι οποίες έχουν δημοσιευτεί κυρίως τα τελευταία 5 χρόνια, ώστε να παρέχουμε μια ολοκληρωμένη και επικαιροποιημένη αφήγηση.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση των συνδεδεμένων οχημάτων και υποδομών [16]

Είναι ενδιαφέρον ότι η υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν εξετάζει τις μεθόδους με τις οποίες τα AV βρίσκουν και καθορίζουν τις διαδρομές τους στα οδικά δίκτυα (δρομολόγηση οχημάτων). Ίσως, θεωρείται ότι τα AV δεν διαφέρουν από τα άλλα αυτοκίνητα στη δρομολόγηση οχημάτων. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η τεχνολογία συνδεδεμένων οχημάτων αποτελεί απαραίτητο μέρος ενός λειτουργικού συστήματος AV.

Τέτοια δεδομένα επικοινωνίας (σε πραγματικό χρόνο) μπορούν να οδηγήσουν σε συνεργασία μεταξύ των δυνατοτήτων κατεύθυνσης των AVs, οδηγώντας σε αποτελεσματικότερο και ευφύεστερο εντοπισμό διαδρομής (ή ροής κυκλοφορίας). Τα δεδομένα πραγματικού χρόνου (συμπεριλαμβανομένου του χρόνου διαδρομής και των συμβάντων) μπορούν να επεξεργαστούν και να αναλυθούν κεντρικά, προκειμένου να υπολογιστούν και να κατευθύνουν (ή να συμβουλευθούν) τα AV προς την καλύτερη δυνατή διαδρομή. Έτσι, μπορούν να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένα και αξιόπιστα μοντέλα δρομολόγησης οχημάτων, για τα οποία χρησιμοποιούμε τον όρο πλοήγηση οχημάτων σε αυτό το χειρόγραφο. Επιπλέον, θα προτείνουμε ένα μοντέλο πλοήγησης βασισμένο στις έννοιες της οπτιμότητας του συστήματος [17, 18], το οποίο αναζητά το καλύτερο δυνατό μοτίβο κυκλοφορίας (ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου διαδρομής στο σύστημα).

1.2 Ορισμός των αυτόνομων οχημάτων

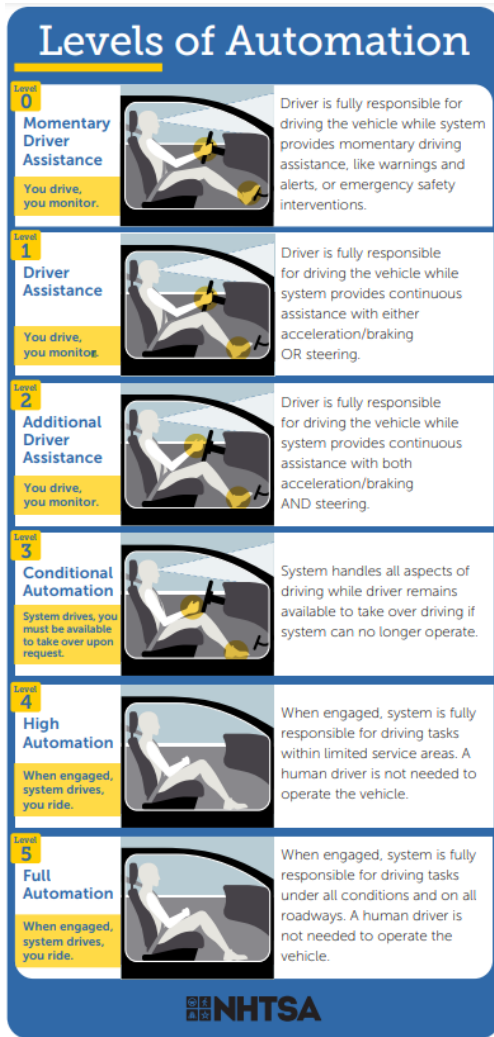
Τα αυτόνομα οχήματα αναφέρονται σε οχήματα που είναι σε θέση να λειτουργούν και να κινούνται χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης για την καθοδήγησή τους. Αυτά τα οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογία όπως αισθητήρες, κάμερες, ραντάρ και συστήματα lidar για να ανιχνεύουν το περιβάλλον τους και να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με την κίνηση και την ασφάλεια. Η λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων βασίζεται σε προηγμένους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, οι οποίοι επιτρέπουν στα οχήματα να αναγνωρίζουν πρότυπα, να προβλέπουν συμπεριφορές και να λαμβάνουν αποφάσεις βάση των δεδομένων που λαμβάνουν από τους αισθητήρες τους.

Τα αυτόνομα οχήματα χωρίζονται συνήθως σε επίπεδα αυτονομίας, τα οποία καθορίζουν το βαθμό στον οποίο το όχημα μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα. Αυτά τα επίπεδα συνήθως περιλαμβάνουν την αυτόνομη πλοήγηση, την αυτόνομη επιτήρηση και τον έλεγχο του οχήματος, καθώς και την αυτόνομη αντίδραση σε εξωτερικούς παράγοντες και καταστάσεις. Ανάλογα με το επίπεδο αυτονομίας και τις δυνατότητές τους, τα αυτόνομα οχήματα μπορεί να είναι ικανά να αντιμετωπίσουν διάφορες συνθήκες οδήγησης, όπως αυτοκινητόδρομοι, αστικές περιοχές και ακραίες καιρικές συνθήκες.

Τα επίπεδα αυτονομίας ορίζονται από την SAE και την NHTSA ως εξής για τα αυτόνομα αυτοκίνητα:

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat" When the feature requests, you must drive These automated driving features will not require you to take over driving		
What do these features do?	These are driver support features These features are limited to providing warnings and momentary assistance These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver			These are automated driving features These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met This feature can drive the vehicle under all conditions		
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions
	For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/					

Εικόνα 4: Επίπεδα αυτοματισμού SAE



Εικόνα 5: Επίπεδα αυτοματισμού NHTSA

Επίπεδο 1 (Βοήθεια Οδηγού): Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει οχήματα που μπορούν να προσφέρουν έναν βαθμό αυτοματοποίησης έχοντας μόνο ένα σύστημα όπως το cruise control ή ο αυτόματο φρενάρισμα, αλλά απαιτείται η συνεχής παρουσία και παρακολούθηση του οδηγού.

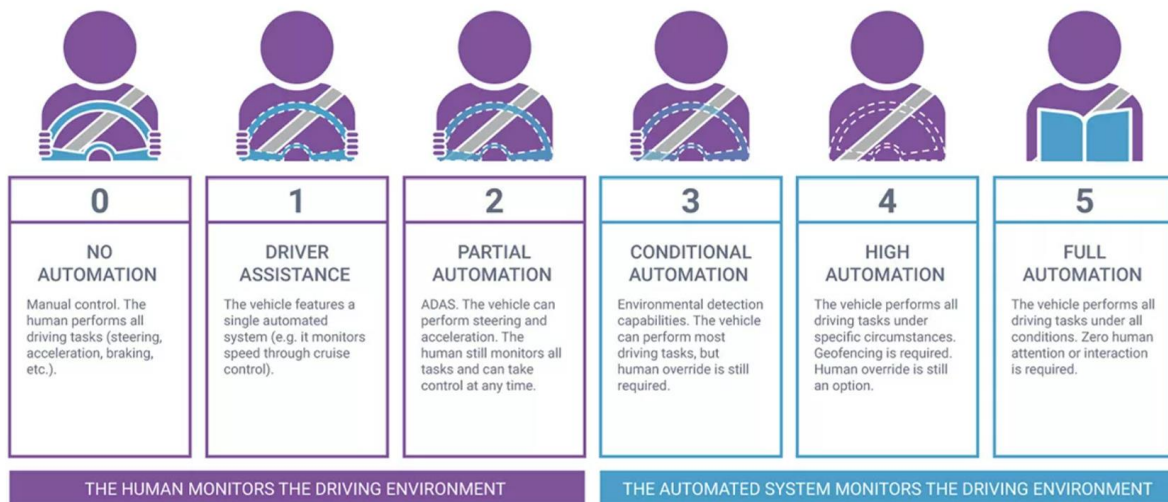
Επίπεδο 2 (Μερική Αυτονομία): Σε αυτό το επίπεδο το όχημα, με την βοήθεια προηγμένων συστημάτων υποβοήθησης οδηγού (Advanced Driver Assistance Systems ή ADAS), μπορεί να αναλάβει συγκεκριμένες λειτουργίες όπως η οδήγηση και το φρενάρισμα αλλά ο οδηγός μπορεί και πρέπει να πάρει τον έλεγχο οποτεδήποτε.

Επίπεδο 3 (Αυτονομία υπό Συνθήκες): Η μετάβαση από το 2^ο στο 3^ο στάδιο είναι τεράστια από τεχνολογικής σκοπιάς αλλά σχεδόν απαραίτητη από την προοπτική των ανθρώπων. Τα οχήματα σε αυτό το επίπεδο έχουν δυνατότητες «περιβαλλοντικής ανίχνευσης και μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις μόνα τους και να χειρίζονται όλες τις κρίσιμες λειτουργίες της οδήγησης. Παρόλα αυτά ο οδηγός πρέπει να είναι σε εγρήγορση και έτοιμος να πάρει τον έλεγχο αν το σύστημα δεν μπορεί να εκτελέσει την εργασία.

Επίπεδο 4 (Υψηλή Αυτονομία): Καθώς βρισκόμαστε μόνο ένα επίπεδο πριν την πλήρη αυτονομία τα οχήματα σε αυτή την κατηγορία μπορούν να λειτουργήσουν τελείως ανεξάρτητα σε ειδικά περιορισμένα σενάρια και περιβάλλοντα (geofencing). Ο οδηγός έχει και ακόμα την επιλογή να πάρει τον έλεγχο του οχήματος στην καθορισμένη ζώνη οδήγησης και επιβάλλεται να έχει τον έλεγχο εκτός αυτής. Τα περισσότερα οχήματα 4^{ης} κατηγορίας χρησιμοποιούνται για ridesharing.

Επίπεδο 5 (Πλήρης Αυτονομία): Το τελευταίο και υψηλότερο επίπεδο αυτονομίας όπου τα οχήματα είναι πλήρως αυτόνομα και μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε περιβάλλον και υπό οποιοδήποτε συνθήκες. Τα οχήματα αυτά δεν θα είναι καν εξοπλισμένα με τιμόνι ή πεντάλ καθώς δεν υπάρχει καθόλου η ανάγκη για ανθρώπινη επέμβαση. Οχήματα στην 5^η κατηγορία είναι ακόμα υπό έλεγχο και δοκιμή και δεν υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά.

LEVELS OF DRIVING AUTOMATION



Εικόνα 6: Επίπεδα αυτόνομης οδήγησης σύμφωνα με την SAE

Η κατανόηση αυτών των επιπέδων είναι κρίσιμη για την ανάλυση των τωρινών δυνατοτήτων και των μελλοντικών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα αυτόνομα οχήματα. Όσο τα επίπεδα αυτονομίας αυξάνονται από το 0 έως το 5, αυξάνεται μαζί και η πολυπλοκότητα των απαιτούμενων τεχνολογιών για εξασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής λειτουργίας τους. Συνεχής διάλογος μεταξύ κατασκευαστών, νομοθετών και του κοινού απαιτείται για την σωστή ενσωμάτωση και εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής.

Κεφάλαιο 2 Τεχνολογική εξέλιξη

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη προσπάθεια για οχήματα χωρίς οδηγό χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1920 [19] και πήρε ώθηση τη δεκαετία του 1980, όταν οι ερευνητές κατάφεραν να αναπτύξουν αυτοματοποιημένα συστήματα αυτοκινητοδρόμων [20, 21]. Αυτό άνοιξε το δρόμο για τη σύνδεση ημιαυτόνομων και αυτόνομων οχημάτων με την υποδομή των αυτοκινητοδρόμων. Οι πρωτοπόροι πιλότοι των AV έγιναν σε μεγάλο βαθμό στη Γερμανία και τις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια του 1980 έως το 2000 [7, 22]. Τα AV οφείλουν πολλά στην εκτεταμένη έρευνα για μη επανδρωμένο εξοπλισμό που διεξάγεται από τον αμυντικό τομέα, γνωστό ως (DARPA), την Υπηρεσία Προηγμένων Αμυντικών Ερευνητικών Προγραμμάτων των ΗΠΑ [23].

Το αυτοκίνητο χωρίς οδηγό της Google έδωσε τεράστια δημοσιότητα στα AV και προσέλκυσε μια δεξαμενή ταλέντων από διάφορους κλάδους. Μόλις τον Ιούλιο του 2015, οι στόλοι αυτοκινήτων χωρίς οδηγό της Google διένυσαν πάνω από ένα εκατομμύριο χιλιόμετρα κατά τη διάρκεια των οποίων καταγράφηκαν μόνο 14 μικροατυχήματα σε δημόσιους δρόμους. Σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο, το AV δεν έφταιγε - αντίθετα, είτε οδηγούσε χειροκίνητα είτε έφταιγε ο άλλος οδηγός [24]. Παρ' όλα αυτά, το πρώτο ατύχημα στο οποίο το αυτοκίνητο της Google βρέθηκε υπαίτιο συνέβη την Ημέρα του Αγίου Βαλεντίνου του 2016, όταν το αυτοκίνητο χτύπησε στο πλάι ενός δημόσιου λεωφορείου στην πόλη Mountain View της Silicon Valley [25].

2.2 Πως λειτουργεί ένα αυτόνομο όχημα

Σε γενικές γραμμές, τα AV λειτουργούν με βάση ένα σχέδιο τριών φάσεων γνωστό ως "αίσθηση-σχεδιασμός-δράση", το οποίο αποτελεί την προϋπόθεση πολλών ρομποτικών συστημάτων [27-29]. Μια ουσιαστική πρόκληση για τα AVs έγκειται στην κατανόηση του πολύπλοκου και δυναμικού περιβάλλοντος οδήγησης [1, 30]. Για το σκοπό αυτό, τα AV είναι εξοπλισμένα με μια ποικιλία αισθητήρων, κάμερες, ραντάρ κ.λπ., τα οποία λαμβάνουν ακατέργαστα δεδομένα και πληροφορίες από το περιβάλλον. Αυτά τα δεδομένα θα χρησιμεύσουν στη συνέχεια ως είσοδος για το λογισμικό το οποίο θα προτείνει τις κατάλληλες ενέργειες, όπως επιτάχυνση, αλλαγή λωρίδας και προσπέραση. Για την αντιμετώπιση μιας τέτοιας δύσκολης εργασίας χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός τεχνολογιών επιτήρησης [31].

Διαφορετικοί αισθητήρες λειτουργούν από κοινού για να σχηματίσουν ένα ακριβές σύστημα ανίχνευσης στα αυτόνομα οχήματα. Στα περισσότερα αυτόνομα οχήματα, ο συνδυασμός καμερών, LiDAR (ανίχνευση φωτός και αποστασιομέτρηση) και RADAR (ραδιοανίχνευση και αποστασιομέτρηση) αποτελούν το πρωταρχικό σύνολο αισθητήρων που παρέχουν τις λειτουργίες

της απεικόνισης, της ανίχνευσης, της αποστασιομέτρησης, της παρακολούθησης και της ανίχνευσης της θέσης οδήγησης για μια απρόσκοπτη οδήγηση. Αυτές οι λειτουργίες των αισθητήρων αλληλεπικαλύπτονται, γεγονός που βοηθά στην ανίχνευση του τρισδιάστατου σχήματος, της απόστασης και της ταχύτητας των κοντινών αντικειμένων.

Πιο συγκεκριμένα οι τεχνολογίες που αλληλοεπιδρούν για την λειτουργία ενός AV έχουν ως εξής:

LIDAR (Light Detection and Ranging)

Οι αισθητήρες LIDAR εκπέμπουν λέιζερ και μετράνε τον χρόνο που χρειάζεται για να επιστρέψει αφού ανακλαστεί από τα αντικείμενα μπροστά τους. Έχοντας τις παραπάνω μετρήσεις, ο αισθητήρας μπορεί να γνωρίζει την ακριβή θέση των αντικειμένων σε σχέση με αυτόν και επιτρέπει στο όχημα να δημιουργεί λεπτομερείς τρισδιάστατους χάρτες του περιβάλλοντος αμέσως τριγύρω του.

RADAR (Radio Detection and Ranging)

Οι αισθητήρες RADAR μέσω ραδιοκυμάτων εντοπίζουν αντικείμενα και μετρούν τις αποστάσεις και τις ταχύτητές τους. Οι αισθητήρες είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς μπορεί να ανιχνεύσει την θέση άλλων οχημάτων και πεζών ακόμα και σε αντίξοες καιρικές συνθήκες όπου άλλοι αισθητήρες όπως οι LIDAR μπορεί να μην λειτουργούσαν αποτελεσματικά.

Κάμερες και οπτική αναγνώριση

Οι κάμερες παρέχουν οπτικά δεδομένα που απαιτούνται για την αναγνώριση δρόμων, πινακίδων σήμανσης, φωτεινών σηματοδοτών, άλλων οχημάτων, εμποδίων και πεζών. Όταν οι κάμερες έρθουν σε συνδυασμό με προηγμένους αλγόριθμους οπτικής αναγνώρισης και μηχανικής μάθησης επιτρέπουν την ερμηνεία του κόσμου γύρω από το όχημα.

GPS και συστήματα πλοήγησης

Τα συστήματα αυτά παρέχουν στο όχημα γεωγραφικές πληροφορίες ζωτικής σημασίας επιτρέποντας τοποθέτηση και πλοήγηση του οχήματος σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στο όχημα να γνωρίζει πάντα την θέση του και να μπορεί να καθορίζει την ιδανική διαδρομή προς το προορισμό του.

Προηγμένοι αλγόριθμοι και μηχανική μάθηση

Τα δεδομένα όλων των αισθητήρων, όσο λεπτομερείς και να είναι, αν δεν μπορεί το όχημα να τα επεξεργαστεί, ενσωματώσει και αξιοποιήσει τότε είναι άχρηστα από μόνα τους. Οι προηγμένοι αλγόριθμοι σε συνεργασία με την μηχανική μάθηση καλούνται λοιπόν στο ρόλο του διερμηνέα και του συντάκτη. Συλλέγουν όλες τις πληροφορίες από τους αισθητήρες, τις επεξεργάζονται και παίρνουν μια σειρά αποφάσεων για τις κινήσεις που θα πρέπει να ακολουθήσει το όχημα διασφαλίζοντας την ομαλή, αποτελεσματική και ασφαλή οδήγησή του.

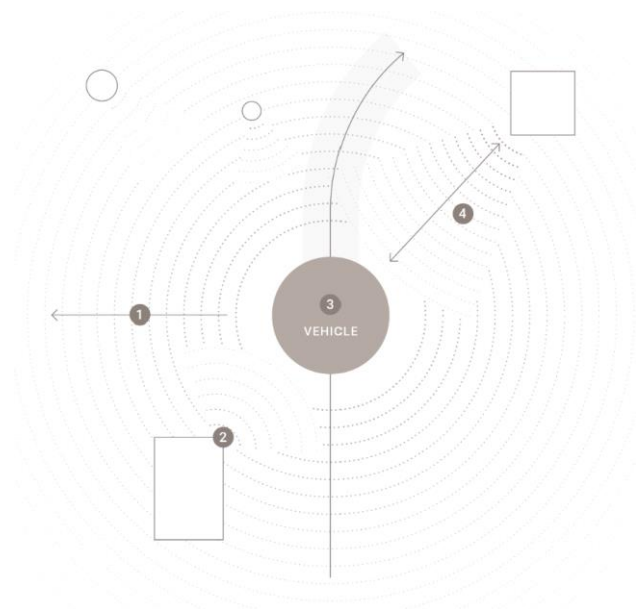
2.2.1 Τι είναι το Lidar

Η σάρωση ανίχνευσης φωτός και εμβέλειας (LIDAR) είναι η τελευταία εξέλιξη στην τοπογραφική τεχνολογία, η οποία εξελίσσεται πάνω στους ώμους των προκατόχων της - του σόναρ και του ραντάρ. Αντί να χρησιμοποιεί ηχητικά ή ραδιοκύματα για τη σάρωση του περιβάλλοντός του, το lidar χρησιμοποιεί παλμούς φωτός λέιζερ.

