



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών
Παραγωγής και Διοίκησης

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ AIAG ΚΑΙ VDA: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΝΟΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ INFOTAINMENT ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ.**

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Αποστολάκης

Επιτροπή:

Γεώργιος Αραμπατζής, Αναπληρωτής Καθηγητής – Επιβλέπων

Γεώργιος Πέππας, Επίκουρος Καθηγητής

Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Καθηγητής

October 2025

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Αραμπατζή Γεώργιο, για την αδιάλειπτη καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τις εύστοχες παρατηρήσεις του σε όλα τα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στον κ. Πέππα Γεώργιο για τη σημαντική συμβολή του, τις δημιουργικές συζητήσεις και την τεχνική υποστήριξη κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του πειραματικού μέρους.

Εγκάρδιες ευχαριστίες προσφέρονται στον κ. Μεσαριτάκη που χάρη στις επικοινωνιακές συζητήσεις μαζί του συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ειλικρινείς ευχαριστίες αποδίδονται στον καθηγητή κ. Σπυρίδων Παπαευθυμίου, μέλος της τριμελούς επιτροπής, για την πολύτιμη και ευγενική συνεισφορά του στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλονται επίσης στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με υπεύθυνο τον καθηγητή Κ. Γκόννο για την ουσιαστική καθοδήγηση και για την παραχώρηση του εργαστηρίου και των απαραίτητων υποδομών, χάρη στις οποίες κατέστη δυνατή η ασφαλής και απρόσκοπτη διεξαγωγή των πειραμάτων. Η συνδρομή του προσωπικού του εργαστηρίου υπήρξε καθοριστική.

Επιπλέον, ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου, Λευτέρη και Κατερίνα, καθώς και τον αδερφό μου Γιάννη, για τη διαρκή τους στήριξη και την πίστη τους σε εμένα καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του όμορφου αλλά και ιδιαίτερου ταξιδιού.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για τις εμπειρίες που μοιραστήκαμε, οι οποίες με διαμόρφωσαν ως άνθρωπο δημιουργώντας αναμνήσεις που θα με συντροφεύουν σε όλη μου τη ζωή.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη και εφαρμογή προτύπων ποιότητας στο πλαίσιο της σχεδίασης και παραγωγής ενός σύγχρονου συστήματος infotainment για οχήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση κινδύνων σχεδίασης μέσω DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis), με σκοπό την πρόβλεψη πιθανών αστοχιών πριν την υλοποίηση του προϊόντος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε κρίσιμα σενάρια λειτουργικής αποτυχίας, όπως π.χ. το να σβήσει η οθόνη κατά την οδήγηση, αστοχίες αφής ή βλάβες στην επικοινωνία του συστήματος με άλλα υποσυστήματα του οχήματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση κινδύνων διαδικασίας μέσω PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis), για τον εντοπισμό σφαλμάτων που ενδέχεται να προκύψουν στα στάδια παραγωγής: παραλαβή υλικών, αποθήκευση, προετοιμασία εντολής παραγωγής, συναρμολόγηση, ηλεκτρικές δοκιμές, τελικός ποιοτικός έλεγχος και αποστολή. Καταγράφονται ενδεικτικά αιτίες αποτυχίας όπως υγρασία στην αποθήκη, ελλιπής εφαρμογή κόλλας, λανθασμένη ροπή βιδώματος και μη ανίχνευση ελαττωμάτων πριν την αποστολή στον πελάτη. Η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνταξη του TPS (Technical Product Specification), όπου τεκμηριώνεται η τεχνική συμμόρφωση του προϊόντος με τις απαιτήσεις του πελάτη και τα προβλεπόμενα πρότυπα. Η αξιολόγηση αυτή ενισχύεται μέσω δοκιμών και πειραμάτων που πραγματοποιούνται σε πρωτότυπο σύστημα, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία των κρίσιμων χαρακτηριστικών του infotainment συστήματος. Η εργασία αυτή αναδεικνύει τη σημασία της ολιστικής προσέγγισης κατά την σχεδίαση ενός προϊόντος στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η πρόληψη σφαλμάτων σε επίπεδο σχεδίασης και παραγωγής συνδυάζεται με σαφή τεκμηρίωση και πειραματική επαλήθευση.

Λέξεις κλειδιά: Control Plan, DFMEA, EMC, Fishbone diagram, infotainment, PFMEA

Abstract

This diploma thesis focuses on the study and application of quality assurance standards in the design and manufacturing of a modern in-vehicle infotainment system. Initially, a risk analysis is performed using DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) to predict possible failures before the product is implemented. Emphasis is placed on critical functional failure scenarios, such as the screen turning off while driving, touch failures, or communication failures between the system and other vehicle subsystems. This is followed by a process risk analysis using PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis) to identify errors that may arise during the production stages: material receipt, storage, production order preparation, assembly, electrical testing, final quality control, and shipping. Indicative causes of failure are recorded, such as moisture in the warehouse, incomplete application of adhesive, incorrect tightening torque, and failure to detect defects before shipment to the customer. The work is completed with the drafting of the TPS (Technical Product Specification), which documents the technical compliance of the product with customer requirements and applicable standards. This assessment is reinforced through tests and experiments carried out on a prototype system, confirming the proper functioning of the critical features of the infotainment system. This work highlights the importance of a holistic approach to product design in the automotive industry, where error prevention at the design and production level is combined with clear documentation and experimental verification.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή	8
1.1. Περί διπλωματικής εργασίας	8
1.2. Δομή της διπλωματικής εργασίας	9
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
2.1. Ορισμός και ρόλος των IVIS	10
2.2. Κύρια χαρακτηριστικά και λειτουργίες των IVIS	10
2.3. Βασικοί ορισμοί ΕΛΟΤ	11
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
3.1. Η σημασία των προτύπων και των κανονισμών στην αυτοκινητοβιομηχανία	11
3.2. Εφαρμοζόμενα πρότυπα, πιστοποιήσεις και κανονισμοί για την σχεδίαση του IVIS	12
3.3. Ανάλυση των προτύπων και των κανονισμών	14
4. Μεθοδολογία σχεδίασης - ανάπτυξης – πιστοποίησης	24
4.1. AIAG–VDA: Ενοποιημένη Μεθοδολογία FMEA	24
4.2. Πλεονεκτήματα της μεθόδου FMEA	26
4.3. DFMEA	26
4.3.1 Βήμα 1 ^ο : Planning & Preparation	27
4.3.2 Βήμα 2 ^ο : Structure Analysis	28
4.3.3 Βήμα 3 ^ο : Function Analysis	29
4.3.4 Βήμα 4 ^ο : Failure Analysis	31
4.3.5 Βήμα 5 ^ο : Risk Analysis	32
4.3.6 Βήμα 6 ^ο : Optimization	37
4.3.7 Βήμα 7 ^ο : Results Documentation	43
4.4. DFMEA fishbone diagram	44
4.5. PFMEA	45
4.5.1 Βήμα 1 ^ο : Planning and Preparation	46

4.5.2 Βήμα 2°: Structure Analysis.....	47
4.5.3 Βήμα 3°: Function Analysis	49
4.5.4 Βήμα 4°: Failure Analysis	50
4.5.5 Βήμα 5°: Risk Analysis	52
4.5.6 Βήμα 6°: Optimization.....	59
4.5.7 Βήμα 7°: Results Documentation	63
4.6. PFMEA fishbone diagram	64
4.7. CONTROL PLAN	65
4.8. CONTROL PLAN CC-SC	73
4.9. TPS	75
5.1. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic discharge)	89
5.2. Ηλεκτρική μεταβατική αγωγή (Electrical transient conduction)	91
5.3 Αποτελέσματα	106
6. Συμπεράσματα	108
7. Μελλοντική έρευνα	109
8. Βιβλιογραφία.....	110

1. Εισαγωγή

1.1. Περί διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διασφάλιση της ποιότητας ενός σύγχρονου in-vehicle infotainment συστήματος που θα συνδυάζει υψηλή λειτουργικότητα, εργονομία και αξιοπιστία, τηρώντας τις απαιτήσεις ασφαλείας και ποιότητας που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα. Στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, τα in-vehicle συστήματα infotainment έχουν εξελιχθεί σε αναπόσπαστο κομμάτι της εμπειρίας του οδηγού και των επιβατών. Παρέχουν πληθώρα λειτουργιών, όπως πλοήγηση, πολυμέσα, φωνητικές εντολές, συνδεσιμότητα με φορητές συσκευές και πρόσβαση στο διαδίκτυο, προσφέροντας άνεση, ψυχαγωγία και ασφάλεια κατά την οδήγηση. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων απαιτεί αυστηρές διαδικασίες σχεδιασμού και ανάλυσης κινδύνων καθώς και συμμόρφωσης με πρότυπα ασφαλείας, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία τους.

Η εργασία καλύπτει το σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας του συστήματος, ξεκινώντας από τη φάση της μελέτης και του σχεδιασμού και συνεχίζοντας με την ανάλυση των Τρόπων και των Επιπτώσεων Αστοχίας στη Σχεδίαση (Design Failure Mode and Effects Analysis – DFMEA), καθώς και στην αντίστοιχη ανάλυση για τη διαδικασία παραγωγής (Process Failure Mode and Effects Analysis – PFMEA). Στη συνέχεια, εξετάζεται η συμμόρφωση του εξαρτήματος με το έγγραφο Τεχνικών Προδιαγραφών του Προϊόντος (Technical Product Specification – TPS), σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα που έχουν θεσπιστεί από παγκόσμιους και ευρωπαϊκούς οργανισμούς τυποποίησης. Στο πλαίσιο αυτής της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε και πειραματική αξιολόγηση, η οποία έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά την αξιολόγηση διεξήχθησαν δύο δοκιμές Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility – EMC) του υπό ανάπτυξη infotainment συστήματος, βασισμένες σε αντίστοιχα διεθνή πρότυπα.

Η μελέτη ανέδειξε ότι η συνδυασμένη αξιοποίηση εργαλείων ανάλυσης κινδύνων (DFMEA, PFMEA, Fishbone, Control Plan) με την πειραματική επαλήθευση βάσει διεθνών προτύπων αποτελεί ουσιαστική στρατηγική για την ανάπτυξη αξιόπιστων και ασφαλών συστημάτων. Ως μελλοντική προοπτική, προτείνεται η ανάπτυξη ενός ενοποιημένου και συνάμα εύχρηστου συστήματος που θα επιτρέπει την αυτόματη ενημέρωση μεταξύ DFMEA και PFMEA, καθώς και η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης για την αντικειμενική αξιολόγηση των δεικτών RPN και AP, μειώνοντας τον υποκειμενικό ανθρώπινο παράγοντα και ενισχύοντας την αποδοτικότητα της μεθοδολογίας.

1.2. Δομή της διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή: Παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας, η σημασία του θέματος, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε και συνοπτική αναφορά στο περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο: Περιλαμβάνονται βασικοί ορισμοί και έννοιες που σχετίζονται με τα συστήματα IVIS, τα κύρια χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες τους, καθώς και σημαντικοί ορισμοί που δίνονται από τον ΕΛΟΤ.

Κεφάλαιο 3 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: Αναδεικνύεται η σημασία των προτύπων και κανονισμών στην αυτοκινητοβιομηχανία, παρουσιάζονται τα πρότυπα που εφαρμόστηκαν στην ανάπτυξη του IVIS και γίνεται αναλυτική επισκόπηση του περιεχομένου τους.

Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία Σχεδίασης – Ανάπτυξης – Πιστοποίησης: Περιγράφεται η ενοποιημένη μεθοδολογία FMEA των οργανισμών AIAG και VDA και τα πλεονεκτήματά της στην πρόληψη αστοχιών και τη βελτίωση της ποιότητας. Ακολουθεί η εφαρμογή των τεχνικών DFMEA και PFMEA, καθώς και των αναλύσεων Control Plan και Control Plan CC-SC για τη σχεδίαση και παραγωγή του συστήματος infotainment. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την τεκμηρίωση βάσει του TPS και τη διενέργεια δοκιμών που διασφαλίζουν τη συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα.

Κεφάλαιο 5 – Περιγραφή Πειραματικών Διατάξεων: Παρουσιάζονται οι δύο πειραματικές ηλεκτρομαγνητικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο συμμόρφωσης του συστήματος infotainment. Η δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Electrostatic Discharge) και η δοκιμή ηλεκτρικής μεταβατικής αγωγιμότητας (Electrical Transient Conduction).

Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα: Συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα της εργασίας, αναδεικνύοντας τη συμβολή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και τη σημασία της για την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων.

Κεφάλαιο 7 – Μελλοντική έρευνα: Παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις της μελέτης, με στόχο την περαιτέρω ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της εφαρμοσιμότητας της μεθοδολογίας.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Ορισμός και ρόλος των IVIS

Τα in-vehicle infotainment systems (IVIS) ορίζονται ως ολοκληρωμένα υποσυστήματα εντός του οχήματος που παρέχουν τόσο πληροφορία όσο και ψυχαγωγία στους επιβάτες [1]. Με άλλα λόγια, προσφέρουν ενσωματωμένες υπηρεσίες όπως πλοήγηση αλλά και πρόσβαση σε ποικιλία περιεχομένου μέσω και της σύνδεσης με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές ενισχύοντας έτσι την εμπειρία του οδηγού και των επιβατών γενικότερα.

2.2. Κύρια χαρακτηριστικά και λειτουργίες των IVIS

Τα συστήματα infotainment στα σύγχρονα οχήματα διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή και την πλατφόρμα.

Ενδεικτικά, περιλαμβάνουν :

- Κλήσεις μέσω Bluetooth
- Αναπαραγωγή μουσικής και ραδιόφωνο
- Πλοήγηση μέσω GPS
- Ενημερώσεις καιρού
- Ειδοποιήσεις κυκλοφορίας
- Έλεγχος κλιματισμού
- Προβολή εικόνας κάμερας οπισθοπορείας
- Δεδομένα απόδοσης οχήματος
- Συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο

2.3. Βασικοί ορισμοί ΕΛΟΤ

Σύμφωνα με τους επίσημους ορισμούς του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης [2]:

«Τυποποίηση» είναι η δραστηριότητα με την οποία καθιερώνονται, για υφιστάμενα ή δυνητικά προβλήματα κοινής και επαναλαμβανόμενης χρήσης, διατάξεις οι οποίες αποσκοπούν στην επίτευξη του βέλτιστου βαθμού τάξης σε συγκεκριμένο πλαίσιο εφαρμογής [3].

«Πρότυπο» είναι το έγγραφο που έχει καθιερωθεί με συναίνεση και έχει εγκριθεί από έναν αναγνωρισμένο φορέα, το οποίο παρέχει, για κοινή και επαναλαμβανόμενη χρήση, κανόνες, κατευθυντήριες οδηγίες ή χαρακτηριστικά, για δραστηριότητες ή τα αποτελέσματά τους και αποσκοπεί στην επίτευξη του βέλτιστου βαθμού τάξης σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο εφαρμογής. Ως αναγνωρισμένοι φορείς νοούνται οι εθνικοί οργανισμοί τυποποίησης. Κάθε πρότυπο είναι προαιρετικής εφαρμογής, εκτός εάν νομοθετικές ή άλλες διατάξεις το καθιστούν υποχρεωτικής εφαρμογής [3].

«Κανονισμός» είναι το έγγραφο που περιέχει δεσμευτικούς νομοθετικούς κανόνες και υιοθετείται από μια Αρχή [3].

«Τεχνικός κανονισμός» είναι ο κανονισμός που παρέχει τεχνικές απαιτήσεις, είτε άμεσα είτε με αναφορά ή με ενσωμάτωση του περιεχομένου ενός προτύπου, μιας τεχνικής προδιαγραφής ή ενός κώδικα πρακτικής. Ένας τεχνικός κανονισμός μπορεί να συνοδεύεται από τεχνική καθοδήγηση που να περιγράφει κάποια μέσα συμμόρφωσης προς τις απαιτήσεις του κανονισμού, δηλ. μια διάταξη τεκμαίρουσα ικανοποίηση απαίτησης [3].

«Τεχνική προδιαγραφή» είναι το έγγραφο που καθορίζει τις τεχνικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ένα προϊόν, μια διαδικασία ή μια υπηρεσία [3].

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1. Η σημασία των προτύπων και των κανονισμών στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία θέτει στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ιδιαίτερα απαιτητικές προκλήσεις. Οι έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, οι συνεχείς κραδασμοί, η έκθεση σε υγρασία και χημικές ουσίες, καθώς και η παρουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI), επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία τους και, κατ' επέκταση, την ασφάλεια των οχημάτων και των επιβατών. Για τον λόγο αυτό, η διασφάλιση της ασφάλειας και της μακροχρόνιας λειτουργίας αυτών των κρίσιμων συστημάτων αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα για τους κατασκευαστές. Η συμμόρφωση με τα διεθνή

και εθνικά πρότυπα είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την επιλογή, τον σχεδιασμό και τις δοκιμές των εξαρτημάτων, εξασφαλίζοντας ότι μπορούν να αντέξουν τις ακραίες συνθήκες λειτουργίας και να πληρούν τα υψηλότερα επίπεδα.

3.2. Εφαρμοζόμενα πρότυπα, πιστοποιήσεις και κανονισμοί για την σχεδίαση του IVIS

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα πρότυπα τα οποία εφαρμόστηκαν, για να γίνει έλεγχος συμμόρφωσης του in-vehicle infotainment system με αυτά, είναι τα είκοσι που περιλαμβάνονται στο Table 1 που παρουσιάζεται παρακάτω:

Table 1. Εφαρμοζόμενα πρότυπα και συνοπτική περιγραφή τους.

ΠΡΟΤΥΠΟ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ
ISO 26262	Πρότυπο για λειτουργική ασφάλεια ηλεκτρονικών συστημάτων, διασφαλίζοντας ότι το infotainment δεν επηρεάζει την ασφάλεια κατά την οδήγηση.
ISO 21434	Πρότυπο για την κυβερνοασφάλεια στα συστήματα οχημάτων, προστατεύοντας από επιθέσεις και διασφαλίζοντας τα δεδομένα.
IEC 61000	Πρότυπο για Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) για μείωση των παρεμβολών και τη σωστή λειτουργία των συσκευών.
CISPR 25	Πρότυπο EMC για μείωση εκπομπών και παρεμβολών στα συστήματα οχημάτων.
UNECE R155	Κανονισμός διαχείρισης κυβερνοασφάλειας για τα δίκτυα οχημάτων.
UNECE R156	Κανονισμός για ασφαλείς ενημερώσεις λογισμικού.
ISO 16750	Πρότυπο για περιβαλλοντικές δοκιμές για ηλεκτρονικά συστήματα σε οχήματα (ρεύματα, κραδασμοί, θερμοκρασία, υγρασία).
Bluetooth SIG Certification	Πιστοποίηση για συμβατότητα και ποιότητα επικοινωνίας Bluetooth.
Wi-Fi Alliance Certification	Πιστοποίηση για Wi-Fi συνδεσιμότητα και διαλειτουργικότητα.

Apple CarPlay Certification	Πιστοποίηση που εξασφαλίζει την συμβατότητα των infotainment με το οικοσύστημα της Apple.
Android Auto Certification	Πιστοποίηση που εξασφαλίζει την συμβατότητα των infotainment με τα συστήματα Android.
RoHS Directive	Οδηγία για τον Περιορισμό Επικίνδυνων Ουσιών στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.
WEEE Directive	Οδηγία για την ανακύκλωση και διαχείριση αποβλήτων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.
REACH Regulation	Κανονισμός που ρυθμίζει τη χρήση επικίνδυνων χημικών σε ηλεκτρονικά, προστατεύοντας την υγεία και το περιβάλλον.
IEC 62368-1	Πρότυπο ασφάλειας για ηλεκτρονικά συστήματα, αποτρέποντας κινδύνους υπερθέρμανσης και φωτιάς.
GDPR Regulation	Κανονισμός για την προστασία δεδομένων χρηστών και την ασφάλεια προσωπικών δεδομένων.
ISO 14001	Πρότυπο περιβαλλοντικής διαχείρισης για βιώσιμες διαδικασίες παραγωγής.
RTCM SC-104	Πρότυπο για δορυφορικά συστήματα (GPS/GLONASS), διασφαλίζοντας ακρίβεια και αξιοπιστία πλοήγησης.

ISO 7637-2	Πρότυπο δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής αντοχής παλμών τάσης σε OEM εξοπλισμό οχημάτων.
EN 50498	Πρότυπο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για aftermarket ηλεκτρονικό εξοπλισμό οχημάτων.

3.3. Ανάλυση των προτύπων και των κανονισμών

1. ISO 26262

Το ISO 26262 αποτελεί το διεθνές πρότυπο για τη λειτουργική ασφάλεια των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων στα οχήματα παραγωγής. Ο σκοπός του είναι να διασφαλίσει ότι τυχόν δυσλειτουργίες σε αυτά τα συστήματα δεν θα οδηγήσουν σε επικίνδυνες συνθήκες για τον οδηγό και τους επιβάτες. Το πρότυπο καλύπτει όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, από τη σύλληψη και τον σχεδιασμό μέχρι την παραγωγή, τη λειτουργία και την απόσυρση ορίζοντας διαδικασίες ανάλυσης, σχεδιασμού, δοκιμών και επιβεβαίωσης. Εισάγει τον μηχανισμό των ASIL (Automotive Safety Integrity Levels), ώστε να ταξινομούνται οι κίνδυνοι ανάλογα με τη σοβαρότητά τους και να εφαρμόζονται τα αντίστοιχα μέτρα πρόληψης. Το ISO 26262 αναφέρεται σε συστήματα και εξαρτήματα που σχετίζονται άμεσα με την ασφάλεια (π.χ. σύστημα πέδησης, διεύθυνση-GPS, προηγμένα συστήματα Βοήθειας Οδηγού-ADAS, αισθητήρες, εγκέφαλος αυτοκινήτου-ECU), ενώ δεν εφαρμόζεται σε λειτουργίες που δεν επηρεάζουν την ασφάλεια, όπως η ψυχαγωγία του infotainment. Σε περιπτώσεις όπου το infotainment ή άλλα μη κρίσιμα υποσυστήματα προβάλλουν ή επηρεάζουν δεδομένα ασφαλείας τότε εντάσσονται στο πεδίο εφαρμογής του προτύπου [4].

2. ISO 21434

Το πρότυπο ISO 21434 αφορά την κυβερνοασφάλεια στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και καθορίζει απαιτήσεις και διαδικασίες για την προστασία των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συστημάτων εντός του οχήματος από ψηφιακές απειλές σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Σκοπός του είναι να διασφαλίσει ότι τα ηλεκτρονικά συστήματα, το λογισμικό και οι συνδεδεμένες υπηρεσίες και συσκευές είναι ανθεκτικά σε κυβερνοεπιθέσεις, ώστε να προληφθούν ενέργειες που θα μπορούσαν

να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και τα προσωπικά δεδομένα του οδηγού και των επιβατών. Το πρότυπο περιλαμβάνει μεθοδολογίες για την αναγνώριση και εκτίμηση κινδύνων, τον εντοπισμό πιθανών σεναρίων επίθεσης (π.χ. υποκλοπή δεδομένων, μη εξουσιοδοτημένος έλεγχος, αλλοίωση αισθητήρων) και την ανάπτυξη μηχανισμών προστασίας όπως ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας, έλεγχο πρόσβασης και αξιόπιστες ενημερώσεις λογισμικού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε συστήματα όπως το infotainment, τα οποία λόγω της σύνδεσής τους με το διαδίκτυο και την διαχείριση προσωπικών δεδομένων αποτελούν βασικό στόχο για κυβερνοεπιθέσεις. Τέλος, δίνει έμφαση στη συνεχή παρακολούθηση νέων απειλών και στην εφαρμογή μέτρων πρόληψης και ανίχνευσης, διασφαλίζοντας ότι το όχημα παραμένει προστατευμένο από κακόβουλες επιθέσεις ακόμα και μετά την πώλησή του [5].

