



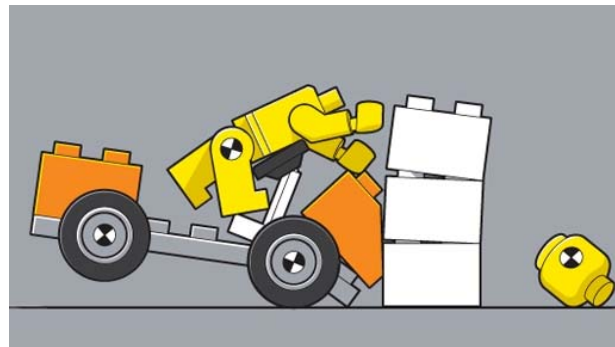
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β. ΚΕΦΑΛΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ με τη μέθοδο SLED TEST**



**ΚΑΤΣΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2009**

## Περιεχόμενα

1. Σύνοψη	2
2. Εισαγωγή – Πώς προέκυψε η ιδέα της κατασκευής του sled test	4
2.1 Γιατί κατασκευάσαμε διάταξη <i>micro sled test</i> . Σύγκριση με το <i>drop test</i>	6
2.2 Πειραματική προσομοίωση κρούσης υπό κλίμακα	7
3 Ιστορικά στοιχεία και τεχνολογία σήμερα	8
3.1 Αναδρομή στην ιστορία της ασφάλειας στους αυτοκινητοδρόμους και της παθητικής ασφάλειας των οχημάτων	8
3.1.1 ΗΠΑ	8
3.1.2 Ευρώπη	9
3.2 Τεχνολογία κρούσης στα αυτοκίνητα ( <i>crash boxes κλπ</i> )	10
3.2.1 Crash boxes	10
3.2.2 Κρούση οχήματος	14
3.3 Αναδρομή στην ιστορία του <i>crash test</i> και του <i>sled test</i> .	15
4. Πειραματικό κομμάτι	18
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης, συνδεσμολογίας, μετρητικών οργάνων. Αναλυτική παρουσίαση του εργαστηριακού εξοπλισμού. Προβλήματα που αντιμετωπίσαμε	18
4.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	18
4.1.2 Σχέδιο πειραματικής διάταξης	22
4.1.3 Εργαστηριακός Εξοπλισμός διάταξης sled test	23
4.2 Βαθμονόμηση ( <i>calibration</i> ) «μηχανής»	29
4.3 Πειραματική διαδικασία	36
4.3.1 Υλικά – κατασκευές που δοκιμάσαμε σε κρούση και σε τι προσομοιάζουν	36
4.3.2 Πειράματα – αξιολόγηση αποτελεσμάτων	38
5. Ανάλυση αποτελεσμάτων	67
5.1 Προσέγγιση παλμού κρούσης	69
5.2 Εφαρμογή	70
6. Αντίστοιχες σκέψεις που έχουν γίνει από άλλους οργανισμούς ανά τον κόσμο – ιδέες για το μέλλον	71
7. Βιβλιογραφία	74

## 1. Σύνοψη

Η παρούσα μελέτη αφορά στον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών και κατασκευών σε κρουστική καταπόνηση. Για να πραγματοποιήσουμε τα πειράματα κατασκευάσαμε ειδική διάταξη δοκιμών κρούσης με ολίσθηση (crash sled test). Τα υλικά που δοκιμάστηκαν ήταν, είτε αφρώδη πολυμερή υλικά, αντίστοιχα αυτών που χρησιμοποιούνται σε προφυλακτήρες οχημάτων, σε κράνη μοτοσικλέτας ή σε ανδρείκελα (dummies), είτε κάποιες μεταλλικές κατασκευές που προσομοιάζουν σε συγκεκριμένα τμήματα οχημάτων και βελτιώνουν την παθητική τους ασφάλεια (πχ crash boxes) ή σε ολόκληρο το εμπρόσθιο ή οπίσθιο παραμορφώσιμο τμήμα οχήματος. Επίσης δοκιμάστηκαν συνδυασμοί μεταλλικών και αφρώδων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές συγκρίσεις μοντέλων «σασί» οχημάτων. Από τη σύγκρισή τους εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη χρησιμότητα του αφρώδους υλικού κατά την κρούση. Προτού παρουσιαστεί η πειραματική διαδικασία, παρατίθενται κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με τον σκοπό αυτού του πονήματος, την τεχνολογία της παθητικής ασφάλειας των οχημάτων σήμερα, την χρήση των sled tests ανά τον κόσμο και τα πλεονεκτήματά της. Επίσης παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής, συναρμολόγησης και βαθμονόμησης της πειραματικής μας διάταξης. Στη συνέχεια προχωράμε στην πειραματική διαδικασία. Αφού περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία πραγματοποίησης των δοκιμών προχωράμε στην αξιολόγησή τους και στην αξιολόγηση του όλου εγχειρήματος.

## **Abstract**

The present study concerns the experimental assessment of the mechanical properties of several different materials and constructions on impact fatigue. To accomplish the experiments, we constructed a special crash sled test device. The materials that were tested were, either foam polymer materials (such as those used in vehicle bumpers, into motorcycle helmets or in the construction of crash test dummies), or some metal specimens that resemble special vehicle parts that improve passive safety (eg crash boxes) or the whole front or back deformable part of the vehicle. Furthermore, combinations of metal and foam materials were tested. To be more specific, four different comparisons of vehicle chassis' models took place. From their parallelism, some useful conclusions were extracted concerning the usefulness of the foam material in a crash. Before the presentation of the experimental process, some general information relative to the goal of this work will be put forward. Also we will make a quick review of the passive safety technology in vehicles today, the use of sled tests around the world and its benefits. The construction, assembly and calibration processes of our experimental installation are also being presented. Afterwards, we go on with the experimental process. After having a detailed look on the procedure, we go on with the evaluation of the results.

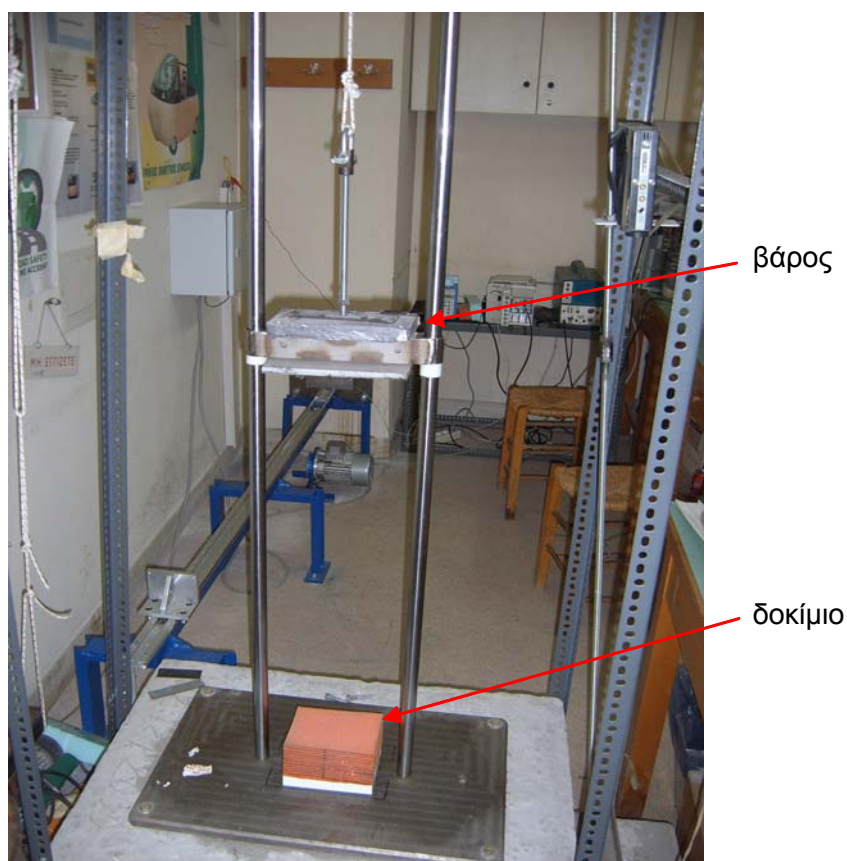
## 2. Εισαγωγή – Πώς προέκυψε η ιδέα της κατασκευής του sled test

Το Εργαστήριο Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών συμμετείχε επί σειρά ετών σε ευρωπαϊκά προγράμματα με αντικείμενο την παθητική ασφάλεια των οχημάτων (Ευρωπαϊκά προγράμματα SIDECAR & ADVANCE).

Στο πλαίσιο των προγραμμάτων αυτών, το βασικό αντικείμενο του εργαστηρίου ήταν η στατική αλλά και δυναμική καταπόνηση διαφόρων αφρωδών υλικών. Τα υλικά αυτά θα χρησιμοποιούνταν στη συνέχεια από τις αυτοκινητοβιομηχανίες στους προφυλακτήρες και σε άλλα σημεία των οχημάτων για να απορροφούν ενέργεια κατά την κρούση.

Για τα πειράματα δυναμικής καταπόνησης χρησιμοποιούνταν μία διάταξη drop-test κατασκευή των φοιτητών Γ. Δαμάσκου και Β. Γράψα, οι οποίοι εκπονούσαν τότε την διπλωματική τους εργασία πάνω σε υλικά και κατασκευές υψηλής απορρόφησης ενέργειας.

Η διάταξη φαίνεται παρακάτω



Το βασικό πρόβλημα με αυτή την διάταξη είναι ότι δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποιες ταχύτητες κρούσης, καθώς η επιτάχυνση που δέχεται το βάρος πέφτοντας, είναι αυτή της βαρύτητας. Βέβαια υπάρχουν κατασκευές drop test που μπορούν να δώσουν κάποια ώθηση στο βάρος τη στιγμή που ελευθερώνεται, η συνήθης ωστόσο πρακτική

είναι οι κατασκευές αυτές να έχουν μεγάλο ύψος έτσι ώστε, ανάλογα με την ταχύτητα που θέλει να πετύχει κανείς, να ανυψώνει το βάρος στο κατάλληλο ύψος και να το αφήνει να πέσει.

Σε κάθε περίπτωση, μία διάταξη sled test υπό κλίμακα μοιάζει να είναι λιγότερο ογκώδης και λιγότερο πολύπλοκη. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, τα οποία και οδήγησαν στην απόφαση για την κατασκευή της, τα βλέπουμε στην επόμενη παράγραφο.