Με τον τρόπο αυτό, τα συστήματα lidar μπορούν κυριολεκτικά να χαρτογραφήσουν το περιβάλλον τους με την ταχύτητα του φωτός. Η ευελιξία του στον άμεσο αέρα και στο κενό του διαστήματος επιτρέπει στο lidar να λειτουργεί με ένα οπτικό σήμα μικρού μήκους κύματος, κοντά στο υπέρυθρο - με αποτέλεσμα να επιφέρει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σάρωσης από ό,τι θα μπορούσαν να επιτρέψουν μεγαλύτερα κύματα, όπως τα μικροκύματα.

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τη NASA και τον αμερικανικό στρατό πριν από 45 χρόνια για την παρακολούθηση των αποστάσεων από τη Σελήνη και τους δορυφόρους. Το 1995, η πρώτη εμπορική χρήση του lidar ξεκίνησε από ένα πρόγραμμα της Γεωλογικής Υπηρεσίας των Ηνωμένων Πολιτειών για τη χαρτογράφηση της ανάπτυξης της παράκτιας βλάστησης στο νησί Assateague.

Καθώς τα συστήματα lidar έγιναν πιο συμπαγή, παρουσιάστηκαν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, αξιοποιώντας την ευελιξία, την ακρίβεια και την άνευ προηγουμένου ταχεία απόκτηση δεδομένων της τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες αξιοποιούν τις δυνατότητες lidar ως βασικό στοιχείο στον αγώνα τους για την ανάπτυξη ασφαλών, αυτοκινούμενων οχημάτων.



Εικόνα 7: Λειτουργία Lidar

Από απόσταση, το lidar λειτουργεί πολύ παρόμοια με το σόναρ. Τα συστήματα σόναρ εκπέμπουν ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις μέχρι να έρθουν σε επαφή με ένα αντικείμενο, με αποτέλεσμα ένα ηχητικό κύμα που ανακλάται και ανακατευθύνεται πίσω στην πηγή. Η απόσταση του αντικειμένου υπολογίζεται στη συνέχεια με βάση το χρόνο που χρειάστηκε η ηχώ για να επιστρέψει, σε σχέση με τη γνωστή ταχύτητα του ήχου.

Τα συστήματα Lidar λειτουργούν με την ίδια αρχή, αλλά με την ταχύτητα του φωτός - πάνω από 1.000.000 φορές ταχύτερα από την ταχύτητα του ήχου. Αντί να εκπέμπουν ηχητικά κύματα, μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα από εκατοντάδες χιλιάδες παλμούς λέιζερ κάθε δευτερόλεπτο. Ένας ενσωματωμένος υπολογιστής καταγράφει το σημείο ανάκλασης κάθε λέιζερ, μεταφράζοντας αυτό το ταχέως "νέφος σημείων" σε μια κινούμενη τρισδιάστατη αναπαράσταση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 8: Αναπαράσταση λειτουργίας Lidar

Ένα σύστημα lidar αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία: έναν πομπό για την εκπομπή παλμών λέιζερ, έναν δέκτη για την αναχαίτιση της ηχούς των παλμών, ένα οπτικό σύστημα ανάλυσης για την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου και έναν ισχυρό υπολογιστή για την απεικόνιση μιας ζωντανής, τρισδιάστατης εικόνας του περιβάλλοντος του συστήματος.

Κατά την ενσωμάτωση πολλαπλών πομπών λέιζερ, οι δυνατότητες παρακολούθησης αυξάνονται εκθετικά, λαμβάνοντας ταυτόχρονα εκατομμύρια μεμονωμένα σημεία ανάκλασης. Οι συνεχείς αυθόρμητες ενημερώσεις δημιουργούν ένα εκπληκτικό επίπεδο λεπτομέρειας και εμβέλειας δεδομένων.

Χρήσεις του Lidar

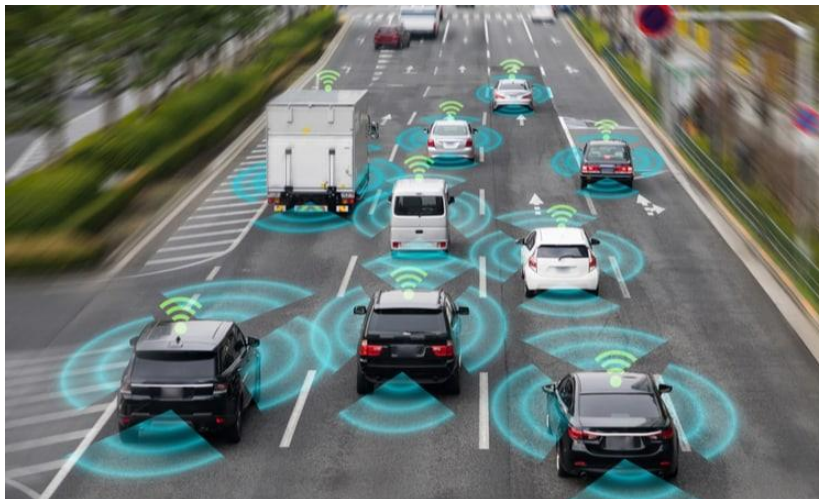
Η αυξανόμενη ισχύς και η φορητότητα των συστημάτων lidar αγκαλιάζονται καθώς ενσωματώνονται σε νέες και συναρπαστικές ερευνητικές λειτουργίες, σε παραγωγές του Χόλιγουντ και - το σημαντικότερο - στη μετατροπή του τρόπου με τον οποίο διασχίζουμε τους δρόμους μας. Οικολογικοί

οργανισμοί, για παράδειγμα, το έχουν χρησιμοποιήσει για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των δέντρων σε εκτεταμένα οικοσυστήματα. Αεροπλάνα εξοπλισμένα με lidar πετούν πάνω από το κεφάλι και -ακόμη και όταν ταξιδεύουν με ταχύτητα πλεύσης- είναι σε θέση να καταγράψουν μεμονωμένα φύλλα και κλαδιά ανά δισεκατομμύρια με μία μόνο σάρωση.

Η NASA έχει χρησιμοποιήσει το lidar για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της στρατόσφαιρας μετρώντας από μακριά την πυκνότητα συγκεκριμένων στοιχείων στην ατμόσφαιρα, ενώ οι περιβαλλοντολόγοι το χρησιμοποιούν για να χαρτογραφήσουν την τοπογραφία του πυθμένα των ωκεανών. Οι υπηρεσίες μεταφορών έχουν επίσης αξιοποιήσει το lidar για τη χαρτογράφηση των οδικών συστημάτων και των γύρω υποδομών.

Οι κινηματογραφιστές έχουν ενσωματώσει αυτή την τεχνολογία για να χαρτογραφήσουν σπάνια περιβάλλοντα ή αντικείμενα που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή - όπως ιερά ερείπια και εύθραυστα αντικείμενα - για να τα αναπαραστήσουν σε CGI. Μια νέα γενιά αυτοκινήτων-υποκατάστατων μπορεί στην πραγματικότητα να μεταμορφωθεί ψηφιακά για να μιμηθεί οποιοδήποτε τετράτροχο όχημα, όταν χρησιμοποιούνται σαρώσεις lidar.

2.2.2 Η χρήση της τεχνολογίας RADAR στα αυτόνομα οχήματα



Εικόνα 9: Radar πάνω σε αυτόνομα οχήματα

Η αρχή λειτουργίας του LiDAR και του RADAR είναι η ίδια, αλλά αντί για τα κύματα φωτός που χρησιμοποιούνται στο LiDAR, το RADAR βασίζεται σε ραδιοκύματα. Ο χρόνος που χρειάζονται τα ραδιοκύματα για να επιστρέψουν από τα εμπόδια στη συσκευή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης, της γωνίας και της ταχύτητας του εμποδίου στο περιβάλλον του αυτόνομου οχήματος.

Το RADAR στα αυτόνομα οχήματα λειτουργεί στις συχνότητες 24, 74, 77 και 79 GHz, που αντιστοιχούν σε ραντάρ μικρής εμβέλειας (SRR), ραντάρ μεσαίας εμβέλειας (MRR) και ραντάρ μεγάλης εμβέλειας (LRR), αντίστοιχα. Το καθένα από αυτά έχει ελαφρώς διαφορετικές λειτουργίες:

Η τεχνολογία SRR επιτρέπει την παρακολούθηση τυφλών σημείων, την υποβοήθηση διατήρησης λωρίδας κυκλοφορίας και την υποβοήθηση στάθμευσης σε αυτόνομα οχήματα.

Οι αισθητήρες MRR χρησιμοποιούνται όταν η ανίχνευση εμποδίων είναι στο εύρος των 100-150 μέτρων με γωνία δέσμης που κυμαίνεται μεταξύ 30° έως 160°.

Ο αυτόματος έλεγχος απόστασης και η υποβοήθηση πέδησης υποστηρίζονται από αισθητήρες ραντάρ LRR.

Η τεχνολογία RADAR στα αυτόνομα οχήματα λειτουργεί με κύματα χιλιοστού και προσφέρει ακρίβεια χιλιοστού. Η χρήση κυμάτων χιλιοστού στα RADAR αυτόνομων οχημάτων εξασφαλίζει υψηλή ανάλυση στην ανίχνευση εμποδίων και ακρίβεια εκατοστών στον προσδιορισμό θέσης και κίνησης. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων στα αυτόνομα οχήματα, το RADAR λειτουργεί αξιόπιστα σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας, όπως συννεφιά, χιόνι, βροχή και ομίχλη.

Υπάρχουν δύο τύποι RADAR που χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα οχήματα.

- Impulse RADAR

Στο impulse RADAR, ένας παλμός εκπέμπεται από τη συσκευή και η συχνότητα του σήματος παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας.

- Radar με διαμόρφωση συχνότητας - συνεχούς κύματος (FMCW)

Στο FMCW RADAR, οι παλμοί εκπέμπονται συνεχώς. Οι παλμοί διαμορφώνονται καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας και η συχνότητα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου εκπομπής.

Το FMCW RADAR κυριαρχεί στα αυτόνομα οχήματα λόγω της υψηλής ανάλυσης στην εμβέλεια και την αντίληψη βάθους. Οι εκτεταμένες ερευνητικές μελέτες των κατασκευαστών αυτοκινήτων θα συνεχίσουν να αναπτύσσουν προηγμένες παραλλαγές του παλμικού και του FMCW RADAR. Το λογισμικό της Cadence προσφέρει εργαλεία προσομοίωσης για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων ραντάρ όχι μόνο για αυτόνομα οχήματα αλλά και για αεροδιαστημικές, αμυντικές και εμπορικές εφαρμογές.

2.2.3 Κάμερες και οπτική αναγνώριση

Οι κάμερες σε αυτόνομα οχήματα χρησιμεύουν ως τα κύρια αισθητήρια όργανα, καταγράφοντας λεπτομερείς οπτικές πληροφορίες από το περιβάλλον. Αυτές οι εξελιγμένες συσκευές είναι στρατηγικά τοποθετημένες γύρω από το όχημα για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα του περιβάλλοντός του, συμπεριλαμβανομένων άλλων οχημάτων, πεζών, οδικών σημάτων και

σημάνσεων λωρίδων. Οι κάμερες με όψη προς τα εμπρός, για παράδειγμα, παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανίχνευση εμποδίων μπροστά και στην ανάγνωση σημάτων, επιτρέποντας στο όχημα να λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την ταχύτητα και την κατεύθυνση. Οι κάμερες surround-view προσφέρουν οπτική 360 μοιρών, απαραίτητη για την πλοήγηση σε στενούς χώρους και τον εντοπισμό αντικειμένων κοντά στο όχημα που μπορεί να μην είναι ορατά από το κάθισμα του οδηγού. Τα οπτικά δεδομένα που καταγράφονται από αυτές τις κάμερες επεξεργάζονται από προηγμένους αλγόριθμους, που συχνά τροφοδοτούνται από τεχνητή νοημοσύνη, για να ερμηνεύουν με ακρίβεια τις σκηνές γύρω από το όχημα. Αυτό περιλαμβάνει τον εντοπισμό και την ταξινόμηση αντικειμένων, την πρόβλεψη των μελλοντικών κινήσεών τους και τη λήψη αποφάσεων σε κλάσματα δευτερολέπτου για τον τρόπο ασφαλούς πλοήγησης. Η ενοποίηση των δεδομένων της κάμερας με πληροφορίες από άλλους αισθητήρες, όπως το ραντάρ και το LiDAR, δημιουργεί ένα στιβαρό σύστημα που διασφαλίζει ότι το όχημα μπορεί να λειτουργεί με ασφάλεια σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών, καθιστώντας τις κάμερες απαραίτητες για την επιδίωξη μιας πλήρως αυτόνομης οδήγησης.

2.2.4 Παγκόσμιο Σύστημα Τοποθεσίας (GPS)

Το Παγκόσμιο σύστημα τοποθεσίας (GPS) είναι ένα δορυφορικό σύστημα πλοήγησης που παρέχει ακριβείς πληροφορίες τοποθεσίας και ώρας σε δέκτες GPS οπουδήποτε πάνω ή κοντά στη Γη, όπου υπάρχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή με τέσσερις ή περισσότερους δορυφόρους GPS. Αυτή η τεχνολογία, που αρχικά αναπτύχθηκε για στρατιωτική χρήση, έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι σε αμέτρητες μη στρατιωτικές εφαρμογές, μια από τις πιο προηγμένες είναι η εφαρμογή της σε αυτόνομα οχήματα. Στο πλαίσιο των αυτόνομων οχημάτων, το GPS χρησιμεύει ως βασική τεχνολογία που επιτρέπει σε αυτά τα οχήματα να κατανοήσουν τη θέση τους σε ένα παγκόσμιο πλαίσιο. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τη βασική πλοήγηση, επιτρέποντας στο όχημα να σχεδιάσει μια πορεία από την τρέχουσα θέση του στον προορισμό του. Ωστόσο, ο ρόλος του GPS στα αυτόνομα οχήματα εκτείνεται πολύ πέρα από την απλή πλοήγηση. Τα αυτόνομα οχήματα συνδυάζουν δεδομένα GPS με μια πληθώρα άλλων εισαγωγών δεδομένων από τους διάφορους αισθητήρες που διαθέτουν. Αυτή η προσέγγιση πολλαπλών αισθητήρων επιτρέπει στο όχημα να δημιουργήσει μια λεπτομερή και δυναμική εικόνα του περιβάλλοντός του. Το GPS παρέχει το γεωγραφικό πλαίσιο για αυτά τα δεδομένα, βοηθώντας το όχημα να κατανοήσει τη θέση του σε έναν χάρτη. Επιπλέον, το GPS παίζει καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα του οχήματος να εκτελεί ακριβείς ελιγμούς. Για παράδειγμα, η διατήρηση της λωρίδας κυκλοφορίας, η προσαρμογή στα όρια ταχύτητας και η εκτέλεση ασφαλών αλλαγών διαδρομής σε περίπλοκα σενάρια κυκλοφορίας απαιτούν ακριβή κατανόηση της θέσης του οχήματος. Ενώ το GPS από μόνο του δεν προσφέρει την απαραίτητη ακρίβεια για όλες αυτές τις εργασίες, η ενσωμάτωσή του με άλλους αισθητήρες και εξελιγμένους αλγόριθμους επιτρέπει στα αυτόνομα οχήματα να επιτυγχάνουν υψηλό επίπεδο ακρίβειας και ασφάλειας.

2.2.5 Προηγμένοι αλγόριθμοι και μηχανική μάθηση

Οι προηγμένοι αλγόριθμοι και η τεχνητή νοημοσύνη (AI) είναι οι κινητήριες δυνάμεις πίσω από τα αυτόνομα οχήματα, που τους επιτρέπουν να ερμηνεύουν τον κόσμο γύρω τους και να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Στον πυρήνα αυτής της τεχνολογίας βρίσκεται η μηχανική μάθηση, ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης που επιτρέπει στο σύστημα να μαθαίνει από δεδομένα και να βελτιώνει την απόδοσή του με την πάροδο του χρόνου. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τον χειρισμό της τεράστιας σειράς σεναρίων που μπορεί να συναντήσει ένα αυτόνομο όχημα στο δρόμο. Μία από τις κύριες εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης σε αυτόνομα οχήματα είναι η επεξεργασία και η ερμηνεία δεδομένων από τους διάφορους αισθητήρες του. Αυτοί οι αισθητήρες παράγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων που πρέπει να αναλυθούν γρήγορα για να χαρτογραφηθεί το περιβάλλον του οχήματος. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να προσδιορίσουν μοτίβα σε αυτά τα δεδομένα, διακρίνοντας διαφορετικά αντικείμενα όπως αυτοκίνητα, πεζούς και ποδήλατα και προβλέποντας τις μελλοντικές τους κινήσεις. Αυτή η ικανότητα είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό διαδρομής και την αποφυγή εμποδίων, διασφαλίζοντας ότι το όχημα μπορεί να πλοηγηθεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Η βαθιά μάθηση, μια πιο σύνθετη μορφή μηχανικής μάθησης, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επεξεργασία οπτικών δεδομένων από κάμερες. Χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα με πολλά στρώματα (άρα «βαθιά») για την ανάλυση εικόνων και την αναγνώριση αντικειμένων, ακόμη και υπό διαφορετικές συνθήκες φωτός ή καιρού. Αυτό είναι κρίσιμο για εργασίες όπως η ανάγνωση οδικών σημάτων, η ανίχνευση σημάνσεων λωρίδας και η αναγνώριση σημάτων κυκλοφορίας. Η τεχνητή νοημοσύνη διαδραματίζει επίσης βασικό ρόλο στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, αξιολογώντας πολλαπλές πιθανές ενέργειες και επιλέγοντας τη βέλτιστη με βάση την τρέχουσα κατάσταση. Αυτό περιλαμβάνει πολύπλοκους αλγόριθμους που μπορούν να αξιολογήσουν τους κινδύνους και να προβλέψουν τα αποτελέσματα, επιτρέποντας στο όχημα να προσαρμόσει τη στρατηγική του σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει στα αυτόνομα οχήματα να μαθαίνουν από την εμπειρία. Αναλύοντας δεδομένα από προηγούμενες μονάδες δίσκου, το σύστημα μπορεί να εντοπίσει περιοχές προς βελτίωση και να προσαρμόσει ανάλογα τους αλγόριθμους του, βελτιώνοντας την ασφάλεια και την απόδοση με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η διαδικασία συνεχούς εκμάθησης είναι που κάνει τα αυτόνομα οχήματα πιο έξυπνα, πιο αξιόπιστα και καλύτερα εξοπλισμένα για να χειρίζονται τις πολυπλοκότητες της οδήγησης στον πραγματικό κόσμο.

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των AV

Αν και οι μεταφορές αποτελούν μέσο για την προώθηση της ευημερίας των κοινωνιών, αναπόφευκτα συνδέονται με αρνητικές εξωτερικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση, τα ατυχήματα και οι ανθρώπινες

απώλειες. Υπάρχει μεγάλος αριθμός μελετών που εκτιμούν αυτά τα κόστη σε σχέση με τα οχήματα που οδηγούνται από τον άνθρωπο [35, 36]. Τα κόστη αυτά διαφέρουν από τα άμεσα κόστη που προκύπτουν, όπως το κόστος της βενζίνης, της συντήρησης του οχήματος, της ταξινόμησης του οχήματος και της έκδοσης αδειών ή των εισιτηρίων των δημόσιων συγκοινωνιών. Το εξωτερικό κόστος είναι ένα κρυφό κόστος που επιβάλλεται στο κοινωνικό σύνολο και περιλαμβάνει κόστη όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση, τα ατυχήματα και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος, καθώς και η ασφάλεια. Σε γενικές γραμμές, η τεχνολογία των AV θεωρείται σε μεγάλο βαθμό ότι έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά (αν όχι να εξαλείψει) πολλές από αυτές τις υπάρχουσες αρνητικές εξωτερικές επιπτώσεις. Σύμφωνα με μια εκτίμηση, το εξωτερικό αυτό κόστος μπορεί να είναι τόσο υψηλό όσο η τιμή των καυσίμων, η οποία επιβάλλεται στο σύνολο της κοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των ατόμων με χαμηλό εισόδημα που είναι αποκλειστικά εξαρτώμενα από τις δημόσιες συγκοινωνίες [7]. Τα AVs μπορούν επίσης να δημιουργήσουν πρόσθετα οφέλη, όπως η αύξηση της προσβασιμότητας και της κινητικότητας και ακόμη και η βελτίωση της χρήσης γης. Παρόλο που θα μπορούσαν να υπάρξουν σημαντικά μειονεκτήματα που συνδέονται με τα AV, πιστεύεται ευρέως ότι τα μειονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα πλεονεκτήματα. Στην ενότητα που ακολουθεί, αναλύουμε τα θετικά και τα αρνητικά των AVs.