3. IEC 61000

Η σειρά προτύπων IEC 61000 αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που καλύπτει την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Στόχος της είναι να διασφαλίσει ότι οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν κανονικά μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, χωρίς να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους αλλά και χωρίς να επηρεάζονται από αυτές. Τα πρότυπα αυτά χωρίζονται σε διαφορετικές ενότητες, καθεμία από τις οποίες έχει συγκεκριμένο αντικείμενο. Τα πρώτα μέρη καλύπτουν το θεωρητικό υπόβαθρο και το περιβάλλον λειτουργίας, τα μεσαία ορίζουν όρια και δοκιμές, ενώ τα τελευταία δίνουν πρακτικές οδηγίες και προσαρμογές σε ειδικούς τομείς. Έτσι, το σύνολο των προτύπων λειτουργεί συμπληρωματικά, εξασφαλίζοντας ότι ο εξοπλισμός πληροί τις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας τόσο κατά τη σχεδίαση και παραγωγή όσο και κατά τη χρήση του. Πιο αναλυτικά, το τμήμα 61000-1 εισάγει τις βασικές αρχές, την ορολογία και το γενικό πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, ενώ το 61000-2 περιγράφει τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος και τα επίπεδα συμβατότητας που πρέπει να τηρούνται. Το 61000-3 εστιάζει στον καθορισμό ορίων εκπομπών, ώστε να περιορίζονται φαινόμενα όπως οι αρμονικές και οι διακυμάνσεις τάσης. Η ενότητα 61000-4 είναι από τις πιο πρακτικές, καθώς περιλαμβάνει μεθόδους δοκιμών και τεχνικές μέτρησης για την αξιολόγηση της αντοχής του εξοπλισμού σε διαφορετικά είδη ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Ενδεικτικά, το 61000-4-2 αφορά τις εκφορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού (ESD), το 61000-4-4 τις ταχείες παρεμβολές (EFT) και το 61000-4-5 την ατρωσία σε υπερτάσεις. Η ενότητα 61000-5 παρέχει κατευθυντήριες οδηγίες για την εγκατάσταση και τον σχεδιασμό συστημάτων, δίνοντας πρακτικές λύσεις για τη θωράκιση και την προστασία τους, ενώ η 61000-6 καθορίζει γενικές απαιτήσεις εκπομπών και ατρωσίας που ισχύουν για συγκεκριμένες κατηγορίες περιβάλλοντος, όπως το βιομηχανικό, το οικιακό ή το εμπορικό περιβάλλον. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η σειρά IEC 61000

δεν εφαρμόζεται καθώς υπάρχουν άλλα πιο εξειδικευμένα πρότυπα για τον τομέα αυτό (ISO 7637-2, EN 50498). Παρόλα αυτά, στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας στο ΕΜΠ, εφαρμόστηκε κατ' εξαίρεση το πρότυπο IEC 61000-4-2 στο infotainment, ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του απέναντι σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις [6].

4. CISPR 25

Το CISPR 25 είναι διεθνές πρότυπο της IEC που έχει αναπτυχθεί ειδικά για την αυτοκινητοβιομηχανία και επικεντρώνεται στις ραδιοπαρεμβολές (radio disturbances). Στόχος του είναι να διασφαλίσει ότι τα ηλεκτρονικά συστήματα των οχημάτων, όπως ECU (Electronic Control Unit), τροφοδοτικά και μονάδες infotainment, δεν παράγουν ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που θα μπορούσε να επηρεάσει τη σωστή λειτουργία των ενσωματωμένων δεκτών ραδιοεπικοινωνίας, όπως το AM/FM ραδιόφωνο, το GPS, τα τηλεματικά συστήματα και οι ασύρματες συνδέσεις. Οι συχνότητες (Hz) αντιστοιχούν στα φάσματα όπου λειτουργούν οι δέκτες του οχήματος, όπως το ραδιόφωνο ή το GPS. Τα dB (συνήθως σε dBμV) εκφράζουν την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που παράγεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε αυτές τις συχνότητες. Το πρότυπο καλύπτει το εύρος συχνοτήτων από 150 kHz έως 2.500 MHz και καθορίζει όρια εκπομπών καθώς και μεθόδους μέτρησης, τόσο σε επίπεδο επιμέρους εξαρτημάτων όσο και σε επίπεδο οχήματος. Με την εφαρμογή του CISPR 25 το οποίο καθορίζει όρια εκπομπών σε dB για κάθε ζώνη συχνοτήτων, διασφαλίζεται ότι οι δέκτες επικοινωνίας και ψυχαγωγίας λειτουργούν αξιόπιστα και χωρίς παρεμβολές, ενισχύοντας την ποιότητα και την ασφάλεια των ηλεκτρονικών συστημάτων του οχήματος [7].

5. UNECE R155

Ο UNECE R155 είναι κανονισμός του ΟΗΕ που καθορίζει τις απαιτήσεις κυβερνοασφάλειας για οχήματα και υποχρεώνει τους κατασκευαστές πρωτότυπου εξοπλισμού (OEM) να εφαρμόζουν ένα Σύστημα Διαχείρισης Κυβερνοασφάλειας (Cyber Security Management System – CSMS). Στόχος του είναι η προστασία των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συστημάτων από κυβερνοαπειλές σε όλο τον κύκλο ζωής του οχήματος, από την ανάπτυξη μέχρι και τη χρήση του μετά την πώληση. Ο κανονισμός απαιτεί αναγνώριση απειλών, εκτίμηση κινδύνων, εφαρμογή μηχανισμών προστασίας και διαδικασίες ανίχνευσης σε επιθέσεις και συνδέεται με την έγκριση τύπου των οχημάτων (type approval). Με άλλα λόγια, το όχημα απαγορεύεται να κυκλοφορήσει σε αγορές που εφαρμόζουν τον κανονισμό αν ο κατασκευαστής δεν αποδείξει ότι πληροί τις απαιτήσεις του. Μέσω της συμμόρφωσης, οι κατασκευαστές οφείλουν να διασφαλίζουν ότι τα οχήματα τους είναι ανθεκτικά σε επιθέσεις προστατεύοντας έτσι την ασφάλεια και τα προσωπικά δεδομένα του οδηγού και των επιβατών. Η σχέση του UNECE R155 με το ISO 21434 είναι άμεση καθώς ο R155 αποτελεί τον

κανονισμό που θέτει τις νομικές απαιτήσεις για την κυβερνοασφάλεια ενώ το ISO 21434 παρέχει την τεχνική μεθοδολογία για την επίτευξη της συμμόρφωσης. Με άλλα λόγια, η R155 καθορίζει το «τι» πρέπει να γίνει ενώ το ISO 21434 δείχνει το «πώς» μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη [8].

6. UNECE R156

Ο UNECE R156 είναι κανονισμός του ΟΗΕ που καθορίζει τις απαιτήσεις για τις ενημερώσεις λογισμικού στα οχήματα και υποχρεώνει τους κατασκευαστές να διαθέτουν ένα Σύστημα Διαχείρισης Ενημερώσεων Λογισμικού (SUMS). Στόχος του είναι να διασφαλίζει ότι όλες οι ενημερώσεις, είτε μέσω καλωδίου, είτε Over-the-Air (OTA), πραγματοποιούνται με ασφαλή και ελεγχόμενο τρόπο, προστατεύοντας την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα του λογισμικού, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του οχήματος και παρέχοντας δυνατότητα επαναφοράς σε προηγούμενες εκδόσεις σε περίπτωση αποτυχίας. Η συμμόρφωση με τον κανονισμό είναι προϋπόθεση για την έγκριση τύπου (type approval), άρα και για την κυκλοφορία του οχήματος στις αγορές που ο αυτός εφαρμόζεται. Σε συνδυασμό με τον UNECE R155, ο R156 συμπληρώνει το παζλ της κυβερνοασφάλειας. Ο πρώτος ορίζει τις απαιτήσεις κυβερνοασφάλειας, ενώ ο δεύτερος καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι ενημερώσεις λογισμικού γίνονται με ασφάλεια [9].

7. ISO 16750

Το ISO 16750 είναι διεθνές πρότυπο που καθορίζει τις περιβαλλοντικές δοκιμές για τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα οχημάτων, με σκοπό να εξασφαλίσει την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητά τους σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Το πρότυπο χωρίζεται συνολικά σε πέντε μέρη. Το 16750-1 παρέχει τις γενικές πληροφορίες και απαιτήσεις, τους ορισμούς και τις βασικές κατηγορίες λειτουργίας. Το 16750-2 εξετάζει ηλεκτρικές καταπονήσεις όπως διακυμάνσεις και υπερτάσεις τάσης, αντιστροφή πολικότητας, βραχυκυκλώματα και φαινόμενα όπως το load dump. Στην συνέχεια, το 16750-3 καλύπτει μηχανικές καταπονήσεις όπως δονήσεις, κρούσεις, πτώσεις και χτύπημα από χαλίκια ενώ το 16750-4 επικεντρώνεται στις κλιματικές συνθήκες, περιλαμβάνοντας ακραίες θερμοκρασίες, υγρασία, κύκλους παγετού-απόψυξης, σκόνη, αλατονέφωση και ακτινοβολία. Τέλος, το 16750-5 αφορά χημικές καταπονήσεις από καύσιμα, λιπαντικά, άλατα και καθαριστικά. Με την εφαρμογή του προτύπου, οι κατασκευαστές διασφαλίζουν ότι κρίσιμα συστήματα όπως ECU, αισθητήρες και infotainment παραμένουν λειτουργικά και ασφαλή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οχήματος, ακόμη και υπό ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες που ενδέχεται να προκύψουν [10].

8. Bluetooth SIG

Ο Bluetooth SIG (Special Interest Group) είναι ένας διεθνής οργανισμός που ιδρύθηκε το 1998 και βασίζεται σε πρότυπα με στόχο να αναπτύσσει, να διαχειρίζεται και να πιστοποιεί την τεχνολογία Bluetooth. Αποτελεί κοινοπραξία περισσότερων από 50.000 εταιρειών μελών από τον χώρο της πληροφορικής, των τηλεπικοινωνιών, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των ηλεκτρονικών. Ο οργανισμός καθορίζει τις προδιαγραφές και τα πρωτόκολλα Bluetooth, διασφαλίζει μέσω διαδικασιών πιστοποίησης ότι όλες οι συσκευές που φέρουν το λογότυπο είναι συμβατές μεταξύ τους και υποστηρίζει την εξέλιξη της τεχνολογίας σε νέες εφαρμογές. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές του Bluetooth SIG είναι απαραίτητη ώστε όλα τα προϊόντα Bluetooth όπως τα συστήματα infotainment να παρέχουν αξιόπιστες λειτουργίες μέσω της ασύρματης σύνδεσης με κινητά τηλέφωνα ή άλλες συσκευές όπως hands-free κλήσεις, αναπαραγωγή μουσικής κλπ [11].

9. Wi-Fi Alliance Standards

Ο Wi-Fi Alliance είναι ένας διεθνής και μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε το έτος 1999 και είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη, την τυποποίηση και την πιστοποίηση των προτύπων Wi-Fi. Ο οργανισμός αριθμεί πάνω από 35.000 εταιρείες μέλη από τον χώρο των τηλεπικοινωνιών, της πληροφορικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των ηλεκτρονικών και κατέχει το λογότυπο "Wi-Fi Certified", ένα καταχωρημένο εμπορικό σήμα, το οποίο επιτρέπεται μόνο σε εξοπλισμό που έχει περάσει επιτυχώς τις αυστηρές δοκιμές συμμόρφωσης. Μέσα από τα προγράμματα πιστοποίησης που προσφέρει, διασφαλίζεται ότι όλες οι συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών είναι συμβατές και μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους, τηρώντας παράλληλα τις απαιτήσεις απόδοσης, ασφάλειας και διαλειτουργικότητας. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η συμμόρφωση με τα πρότυπα του Wi-Fi Alliance είναι απαραίτητη για τα συστήματα infotainment και τις τηλεματικές υπηρεσίες, καθώς επιτρέπει την αξιόπιστη ασύρματη σύνδεση με κινητά τηλέφωνα και άλλες συσκευές, την υποστήριξη λειτουργιών όπως το Android Auto και το Apple CarPlay αλλά και την πραγματοποίηση ασφαλών ενημερώσεων λογισμικού [12].

10. Apple CarPlay Certification

Η Apple CarPlay Certification είναι η επίσημη διαδικασία πιστοποίησης που καθορίζει η Apple ώστε τα συστήματα infotainment των αυτοκινήτων να είναι πλήρως συμβατά με το λειτουργικό της σύστημα, iOS. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, οι κατασκευαστές οφείλουν να τηρούν συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις που αφορούν την ποιότητα της εικόνας και του ήχου, την ασφάλεια της σύνδεσης, την απόκριση των χειρισμών και τη διαλειτουργικότητα με τα Apple προϊόντα. Η

πιστοποίηση εξασφαλίζει ότι ο οδηγός μπορεί να χρησιμοποιεί με αποτελεσματικότητα, ασφάλεια και ευκολία τις εφαρμογές και τις λειτουργίες του IOS, όπως τηλεφωνικές κλήσεις, πλοήγηση, μουσική, βίντεο, είτε μέσω ενσύρματης σύνδεσης USB, είτε μέσω ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi και Bluetooth. Συμπερασματικά, το CarPlay Certification αποτελεί προϋπόθεση ώστε ένα infotainment σύστημα να φέρει επίσημα την ονομασία CarPlay, εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη σύζευξη με συσκευές Apple και προσφέροντας ταυτόχρονα εμπειρία χρήσης σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρείας [13].

11. Android Auto Certification

Το Android Auto Certification είναι η επίσημη διαδικασία πιστοποίησης που καθορίζει η Google ώστε τα συστήματα infotainment των αυτοκινήτων να είναι πλήρως συμβατά με το λειτουργικό της σύστημα, Android. Στόχος της είναι να διασφαλίσει ότι το περιβάλλον χρήσης του Android προβάλλεται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στο infotainment σύστημα του οχήματος και ότι οι λειτουργίες των συσκευών Android ελέγχονται με τρόπο ομαλό και χωρίς καθυστερήσεις. Στο πλαίσιο της πιστοποίησης, οι κατασκευαστές πρέπει να τηρούν τεχνικές απαιτήσεις που αφορούν την ποιότητα εικόνας και ήχου, τη διαλειτουργικότητα με διαφορετικές συσκευές Android, την προστασία της σύνδεσης και τη συμβατότητα με τις φωνητικές εντολές μέσω Google Assistant. Η σύνδεση μπορεί να γίνεται είτε ενσύρματα μέσω USB, είτε ασύρματα μέσω Wi-Fi και Bluetooth, προσφέροντας στον οδηγό και τους επιβάτες πρόσβαση σε λειτουργίες όπως τηλεφωνικές κλήσεις, πλοήγηση μέσω Google Maps, βίντεο και μουσική. Με λίγα λόγια, η Android Auto Certification αποτελεί προϋπόθεση ώστε ένα infotainment να φέρει επίσημα την ονομασία Android Auto, εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη ενσωμάτωση των συσκευών Android στο οικοσύστημα του οχήματος και προσφέροντας εμπειρία χρήσης σύμφωνα με τα πρότυπα της Google [14].

12. RoHS Directive

Το έγγραφο RoHS (Restriction of Hazardous Substances) Directive είναι μια οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που περιορίζει τη χρήση επικίνδυνων ουσιών όπως βαρέα μέταλλα, επιβραδυντικά φλόγας ή πλαστικοποιητές στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Στόχος της είναι η προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος μέσω της, επί του παρόντος, απαγόρευσης δέκα ουσιών. Η οδηγία εφαρμόζεται σε ευρύ φάσμα προϊόντων, από καταναλωτικές συσκευές και ιατρικό εξοπλισμό έως ηλεκτρονικά αυτοκινήτων όπως τα συστήματα infotainment και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη σήμανση CE. Η συμμόρφωση με τη RoHS διασφαλίζει ότι οι κατασκευαστές τηρούν τα ευρωπαϊκά πρότυπα ασφάλειας και περιβαλλοντικής προστασίας σε όλα τα στάδια παραγωγής και διάθεσης των προϊόντων [15].

13. WEEE Directive

Το έγγραφο WEEE Directive (Waste of Electrical and Electronic Equipment) είναι μία οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αφορά τη διαχείριση και την ανακύκλωση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Στόχος της είναι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την απόρριψη συσκευών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, μέσω της πρόληψης δημιουργίας αποβλήτων, της προώθησης της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης υλικών. Η οδηγία καθορίζει υποχρεώσεις για τους κατασκευαστές, τους εισαγωγείς, τους διανομείς και τα κράτη μέλη ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή συλλογή, η διαχείριση και η επεξεργασία των Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα προϊόντων, από οικιακές συσκευές και καταναλωτικά ηλεκτρονικά έως ιατρικό και βιομηχανικό εξοπλισμό, καθώς και ηλεκτρονικά συστήματα οχημάτων. Η συμμόρφωση με την οδηγία WEEE αποτελεί προϋπόθεση για τη σήμανση CE και διασφαλίζει ότι οι οικονομικοί φορείς συμβάλλουν ενεργά στην προστασία του περιβάλλοντος, μειώνοντας τα επικίνδυνα απόβλητα και προωθώντας την κυκλική οικονομία δημιουργώντας ίσους όρους ανταγωνισμού για τις επιχειρήσεις [16].

14. REACH

Ο Κανονισμός REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) είναι το βασικό νομικό έγγραφο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των χημικών ουσιών. Στόχος του είναι η προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος μέσω της καταγραφής, αξιολόγησης, αδειοδότησης και της απαγόρευσης ή του περιορισμού των επικίνδυνων ουσιών. Ο κανονισμός υποχρεώνει τους κατασκευαστές και τους εισαγωγείς να καταχωρούν στον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Χημικών-ECHA (European Chemicals Agency) τις ουσίες που παράγουν ή εισάγουν σε ποσότητες άνω του ενός τόνου ετησίως, παρέχοντας λεπτομερή στοιχεία για τις ιδιότητές τους και τα μέτρα ασφαλούς χρήσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις ουσίες υψηλής ανησυχίας SVHC (Substances of Very High Concern) που έχουν αναγνωριστεί ως καρκινογόνες, μεταλλαξιογόνες ή τοξικές για την αναπαραγωγή και για τις οποίες απαιτείται ειδική αδειοδότηση. Παράλληλα, περιλαμβάνει λίστες περιορισμών που ενημερώνονται διαρκώς, ώστε να αντικατοπτρίζουν τις επιστημονικές εξελίξεις και προωθεί εναλλακτικές μεθόδους για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των ουσιών, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των δοκιμών σε ζώα. Ο REACH εφαρμόζεται σε όλες τις βιομηχανίες και σε ευρύ φάσμα προϊόντων, από πρώτες ύλες και βιομηχανικά υλικά μέχρι καταναλωτικά αγαθά και ηλεκτρονικά συστήματα οχημάτων. Σύμφωνα με τον κανονισμό, οι καταναλωτές έχουν το δικαίωμα να γνωρίζουν εάν τα προϊόντα που αγοράζουν περιέχουν επιβλαβείς χημικές ουσίες για την υγεία τους ή το περιβάλλον. Συνοψίζοντας, η συμμόρφωση με τον κανονισμό αποτελεί προϋπόθεση για την κυκλοφορία προϊόντων στην αγορά της ΕΕ και διασφαλίζει ότι οι επιχειρήσεις αναλαμβάνουν την

ευθύνη για την ασφαλή χρήση των χημικών, ενισχύοντας τη διαφάνεια στην εφοδιαστική αλυσίδα και προωθώντας τη βιώσιμη ανάπτυξη, την ανταγωνιστικότητα και την καινοτομία της ευρωπαϊκής βιομηχανίας και των επιχειρήσεων [17].

15. IEC 62368-1

Το IEC 62368-1 είναι διεθνές πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις ασφαλείας για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό στον τομέα της τεχνολογίας ήχου, βίντεο, πληροφοριών και επικοινωνιών, καθώς και σε επαγγελματικές και γραφειακές μηχανές με ονομαστική τάση που δεν υπερβαίνει τα 600 V. Στόχος του είναι η προστασία των τεχνικών και των χρηστών από κινδύνους που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια, τη θερμότητα, τις μηχανικές καταπονήσεις, την ακτινοβολία, την ακουστική ενέργεια κ.α. Το πρότυπο εφαρμόζει την προσέγγιση Hazard-Based Safety Engineering (HBSE), δηλαδή πρώτα αναλύει πιθανές πηγές κινδύνου και έπειτα καθορίζει κατάλληλες δικλείδες ασφαλείας, όπως σχεδιαστικά μέτρα, προστασία κατά την εγκατάσταση και μέτρα χρήσης που αποσκοπούν στη μείωση της πιθανότητας πόνου, τραυματισμού και υλικής ζημιάς. Πιο συγκεκριμένα, ταξινομεί τις πηγές ενέργειας και ορίζει μέτρα προστασίας έναντι αυτών των πηγών ενέργειας εξετάζοντας σενάρια όπως η ηλεκτροπληξία, η πυρκαγιά, τα εγκαύματα, οι βλάβες ακοής και οι κίνδυνοι από οπτική ακτινοβολία (π.χ. LAZER). Το IEC 62368-1 αντικατέστησε τα παλαιότερα πρότυπα IEC 60950-1 και IEC 60065, ενοποιώντας τις απαιτήσεις ασφαλείας για τις σύγχρονες πολυλειτουργικές συσκευές, όπως smartphones, tablets και συστήματα infotainment. Η συμμόρφωση με το πρότυπο αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σήμανση CE και τη νόμιμη διάθεση του προϊόντος στην αγορά, εξασφαλίζοντας ότι η προστασία της σωματικής ακεραιότητας των κατασκευαστών και των χρηστών καθώς και της υλικής ακεραιότητας του εξοπλισμού λαμβάνονται υπόψη σε όλο τον κύκλο ζωής του [18].

16. GDPR

Ο Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων γνωστός και ως GDPR (General Data Protection Regulation) αποτελεί το βασικό νομικό έγγραφο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία των προσωπικών δεδομένων και εφαρμόζεται από τον Μάιο του 2018 σε όλα τα κράτη-μέλη της. Σκοπός του είναι να διασφαλίσει τα θεμελιώδη δικαιώματα και τις ελευθερίες των φυσικών προσώπων ως προς την επεξεργασία δεδομένων προσωπικού χαρακτήρα. Επιβάλλει λοιπόν σαφείς κανόνες για το πώς συλλέγονται, αποθηκεύονται, χρησιμοποιούνται και διαγράφονται τα δεδομένα αυτά από όλους τους φορείς (ιδιωτικές και δημόσιες επιχειρήσεις, κρατικές αρχές, συλλόγους, κλπ.). Ο GDPR καθιερώνει αρχές όπως η νομιμότητα, η διαφάνεια, η επιλεκτική συλλογή και η ασφάλεια της επεξεργασίας των δεδομένων ενώ δίνει στους πολίτες δικαιώματα όπως η πρόσβαση, η διόρθωση, η

μεταφορά και η διαγραφή τους. Για τους οργανισμούς και τις επιχειρήσεις, προβλέπει υποχρέωση συμμόρφωσης μέσω τεχνικών και οργανωτικών μέτρων ασφαλείας, επιτρέπει ορισμό Υπευθύνου Προστασίας Δεδομένων (Data Protection Officer) καθώς και υποχρέωση γνωστοποίησης περιστατικών παραβίασης. Η συμμόρφωση είναι δεσμευτική, με αυστηρά διοικητικά πρόστιμα σε περίπτωση παραβάσεων, γεγονός που καθιστά τον GDPR κρίσιμο κανονισμό για όλες τις επιχειρήσεις που διαχειρίζονται δεδομένα πελατών, εργαζομένων ή συνεργατών [19].