## 2.1 Γιατί κατασκευάσαμε διάταξη micro sled test. Σύγκριση με το drop test

Στο sled test:

- η μάζα δεν είναι συνεχώς επιταχυνόμενη αλλά αποκτάει σταθερή ταχύτητα με την οποία γίνεται η κρούση, όπως συμβαίνει δηλαδή συνήθως και στα αυτοκινητιστικά ατυχήματα
- το μοτέρ δύναται να δίνει μεγαλύτερη επιτάχυνση από αυτή της βαρύτητας και πετυχαίνουμε έτσι μεγαλύτερες ταχύτητες σε μικρότερης κλίμακας κατασκευή
- για μεγάλα βάρη, γλιτώνουμε τον κόπο και την ενέργεια που απαιτούνται για την ανύψωσή τους
- η ταχύτητα και οι λοιπές συνθήκες κρούσης (γωνία κτ) είναι απολύτως ελεγχόμενες

Επιπλέον, μία διάταξη micro sled test αποτελεί μία οικονομική λύση και παρέχει μία μικρή και εύχρηστη συσκευή με την οποία μπορούν να μελετούνται εύκολα μικρές κατασκευές και δοκίμια.

## 2.2 Πειραματική προσομοίωση κρούσης υπό κλίμακα

Το αντικείμενο το οποίο θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία είναι η μηχανική συμπεριφορά διαφόρων υλικών και κατασκευών σε κρούση. Η μελέτη αυτή αφορά προσομοίωση με πειραματική μέθοδο και όχι με μεθόδους υπολογιστικές.

Η διάταξη που χρησιμοποιούμε αντιστοιχεί στον αγγλικό όρο **crash sled test**, είναι δηλαδή, σε ελεύθερη απόδοση, μία **δοκιμή κρούσης με ολίσθηση**.

Σημειώνεται ότι η διάταξη είναι κατασκευασμένη υπό κλίμακα και δεν αντιστοιχεί σε πραγματικές διαστάσεις και βάρος οχήματος σε κρούση. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν το μέγεθος της κατασκευής και συγκρίνοντας το με τις συνήθεις διαστάσεις των υπάρχουσών εγκαταστάσεων sled test ανά τον κόσμο, θα λέγαμε ότι η δική μας κατασκευή αποτελεί μια εγκατάσταση **micro crash sled test**.

Σκοπός της κατασκευής αυτής ήταν να αποκτήσουμε μία διάταξη μικρού μεγέθους (περίπου 2m σε μήκος) η οποία να μπορεί να επιτυγχάνει υψηλές ταχύτητες και επιταχύνσεις.

Τονίζεται ότι τα δοκίμια στην διάταξή μας υποβάλλονται πραγματικά σε κρούση και όχι απλά στις αντίστοιχες επιταχύνσεις μιας κρούσης, όπως συμβαίνει σε πολλά sled tests (με σκοπό την μη καταστροφή των δοκιμαζομένων κατασκευών).

Στην παρούσα μελέτη θα πραγματοποιηθούν δοκιμές προσομοίωσης εμπρόσθιας-μετωπικής σύγκρουσης και όχι πλευρικής. Ωστόσο στη διάταξή μας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν όλων των ειδών οι συγκρούσεις, ανάλογα με την γωνία με την οποία τοποθετείται κάθε φορά το δοκίμιο (μοντέλο οχήματος).

Φυσικά η χρησιμότητα της διάταξης δεν περιορίζεται στην προσομοίωση αυτοκινητικών συγκρούσεων αλλά, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να έχει ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Δεν είναι λίγοι οι τομείς της επιστήμης που χρειάζεται να μελετηθεί η αντοχή κάποιου υλικού σε κρουστική καταπόνηση. Τέτοιος τομέας είναι για παράδειγμα η εμβιομηχανική (biomechanics), η οποία συχνά απαιτεί την δοκιμή αντοχής ανθρώπινων ή ζωικών μελών, ιστών κα σε κρούση.



### 3 Ιστορικά στοιχεία και τεχνολογία σήμερα

#### 3.1 Αναδρομή στην ιστορία της ασφάλειας στους αυτοκινητοδρόμους και της παθητικής ασφάλειας των οχημάτων

##### 3.1.1 ΗΠΑ

«Πριν από τη δεκαετία του 1960, οι προσπάθειες για ασφάλεια στους αυτοκινητοδρόμους επικέντρωναν σχεδόν όλη την προσοχή τους στην αποφυγή συγκρούσεων, έχοντας ως βασικό μέλημα την αλλαγή της συμπεριφοράς των οδηγών. Η μηχανική έπαιζε και αυτή κάποιο ρόλο, στον ίδιο όμως τομέα, έχοντας δηλαδή ως στόχο να βοηθάει στην αποτροπή συγκρούσεων. Η μείωση των συνεπειών μιας πιθανής σύγκρουσης, δεν είχε μελετηθεί σχεδόν καθόλου έως τότε.

Εξαιτίας της επικέντρωσης στην αποφυγή των συγκρούσεων, δεν δινόταν ιδιαίτερη προσοχή σε προτάσεις σχεδιασμού αυτοκινήτων που πιθανώς να έσωζαν ζωές. Ήδη από τη δεκαετία του 30, κάποιοι φυσικοί και σχεδιαστές οχημάτων είχαν προτείνει τη χρήση της ζώνης ασφαλείας, ωστόσο οι αυτοκινητοβιομηχανίες των ΗΠΑ δεν άρχισαν να εγκαθιστούν ζώνες ασφαλείας στα οχήματα πριν τη δεκαετία του 60. Η ζώνη ασφαλείας τελικά έγινε υποχρεωτική από το νόμο το έτος 1968.

Ο λόγος αυτής της τόσο μεγάλης καθυστέρησης ήταν πρακτικά ότι μέχρι το 1960 η προσέγγιση στην οδική ασφάλεια ήταν λίγο-πολύ μη-επιστημονική. Η σύγχρονη επιστημονική προσέγγιση ξεκίνησε στην πραγματικότητα με τον William Haddon που ανέπτυξε τις πρώτες συστηματικές μεθόδους προσδιορισμού ενός πλήρους συνόλου δυνατοτήτων για την μείωση των απωλειών από συγκρούσεις. Το 1966 ο Dr Haddon διορίστηκε ως ο αρχηγός του πρώτου συμβουλίου για την ασφάλεια στους δρόμους.

Σύντομα, οι ασφαλιστές αυτοκινήτων στις ΗΠΑ άρχισαν να συνδράμουν την προσπάθεια να μετατραπεί το πεδίο της οδικής ασφάλειας σε πεδίο επιστημονικά βασιζόμενο. Το 1969, ο Dr Haddon έγινε πρόεδρος του IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) με εντολή να το μετατρέψει σε έναν ερευνητικού προσανατολισμού οργανισμό. Το IIHS είχε ήδη ιδρυθεί από το έτος 1959 σαν ένας φορέας μέσω του οποίου οι ασφαλιστικές εταιρίες υποστήριζαν και προωθούσαν την οδική ασφάλεια. Ωστόσο, το 1968 ο οργανισμός άλλαξε και σήμερα έχει επιστημονικό και ερευνητικό χαρακτήρα με σκοπό τη μείωση των απωλειών – θάνατοι, τραυματισμοί, καταστροφή περιουσίας – των συγκρούσεων. Το όνομα παρέμεινε όμως το ίδιο, περιέχοντας μέχρι σήμερα τον όρο insurance, τιμώντας έτσι τους αρχικούς δημιουργούς του.» [1]

**Σήμερα** στις ΗΠΑ ο βασικός φορέας που ασχολείται με την ασφάλεια των οχημάτων και ενεργοποιείται στις δοκιμές ασφαλείας όπως είναι τα crash test, είναι το NHTSA (National Highway Traffic Safety Association).

Ιδρύθηκε επισήμως το 1970 και οι αρμοδιότητες του είναι ευρύτερες, ακόμη και οικονομικής φύσεως, όσον αφορά τα καύσιμα), ανάμεσα τους όμως είναι και η δημιουργία κανονισμών και προδιαγραφών για την ενεργητική και παθητική ασφάλεια των οχημάτων, η κατασκευή ανδρείκελων για προσομοιώσεις κρούσεων και οι δοκιμές κρούσης οχημάτων.

### 3.1.2 Ευρώπη

«Από την δεκαετία του 1970, κάποιες κυβερνήσεις ευρωπαϊκών χωρών εργάζονταν, μέσω του EEVC (European Experimental Vehicles Committee), εκτιμώντας διάφορα θέματα στον τομέα της ‘δευτερεύουσας’ ασφάλειας στο αυτοκίνητο, αυτής που σήμερα αποκαλείται συνηθέστερα ‘παθητική ασφάλεια’ και εκφράζει την ικανότητα ενός οχήματος να προστατεύει τους επιβαίνοντες κατά την σύγκρουση (δηλαδή από τη στιγμή που αρχίζει να πραγματοποιείται η σύγκρουση).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αυτή η έρευνα είχε φέρει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεθόδων δοκιμής κρούσης πλήρους κλίμακας, για την προστασία των επιβατών σε εμπρόσθιο και πλάγιο χτύπημα, και μία σύνθετη μέθοδο δοκιμής για την εκτίμηση της προστασίας των πεζών σε χτύπημα από το εμπρόσθιο τμήμα οχήματος.

Το 1994, προτάσεις για την υιοθέτηση από την ευρωπαϊκή νομοθεσία κανονισμών που θα υποχρέωναν τις αυτοκινητοβιομηχανίες να υπόκεινται στις δοκιμές του EEVC, έτυχαν ισχυρής αντίστασης από τις διάφορες εταιρίες κατασκευής οχημάτων. Τον Ιούνιο του 1994, το υπουργείο μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου σκεφτόταν τη ίδρυση του NCAP (New Car Assessment Program) στη χώρα, το οποίο θα μπορούσε αργότερα να επεκταθεί στην υπόλοιπη Ευρώπη. Το πρόγραμμα θα βασιζόταν στις διαδικασίες δοκιμών που είχαν αναπτυχθεί από το EEVC.

Τον Νοέμβριο του 1996, το SNRA (Swedish National Road Administration), η FIA (Federation International l’Automobile) ήταν οι πρώτοι οργανισμοί που προσχώρησαν στο πρόγραμμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία του **Euro NCAP**. Η εναρκτήρια συνάντηση έλαβε χώρα τον Δεκέμβριο του 1996.» [2]

«Ο Ανεξάρτητος Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ασφαλείας (Euro NCAP) πραγματοποιεί τα crash tests των νέων μοντέλων και αξιολογεί το επίπεδο παθητικής ασφάλειας που προσφέρουν. Το κάθε μοντέλο βαθμολογείται με βάση την συνολική του επίδοση στα τεστ πρόσκρουσης του Euro NCAP και με άριστα τα 5 αστέρια.