2.4 Ασφάλεια και ατυχήματα

Τα στατιστικά στοιχεία για τα τροχαία ατυχήματα στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2010 είναι συγκλονιστικά: 32.999 νεκροί, 3,9 εκατομμύρια τραυματίες και 24 εκατομμύρια οχήματα που υπέστησαν ζημιές, το υλικό και άυλο κόστος των οποίων ανέρχεται σε 277 δισεκατομμύρια δολάρια [37]. Αυτή η επιβάρυνση του κόστους έχει αλυσιδωτές επιπτώσεις, επηρεάζοντας την παραγωγικότητα, τις ιατρικές δαπάνες, τα νομικά και δικαστικά έξοδα, τις απώλειες στο χώρο εργασίας, το κόστος των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης, την επιβάρυνση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, το κόστος διαχείρισης των ασφαλιστικών εταιρειών και τις υλικές ζημιές. Η τάση μείωσης του αριθμού των ατυχημάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες [38] οφείλεται σημαντικά στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, όπως οι αερόσακοι, τα αντιμπλοκαριστικά φρένα, ο ηλεκτρονικός έλεγχος ευστάθειας, οι πλευρικοί αερόσακοι προστασίας κεφαλής και οι προειδοποιήσεις πρόσθιας σύγκρουσης [39, 40]. Αυτά είναι χαρακτηριστικά που θα υιοθετηθούν στην τεχνολογία AV. Συγκεκριμένα, ορισμένες μελέτες εκτιμούν ότι η μείωση των ατυχημάτων θα μπορούσε να φτάσει το ένα τρίτο, εάν όλα τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με προσαρμοζόμενους προβολείς, προειδοποιήσεις εμπρόςθιας σύγκρουσης, προειδοποιήσεις απομάκρυνσης από τη λωρίδα κυκλοφορίας και βοήθεια τυφλού σημείου.

2.5 Συμφόρηση

Οι Anderson κ.ά. [7] έχουν αποδώσει τρεις κύριους παράγοντες που σχετίζονται με τα AV που επηρεάζουν θετικά και ενίοτε αρνητικά τη συμφόρηση: (i) μείωση της καθυστέρησης της κυκλοφορίας λόγω της μείωσης των ατυχημάτων με οχήματα, (ii) ενίσχυση της απόδοσης των οχημάτων και (iii) μεταβολές στο συνολικό διανυόμενο οχηματοχιλιόμετρο (VKT). Η αναμενόμενη μείωση των συγκρούσεων των οχημάτων θα έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες καθυστερήσεις και, με τη σειρά της, μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος μεταφορών. Οι αλλαγές στο VKT λόγω της έλευσης των AV παραμένουν ασαφείς, αν και ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν την άποψη ότι το VKT στην πραγματικότητα θα αυξηθεί (γνωστό ως "φαινόμενο ανάκαμψης") [13]. Για το λόγο αυτό, εικάζουν έναν συνδυασμό παραγόντων, όπως η πρόσθετη VKT λόγω της αυτο-τροφοδότησης και του αυτοπαρκάρειν, η αυξημένη χρήση των AVs από όσους δεν μπορούν να οδηγήσουν, ο αυξημένος αριθμός των ταξιδιών (τόσο των μη κατελιημμένων όσο και των κατελιημμένων), η απομάκρυνση από τα μέσα μαζικής μεταφοράς και οι μεγαλύτερες μετακινήσεις [43-45]. Η NHTSA κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ανάκαμψης θα σταθεροποιηθεί στο 10 % [7].

Το γεγονός ότι τα οχήματα AV είναι συνδεδεμένα μπορεί επίσης να προσφέρει μια ευκαιρία για τον μετριασμό της επιβάρυνσης από τη συμφόρηση. Οι Dresner και Stone [46] προτείνουν ένα σύστημα βασισμένο σε κρατήσεις για την ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, ειδικά στις διασταυρώσεις όταν τα οχήματα είναι συνδεδεμένα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα με βάση την κράτηση που έχει σχεδιαστεί για συνδεδεμένα AV μπορεί να αποδώσει δύο έως τρεις φορές καλύτερα από τα φανάρια. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να διαχειριστεί ομαλά πολύ πιο συμφορημένες συνθήκες κυκλοφορίας. Οι Dresner και Stone [47] δείχνουν ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των AVs στο δρόμο, οι καθυστερήσεις της κυκλοφορίας μειώνονται προς τα επίπεδα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη εργασία τους.

Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Fajardo et al. [48]. Κατά συνέπεια, είναι απολύτως σαφές ότι η τεχνολογία AV θα έχει σύντομα θετική επίδραση στη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, εκτός εάν προκαλέσει πρόσθετη ζήτηση, η οποία με τη σειρά της θα μπορούσε να προσθέσει περαιτέρω επιβάρυνση σε ένα ήδη επιβαρυσμένο δίκτυο

2.6 Ταξί και ιδιοκτησία αυτοκινήτου

Οι τεχνολογίες AV μπορούν να ευνοήσουν την ανάπτυξη ταξί χωρίς οδηγό ή παρόμοιων συστημάτων κοινής χρήσης αυτοκινήτων, στα οποία το κόστος αποζημίωσης του χρόνου και του ταλέντου των οδηγών ταξί αποκλείεται. Ως αποτέλεσμα, τα ταξί χωρίς οδηγό αναμένεται να γίνουν φθηνότερα και

τα οποία τελικά μπορεί να αποθαρρύνουν την ιδιοκτησία αυτοκινήτων. Η ιδέα των ταξί χωρίς οδηγό είναι ανάλογη με την κοινή χρήση αυτοκινήτων, η οποία αποτελεί ένα ακμάζον επιχειρηματικό μοντέλο. Τα AV μπορούν να ενισχύσουν τα συστήματα κοινής χρήσης αυτοκινήτων και διαδρομών, καθώς μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλά άτομα κατά παραγγελία [1].

Κατά συνέπεια, τα νοικοκυριά μπορεί να βρουν τα ταξί χωρίς οδηγό πιο βολικά και φθηνότερα να τα μισθώνουν από την ιδιοκτησία ενός οχήματος. Επιπλέον, σε σύγκριση με το car-sharing, τα ταξί χωρίς οδηγό δεν θα πρέπει να είναι ακριβότερα. Δεδομένου ότι το ταξί χωρίς οδηγό καταργεί την ανάγκη για ετήσιο πάγιο κόστος και συντήρηση που συνήθως συνδέεται με το cars-haring καθώς και με τη στάθμευση, θα παρέχει ακόμη μεγαλύτερη ευκολία. Πράγματι, πρόσφατα διαπιστώθηκε ότι ο διαμοιρασμός αυτοκινήτων μειώνει το VKT στην αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών [49]. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι φθηνότερες διαδρομές θα συνοδεύονται από νέες απαιτήσεις, ιδίως από άπορους (χαμηλόμισθους) ανθρώπους που μπορούν πλέον να αντέξουν οικονομικά είτε να οδηγήσουν είτε να πάρουν ταξί.

Μια πρόσφατη ανάλυση των δεδομένων των νοικοκυριών των ΗΠΑ δείχνει μια σημαντική μείωση της ιδιοκτησίας οχημάτων και μια ταυτόχρονη στροφή προς την κοινή χρήση οχημάτων [50]. Η μείωση αυτή μπορεί να φτάσει το 43 % - από 2,1 σε 1,2 οχήματα ανά νοικοκυριό. Αντίθετα, αναμένεται ότι αυτή η μετατόπιση θα διογκώσει τη χρήση του ατομικού οχήματος έως και 75 %, από 11.661 σε 20.406 μίλια ανά όχημα ετησίως. (Αυτή η αύξηση των χιλιομέτρων δεν συνυπολογίζει τα πρόσθετα χιλιόμετρα που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια κάθε διαδρομής "επιστροφής στο σπίτι"). Συνολικά, τα AV έχουν μεγάλες δυνατότητες να μειώσουν πολλά κόστη που σχετίζονται με τους ιδιωτικούς τρόπους μεταφοράς, καθώς είναι πιθανό να προκαλέσουν περισσότερα ταξίδια, με αποτέλεσμα την αύξηση του VKT. Δεν έχει υπολογιστεί στο VKT η εμφάνιση των ταξί χωρίς οδηγό.

2.7 AV και ηλεκτρικά οχήματα

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες, σε συνδυασμό με τις υψηλότερες τιμές του πετρελαίου κατά την τελευταία δεκαετία, αποτέλεσαν τις κινητήριες δυνάμεις πίσω από την εμφάνιση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Τα ηλεκτρικά οχήματα υποφέρουν από ορισμένα λειτουργικά μειονεκτήματα, όπως η ικανότητα μετακίνησης σε απόσταση που περιορίζεται από το μέγεθος και την ανθεκτικότητα των μπαταριών.

Αυτό περιορίζει το EV σε ταξίδια μικρών αποστάσεων και μπορεί να κάνει τη διαδικασία εύρεσης σταθμών φόρτισης ένα θέμα συνεχούς ανησυχίας [51]. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί κανείς να βρει φυσική και οργανική συνέργεια μεταξύ των κοινών στόλων AV και της τεχνολογίας EV: ένας στόλος AV μπορεί να επιλύσει τους πρακτικούς περιορισμούς των EV, συμπεριλαμβανομένου του άγχους για την εμβέλεια ταξιδιού, την πρόσβαση σε υποδομές φόρτισης και τη διαχείριση του χρόνου φόρτισης [52, 51].

Σύμφωνα με τον Chen [53] τα AVs που διαχειρίζονται στόλο ανακουφίζουν από αυτές τις ανησυχίες με βάση τη ζήτηση ταξιδιού σε πραγματικό χρόνο και τις καθιερωμένες τοποθεσίες σταθμών φόρτισης. Η οικονομική τους ανάλυση δείχνει ότι το συνδυασμένο κόστος της υποδομής φόρτισης, του κεφαλαίου και της συντήρησης των οχημάτων, της ηλεκτρικής ενέργειας, της ασφάλισης και της καταχώρισης για ένα στόλο AVs κυμαίνεται από 0,42 έως 0,49 δολάρια ανά διανυόμενο μίλι. Επομένως, η υπηρεσία κοινής χρήσης AV μπορεί να προσφερθεί με το ισοδύναμο κόστος ανά μίλι της ιδιοκτησίας ιδιωτικού οχήματος για νοικοκυριά με χαμηλά χιλιόμετρα. Ως εκ τούτου, τα αυτοματοποιημένα ηλεκτρικά αυτοκίνητα θα είναι πιθανότατα ανταγωνιστικά με τις τρέχουσες υπηρεσίες κοινής χρήσης αυτοκινήτων με χειροκίνητη οδήγηση και σημαντικά φθηνότερα από τις υπηρεσίες μεταφοράς κατά παραγγελία με οδηγό.

2.8 Χωρητικότητα των δρόμων

Οι τεχνολογίες AV παρέχουν λεπτομερώς συντονισμένους ελιγμούς επιτάχυνσης-φρεναρίσματος ανά πάσα στιγμή, ενώ παρακολουθούν συνεχώς και ακούραστα το περιβάλλον της κυκλοφορίας. Ως εκ τούτου, τα AV είναι σε θέση να κινούνται με υψηλότερες ταχύτητες, διατηρώντας παράλληλα μικρότερες αποστάσεις. Τα ημιαυτόνομα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με Adaptive Cruise Control (ACC) έχουν ήδη δείξει μια τέτοια πολλά υποσχόμενη λειτουργία [54]. Οι χαμηλότερες αποστάσεις από μια ουρά AVs δεν θα θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και, ως εκ τούτου, είναι πιθανό να δούμε μια διμοιρία AVs. Ως αποτέλεσμα, η διαπερατότητα των δρόμων θα αυξηθεί σημαντικά - κάποιες μελέτες έχουν εκτιμήσει έως και 5 φορές [55]. Σε ορισμένες μελέτες, το γεγονός ότι τα AVs είναι συνδεδεμένα έχει αξιοποιηθεί στον έλεγχο των σηματοδοτών, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα πολύ λιγότερες καθυστερήσεις στα σήματα ή ισοδύναμα μεγαλύτερη χωρητικότητα των δρόμων [46-48].

2.9 Χρήση γης

Τα AV μπορεί να έχουν βαθύ και παρατεταμένο αντίκτυπο στο πρότυπο χρήσης γης. Η αξία της γης αυξάνεται αναλογικά με την εγγύτητά της στην κεντρική πόλη, όπου υπάρχουν ευκαιρίες απασχόλησης σε πολλούς κλάδους, όπως οι τράπεζες, οι χρηματοπιστωτικές αγορές και πολλοί άλλοι τομείς παροχής υπηρεσιών. Η εγγύτητα εκδηλώνεται με τη μεταφορά. Η έλευση των αυτοκινήτων στις αρχές του 20ου αιώνα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των προαστίων. Η σχέση μεταξύ των AV και της χρήσης γης είναι τόσο περίπλοκη όσο και κάπως παράδοξη. Σε ένα σενάριο, η εισαγωγή των AVs θα μπορούσε να αναζωογονήσει μια τάση προς ακόμη πιο διασκορπισμένα και χαμηλής πυκνότητας πρότυπα χρήσης γης γύρω από μητροπολιτικές περιοχές.

Με άλλα λόγια, τα AVs μπορεί να οδηγήσουν στην περαιτέρω ανάπτυξη των προαστίων και μπορεί ακόμη και να ωθήσουν περισσότερο σε εξωαστικές περιοχές. Στο εντελώς αντίθετο σενάριο, η τεχνολογία AV εξαλείφει την οξεία ανάγκη για χώρους στάθμευσης, πράγμα που σημαίνει ότι οι χώροι στάθμευσης στην καρδιά των πόλεων μπορούν να απελευθερωθούν για άλλες χρήσεις. Επομένως, τα AV θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην τόνωση της αστικής ανάπτυξης στις κεντρικές περιοχές, αυξάνοντας την πυκνότητα των αστικών κέντρων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι χώροι στάθμευσης μονοπωλούν ένα μεγάλο κομμάτι του χώρου στις κεντρικές πόλεις. Ο Shoup [58] υπολόγισε ότι η συνολική έκταση που αφιερώνεται σε χώρους στάθμευσης ισοδυναμεί κατά μέσο όρο με το 31 % περίπου των εκτάσεων των συνοικιών.

2.10 Περιβάλλον (ενέργεια και εκπομπές)

Οι Anderson κ.ά. [7] έχουν επισημάνει τρεις παράγοντες βάσει των οποίων ο αντίκτυπος των AVs στο περιβάλλον θα είναι είτε θετικός είτε αρνητικός:

- αποδοτικότητα καυσίμων των AVs,
- την ένταση του άνθρακα και τις εκπομπές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των AV και
- συνολική μεταβολή της VKT που προκύπτει από τη χρήση των AVs. Έχουμε συζητήσει προηγουμένως για την VKT. Στην επόμενη Ενότητα, θα αναλύσουμε την κατανάλωση καυσίμου και την αποδοτικότητα των AVs.

Ανεξάρτητα από την εμφάνιση των AV, η πρόοδος στο σχεδιασμό των οχημάτων και στην αποδοτικότητα των κινητήρων έχει μειώσει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων. Σε μια εκτίμηση για τα επιβατικά αυτοκίνητα, η κατανάλωση καυσίμου μειώθηκε σχεδόν στο μισό σε σύγκριση με τα στοιχεία που παρατηρήθηκαν πριν από 30 χρόνια [60]. Η υιοθέτηση της τεχνολογίας AV ακόμη και στα επίπεδα 1, 2 και 3 θα οδηγήσει σε βελτιστοποιημένη οδήγηση και τεχνολογία, που ονομάζεται επίσης οικολογική οδήγηση. Παραδείγματα ορισμένων βασικών τεχνολογιών που οδηγούν σε οικολογική οδήγηση είναι το cruise control και η ομαλή και σταδιακή επιτάχυνση και επιβράδυνση. Η οικολογική οδήγηση αποδεικνύεται ότι βελτιώνει την οικονομία καυσίμου κατά 4 % έως 10 % [61]. Πιο αισιόδοξες προβλέψεις προβλέπουν αύξηση της αποδοτικότητας καυσίμου έως και 39 % [62]. Έχουμε επίσης συζητήσει προηγουμένως ότι τα AV μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερη ταξιδιωτική ικανότητα και μείωση της σπατάλης καυσίμων σε περιόδους κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Τα AVs παρέχουν επίσης την ευκαιρία στα οχήματα να επικοινωνούν τους ελιγμούς και τις ενέργειές τους μεταξύ τους, γεγονός που μπορεί να μειώσει τον χρόνο αδράνειας, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα τόσο της κυκλοφορίας όσο και του κύκλου οδήγησης [7]. Επιπλέον, μια διμοιρία από στενά τοποθετημένα AV που σταματά ή επιβραδύνει λιγότερο συχνά θα μοιάζει με τρένο. Το αποτέλεσμα αναμένεται να οδηγήσει σε χαμηλότερες ταχύτητες αιχμής (βελτιώνοντας την οικονομία καυσίμου), αλλά σε υψηλότερες πραγματικές ταχύτητες (βελτιώνοντας το χρόνο διαδρομής) [63, 64]. Από μια εντελώς διαφορετική οπτική γωνία, το αυξημένο επίπεδο ασφάλειας των AV μπορεί να οδηγήσει σε ελαφριά οχήματα από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων. Στην πραγματικότητα, οι προσπάθειες για την ασφάλεια κατευθύνονται προς την αποφυγή ατυχημάτων και απομακρύνονται από τα παλιομοδίτικα αυτοκίνητα με αντοχή στη σύγκρουση. Ως εκ τούτου, τα ελαφριά οχήματα είναι πολλά υποσχόμενα υποπροϊόντα της τεχνολογίας AV, η οποία με τη σειρά της συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων. Για τα συμβατικά οχήματα, έως και το 20 % του βάρους

αποδίδεται σε χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ασφάλεια [61]. Ως τεχνικός κανόνας, μια μείωση του βάρους κατά 10 % μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 6 έως 7 % [7, 65,]).

Η στροφή προς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (από τα ορυκτά αυτοκίνητα) προσφέρει επίσης προστιθέμενη αξία στην αποδοτικότητα των καυσίμων. Έχει αποδειχθεί ότι η αποτελεσματικότητα της μετατροπής σε αυτοκίνητα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα σε σχέση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι 1-3 [7].

2.11 Πρόβλεψη ζήτησης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι επιπτώσεις και οι εφαρμογές της τεχνολογίας AV επισκιάζονται από αβεβαιότητες. Ένα βασικό μέλημα των κατασκευαστών αυτοκινήτων, των ρυθμιστικών αρχών και, σε κάποιο βαθμό, των ακαδημαϊκών μελετητών είναι η πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης των AV. Μια πρόσφατη και ολοκληρωμένη επισκόπηση επί του θέματος παρουσιάστηκε από τους Bansal και Kockelman [68].