17. ISO 14001

Το ISO 14001 είναι διεθνές πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις για την εφαρμογή ενός Συστήματος Περιβαλλοντικής Διαχείρισης ή αλλιώς EMS (Environmental Management System) με σκοπό τον έλεγχο και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός οργανισμού. Βασίζεται στην μεθοδολογία PDCA (Plan–Do–Check–Act) εστιάζει δηλαδή στη συνεχή βελτίωση μέσω προγραμματισμού στόχων, εφαρμογής διαδικασιών, παρακολούθησης και διορθωτικών ενεργειών. Το πρότυπο καλύπτει πολλούς τομείς όπως η εξοικονόμηση πόρων, η μείωση αποβλήτων και εκπομπών, η συμμόρφωση με τη νομοθεσία και η προετοιμασία για περιβαλλοντικά συμβάντα. Εφαρμόζεται σε οργανισμούς κάθε μεγέθους και κλάδου, ενώ στην αυτοκινητοβιομηχανία συνδέεται με τη βιώσιμη παραγωγή, τη χρήση υλικών, τα ηλεκτρονικά συστήματα και τη διαχείριση αποβλήτων. Η συμμόρφωση με την ISO 14001 δεν αποτελεί από μόνη της εγγύηση άριστης περιβαλλοντικής επίδοσης, αλλά παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης που εφαρμόζει ένας οργανισμός για να οργανώνει, να παρακολουθεί και να μειώνει τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις, να εξοικονομεί ενέργεια και κόστος, ενισχύοντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία του και τη δέσμευσή του στη βιωσιμότητα [20].

18. RTCM SC-104

Το RTCM SC-104 είναι διεθνές πρότυπο επικοινωνίας (DGPS), που αναπτύχθηκε από την ειδική επιτροπή SC-104 του RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), για τη μετάδοση διορθωτικών σημάτων GNSS (π.χ. GPS, GLONASS, Galileo κ.ά.) από σταθμούς αναφοράς προς τα οχήματα, ώστε η θέση που υπολογίζει ο δέκτης να είναι πολύ πιο ακριβής. Καθορίζει τη δομή των μηνυμάτων, δηλαδή τα formats και τα πρωτόκολλα μετάδοσης, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό διαλειτουργικότητα μεταξύ δεκτών διαφορετικών κατασκευαστών. Το RTCM SC-104 έχει εξελιχθεί σε ευρέως αποδεκτό «βιομηχανικό πρότυπο» για DGPS και RTK εφαρμογές και έχει διαμορφωθεί ώστε να επιτρέπει υψηλή απόδοση στη ροή διορθώσεων GNSS. Στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει ιδιαίτερη σημασία για τα συστήματα πλοήγησης (GPS) και τα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης οδηγού

(ADAS), όπου η ακρίβεια εντοπισμού και τοποθεσίας είναι κρίσιμη για την ασφάλεια του οδηγού και των επιβατών, καθώς και για την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών μονάδων όπως τα IVIS [21].

19. ISO 7637-2

Το ISO 7637-2 είναι διεθνές πρότυπο που καθορίζει τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) σε ηλεκτρικές παροδικές διαταραχές τάσης (electrical transients) οι οποίες μεταδίδονται κατά μήκος των γραμμών τροφοδοσίας σε οχήματα εξοπλισμένα με ηλεκτρικά συστήματα 12 V ή 24 V. Οι διαταραχές αυτές προκαλούνται από το άνοιγμα και το κλείσιμο διακοπών και ρελέ, την εναλλαγή λειτουργίας συστημάτων ή ακόμη και από σφάλματα στο ηλεκτρικό κύκλωμα, δημιουργώντας αιχμές τάσης που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία και λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Το πρότυπο ισχύει για όλα τα είδη οχημάτων, ανεξάρτητα από τον τύπο του κινητήρα τους και ορίζει μια σειρά από τυποποιημένους παλμούς (π.χ. Pulse 1, Pulse 2a, Pulse 2b, Pulse 3a, Pulse 3b) με καθορισμένα χαρακτηριστικά τάσης, διάρκειας και επαναληψιμότητας, οι οποίοι κατά τη διάρκεια των δοκιμών εφαρμόζονται στις ηλεκτρονικές μονάδες όπως ECU, infotainment και άλλα υποσυστήματα. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί ότι τα συστήματα μπορούν να αντέξουν χωρίς βλάβη ή δυσλειτουργία σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η συμμόρφωση με το ISO 7637-2 αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πιστοποίηση OEM εξοπλισμού, καθώς διασφαλίζει ότι τα ηλεκτρονικά του οχήματος παραμένουν αξιόπιστα και ασφαλή ακόμη και σε περιβάλλον έντονων ηλεκτρικών διαταραχών [22].

20. EN 50498

Το EN 50498 είναι ευρωπαϊκό πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) για aftermarket ηλεκτρονικό εξοπλισμό, δηλαδή συσκευές που εγκαθίστανται σε οχήματα μετά την πώλησή τους και δεν περιλαμβάνονται στον βασικό σχεδιασμό του κατασκευαστή. Σκοπός του είναι να διασφαλίσει ότι ο πρόσθετος εξοπλισμός, όπως φορτιστές, τηλεματικές μονάδες, βοηθητικά ηλεκτρονικά, συστήματα φωτισμού ή ακόμη και μονάδες infotainment που τοποθετούνται εκ των υστέρων, δεν θα προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ούτε θα επηρεάζονται από αυτές, ώστε να μην διαταράσσεται η λειτουργία των υπόλοιπων ηλεκτρονικών μονάδων του οχήματος. Το πρότυπο ορίζει μεθόδους δοκιμών και όρια εκπομπών και ανοσίας αντίστοιχα με εκείνα που εφαρμόζονται στον OEM εξοπλισμό, βασιζόμενο σε διεθνή πρότυπα όπως το ISO 7637-2. Μάλιστα, το EN 50498 υιοθετεί ρητά τους τυποποιημένους παλμούς του ISO 7637-2 και περιλαμβάνει σχετικούς πίνακες παλμών (pulses), ώστε να διασφαλίζεται ότι ο aftermarket εξοπλισμός δοκιμάζεται κάτω από τις ίδιες ηλεκτρικές καταπονήσεις που ισχύουν και για τον εργοστασιακό εξοπλισμό. Συμπερασματικά, το EN 50498 συμπληρώνει τα υπάρχοντα πρότυπα

για την αυτοκινητοβιομηχανία, εξασφαλίζοντας ότι και οι πρόσθετες συσκευές aftermarket πληρούν τις απαιτήσεις EMC και δεν θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και την αξιοπιστία των οχημάτων [23].

4. Μεθοδολογία σχεδίασης - ανάπτυξης – πιστοποίησης

4.1. AIAG–VDA: Ενοποιημένη Μεθοδολογία FMEA

Οι οργανισμοί AIAG (Automotive Industry Action Group) και VDA (Verband der Automobilindustrie) αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους φορείς ανάπτυξης προτύπων ποιότητας και ασφάλειας στην παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία. Ο πρώτος ιδρύθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες και εκπροσωπεί κυρίως αμερικανικούς κατασκευαστές (όπως GM, Ford, Stellantis), ενώ ο δεύτερος εδρεύει στη Γερμανία και εκπροσωπεί κορυφαίους ευρωπαϊκούς ομίλους (όπως VW, BMW, Mercedes-Benz). Ανταποκρινόμενοι στις αυξανόμενες απαιτήσεις για εναρμόνιση διαδικασιών διαχείρισης ποιότητας σε παγκόσμιο επίπεδο, οι δύο οργανισμοί συνεργάστηκαν για την ανάπτυξη ενός ενιαίου πλαισίου ανάλυσης αστοχιών. Το αποτέλεσμα αυτής της συνεργασίας είναι η δημιουργία μιας κοινής μεθόδου FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) με βάση το πρότυπο AIAG & VDA, που παρουσιάστηκε επίσημα το 2019 [24].

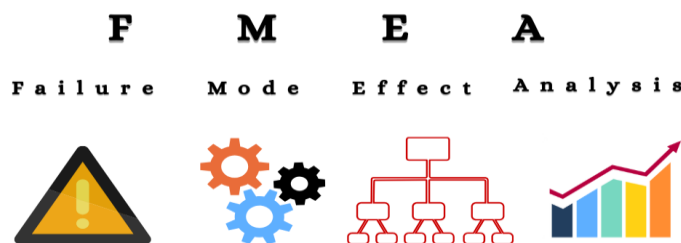


Figure 1. FMEA diagram.

Η μέθοδος FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) με βάση το εγχειρίδιο FMEA AIAG & VDA χωρίζεται σε 3 βασικές κατηγορίες [25] :

1. DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis)
2. PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis)

3. FMEA-MSR (Supplemental FMEA for Monitoring and System Response)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκαν οι πρότυπες αναλύσεις DFMEA και PFMEA, με σκοπό την αξιολόγηση και πρόληψη πιθανών τρόπων αστοχίας κατά τη φάση της σχεδίασης και της παραγωγής του συστήματος infotainment, αντίστοιχα. Οι δύο αναλύσεις βασίστηκαν στην ενοποιημένη μεθοδολογία των 7 βημάτων, όπως αυτή ορίζεται στο κοινό εγχειρίδιο των οργανισμών AIAG (Automotive Industry Action Group) και VDA (Verband der Automobilindustrie). Τα επτά αυτά βήματα εφαρμόστηκαν πιστά, διασφαλίζοντας τη συστηματική και ολοκληρωμένη ανάπτυξη του συστήματος in-vehicle infotainment. Τα 7 βήματα της Ανάλυσης FMEA (DFMEA & PFMEA) παρουσιάζονται στο Table 2 [24].

Table 2. Τα 7 βήματα της FMEA.

#	ΒΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Planning and Preparation (Σχεδιασμός και Προετοιμασία)	Ορίζεται το προϊόν ή η διαδικασία υπό μελέτη, προσδιορίζονται οι απαιτήσεις του πελάτη, οι στόχοι της ανάλυσης και η FMEA ομάδα.
2	Structure Analysis (Ανάλυση Δομής)	Δημιουργείται ιεραρχική απεικόνιση του συστήματος (System > Subsystem > Component) ή της διαδικασίας (Process > Step > Task), προκειμένου να κατανοηθεί η σχέση μεταξύ των στοιχείων.
3	Function Analysis (Ανάλυση Λειτουργιών)	Καταγράφονται αναλύονται οι βασικές λειτουργίες κάθε στοιχείου του συστήματος ή κάθε βήματος της διαδικασίας, ανάλογα με τον τύπο της FMEA.
4	Failure Analysis (Ανάλυση Αστοχιών)	Εντοπίζονται πιθανοί τρόποι αστοχίας (Failure Modes), τα αίτια (Causes) και οι επιπτώσεις (Effects) για κάθε στοιχείο του συστήματος ή για κάθε στάδιο της παραγωγής
5	Risk Analysis (Ανάλυση Κινδύνου)	Εκτιμώνται οι δείκτες Severity (S), Occurrence (O) και Detection (D), και υπολογίζεται το RPN (Risk Priority Number) και το AP (Action Priority) σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου.
6	Optimization (Βελτιστοποίηση)	Προτείνονται και εφαρμόζονται διορθωτικά μέτρα με σκοπό τη μείωση των δεικτών Occurrence (O) και Detection (D). Ακολουθεί επαναξιολόγηση του κινδύνου, με την ιεράρχηση να βασίζεται πλέον στους δείκτες Risk Priority Number (RPN) και Action Priority (AP). Παράλληλα, υπολογίζονται οι νέες τιμές RPN και AP, ώστε να τεκμηριωθεί η βελτίωση κάθε Failure Mode και η αποτελεσματικότητα των εφαρμοσμένων ενεργειών.
7	Results Documentation (Τεκμηρίωση Αποτελεσμάτων)	Καταγράφονται τα τελικά αποτελέσματα, οι ενέργειες που υλοποιήθηκαν στα προηγούμενα βήματα, ο σκοπός και τα συμπεράσματα της ανάλυσης.

4.2. Πλεονεκτήματα της μεθόδου FMEA

Η νέα μέθοδος AIAG-VDA FMEA εισάγει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με την παλαιότερη διαδικασία που εφαρμόζονταν από τον όμιλο AIAG. Η βασικότερη αλλαγή αφορά την προσθήκη του δείκτη Action Priority (AP) στην αξιολόγηση των failure modes. Ο τελευταίος δίνει αυξημένη βαρύτητα στη σοβαρότητα της αστοχίας (S) και επιτρέπει πιο αξιόπιστη ιεράρχηση ενεργειών. Με αυτόν τον τρόπο, κρίσιμες αστοχίες δεν υποβαθμίζονται λόγω χαμηλής πιθανότητας εμφάνισης ή εύκολης ανίχνευσης, όπως συνέβαινε με το RPN, αλλά αντιμετωπίζονται κατά προτεραιότητα, σύμφωνα με τον πραγματικό τους κίνδυνο.

Παράλληλα, τα επτά βήματα ανάπτυξης της καινούριας FMEA παρέχουν ένα σαφές πλαίσιο (clear framework) για την πρόληψη ελαττωμάτων (defect prevention). Πιο συγκεκριμένα, τα αναθεωρημένα κριτήρια Severity, Occurrence και Detection (S-O-D) προσφέρουν μεγαλύτερη αντικειμενικότητα και σαφήνεια στην αξιολόγηση, ενώ η απαίτηση για δομική, λειτουργική και στοιχειακή ανάλυση ενισχύει την πληρότητα και την ανθεκτικότητα (robustness) της διαδικασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην τεκμηρίωση βελτιστοποίησης και επίσημων αποτελεσμάτων, με αποτέλεσμα η FMEA να μετατρέπεται σε δυναμικό εργαλείο, ικανό να καθοδηγεί και να παρακολουθεί τις βελτιωτικές ενέργειες.

Τέλος, η εισαγωγή της κατηγορίας MSR-FMEA επεκτείνει την ανάλυση πέρα από το στάδιο της σχεδίασης και παραγωγής, καλύπτοντας και τους κινδύνους που εμφανίζονται κατά τη χρήση του προϊόντος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζονται καταστάσεις που συνδέονται άμεσα με την ασφάλεια του οδηγού, τη συμμόρφωση με κανονισμούς και την αξιοπιστία του συστήματος σε βάθος χρόνου. Η πρόβλεψη και η αξιολόγηση τέτοιων κινδύνων ενισχύουν τη δυνατότητα πρόληψης σοβαρών αστοχιών και μειώνουν σημαντικά την πιθανότητα μελλοντικών ανακλήσεων [25], [26].

4.3. DFMEA

Η ανάλυση DFMEA αποτελεί βασική και απαραίτητη προϋπόθεση στον σχεδιασμό εξαρτημάτων για την αυτοκινητοβιομηχανία. Μέσα από μια συστηματική διαδικασία, η DFMEA επιτρέπει την πρόβλεψη και αξιολόγηση πιθανών τρόπων αστοχίας, την εκτίμηση της σοβαρότητας, της πιθανότητας εμφάνισης και της δυνατότητας ανίχνευσής τους καθώς και την ιεράρχηση των σχετικών κινδύνων μέσω των δεικτών RPN (Risk Priority Number) και AP (Action Priority). Με αυτόν τον τρόπο, οι ομάδες μηχανικών μπορούν να ενσωματώσουν διορθωτικά μέτρα, μηχανισμούς ασφαλείας και στρατηγικές βελτίωσης πριν την παραγωγή, μειώνοντας το κόστος επανασχεδιασμού και τις πιθανότητες εμφάνισης προβλημάτων στο τελικό προϊόν, που στην περίπτωση μας είναι το IVIS [27].

4.3.1 Βήμα 1^ο: Planning & Preparation

Το πρώτο βήμα στο πλαίσιο του σχεδιασμού του infotainment συστήματος ήταν το Planning & Preparation, όπου καθορίστηκε ως αντικείμενο της ανάλυσης το car infotainment system. Στο στάδιο αυτό δηλώθηκε και ο αριθμός του εγγράφου TPS, σύμφωνα με το οποίο θα διασφαλιζόταν στη συνέχεια η συμμόρφωση του συστήματος με τα σχετικά πρότυπα. Ως πελάτης για τον οποίο προορίζεται το εν λόγω infotainment σύστημα ορίστηκε η εταιρεία Audixx, με τελικό προϊόν τη σειρά αυτοκινήτων AA3. Στο πεδίο DFMEA Team καταγράφηκαν οι ομάδες, τα επιμέρους τμήματα και οι ρόλοι που συνεργάστηκαν στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του προϊόντος. Συγκεκριμένα, στην DFMEA συμμετείχαν οι εξής: Mechanical Design Team, Electronics Design Team, Software Team, το Τμήμα Διασφάλισης Ποιότητας (Quality Assurance), καθώς και ο Project Manager, υπεύθυνος για τον συντονισμό και την επίβλεψη της διαδικασίας. Ως Applicable Standards ορίστηκαν όλα τα πρότυπα ISO, IEC, UNECE, RoHS, REACH, GDPR κ.ά που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο συμμόρφωσης του προϊόντος, καθώς και για τις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές. Τέλος, καθορίστηκε ως σκοπός της ανάλυσης ο εντοπισμός και η πρόληψη πιθανών αστοχίας στο σύστημα infotainment, με στόχο τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος (Table 3).

Table 3. DFMEA Planning and Preparation.

Field	Details
Product under analysis	Car Infotainment System
TPS Number	255-2352xxxxx
Company	Hellenic Infotainment Systems
Engineering Location	Athens Greece
Customer	Audixx
Model Year	2025
Program Name	Model AA3
DFMEA Start Date	19-5-2025
DFMEA Revision Date	31-6-2025
DFMEA Teams	Mechanical Design Team, Electronics Design Team, Software Team, Quality Assurance, Project Manager

Applicable Standards	ISO 7637-2, EN 50498, ISO 26262, ISO 21434, ISO 16750, ISO 14001, IEC 61000, IEC 62368-1, CISPR 25, UNECE R155/R156, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification, RoHS, REACH, GDPR, WEEE, RTCM SC-104.
Purpose of Analysis	Identification and prevention of potential failure modes in the infotainment system, ensuring functional, electrical, environmental and regulatory compliance during the product lifecycle.

ATTENTION: IEC 61000-4-4, 61000-4-5 NOT applicable for automotive applications, applicable only for stations.

4.3.2 Βήμα 2^ο: Structure Analysis

Το δεύτερο βήμα της ανάλυσης DFMEA είναι η Ανάλυση Δομής (Structure Analysis) όπου καθορίζεται η ιεραρχική δομή του υπό ανάλυση συστήματος. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ανάλυση ως σύστημα προσδιορίστηκε το αυτοκίνητο και ως υποσύστημα καταγράφηκε το infotainment system.

Ως στοιχεία ορίστηκαν όλα τα επιμέρους μέρη που συγκροτούν το infotainment και τα οποία είναι:

1. Οθόνη (Display)
2. Χειριστήριο αφής (Touch Controller)
3. Κύρια Μονάδα Επεξεργασίας (MCU – Main Processor)
4. Πομποδέκτης CAN (CAN Transceiver)
5. Έξοδος ήχου / Ενισχυτής (Audio Output / Amplifier)
6. Ασύρματες διεπαφές (Wireless Interfaces – Bluetooth / Wi-Fi)
7. Δέκτης GNSS (GPS Receiver)
8. Μνήμη (Flash / RAM)
9. Διεπαφή USB (USB Interface)
10. Μονάδα Τροφοδοσίας (DC/DC Converter – Power Supply Unit)
11. Μονάδα Ψύξης (Heatsink / Fan – Cooling Unit)

12. Είσοδος Μικροφώνου (Microphone Input)
13. Σύστημα Κεραίας (Antenna System)
14. Λειτουργικό Σύστημα / Υλικολογισμικό (Infotainment OS / Firmware)
15. Υποδοχές / Διεπαφές καλωδίωσης (Connectors / Harness Interface)

Για κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία, περιεγραφή η λειτουργία του στο πλαίσιο του συστήματος infotainment, προκειμένου να υποστηριχθεί η ανάλυση πιθανών τρόπων αστοχίας (Failure Modes) στα επόμενα βήματα της DFMEA (Table 4).

Table 4. DFMEA Structure Analysis.

Level	Description
System	Vehicle
Subsystem	Infotainment
Components	Display, Touch Controller, MCU, CAN Transceiver, Audio Output, Wireless Interfaces, GNSS Receiver (GPS), Memory (Flash / RAM), USB Interface, Power Supply Unit (DC/DC), Cooling Unit (Heatsink/Fan), Microphone Input, Antenna System, Infotainment OS / Firmware, Connectors / Harness Interface
Function	Graphical user interface display, Touch input detection, System execution and control, Vehicle communication interface, Audio amplification and playback, Wireless connectivity and data transfer, Navigation positioning, Software and data storage, External device connection and charging, Internal power distribution, Thermal management, Voice input capture, Wireless and RF signal reception, System control and firmware execution, Vehicle system interfacing

4.3.3 Βήμα 3^ο: Function Analysis

Στο τρίτο βήμα της DFMEA εφαρμόζεται η Λειτουργική Ανάλυση (Function Analysis). Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή των λειτουργιών όλων των επιμέρους στοιχείων του

infotainment συστήματος, με σκοπό τον εντοπισμό όλων των κρίσιμων λειτουργιών που, σε περίπτωση αποτυχίας, ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την ασφάλεια, τη χρηστικότητα ή τη συμμόρφωση του τελικού προϊόντος (Table 5).

Table 5. DFMEA Function Analysis.

Component	Function
Display	Provides graphical user interface for navigation, media, and vehicle information
Touch Controller	Detects and interprets user touch input for system interaction
MCU (Main Processor)	Executes the infotainment operating system, applications, and controls system operation
CAN Transceiver	Facilitates communication with vehicle ECUs through the CAN bus
Audio Output / Amplifier	Amplifies and outputs audio signals to speakers
Wireless Interfaces (Bluetooth/Wi-Fi)	Enables wireless communication with external devices and networks
GNSS Receiver (GPS)	Receives satellite signals to determine vehicle location and assist navigation
Memory (Flash / RAM)	Stores operating system, application data, user settings, and cache memory
USB Interface	Connects external devices for data transfer and device charging
Power Supply Unit (DC/DC Converter)	Converts vehicle battery voltage to regulated power levels for system components
Cooling Unit (Heatsink/Fan)	Manages system temperature by dissipating excess heat
Microphone Input	Captures voice commands and supports hands-free communication
Antenna System	Receives radio frequency signals for GPS, Wi-Fi, Bluetooth, and FM/AM reception
Infotainment OS / Firmware	Manages system resources, runs user interfaces, handles device integration and updates
Connectors / Harness Interface	Provides electrical and data connections between the infotainment system and the vehicle's wiring system

4.3.4 Βήμα 4^ο: Failure Analysis

Στο τέταρτο βήμα της DFMEA, πραγματοποιείται η Ανάλυση Αποτυχίας (Failure Analysis). Αξιοποιώντας τις πληροφορίες που προέκυψαν από την ανάλυση λειτουργιών (Function Analysis), για κάθε στοιχείο του υποσυστήματος infotainment προσδιορίστηκε:

- ένας πιθανός τρόπος αστοχίας (Failure Mode),
- η αιτία που μπορεί να τον προκαλέσει (Failure Cause), και
- το αποτέλεσμα που επιφέρει η συγκεκριμένη αστοχία στο σύστημα (Failure Effect).