Τα τεστ πρόσκρουσης είναι βασικά τρία:

- 1) Μετωπική σύγκρουση του αυτοκινήτου με ταχύτητα 64 χλμ./ώρα σε εμπόδιο που παραμορφώνεται και καλύπτει το 40% του πλάτους του.
- 2) Πλευρική σύγκρουση όπου το όχημα είναι σταθερό και προς αυτό κινείται και συγκρούεται ανένδοτο εμπόδιο πλάτους 1,5 μέτρου με ταχύτητα 50 χλμ./ώρα
- 3) Πλευρική πρόσκρουση με στύλο με ταχύτητα 29χλμ./ώρα.» [3]

## 3.2 Τεχνολογία κρούσης στα αυτοκίνητα (crash boxes κλπ)

### 3.2.1 Crash boxes

Η βασική φιλοσοφία σχετικά με την αποτελεσματικότητα σε θέματα ασφαλείας των οχημάτων σε κρούση, επικεντρώνεται στην ιδέα των παραμορφώσιμων τμημάτων αυτών που, καθώς καταρρέουν απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας της κρούσης με αποτέλεσμα αυτή να μην μεταφέρεται όλη στην καμπίνα των επιβατών και έτσι να μειώνεται ο κίνδυνος τραυματισμού τους.

Η ιδέα αυτή συνοψίζεται στην έννοια του crash box (κουτί κρούσης) που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία κατασκευή της οποίας η παραμόρφωση σε κρουστική καταπόνηση συμβαίνει με τρόπο γνωστό και ομαλό.

Στο σχήμα φαίνεται σε προσομοίωση σε πρόγραμμα LS-DYNA , η παραμορφωσιακή συμπεριφορά ως προς το χρόνο ενός τυπικού crash box. [4]

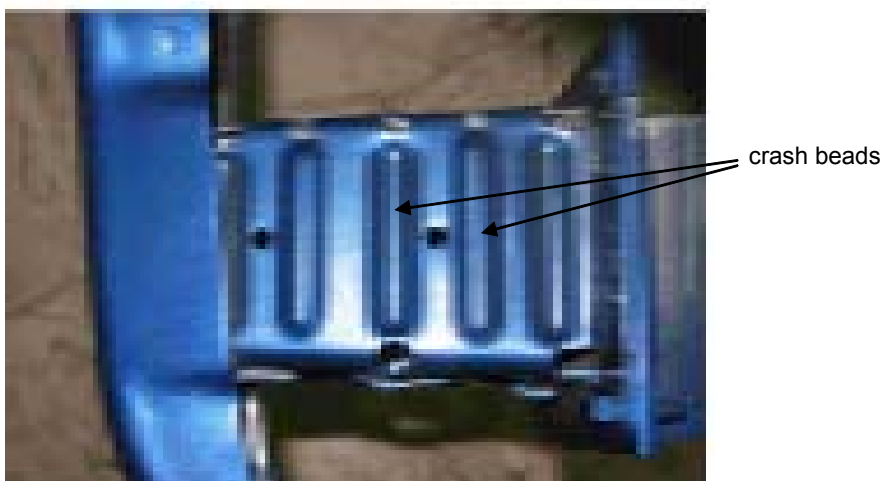


Crash boxes χρησιμοποιούνται σήμερα σε διάφορα σημεία του οχήματος. Για παράδειγμα, ο **προφυλακτήρας** στηρίζεται σε crash boxes που παραλαμβάνουν την πρώτη παραμόρφωση. Επίσης η **μηχανή** του οχήματος στηρίζεται πάνω σε crash boxes ειδικής κατασκευής έτσι ώστε κατά την κρούση αυτή να κυλιέται προς τα πίσω, έως ότου βέβαια ακουμπήσει πάνω στο πλαίσιο της καμπίνας. Τέλος, ως crash box λογίζεται συχνά **ολόκληρο το εμπρόσθιο τμήμα** του οχήματος μέχρι την καμπίνα των επιβατών, αφού οι αυτοκινητοβιομηχανίες μελετούν τη συμπεριφορά του έτσι ώστε να απορροφήσει αυτό την ενέργεια της κρούσης, αφήνοντας την καμπίνα ανέγγιχτη.



## Το crash box πίσω από τον προφυλακτήρα

«Το crash box, με το οποίο ένα αυτοκίνητο είναι εφοδιασμένο στο μπροστινό σημείο του πλαισίου του (ακριβώς πίσω απ' τον προφυλακτήρα), είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του αυτοκινήτου όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας σε κρούση. Σε περίπτωση ατυχήματος εμπρόςθιας σύγκρουσης, για παράδειγμα, το crash box αναμένεται να καταρρεύσει σταδιακά απορροφώντας κρουστική ενέργεια πριν από τα υπόλοιπα μέλη του σώματος του οχήματος, έτσι ώστε η καταστροφή του πλαισίου της καμπίνας να ελαχιστοποιηθεί και να σωθούν οι ζώες των επιβατών. Συμβατικά, ένα crash box είναι εφοδιασμένο με μερικές πτυχώσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα.

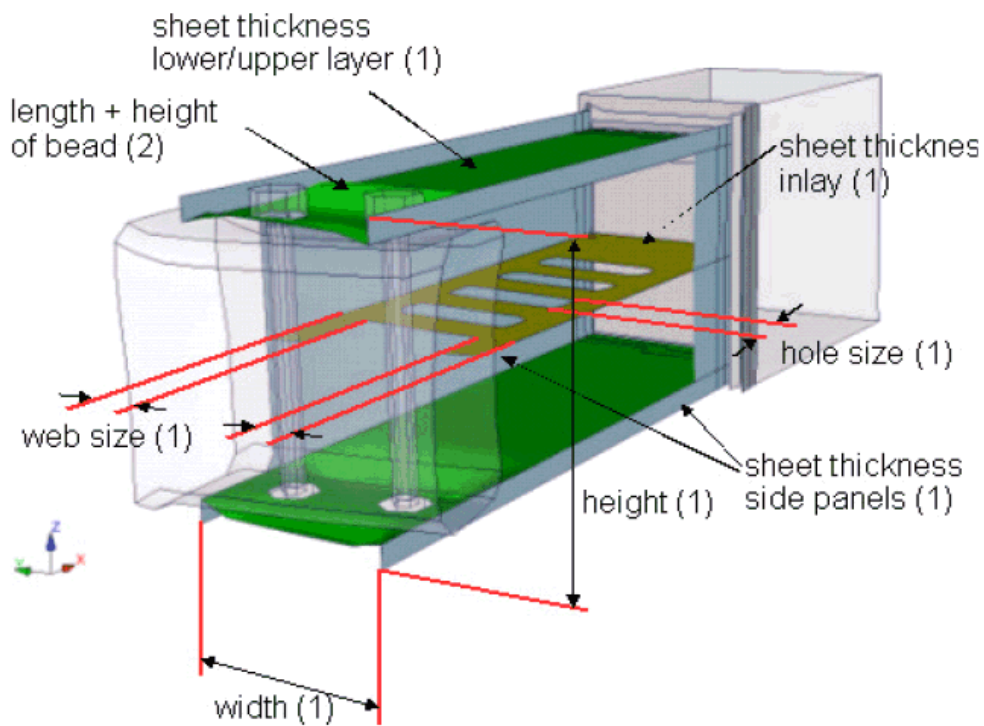


Οι πτυχώσεις αυτές ονομάζονται crash beads (αυλάκια κρούσης) και δουλειά τους είναι να ενεργοποιούν την διαδικασία παραμόρφωσης με λυγισμό (buckling) και να βοηθήνε το crash box να καταρρέει ευκολότερα και με προκαθορισμένο τρόπο. Τελευταία, έχει γίνει αυστηρά απαιτητό να ικανοποιείται τόσο η μείωση του βάρους των οχημάτων, όσο και η βελτίωση της αξιοπιστίας σε κρούση και έτσι, όσον αφορά το crash box, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζει μεγάλη απορρόφηση ενέργειας χρησιμοποιώντας ελάσματα κατά το δυνατόν πιο λεπτά.» [5]

Παρακάτω μπορούμε να δούμε διάφορους τύπους crash boxes που χρησιμοποιούνται σε σημεία οχημάτων:



Βλέπουμε στο σχήμα την πολυπλοκότητα που μπορεί να έχει ένα crash box προκειμένου να επιτυγχάνει όσο το δυνατόν ελεγχόμενη παραμόρφωση.

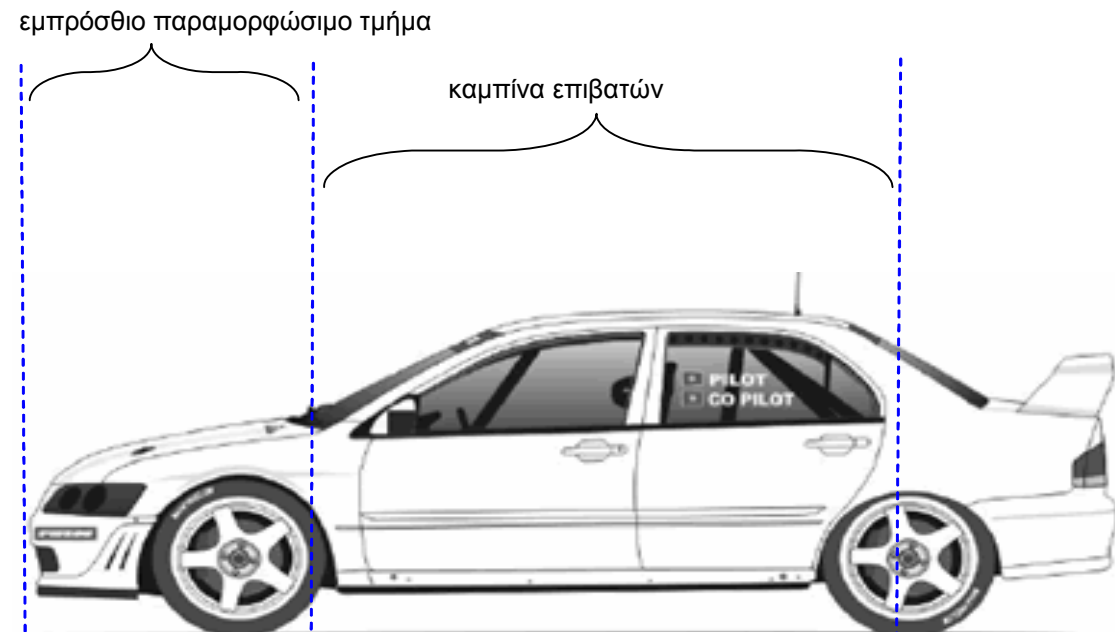


Παρακάτω φαίνεται ένα crash box με αφρό αλουμινίου στο εσωτερικό του



### 3.2.2 Κρούση οχήματος

#### Σχηματικό διάγραμμα ζωνών κρούσης



Κατά την κρούση ενός οχήματος σε απαραμόρφωτο ή παραμορφούμενο εμπόδιο, η βασική τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί σχετίζεται με την ιδέα ότι όσο πιο πολύ χρόνο χρειαστούν για να παραμορφωθούν τα μέλη του οχήματος γύρω από την καμπίνα, τόση πιο πολλή ενέργεια θα απορροφήσουν, οπότε οι πιθανότητες των επιβατών να επιβιώσουν θα είναι περισσότερες.

Φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος που προορίζεται να απορροφήσει την κρούση, αν μιλάμε για μετωπική ή πλαγιομετωπική σύγκρουση.