Οι προβλέψεις αυτές βασίστηκαν στην παρέκταση τάσεων που προέκυψαν από προηγούμενες τεχνολογίες οχημάτων, γνώμες εμπειρογνομώνων και προβλέψεις μεταβλητών από την πλευρά της προσφοράς, με πολύ μικρή έμφαση στις υποκείμενες παραδοχές πίσω από αυτές τις προβλέψεις. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η Litman T [13] προβλέπει ότι το 50 % της παγκόσμιας αγοράς αυτοκινήτων θα οφείλεται σε οχήματα AV μέχρι το 2040. Σύμφωνα με μια εκτίμηση [69], το μερίδιο αγοράς των αυτοματοποιημένων οχημάτων των επιπέδων 2 και 3 θα ανέλθει σε περίπου 87 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Αυτές οι εκτιμήσεις ή προβλέψεις ποικίλλουν σημαντικά. Άλλες μελέτες έχουν μια πολύ πιο αισιόδοξη άποψη για το θέμα [βλ. τη συζήτηση που παρέχουν οι Bansal και Kockelman [68].

Είναι ασφαλές να δηλώσουμε ότι, δεδομένων των συνεχιζόμενων επενδύσεων στην τεχνολογία AV από τους γιγάντιους κατασκευαστές αυτοκινήτων, η αγορά αυτοκινήτων θα μπορούσε σύντομα να τροφοδοτηθεί από AV πρώτης γενιάς. Το πόσο μεγάλη θα είναι αυτή η κίνηση είναι δύσκολο να προβλεφθεί- ωστόσο, είναι πιθανό να είναι αρκετά σημαντική ώστε να δικαιολογεί την αμέριστη προσοχή όσων εμπλέκονται στη φάση του σχεδιασμού. Στην προηγούμενη ενότητα καλύψαμε θέματα που σχετίζονται άμεσα με τις πολιτικές μεταφορών. Ωστόσο, η AV έχει εκτεταμένες επιπτώσεις.

Κεφάλαιο 3 Δυσκολίες αυτόνομων οχημάτων

Όπως κάθε νέα τεχνολογία έτσι και τα αυτόνομα οχήματα, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις προοπτικές που προσφέρουν, έρχονται αντιμέτωπα με μια σειρά από δυσκολίες που επηρεάζουν την ενσωμάτωσή της στην καθημερινότητά μας. Οι προκλήσεις αυτές μπορούν να καταταχθούν σε τρεις κατηγορίες: τεχνικές, κοινωνικές και νομικές, καθώς και οικονομικές. Κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές παρουσιάζει ξεχωριστά εμπόδια ξεχωριστά εμπόδια που απαιτούν καινοτόμες λύσεις.

3.1 Τεχνικές προκλήσεις

Τα αυτόνομα αυτοκίνητα αντιπροσωπεύουν έναν σημαντικό τομέα έρευνας και ανάπτυξης στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, με την προοπτική της πλήρους αυτονομίας να φέρνει μαζί της πολλές τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η πρώτη και κύρια πρόκληση για τα αυτόνομα αυτοκίνητα είναι η ακριβής αντίληψη του περιβάλλοντος. Αυτό απαιτεί τη χρήση ποικίλων αισθητήρων όπως κάμερες, ραντάρ, λέιζερ (LiDAR) και άλλων συστημάτων ανίχνευσης όπως έχει προαναφερθεί. Κάθε ένας από αυτούς τους αισθητήρες έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι κάμερες παρέχουν υψηλής ανάλυσης εικόνες που είναι εξαιρετικές για την αναγνώριση αντικειμένων, αλλά είναι ευάλωτες σε κακές καιρικές συνθήκες και χαμηλό φωτισμό. Το ραντάρ είναι καλό για την ανίχνευση αποστάσεων και την αναγνώριση αντικειμένων σε όλες τις καιρικές συνθήκες, αλλά η ανάλυση του είναι περιορισμένη. Το LiDAR προσφέρει τρισδιάστατες εικόνες υψηλής ακρίβειας του περιβάλλοντος, αλλά είναι ακριβό και επίσης ευάλωτο σε κακές καιρικές συνθήκες. Η συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων από αυτούς τους αισθητήρες αποτελεί μια πρόκληση λόγω της ανάγκης για υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Τα αυτόνομα οχήματα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζουν και να ταξινομούν αντικείμενα όπως πεζοί, άλλα οχήματα, σήματα κυκλοφορίας και εμπόδια στον δρόμο με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα. Αυτή η διαδικασία απαιτεί εξελιγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας και αναγνώρισης αντικειμένων που να μπορούν να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο.

Η επιτυχία των αυτόνομων οχημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητά τους να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο βασισμένες στις πληροφορίες που αποκτούν από τους αισθητήρες τους. Αυτό απαιτεί προηγμένες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης για την αυτόματη επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων. Οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να είναι σε θέση να αναλύουν τεράστιους όγκους δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, να εντοπίζουν μοτίβα και να προβλέπουν πιθανές καταστάσεις για να λάβουν τις σωστές αποφάσεις. Για παράδειγμα, ένα αυτόνομο όχημα πρέπει να μπορεί να αποφασίζει πότε να σταματήσει για έναν

πεζό που διασχίζει τον δρόμο, πώς να αντιδράσει σε ένα άλλο όχημα που κάνει ξαφνική στροφή, ή πώς να αποφύγει ένα απρόβλεπτο εμπόδιο στον δρόμο. Αυτές οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται σε κλάσματα του δευτερολέπτου για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των επιβατών και των άλλων χρηστών του δρόμου.

Τα αυτόνομα οχήματα χρειάζονται επίσης να είναι σε θέση να επικοινωνούν με άλλα οχήματα και υποδομές για να μπορούν να λαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την κίνηση, τις συνθήκες και άλλα στοιχεία που επηρεάζουν την οδήγηση. Η λεγόμενη επικοινωνία Vehicle-to-Everything (V2X) περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων (V2V), μεταξύ οχημάτων και υποδομών (V2I), και μεταξύ οχημάτων και άλλων δικτύων, όπως τα δίκτυα πεζών ή ακόμα και τα δίκτυα του Internet of Things (IoT). Η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα των αυτόνομων οχημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία των συστημάτων επικοινωνίας τους. Αυτή η επικοινωνία πρέπει να είναι άμεση, ακριβής και ασφαλής από πιθανές παρεμβολές ή κυβερνοεπιθέσεις. Για παράδειγμα, ένα αυτόνομο όχημα πρέπει να μπορεί να λάβει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες για την κίνηση από άλλα οχήματα ή να ενημερώνεται για μια αλλαγή στην κυκλοφορία μέσω των συστημάτων διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Επιπλέον, τα αυτόνομα οχήματα πρέπει να είναι σε θέση να αντιδρούν σε απρόβλεπτες καταστάσεις και επικίνδυνες συνθήκες. Αυτό απαιτεί από τους μηχανικούς να σχεδιάσουν αλγόριθμους και συστήματα που να μπορούν να διαχειρίζονται έκτακτες καταστάσεις χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Για παράδειγμα, αν ένα αυτόνομο όχημα βρεθεί μπροστά σε ένα απρόβλεπτο εμπόδιο, πρέπει να είναι σε θέση να λάβει γρήγορα μια απόφαση για να το αποφύγει, είτε αυτό σημαίνει να φρενάρει απότομα, είτε να αλλάξει λωρίδα. Αυτές οι αποφάσεις πρέπει να είναι άμεσες και να λαμβάνονται με γνώμονα την ασφάλεια όλων των εμπλεκομένων.

Σημαντικό επίσης κρίνεται το να μπορούν τα AV να λειτουργούν σε ποικίλες συνθήκες οδήγησης και περιβάλλοντα, από αστικές περιοχές μέχρι ανοικτούς αυτοκινητόδρομους και ακραίες καιρικές συνθήκες. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη υποδομών υποστήριξης και την εξέλιξη των ειδών υποδομών οδήγησης για να συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις των αυτόνομων οχημάτων. Οι δρόμοι πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με κατάλληλη σήμανση και αισθητήρες που να μπορούν να συνεργάζονται με τα αυτόνομα οχήματα, ενώ οι τεχνολογίες υποστήριξης όπως τα δίκτυα 5G είναι απαραίτητα για την αξιόπιστη και γρήγορη μεταφορά δεδομένων.

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας που απαιτείται για την αυτόνομη οδήγηση είναι δαπανηρή και πολύπλοκη. Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και οι ερευνητές πρέπει να βρουν τρόπους να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των τεχνολογιών αυτών ώστε να γίνουν προσιτές στο ευρύ κοινό. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη φθηνότερων και πιο αποδοτικών αισθητήρων, την

βελτιστοποίηση των αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων και τη δημιουργία οικονομικά αποδοτικών λύσεων για την επικοινωνία και τη συντήρηση των συστημάτων.

Αυτές οι προκλήσεις απαιτούν συνεχή καινοτομία και συνεργασία σε διαφορετικούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Η επιτυχία της πλήρους αυτονομίας των οχημάτων εξαρτάται από την πρόοδο στην τεχνητή νοημοσύνη, την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και φθηνών αισθητήρων, τη δημιουργία αξιόπιστων δικτύων επικοινωνίας και την προσαρμογή των υποδομών για να υποστηρίξουν την αυτόνομη οδήγηση. Οι ερευνητές και οι μηχανικοί πρέπει να συνεργαστούν στενά με τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, τις αρχές και τις εταιρείες τεχνολογίας για να ξεπεράσουν αυτά τα εμπόδια και να φέρουν την αυτόνομη οδήγηση πιο κοντά στην πραγματικότητα.

3.2 Κοινωνικές και νομικές προκλήσεις

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων στην καθημερινότητά μας θέτει πολλαπλές κοινωνικές προκλήσεις καθώς με την ένταξη των συστημάτων αυτών αλλάζει ριζικά η έννοια της οδήγησης και της μετακίνησης. Το κοινό είναι διστακτικό και εκφράζει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των οχημάτων αυτών. Η κυριότερη ανησυχία περιλαμβάνει το πώς τα AV θα διαχειρίζονται κρίσιμες και απρόβλεπτες καταστάσεις, καθώς και το ποια θα είναι η συμπεριφορά τους σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Για να κερδηθεί λοιπόν αυτή η εμπιστοσύνη προς την τεχνολογία των AV θα πρέπει να καταβληθούν στοχευμένες προσπάθειες για εκπαίδευση και διαφάνεια. Εκπαίδευση του κοινού τόσο για το πως λειτουργούν αυτά τα οχήματα, ποιες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται αλλά και για το ποια είναι τα οφέλη τους. Εξίσου κρίσιμη είναι η διαφάνεια στην λειτουργία των συστημάτων που έχουν να κάνουν με τις διαδικασίες απόφασης του οχήματος καθώς και τα μέτρα ασφαλείας που αυτό θα παίρνει σε κάθε σενάριο. Επίσης δεν μπορεί να αγνοηθεί το γεγονός πως σας λαός ενώ παλεύουμε για την αλλαγή προς το καλύτερο, από πάντα την φοβόμαστε. Δεν είναι έκπληξη λοιπόν το ότι ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού αισθάνονται ανασφάλεια στην ιδέα να μην ελέγχουν άμεσα το όχημα που τους μεταφέρει. Για αυτό και οι βιομηχανίες και οι φορείς θα πρέπει μέσω σταδιακής μετάβασης της τεχνολογίας, μαζί με συνεχή ενημέρωση της αξιοπιστίας της τεχνολογίας μέσω τεστ ασφαλείας που θα διενεργούνται, να διασφαλίσουν ότι οι άνθρωποι θα αρχίσουν να αισθάνονται όλο και πιο άνετα με τα AV.

Γενικά τα AV θα γίνουν τελειώς κοινωνικά αποδεχτά μόνο όταν θα έχουν αποδείξει την ικανότητά τους να λειτουργούν, όχι μόνο αποτελεσματικά αλλά και με ασφάλεια σε διάφορα σενάρια και περιβάλλοντα. Στην υπέρβαση αυτών των προκλήσεων θα βοηθήσουν η συνεχή προώθηση της

τεχνολογίας, η διασφάλιση της λειτουργικής τους αξιοπιστίας και ενσωμάτωση στρατηγικών που προωθούν την ασφάλεια και την διαφάνεια προς αυτή.

Ξεπερνώντας τις προκλήσεις που εμφανίζονται από κοινωνικούς θεσμούς, η εισαγωγή των AV στο οδικό δίκτυο έρχεται αντιμέτωπη και με μια σειρά από νομικές προκλήσεις που απαιτούν την διαμόρφωση ενός κατάλληλου κανονιστικού και αξιοκρατικού πλαισίου. Μέσω αυτού του πλαισίου θα πρέπει να διασφαλίζεται η ασφαλή, δίκαιη και αποτελεσματική λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων, τηρώντας ταυτόχρονα τις αρχές προστασίας των δεδομένων και της ιδιωτικότητας των χρηστών. Αρχικά θα πρέπει να αναπτυχθούν κανόνες για την αδειοδότηση και ασφάλιση των αυτόνομων οχημάτων. Τα στάνταρ ασφαλείας θα πρέπει να είναι αυστηρά και να παρέχουν συγκεκριμένα μέτρα αξιολόγησης της τεχνολογίας και της ασφάλειας των συστημάτων των AV. Επιπρόσθετα, η διαδικασία αδειοδότησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο την εκπαίδευση όσο και την εξοικείωση των χρηστών όχι μόνο με την συμβατική οδήγηση αλλά και με τις νέες πλέον τεχνολογίες. Στην συνέχεια, καθώς τα αυτόνομα οχήματα συλλέγουν και επεξεργάζονται μια πληθώρα πληροφοριών για την αποτελεσματική τους λειτουργία, θα πρέπει μέσω νόμων να διασφαλίζεται η προστασία των προσωπικών και ευαίσθητων δεδομένων χωρίς όμως να περιορίζει την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των AV. Και τέλος, με την ένταξη των AV στα οδικά δίκτυα, το ποιος φέρει την ευθύνη σε περίπτωση ατυχημάτων. Πρέπει να εφαρμοστούν νέες νομικές διατάξεις που θα καθορίζουν εάν η ευθύνη θα ανήκει στους κατασκευαστές του οχήματος, στους προγραμματιστές του συστήματος, στον οδηγό, ή σε κάποιον άλλο φορέα που συνδέεται με την λειτουργία του οχήματος.

Συνολικά, για να ξεπεραστούν οι νομικές προκλήσεις που συνδέονται με τα AV, απαιτείται ολοκληρωμένη και στοχευμένη νομοθετική προσέγγιση μέσω της οποίας θα εξασφαλίζεται η νομιμότητα και η ηθική ευθύνη στη χρήση τέτοιων τεχνολογιών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια και άνεση όλων των χρηστών του δικτύου μεταφοράς.

3.3 Οικονομικές προκλήσεις

Η ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων απαιτεί εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη, όχι μόνο στις επιμέρους τεχνολογίες των AV αλλά και στις υποδομές που θα τα υποστηρίξουν. Αρχικά θα πρέπει να αφιερωθεί ένα αρκετά μεγάλο κεφάλαιο για την έρευνα και ανάπτυξη των αισθητήρων και των αλγορίθμων. Θα πρέπει να κατασκευαστούν αισθητήρες που θα λειτουργούν με μεγαλύτερη ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία και θα είναι ικανοί να ανταπεξέρχονται σε όποια περιβάλλοντα χρειαστεί και κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Χωρίς να δυσχεραίνεται αισθητά η λειτουργία τους

όσο αντίξοες και να είναι. Για αυτό τον σκοπό επιβάλλεται η βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας LIDAR, RADAR και των συστημάτων οπτικής αναγνώρισης.

Σημαντικές επενδύσεις χρειάζονται επίσης να κατατεθούν εξωτερικά του οχήματος για την αναβάθμιση των οδικών δικτύων ώστε να ενσωματωθούν τεχνολογίες που θα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και υποδομής (Vehicle to Infrastructure, V2I). Η επικοινωνία αυτή είναι αρκετά σημαντική καθώς μεταφέρει ζωτικής σημασίας πληροφορίες στο όχημα για την κατάσταση του οδικού δικτύου κάθε στιγμή με την χρήση αισθητήρων που έχουν τοποθετηθεί κατ' επέκταση του.

Καθώς οι τεχνολογίες των αισθητήρων εντός και εκτός του οχήματος αναπτύσσονται, παράγουν όλο και πιο σύνθετες πληροφορίες με μεγαλύτερη ταχύτητα και σε μεγαλύτερο βαθμό. Σε συνδυασμό λοιπόν με τις δύο παραπάνω τεχνολογίες θα πρέπει να συμβαδίζει πολύ κοντά και η ανάπτυξη των αλγορίθμων που διαχειρίζονται την αυτόματη πλοήγηση. Οι αλγόριθμοι αυτοί θα πρέπει να μπορούν να επεξεργάζονται το τεράστιο αυτό πλήθος πληροφοριών και με σαφήνεια και ακρίβεια να παίρνουν μια σειρά από αποφάσεις για το πως θα πρέπει να ανταποκριθεί το όχημα. Η ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων απαιτεί εκτενείς και χρονοβόρες δοκιμές ώστε με την τελειοποίησή τους να εξασφαλίζουν ότι τα AV μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά σε διαφορετικές καταστάσεις, μειώνοντας ταυτόχρονα τον κίνδυνο ατυχημάτων.

Συνολικά, οι επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη των τεχνολογιών των AV είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους και απαιτούν τη συνεργασία μεταξύ των ιδιωτικών επιχειρήσεων και βιομηχανιών, των ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και κέντρων έρευνας καθώς και των δημοσίων αρχών ώστε να επιτευχθεί η υλοποίησή τους.

Οι δυσκολίες βέβαια δεν περιορίζονται στο κόστος ανάπτυξης της τεχνολογίας. Όπως έχει γίνει με κάθε τεχνολογικό άλμα τέτοιας έκτασης έτσι και η ένταξη των AV επιφέρει μεγάλες επιπτώσεις στην αγορά εργασίας. Με την ένταξή τους στο οδικό δίκτυο και με την υπόσχεση πως δεν θα χρειάζεται οδηγός πλέον για την χρήση τους, τα αυτόνομα οχήματα αρχικά και κατά κύριο λόγο απειλούν όλους τους κλάδους στους οποίους η κύρια ασχολία ήταν η οδήγηση. Επαγγέλματα όπως οδηγοί ταξί, φορτηγών και λεωφορείων αναμένεται να υποστούν τις πιο άμεσες επιπτώσεις. Η αντικατάσταση των συστημάτων αυτών θα μειώσει αισθητά και ραγδαία τις διαθέσιμες θέσεις εργασιών για τους παραδοσιακούς οδηγούς. Για αυτό τον λόγο, επιτακτική γίνεται η ανάγκη για πολιτικές αναδιαρθρώσεις και επανεκπαιδεύσεις των εργαζομένων. Οι «πρώην» οδηγοί θα χρειαστεί να αποκτήσουν νέες δεξιότητες που να συμβαδίζουν με τις αλλαγές που επιφέρει η τεχνολογία αυτή.

Και γενικά θα χρειαστεί μια συντονισμένη προσπάθεια από πολλούς φορείς για να διασφαλιστεί ότι οι εργαζόμενοι θα έχουν την ευκαιρία να ενταχθούν στην νέα τεχνολογική εποχή και δεν θα εγκαταλείπονται από αυτές τις αλλαγές.

Κεφάλαιο 4 Το μέλλον της αυτόνομης οδήγησης

Το να δούμε στόλους αυτοκινήτων χωρίς οδηγό να μεταφέρουν αποτελεσματικά τους ανθρώπους στους προορισμούς τους δεν αποτελεί πια όνειρο αλλά πραγματικότητα η οποία έχει εξάψει τη φαντασία των καταναλωτών και έχει τροφοδοτήσει επενδύσεις δισεκατομμυρίων δολαρίων τα τελευταία χρόνια. Όμως, ακόμη και μετά από κάποιες αναποδιές που ανέβαλαν τα χρονοδιαγράμματα για την κυκλοφορία αυτόνομων οχημάτων και καθυστέρησαν την υιοθέτηση από τους πελάτες, η κοινότητα της κινητικότητας εξακολουθεί να συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό ότι η αυτόνομη οδήγηση έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τις μεταφορές, τη συμπεριφορά των καταναλωτών και την κοινωνία γενικότερα.