Η ανάλυση αυτή αποτελεί το θεμέλιο για την εκτίμηση του κινδύνου κάθε αστοχίας και οδηγεί στα επόμενα βήματα αξιολόγησης και προτεινόμενων διορθωτικών ενεργειών (Table 6).

Table 6. DFMEA Failure Analysis.

Component	Failure Mode	Cause	Effect
Display	Black screen	Overheating of the display panel	Loss of visual output – no navigation or media visibility
Touch Controller	No touch detection	Aging and degradation of capacitive sensor	Loss of touch interaction functionality
MCU (Main Processor)	System freeze	Thermal overload on CPU cores	Full system unresponsiveness and reboot required
CAN Transceiver	Loss of vehicle communication	Connector loosening due to vibration	Vehicle data unavailable, affecting system functionality
Audio Output / Amplifier	No sound output	Amplifier IC damage due to overcurrent	Loss of audio alerts and media playback
Wireless Interfaces (Bluetooth/Wi-Fi)	Dropped wireless connections	Signal interference from external sources	Loss of wireless connectivity features
GNSS Receiver (GPS)	No GPS fix	Antenna misalignment	Navigation feature becomes unavailable

Memory (Flash / RAM)	Data corruption	Frequent power cycling during data writes	Loss of critical system files and settings
USB Interface	No device recognition	Physical damage to the USB port	External devices cannot be detected or charged
Power Supply Unit (DC/DC)	Overvoltage output	Internal voltage regulator failure	Potential damage to system electronics
Cooling Unit (Heatsink/Fan)	Ineffective cooling	Dust accumulation blocking airflow	Overheating of the infotainment mainboard
Microphone Input	No voice input	Microphone element breakage	Voice control and hands-free functions disabled
Antenna System	Signal attenuation	Cable corrosion at antenna connector	Loss of GPS, Wi-Fi, or radio signal reception
Infotainment OS / Firmware	System crash after boot	Corrupted firmware update	Inaccessibility of the infotainment system
Connectors / Harness Interface	Intermittent power loss	Vibration-induced pin misalignment	Random system resets or shutdowns

4.3.5 Βήμα 5^ο: Risk Analysis

Το πέμπτο βήμα της ανάλυσης DFMEA είναι η Ανάλυση Κινδύνου (Risk Analysis). Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιεί για την εκτίμηση του κινδύνου δύο δείκτες. Ο πρώτος είναι ο δείκτης προτεραιότητας κινδύνου RPN (Risk Priority Number), ο οποίος υπολογίζεται ως το γινόμενο των τριών παραμέτρων Severity (S), Occurrence (O) και Detection (D), οι οποίοι παρουσιάζονται στον Table 7, δηλαδή $RPN = S \times O \times D$. Ο δείκτης αυτός παρέχει μια ποσοτική μέτρηση του επιπέδου κινδύνου κάθε Failure Mode. Ο δεύτερος είναι ο δείκτης προτεραιότητας ενεργειών AP (Action Priority), ο οποίος προκύπτει από συγκεκριμένους συνδυασμούς των ίδιων παραμέτρων (S,O,D) και κατηγοριοποιεί κάθε Failure Mode σε επίπεδα προτεραιότητας (High, Medium και Low), δίνοντας αυξημένη βαρύτητα στη σοβαρότητα (S). Ο δείκτης AP εισήχθη με τη μεθοδολογία AIAG–VDA FMEA (2019) για να ξεπεράσει τους περιορισμούς του RPN και να κατευθύνει πιο αξιόπιστα την ιεράρχηση των διορθωτικών ενεργειών.

Table 7. Παράμετροι υπολογισμού δείκτη RPN.

Παράμετρος	Αντιστοιχεί	Ορισμός	Κλίμακα
S Severity (Σοβαρότητα)	Failure effect	Αντιπροσωπεύει πόσο σοβαρή είναι η συνέπεια ενός τρόπου αστοχίας, εάν αυτός πράγματι συμβεί.	1 (ασήμαντο) έως 10 (πολύ κρίσιμο)
O Occurrence (Πιθανότητα εμφάνισης)	Failure Cause	Αντιπροσωπεύει τη συχνότητα με την οποία αναμένεται να συμβεί η συγκεκριμένη αστοχία.	1 (πολύ σπάνια) έως 10 (πολύ συχνή)
D Detection (Ανιχνευσιμότητα)	Failure Mode	Αντιπροσωπεύει το πόσο πιθανό είναι να εντοπιστεί η αστοχία ή η αιτία της πριν φτάσει στον τελικό χρήστη.	1 (ανίχνευση σχεδόν βέβαιη) έως 10 (ανίχνευση σχεδόν αδύνατη)

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας υπολογισμού του δείκτη Action Priority (AP), χωρισμένος σε δύο τμήματα για λόγους καλύτερης παρουσίασης των συνδυασμών των παραμέτρων S, O και D. Σε συνέχεια, κατά τη Risk Analysis πραγματοποιείται ποσοτική εκτίμηση του κινδύνου κάθε πιθανού τρόπου αστοχίας, με βάση τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από τα προηγούμενα βήματα και λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο που έχει η αστοχία στο σύστημα infotainment, στον οδηγό και στους επιβάτες (Table 10).

Table 8. Action Priority part 1.

Effect	S	Prediction of failure cause Occurring	O	Ability to Detect	D	Action Priority (AP)
	9-10			Low-Very Low	7-10	H

Product or Plan Effect Very High		Very High	8-10	Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	H
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
		Moderate	5-4	Very High	1	H
				Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
		Low	3-2	High	2-4	H
				Very High	1	M
				Low-Very Low	7-10	H
		Very Low	1	Moderate	5-6	M
				High	2-4	L
				Very High	1	L
				Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect High	7- 8	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
		High	6-7	Very High	1	H
				Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
		Moderate	4-5	High	2-4	H
				Very High	1	M
				Low-Very Low	7-10	H
		Low	2-3	Moderate	5-6	M
				High	2-4	M
				Very High	1	M
		Very Low	1	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	L
				Very High	1	L
				Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect Moderate	4-6	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	M
		High	6-7	Very High	1	M
				Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	M

Table 9. Action Priority part 2.

Effect	S	Prediction of failure	O	Ability to Detect	D	Action Priority (AP)
--------	---	-----------------------	---	-------------------	---	----------------------

		cause Occurring				
				Very High	1	L
		Moderate	4-5	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	L
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Low	2-3	Low-Very Low	7-10	L
				Moderate	5-6	L
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect Low	2-3	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	M
				Very High	1	M
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	M
				Very High	1	L
		Moderate	4-5	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	L
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Low	2-3	Low-Very Low	7-10	L
				Moderate	5-6	L

				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
No Discernible Effect	1	Very Low	1-10	Very High - Very Low	1-10	L

Table 10. DFMEA Risk Analysis.

Component	Failure Mode	S	O	D	RPN (S×O×D)	AP
Display	Black screen	9	3	5	135	Medium
Touch Controller	No touch detection	8	3	6	144	Medium
MCU (Main Processor)	System freeze	9	4	5	180	High
CAN Transceiver	Loss of vehicle communication	8	4	5	160	Medium
Audio Output / Amplifier	No sound output	7	3	5	105	Medium
Wireless Interfaces (Bluetooth/Wi-Fi)	Dropped wireless connections	6	5	5	150	Low
GNSS Receiver (GPS)	No GPS fix	7	4	6	168	Medium
Memory (Flash / RAM)	Data corruption	9	3	6	162	Medium
USB Interface	No device recognition	6	4	5	120	Low
Power Supply Unit (DC/DC Converter)	Overvoltage output	10	2	4	80	Low

Cooling Unit (Heatsink/Fan)	Ineffective cooling	9	3	5	135	Medium
Microphone Input	No voice input	5	4	6	120	Low
Antenna System	Poor signal reception	6	4	5	120	Low
Infotainment OS / Firmware	System crash after boot	9	3	6	162	Medium
Connectors / Harness Interface	Intermittent power loss	8	4	5	160	Medium

4.3.6 Βήμα 6° : Optimization

Το έκτο βήμα της ανάλυσης DFMEA είναι η Βελτιστοποίηση (Optimization). Στο Table 11, για κάθε αναγνωρισμένο τρόπο αστοχίας προτείνονται στοχευμένες διορθωτικές ενέργειες (Recommended Actions) με σκοπό τη μείωση των δεικτών RPN και AP, σύμφωνα με την καθορισμένη σειρά προτεραιότητας. Οι ενέργειες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν βελτιώσεις στον σχεδιασμό, ενίσχυση της ποιότητας υλικών, εφαρμογή διαγνωστικών μηχανισμών ή άλλες τεχνικές παρεμβάσεις. Συμπληρώνονται επίσης οι υπεύθυνες ομάδες, οι ημερομηνίες ολοκλήρωσης και η στήλη Status για την παρακολούθηση προόδου. Σε δεύτερο πίνακα (Table 12) επανεκτιμώνται οι παράγοντες O και D, με την τιμή S να παραμένει αμετάβλητη, και υπολογίζονται τα νέα RPN και AP. Οι νέες τιμές πρέπει να είναι χαμηλότερες ή ίσες με τις αρχικές, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα των ενεργειών. Τέλος, στον τρίτο πίνακα (Table 13) παρουσιάζεται η σύγκριση παλαιών και νέων τιμών RPN και AP.

Table 11. DFMEA Expected RPN & AP Reduction.

Component	Failure Mode	Recommended Action	Responsibility & Target Completion Date	Status	Expected RPN & AP Reduction
Display	Black screen	Improve thermal dissipation; add overheating sensor	Mechanical Design Team – 25/06/2025	Closed	✓
Touch Controller	No touch detection	Use high-grade sensors and firmware self-diagnostics	Electronics Design Team – 20/06/2025	Closed	✓

MCU (Main Processor)	System freeze	Enhance cooling design; implement watchdog timer	Mechanical Design Team – 28/06/2025	Closed	✓
CAN Transceiver	Loss of vehicle communication	Use automotive-grade connectors with locking mechanism	Electronics Design Team – 26/06/2025	Closed	✓
Audio Output / Amplifier	No sound output	Implement audio path diagnostics and fault logging	Electronics Design Team – 24/06/2025	Closed	✓
Wireless Interfaces (Bluetooth/Wi-Fi)	Dropped wireless connections	Improve antenna placement and validate wireless modules	Electronics Design Team – 27/06/2025	Closed	✓
GNSS Receiver (GPS)	No GPS fix	Use enhanced GNSS antenna modules; test for positioning robustness	Electronics Design Team – 28/06/2025	Closed	✓
Memory (Flash / RAM)	Data corruption	Use ECC (Error Correction Code) memory; ensure stable power supply	Software Team – 25/06/2025	Closed	✓
USB Interface	No device recognition	Use reinforced ports and increase ESD protection	Electronics Design Team – 30/06/2025	Closed	✓
Power Supply Unit (DC/DC Converter)	Overvoltage output	Add overvoltage protection circuits and monitor outputs	Electronics Design Team – 30/06/2025	Closed	✓
Cooling Unit (Heatsink/Fan)	Ineffective cooling	Add thermal alerts; use more robust cooling solutions	Mechanical Design Team – 25/06/2025	Closed	✓
Microphone Input	No voice input	Use redundant microphone systems; implement diagnostics	Electronics Design Team – 29/06/2025	Closed	✓

Antenna System	Poor signal reception	Strengthen cable shielding and improve connector design	Mechanical Design Team – 26/06/2025	Closed	✓
Infotainment OS / Firmware	System crash after boot	Improve firmware validation process and rollback mechanisms	Software Team – 28/06/2025	Closed	✓
Connectors / Harness Interface	Intermittent power loss	Apply vibration-proof connectors and better mechanical support	Mechanical Design Team – 27/06/2025	Closed	✓

Table 12. DFMEA Optimization.

Component	Failure Mode	Recommended Action	S	New O	New D	New RPN	New AP
Display	Black screen	Improve thermal dissipation; add overheating sensor	9	2	3	54	Low
Touch Controller	No touch detection	Use high-grade sensors and firmware self-diagnostics	8	2	4	64	Low
MCU	System freeze	Enhance cooling design; implement watchdog timer	9	2	3	54	Low
CAN Transceiver	Loss of vehicle communication	Use automotive-grade connectors with locking mechanism	8	2	5	80	Medium
Audio Output / Amplifier	No sound output	Implement audio path diagnostics and fault logging	7	3	3	63	Low

Wireless Interfaces	Dropped wireless connections	Improve antenna placement and validate wireless modules	6	3	5	90	Low
GNSS Receiver	No GPS fix	Use enhanced GNSS antenna modules; test for positioning robustness	7	3	6	126	Medium
Memory (Flash / RAM)	Data corruption	Use ECC memory; ensure stable power supply	9	2	4	72	Low
USB Interface	No device recognition	Use reinforced ports and increase ESD protection	6	2	5	60	Low
Power Supply Unit	Overvoltage output	Add overvoltage protection circuits and monitor outputs	10	1	2	20	Low
Cooling Unit	Ineffective cooling	Add thermal alerts; use more robust cooling solutions	9	2	3	54	Low
Microphone Input	No voice input	Use redundant microphone systems; implement diagnostics	5	2	4	40	Low
Antenna System	Signal attenuation due to connector corrosion	Strengthen cable shielding and improve connector design	6	2	5	60	Low
Infotainment OS / Firmware	System crash after boot	Improve firmware validation process and rollback mechanisms	9	2	3	54	Low

Connectors / Harness Interface	Intermittent power loss	Apply vibration- proof connectors and better mechanical support	8	2	5	80	Medium
--------------------------------------	----------------------------	--	---	---	---	----	--------

Table 13. DFMEA RPN & AP Before and After Recommended Actions.

Component	Failure Mode	Recommended Action	Old RPN	New RPN	Old AP	New AP
Display	Black screen	Improve thermal dissipation; add overheating sensor	135	54	Medium	Low
Touch Controller	No touch detection	Use high-grade sensors and firmware self- diagnostics	144	64	Medium	Low
MCU	System freeze	Enhance cooling design; implement watchdog timer	180	54	High	Low
CAN Transceiver	Loss of vehicle communication	Use automotive- grade connectors with locking mechanism	160	80	Medium	Medium
Audio Output / Amplifier	No sound output	Implement audio path	105	63	Medium	Low

		diagnostics and fault logging				
Wireless Interfaces	Dropped wireless connections	Improve antenna placement and validate wireless modules	150	90	Low	Low
GNSS Receiver	No GPS fix	Use enhanced GNSS antenna modules; test for positioning robustness	168	126	Medium	Medium
Memory (Flash / RAM)	Data corruption	Use ECC memory; ensure stable power supply	162	72	Medium	Low
USB Interface	No device recognition	Use reinforced ports and increase ESD protection	120	60	Low	Low
Power Supply Unit	Overvoltage output	Add overvoltage protection circuits and monitor outputs	80	20	Low	Low
Cooling Unit	Ineffective cooling	Add thermal alerts; use more robust cooling solutions	135	54	Medium	Low

Microphone Input	No voice input	Use redundant microphone systems; implement diagnostics	120		Low	Low
Antenna System	Signal attenuation due to connector corrosion	Strengthen cable shielding and improve connector design	120		Low	Low
Infotainment OS / Firmware	System crash after boot	Improve firmware validation process and rollback mechanisms	162		Medium	Low
Connectors / Harness Interface	Intermittent power loss	Apply vibration-proof connectors and better mechanical support	160		Medium	Medium

4.3.7 Βήμα 7^ο: Results Documentation

Στο έβδομο και τελευταίο βήμα της DFMEA γίνεται η καταγραφή των αποτελεσμάτων (Results Documentation). Σε αυτό το στάδιο, καταγράφονται οι ενέργειες που ακολουθήθηκαν στα προηγούμενα βήματα, ο σκοπός της ανάλυσης και αναφέρεται ότι η DFMEA έχει αναπτυχθεί λαμβάνοντας υπόψη τα ισχύοντα πρότυπα ISO, IEC, UNECE, RoHS, REACH, GDPR κ.ά. (Table 14).

Table 14. DFMEA Results Documentation.

DFMEA Summary Item	Description
Component Analysis	All critical components of the infotainment system have been individually analyzed.
Failure Mode, Cause, Effect	For each component, one failure mode, one failure cause, and one failure effect were identified. Severity (S), Occurrence (O), Detection (D) and the corresponding RPN and AP values were calculated.
Recommended Actions	All RPN and AP items have dedicated recommended actions to reduce risk.
Prioritization	All identified failure modes were prioritized based on their RPN, AP and Severity ratings. Optimization actions were applied, leading to significant risk mitigation across critical components.
Optimization Actions	Improvements include better cooling design, enhanced connector robustness, watchdog timer implementation, and firmware validation processes.
Compliance	DFMEA aligns with compliance requirements of TPS standards: ISO 7637-2, EN 50498, ISO 26262, ISO 21434, ISO 16750, ISO 14001, IEC 61000 (note: IEC 61000-4-4, 61000-4-5 not applicable for automotive components, applicable only for stations), IEC 62368-1, CISPR 25, UNECE R155/R156, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification, RoHS, REACH, GDPR, WEEE, RTCM SC-104.
Update Process	Document will be periodically updated: (1) Based on validation test results, (2) Following design changes or software/hardware revisions.

4.4. DFMEA fishbone diagram

Μετά την ολοκλήρωση του τελευταίου βήματος της DFMEA, δημιουργείται το διάγραμμα Fishbone όπως φαίνεται στο Figure 2 (Ishikawa method), το οποίο αποτελεί εργαλείο οπτικής απεικόνισης των πιθανών αιτιών που οδηγούν σε μια αστοχία. Το διάγραμμα αυτό στηρίζεται στη φιλοσοφία των **6M (Man, Machine, Material, Method, Measurement, Mother Nature)**, όπου κάθε “οστό” του ψαριού αντιπροσωπεύει μία κατηγορία αιτιών. Με αυτόν τον τρόπο, οι πιθανές αιτίες ομαδοποιούνται διευκολύνοντας τον εντοπισμό των ριζικών αιτιών και την εφαρμογή στοχευμένων διορθωτικών ενεργειών. Με άλλα λόγια, το Fishbone diagram λειτουργεί συμπληρωματικά με την DFMEA, ενισχύοντας τη συνολική ανάλυση ενώ η οπτική του μορφή διευκολύνει τη συγκέντρωση και κατανόηση της πληροφορίας.

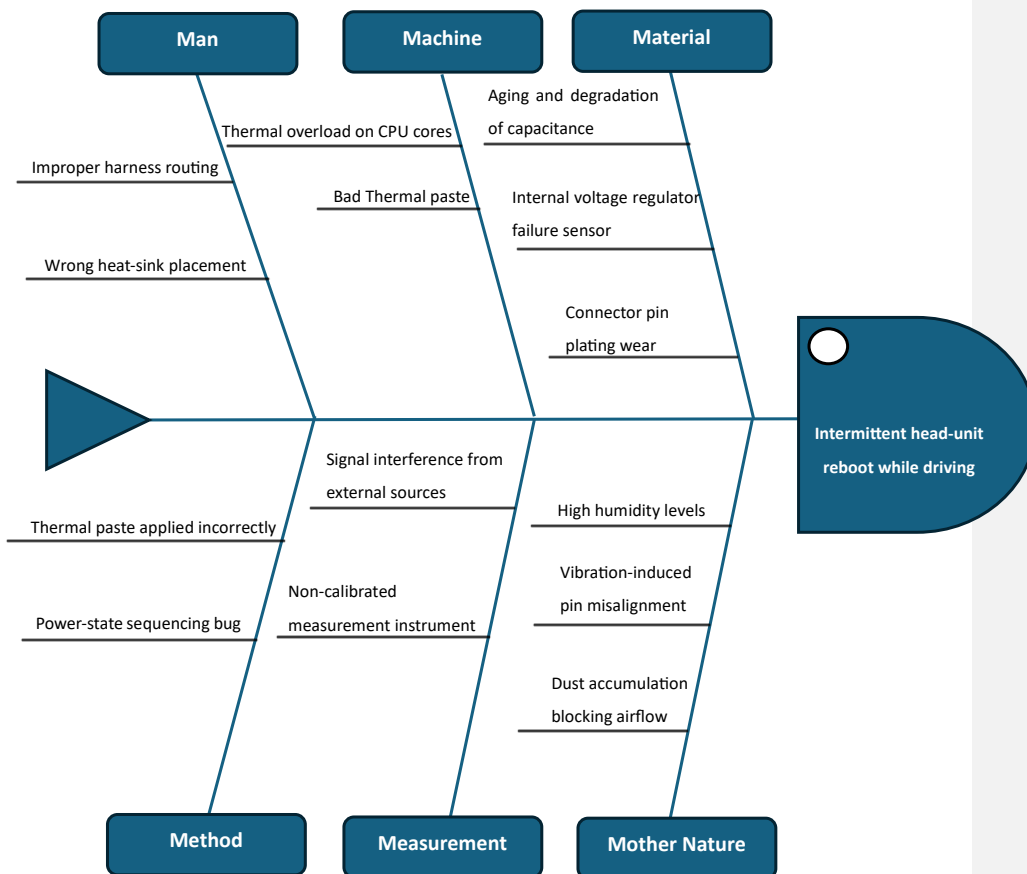


Figure 2. DFMEA fishbone diagram.

4.5. PFMEA

Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση DFMEA, ακολουθεί η PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis), η οποία εστιάζει στον εντοπισμό πιθανών αστοχιών στις διαδικασίες παραγωγής ή λειτουργίας και στην εκτίμηση των επιπτώσεών τους στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η PFMEA εντάσσεται στο πλαίσιο της διαδικασίας PPAP (Production Part Approval Process), η οποία περιλαμβάνει και άλλα κρίσιμα στάδια πρόληψης λαθών στην παραγωγή, όπως η ανάπτυξη του Control Plan. Μέσω της PFMEA, αξιολογούνται οι κρίσιμοι παράγοντες κινδύνου στις παραγωγικές διαδικασίες, εντοπίζονται οι αιτίες και τα αποτελέσματα πιθανών αστοχιών και προτείνονται διορθωτικά ή προληπτικά μέτρα. Η συστηματική εφαρμογή της αποτελεί σήμερα βασικό εργαλείο διαχείρισης κινδύνου, ιδίως σε ιδιαίτερα απαιτητικούς βιομηχανικούς κλάδους, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία [27].