Οι μελέτες πάντως των επιστημόνων επικεντρώνονται σε αυτού του είδους τις συγκρούσεις καθώς στατιστικά αποδεικνύεται ότι είναι οι πιο πιθανές και οι πιο επικίνδυνες. Το τελευταίο είναι σχεδόν προφανές αφού, στις μετωπικές συγκρούσεις, και τα δύο οχήματα κινούνται με αποτέλεσμα να αθροίζεται η ταχύτητα τους και να πολλαπλασιάζεται η επικινδυνότητα της σύγκρουσης.

### 3.3 Αναδρομή στην ιστορία του crash test και του sled test.

«Οι δοκιμές κρούσης οχημάτων πλήρους κλίμακας χρησιμοποιούνται συχνά σαν ένα εργαλείο των μηχανικών για να αναπαράγουν τις δυναμικές συνθήκες των ατυχημάτων που συμβαίνουν στον πραγματικό κόσμο. Η πολυπλοκότητα και η καταστροφική φύση της πραγματοποίησής τους ωστόσο, καθιστά αυτές τις δοκιμές πολυέξοδες. Συχνά, η μηχανική ανάλυση της κρούσης απαιτεί πολλαπλές δοκιμές.» [6]

Σε μία δοκιμή κρούσης επίσης, εξετάζεται η αποτελεσματική λειτουργία πολλών συσκευών ασφαλείας ταυτόχρονα. Κάποιες φορές είναι πιθανό να εξετάζεται η αποτελεσματικότητα μόνο κάποιων συσκευών στο εσωτερικό της καμπίνας όπως πχ οι ζώνες ασφαλείας, οι αερόσακοι κλπ.

«Σε αυτές τις περιπτώσεις η **δοκιμή προσομοίωσης της κρούσης πάνω σε κυλιόμενο διάδρομο (στη συνέχεια θα αναφέρεται ως δοκιμή ολίσθησης ή sled test)** φαίνεται να είναι πιο κατάλληλη. Η δοκιμή ολίσθησης επιτρέπει στους μηχανικούς να αναπαράγουν τις δυναμικές συνθήκες μίας πλήρους κλίμακας δοκιμής κρούσης σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον ξοδεύοντας μόνο ένα ποσοστό του κόστους της πραγματικής δοκιμής.» [6]

«Η πρώτη καταγεγραμμένη δοκιμή ολίσθησης μας πάει πίσω στο έτος 1949, ακριβώς μετά το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου. Τη χρονιά εκείνη η Sierra Engineering Company κατασκεύασε το πρώτο ανθρώπινο ομοίωμα για χρήση σε δοκιμές κρούσης (crash test dummy). Ήταν το ομοίωμα ενός ενήλικου άνδρα και ονομάστηκε **Sierra Sam**. Το ανδρείκελο εκτοξεύτηκε σε δοκιμή ολίσθησης επιταχυνόμενο από ρουκέτες καθώς το πείραμα αποτέλεσε κομμάτι των δοκιμών της αμερικανικής αεροπορίας για τον έλεγχο της λειτουργίας των εκτοξευόμενων αεροπορικών θέσεων.

Δεκατρία χρόνια αργότερα, το 1962, η General Motors εισήγαγε τον διάδρομο ολίσθησης **HYGE** με σκοπό να προσομοιώνει την επιβράδυνση του οχήματος την στιγμή της σύγκρουσης.» [7]

«Εκτοτε, περισσότερες από 60 τέτοιες μονάδες έχουν κατασκευασθεί ανά τον κόσμο. Έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη συστημάτων απόσβεσης κρούσεων στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στη σιδηροδρομική και στη στρατιωτική βιομηχανία. Η επιτυχία της τεχνικής βασίζεται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες:

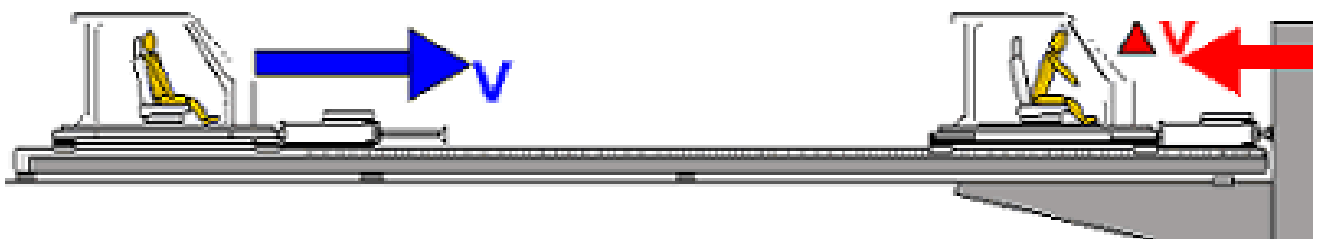


- Αξιοπιστία – μόνο ένα βασικό κινούμενο κομμάτι με ελάχιστο χρόνο να μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών δοκιμών
- Επαναληψιμότητα – δυνατότητα επανάληψης του ίδιου πειράματος με τις ίδιες συνθήκες
- Ακρίβεια – ξεχωριστή ικανότητα να υποκαθιστά την ακριβείς συνθήκες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης που συναντώνται σε μια δοκιμή κρούσης
- Ευελιξία – η εφαρμογή έχει δυνατότητα διακύμανσης από πολύ χαμηλές επιταχύνσεις για σιδηροδρομικά οχήματα μέχρι πολύ υψηλές για την προσομοίωση εκρηκτικών κυμάτων» [8]

Στο σχήμα παρουσιάζεται μια διάταξη sled test με κρούση (crash sled test). Το κυλιόμενο βαγόνι επιταχύνεται και προσκρούει με ταχύτητα σε ακίνητο και ανένδοτο τοίχωμα, υπό την προστασία ειδικού ελατηρίου που είναι προσαρμοσμένο μπροστά στο βαγόνι και υποκαθιστά το εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος.

## HORIZONTAL IMPACT TEST SLEDS

**HITS** 



Στη φωτογραφία βλέπουμε μία διάταξη sled test της εταιρίας HYGE. Ένα ελατήριο επιταχύνει ανάποδα το όχημα μαζί με το ανδρείκελο και τα υποβάλλει στις επιθυμητές επιταχύνσεις προσομοιώνοντας τις επιβραδύνσεις μιας πιθανής κρούσης.



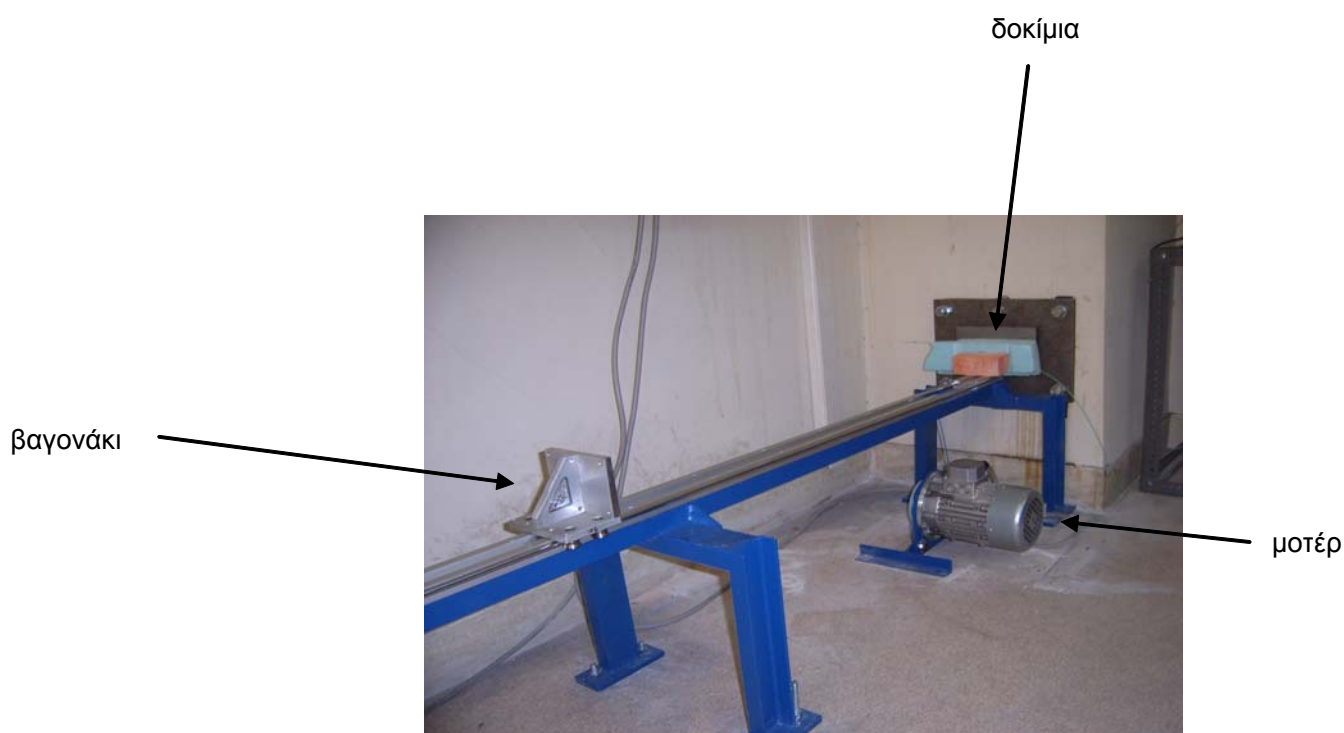
Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις το κυλιόμενο βαγόνι δεν καταστρέφεται.