Για το λόγο αυτό, η αυτόνομη οδήγηση θα μπορούσε να δημιουργήσει τεράστια αξία για την αυτοκινητοβιομηχανία, αποφέροντας εκατοντάδες δισεκατομμύρια δολάρια πριν από το τέλος αυτής της δεκαετίας, σύμφωνα με έρευνα της McKinsey. Για να αξιοποιήσουν τα καταναλωτικά και εμπορικά οφέλη της αυτόνομης οδήγησης, ωστόσο, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και οι προμηθευτές μπορεί να χρειαστεί να αναπτύξουν νέες στρατηγικές πωλήσεων και επιχειρήσεων, να αποκτήσουν νέες τεχνολογικές δυνατότητες και να αντιμετωπίσουν τις ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια.

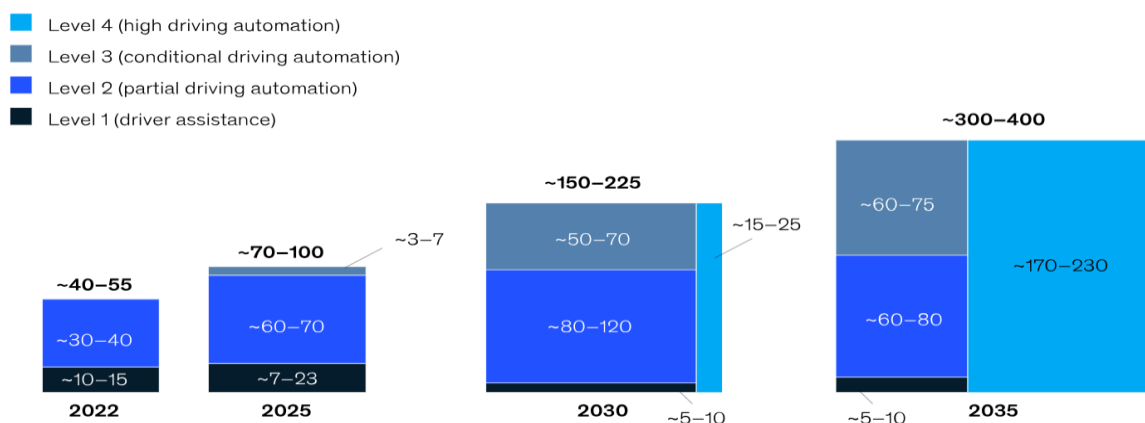
Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στο τμήμα των ιδιωτικών επιβατικών αυτοκινήτων της αγοράς AV, εξετάζει τις δυνατότητες των αυτόνομων τεχνολογιών να διαταράξουν την αγορά των επιβατικών αυτοκινήτων. Περιγράφει επίσης τους κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας που πρέπει να γνωρίζει κάθε OEM/ΚΑΕ (Original Equipment Manufacturer - Κατασκευαστής αρχικού εξοπλισμού) αυτοκινήτων, προμηθευτής και πάροχος τεχνολογίας προκειμένου να κερδίσει στην αγορά επιβατικών AV.

Η αυτόνομη οδήγηση θα μπορούσε να παράγει σημαντική αξία για τους οδηγούς, την αυτοκινητοβιομηχανία και την κοινωνία.

Τα αυτόνομα αυτοκίνητα θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι καταναλωτές βιώνουν την κινητικότητα. Τα συστήματα AV μπορούν να κάνουν την οδήγηση ασφαλέστερη, πιο βολική και πιο ευχάριστη. Οι ώρες οδήγησης που προηγουμένως αναλώνονταν στο δρόμο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ψυχαγωγία, ξεκούραση ή ακόμη και για εργασία. Για τους εργαζόμενους με μεγάλες μετακινήσεις, η οδήγηση ενός AV θα μπορούσε να αυξήσει την

παραγωγικότητα τους και να μειώσει ακόμη και την εργάσιμη ημέρα. Εφόσον οι εργαζόμενοι μπορούν να εκτελούν τις εργασίες τους από ένα αυτόνομο αυτοκίνητο, θα μπορούσαν να μετακινηθούν πιο εύκολα πιο μακριά από το γραφείο, γεγονός που με τη σειρά του θα μπορούσε να προσελκύσει περισσότερους ανθρώπους σε αγροτικές περιοχές και προάστια. Τα AV θα μπορούσαν επίσης να βελτιώσουν την κινητικότητα για τους ηλικιωμένους οδηγούς, παρέχοντάς τους επιλογές κινητικότητας που υπερβαίνουν τις δημόσιες συγκοινωνίες ή τις υπηρεσίες κοινής χρήσης αυτοκινήτων. Η ασφάλεια θα μπορούσε επίσης να αυξηθεί, με μια μελέτη να δείχνει ότι η αυξανόμενη υιοθέτηση προηγμένων συστημάτων υποβοήθησης του οδηγού (ADAS) στην Ευρώπη θα μπορούσε να μειώσει τον αριθμό των ατυχημάτων κατά περίπου 15% έως το 2030.

Μαζί με αυτά τα οφέλη για τους καταναλωτές, η AV μπορεί επίσης να δημιουργήσει πρόσθετη αξία για την αυτοκινητοβιομηχανία. Σήμερα, τα περισσότερα αυτοκίνητα περιλαμβάνουν μόνο βασικά χαρακτηριστικά ADAS, αλλά σημαντικές εξελίξεις στις δυνατότητες των AV είναι στον ορίζοντα. Τα οχήματα θα επιτύχουν τελικά το επίπεδο 4 (L4) της Society of Automotive Engineers (SAE), ή τον έλεγχο χωρίς οδηγό υπό ορισμένες συνθήκες. Οι καταναλωτές επιθυμούν πρόσβαση στα χαρακτηριστικά των AV και είναι πρόθυμοι να πληρώσουν γι' αυτά, σύμφωνα με έρευνα της McKinsey για τους καταναλωτές το 2021. Η αυξανόμενη ζήτηση για συστήματα AV θα μπορούσε να δημιουργήσει έσοδα δισεκατομμυρίων δολαρίων. Τα οχήματα με δυνατότητες επιπέδου 2+ (L2+) με βάση το lidar περιέχουν περίπου 1.500 έως 2.000 δολάρια σε κόστος εξαρτημάτων, και ακόμη περισσότερα για τα αυτοκίνητα με επιλογές επιπέδου 3 (L3) και L4. Με βάση το ενδιαφέρον των καταναλωτών για τα χαρακτηριστικά AV και τις εμπορικές λύσεις που διατίθενται σήμερα στην αγορά, τα ADAS και AV θα μπορούσαν να αποφέρουν 300 έως 400 δισεκατομμύρια δολάρια στην αγορά επιβατικών αυτοκινήτων έως το 2035, σύμφωνα με ανάλυση της McKinsey [εικόνα 6].



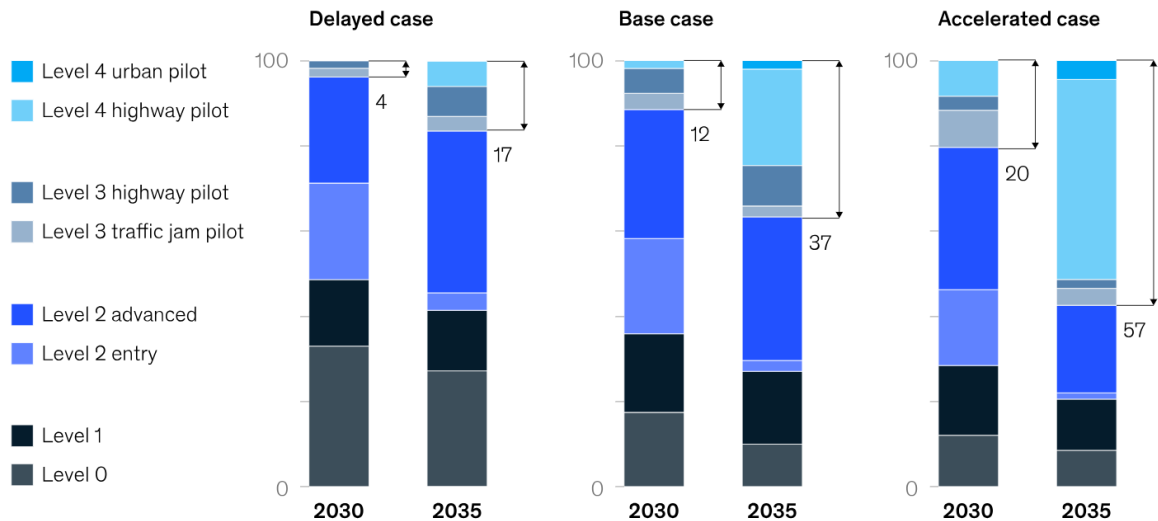
Εικόνα 10: Πως η χρήση των αυτόνομων αυτοκινήτων μπορεί να δημιουργήσει 300-500 δισεκατομμύρια έσοδα μέχρι το 2035, Πηγή: McKinsey & Company

Οι επιπτώσεις των αυτόνομων αυτοκινήτων σε άλλους κλάδους θα μπορούσαν να είναι σημαντικές. Για παράδειγμα, μειώνοντας τον αριθμό των τροχαίων ατυχημάτων και των συγκρούσεων, η τεχνολογία των AV θα μπορούσε να περιορίσει τον αριθμό των καταναλωτών που χρειάζονται οδική βοήθεια και επισκευές. Αυτό μπορεί να ασκήσει πίεση σε αυτούς τους τύπους επιχειρήσεων καθώς αυξάνεται η υιοθέτηση της AV από τους καταναλωτές. Επιπλέον, οι καταναλωτές με αυτοκινούμενα αυτοκίνητα ενδέχεται να μην υποχρεούνται να καταβάλλουν υψηλά ασφάλιστρα, καθώς η παράδοση του ελέγχου των οχημάτων στα συστήματα AV ενδέχεται να σημαίνει ότι οι μεμονωμένοι οδηγοί δεν θα μπορούν πλέον να θεωρηθούν υπεύθυνοι για αυτοκινητιστικά ατυχήματα. Κατά συνέπεια, ενδέχεται να προκύψουν νέα μοντέλα ασφάλισης μεταξύ επιχειρήσεων για αυτόνομα ταξίδια.

Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες δοκιμάζουν ήδη νέα ασφαλιστικά προϊόντα. Οι εταιρείες αυτές συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με την οδηγική συμπεριφορά από την αυτόνομη τεχνολογία και κάνουν εξατομικευμένες προσφορές στους καταναλωτές τους. Δεδομένου ότι οι ΚΑΕ ελέγχουν το σύστημα AV, τις επιδόσεις του και τα δεδομένα που παράγει (όπως οι επιδόσεις των οδηγών σε πραγματικό χρόνο), οι αυτοκινητοβιομηχανίες μπορούν να προσαρμόσουν με ακρίβεια τις ασφαλιστικές πολιτικές στους καταναλωτές τους, δίνοντάς τους ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των εξωτερικών ασφαλιστικών παρόχων.

4.1 Πώς τα AV θα μπορούσαν να μεταμορφώσουν την αγορά επιβατικών αυτοκινήτων

Δεδομένων των σημερινών υψηλών επιπέδων αβεβαιότητας στην αυτοκινητοβιομηχανία, η McKinsey ανέπτυξε τρία σενάρια για τις πωλήσεις αυτόνομων επιβατικών αυτοκινήτων με βάση διαφορετικά επίπεδα διαθεσιμότητας της τεχνολογίας, υιοθέτησης από τους πελάτες και κανονιστικής υποστήριξης (εικόνα 11). Στο σενάριο καθυστέρησης, οι αυτοκινητοβιομηχανίες πιέζουν περαιτέρω τα χρονοδιαγράμματα κυκλοφορίας των AV και η υιοθέτηση από τους καταναλωτές παραμένει χαμηλή. Αυτό το σενάριο προβλέπει ότι το 2030, μόνο το 4% των νέων επιβατικών αυτοκινήτων που πωλούνται είναι εγκατεστημένα με λειτουργίες AV L3+, με το ποσοστό αυτό να αυξάνεται σε 17% το 2035.



Εικόνα 11: Εκτιμώμενες πωλήσεις αυτόνομων αυτοκινήτων, Πηγή: McKinsey & Company

Το βασικό σενάριο στο παραπάνω διάγραμμα υποθέτει ότι οι κατασκευαστές OEM μπορούν να τηρήσουν τα χρονοδιαγράμματα που έχουν ανακοινώσει για το λανσάρισμα των AV, με ένα μεσαίο επίπεδο υιοθέτησης από τους πελάτες παρά το υψηλό κόστος των συστημάτων AV. Μέχρι το 2030, το 12% των νέων επιβατικών αυτοκινήτων πωλούνται με αυτόνομες τεχνολογίες L3+ και το 37% διαθέτουν προηγμένες τεχνολογίες AV το 2035.

Τέλος, στο σενάριο επιτάχυνσης, οι κατασκευαστές OEM κάνουν γρήγορα το ντεμπούτο τους με νέα AV, με σημαντικά έσοδα από νέα επιχειρηματικά μοντέλα (για παράδειγμα, pay as you go, που προσφέρει AV on demand (ζήτηση), ή νέες συνδρομητικές υπηρεσίες). Σε αυτό το σενάριο, οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτοκινήτων προεγκαθιστούν υλικό που καθιστά δυνατή την πλήρως αυτόνομη οδήγηση όταν το λογισμικό είναι έτοιμο για αναβάθμιση. Σε αυτό το σενάριο, το 20% των επιβατικών αυτοκινήτων που πωλούνται το 2030 περιλαμβάνουν προηγμένες τεχνολογίες AV και το 57% τις διαθέτουν μέχρι το 2035.

4.2 Υψηλότερα επίπεδα αυτοματοποίησης

Για τις αυτοκινητοβιομηχανίες που επικεντρώνονται στην παροχή οχημάτων με υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης. Οι καταναλωτές που ενδιαφέρονται για την ευκολία της οδήγησης χωρίς χέρια μπορεί να επιθυμούν αυτοκίνητα με πιο προηγμένες αυτόνομες λειτουργίες (συμπεριλαμβανομένων των L2+, L3 και L4), οι οποίες δίνουν στο αυτόνομο σύστημα μεγαλύτερο έλεγχο των καθηκόντων οδήγησης. Το κόστος των αισθητήρων και των υπολογιστών υψηλής απόδοσης μειώνεται, ενώ τα πρότυπα ασφαλείας για τις τεχνολογίες AV συνεχίζουν να εξελίσσονται. (Για παράδειγμα, τα πρότυπα που είναι σήμερα διαθέσιμα για τους

πιλότους κυκλοφοριακής συμφόρησης, τα οποία επιτρέπουν στα αυτόνομα οχήματα να πλοηγούνται μέσα στην κυκλοφορία με στάση και κίνηση, διατηρώντας παράλληλα μια ασφαλή απόσταση από άλλα αυτοκίνητα, θα μπορούσαν σύντομα να επεκταθούν και σε άλλες προηγμένες λειτουργίες AV). Στο σύνολό τους, οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να βοηθήσουν την αυτοκινητοβιομηχανία να εισαγάγει πιο προηγμένες αυτόνομες λειτουργίες σε ένα ευρύ φάσμα οχημάτων με την πάροδο του χρόνου.

Με βάση τα σενάρια πωλήσεων της McKinsey, τα συστήματα L3 και L4 για οδήγηση σε αυτοκινητόδρομους θα είναι πιθανότατα πιο ευρέως διαθέσιμα στην κατηγορία των ιδιωτικών επιβατικών αυτοκινήτων μέχρι το 2025 περίπου στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, παρόλο που οι πρώτες εφαρμογές μόλις τώρα βγαίνουν στην αγορά. (Μια πολυτελής ευρωπαϊκή μάρκα προσφέρει ένα σύστημα αυτοοδήγησης L3 υπό όρους, αλλά περιορίζει τη χρήση σε ορισμένους καλά σηματοδοτημένους αυτοκινητόδρομους και σε μειωμένες ταχύτητες).

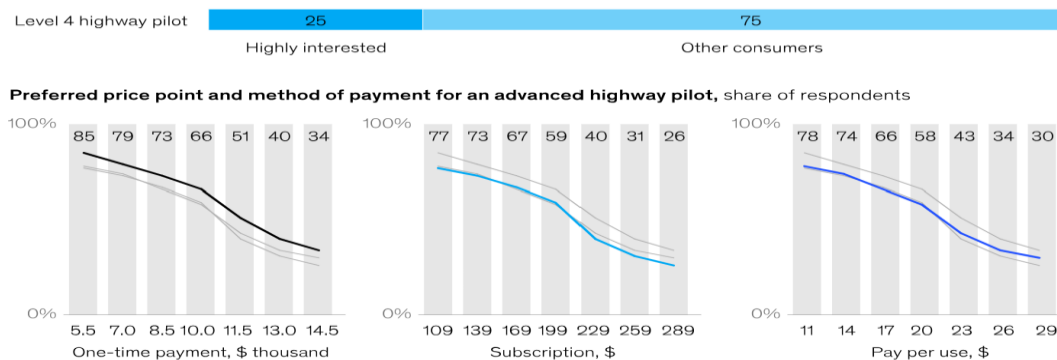
Το υψηλό αρχικό κόστος για την ανάπτυξη των συστημάτων οδήγησης L3 και L4 υποδηλώνει ότι οι προσπάθειες των αυτοκινητοβιομηχανιών για την εμπορική διάθεση πιο προηγμένων συστημάτων AV μπορεί να περιοριστούν αρχικά σε τμήματα οχημάτων υψηλής ποιότητας. Το πρόσθετο κόστος αδειοδότησης υλικού και λογισμικού ανά όχημα για τα συστήματα L3 και L4 θα μπορούσε να φτάσει τα 5.000 δολάρια ή και περισσότερο κατά την πρώιμη φάση της εξάπλωσης, ενώ το κόστος ανάπτυξης και επικύρωσης πιθανόν να ξεπεράσει το 1 δισεκατομμύριο δολάρια. Επειδή η τιμή αυτών των οχημάτων είναι πιθανό να είναι υψηλή, η προσφορά συστημάτων L2+ μπορεί να έχει μεγαλύτερες εμπορικές δυνατότητες. Αυτά τα αυτόνομα συστήματα θολώνουν κάπως τα όρια μεταξύ των τυπικών ADAS και της αυτοματοποιημένης οδήγησης, επιτρέποντας στους οδηγούς να αφήνουν τα χέρια τους από το τιμόνι για ορισμένες περιόδους σε περιοχές που επιτρέπονται από το νόμο.

Τα συστήματα L2+ είναι ήδη διαθέσιμα από αρκετούς κατασκευαστές OEM, ενώ πολλές άλλες εκδόσεις οχημάτων έχουν προγραμματιστεί για τα επόμενα χρόνια. Εάν εξοπλιστεί με επαρκή αισθητήρα και υπολογιστική ισχύ, η τεχνολογία που αναπτύχθηκε για τα συστήματα L2+ θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στην ανάπτυξη των συστημάτων L3. Αυτή είναι η προσέγγιση που ακολουθούν αρκετοί κινεζικοί ανατρεπτικοί ΚΑΕ. Οι εταιρείες αυτές λανσάρουν οχήματα που προσφέρουν συστήματα L2+ προ-εξοπλισμένα με αισθητήρες lidar. Τα οχήματα είναι πιθανό να φτάσουν σε λειτουργικότητα L3 σχετικά σύντομα, δεδομένου ότι οι εταιρείες χρησιμοποιούν πιθανότατα τον εν κινήσει στόλο των βελτιωμένων οχημάτων L2+ για τη συλλογή δεδομένων ώστε να μάθουν πώς να χειρίζονται σπάνιες ακραίες περιπτώσεις, ή για να τρέξουν το σύστημα L3 σε σκιάδη λειτουργία.

Όπου δεν είναι διαθέσιμα πραγματικά συστήματα L3, οι προγραμματιστές μπορεί επίσης να προσφέρουν έναν συνδυασμό χαρακτηριστικών L2+ και L3. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ένα χαρακτηριστικό L2+ για αυτοματοποιημένη οδήγηση σε αυτοκινητόδρομους και πόλεις, μαζί με ένα χαρακτηριστικό L3 για χρήση σε μποτιλιαρίσματα.