4.5.1 Βήμα 1^ο: Planning and Preparation

Όπως και στη DFMEA, το πρώτο βήμα της ανάλυσης είναι το Planning & Preparation, στο οποίο καταγράφονται αναλυτικά όλες οι διαδικασίες που πρόκειται να εφαρμοστούν στη φάση παραγωγής του συστήματος infotainment. Παράλληλα, συμπληρώθηκε ο πίνακας σχεδιασμού της PFMEA, στον οποίο αποτυπώνονται οι βασικές πληροφορίες της ανάλυσης. Ως προϊόν ανάλυσης ορίστηκε το Car Infotainment System, ενώ ως TPS number καταχωρήθηκε ο αριθμός 255-2352xxxxx. Στο πεδίο της εταιρείας δηλώθηκε η Hellenic Infotainment Systems, με τόπο παραγωγής την Αθήνα. Ως πελάτης καταγράφηκε η Audixx, ενώ στο πεδίο του μοντέλου αναφέρθηκε το Model AA3, χρονολογίας 2025. Στην PFMEA έλαβαν μέρος οι εξής ομάδες: Mechanical Design Team, Electronics Design Team, Software Team, Quality Assurance, καθώς και ο Project Manager, ο οποίος είχε τον συντονιστικό τους ρόλο. Ως πρότυπα συμμόρφωσης καθορίστηκαν όλα τα σχετικά διεθνή πρότυπα που θα χρησιμοποιηθούν τόσο για τον έλεγχο συμμόρφωσης των διαδικασιών όσο και για τις πειραματικές δοκιμές. Τέλος, ως σκοπός της ανάλυσης ορίστηκε η πρόληψη των προβλημάτων ποιότητας και η πρόληψη των αστοχιών κατά τη διαδικασία παραγωγής, με τελικό στόχο την εξασφάλιση αξιοπιστίας και την πλήρη συμμόρφωση του τελικού προϊόντος με τις απαιτήσεις του πελάτη και των διεθνών προτύπων ISO, IEC, UNECE, RoHS, REACH, GDPR κ.ά (

Table 15).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι φάσεις παραγωγής περιλαμβάνουν 12 διαδικασίες:

1. Παραλαβή υλικών
2. Αποθήκευση υλικών
3. Έκδοση εντολής παραγωγής
4. Διαδικασία συλλογής υλικών
5. Μεταφορά υλικών στη γραμμή παραγωγής
6. Συναρμολόγηση κύριας μονάδας
7. Ηλεκτρικός έλεγχος
8. Συναρμολόγηση πλάκας
9. Συναρμολόγηση περιβλήματος
10. Έλεγχος ποιότητας
11. Συσκευασία
12. Αποστολή τελικού προϊόντος

Table 15. PFMEA Planning and Preparation.

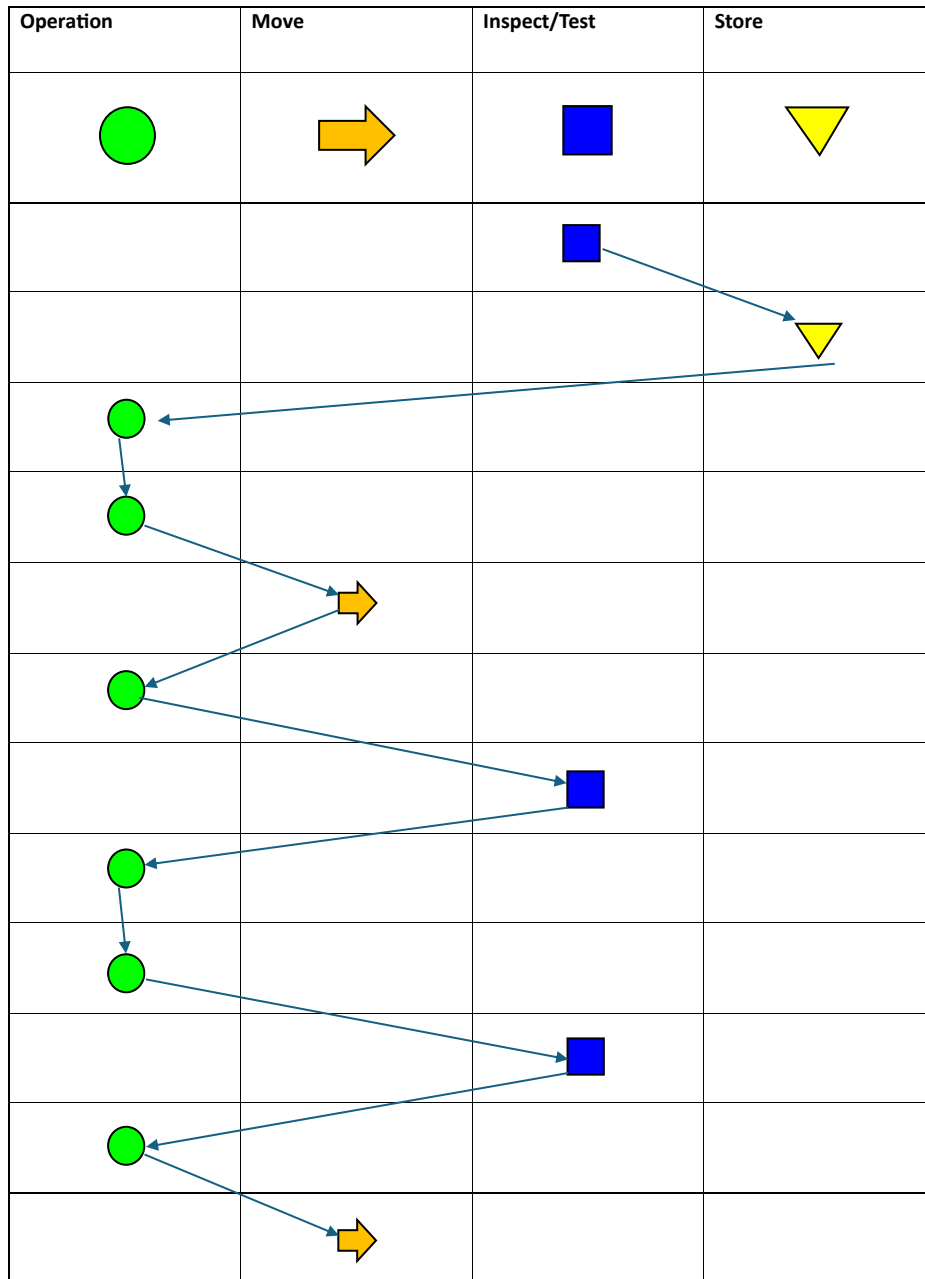
Field	Details
Product under Analysis	Car Infotainment System
TPS Number	255-2352xxxxx
Company	Hellenic Infotainment Systems
Engineering Location	Athens, Greece
Customer	Audixx
Model Year	2025
Program Name	Model AA3
PFMEA Start Date	05/07/2025
PFMEA Revision Date	03/08/2025
PFMEA Teams	Mechanical Design Team, Electronics Design Team, Software Team, Quality Assurance, Project Manager
Applicable Standards	ISO 7637-2, EN 50498, ISO 26262, ISO 21434, ISO 16750, ISO 14001, IEC 61000, IEC 62368-1, CISPR 25, UNECE R155/R156, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification, RoHS, REACH, GDPR, WEEE, RTCM SC-104
Purpose of Analysis	Prevention of quality issues and failures during the production process, aiming to ensure reliability and full compliance of the final product with customer requirements and international standards.

ATTENTION: IEC 61000-4-4, 61000-4-5 NOT applicable for automotive applications, applicable only for stations.

4.5.2 Βήμα 2^ο: Structure Analysis

Το δεύτερο βήμα της PFMEA είναι αυτό της Ανάλυσης Δομής (Structure Analysis). Σε αυτό το στάδιο δημιουργήθηκε το Διάγραμμα Ροής Διαδικασιών (Process Flow Diagram), το οποίο απεικονίζει γραφικά (Table 16) τις δώδεκα επιμέρους διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή του infotainment συστήματος. Κάθε διαδικασία αναπαρίσταται με διακριτό σχήμα, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει. Οι κατηγορίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι: Λειτουργία, Μετακίνηση, Επιθεώρηση/Δοκιμή και Αποθήκευση. Με βάση την κατηγοριοποίηση αυτή, κάθε βήμα τοποθετήθηκε στο διάγραμμα με κατάλληλη γραφική μορφή. Στη συνέχεια, τα βήματα ενώθηκαν μεταξύ τους με κατευθυνόμενα βέλη, ώστε να αποτυπώνεται με ακρίβεια η σειρά εκτέλεσης των διαδικασιών στη γραμμή παραγωγής του infotainment (Table 16).

Table 16. PFMEA Structure Analysis.



4.5.3 Βήμα 3^ο: Function Analysis

Στο τρίτο βήμα της PFMEA εφαρμόζεται η Λειτουργική Ανάλυση (Function Analysis). Σε αυτό το στάδιο, κάθε διαδικασία αναλύεται στα βασικά της στάδια και λειτουργικά χαρακτηριστικά, ώστε να κατανοηθεί πλήρως ο ρόλος της μέσα στην παραγωγή και να εντοπιστούν τα κρίσιμα σημεία της. Η λειτουργική ανάλυση είναι μεγάλης σημασίας για την PFMEA αποτελώντας την βάση για την αναγνώριση πιθανών αποκλίσεων ή αστοχιών στο επόμενο βήμα (Table 17).

Table 17. PFMEA Function Analysis.

OP / Event #	OP / Event Description	Key Product & Process Characteristics	Key Control Characteristics & Methods
1	Material receiving	1. Material identification 2. Packaging integrity 3. Quantity 4. Quality characteristics per Inspection Test Plan	1. P.O (Purchase Order) cross-reference 2. Visual defects through operator control 3. Counting based on P.O (Purchase Order)
2	Material storage	1. Storage location 2. Material integrity 3. Material quantity 4. Storage conditions	1. WMS (Warehouse Management System) processes 2. Product or packaging damage during transportation 3. P.O (Purchase Order) quantity reaches storage location
3	Issue of production order	1. Material type 2. Material quantity 3. Accurate information set on ERP (Enterprise Resource Planning)	Cross-reference with data registered in ERP
4	Material picking process	1. Material type 2. Material quantity	1. Picking list generated from ERP 2. Cross-check with BoM (Bill of Materials) for correct item and quantity
5	Material transfer to production	1. Material type 2. Material quantity 3. Material integrity	1. Receiving material process from Production Leader (Production Order verification) 2. Visual defects through operator control
6	Main Unit Assembly	1. Material appearance 2. Assembly sequence 3. Material fitment 4. Sealing and torque application	1. Visual defects through operator control 2. Cross-reference with assembly drawings and W.I (Work Instruction) 3. M2 torque value: 0.25 Nm

7	Electrical test	Electrical performance characteristics	—
8	Plate assembly	1. Material appearance 2. Assembly sequence 3. Material fitment	1. Visual defects through operator control 2. Cross-reference with assembly drawings and W.I (Work Instruction) 3. Application temperature: min. 18°C; Adhesive curing time: max. 4 min; No openings
9	Enclosure assembly	1. Material appearance 2. Adhesive application 3. Assembly sequence 4. Material fitment 5. Sealing and torque application	1. Visual defects through operator control 2. Mix ratio; Cure time: 24 hours at 23°C 3. Cross-reference with assembly drawings and W.I (Work Instruction) 4. No enclosure deformation (plastic parts)
10	Quality inspection	1. Visual appearance of the product 2. Missing materials 3. Enclosure flatness 4. Fit test 5. Weight evaluation	1. Visual inspection based on drawings requirements 2. BoM (Bill of Materials) & drawing cross-reference 3. No deformation: Lever meter control 4. Multimeter inspection 5. Fitment on base jig (hole pattern check) 6. Weight calculation: < 2 kg
11	Packaging	1. Packaging material selection 2. Product fitment in packaging	1. Correct materials used 2. No movement in packaging enclosure
12	Shipping	1. Delivery date 2. Shipping address	1. Backlog daily review 2. Order confirmation to customer

4.5.4 Βήμα 4^ο: Failure Analysis

Το τέταρτο βήμα της PFMEA είναι γνωστό ως Ανάλυση Αποτυχίας (Failure Analysis). Αξιοποιώντας τις πληροφορίες που προέκυψαν από την Ανάλυση Λειτουργιών (Function Analysis), για κάθε διαδικασία στην ροή παραγωγής του infotainment προσδιορίστηκε:

- ένας πιθανός τρόπος αστοχίας (Failure Mode),
- η αιτία που μπορεί να τον προκαλέσει (Failure Cause), και

- το αποτέλεσμα που επιφέρει η συγκεκριμένη αστοχία στο σύστημα (Failure Effect).

Η ανάλυση αυτή αποτελεί προϋπόθεση για την επόμενη φάση εκτίμησης κινδύνου, καθώς επιτρέπει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κάθε πιθανή αποτυχία μπορεί να επηρεάσει την ομαλή και ποιοτική παραγωγή του προϊόντος (Table 18).

Table 18. PFMEA Failure Analysis.

Process Step	Failure Mode	Failure Effect	Failure Cause
Material receiving	Wrong component received	Assembly failure due to incompatible part	Supplier error during order fulfillment
Material storage	Exposure to humidity	Corrosion on connector terminals	Improper storage conditions
Issue of production order	Incorrect BOM data in production order	Wrong components used during assembly	ERP data entry error
Material picking process	Wrong component picked	Electrical malfunction after assembly	Operator selected wrong part
Material transfer to production	Component damaged during transfer	Production delay due to component rejection	Improper handling during manual transport
Main Unit Assembly	Incorrect positioning/ orientation	Mechanical stress on assembled parts	Assembly performed without following work instructions
Electrical test	Electrical test skipped	Undetected electrical fault	Electrical test step not included in the work instructions
Plate assembly	Insufficient adhesive application	Inadequate component sealing	Adhesive weight not verified before application
Enclosure assembly	Improper adhesive curing	Incomplete curing causes part detachment	Curing time not properly monitored during assembly
Quality inspection	Missed visual defect	Customer receives misaligned product	Operator failed to follow visual inspection checklist
Packaging	Inadequate ESD protection	Damage to sensitive electronic components	ESD-safe tray not properly grounded

Shipping	Wrong address	Delivery to incorrect customer location	Incorrect data entry during shipping label creation.
----------	---------------	---	--

4.5.5 Βήμα 5^ο: Risk Analysis

Το πέμπτο βήμα της ανάλυσης PFMEA είναι η Ανάλυση Κινδύνου (Risk Analysis). Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιεί για την εκτίμηση του κινδύνου δύο δείκτες. Ο πρώτος είναι ο δείκτης προτεραιότητας κινδύνου RPN (Risk Priority Number), ο οποίος υπολογίζεται ως το γινόμενο των τριών παραμέτρων Severity (S), Occurrence (O) και Detection (D), δηλαδή $RPN = S \times O \times D$. Ο δείκτης αυτός παρέχει μια ποσοτική μέτρηση του επιπέδου κινδύνου κάθε Failure Mode. Ο δεύτερος είναι ο δείκτης προτεραιότητας ενεργειών AP (Action Priority), ο οποίος προκύπτει από συγκεκριμένους συνδυασμούς των ίδιων παραμέτρων (S,O,D) και κατηγοριοποιεί κάθε Failure Mode σε επίπεδα προτεραιότητας High, Medium ή Low, δίνοντας αυξημένη βαρύτητα στη σοβαρότητα (S). Ο δείκτης AP εισήχθη με τη μεθοδολογία AIAG-VDA FMEA (2019) για να ξεπεράσει τους περιορισμούς του RPN και να κατευθύνει πιο αξιόπιστα την ιεράρχηση των διορθωτικών ενεργειών.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας υπολογισμού του δείκτη Action Priority (AP), χωρισμένος σε δύο τμήματα για λόγους καλύτερης παρουσίασης των συνδυασμών των παραμέτρων Severity (S), Occurrence (O) και Detection (D).

Table 19. Action Priority part 1.

Effect	S	Prediction of failure cause Occurring	O	Ability to Detect	D	Action Priority (AP)
Product or Plan Effect Very High	9-10	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	H
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	H
		Moderate	5-4	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	M

		Low	3-2	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect High	7- 8	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	H
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	H
				Very High	1	M
		Moderate	4-5	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	M
				Very High	1	M
		Low	2-3	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect Moderate	4-6	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	M
				Very High	1	M
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	M

Table 20. Action Priority part 2.

Effect	S	Prediction of failure cause Occurring	O	Ability to Detect	D	Action Priority (AP)
				Very High	1	L
		Moderate	4-5	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	L

				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Low	2-3	Low-Very Low	7-10	L
				Moderate	5-6	L
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
Product or Plan Effect Low	2-3	Very High	8-10	Low-Very Low	7-10	H
				Moderate	5-6	H
				High	2-4	M
				Very High	1	M
		High	6-7	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	M
				High	2-4	M
				Very High	1	L
		Moderate	4-5	Low-Very Low	7-10	M
				Moderate	5-6	L
				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Low	2-3	Low-Very Low	7-10	L
				Moderate	5-6	L

				High	2-4	L
				Very High	1	L
		Very Low	1	Very High - Very Low	1-10	L
No Discernible Effect	1	Very Low	1-10	Very High - Very Low	1-10	L

Στο συγκεκριμένο βήμα δημιουργήθηκαν δύο πίνακες. Ο πρώτος είναι αντίστοιχος με αυτόν της Failure Analysis, με την προσθήκη των στηλών “Current Controls-Prevention” και “Current Controls-Detection”, ώστε να καταγραφούν τα μέτρα που εφαρμόζονται ήδη για την πρόληψη και την ανίχνευση πιθανών αποτυχιών και να καταστεί δυνατός στη συνέχεια ο υπολογισμός των δεικτών Severity (S), Occurrence (O) και Detection (D) (Table 21). Ο δεύτερος πίνακας συγκεντρώνει τις τιμές των δεικτών αυτών, το γινόμενο τους (RPN) καθώς και τον δείκτη (AP), επιτρέποντας την αξιολόγηση και την ιεράρχηση των κινδύνων (Table 22).

Table 21. PFMEA Risk Analysis.

Process Step	Failure Mode	Failure Effect	Failure Cause	Current Controls – Prevention	Current Controls – Detection
Material receiving	Wrong component received	Assembly failure due to incompatible part	Supplier error during order fulfillment	P.O and part-number cross-check during reception	Visual check & BOM matching in ERP
Material storage	Exposure to humidity	Corrosion on connector terminals	Improper storage conditions	Storage in climate-controlled, humidity-	Humidity sensor triggers alert

				monitored area	
Issue production order	Incorrect BOM data	Wrong components used during assembly	ERP data entry error	Automated BOM upload from verified engineering source	System cross-check with master BOM before release
Material picking process	Wrong component picked	Electrical malfunction after assembly	Operator selected wrong part	Automated picking with barcode validation	Barcode scanning at assembly station with ERP match check
Material transfer to production	Component damaged during transfer	Production delay due to rejection	Improper handling during manual transport	Use of ESD-safe & shock-absorbing trays	Visual inspection at workstation
Main Unit Assembly	Incorrect positioning/or ientation	Mechanical stress on assembled parts	Assembly without following work instructions	Clear assembly Work Instructions (W.I) with visuals	Visual inspection before final assembly
Electrical test	Electrical test skipped	Undetected electrical fault	Test step missing from work instructions	Physical lockout mechanism until test is completed	Daily test result review by Quality Engineer

Plate assembly	Insufficient adhesive application	Inadequate component sealing	Adhesive weight not verified	Adhesive applied using calibrated automatic dispenser	Weighing adhesive-applied part before curing
Enclosure assembly	Improper adhesive curing	Part detachment due to incomplete curing	Curing time not properly monitored	Use of controlled curing environment	Curing timer with alert for incomplete cycles
Quality inspection	Missed visual defect	Customer receives misaligned product	Operator skipped checklist	Standardized visual inspection checklist	Secondary inspection by Quality Engineer

Table 22. PFMEA Risk Analysis with RPN & AP.

Process Step	Failure Mode	S	O	D	RPN (S×O×D)	AP
Material receiving	Wrong component received	8	4	4	128	Medium
Material storage	Exposure to humidity	7	3	4	84	Low
Issue production order	Incorrect BOM data in production order	8	4	3	96	Medium
Material picking process	Wrong component picked	9	3	4	108	Low
Material transfer to production	Component damaged during transfer	8	4	4	128	Medium
Main Unit Assembly	Incorrect positioning/orientation	9	5	3	135	High

Electrical test	Electrical test skipped	9	3	4	108	Low
Plate assembly	Insufficient adhesive application	8	4	4	128	Medium
Enclosure assembly	Improper adhesive curing	9	4	4	144	High
Quality inspection	Missed visual defect	10	3	3	90	Low
Packaging	Inadequate ESD protection	8	3	4	96	Low
Shipping	Wrong address	7	4	4	112	Medium

4.5.6 Βήμα 6^ο: Optimization

Το έκτο βήμα της ανάλυσης PFMEA είναι η Βελτιστοποίηση (Optimization) όπου για κάθε αναγνωρισμένο τρόπο αστοχίας προτείνονται συγκεκριμένες διορθωτικές ενέργειες (Recommended Actions) με στόχο τη μείωση των δεικτών προτεραιότητας κινδύνου (RPN) και (AP). Παράλληλα, καταγράφονται οι ομάδες που είναι υπεύθυνες για την υλοποίηση κάθε ενέργειας καθώς και οι αντίστοιχες ημερομηνίες ολοκλήρωσης. Οι ενέργειες αυτές συγκεντρώνονται σε έναν πίνακα και μπορεί να περιλαμβάνουν βελτιώσεις στις διαδικασίες παραγωγής, εφαρμογή διαγνωστικών μηχανισμών ή άλλες τεχνικές παρεμβάσεις που μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης ή αυξάνουν την ικανότητα έγκαιρης ανίχνευσης των αστοχιών. Όταν μια ενέργεια ολοκληρώνεται, σημειώνεται η ένδειξη *Closed* στη στήλη Status, τεκμηριώνοντας ότι η διαδικασία έχει κλείσει επιτυχώς (Table 23). Μετά την ολοκλήρωση των ενεργειών αυτών, πραγματοποιείται επανεκτίμηση των ειδικών παραμέτρων O και D ενώ η τιμή του S παραμένει σταθερή, καθώς η σοβαρότητα της επίπτωσης δεν αλλάζει από τις διορθωτικές παρεμβάσεις. Έτσι, συντάσσεται ένας δεύτερος πίνακας με τις αναθεωρημένες τιμές O και D και υπολογίζονται τα νέα RPN και AP για κάθε διαδικασία. Οι νέες τιμές του δείκτη πρέπει να είναι χαμηλότερες ή ίσες με τις αρχικές, αποδεικνύοντας τη θετική επίδραση των ενεργειών στη μείωση του κινδύνου (Table 24). Τέλος, παρουσιάζεται και ένας τρίτος πίνακας στον οποίο γίνεται σύγκριση των παλιών τιμών RPN και AP με τις καινούριες (Table 25).

Table 23. PFMEA Expected RPN & AP Reduction.

Process Step	Failure Mode	Recommended Action	Responsibility & Target Completion Date	Status	Expected RPN & AP Reduction
Material receiving	Wrong component received	Install barcode scanning station to verify part numbers upon arrival	Incoming Quality Control (IQC) department – 31/07/2025	Closed	✓
Material storage	Exposure to humidity	Assign supervisor to review humidity logs and preventive actions	Warehouse Manager – 18/07/2025	Closed	✓
Issue production order	Incorrect BOM data in production	Require engineering approval before BOM release	ERP Department – 25/07/2025	Closed	✓

Material picking process	Wrong component picked	Require double barcode scan confirmation by two operators	Production Supervisor – 29/07/2025	Closed	✓
Material transfer to production	Component damaged during transfer	Introduce mandatory ESD and handling training	Production Supervisor – 22/07/2025	Closed	✓
Main Unit Assembly	Incorrect positioning /orientation	Implement Poka-Yoke alignment features in design	Process Engineering – 29/07/2025	Closed	✓
Electrical test	Electrical test skipped	Introduce mandatory checklist sign-off after electrical test	Quality Assurance – 24/07/2025	Closed	✓
Plate assembly	Insufficient adhesive application	Introduce real-time adhesive flow monitoring with alarm	Process Engineering – 29/07/2025	Closed	✓
Enclosure assembly	Improper adhesive curing	Introduce color-change adhesive for visual curing confirmation	Process Engineering – 25/07/2025	Closed	✓
Quality inspection	Missed visual defect	Implement camera-based visual inspection system	Quality Assurance – 30/07/2025	Closed	✓
Packaging	Inadequate ESD protection	Introduce automated grounding verification sensor	Quality Assurance – 28/07/2025	Closed	✓
Shipping	Wrong address	Implement automated shipping label generation from ERP system	Shipping & Logistics – 26/07/2025	Closed	✓

Table 24. PFMEA Optimization.