#### 4. Πειραματικό κομμάτι

4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης, συνδεσμολογίας, μετρητικών οργάνων. Αναλυτική παρουσίαση του εργαστηριακού εξοπλισμού. Προβλήματα που αντιμετωπίσαμε

##### 4.1.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για να πραγματοποιήσουμε τα πειράματα κατασκευάσαμε πειραματική διάταξη sled test, το βασικό κομμάτι της οποίας φαίνεται στη φωτογραφία



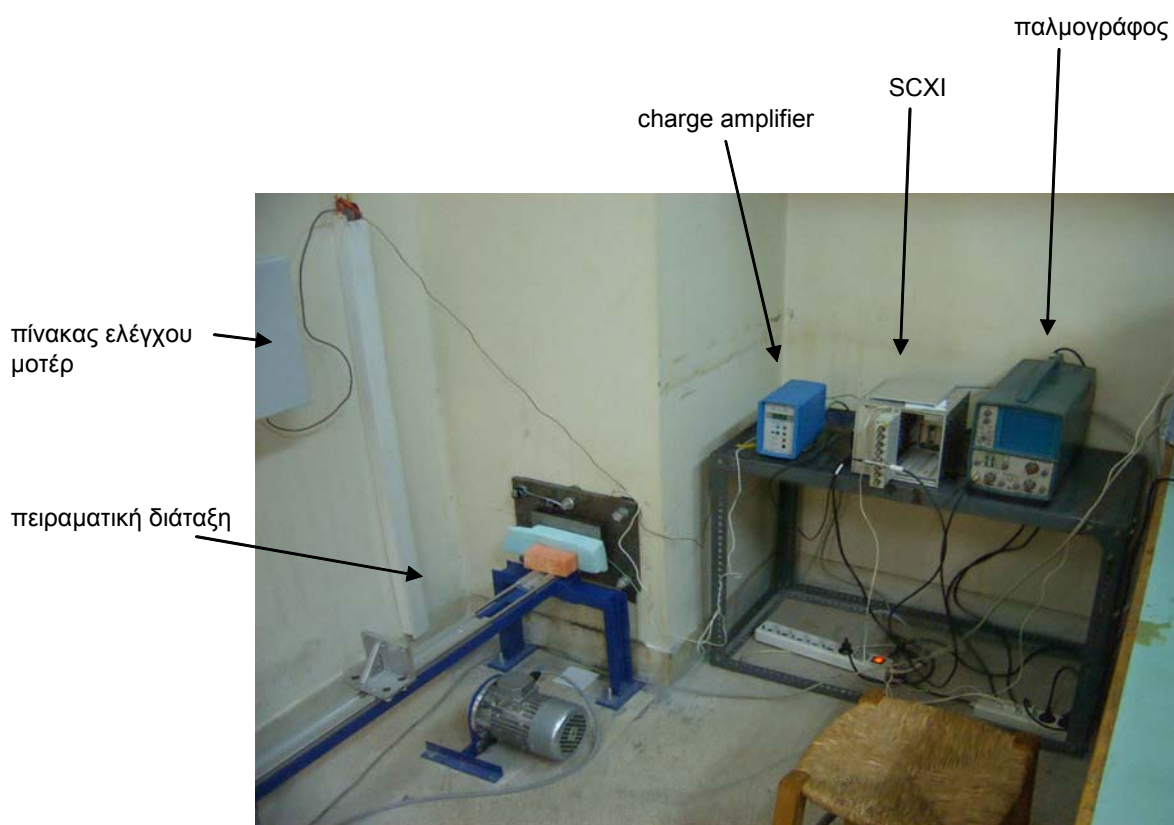
Παραπάνω βλέπουμε την πειραματική διάταξη. Διακρίνεται η βαρέος τύπου (μπλε) **μεταλλική κατασκευή** πάνω στην οποία είναι βιδωμένη μία **ράγα** βιομηχανικού τύπου. Πίσω από τα δοκίμια βρίσκονται δύο **ανένδοτες μεταλλικές πλάκες** από σκληρό χάλυβα. Ανάμεσα στις δύο πλάκες είναι τοποθετημένο δυναμικό Quasi Static **δυναμόμετρο** Kistler 9041A. Ανάμεσα στη μεγάλη πλάκα και στον τοίχο είναι τοποθετημένη ασυμπίεστη λεπτή πλάκα από λάστιχο.

Η μεγάλη πλάκα είναι βιδωμένη σταθερά στον τοίχο με ειδικά μεταλλικά ούπα σταθεροποιούμενα με χημικώς σκληρυνόμενη ρητίνη και η μικρή είναι βιδωμένη πάνω στη μεγάλη με τρόπο ώστε να μην πιέζει το δυναμόμετρο αλλά και να μην παρεμποδίζεται η εμπρός-πίσω κίνησή της παράλληλα με τη διεύθυνση της ράγας. Κάτω από την όλη κατασκευή βρίσκεται ένα **μοτέρ** Bonfiglioli M7182. Ακριβώς από πάνω του, η μπλε μεταλλική κατασκευή και η ράγα κύλισης έχουν οπή από την οποία περνάει **νήμα** το οποίο συνδέει το στρεφόμενο μέρος του μοτέρ με το **βαγονάκι**, το οποίο μπορεί να κινείται πάνω στη ράγα με ελάχιστες τριβές. Το νήμα τυλίγεται σε **τροχαλία** που είναι προσαρμοσμένη στον άξονα περιστροφής του μοτέρ. Το μέγεθος της τροχαλίας επιλέγεται να έχει τέτοια σχέση στροφών – ακτίνας ώστε η συχνότητα του **inverter** (ρυθμιστής στροφών με ρύθμιση συχνότητας ρεύματος) του μοτέρ σε Hz να αντιστοιχεί στην ταχύτητα του οχήματος (βαγονάκι) σε km/h. Με αυτό τον τρόπο το μοτέρ δύναται να επιταχύνει το βαγονάκι στην ταχύτητα που εμείς επιθυμούμε. Λίγα εκατοστά πριν την κρούση το νήμα αποσυνδέεται από το βαγονάκι για να μην δημιουργεί ανεπιθύμητες διαταραχές κατά την κρούση.

#### 4.1.1.1 Λειτουργία

Τη στιγμή της κρούσης, το δυναμόμετρο καταγράφει τον παλμό και στέλνει τα δεδομένα σε έναν **προενισχυτή-φίλτρο** (charge amplifier) KISTLER 5011. Στην συνέχεια το σήμα διέρχεται μέσω της εισόδου-φίλτρου του ενισχυτή μάρκας National Instruments (NI) SCXI-1305 DIECAST και μετά πάει στον ενισχυτή NI SCXI-1140. Τα δύο παραπάνω όργανα φιλοξενούνται στη μονάδα καταγραφής δεδομένων (Data Acquisition) NI SCXI-1000. Από εκεί, μέσω μίας κάρτας λήψης Data Acquisition NI 16E MIO που είναι προσαρμοσμένη στον υπολογιστή, παίρνουμε το σήμα στο πρόγραμμα LabVIEW Signal Express 2009. Από το LabView έχουμε τη δυνατότητα να εξάγουμε τα δεδομένα σε ένα φύλλο Excel.

Τα δεδομένα που παίρνουμε στον υπολογιστή είναι σε Volt, τα οποία μετατρέπουμε σε Newton. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο μετά τη **βαθμονόμηση** της «μηχανής» (δηλαδή όλης της συνδεσμολογίας), όταν δηλαδή υπολογίσουμε με ανεξάρτητο τρόπο σε πόσα Newton αντιστοιχεί 1 Volt.



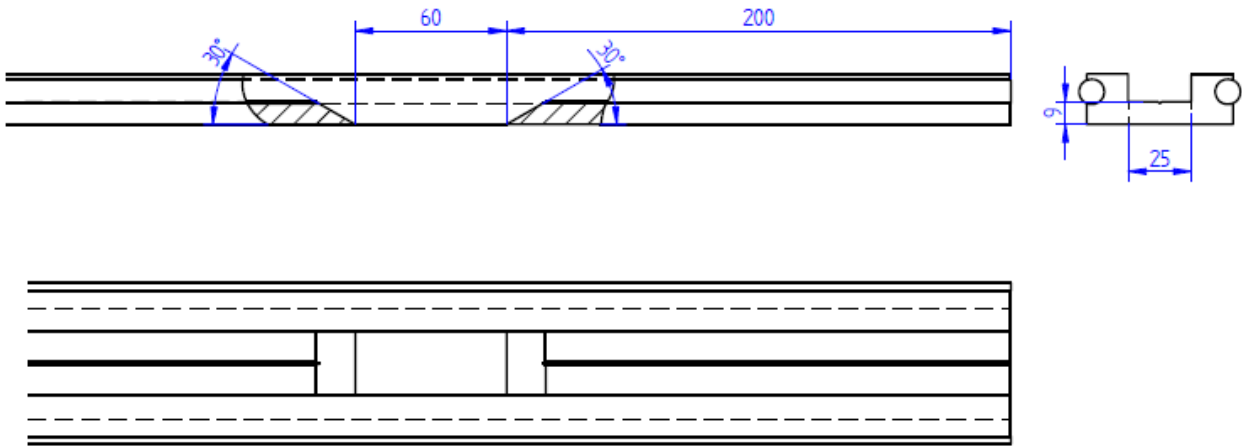
\* Ο παλμογράφος που φαίνεται στο σχήμα δεν χρησιμοποιείται στη συνδεσμολογία. Χρησιμοποιήθηκε όμως στις πρώτες δοκιμές εγκατάστασης του δυναμομέτρου ανάμεσα στις πλάκες για να διαπιστώσουμε ότι αυτό λειτουργεί και να πάρουμε μία πρώτη εκτίμηση του μεγέθους του παλμού

κάρτα Data Acquisition

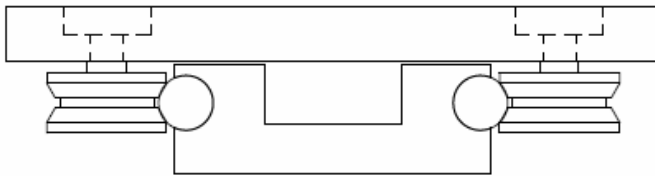


#### 4.1.2 Σχέδιο πειραματικής διάταξης

Μηχανολογικό σχέδιο ράγας – πάνω φαίνονται οι δύο τομές και κάτω η κάτωψη



Μηχανολογικό σχέδιο όπου φαίνεται το βαγονάκι και η ράγα σε τομή. Διακρίνονται οι δύο τροχοί και ο τρόπος που εφαρμόζουν στη ράγα-οδηγό



Παρακάτω βλέπουμε και μία φωτογραφία από την κάτω όψη του βαγονιού



#### 4.1.3 Εργαστηριακός Εξοπλισμός διάταξης sled test

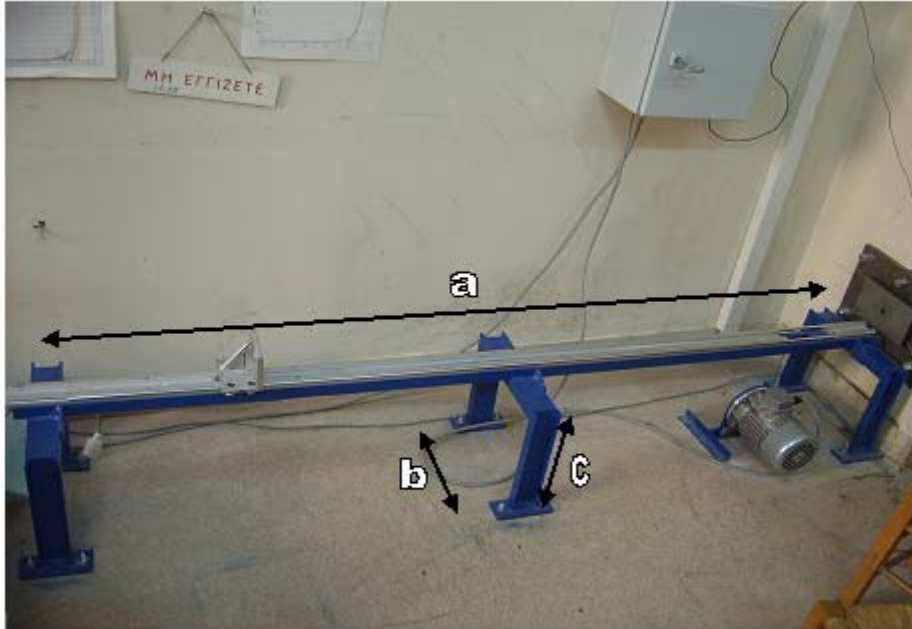
Μεταλλική κατασκευή:

Μασίφ κατασκευή από χάλυβα κατασκευών Π60x30.