Οι καταναλωτές επωφελούνται από τη χρήση των συστημάτων AV με πολλούς τρόπους, όπως μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας, ευκολία στη λειτουργία για στάθμευση, συγχώνευση και άλλους ελιγμούς, πρόσθετη εξοικονόμηση καυσίμων λόγω της ικανότητας του αυτόνομου συστήματος να διατηρεί τις βέλτιστες ταχύτητες και περισσότερο ποιοτικό χρόνο.

Στην έρευνα της McKinsey για την αυτόνομη οδήγηση, τη συνδεσιμότητα, την ηλεκτροκίνηση και την κοινή κινητικότητα (ACES) του 2021, στην οποία συμμετείχαν περισσότεροι από 25.000 καταναλωτές σχετικά με τις προτιμήσεις τους για την κινητικότητα, περίπου το ένα τέταρτο των ερωτηθέντων δήλωσε ότι είναι πολύ πιθανό να επιλέξει ένα προηγμένο χαρακτηριστικό AV όταν αγοράσει το επόμενο όχημά του. Τα δύο τρίτα από αυτούς τους πολύ ενδιαφερόμενους πελάτες θα πλήρωναν εφάπαξ 10.000 δολάρια ή ένα ισοδύναμο ποσό συνδρομής για ένα πιλοτικό σύστημα L4 για αυτοκινητόδρομους, το οποίο παρέχει οδήγηση χωρίς χέρια σε αυτοκινητόδρομους υπό ορισμένες συνθήκες (εικόνα 12). Αυτό αντιπροσωπεύει μια τιμή και μια προθυμία πληρωμής που συνάδει με μερικά κορυφαία οχήματα AV που κυκλοφόρησαν τα τελευταία χρόνια, καθώς και με το μοντέλο τιμολόγησης που βασίζεται στην αξία μας.



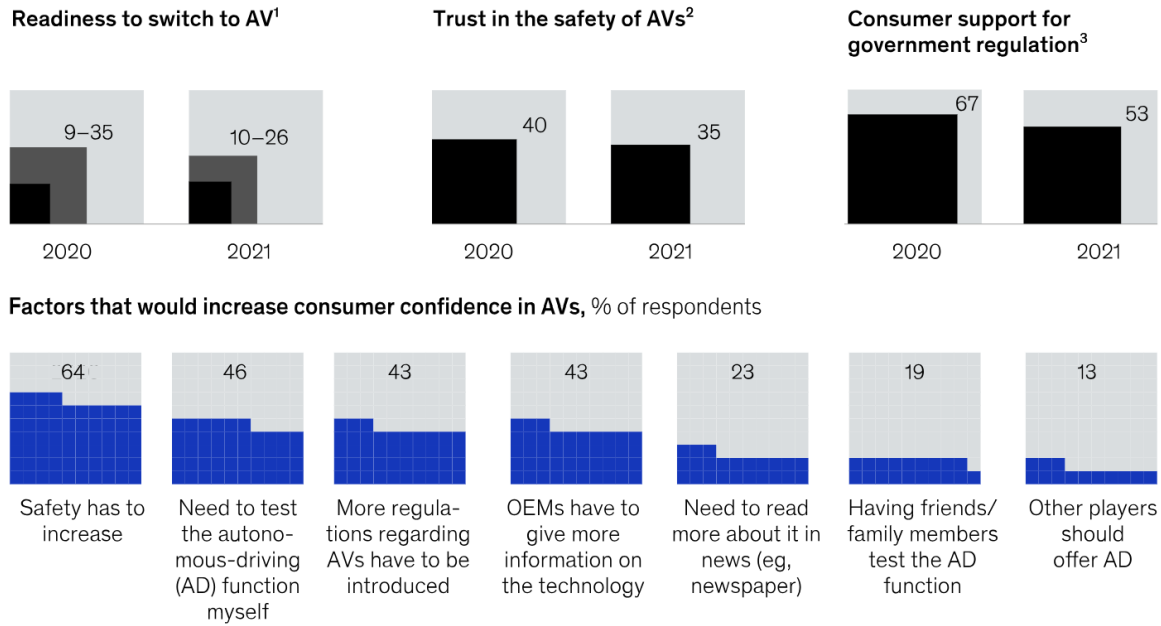
Εικόνα 12: Ενδιαφέρον για τη λειτουργία αυτόνομης οδήγησης κατά την αγορά του επόμενου αυτοκινήτου

Δεδομένου ότι οι καταναλωτές έχουν τόσο διαφορετικό τρόπο ζωής και ανάγκες, τα συστήματα AV μπορούν να ωφελήσουν ορισμένους καταναλωτές πολύ περισσότερο από άλλους, καθιστώντας τους πολύ πιο πρόθυμους να πληρώσουν για τα χαρακτηριστικά AV. Για παράδειγμα, ένας διευθυντής

πωλήσεων που διανύει 30.000 μίλια το χρόνο και αναβαθμίζει το αυτοκίνητό του σε αυτόνομο, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει όλο αυτό το χρόνο που προηγουμένως περνούσε οδηγώντας για να έρθει σε επαφή με νέους πελάτες ή να δημιουργήσει σε βάθος στρατηγικές πωλήσεων με την ομάδα του. Από την άλλη πλευρά, ένας γονέας που χρησιμοποιεί το αυτοκίνητό του κυρίως για ψώνια ή για να πηγαίνει τα παιδιά στο σχολείο μπορεί να είναι πιο απρόθυμος να πληρώσει για λειτουργίες AV.

Η διερεύνηση των αξιών των διαφορετικών προσωπικοτήτων καταναλωτών θα μπορούσε να επιτρέψει στους OEM και τις αντιπροσωπείες να προσαρμόσουν τις προτάσεις αξίας και τα συστήματα τιμολόγησης. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να εφαρμόσουν ένα ευέλικτο μοντέλο τιμολόγησης που θα περιλαμβάνει μια σταθερή εφάπαξ χρέωση, συνδρομητικές προσφορές και, ενδεχομένως, μια επιλογή κατά παραγγελία, όπως η καταβολή ωριαίας τιμής για κάθε χρήση ενός πιλότου κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η έρευνά μας δείχνει ότι οι καταναλωτές προτιμούν να έχουν διαφορετικές επιλογές τιμολόγησης. Από τους ιδιαίτερα ενδιαφερόμενους καταναλωτές, το 20 τοις εκατό των ερωτηθέντων στην έρευνα ACES δήλωσε ότι θα προτιμούσε να αγοράζει τα χαρακτηριστικά ADAS μέσω συνδρομής, ενώ σχεδόν το 30 τοις εκατό δήλωσε ότι θα προτιμούσε να πληρώνει κάθε φορά που χρησιμοποιεί ένα χαρακτηριστικό. Επιπλέον, ένας στους τέσσερις ερωτηθέντες δήλωσε ότι θα ήθελε να μπορεί να ξεκλειδώνει πρόσθετες λειτουργίες ADAS ακόμη και μετά την αγορά ενός νέου αυτοκινήτου.

Αν και οι καταναλωτές εξακολουθούν να ενδιαφέρονται πολύ για την αυτόνομη οδήγηση, υιοθετούν επίσης πιο προσεκτική και ρεαλιστική στάση απέναντι στα αυτοκινούμενα αυτοκίνητα. Για πρώτη φορά μετά από πέντε χρόνια, οι καταναλωτές είναι λιγότερο πρόθυμοι να εξετάσουν το ενδεχόμενο οδήγησης ενός πλήρως αυτόνομου οχήματος, όπως δείχνουν οι έρευνες ACES για τους καταναλωτές μας. Η προθυμία να μεταβούν σε ένα ιδιωτικό AV είναι μειωμένη κατά σχεδόν δέκα ποσοστιαίες μονάδες, με το 26% των ερωτηθέντων να δηλώνουν ότι θα προτιμούσαν να μεταβούν σε ένα πλήρως αυτόνομο αυτοκίνητο το 2021, σε σύγκριση με το 35% το 2020 (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Δείκτες ενδιαφέροντος των καταναλωτών για την κατοχή πλήρως αυτόνομων οχημάτων

4.3 Η νομική υποστήριξη και οι κανονισμοί είναι κρίσιμοι

Η υποστήριξη από τις ρυθμιστικές αρχές είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των ανησυχιών σχετικά με την ασφάλεια των AV, τη δημιουργία ενός αξιόπιστου και ασφαλούς οικοσυστήματος και την εφαρμογή παγκόσμιων προτύπων. Μέχρι στιγμής, οι περισσότεροι δημόσιοι λειτουργοί έχουν υποστηρίξει σθεναρά τη συμπερίληψη των δυνατοτήτων ADAS στους υφιστάμενους κανονισμούς, θέτοντας τις βάσεις για την αυτόνομη οδήγηση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πολύ μεγαλύτερη διείσδυση των λειτουργιών ADAS, τόσο στα επιβατικά όσο και στα επαγγελματικά οχήματα.

Η αυτοκινητοβιομηχανία και οι δημόσιες αρχές συμφωνούν για τις δυνατότητες της αυτόνομης οδήγησης να σώσει ζωές. Σήμερα, οι βασικές λειτουργίες ADAS SAE L1 και L2 εντάσσονται όλο και περισσότερο στο πλαίσιο κανονισμών. Αυτό περιλαμβάνει τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Γενικής Ασφάλειας Οχημάτων, μαζί με το Πρόγραμμα Αξιολόγησης Νέων Αυτοκινήτων (NCAP) της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, ένα εθελοντικό πρόγραμμα που θεσπίζει πρότυπα για την ασφάλεια των αυτοκινήτων. Το NCAP είναι βασικός υποστηρικτής της ενσωμάτωσης συστημάτων ενεργητικής ασφάλειας στα επιβατικά αυτοκίνητα.

Το 2020 και το 2022, οι κατασκευαστές OEM που επιδιώκουν την υψηλότερη βαθμολογία ασφαλείας του NCAP, πέντε αστέρων, βρέθηκαν αντιμέτωποι με τις προκλήσεις της εφαρμογής χαρακτηριστικών όπως η αυτόματη πέδηση έκτακτης ανάγκης (AEB) και η αυτόματη οδήγηση έκτακτης ανάγκης (AES).

Ως αποτέλεσμα, οι αμερικανικοί και οι ευρωπαϊκοί κατασκευαστές OEM σε όλα τα τμήματα έχουν αναπτύξει αυτά τα χαρακτηριστικά, με περισσότερο από το 90 % όλων των αυτοκινήτων ευρωπαϊκής και αμερικανικής κατασκευής να προσφέρουν δυνατότητες L1 ως βασικό επίπεδο.

Υπάρχει ήδη επαρκής ρύθμιση που επιτρέπει στις εταιρείες να δοκιμάσουν πιλοτικά υπηρεσίες ρομποτικής μεταφοράς σε πόλεις, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Κίνα, το Ισραήλ και τώρα στην Ευρώπη. Οι εταιρείες θα συνεχίσουν τους κύκλους δοκιμής και εκμάθησης με τα πιλοτικά robo-shuttle και θα περάσουν σε φάση σταθερής λειτουργίας τα επόμενα χρόνια. Ακόμα λείπουν, ωστόσο, παγκόσμια πρότυπα σχετικά με τις λειτουργίες AV για χρήση σε ιδιωτικά οχήματα, αν και πολλές ρυθμιστικές αρχές εργάζονται πάνω σε αυτά.

Η Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη έχει έναν κανόνα σχετικά με τα αυτοματοποιημένα συστήματα διατήρησης λωρίδας κυκλοφορίας που ρυθμίζει την εισαγωγή του AV L3 για ταχύτητες έως 60 χιλιόμετρα την ώρα. Επιπλέον, το Παγκόσμιο Φόρουμ των Ηνωμένων Εθνών για την εναρμόνιση των κανονισμών για τα οχήματα (WP.29) επεξεργάζεται πρόσθετους κανονισμούς για τη χρήση λειτουργιών AV σε υψηλότερες ταχύτητες. Η ομάδα αυτή σχεδιάζει να επεκτείνει τη χρήση προηγμένων αυτόνομων συστημάτων σε ταχύτητες έως 130 χιλιόμετρα την ώρα, με τον κανόνα να τίθεται σε ισχύ το 2023. Η Γερμανία έχει επίσης προσφέρει ολοκληρωμένη νομοθεσία για τα AV που επέτρεψε σε έναν ευρωπαϊκό ΚΑΕ να λανσάρει την πρώτη πραγματική λειτουργία L3 σε ένα τρέχον μοντέλο. Παρόμοια νομοθεσία υπάρχει στην Ιαπωνία και πρόσφατα εγκρίθηκε στη Γαλλία. Η ανάπτυξη παγκόσμιων προτύπων AV για τα οχήματα ιδιωτικής χρήσης βρίσκεται σαφώς σε εξέλιξη.

Για να επιτύχουν στην αγορά αυτόνομων επιβατικών αυτοκινήτων, οι κατασκευαστές και οι προμηθευτές θα πρέπει πιθανότατα να αλλάξουν τον τρόπο λειτουργίας τους. Αυτό μπορεί να απαιτήσει μια νέα προσέγγιση στην E&A που θα επικεντρώνεται σε διαδικασίες ανάπτυξης με γνώμονα το λογισμικό, ένα σχέδιο για την αξιοποίηση των δεδομένων του στόλου και ευέλικτες, πλούσιες σε χαρακτηριστικά προσφορές σε όλα τα τμήματα οχημάτων που θα λαμβάνουν υπόψη τις διαφορετικές τιμές των καταναλωτών. Η αποσύνδεση της ανάπτυξης εξαρτημάτων υλικού και λογισμικού για τις πλατφόρμες AV θα μπορούσε να επιτρέψει στους κατασκευαστές αυτοκινήτων και τους προμηθευτές να διατηρήσουν το κόστος σχεδιασμού πιο εφικτό, δεδομένου ότι η αρχιτεκτονική AV θα μπορούσε στη συνέχεια να επαναχρησιμοποιηθεί.

Για να κερδίσουν τους καταναλωτές, οι αυτοκινητοβιομηχανίες θα μπορούσαν επίσης να αναπτύξουν μια πελατοκεντρική στρατηγική προώθησης στην αγορά. Επιπλέον, οι ηγέτες θα μπορούσαν να διερευνήσουν διαφορετικά μοντέλα ιδιοκτησίας και μεθόδους πωλήσεων με γνώμονα την επιχειρηματική υπόθεση end-to-end (E2E), λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής του

αυτόνομου οχήματος. Τέλος, οι ηγέτες μπορεί επίσης να χρειαστεί να δημιουργήσουν μια οργάνωση που θα υποστηρίζει όλες τις παραπάνω αλλαγές.

4.3.1 Δημιουργία νέας στρατηγικής σε E&A

Η επιτυχία των AV μπορεί να απαιτήσει από τους OEM να αλλάξουν νοοτροπία. Με απλά λόγια, οι παλιοί τρόποι λειτουργίας δεν ισχύουν πλέον. Οι επιτυχημένοι ΚΑΕ θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη εσωτερικών ικανοτήτων, όπως η αριστεία στην ανάπτυξη λογισμικού. Παρόλο που η αυτοκινητοβιομηχανία έχει βελτιώσει την ικανότητά της να κατανέμει τις εργασίες ανάπτυξης μεταξύ πολλών συνεργατών και προμηθευτών, η πολυπλοκότητα μιας στοίβας AV με δυνατότητα L3 ή L4 περιορίζει τις δυνατότητες συνεργασίας με πολλούς διαφορετικούς ειδικούς.

Πράγματι, η ανάπτυξη δυνατοτήτων AV απαιτεί πολύ ισχυρότερη ιδιοκτησία ολόκληρου του οικοσυστήματος, καθώς και την ικανότητα κωδικοποίησης υλικού και λογισμικού - ιδίως τσιπ και νευρωνικών δικτύων. Αυτό υποδηλώνει ότι οι κορυφαίοι κατασκευαστές OEM θα πρέπει είτε να αναπτύξουν ισχυρές εσωτερικές δυνατότητες είτε να συνάψουν συνεργασίες με κορυφαίους τεχνολογικούς φορείς που θα αναλάβουν την παροχή ολόκληρης της πλατφόρμας οδήγησης.

Οι OEM θα επωφεληθούν επίσης από την ολιστική διαχείριση των οδικών τους χαρτών για την ανάπτυξη χαρακτηριστικών AV και χαρτοφυλακίων προσφορών. Θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι η αρχιτεκτονική AV είναι ευέλικτη και επαναχρησιμοποιήσιμη, όπου είναι δυνατόν. Επιπλέον, για να παραμείνουν ανταγωνιστικά κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας πλατφόρμας οχήματος, τα συστήματα πρέπει να είναι εύκολο να αναβαθμιστούν. Η ανάπτυξη νέων στρατηγικών για τη συλλογή δεδομένων του στόλου, η επιλογή σχετικών σεναρίων δοκιμών και η χρήση των δεδομένων για την εκπαίδευση και την επικύρωση του συστήματος AV είναι επίσης πιθανό να είναι ουσιαστικής σημασίας.

4.4 Ανάπτυξη στρατηγικών με κέντρο τον πελάτη go-to-market

Οι OEM και τα δίκτυα αντιπροσώπων τους θα πρέπει να προσπαθήσουν να διαλύσουν τις πολλές αβεβαιότητες που αντιμετωπίζουν οι καταναλωτές όταν αποφασίζουν να αγοράσουν ένα αυτοκίνητο με δυνατότητες AV. Παρόλο που οι καταναλωτές εξακολουθούν να ενδιαφέρονται πολύ για το AV, οι περισσότεροι αγοραστές δεν έχουν ακόμη οδηγήσει ένα αυτόνομο αυτοκίνητο. Οι καταναλωτές λαμβάνουν πολλά διαφορετικά (και μερικές φορές αντιφατικά) μηνύματα καθ' όλη τη διάρκεια της αγοράς αυτοκινήτου, από πηγές που διαφημίζουν την τεχνολογία μέχρι πηγές που προβάλλουν

σημαντικές ανησυχίες για την ασφάλεια. Για να κερδίσουν την εμπιστοσύνη των καταναλωτών, οι κατασκευαστές OEM και οι αντιπρόσωποι ενδέχεται να χρειαστεί να παρέχουν πρόσθετη εκπαίδευση στις πωλήσεις, ώστε οι υπάλληλοι να μπορούν να παρουσιάσουν τα συστήματα AV στους πελάτες και να εξηγήσουν τις τεχνολογίες με αρκετές λεπτομέρειες ώστε να αμβλύνουν τις ανησυχίες των πελατών.

Η παροχή στους πελάτες της δυνατότητας να βιώσουν την AV από πρώτο χέρι είναι κρίσιμη, οπότε οι αυτοκινητοβιομηχανίες ίσως θελήσουν να προσφέρουν μια δοκιμαστική οδήγηση που να παρουσιάζει την πλατφόρμα AV. Η αλλαγή του επιχειρηματικού μοντέλου από την προσφορά εφάπαξ αδειοδότησης σε ένα συνεχές συνδρομητικό πρόγραμμα θα μπορούσε να διευκολύνει τους πελάτες να αποκτήσουν οικονομικά ένα AV και να προσφέρει πρόσθετο κέρδος για τους ΚΑΕ. Η έρευνά μας δείχνει ότι στο μέλλον και τα τρία επιχειρηματικά μοντέλα (εφάπαξ πωλήσεις, συνδρομητική τιμολόγηση και πληρωμή ανά χρήση) μπορεί να αποφέρουν σημαντικά έσοδα. Αυτό σημαίνει ότι οι ΚΑΕ και άλλες εταιρείες ενδέχεται να χρειαστεί να προσαρμόσουν την προσέγγισή τους στην αγορά προκειμένου να πωλούν συνδρομές. Οι ΚΑΕ θα μπορούσαν να εξετάσουν το ενδεχόμενο να προσφέρουν συνδρομές που υπερβαίνουν τα χαρακτηριστικά AV και την πιθανή ιδιοκτησία του οχήματος, όπως η συνδεσιμότητα εντός του αυτοκινήτου.