Process Step	Failure Mode	Recommended Action	S	New O	New D	New RPN	New AP
Material receiving	Wrong component received	Install barcode scanning station to verify part numbers upon arrival	8	2	2	32	Low
Material storage	Exposure to humidity	Assign supervisor to review humidity logs and preventive actions	7	2	2	28	Low
Issue production order	Incorrect BOM data in production	Require engineering approval before BOM release	8	2	2	32	Low
Material picking process	Wrong component picked	Require double barcode scan confirmation by two operators	9	3	2	54	Low
Material transfer to production	Component damaged during transfer	Introduce mandatory ESD and handling training	8	2	2	32	Low
Main Unit Assembly	Incorrect positioning/orientation	Implement Poka-Yoke alignment features in design	9	2	2	36	Low
Electrical test	Electrical test skipped	Introduce mandatory checklist sign-off after electrical test	9	2	2	36	Low
Plate assembly	Insufficient adhesive application	Introduce real-time adhesive flow monitoring with alarm	8	2	2	32	Low

Enclosure assembly	Improper adhesive curing	Introduce color-change adhesive for visual curing confirmation	9	2	2	36	Low
Quality inspection	Missed visual defect	Implement camera-based visual inspection system	10	2	2	40	Low
Packaging	Inadequate ESD protection	Introduce automated grounding verification sensor	8	2	2	32	Low
Shipping	Wrong address	Implement automated shipping label generation from ERP system	7	2	2	28	Low

Table 25. PFMEA RPN & AP Before and After Recommended Actions.

Process Step	Failure Mode	Recommended Action	Old RPN	New RPN	Old AP	New AP
Material receiving	Wrong component received	Install barcode scanning station to verify part numbers upon arrival	128	32	Medium	Low
Material storage	Exposure to humidity	Assign supervisor to review humidity logs and preventive actions	84	28	Low	Low
Issue production order	Incorrect BOM data in production	Require engineering approval before BOM release	96	32	Medium	Low
Material picking process	Wrong component picked	Require double barcode scan confirmation by two operators	108	54	Low	Low

Material transfer to production	Component damaged during transfer	Introduce mandatory ESD and handling training	128	32	Medium	Low
Main Unit Assembly	Incorrect positioning/orientation	Implement Poka-Yoke alignment features in design	135	36	High	Low
Electrical test	Electrical test skipped	Introduce mandatory checklist sign-off after electrical test	108	36	Low	Low
Plate assembly	Insufficient adhesive application	Introduce real-time adhesive flow monitoring with alarm	128	32	Medium	Low
Enclosure assembly	Improper adhesive curing	Introduce color-change adhesive for visual curing confirmation	144	36	High	Low
Quality inspection	Missed visual defect	Implement camera-based visual inspection system	90	40	Low	Low
Packaging	Inadequate ESD protection	Introduce automated grounding verification sensor	96	32	Low	Low
Shipping	Wrong address	Implement automated shipping label generation from ERP system	112	28	Medium	Low

4.5.7 Βήμα 7^ο: Results Documentation

Το έβδομο και τελευταίο βήμα της PFMEA είναι η Καταγραφή Αποτελεσμάτων (Results Documentation). Σε αυτό το στάδιο καταγράφονται συνοπτικά οι ενέργειες που εφαρμόστηκαν σε

όλα τα προηγούμενα βήματα, καθώς και ο σκοπός της ανάλυσης. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ότι η PFMEA ευθυγραμμίζεται πλήρως με τα ισχύοντα πρότυπα (Table 26).

Table 26. PFMEA Results Documentation.

PFMEA Summary Item	Description
Process Analysis	All critical production processes of the infotainment system were individually analyzed.
Failure Mode, Cause, Effect	For each process step, one failure mode, one failure cause, and one failure effect were identified. Severity (S), Occurrence (O), Detection (D) and the corresponding RPN and AP values were calculated.
Current Controls – Prevention & Detection	Existing preventive and detection measures were recorded for each failure mode, ensuring that process risks are systematically monitored and controlled before optimization actions are applied.
Recommended Actions	Dedicated recommended actions were defined for all failure modes with calculated RPN and AP values, aiming at risk reduction and improved process robustness.
Prioritization	Failure modes were prioritized based on RPN, AP, and Severity ratings. Improvement actions were implemented with focus on the most critical process steps.
Optimization Actions	Implemented improvements include barcode scanning verification, daily humidity log review, ESD training, Poka-Yoke alignment features, camera-based inspection systems, adhesive flow monitoring, and ERP-based automated shipping labels.
Compliance	PFMEA fully aligns with the compliance requirements of the TPS and international standards: ISO 7637-2, EN 50498, ISO 26262, ISO 21434, ISO 16750, ISO 14001, IEC 61000, IEC 62368-1, CISPR 25, UNECE R155/R156, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification, RoHS, REACH, GDPR, WEEE, RTCM SC-104.
Update Process	This document will be periodically updated: (1) Based on validation test results, (2) Following design, software, or hardware revisions.

4.6. PFMEA fishbone diagram

Όπως και στην DFMEA, έτσι και μετά την ολοκλήρωση των βημάτων της PFMEA, αξιοποιείται το διάγραμμα Fishbone (Ishikawa method) για την οπτική αποτύπωση των πιθανών αιτιών αστοχίας. Βασισμένο στη φιλοσοφία των 6M, το διάγραμμα αυτό οργανώνει συστηματικά τις αιτίες που

σχετίζονται με τη διαδικασία παραγωγής, διευκολύνοντας τον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων και την κατανόηση της πληροφορίας μέσα από τη γραφική του μορφή.

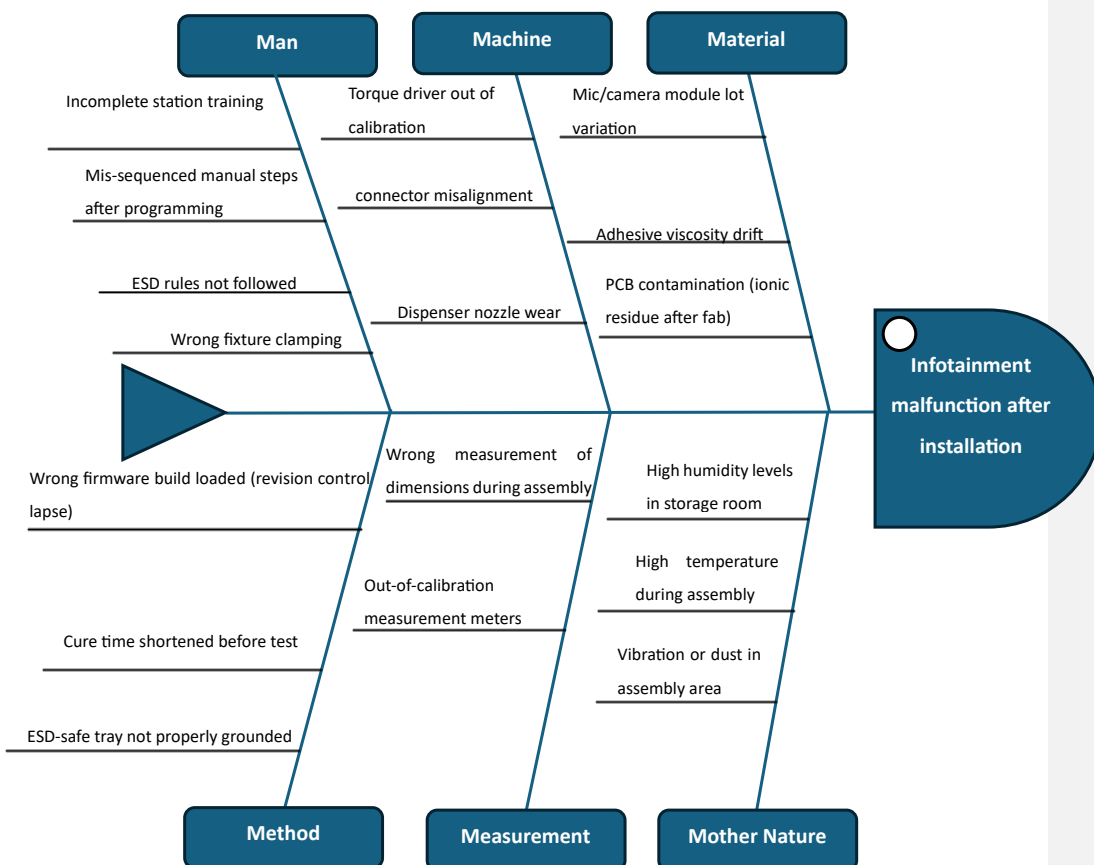


Figure 3. PFMEA fishbone diagram.

4.7. CONTROL PLAN

Μετά την ολοκλήρωση της PFMEA, ακολούθησε η ανάπτυξη του Control Plan, στο οποίο αναλύονται και καταγράφονται με λεπτομέρεια οι διαδικασίες ελέγχου και πρόληψης που προέκυψαν ως Recommended Actions από την PFMEA. Με απλά λόγια, η PFMEA καθορίζει «τι μπορεί να πάει στραβά και τι πρέπει να γίνει», ενώ το Control Plan περιγράφει «πώς θα το υλοποιήσουμε στην πράξη, ποιοι είναι υπεύθυνοι για κάθε ενέργεια, ποια βήματα θα ακολουθούνται, καθώς και πότε και με ποιον τρόπο θα πρέπει να αντιδρούμε σε περίπτωση αστοχίας». Όλες αυτές οι πληροφορίες

συγκεντρώνονται σε έναν ενιαίο πίνακα Control Plan, όπου σε κάθε γραμμή αναλύεται μία από τις δώδεκα παραγωγικές διαδικασίες που έχουν καθοριστεί στο πρώτο βήμα της PFMEA. Η δομή του πίνακα ακολουθεί συγκεκριμένες στήλες, καθεμία από τις οποίες περιέχει κρίσιμες πληροφορίες:

- **Process Step / Description:** Καταγράφεται η ονομασία και η περιγραφή της διαδικασίας. Εδώ τοποθετούνται διαδοχικά οι δώδεκα παραγωγικές διαδικασίες.
- **Tools / Equipment:** Περιλαμβάνει τον εξοπλισμό και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την πρόληψη αστοχιών και είτε προϋπήρχαν είτε προτάθηκαν στην PFMEA.
- **Product Characteristics:** Αναλύονται τα κύρια χαρακτηριστικά των προϊόντων σε κάθε στάδιο της παραγωγής.
- **Process Characteristics:** Αναλύονται οι κρίσιμες παράμετροι των διαδικασιών, περιγράφοντας τα σημαντικότερα βήματα που τις απαρτίζουν.
- **Special Characteristic Class:** Δηλώνεται εάν η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως Special (SC) ή Critical (CC), σύμφωνα με τα κριτήρια της ανάλυσης.
- **Control Method:** Παρέχεται συνοπτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο θα γίνεται ο έλεγχος και η πρόληψη των αστοχιών.
- **Sample Size:** Καθορίζει το ποσοστό της παραγωγής που θα ελέγχεται για την ανίχνευση λαθών.
- **Sample Frequency:** Ορίζει τη συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιείται ο έλεγχος.
- **Control Technique:** Παρουσιάζει την αρίθμηση των σταδίων ελέγχου και εποπτείας μέσα στη διαδικασία παραγωγής.
- **Reaction Plan:** Περιγράφει τις ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν σε περίπτωση εμφάνισης αστοχίας, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή της και να αποτραπεί η επανάληψή της.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το Control Plan χωρίστηκε, όπως φαίνεται παρακάτω, σε δύο διαδοχικούς πίνακες (Table 27 και Table 28) για λόγους σαφήνειας και ευκολίας παρουσίασης. Ο πρώτος πίνακας περιγράφει τα βασικά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας (Process Name / Description), τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό (Tools / Equipment), τα χαρακτηριστικά προϊόντος (Product Characteristics), τα χαρακτηριστικά διαδικασίας (Process Characteristics) και την κατηγορία χαρακτηριστικών (Special Characteristic Class – SC/CC). Ο δεύτερος πίνακας περιλαμβάνει τις μεθόδους ελέγχου (Control Method), το μέγεθος δείγματος (Sample Size), τη συχνότητα ελέγχου (Sample Frequency), τις τεχνικές ελέγχου (Control Technique) και το αντίστοιχο σχέδιο αντίδρασης (Reaction Plan) σε περίπτωση που υπάρξουν απρόοπτα ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Table 27. Control Plan part 1.

Process Step / Description	Tools / Equipment	Product Characteristics	Process Characteristics	Special Char. Class.
Material receiving	ERP system, barcode scanner, visual inspection	1. Material identification (type, grade, etc.) 2. Packaging integrity (damages, seals, etc.) 3. Weight and dimension check (based on P.O)	1. ERP verification (cross-checking against purchase order) 2. Visual inspection (damages, quality)	SC
Material storage	Climate-controlled storage room, humidity sensors, data logger	1. Material integrity (no damage) 2. Material quantity (based on order)	1. Storage location (correct rack, correct area) 2. Humidity control (sensor readings, proper levels) 3. Temperature monitoring (for materials sensitive to temperature)	SC
Issue of production order	ERP system, master BOM database	1. Material type (material required for production) 2. Material quantity (according to production requirement)	1. BOM accuracy (correct bill of materials, with parts specified for each assembly) 2. Data entry accuracy (proper entry of order data in ERP)	SC
Material picking process	Barcode scanner	1. Material type (material required for production) 2. Material quantity (according to production requirement)	1. Barcode validation (correct part number) 2. Picking list accuracy (items matched with P.O)	SC

Material transfer to production	ESD-safe trays, shock-absorbing transport containers	1. Material integrity (no damage) 2. Material quantity (according to picking list)	1. ESD-safe handling (ensure no static electricity damage)	SC
Main Unit Assembly	Assembly tools, Visual aids, Poka-Yoke alignment features	1. Material appearance (finish, color, visual defects)	1. Assembly sequence (correct order of components) 2. Material fitment (components fit together correctly) 3. Work instructions (W.I.) (clear assembly steps) 4. Torque application (specific torque for assembly)	SC
Electrical test	Test bench, multimeter, test checklist, test review form, lockout mechanism	1. Electrical performance characteristics (voltage, resistance, continuity)	1. Testing parameters (correct test settings, safety) 2. Test procedure (steps and checklist for the electrical test)	CC
Plate assembly	Automatic dispenser (calibrated), weighing scale, adhesive monitoring system	1. Material appearance (visual defects)	1. Assembly height (correct stacking/fitment) 2. Adhesive application (correct adhesive type and amount) 3. Curing time (adhesive curing duration)	SC
Enclosure assembly	Curing chamber, curing timer, color-change adhesive	1. Material appearance (finish, color, visual defects)	1. Sealing (proper sealing without gaps or cracks) 2. Material fitment (correct alignment of components) 3. Curing time & temperature (proper curing duration and environment) 4. Visual confirmation of curing via color-change adhesive	CC

Quality inspection	Visual inspection checklist, camera-based inspection system	1. Material appearance (no visible defects, scratches, etc.) 2. Missing materials (correct number of components) 3. Weight evaluation 4. Enclosure flatness	1. Fit test (proper fit of parts)	SC
Packaging	ESD-safe tray, grounding wrist straps, grounding verification sensor	1. Material integrity (no damage) 2. Material quantity (according to picking list)	1. Packaging material selection (correct material for packaging) 2. Product fitment in packaging (correct placement) 3. ESD protection (ensure no electrostatic damage) 4. Proper sealing & protection (adequate protection during transit)	CC
Shipping	ERP shipping module, label printer, shipping checklist	1. Delivery date (accurate shipping date) 2. Shipping address (correct destination)	1. Shipping label accuracy (label matches the order) 2. Shipping data verification (cross-checking shipping info)	SC

Table 28. Control Plan part 2

Process Step / Description	Control Method	Sample Size	Sample Freq.	Control Technique	Reaction Plan
Material receiving	100% inspection using barcode scanning and ERP verification	100%	Each P.O. (Purchase Order)	1. Visual inspection of incoming items 2. Barcode scanning of part numbers 3. Cross-check with ERP-registered P.O. and BOM data	Quarantine non-conforming items, notify IQC, inform supplier for

Με σχόλια [GP1]: Έχεις πει τι είναι το P.O.?

	against P.O. and BOM				corrective action
Material storage	Daily monitoring of storage humidity levels via sensor log review	100%	Daily	1. Humidity sensor logging 2. Daily review by warehouse supervisor	Alert maintenance team, relocate affected materials, inform Quality Department for evaluation
Issue of production order	System cross-check of BOM data before order release	100%	Each P.L. (Picking List)	1. ERP system validation of BOM accuracy 2. Engineering approval of BOM	Block release of production order, notify Engineering and ERP Admin for correction
Material picking process	100% barcode scan verification at picking and assembly station	100%	Each P.L.	1. Barcode scan at picking 2. Barcode scan at assembly station confirmed by two operators	Stop assembly, isolate incorrect part, notify supervisor, re-pick correct part

Material transfer to production	Visual inspection at workstation upon receipt	100%	Each P.L.	1. Visual check for damage 2. Confirmation of proper ESD-safe handling procedure 3. Operators trained on ESD & handling (recorded in training matrix)	Isolate damaged parts, report to Production Supervisor, investigate cause, retrain if necessary
Main Unit Assembly	Visual inspection before final assembly	100%	Each unit	1. Based on W.I. at workstation 2. Visual check of orientation 3. Use of Poka-Yoke to enforce correct alignment	Isolate non-conforming unit, notify supervisor, retrain operator if repeated
Electrical test	Physical interlock to prevent continuation without test completion, with mandatory checklist and daily review form	100%	Each unit	1. Operator performs functional test 2. Lockout prevents process continuation if test not done 3. Checklist signed by operator and reviewed by QA daily	Stop unit if test fails or skipped, isolate item, notify Quality Assurance, investigate cause
Plate assembly	Automatic dispenser,p	100%	Each unit	1. Use of calibrated automatic adhesive dispenser (daily	Stop process,

	re-curing weighing of adhesive-applied parts, real-time flow monitoring with alarm			calibration log) 2. Pre-curing weighing of adhesive-applied parts 3. Real-time flow rate monitoring with alarm for under-application	isolate unit, investigate dispensing system, notify Process Engineering
Enclosure assembly	Use of controlled curing chamber, automated curing timer and color-change adhesive	100%	Each unit	1. Curing under controlled temperature and humidity 2. Automated curing timer with audible/visual alert for incomplete cycles 3. Visual confirmation of curing via color-change adhesive	Stop process for any uncured unit, isolate affected unit, notify supervisor, inspect adhesive type and curing settings
Quality inspection	Use of checklist by operator and camera-based system for alignment verification	100%	Each unit	1. Visual inspection by operator using standardized checklist 2. Secondary review by Quality Engineer 3. Camera-based alignment verification system	Stop shipment, isolate defective unit, notify Quality Assurance, investigate operator error and retrain if needed

Packaging	Use of ESD-safe tray, operator grounding via wrist strap, automated grounding verification sensor before tray usage	100%	Each delivery	1. Ensure operator wears grounding wrist strap 2. Perform periodic ESD effectiveness test (e.g., wrist strap, tray, workstation) 3. Verify grounding of tray using sensor	Stop packaging, replace tray or correct ground, retest system, log failure and inform Quality Assurance
Shipping	Shipping labels generated automatically from ERP system, auto ERP validation and final visual confirmation of shipping data before dispatch	100%	Each delivery	1. Automatic address generation from ERP 2. Validation of shipping data (customer, order, destination) 3. Final manual confirmation of printed label against ERP before shipment	Stop shipment, correct label in ERP, reprint, notify shipping supervisor and log event

4.8. CONTROL PLAN CC-SC

Ο τελικός πίνακας Control Plan συνοδεύεται από έναν συμπληρωματικό πίνακα με τίτλο Control Plan CC-SC, ο οποίος εστιάζει αποκλειστικά στις διαδικασίες που έχουν χαρακτηριστεί ως Special (SC) ή Critical (CC). Η δομή του περιλαμβάνει τις εξής στήλες:

- **Description:** Καταγράφεται η ονομασία και η συνοπτική περιγραφή του failure mode κάθε διαδικασίας.
- **Specification:** Παρατίθενται οι προδιαγραφές πρόληψης σφαλμάτων για κάθε διαδικασία, συνοδευόμενες από αριθμητικά δεδομένα, όρια και τεχνικές απαιτήσεις.
- **Tolerance:** Ορίζεται το αποδεκτό εύρος απόκλισης από τις τιμές της στήλης Specification, εντός του οποίου η διαδικασία θεωρείται συμμορφούμενη χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η παραγωγή.
- **Class:** Δηλώνεται αν η διαδικασία ανήκει στην κατηγορία Special (SC) ή Critical (CC), βάσει της ταξινόμησης που έχει προκύψει από την PFMEA.

Ο ειδικός πίνακας Control Plan CC-SC λειτουργεί ως ένα στοχευμένο και χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης και ελέγχου, επιτρέποντας στους υπεύθυνους ποιότητας να επικεντρωθούν στα πιο κρίσιμα στάδια της παραγωγής, όπου οι πιθανές αστοχίες θα είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό προϊόν (Table 29).

Table 29. Control Plan CC-SC.

Description	Specification	Tolerance	Class
Wrong component received	Correct component according to P.O.	–	SC
Exposure to humidity	Humidity levels < 30%	±5% humidity level	SC
Incorrect BOM data in production order	Correct Bill of Materials (BOM)	–	SC
Wrong component picked	Correct component as per the Picking List (P.L.)	–	SC
Component damaged during transfer	Vibration frequency ≤ 5 Hz and acceleration ≤ 0.1 g	±0.5 Hz vibration tolerance, ±0.02 g acceleration	SC
Incorrect positioning/orientation	Correct part positioning and orientation per assembly guidelines	–	SC
Electrical test skipped	Completion of functional electrical test	–	CC
Insufficient adhesive application	Adequate adhesive coverage for sealing	±2% adhesive coverage	SC
Improper adhesive curing	Curing time: 4 minutes at 80°C	Time: ±10%, Temperature: ±5°C	CC
Missed visual defect	No visible defects (scratches, dents, etc.)	–	SC
Inadequate ESD protection	Ensure ESD protection for all components	±1 kV on voltage	CC
Wrong address	Correct shipping address per customer order	–	SC

4.9. TPS

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω αναλύσεων, ακολουθεί η συμπλήρωση της αναφοράς TPS (Technical Product Specification), στην οποία καταγράφονται όλες οι απαιτήσεις που έχουν οριστεί τόσο από την εταιρεία μας όσο και από τον πελάτη και αφορούν το in-vehicle infotainment system. Για κάθε απαίτηση, στις στήλες Compliance και Acceptance σημειώνεται «OK» εφόσον διαπιστώνεται

συμμόρφωση με τα αντίστοιχα πρότυπα. Στην τελευταία στήλη της αναφοράς περιγράφονται συνοπτικά οι δοκιμές και οι διαδικασίες επαλήθευσης που πραγματοποιήθηκαν, βάσει των οποίων τεκμηριώνεται η συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές (όπως φαίνεται στο Table 30).