Μήκος δοκού  $a = 210\text{cm}$ .

Πλάτος  $b = 36\text{cm}$

Ύψος  $c = 31\text{cm}$



Ράγα:

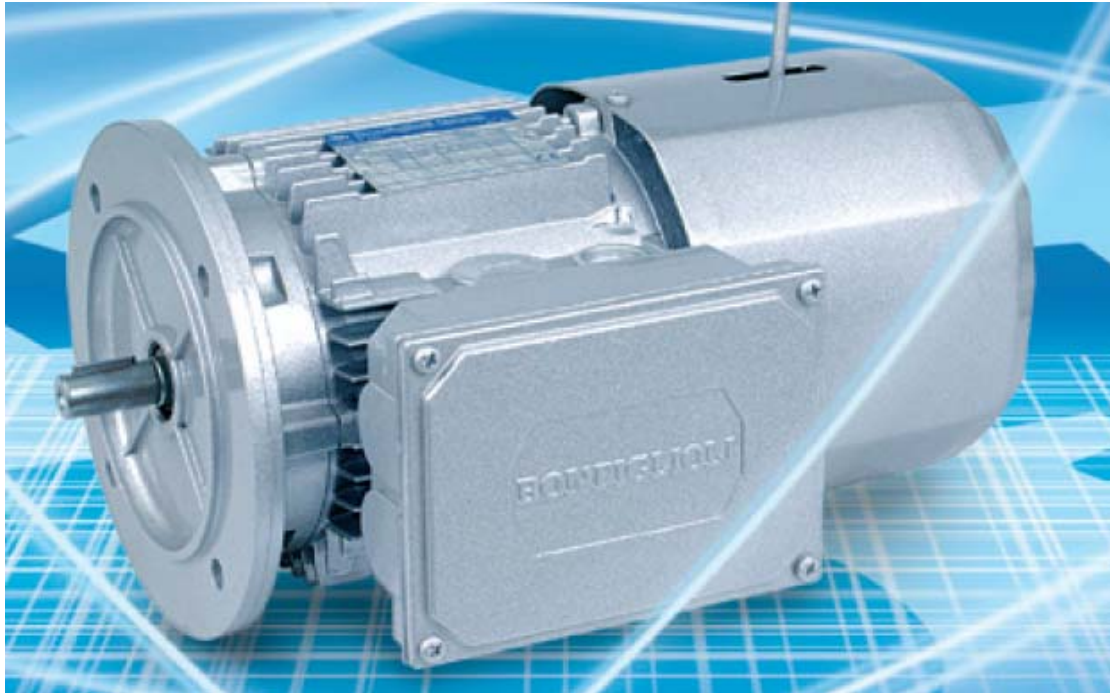
Βιομηχανικού τύπου. Το σχέδιο της ράγας παρουσιάστηκε παραπάνω.

Μήκος 216cm

Πλάτος 6cm



Μοτέρ:  
Bonfiglioli M7182 με Inverter για τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής



Διακόπτης ρεύματος

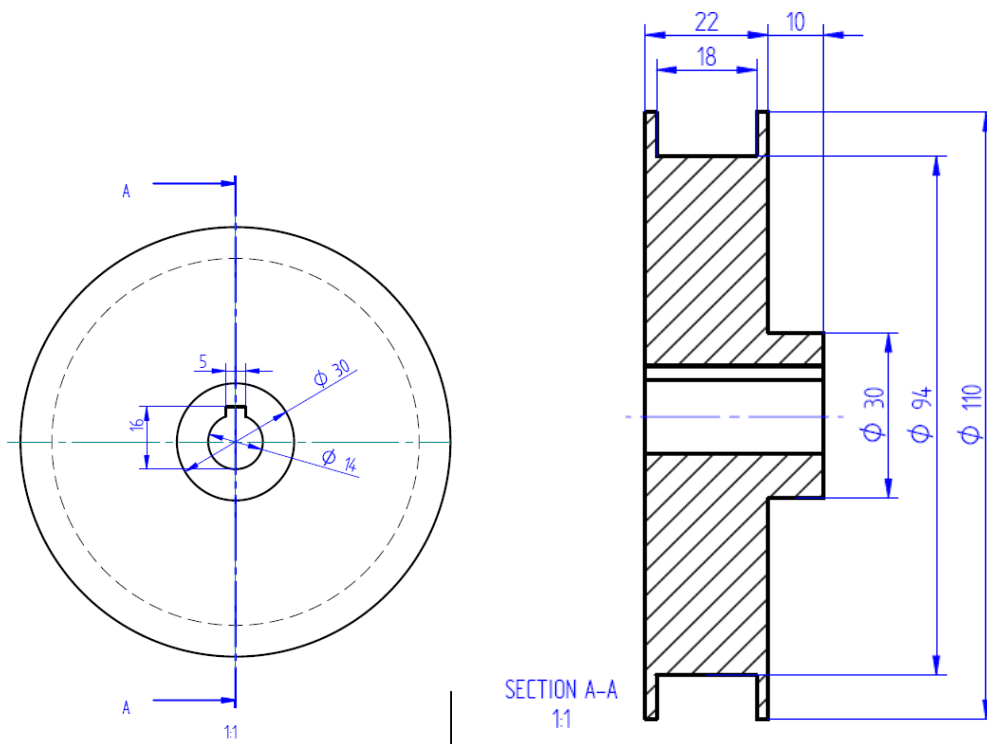
Inverter



Πίνακας ελέγχου

*Πλαστική τροχαλία:*

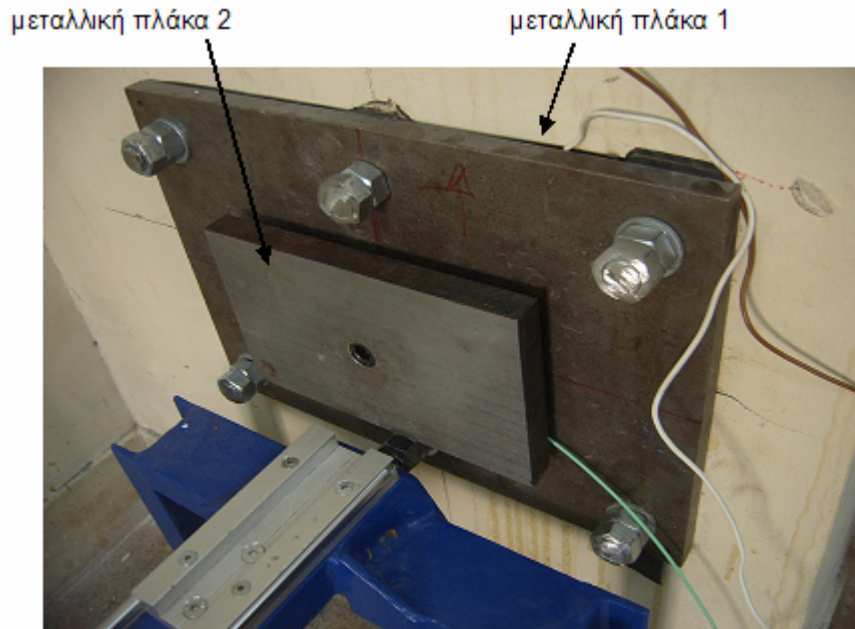
Η τροχαλία αυτή είναι προσαρμοσμένη στο μοτέρ και γύρω της τυλίγεται το νήμα.  
Η φωτογραφία και το σχέδιό της φαίνεται παρακάτω:



*Νήμα:*

Στιβαρό νήμα τύπου SPECTRA

Μεταλλική πλάκα 1:  
Πάχος 1.5cm  
Πλάτος 35cm  
Ύψος 25cm



Μεταλλική πλάκα 2:  
Πάχος 2cm  
Πλάτος 20cm  
Ύψος 12cm

Δυναμόμετρο:



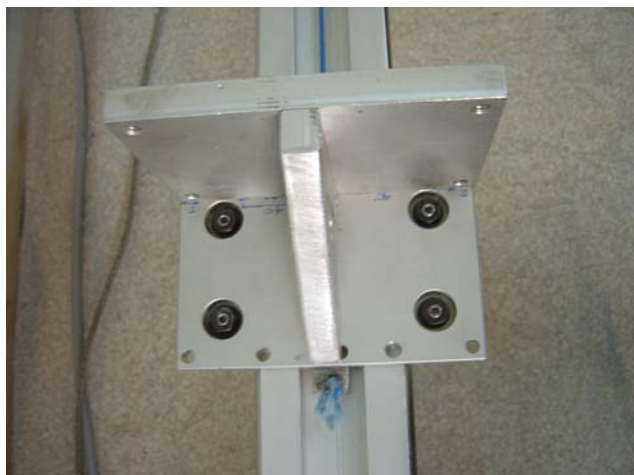
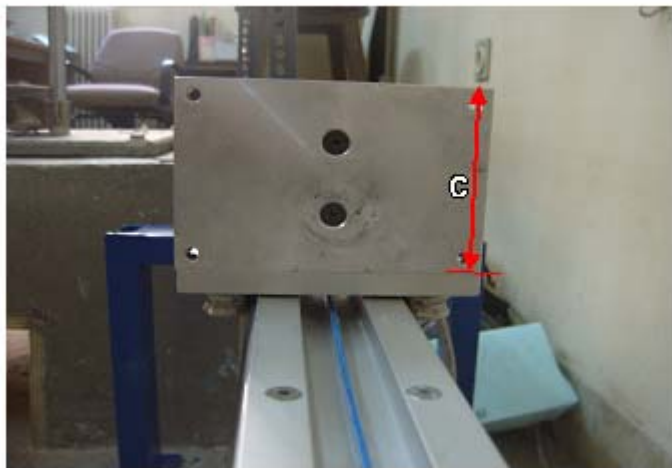
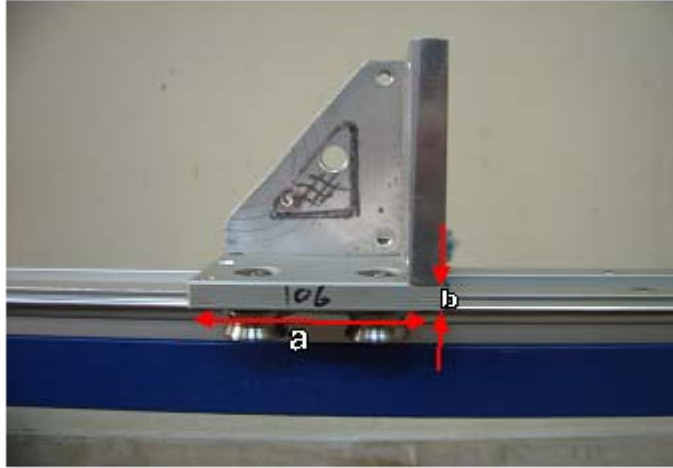
National Instruments Kistler 9041, πιεζο-ηλεκτρικό δυναμόμετρο (load cell). Το δυναμόμετρο είναι βαθμονομημένο από κατασκευής και έχει ευαισθησία  $-4.2 \text{ pC/N}$  (sensitivity). Αυτό σημαίνει ότι για 1Newton δίνει  $4.2 \text{ pCoulomb}$ . Επίσης δίνει αρνητική φόρτιση, ο charge amplifier όμως αντιστρέφει την πολικότητα, οπότε στον υπολογιστή εν τέλει παίρνουμε θετικό σήμα.