4.4.1 Επιχειρηματικό πλάνο από την αρχή έως το τέλος

Με τις νέες μορφές εσόδων που εισέρχονται μέσω συνδρομών και προσφορών pay-per-use, οι κατασκευαστές OEM ίσως χρειαστεί να επανεξετάσουν τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζουν την επιχειρηματική υπόθεση για τα οχήματά τους και να στραφούν προς στρατηγικές μάρκετινγκ E2E. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να εξετάσουν την τιμολόγηση και τη διάρκεια της συνδρομής, τις πωλήσεις αναβαθμίσεων, τη συντήρηση λογισμικού και την πιθανή μεταβίβαση σε πιο προηγμένα συστήματα. Για την τιμολόγηση μέσω συνδρομής, οι ΚΑΕ είναι πιθανό να αντιμετωπίσουν υψηλότερο αρχικό κόστος, καθώς πρέπει να εξοπλίσουν όλα τα οχήματα με τις τεχνολογίες που θα κάνουν τα χαρακτηριστικά AV να λειτουργούν. Σε αντάλλαγμα, μπορεί να αναμένουν μεγαλύτερη χρήση από τους πελάτες και υψηλότερα έσοδα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οχήματος.

Με βάση την έρευνα πελατών της McKinsey και τις μελέτες επιχειρηματικών περιπτώσεων, τα συνδρομητικά μοντέλα AV μπορεί αρχικά να είναι οικονομικά βιώσιμα μόνο για τα premium οχήματα του D-segment (μεγάλα αυτοκίνητα όπως σεντάν ή βαγόνια) και άνω, ιδίως για εκείνα που ήδη εμφανίζουν υψηλότερα έσοδα από τις λειτουργίες ADAS/AV. Οι κατασκευαστές OEM ενδέχεται να

χρειαστεί να προσαρμόσουν τους εσωτερικούς βασικούς δείκτες απόδοσης (KPI), τις δομές χρηματοδότησης και τις στρατηγικές επικοινωνίας με τους επενδυτές, καθώς το επιχειρηματικό μοντέλο E2E μειώνει τη βραχυπρόθεσμη κερδοφορία σε αντάλλαγμα για μακροπρόθεσμα έσοδα.

4.5 Επιπτώσεις για τους προμηθευτές

Οι προμηθευτές μπορεί επίσης να χρειαστεί να προσαρμοστούν στους νέους παράγοντες επιτυχίας του κλάδου. Αντιμετωπίζουν έντονο ανταγωνισμό για λύσεις πλήρους φάσματος, ο οποίος ενδέχεται να οδηγήσει σε ενοποίηση των παικτών. Για να ανταγωνιστούν, οι προμηθευτές πρέπει να είναι εστιασμένοι και ευέλικτοι. Μπορεί να επωφεληθούν από την προσφορά διαφορετικών μοντέλων παράδοσης στους πελάτες OEM, από αυτόνομες λύσεις υλικού έως πλήρως ολοκληρωμένες λύσεις υλικού-λογισμικού. Σε αντάλλαγμα, μπορεί να ανοίξουν νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη κοινών επιχειρηματικών μοντέλων πιο κοντά στους τελικούς πελάτες, συμπεριλαμβανομένης ενδεχομένως της δυνατότητας επιμερισμού των εσόδων.

Για λύσεις AV τελευταίας τεχνολογίας, οι εταιρείες θα χρειαστούν πρόσβαση σε μεγάλες ποσότητες δεδομένων στόλου για την εκπαίδευση αλγορίθμων ώστε να επιτύχουν αρκετά χαμηλά ποσοστά αστοχίας. Ενώ οι κατασκευαστές OEM έχουν πρόσβαση στο στόλο και πρέπει μόνο να βρουν την κατάλληλη τεχνολογία για να αντλήσουν δεδομένα από τους στόλους των πελατών τους, οι προμηθευτές πρέπει να εξαρτώνται από συνεργάτες ή βασικούς πελάτες για να αποκτήσουν πρόσβαση. Κατά συνέπεια, είναι ζωτικής σημασίας για τους προμηθευτές που επιθυμούν να αναπτύξουν συστήματα AV τελευταίας τεχνολογίας να προσλάβουν έναν στενό κύριο πελάτη από νωρίς για την ανάπτυξη κώδικα και την πρόσβαση στο στόλο.

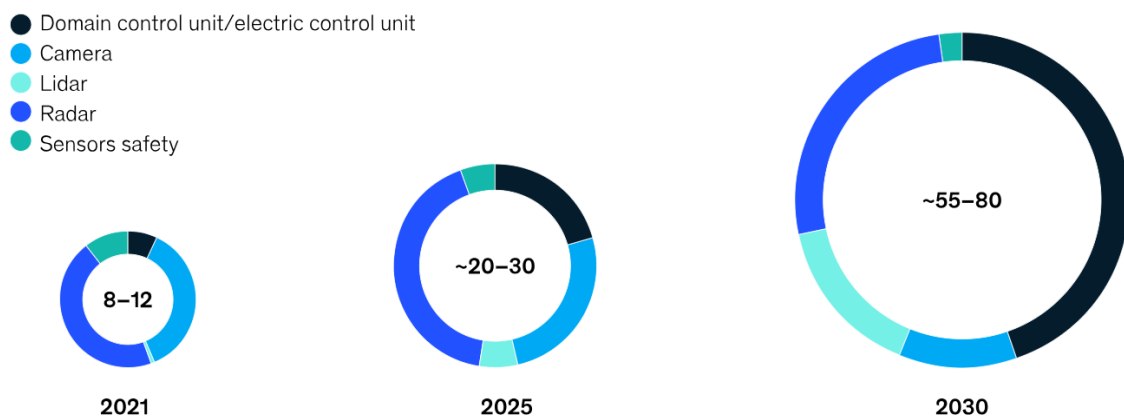
Η έλλειψη πρόσβασης σε σημαντικές ποσότητες δεδομένων στόλου, χρηματοδότησης και επαρκούς ταλέντου πιθανόν να περιορίσει τον αριθμό των εταιρειών που θα μπορέσουν να προσφέρουν με επιτυχία ολοκληρωμένα συστήματα AV. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι μια δυναμική της αγοράς "ο νικητής παίρνει τα περισσότερα". Οι εταιρείες με την καλύτερη πρόσβαση σε δεδομένα και χρηματοδότηση θα απολαμβάνουν πιθανότατα ισχυρό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι εκείνων που δεν διαθέτουν αυτές τις πληροφορίες, καθώς θα έχουν περισσότερες πιθανότητες να προωθήσουν την τεχνολογία τους και να προηγηθούν των ανταγωνιστών τους.

Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των επιτυχημένων προμηθευτών ή τεχνολογικών εταιρειών που θα παραδώσουν ένα πλήρες σύστημα AV ενδέχεται να παραμείνει περιορισμένος σε μια χούφτα εταιρειών, τόσο στη Δύση όσο και στην Κίνα. Για την πρώτη γενιά συστημάτων AV, η από κοινού ανάπτυξη του λογισμικού και των απαιτούμενων τσιπ μπορεί να βοηθήσει το πλήρες σύστημα να επιτύχει καλύτερες επιδόσεις και αποδοτικότητα, με μικρότερο κίνδυνο καθυστερημένων

προβλημάτων ενσωμάτωσης. Αυτό θα μπορούσε να περιορίσει περαιτέρω τον αριθμό των πιθανών νικητών της βιομηχανίας.

Η επίτευξη μακροπρόθεσμης επιτυχίας μπορεί επίσης να απαιτεί από τους προμηθευτές να διατυπώσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα, την πρόταση αξίας και τις στρατηγικές τους. Θα πρέπει να αποφασίσουν αν θα γίνουν ή όχι ένας παίκτης πλήρους στοίβας για τα πιο προηγμένα συστήματα ή αν θα επικεντρωθούν σε ειδικές περιοχές της στοίβας, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι είτε εξαρτήματα υλικού είτε στοιχεία λογισμικού. Η έρευνά McKinsey δείχνει ότι μια στοχευμένη προσέγγιση μπορεί να αποφέρει υψηλότερες αποδόσεις για πολλούς προμηθευτές και ενδεχομένως να προσφέρει σημαντικές και ελκυστικές δεξαμενές αξίας. Η συνολική αξία της αγοράς εξαρτημάτων AV για επιβατικά αυτοκίνητα θα μπορούσε να φτάσει τα 55 έως 80 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2030, με βάση μια λεπτομερή ανάλυση που υποθέτει ένα μεσαίο σενάριο υιοθέτησης AV (Εικόνα 11). Σε αυτό το σενάριο, το μεγαλύτερο μέρος των εσόδων θα προέρχεται από τις μονάδες ελέγχου.

Autonomous-driving hardware value pools,¹ \$ billion



¹Estimates are for the passenger car market.
Source: McKinsey Center for Future Mobility

Εικόνα 14: Δεξαμενές υλικών αυτόνομων αυτοκινήτων, Πηγή: McKinsey Center of Mobility

Οι κατασκευαστές OEM συχνά ακολουθούν διαφορετικές στρατηγικές για τις λύσεις ADAS χαμηλότερου επιπέδου και AV υψηλότερου επιπέδου, οπότε οι προμηθευτές που θέλουν να παίξουν σε ολόκληρη τη στοίβα τεχνολογίας μπορεί να χρειαστεί να εργαστούν με ευέλικτα μοντέλα παράδοσης. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει την προμήθεια εξαρτημάτων, την παροχή αυτόνομων λειτουργιών λογισμικού, όπως η στάθμευση, ή την παροχή πλήρως ολοκληρωμένων στοίβων ADAS ή AV. Ενώ η παράδοση εξαρτημάτων είναι ένα επιχειρηματικό μοντέλο που επιτρέπει τη συνεργασία με πολλούς διαφορετικούς ΚΑΕ, η παροχή στοχευμένων λύσεων λογισμικού ή πλήρως

ολοκληρωμένων στοίβων λογισμικού είναι δυνατή μόνο όταν οι ΚΑΕ έχουν αποφασίσει να αναθέσουν σε τρίτους.

Επειδή οι περισσότεροι κορυφαίοι ΚΑΕ στην ανάπτυξη AV χρησιμοποιούν εσωτερική ανάπτυξη για τα πιο προηγμένα συστήματά τους, ο αριθμός των δυνητικών πελατών για λύσεις πλήρους πακέτου είναι αρκετά περιορισμένος. Για μεμονωμένες λειτουργίες ή πρόσθετα (π.χ. στάθμευση ή λιγότερο εξελιγμένα συστήματα ADAS), υπάρχει μεγαλύτερο εύρος πελατών που αναζητούν προμηθευτές. Τα συστήματα ADAS και AV εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το λογισμικό, οπότε οι στρατηγικές νομισματοποίησης της αλυσίδας εφοδιασμού θα μπορούσαν να αλλάξουν. Για παράδειγμα, αντί να χρεώνουν μια εφάπαξ χρέωση για κάθε εξάρτημα, οι προμηθευτές θα μπορούσαν να χρεώνουν για την εκτέλεση τακτικών ενημερώσεων του συστήματος. Θα μπορούσαν ακόμη και να μεταβούν σε ένα μοντέλο επιμερισμού των εσόδων, το οποίο θα αύξανε το οικονομικό κίνητρο για την ενημέρωση των χαρακτηριστικών.

Νέες εταιρείες τεχνολογίας εισέρχονται επίσης σε μια αγορά που προηγουμένως προοριζόταν για τους προμηθευτές της πρώτης βαθμίδας της αυτοκινητοβιομηχανίας. Οι τεχνολογικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται σήμερα στην αγορά επιβατικών αυτοκινήτων ξεκινούν κυρίως από την αρμοδιότητα του system-on-chip και χτίζουν τη σουίτα λογισμικού από πάνω. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα, στο μέλλον, οι πάροχοι τεχνολογίας ρομπο-ταξί και ρομπο-μεταφοράς L4 να εισέλθουν στην αγορά προμηθειών αυτοκινήτων, αλλά οι εταιρείες αυτές θα πρέπει να αξιολογήσουν τη δυνατότητα εφαρμογής των τεχνολογιών AV και τις θέσεις κόστους σε σχέση με το τι απαιτούν οι πελάτες από τα επιβατικά αυτοκίνητα.

Με μια πρώτη ματιά, αυτές οι νέες τεχνολογικές εταιρείες μπορεί να φαίνεται ότι απειλούν τους καθιερωμένους προμηθευτές αυτοκινήτων, δεδομένου ότι ανταγωνίζονται για τις δουλειές των ίδιων κατασκευαστών αυτοκινήτων. Όμως, οι εταιρείες τεχνολογίας και οι καθιερωμένοι προμηθευτές θα μπορούσαν ενδεχομένως να επωφεληθούν από νέες ευκαιρίες συνεργασίας στις οποίες θα παρέχουν συμπληρωματικές ικανότητες στην ανάπτυξη λογισμικού και υλικού που θα βοηθήσουν επίσης στη βιομηχανοποίηση των λύσεων AV.

Η εξασφάλιση μιας ηγετικής θέσης ως προμηθευτής AV θα είναι πιθανώς δύσκολη. Μπορεί να απαιτηθεί από τις εταιρείες να αναπτύξουν ισχυρές ικανότητες στην τεχνολογία και οικονομίες κλίμακας για να αποκτήσουν ηγετική θέση στο κόστος. Όμως, καθώς οι προμηθευτές αρχίζουν να συζητούν με τους ΚΑΕ για τον εξοπλισμό των στόλων με νέες τεχνολογίες, θα μπορούσαν να

προκύψουν πρόσθετες νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες -συμπεριλαμβανομένου του επιμερισμού των κερδών. Κρίσιμα, οι προμηθευτές θα μπορούσαν να επωφεληθούν από ένα νέο λειτουργικό μοντέλο συνεργασίας με τους ΚΑΕ που θα εξασφαλίζει επαρκή οφέλη πέρα από την απλή κατανομή των κινδύνων, δεδομένου ότι οι προμηθευτές δεν έχουν την άμεση πρόσβαση στους αγοραστές αυτοκινήτων ή στους οδηγούς που θα τους επέτρεπε να επικοινωνήσουν ορισμένες προτάσεις αξίας.

4.6 Υψηλό δυναμικό ανάπτυξης αλλά και υψηλή αβεβαιότητα και ρίσκο

Οι νέες τεχνολογίες AV έχουν τεράστιες δυνατότητες να προσφέρουν νέα επίπεδα ασφάλειας και ευκολίας για τους καταναλωτές, να δημιουργήσουν σημαντική αξία στην αυτοκινητοβιομηχανία και να μεταμορφώσουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι ταξιδεύουν. Ταυτόχρονα, η δυναμική και ταχέως εξελισσόμενη αγορά επιβατικών αυτοκινήτων AV δημιουργεί υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας. Όλες οι εταιρείες στην αλυσίδα αξίας AV - από τις αυτοκινητοβιομηχανίες και τους προμηθευτές έως τους παρόχους τεχνολογίας - πρέπει να έχουν σαφείς, καλά ευθυγραμμισμένες στρατηγικές. Οι εταιρείες που επιδιώκουν να κερδίσουν στην αγορά αυτόνομων επιβατικών αυτοκινήτων θα μπορούσαν να επωφεληθούν από μια στοχευμένη πρόταση αξίας, ένα σαφές όραμα για το πού κατευθύνεται η αγορά (συμπεριλαμβανομένων καλά αναπτυγμένων σεναρίων που καλύπτουν τουλάχιστον τα επόμενα δέκα χρόνια) και μια κατανόηση του τι θέλουν περισσότερο οι καταναλωτές.

Αρχικά, οι εταιρείες μπορούν να αξιολογήσουν την αρχική τους θέση σε σχέση με τους μακροπρόθεσμους επιχειρηματικούς στόχους και τις προτεραιότητές τους. Το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι μια στρατηγική χαρτοφυλακίου AV, ένας οδικός χάρτης χαρακτηριστικών και ένα λεπτομερές σχέδιο υλοποίησης που θα αντιμετωπίζει κάθε κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Οι εταιρείες πιθανόν να επωφεληθούν από την εξασφάλιση βασικών δυνατοτήτων, την αναμόρφωση της οργάνωσης, την ενημέρωση των εσωτερικών διαδικασιών και την ανάπτυξη εξωτερικών σχέσεων με συνεργάτες και ρυθμιστικές αρχές. Καθώς οι κατασκευαστές OEM αναθεωρούν τακτικά τα χρονοδιαγράμματα για την κυκλοφορία νέων οχημάτων AV, οι εταιρείες ενδέχεται επίσης να χρειάζεται να αναθεωρούν και να επικαιροποιούν συχνά τις επιχειρηματικές στρατηγικές τους. Η επιτυχία στην AV δεν είναι δεδομένη. Αλλά για να αξιοποιηθεί πλήρως η υπόσχεση της αυτόνομης οδήγησης, οι προνοητικές εταιρείες και οι ρυθμιστικοί φορείς μπορούν να ανοίξουν το δρόμο.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Η εισαγωγή και η αποδοχή των αυτόνομων οχημάτων αντιπροσωπεύουν ένα συναρπαστικό, αλλά και πολύπλοκο κεφάλαιο στην εξέλιξη της τεχνολογίας και της κοινωνίας. Τα αυτόνομα οχήματα, με τη δυνατότητά τους να λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, αντιπροσωπεύουν ένα επαναστατικό βήμα προς ένα μέλλον όπου η μετακίνηση θα είναι πιο ασφαλής, αποτελεσματική και πράσινη. Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις σε πολλούς τομείς, που απαιτούν συνεπή ανάλυση και προετοιμασία για να επιτευχθεί η ομαλή της ένταξη στην καθημερινή ζωή και στην κοινωνία μας.

Οι τεχνικές προκλήσεις αποτελούν κορυφαίο προτεραιότητα για την ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων. Απαιτείται η δημιουργία συστημάτων αισθητήρων, λογισμικού και υποδομών που θα εξασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία τους σε κάθε συνθήκη κυκλοφορίας. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας προσφέρει νέες ευκαιρίες, αλλά και απαιτήσεις για προσαρμογή και βελτίωση των υπάρχοντων συστημάτων, προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης αξιοπιστία και απόδοση των οχημάτων.

Τα νομικά και ηθικά ζητήματα αποτελούν κρίσιμη πτυχή στην εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στην κοινωνία. Η νομοθετική ρύθμιση για θέματα όπως η ευθύνη σε περίπτωση ατυχημάτων και η προστασία των δεδομένων είναι απαραίτητη για την προστασία των χρηστών και την αποφυγή νομικών αβεβαιοτήτων. Παράλληλα, οι ηθικές ανησυχίες σχετικά με τις αποφάσεις των αυτόνομων οχημάτων σε κρίσιμες καταστάσεις απαιτούν διεξοδική συζήτηση και καθοδήγηση για την ανάπτυξη ηθικών προτύπων και αλγορίθμων λήψης αποφάσεων.

Οι υποδομές και οι τεχνολογίες υποστήριξης είναι ουσιώδεις για την επιτυχή λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων στον χώρο της κυκλοφορίας. Απαιτούνται επενδύσεις σε έξυπνες υποδομές και τεχνολογίες που θα επιτρέπουν τη συνεχή επικοινωνία και αλληλεπίδραση των οχημάτων με το περιβάλλον τους. Η ανάπτυξη αυτών των υποδομών απαιτεί συνεργασία μεταξύ δημόσιων και ιδιωτικών φορέων και την εφαρμογή συντονισμένων προγραμμάτων ανάπτυξης.

Η απόδοση και η αξιοπιστία των αυτόνομων οχημάτων είναι ουσιώδης για την αποδοχή και επιτυχία της τεχνολογίας. Η συνεχή βελτίωση των συστημάτων αισθητήρων, του λογισμικού και των αλγορίθμων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση όχι μόνο της ασφαλούς λειτουργίας των οχημάτων αλλά και της εμπιστοσύνης του κοινού σε αυτά.

Η εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στην κοινωνία έχει επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων συμβάλλει στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ενώ η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών στην κοινωνία επηρεάζει τον τρόπο ζωής και τις υποδομές των πόλεων.

Η τεχνολογική ανάπτυξη και καινοτομία προωθούν την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και προϊόντων που βελτιώνουν την καθημερινότητά μας και δημιουργούν νέες αγορές και ευκαιρίες. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη είναι καίρια για την επίτευξη των επιδιωκόμενων αποτελεσμάτων και τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας στο παγκόσμιο περιβάλλον.