Table 30. Technical Product Specification.

Chapter	Compliance	Acceptance	Vapostolakis Comments	Further Comments
Lifetime	OK	OK	Complies with ISO 16750	Lifetime testing is defined in the general test plan requirements of ISO 16750-1. According to Clause 7.3, a life test must be specifically defined for the product and included in the test sequence. An example life test setup is provided in Annex B, which includes both functional and environmental loads that simulate real-world conditions. These tests are designed to identify potential design weaknesses and validate product reliability.
Insulate exposed terminal connection	OK	OK	Complies with IEC 62368-1	Terminal insulation verified through electric strength testing in accordance with IEC 62368-1 (Clause 5.4.9.1). Standardized voltage levels were applied based on insulation type and working conditions to ensure user

				protection against electric shock.
Markings	OK	OK	Complies with IEC 62368-1, RoHS, WEEE	Product markings comply with the requirements of IEC 62368-1 regarding safety labels and hazard warnings. Environmental compliance markings, including recycling and substance restrictions, follow the provisions of the RoHS Directive 2011/65/EU (Annex II, Article 4) and the WEEE Directive 2012/19/EU (Article 14), ensuring visibility and traceability for safe use and end-of-life handling.
Protection	OK	OK	Complies with IEC 62368-1	Protective measures against electric shock and overvoltage conditions were verified in compliance with IEC 62368-1 (Clauses 5.4-5.6), addressing solid insulation, creepage distances, and leakage current limits.
Electrical Requirements	OK	OK	Complies with IEC 62368-1, ISO 7637-2, EN 50498, ISO 16750	Electrical requirements were validated in compliance with ISO 7637-2 for voltage transient emissions (Section 4.3) and immunity to fast transients (Section 4.4). EN

				<p>50498 ensures the DUT's compatibility with electromagnetic interference (EMI) in automotive environments. Electrical safety was verified in accordance with IEC 62368-1 (Clause 5 and Annex F), which addresses safeguards against hazardous electrical energy. Automotive-specific electrical robustness was tested following ISO 16750-2:2023, including transient overvoltage (Clause 4.3.2), power supply interruptions (Clause 4.6), and reverse voltage conditions (Clause 4.7).</p>
EMC - Safety	OK	OK	Complies with ISO 7637-2, EN 50498, CISPR 25	<p>The EMC safety was validated in compliance with ISO 7637-2 (Sections 4.3 and 4.4), ensuring the device's immunity to voltage transient emissions and fast transients in automotive environments. Additionally, the DUT complies with EN 50498 (aftermarket EMC standard), which ensures compatibility with electromagnetic</p>

				interference (EMI) in automotive systems. The DUT was also tested for electromagnetic emissions in accordance with CISPR 25, which specifies the limits and testing methods for electromagnetic emissions from automotive equipment. All tests confirmed the DUT's compliance with the relevant EMC safety standards.
EMC - Reliability	OK	OK	Complies with ISO 7637-2, EN 50498, ISO 26262 (Part 4–6)	The EMC reliability of the DUT was validated in compliance with ISO 7637-2 (Sections 4.3 and 4.4), ensuring its resilience to voltage transient emissions and fast transients in automotive environments. Additionally, the DUT complies with EN 50498, confirming its compatibility with electromagnetic interference (EMI) in electronic systems in automotive aftermarket applications. Reliability testing followed ISO 26262 methodology (Parts 4–6), applying safety analysis and

				failure mode evaluation to guarantee system integrity under electromagnetic stress conditions. These results confirm alignment with UNECE Regulation R10.
Static hazard	OK	OK	Complies with IEC 61000-4-2 (ESD)	Static hazard protection was evaluated according to IEC 61000-4-2 (Clauses 6–9), which defines test setups, discharge methods (contact and air), and acceptance criteria for electrostatic discharge immunity. The system demonstrated no malfunction or damage during ESD exposure, ensuring compliance with automotive static safety standards. These results confirm alignment with UNECE Regulation R10.
Electrical Fast Transients-Resistance	OK	OK	Complies with ISO 7637-2, EN 50498	The Electrical Fast Transients (EFT) test was conducted according to ISO 7637-2 (Sections 4.3 and 4.4), evaluating both the emissions and immunity of the DUT to fast transients caused by switching events in automotive power systems. A standardized pulse generator was used

				for transient simulation, and the DUT's performance was monitored under various conditions. The test confirmed compliance with ISO 7637-2 and EN 50498, ensuring the DUT's immunity to fast transients.
Interface Requirements	OK	OK	Complies with ISO 21434, UNECE R155, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance Standards, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification	Cybersecurity measures and data interfaces comply with ISO 21434 (Clauses 5 and 9) and UNECE R155. Secure communication protocols, authentication layers and threat detection were validated for automotive systems. Wireless and infotainment interface compliance validated against Bluetooth SIG and Wi-Fi Alliance standards. System also meets Apple CarPlay and Android Auto interoperability certification requirements.
Reliability and Robustness	OK	OK	Complies with ISO 26262, ISO 7637-2, EN 50498	Reliability and robustness were validated according to ISO 26262-4 (Clause 6) and ISO 26262-6 (Clause 5), ensuring safe operation under fault conditions at both system and software levels. Electrical disturbance

				tolerance was confirmed through ISO 7637-2 (Sections 4.3 and 4.4), demonstrating its resilience to voltage transient emissions and fast transients in automotive environments. Additionally, the DUT meets the requirements of EN 50498, ensuring electromagnetic compatibility (EMC) and its ability to operate reliably in the presence of such disturbances.
Material Requirements	OK	OK	Complies with ISO_14001, REACH, RoHS Directive	All components are verified for hazardous substance restrictions according to RoHS Directive 2011/65/EU (Annex II) and comply with REACH Regulation (EC) 1907/2006 (Articles 31–33), ensuring chemical safety in materials used. Additionally, ISO 14001:2015 (Clauses 4.1, 6.1.2, 8.1, 8.2) requirements ensure environmentally responsible material sourcing, aligning with sustainability and life cycle management principles.

RoHS compliance	OK	OK	Complies with RoHS Directive	The device complies with RoHS Directive 2011/65/EU by ensuring that all homogeneous materials contain no more than 0.1% (or 0.01% for cadmium) of restricted substances, including lead, mercury, cadmium, hexavalent chromium, PBB, PBDE, and selected phthalates (DEHP, BBP, DBP, DIBP). (Annex II, Article 4 of Directive 2011/65/EU)
REACH	OK	OK	Complies with REACH Regulation	Compliance with REACH is ensured by identifying and communicating the presence of any SVHC (Substances of Very High Concern) above 0.1% w/w in components, as required by Article 33. All obligations for safe use, registration, and restriction (Annex XVII) are met. Applicable to all articles placed on the EU market. (Article 33, Annex XVII of Regulation (EC) 1907/2006)
WEEE compliance	OK	OK	Complies with WEEE Directive	The product complies with the WEEE Directive 2012/19/EU, enabling proper labeling, collection,

				treatment, recovery, and environmentally sound disposal of electronic waste at end-of-life. This ensures traceability and responsibility of producers under EPR (Extended Producer Responsibility) obligations. (Articles 12–14 of Directive 2012/19/EU)
End of life Requirements	OK	OK	Complies with ISO 14001, WEEE Directive	End-of-life handling follows ISO 14001:2004 (Clauses 4.3.1 and 4.4.6) for environmental management, ensuring identification of environmental aspects and implementation of operational controls. The process also meets the obligations of the WEEE Directive 2012/19/EU concerning the disposal and recyclability of electronic equipment.
Operating environment	OK	OK	Complies with ISO 16750	The system was tested under environmental conditions in accordance with ISO 16750-1 (Clauses 4, 5, and 7), which define the mounting location classification, the applicable operating modes, and the

				<p>overall environmental testing framework for road vehicle equipment. Climatic loads, including exposure to temperature extremes, humidity, thermal cycling, and solar radiation, were evaluated following ISO 16750-4 (Clauses 4 and 5). Electrical environmental stresses were assessed in accordance with ISO 16750-2 (Clauses 4.2 to 4.7), verifying reliable operation under conditions of direct current voltage variation, transient overvoltage, slow voltage decreases, power interruptions, load dump events, and reverse polarity. This comprehensive evaluation ensures the robustness of the system across real-world road vehicle environments.</p>
Relative humidity	OK	OK	Complies with ISO 16750	<p>Relative humidity testing was performed according to ISO 16750-4 (Clauses 5.6 and 5.7). The humid heat cyclic test simulated repeated transitions between high temperature and high relative humidity</p>

				<p>conditions, verifying system performance under fluctuating climatic stresses. Additionally, the steady-state damp heat test exposed the system to sustained high relative humidity at elevated temperatures to assess its long-term resistance to moisture ingress and corrosion. Compliance with these tests ensures reliable system operation in humid climatic zones and under varying seasonal environmental conditions.</p>
Environmental verification - Temperature	OK	OK	Complies with ISO 16750	<p>Temperature exposure testing was performed in accordance with ISO 16750-4 (Clause 5.3). The system was subjected to temperature cycling between extreme low and high temperatures to simulate real-world operating conditions, including cold starts and elevated thermal loads during vehicle operation. These tests verified system functionality and mechanical integrity across</p>

				the specified operating temperature range, ensuring reliable performance under both typical and extreme thermal environments experienced in road vehicles.
Environmental verification – Corrosion	OK	OK	Complies with ISO 16750	Corrosion resistance testing was conducted according to ISO 16750-4 (Clause 5.8). The system was subjected to salt mist exposure to evaluate its resistance to corrosion caused by road salt, humidity, and atmospheric contaminants. This test confirmed the mechanical and functional integrity of the system under prolonged corrosive environmental conditions, ensuring long-term durability in vehicle applications.
Environmental verification - Vibration	OK	OK	Complies with ISO 16750	Vibration testing was performed in accordance with ISO 16750-3 (Clause 4.1). The system was subjected to vibration profiles representative of road vehicle conditions to assess its mechanical robustness and the integrity

				<p>of its electrical and electronic connections.</p> <p>These tests verified that the system can withstand mechanical stresses induced by road surface irregularities, engine vibrations, and operational shocks during the lifetime of the vehicle.</p>
Reference to Standards	OK	OK	<p>Complies with ISO 26262, ISO 21434, ISO 16750, ISO 14001, IEC 61000, ISO 7637-2, EN 50498, IEC 62368-1, CISPR 25, UNECE R155/R156, Bluetooth SIG, Wi-Fi Alliance, Apple CarPlay Certification, Android Auto Certification, RoHS, REACH, GDPR, WEEE, RTCM SC-104</p>	

5. Περιγραφή πειραματικών διατάξεων

5.1. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic discharge)

Η 1η δοκιμή, γνωστή και ως ESD (Electrostatic Discharge), πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2:2008 και συγκεκριμένα την ενότητα 8 (clause 8) όπου και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία (test procedure), για συσκευή infotainment με πλαστικό, μονωτικό περίβλημα και μεταλλικό εσωτερικό σασί. Η συγκεκριμένη δοκιμή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της αντοχής της συσκευής έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, οι οποίες μπορούν να προκύψουν κατά τη χρήση της σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν αποκλειστικά ως air discharge σε όλες τις προσβάσιμες μονωτικές επιφάνειες της συσκευής (πρόσοψη, πλαστικά καλύμματα και καπάκια θυρών, περιοχές περιβλήματος), ενώ η συσκευή βρισκόταν σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Δεν πραγματοποιήθηκαν contact discharges, καθώς το infotainment διαθέτει πλήρως πλαστικό μονωτικό περίβλημα και το πρωτόκολλο της παρούσας δοκιμής περιορίστηκε σκόπιμα στην τεχνική air discharge. Σύμφωνα με την συνδεσμολογία που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2:2008 και παρουσιάζεται στο (Figure 4) η συσκευή υπό δοκιμή (EUT – infotainment system) τοποθετήθηκε σε εργαστηριακό πάγκο πάνω από γειωμένη μεταλλική πλάκα αναφοράς (Ground Reference Plane – GRP) που βρισκόταν στο πάτωμα και η οποία ήταν συνδεδεμένη στη γείωση του εργαστηρίου. Η πηγή εκφόρτισης ήταν ESD gun με κύκλωμα ισοδύναμου ανθρώπινου σώματος χωρητικότητας 150 pF και αντίστασης 330 Ω, ρυθμισμένο για απευθείας εκφόρτιση αέρος (air discharge) στο Επίπεδο 4 του προτύπου, δηλαδή 15 kV. Το πιστόλι ESD γειώθηκε μέσω του προβλεπόμενου καλωδίου επιστροφής στο GRP, (Figure 5) [6].

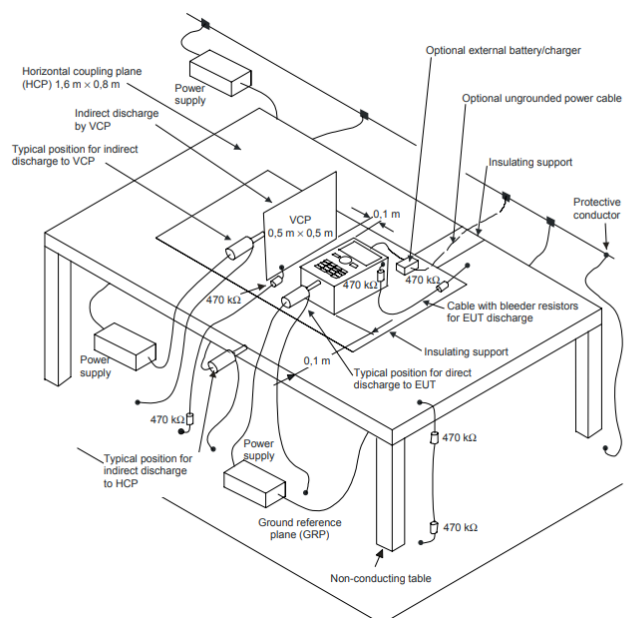


Figure 4. Setup for ESD testing [6].



Figure 5. Πειραματική διάταξη δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) της μονάδας infotainment με χρήση ESD gun και με τροφοδοσία μπαταρίας.

Όπως φαίνεται στη διάταξη, Figure 6, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η άκρη του ακροφυσίου του ESD gun πλησίαζε κάθε σημείο δοκιμής με σταθερή ταχύτητα, μέχρι να προκληθεί εκφόρτιση λόγω διάσπασης του αέρα. Η απόσταση και η ταχύτητα προσέγγισης διατηρούνταν σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου, ώστε να εξασφαλίζεται επαναληψιμότητα. Η πολικότητα εναλλασσόταν ανά 10 πλήγματα (10 θετικής και 10 αρνητικής), με ελάχιστο χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου μεταξύ των εκφορτίσεων. Συνολικά εφαρμόστηκαν 20 εκφορτίσεις ανά σημείο δοκιμής.



Figure 6. Εκτέλεση της δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) στην μονάδα infotainment σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, με χρήση ESD gun και τροφοδοσία από μπαταρία.

Κατά την εκτέλεση όλων των εκφορτίσεων στο επίπεδο τάσης των 15 kV, δεν παρατηρήθηκε καμία δυσλειτουργία ή μόνιμη βλάβη στην απόδοση του συστήματος. Η συσκευή διατήρησε πλήρως την λειτουργική της κατάσταση και πέρασε επιτυχώς τη δοκιμή ESD.

5.2. Ηλεκτρική μεταβατική αγωγή (Electrical transient conduction)

Η 2η δοκιμή ήταν ηλεκτρικής μεταβατικής αγωγή (electrical transient conduction). Πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 50498, το οποίο εφαρμόζεται σε aftermarket ηλεκτρονικό εξοπλισμό για χρήση σε οχήματα, και παραπέμπει στις μεθόδους δοκιμής παλμών του ISO 7637-2 το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για έλεγχο εξοπλισμού OEM (Original Equipment Manufacturer) [22]. Η συσκευή υπό δοκιμή (EUT – infotainment system) τοποθετήθηκε σε

πάγκο εργαστηρίου και συνδέθηκε με την γεννήτρια παλμών, η οποία μπορεί να εφαρμόσει προκαθορισμένα κύματα τάσης (Test Pulses) στο τροφοδοτικό και στα σήματα της συσκευής. Η γεννήτρια ρυθμίστηκε στο Επίπεδο III όπως ορίζεται στον πίνακα του προτύπου, το οποίο αντιπροσωπεύει σοβαρές διαταραχές που μπορούν να παρουσιαστούν στο ηλεκτρικό σύστημα ενός οχήματος. Η διαδικασία εκτελέστηκε με δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες, όπως ορίζεται από το πρότυπο:

Πειραματική Διάταξη Α:



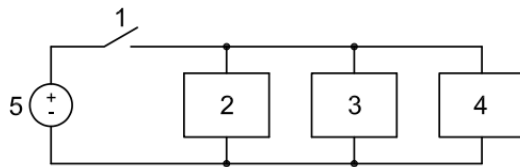
Figure 7. Συνδεσμολογία IVIS με γεννήτρια παραγωγής παλμών 1, 2a, 3a, 3b.

Πειραματική Διάταξη Β:



Figure 8. Συνδεσμολογία IVIS με γεννήτρια παραγωγής παλμών 2b, 4.

Τα σχηματικά διαγράμματα των πειραματικών διατάξεων (Figure 9-Figure 12) αποτυπώνουν σε θεωρητικό επίπεδο το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που αντιστοιχεί σε κάθε παλμό, με καθορισμένες παραμέτρους τάσης, αντίστασης και χρόνου. Οι γεννήτριες παλμών αναπαράγουν εσωτερικά αυτά τα διαγράμματα, ενώ οι συνδεσμολογίες Α και Β καθορίζουν τον τρόπο διοχέτευσης του παλμού στο υπό δοκιμή σύστημα. Για κάθε Pulse Number που ορίζεται από το πρότυπο, η γεννήτρια παρήγαγε την αντίστοιχη κυματομορφή τάσης, σύμφωνα με τον αριθμό επαναλήψεων και τη διάρκεια που προβλέπεται. Συνολικά εκτελέστηκαν έξι σενάρια δοκιμών (Table 34). Τα τέσσερα (Pulse 1, Pulse 2a, Pulse 3a, Pulse 3b) με Συνδεσμολογία Α και τα δύο (Pulse 2b, Pulse 4) με Συνδεσμολογία Β.



1: ignition switch

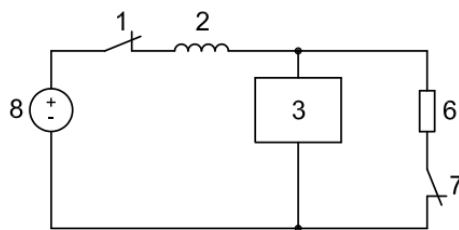
2: inductive load

3: load Rs

4: DUT

5: power supply

Figure 9. Circuit diagram for pulse 1 [22].



1: ignition switch

2: wiring harness (inductive)

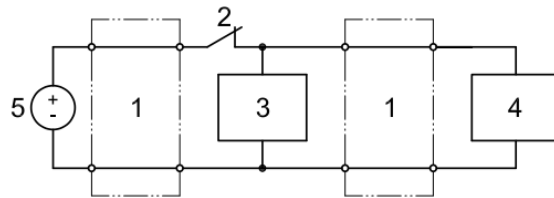
3: DUT

6: load

7: load switch

8: power supply

Figure 10. Circuit diagram for pulse 2a [22].



1: wiring harness with distributed inductance and capacitance

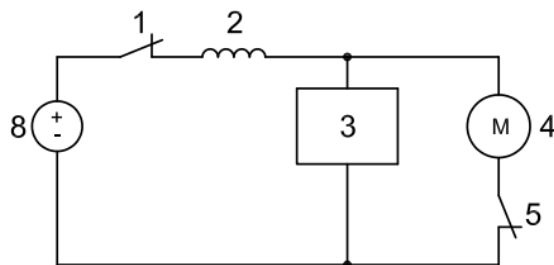
2: switch

3: DUT

4: inductive load

5: power supply

Figure 11. Circuit diagram for pulses 3a/3b [22].



1: ignition switch

2: wiring harness (inductive)

3: DUT

4: DC motor with internal inductance

5: motor switch

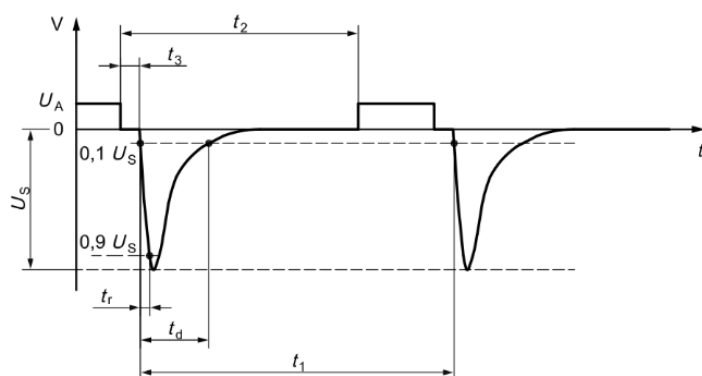
8: power supply

Figure 12. Circuit diagram for pulse 2b [22].

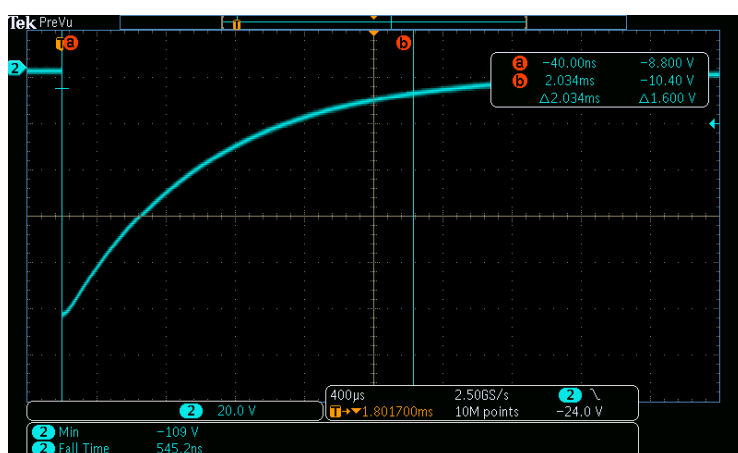
Table 31. Test pulses [23].

Pulse	Setup	Number of Pulses / Duration	Test Level
Pulse 1	Setup A	500 pulses	III
Pulse 2a	Setup A	500 pulses	III
Pulse 3a / 3b	Setup A	1 hour for each pulse	III
Pulse 2b	Setup B	10 pulses	III
Pulse 4	Setup B	4 pulses	III

Οι εφαρμοζόμενοι παλμοί καθορίζονται από το πρότυπο ISO 7637-2 και αποδίδονται στα αντίστοιχα παλμογραφήματα, τα οποία συνοδεύονται από πίνακες παραμέτρων. Η κυματομορφή κάθε παλμού που παρήχθη από τη γεννήτρια συγκρίνεται με το παλμογράφημα αναφοράς του προτύπου, ώστε να επιβεβαιωθεί η συμμόρφωσή της. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα πρότυπα παλμογραφήματα, τα παλμογραφήματα που καταγράφηκαν από τις δύο γεννήτριες, καθώς και οι σχετικοί πίνακες παραμέτρων [22].