*Βαγονάκι:*

Βιομηχανικού τύπου. Το σχέδιο του βαγονιού παρουσιάστηκε παραπάνω.

Βάρος 0.7795kgf

Διαστάσεις  $a = 8\text{cm}$ ,  $b = 1\text{cm}$ ,  $c = 8\text{cm}$



*Προενισχυτής - Φίλτρο:*

Charge amplifier Kistler 5011

Επιλέγουμε στον charge amplifier sensitivity 99.9pC/N και scale 10N/V.

*Είσοδος Ενισχυτή - Φίλτρο:*

National Instruments SCXI-1305

*Ενισχυτής Data Acquisition:*

National Instruments SCXI-1140

Η μεγέθυνση (magnification) στο SCXI επιλέγεται 1 (μονάδα).

*Συσκευή Data Acquisition:*

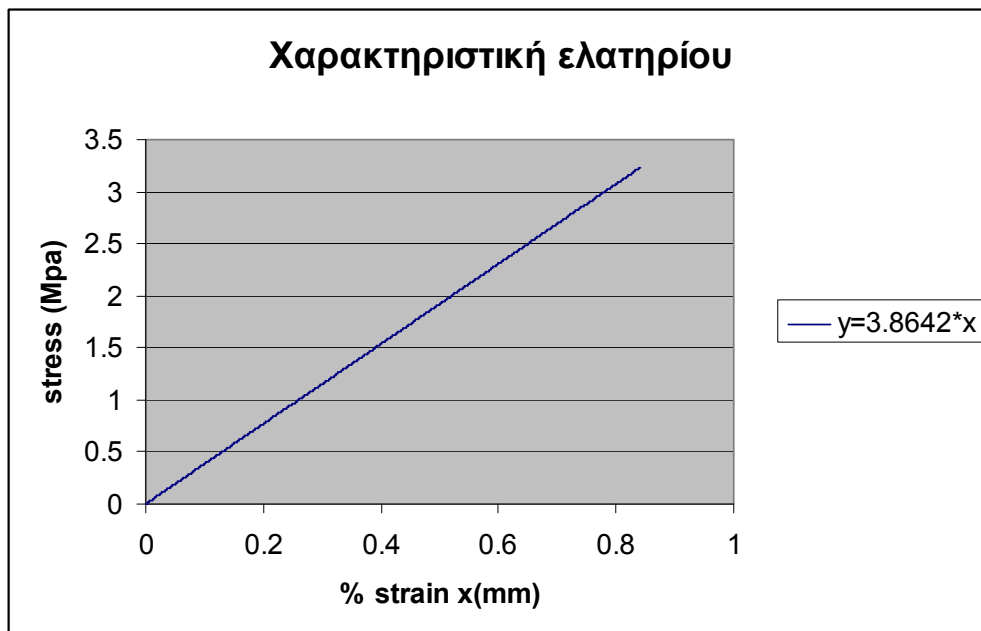
National Instruments SCXI-1000

*Κάρτα Data Acquisition στο PC:*

National Instruments 16E MIO

## 4.2 Βαθμονόμηση (calibration) «μηχανής»

Για να βαθμονομήσουμε τη μηχανή μας χρησιμοποιούμε ελατήριο του οποίου τα χαρακτηριστικά έχουν μετρηθεί και τα γνωρίζουμε. Έχουμε λοιπόν το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο ελατήριο. Το διάγραμμα φαίνεται στη φωτογραφία.



Χαρακτηριστικά ελατηρίου

αρχικό μήκος	Lo	45	mm
διάμετρος	D	30	mm
μέτρο ελαστικότητας	E	3,87	Mpa

Παραμορφώνοντάς το λοιπόν σε συγκεκριμένα μήκη μπορούμε να γνωρίζουμε ποια είναι η τάση την οποία δίνει και επομένως, κάνοντας την κατάλληλη μετατροπή, έχουμε τη δύναμη. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούμε είναι οι παρακάτω:

$$\sigma = E * \epsilon \Rightarrow F / \text{area} = E * dl / L_0 \Rightarrow F = \text{area} * E * dl / L_0 \quad (1)$$

όπου  $\sigma$ -τάση,  $E$ -μέτρο ελαστικότητας,  $\epsilon$ -% παραμόρφωση,  $F$ -δύναμη,  $\text{area}$ -επιφάνεια ελατηρίου,  $dl$ -παραμόρφωση,  $L_0$ -αρχικό μήκος ελατηρίου

$$\text{είναι όμως: } \text{area} = (\pi * D^2) / 4 \quad (2)$$

από τη σχέση (1) λοιπόν παίρνουμε τη δύναμη  $F$ , όταν γνωρίζουμε την παραμόρφωση  $dl$  (την οποία μετράμε). Τα υπόλοιπα μεγέθη της σχέσης είναι σταθερά και γνωστά.

Τοποθετούμε λοιπόν το ελατήριο στην θέση όπου τοποθετούνται τα δοκίμια στην πειραματική μας διάταξη, ανυψωμένο κατάλληλα (κρεμασμένο με σχοινάκι) ώστε να βρίσκεται στο κέντρο της μικρής πλάκας για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το δυναμόμετρο βρίσκεται και αυτό τοποθετημένο στο κέντρο.

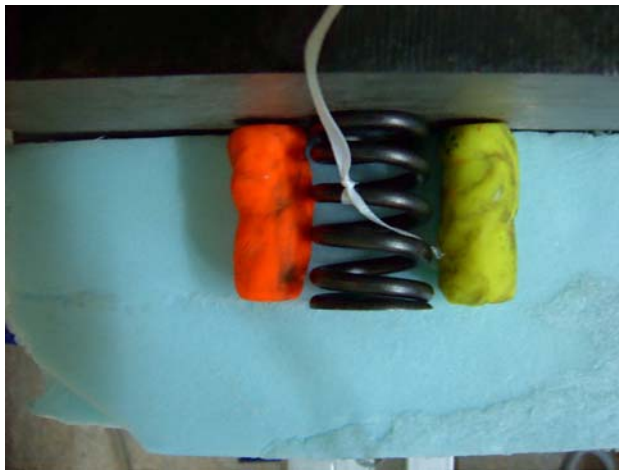


Στο βαγονάκι τοποθετούμε δεξιά και αριστερά δύο κομμάτια πλαστελίνης, έτσι ώστε τελικά, μετρώντας τα και υπολογίζοντας τον μέσο όρο τους να πάρουμε το τελικό μήκος του ελατηρίου. Η δύναμη που ασκούν στην πλάκα τα κομμάτια πλαστελίνης θεωρείται αμελητέα (υπόθεση που επαληθεύεται δοκιμάζοντας το ελατήριο σε κρούση με και χωρίς πλαστελίνες).

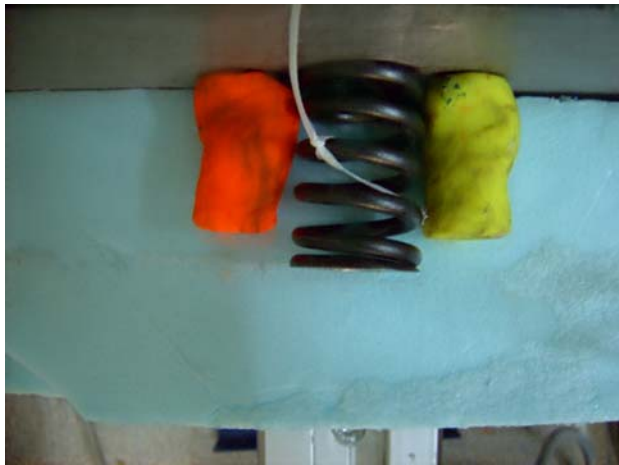


Χτυπάμε το ελατήριο επιταχύνοντας το βαγονάκι στις προκαθορισμένες ταχύτητες, 5, 8, 10, 12 και 15 km/h.

Παρακάτω βλέπουμε ενδεικτικά για δύο κρούσεις το τελικό μήκος των πλαστελινών, συγκρινόμενο με το μήκος του ελατηρίου.



5km/h



10km/h



Μετράμε το μήκος της κίτρινης και της πορτοκαλί πλαστελίνης, υπολογίζουμε τον μέσο όρο τους και αφαιρώντας από το αρχικό μήκος του ελατηρίου, βρίσκουμε σε κάθε περίπτωση την παραμόρφωση του ελατηρίου.

Από το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων διαβάζουμε την ορθή τάση (πίεση) την οποία ασκεί το ελατήριο σε MPa, την οποία για σταθερή διάμετρο και μέτρο ελαστικότητας μετατρέπουμε εύκολα σε Newton.

Από το LabView διαβάζουμε την τάση σε Volt που καταγράφεται.

**Αυτό που θέλουμε είναι να υπολογίσουμε μία σταθερά μετατροπής της τάσης (Volt) σε δύναμη (Newton). Έτσι, στο εξής όταν διαβάζουμε ένα σήμα στο LabView, θα ξέρουμε σε τι δύναμη αντιστοιχεί.**

Παίρνουμε τα παρακάτω:

	V που μετράμε	N	N/V
5km/h	0.355	224.8083	633.2628
8km/h	0.776	382.7817	493.2754
10km/h	1.3	455.6925	350.5327
12km/h	1.9	637.9695	335.7734
15km/h	2.86	789.867	276.1773

Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η αναλογία N/V δεν είναι σταθερή όπως θα περιμέναμε. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε πιθανή αστάθεια της κρούσης και ίσως κάποια φαινόμενα λυγισμού κατά τη διεύθυνση του μήκους του ελατηρίου.

Επειδή το ελατήριο που χρησιμοποιήσαμε είχε αρκετά μικρή διάμετρο και λίγες σχετικά σπείρες, πιθανώς να ενέτεινε τα φαινόμενα αστάθειας.

Ένα πιο σωστό ελατήριο για να βαθμονομήσουμε τη συσκευή μας θα ήταν κάποιο με μεγάλη διάμετρο και πολλές σπείρες. Ακόμα καλύτερο ίσως θα ήταν κάποιο ελαστικό υλικό, για παράδειγμα ένα κυλινδρικό κομμάτι λάστιχο με γνωστές τις ιδιότητές του (βαθμονομημένο).