Συνοψίζοντας, η εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στην κοινωνία αντιπροσωπεύει μια σημαντική τεχνολογική πρόκληση και ευκαιρία για την ανθρώπινη κοινωνία. Η επιτυχής υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες σε τεχνικό, νομικό, ηθικό και κοινωνικό επίπεδο. Μόνο μέσα από αυτήν την προσέγγιση θα μπορέσουμε να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις και να αξιοποιήσουμε τα οφέλη που προσφέρουν οι αυτόνομες μεταφορές για το μέλλον μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fagnant DJ, Kockelman K (2015) Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp Res Part A* 77:167-181.
2. Guizzo E (2011) Πώς λειτουργεί το αυτοοδηγούμενο αυτοκίνητο της Google. *IEEE Spectrum Online*, 18 Οκτωβρίου
3. Markoff J (2010) Τα αυτοκίνητα της Google οδηγούν μόνα τους, στο Traffic. *New York Times* 9
4. ACEA (2015) Οδηγός τσέπης για την αυτοκινητοβιομηχανία. Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων, http://www.acea.be/uploads/publications/POCKET_GUIDE_2015-2016.pdf
5. Nieuwenhuijsen J (2015) Diffusion of automated vehicles: a quantitative method to model the diffusion of automated vehicles with system dynamics. Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Delft, TU Delft
6. Hong D, Kimmel S, Boehling R, Camoriano N, Cardwell W, Jannaman G, Purcell A, Ross D, Russel E (2008) Development of a semi-autonomous vehicle operateable by the visually-impaired. In: *IEEE International Conference on multisensor fusion and integration for intelligent systems*, 2008. MFI 2008, σελ. 539-544
7. Anderson JM, Nidhi K, Stanley KD, Sorensen P, Samaras C, Oluwatola OA (2014) Autonomous vehicle technology: Για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής: Ένας οδηγός για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Rand Corporation
8. Folsom TC (2011) Κοινωνικές προεκτάσεις των αυτόνομων αστικών οχημάτων εδάφους. In: *IEEE International Symposium on Technology and Society: IEEE International Symposium on Technology and Society*
9. Piao J, McDonald M (2008) Προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού από την αυτόνομη στη συνεργατική προσέγγιση. *Transp Rev* 28:659-684
10. Manyika J, Chui M, Bughin J, Dobbs R, Bisson P, Marrs A (2013) Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy. McKinsey Global Institute Νέα Υόρκη
11. Petit J, Shladover SE (2015) Πιθανές κυβερνοεπιθέσεις σε αυτοκινούμενα οχήματα. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 16:546- 556
12. Knight W (2013) Τα αυτοκίνητα χωρίς οδηγό είναι πιο μακριά απ' ό,τι νομίζετε. *MIT Technology Review*. <https://www.technologyreview.com/s/520431/driverless-carsare-further-away-than-you-think/>

13. Litman T (2015) Προβλέψεις εφαρμογής αυτόνομων οχημάτων. Victoria Transport Policy Institute 28
14. Maddox J, Sweatman P, Sayer J (2015) Intelligent vehicles + infrastructure to address transportation problems-a strategic approach. Στο: 24ο διεθνές τεχνικό συνέδριο για την ενισχυμένη ασφάλεια των οχημάτων (ESV)
15. Schoettle B, Sivak M (2014) Έρευνα της κοινής γνώμης σχετικά με τα συνδεδεμένα οχήματα στις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Αυστραλία. In: 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)
16. Kan Z, Qiang Z, Haojun Y, Long Z, Lu H, Chatzimisios P (2015) Reliable and efficient autonomous driving: the need for heterogeneous vehicular networks. Commun Mag IEEE 53:72- 79
17. Patriksson P (1994) The traffic assignment problem: models and methods, VSP BV, The Netherlands. Αναπαραγωγή με πιστό αντίγραφο που δημοσιεύθηκε το 2014 από την Dover Publications, Inc., Mineola.
18. Sheffi Y (1985) Δίκτυα αστικών μεταφορών: ανάλυση ισορροπίας με μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού. Prentice- Hall Inc, Englewood Cliffs
19. Weber M (2014) Where to? a history of autonomous vehicles. Διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.computerhistory.org/atc/m/where-to-a-history-ofautonomous-vehicles>
20. Fenton RE, Mayhan RJ (1991) Μελέτες αυτοματοποιημένων αυτοκινητοδρόμων στο πανεπιστήμιο του Οχάιο - μια επισκόπηση. IEEE Trans Vehicular Technol 40:100-113
21. Ιοαννου P (2013) Αυτοματοποιημένα συστήματα αυτοκινητοδρόμων. Springer Science & Business Media
22. Lantos B (2010) Μη γραμμικός έλεγχος οχημάτων και ρομπότ. Springer Science & Business Media
23. Blasch EP, Lakhota A, Seetharaman G (2006) Τα μη επανδρωμένα οχήματα ενηλικιώνονται: Η μεγάλη πρόκληση της DARPA. Computer 39:26-29
24. Google (2015) Google Self-Driving Car Project, http://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/en//selfdriving_car/files/reports/report-0615.pdf
25. Muir H (2016) Το αυτοκινούμενο αυτοκίνητο της Google καταγράφηκε σε βίντεο να συγκρούεται με λεωφορείο. In: (ed.) The Guardian <https://www.theguardian.com/technology/2016/mar/09/google-self-driving-car-crash-video-accident-bus>
26. NHTSA (2013) <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development>

27. Behere S, Torrington M (2015) Μια λειτουργική αρχιτεκτονική για αυτόνομη οδήγηση. In: Proceedings of the first international workshop on automotive software architecture. ACM, σσ. 3-10
28. DiClemente J, Mogos S, Wang R (2014) Έκθεση πολιτικής για τα αυτόνομα αυτοκίνητα
29. Siciliano B, Khatib O (2008) Springer handbook of robotics. Springer Science & Business Media, Βερολίνο
30. Farhadi A, Endres I, Hoiem D, Forsyth D (2009) Describing objects by their attributes. In: IEEE Conference on Computer vision and pattern recognition, 2009. CVPR 2009, σελ. 1778-1785
31. Savasturk D, Froehlich B, Schneider N, Enzweiler M, Franke U (2015) Συγκριτική μελέτη για την ανίχνευση οχημάτων σε εικόνες μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας και κανονικές εικόνες. In: IEEE 18th international conference on intelligent transportation systems (ITSC), IEEE 2015, σελ. 1595-1600
32. Chen W (2015b) Vehicular communications and networks: Αρχιτεκτονικές, πρωτόκολλα, λειτουργία και ανάπτυξη. Elsevier
33. Sivaraman S (2013) Εκμάθηση, μοντελοποίηση και κατανόηση του περιβάλλοντος χώρου οχημάτων με χρήση πολυτροπικής ανίχνευσης
34. Wei J, Snider JM, Kim J, Dolan JM, Rajkumar R, Litkouhi B (2013) Towards a viable autonomous driving research platform. In: (IV), IEEE 2013, σελ. 763-770
35. Link H, Nash C, Ricci A, Shires J (2014) Μια γενικευμένη προσέγγιση για τη μέτρηση του οριακού κοινωνικού κόστους των οδικών μεταφορών στην Ευρώπη. Int J Sustain Transp, null
36. Parry IW, Walls M, Harrington W (2007) Automobile externalities and policies. J Econom Lit 45:373-399
37. Blincoc L, Miller TR, Zaloshnja E, Lawrence BA (2015) The economic and societal impact of motor vehicle crashes, 2010
38. NHTSA (2012) 2010 motor vehicle crashes: overview. Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, Ουάσινγκτον, DC, Research Note DOT HS 811, 552
39. IIHS (2010) New estimates of benefits of crash avoidance features on passenger vehicles, In: report, S. (Ed.), Insurance Institute for Highway Safety, pp. 4-5.
40. Jermakian JS (2011) Δυνατότητες αποφυγής ατυχήματος τεσσάρων τεχνολογιών οχημάτων επιβατών. Accid Anal Prev 43:732-740
41. Farmer CM (2008) Δυνατότητες αποφυγής συγκρούσεων από πέντε τεχνολογίες οχημάτων. Πρόληψη τροχαίων τραυματισμών
42. Maddox J (2012) Improving driving safety through automation, congressional robotics caucus, National Highway Traffic Safety Administration

43. Davidson P, Spinoulas A (2015a) Autonomous vehicles-what could this mean for the future of transport?, AITPM 2015 National Conference.
44. Greenblatt JB, Shaheen S (2015) Αυτοματοποιημένα οχήματα, κινητικότητα κατά την εντολή και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. *Curr Sustain Renew Energy Rep* 2:74-81.
45. Templeton B (2012) Πού μπορούν πραγματικά να μας οδηγήσουν τα ρομποτικά αυτοκίνητα (robocars). Brad Templeton Robocar Blog. Np <http://www.templetons.com/brad/robocars/>
46. Dresner K, Stone P (2004) Multiagent traffic management: ένας μηχανισμός ελέγχου διασταυρώσεων βάσει κρατήσεων. In: *Proceedings of the Third international joint conference on autonomous agents and multiagent systems*, 2004. AAMAS 2004, σελ. 530-537
47. Dresner KM, Stone P (2007) Sharing the Road: autonomous vehicles meet human drivers, *IJCAI*, σ. 1263-1268.
48. Fajardo D, Au T-C, Waller S, Stone P, Yang D (2011) Automated intersection control: Απόδοση της μελλοντικής καινοτομίας έναντι του σημερινού ελέγχου σηματοδότησης. *Transp Res Rec* 1:223- 232
49. Martin EW, Shaheen S (2011) Επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την κοινή χρήση αυτοκινήτων στη Βόρεια Αμερική. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 12:1074-1086
50. Schoettle B, Sivak M (2015) Πιθανός αντίκτυπος των αυτοκινούμενων οχημάτων στη ζήτηση και τη χρήση οχημάτων από τα νοικοκυριά
51. Melis WJ (2014) Το μέλλον των ηλεκτρικών οχημάτων. *Αυτόνομα οχήματα*: 509-530.
52. Kang N, Feinberg FM, Papalambros PY (2015) Autonomous electric vehicle sharing system design. In: *ASME 2015 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. V02AT03A034-V002AT003A034.
53. Chen TD (2015a) Διαχείριση ενός κοινόχρηστου, αυτόνομου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων: επιλογή οχημάτων, υποδομές φόρτισης και στρατηγικές τιμολόγησης
54. Ploeg J, Serrarens AFA, Heijenk GJ (2011) Connect & drive: σχεδιασμός και αξιολόγηση του συνεργατικού προσαρμοστικού ελέγχου ταχύτητας για τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. *J Mod Transp* 19:207-213
55. Fernandes P, Nunes U (2012) Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 13:91-106.
56. Milakis D, Snelder M, Van Arem B, Van Wee G, Homem de Almeida Correia G (2015) Development of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050

57. Hensher DA, Bliemer MC (2014) Ποιο είδος συστήματος οδικής τιμολόγησης θα μπορούσε να προσελκύσει τους πολιτικούς; Απόψεις σχετικά με τη δυσκολία να κερδηθεί η J. Mod. Transport. (2016) 24(4):284-303 ψήφος των πολιτών και των δημοσίων υπαλλήλων με τη σκηνοθεσία της μεταρρύθμισης. Transp Res Part A 61:227-237
58. Shoup DC (2005) Το υψηλό κόστος της δωρεάν στάθμευσης. Planners Press, Σικάγο
- 18 S. A. Bagloee et al. 13 J. Mod. Transport. (2016) 24(4):284-303
59. Sridhar KS, Sridhar V (2007) Telecommunications infrastructure and economic growth: evidence from developing countries. Appl Econom Int Dev 7
60. Alson J, Hula A, Bunker A (2014) Light-duty automotive technology, carbon dioxide emissions, and fuel economy trends: 1975 έως 2013. Παράρτημα ΣΤ, US Environmental Protection Agency, Ann Arbor, Michigan. <http://www.epa.gov/oms/fetrends.htm#report>
61. NRC N.R.C. (2010) Hidden costs of energy: unpriced consequences of energy production and use. National Academies Press. doi: 10.17226/12794.
62. Atiyeh C (2012) Πρόβλεψη των προτύπων κυκλοφορίας, ένα Honda κάθε φορά. MSN Auto, 25 Ιουνίου
63. Folsom T (2012) Ενέργεια και αυτόνομα αστικά οχήματα εδάφους. IEEE Technol Soc Mag 2:28-38
64. Lu X.-Y, Shladover SE (2014) Automated truck platoon control and field test, road vehicle automation. Springer, σσ. 247-261.
65. Brooker AV, Ward J, Wang L (2013) Επιπτώσεις του ελαφρού βάρους στην οικονομία καυσίμου, το κόστος και τις απώλειες εξαρτημάτων. SAE Technical Paper
66. US-DOE (2011) Έκθεση για την πρώτη τετραετή τεχνολογική ανασκόπηση. In: US Department of Energy. http://energy.gov/sites/prod/files/QTR_report.pdf
67. US-EPA (2013) Τεχνολογία ελαφρών αυτοκινήτων, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τάσεις οικονομίας καυσίμου: 1975 έως 2012, In: Agency UEP (ed.) Transportation and climate division, office of transportation and air quality. <http://www.epa.gov/fueleconomy/fetrends/1975-2012/420r13001.pdf>
68. Bansal P, Kockelman KM (2016) Forecasting Americans' longterm adoption of connected and autonomous vehicle technologies. In: Ετήσια συνάντηση του Συμβουλίου Έρευνας Μεταφορών, αρ. 16-1871.
69. Laslau C, Holman M, Saenko M, See K, Zhang Z (2014) Ρύθμιση αυτόματου πιλότου για κέρδη: Σε: <http://www.giiresearch.com/report/lux301508-set-autopilotprofits-capitalizing-on-87-billion.html>

70. Kesting A, Treiber M, Helbing D (2010) Ενισχυμένο μοντέλο ευφυούς οδηγού για πρόσβαση στον αντίκτυπο των στρατηγικών οδήγησης στην κυκλοφοριακή ικανότητα. *Philos Trans R Soc Lond A* 368:4585-4605
71. Levin MW, Boyles SD (2016) Ένα μοντέλο μετάδοσης κυττάρων πολλαπλών κατηγοριών για κοινόχρηστους δρόμους ανθρώπινων και αυτόνομων οχημάτων. *Transp Res Part C* 62:103-116
72. Marsden G, McDonald M, Brackstone M (2001) Towards an understanding of adaptive cruise control. *Transp Res Part C* 9:33-51
73. Van Arem B, Van Driel CJ, Visser R (2006) The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 7:429-436.
74. Carlino D, Depinet M, Khandelwal P, Stone P (2012) Approximately orchestrated routing and transportation analyzer: για αυτόνομα οχήματα. In: 15th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC), IEEE 2012, pp. 334-339.
75. Levin MW, Boyles SD (2015) Intersection auctions and reservation-based control in dynamic traffic assignment. *Transportation Research Record* 1:35-44.
76. Bagloee SA, Ceder A, Tavana M, Bozic C (2013) Μια ευρετική μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος ανίχνευσης του παραδόξου Braess, προσαρμοσμένη σε πραγματικά οδικά δίκτυα. *Transp A* 10:437-456
77. Roughgarden T, Tardos E (2002) How bad is selfish routing? *J ACM (JACM)* 49:236-259
78. Bennett LD (1993) The existence of equivalent mathematical programs for certain mixed equilibrium traffic assignment problems. *Eur J Oper Res* 71:177-187
79. Harker PT (1988) Πολλαπλές συμπεριφορές ισορροπίας σε δίκτυα. *Transp Sci* 22:39-46
80. Yang H (1998) Πολλαπλές συμπεριφορές ισορροπίας και προηγμένα συστήματα πληροφόρησης ταξιδιωτών με ενδογενή διείδυση στην αγορά. *Transp Res Part B* 32:205-218
81. Bagloee SA, Ceder A, Bozic C (2014) Αποτελεσματικότητα των πληροφοριών για την κυκλοφορία κατά τη διαδρομή στις αναπτυσσόμενες χώρες με τη χρήση συμβατικών μοντέλων διακριτής επιλογής και νευρωνικών δικτύων. *J Adv Transp* 48:486-506
82. Bagloee SA, Kermanshah M, Bozic C (2013) Αξιολόγηση της σύμπραξης δημόσιου και ιδιωτικού τομέα στην παροχή πληροφοριών για τους ταξιδιώτες. *Transp Res Rec* 2394:19-29
83. van Essen M, Thomas T, van Berkum E, Chorus C (2016) From user equilibrium to system optimum: a literature review on the role of travel information, bounded rationality and non-selfish behaviour at the network and individual levels. *Transp Rev* 1-22

84. Aashtiani HZ (1979) The multi-modal traffic assignment problem. Διδακτορική διατριβή, Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης.
85. Bar-Gera H, Boyce D (1999) Μεγιστοποίηση της εντροπίας ροής διαδρομής στην ανάθεση κυκλοφορίας με βάση την προέλευση. In: 14th international symposium on transportation and traffic theory. Elsevier Science, Oxford, U.K., Jerusalem, Israel, pp. 397-415.
86. Boyce D (2014) Μοντέλα δικτυακής ισορροπίας για τις αστικές μεταφορές. In: Fischer MM, Nijkamp P (eds) Handbook of regional science. Springer, Berlin, pp 759-786.
87. Chen BY, Lam WHK, Sumalee A, Shao H (2011) Ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης πολλαπλών κατηγοριών με βάση την αξιοπιστία. Math Comput Model 54:1428-1439
88. Dafermos SC (1972) The traffic assignment problem for multiclass-user transportation networks. Transp Sci 6:73-87
89. Florian M, Morosan CD (2014) On uniqueness and proportionality in multi-class equilibrium assignment. Transp Res Part B 70:173-185
90. Nagurney A (2000) Μοντέλο ισορροπίας δικτύου κυκλοφορίας πολλαπλών κατηγοριών και κριτηρίων. Math Comput Model 32:393-411
91. Nagurney A, Dong J (2002) Μοντέλο ισορροπίας δικτύου κυκλοφορίας πολλαπλών κατηγοριών και πολλαπλών κριτηρίων με ελαστική ζήτηση. Transp Res Part B 36:445-469
92. Xie J, Xie C (2014) Ένας βελτιωμένος αλγόριθμος TAPAS για το πρόβλημα ανάθεσης κυκλοφορίας. In: 17th international conference on intelligent transportation systems (ITSC), IEEE 2014, σελ. 2336-2341
93. Xie J, Xie C (2015) Αλγόριθμοι βασισμένοι στην προέλευση για ανάθεση κυκλοφορίας: αλγοριθμική δομή, ανάλυση πολυπλοκότητας και απόδοση σύγκλισης. Στο: Συμβούλιο Έρευνας Μεταφορών 94η ετήσια συνάντηση
94. Zhang G, Chen J (2010) Επίλυση προβλήματος ανάθεσης κυκλοφορίας πολλαπλών κατηγοριών με γενετικό αλγόριθμο. In: CINC), 2010 second international conference on. IEEE, σσ. 229-232.
95. Braess D (1968) Ueber ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. Unternehmensforschung 12:258-268
96. GAMS (2014) GAMS Development Corporation. GAMS Development Corporation, Ουάσινγκτον
97. Chowdhury M, Dey K (2016) Ευφυή συστήματα μεταφορών - ένα σύνορο για τη διάσπαση των ορίων των παραδοσιακών ακαδημαϊκών κλάδων μηχανικής [Εκπαίδευση]. IEEE Intell Transp Syst Mag 8:4-8

98. Sonka M, Hlavac V, Boyle R (2014) Επεξεργασία, ανάλυση εικόνας και μηχανική όραση. Cengage Learning
99. Olson PL, Dewar R, Farber E (2010) Ιατροδικαστικές πτυχές της αντίληψης και της αντίδρασης του οδηγού. Lawyers & Judges Publishing Company, Tucson.
100. Wan Y, Huang Y, Buckles B (2014) Βαθμονόμηση κάμερας και εντοπισμός οχήματος: ανάλυση βίντεο κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο. Transp Res Part C 44:202-213
101. Lillesand T, Kiefer RW, Chirpman J (2014) Τηλεπισκόπηση και ερμηνεία εικόνων. Wiley, Νέα Υόρκη