(a)



(b)

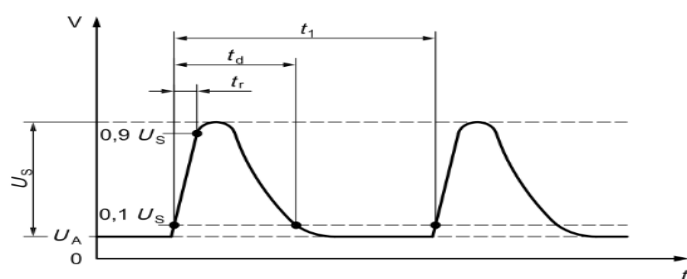
Figure 13. Test pulse 1 given from standard (a) and No-Load (b) [22].

Table 32. Parameters for test pulse 1 [22].

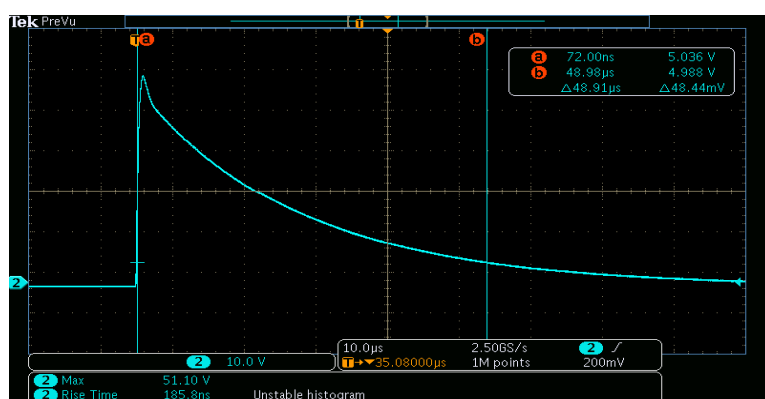
Parameters	Nominal 12 V system
U_s	–75 V to –150 V
R_i	10 Ω
t_d	2 ms
t_r	(1 ⁰ -0.5) μ s
$t1^a$	≥ 0.5 s
$t2$	200 ms
$t3^b$	< 100 μ s

a $t1$ shall be chosen such that it is the minimum time for the DUT to be correctly initialized before the application of the next pulse and shall be ≥ 0.5 s.

b $t3$ is the smallest possible time necessary between the disconnection of the supply source and the application of the pulse.



(a)



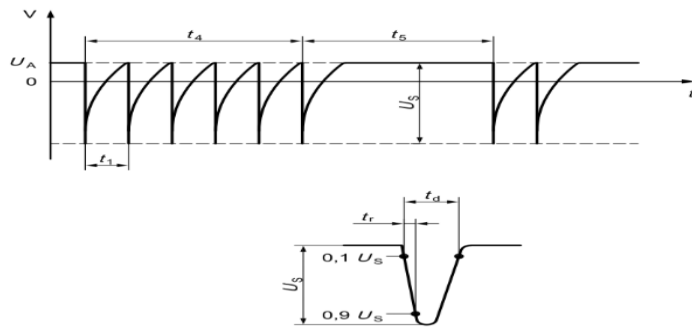
(b)

Figure 14. Waveform for pulse 2a from (a) ISO-7637 and (b) captured from the generator under no-load conditions [22].

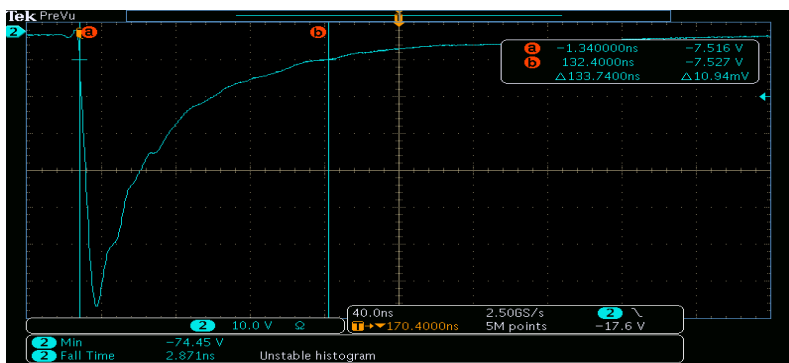
Table 33. Parameters for test pulse 2a [22].

Parameters	Nominal 12 V system
U_s	+37 V to +112 V
R_i	2 Ω
T_d	0,05 ms
T_r	(1 ⁰ -0.5) μ s
t_1^a	0,2 s to 5 s

a The repetition time t_1 can be short depending on the switching. The use of a short repetition time reduces the test time.



(a)

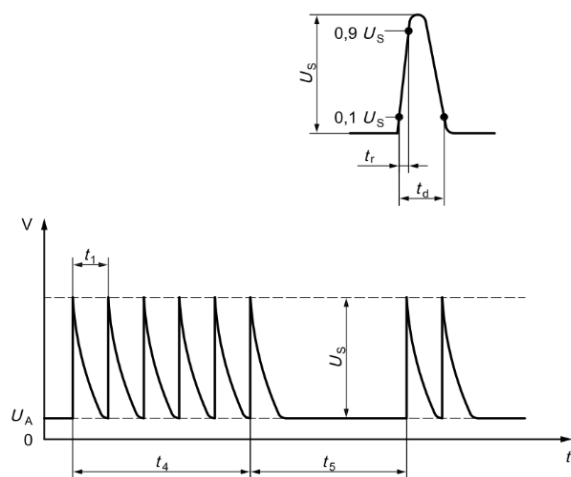


(b)

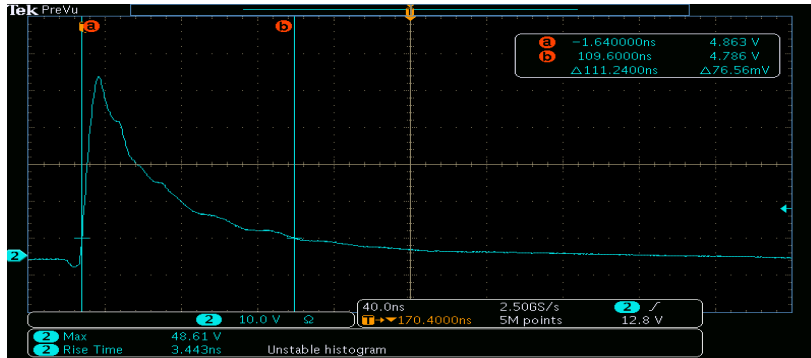
Figure 15. Waveform for pulse 3a from (a) ISO-7637 and (b) captured from the generator under no-load conditions [22].

Table 34. Parameters for test pulse 3a [22].

Parameters	Nominal 12 V system
U_s	-112 V to -220 V
R_I	50 Ω
t_d	150 ns \pm 45 ns
t_r	5 ns \pm 1,5 ns
t_1	100 μ s
t_4	10 ms
t_5	90 ms



(a)

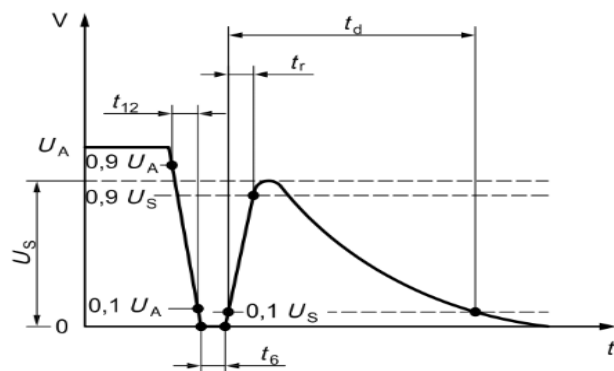


(b)

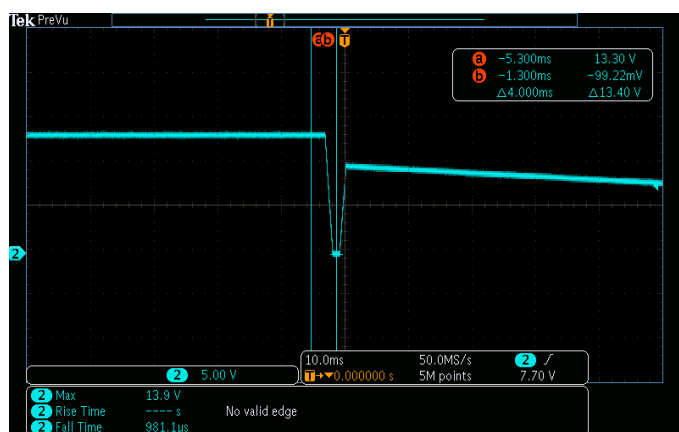
Figure 16. Waveform for pulse 3b from (a) ISO-7637 and (b) captured from the generator under no-load conditions [22].

Table 35. Parameters for test pulse 3b [22].

Parameters	Nominal 12 V system
U_s	+75 V to +150 V
R_i	50 Ω
t_d	150 ns \pm 45 ns
t_r	5 ns \pm 1,5 ns
t_1	100 μ s
t_4	10 ms
t_5	90 ms



(a)

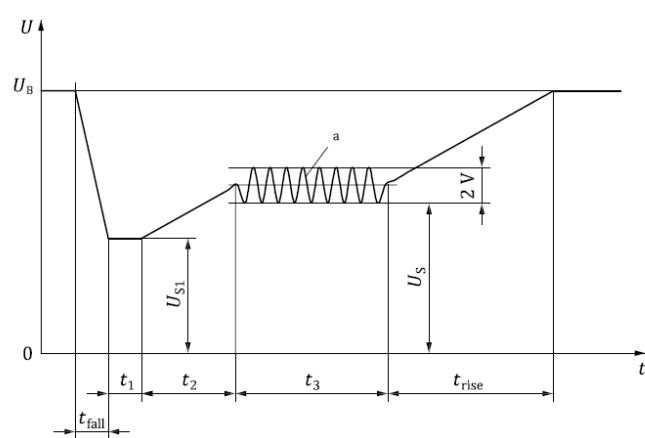


(b)

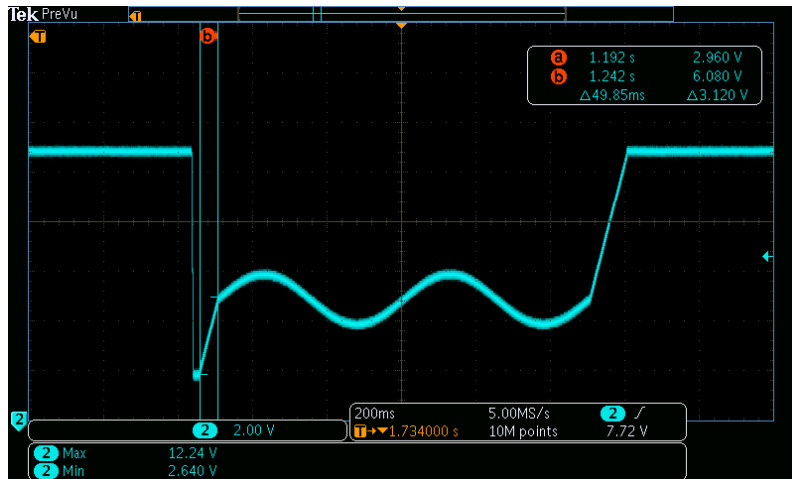
Figure 17. Waveform for pulse 2b from (a) ISO-7637 and (b) captured from the generator under no-load conditions [22].

Table 36. Parameters for test pulse 2b [22].

Parameters	Nominal 12 V system
U_s	10 V
R_i	0 Ω to 0,05 Ω
t_d	0,2 s to 2 s
t_{12}	1 ms \pm 0,5 ms
t_r	1 ms \pm 0,5 ms
t_6	1 ms \pm 0,5 ms



(a)



(b)

Figure 18. Waveform for pulse 4 from (a) ISO-7637 and (b) captured from the generator under no-load conditions [22].

Table 37. Parameters for test pulse 4 [10].

Starting profile values for systems with 12V nominal voltage (U_N)					
Parameter		Level			
		I (Warm crank)	II (Cold crank with good battery at cold temperature)	III (Cold crank with aged battery at cold temperature)	IV (Cold crank with good battery at room temperature)
Voltage [V]	U_{s1}	8 (+0/-0.2)	4.5 (+0/-0.2)	3.0 (+0/-0.2)	6.0 (+0/-0.2)
	U_s	9.5 (+0/-0.2)	6.5 (+0/-0.2)	5.0 (+0/-0.2)	6.5 (+0/-0.2)
Duration [ms]	t_{fall}	5 (± 0.5)	5 (± 0.5)	5 (± 0.5)	5 (± 0.5)
	t_1	15 (± 1.5)	15 (± 1.5)	15 (± 1.5)	15 (± 1.5)

	t2	50 (±5)	50 (±5)	50 (±5)	50 (±5)
	t3	1 000 (±100)	10 000 (±1 000)	1 000 (±100)	10 000 (±1 000)
	t _{rise}	40 (±4)	100 (±10)	100 (±10)	100 (±10)
Minimum functional status		A ^a	B ^a	B ^a	A ^a
		A ^b	B ^b	C ^b	B ^b
		B ^c	C ^c	C ^c	C ^c
		B ^d	C ^d	C ^d	D ^d

Notes:

a $U_{smin} = 6 \text{ V}$; $U_{smax} = 16 \text{ V}$

b $U_{smin} = 8 \text{ V}$; $U_{smax} = 16 \text{ V}$

c $U_{smin} = 9 \text{ V}$; $U_{smax} = 16 \text{ V}$

d $U_{smin} = 10.5 \text{ V}$; $U_{smax} = 16 \text{ V}$

5.3 Αποτελέσματα

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η συσκευή βρισκόταν σε κανονική κατάσταση λειτουργίας, με την οθόνη ανοιχτή και όλα τα κύρια υποσυστήματα σε λειτουργία, ώστε να είναι δυνατή η άμεση ανίχνευση οποιασδήποτε διαταραχής. Η επιθεώρηση περιλάμβανε οπτική παρακολούθηση της οθόνης, έλεγχο απόκρισης στις εντολές χρήστη και καταγραφή τυχόν απενεργοποιήσεων ή σφαλμάτων. Στα σενάρια (Pulse 1, Pulse 2b, Pulse 4), η οθόνη παρουσίασε προσωρινή διακοπή λειτουργίας (status D), η οποία αποκαταστάθηκε πλήρως με απλό επανεκκίνηση μέσω του πλήκτρου start. Στα υπόλοιπα τρία σενάρια (Pulse 2a, Pulse 3a, Pulse 3b), δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στη λειτουργία της συσκευής (status A). Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας καταγραφής των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων, της δοκιμής ηλεκτρικής μεταβατικής αγωγιμότητας στις δύο διατάξεις (Table 38).

Table 38. Functional status.

Pulse	Setup	Number of Pulses / Duration	Test Level	Functional Status
Pulse 1	Setup A	500 pulses	III	D
Pulse 2a	Setup A	500 pulses	III	A
Pulse 3a / 3b	Setup A	1 hour for each pulse	III	A
Pulse 2b	Setup B	10 pulses	III	D
Pulse 4	Setup B	4 pulses	III	D

Σύμφωνα με την παράγραφο 7.4 (Conducted transient immunity) του προτύπου EN 50498, η κατηγορία D θεωρείται αποδεκτή, καθώς δεν προκαλείται μόνιμη βλάβη στον υπό δοκιμή εξοπλισμό και η λειτουργία του επανέρχεται πλήρως μετά από κάθε δοκιμή. Συμπερασματικά, η συσκευή πέρασε με απόλυτη επιτυχία τη δοκιμή [23].

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη σημασία μιας ολιστικής προσέγγισης στη σχεδίαση και την παραγωγή συστημάτων infotainment αυτοκινήτου, συνδυάζοντας την ανάλυση κινδύνων για την πρόληψη σφαλμάτων, τη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα και την πειραματική επαλήθευση. Με την εφαρμογή της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας AIAG-VDA FMEA, πραγματοποιήθηκαν τόσο η DFMEA, για τον εντοπισμό και την αποτροπή πιθανών αστοχιών κατά τη φάση της σχεδίασης, όσο και η PFMEA, για την πρόβλεψη και μείωση κινδύνων πριν την έναρξη της παραγωγής.

Οι δύο αναλύσεις ακολούθησαν τη μεθοδολογία των επτά βημάτων που εισήχθη το 2019, με συνδυασμένη χρήση των δεικτών RPN και AP, εξασφαλίζοντας αντικειμενικότερη ιεράρχηση των failure modes. Επιπλέον, η αξιοποίηση των fishbone διαγραμμάτων διευκόλυνε την ομαδοποίηση και ερμηνεία των αιτιών βάσει της μεθοδολογίας των 6M, ενώ η ανάπτυξη του Control Plan διασφάλισε ότι οι προτεινόμενες βελτιωτικές ενέργειες ενσωματώθηκαν ορθά, μειώνοντας την πιθανότητα λαθών στη γραμμή παραγωγής. Παράλληλα, μέσω του TPS αξιολογήθηκε η συμμόρφωση του συστήματος με τα διεθνή πρότυπα, τα οποία συσχετίστηκαν συστηματικά με τις διαδικασίες σχεδίασης και παραγωγής.

Οι πειραματικές δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) περιλάμβαναν δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (IEC 61000-4-2) και ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων αγωγής (ISO 7637-2, EN 50498), επιβεβαιώνοντας την αξιόπιστη λειτουργία του πρωτοτύπου σε συνθήκες πραγματικής χρήσης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι σχεδιαστικές και παραγωγικές παρεμβάσεις είχαν ουσιαστική συμβολή στην αποτροπή ηλεκτρομαγνητικών κινδύνων και στην επίτευξη πλήρους συμμόρφωσης.

Συνολικά, η εργασία απέδειξε ότι ο συνδυασμός θεωρητικών εργαλείων ανάλυσης κινδύνων (DFMEA, PFMEA, Fishbone, Control Plan) με πειραματική επαλήθευση στο πλαίσιο του TPS συνιστά αποτελεσματική στρατηγική για την ανάπτυξη συστημάτων infotainment που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ασφάλειας, αξιοπιστίας και διεθνούς συμμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό, οι εταιρείες επενδύουν στην ασφάλεια οδηγού και επιβατών, διασφαλίζουν την αξιοπιστία των προϊόντων τους και περιορίζουν τον κίνδυνο και τα έξοδα που μπορεί να προκύψουν από μελλοντικές αστοχίες ή ανακλήσεις.

7. Μελλοντική έρευνα

Η διπλωματική εργασία απέδειξε τη χρησιμότητα της μεθοδολογίας AIAG-VDA FMEA για την ανάλυση και πρόληψη αστοχιών σε επίπεδο σχεδίασης (DFMEA) και παραγωγικών διαδικασιών (PFMEA). Παρόλα αυτά, υπάρχουν τομείς που χρίζουν περαιτέρω βελτίωσης ώστε οι δύο αυτές διαδικασίες να γίνουν ακόμη πιο αποτελεσματικές στο μέλλον, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη ενός ενοποιημένου συστήματος που θα επιτρέπει την αυτόματη ενημέρωση μεταξύ DFMEA και PFMEA, δημιουργώντας κοινή βάση δεδομένων failure modes και διευκολύνοντας την έγκαιρη πρόληψη τόσο στη φάση της σχεδίασης όσο και στη φάση της παραγωγής. Επιπλέον, με την αυξανόμενη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, μπορεί να ενσωματωθεί και στις δύο αυτές αναλύσεις ώστε οι δείκτες RPN και AP να υπολογίζονται με πλήρως αντικειμενικά κριτήρια, μειώνοντας την επίδραση του υποκειμενικού ανθρώπινου παράγοντα στην ιεράρχηση των failure modes. Τέλος, ένα μελλοντικό βήμα θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη εργαλείων λογισμικού με φιλικά προς τον χρήστη περιβάλλοντα και αυτοματοποιημένους ελέγχους, τα οποία θα απλοποιούν τη διαδικασία και θα ενισχύουν την αποδοχή της μεθόδου από τους μηχανικούς και το προσωπικό που την εφαρμόζουν στην πράξη.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Z. El-Rewini, K. Sadatsharan, D. F. Selvaraj, S. J. Plathottam και P. Ranganathan, «Cybersecurity challenges in vehicular communications,» *Vehicular Communications*, 3 Δεκέμβριος 2019.
- [2] Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ), «Τι είναι Πρότυπα – Τυποποίηση,» Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης. [Ηλεκτρονικό].
- [3] Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ), ΕΛΟΤ EN 45020: Τυποποίηση και συναφείς δραστηριότητες – Γενικό λεξιλόγιο, Αθήνα: ΕΛΟΤ, 2006.
- [4] International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262-1 – Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary, Geneva: ISO, 2018.
- [5] International Organization for Standardization (ISO), ISO/SAE 21434: Road vehicles – Cybersecurity engineering, Geneva: ISO, 2021.
- [6] International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test, Geneva, Switzerland: IEC, 2025.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), CISPR 25 – Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, Geneva: IEC, 2016.
- [8] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), «UN Regulation No 155 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to cybersecurity and cybersecurity management system,» United Nations , Genova, 2021.
- [9] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), «UN Regulation No 156 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to software update and software updates management system,» United Nations, Geneva, 2021 .

- [10] International Organization for Standardization (ISO), ISO 16750: Part 2: Electrical loads– Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment, Geneva: ISO, 2003.
- [11] Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), «Bluetooth Core Specification,» Bluetooth SIG, Kirkland.
- [12] Wi-Fi Alliance, «Wi-Fi Alliance Standards,» Wi-Fi Alliance, Austin, Texas.
- [13] Apple Inc., «Apple CarPlay Certification,» Apple, Cupertino.
- [14] Google LLC, «Android Auto Certification,» Google, Mountain View.
- [15] European Union, «Directive 2011/65/EU on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS),» Official Journal of the European Union, Brussels, 2011.
- [16] European Union, «Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE),» Official Journal of the European Union, Brussels, 2012.
- [17] European Chemicals Agency (ECHA), «REACH Regulation (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals),» European Union, Brussels, 2006.
- [18] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 62368-1: Audio/video, information and communication technology equipment – Part 1: Safety requirements, Geneva: IEC, 2018.
- [19] European Union, «Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data (General Data Protection Regulation),» Official Journal of the European Union, Brussels, 2016.
- [20] International Organization for Standardization (ISO), ISO 14001: Environmental management systems — Requirements with guidance for use, Geneva: ISO, 2004.
- [21] Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM), «RTCM Standard SC-104,» Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM), Arlington.

- [22] International Organization for Standardization (ISO), ISO 7637-2: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling — Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only, Geneva: ISO, 2011.
- [23] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), «EN 50498: Electromagnetic compatibility (EMC)-Product family standard for aftermarket electronic equipment in vehicles,» CENELEC, Brussels, 2010.
- [24] F. Anackovski, I. Kuzmanov και R. Pasic, «Action Priority in new FMEA as factor for Resources Management in Risk Reduction,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, p. 1042–1047, 2021.
- [25] E. F. Ramly και H. Atan, «FMEA AIAG-VDA - Commentary and Case Study,» IEOM Society International, Dubai, 2020.
- [26] C. Kluse, «A Critical Analysis of the AIAG-VDA FMEA; Does the Newly Released AIAG-VDA Method Offer Improvements over the Former AIAG Method?,» *Journal of Management and Engineering Integration*, 2020.
- [27] S. Rana και R. Belokar, «Quality Improvement Using FMEA: A Short Review,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, pp. 263-267, Ιούλιος 2017.