Επομένως δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιον σταθερό λόγο μετατροπής της τάσης (V) σε δύναμη (N) για ταχύτητα μεταβαλλόμενη.

Αυτό που παρατηρούμε πάντως είναι ότι επαναλαμβάνοντας ένα πείραμα στην ίδια ταχύτητα και με το ίδιο υλικό, έχουμε σταθερή απόκριση. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μία μετρητική διάταξη που έχει ακρίβεια.

Χρειάζεται επομένως να βαθμονομήσουμε το ελατήριο για κάθε ταχύτητα που μας ενδιαφέρει.

**Σημειώνεται εδώ ότι τα πειράματα που θα πραγματοποιήσουμε στη συνέχεια της εργασίας πρόκειται να επαναληφθούν για δοκίμια σε σταθερή ταχύτητα (15km/h).**

Έτσι, χτυπώντας το ελατήριο με μία συγκεκριμένη ταχύτητα κρούσης και επαναλαμβάνοντας αρκετές φορές, αν βρούμε μία σταθερή τιμή για τον λόγο N/V, θα μπορούμε να χρησιμοποιούμε αυτή την τιμή για αυτή την ταχύτητα.

- Για να το ελέγξουμε αυτό επαναλαμβάνουμε το πείραμα τέσσερις φορές για ταχύτητα **15km/h**.

Παίρνουμε τα παρακάτω:

	V που μετράμε	N	N/V
15km/h	2.86	789.867	276.1773
15km/h	2.7	789.867	292.5433
15km/h	2.875	777.7152	270.5096
15km/h	3.15	856.7019	271.9689

Εδώ φαίνεται ότι η διακύμανση είναι αρκετά μικρή.

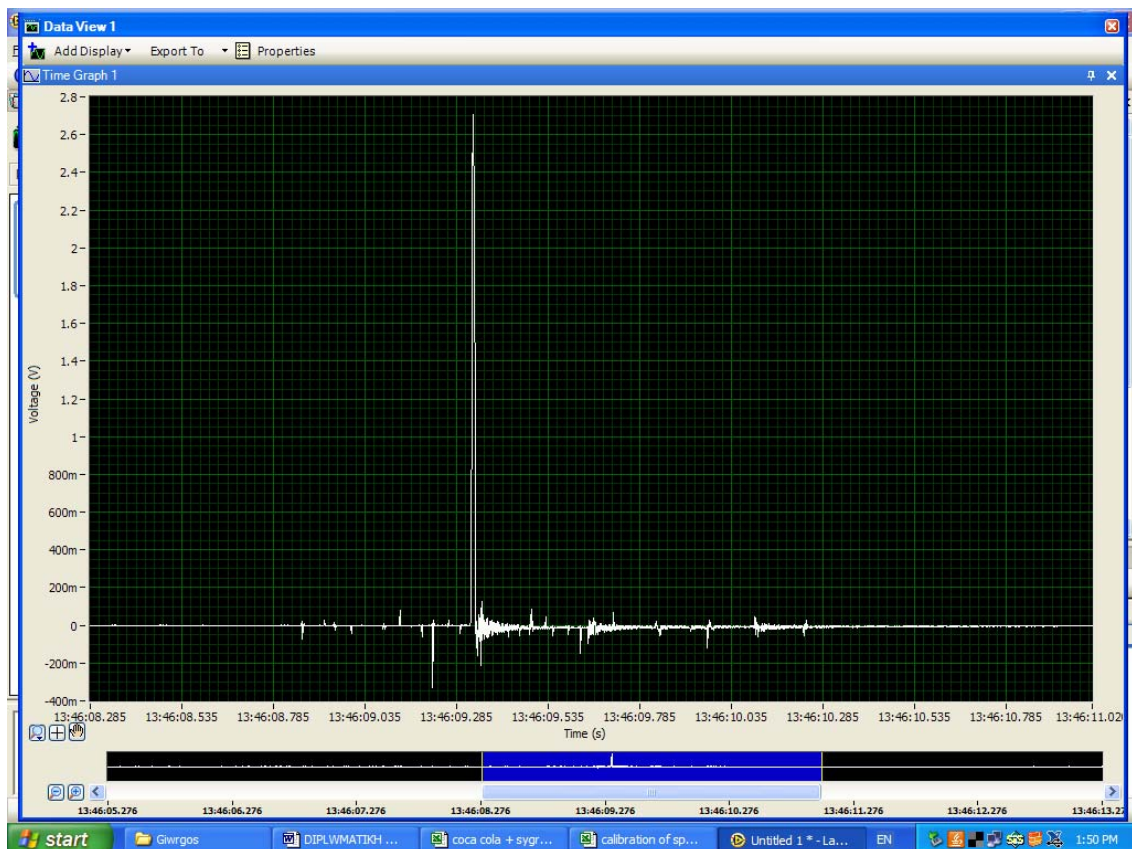
Μπορούμε να χρησιμοποιούμε λοιπόν τον μέσο όρο των παραπάνω μετρήσεων, να έχουμε δηλαδή:

15km/h	
V/N	N/V
0,003603194	277,7997745

Για 15km/h λοιπόν, έχουμε βαθμονομήσει τη μηχανή μας και γνωρίζουμε ότι, με τις παρούσες ρυθμίσεις των ενισχύσεων, σε κάθε Volt που εμφανίζεται στον υπολογιστή αντιστοιχούν περίπου 277,8 Newton.

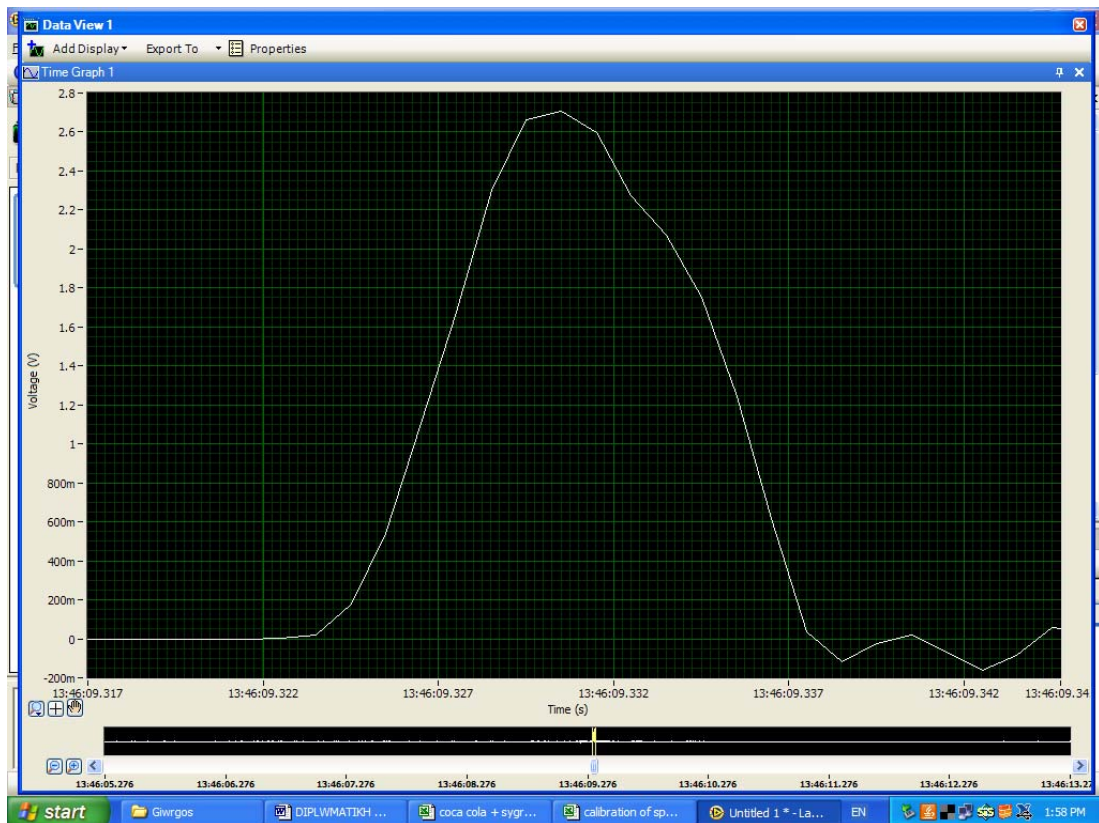
Το φίλτρο low pass του charge amplifier επιλέγεται στα 100Hz. Έτσι, ο θόρυβος που εμφανίζεται στο σήμα περιορίζεται (κόβεται έτσι και η συχνότητα 50Hz του ρεύματος του δικτύου). Τελικά ο θόρυβος που παίρνουμε στο σήμα μας είναι της τάξεως των 2.5mV, μέγεθος που δεν επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων αφού οι παλμοί που παίρνουμε από τα χτυπήματα είναι της τάξεως των 1-5V. Ωστόσο κάποιος θόρυβος (ηλεκτρικός της τάξεως 20-200mV περίπου), μικρής σχετικά συχνότητας, που σχετίζεται με την λειτουργία του μοτέρ δεν κόβεται τελείως, μας χρησιμεύει όμως στη συνέχεια για να επαληθεύσουμε την σωστή λειτουργία της μηχανής και την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας, αφού η πρώτη εμφάνισή του στο σήμα μας, σηματοδοτεί την εκκίνηση του μοτέρ και επομένως του βαγονιού. Ο χρόνος που μεσολαβεί από την εκκίνηση μέχρι τον παλμό, είναι ο χρόνος που έτρεξε το βαγονάκι. Διαιρούμενη η απόσταση που διένυσε (άλλη κάθε φορά, περίπου 1.8m) με τον χρόνο αυτόν, δίνει την ακριβή ταχύτητα του βαγονιού, την οποία συγκρίνουμε με την αναμενόμενη (η συχνότητα σε Hz στην οποία ρυθμίζεται ο inverter έχει υπολογιστεί να αντιστοιχεί σε ταχύτητα σε km/h του βαγονιού και αυτή είναι η αναμενόμενη).

Παρακάτω φαίνεται το σήμα μας σε LabView για κρούση με ελατήριο, όπου παρατηρούμε την λεπτή γραμμή στην αρχή (2,5mV) και την εμφάνιση στη συνέχεια του θορύβου που ξεκινάει με την εκκίνηση του μοτέρ.



**Διάγραμμα 1**

Στη συνέχεια βλέπουμε το σήμα μεγεθυμένο όπου διαπιστώνουμε ότι η επίδραση του θορύβου στην ακρίβεια της μέτρησης είναι αμελητέα



**Διάγραμμα 2**

### 4.3 Πειραματική διαδικασία

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν να επαληθεύσουμε την αρχική μας υπόθεση ότι, χρησιμοποιώντας υλικά υψηλής απορρόφησης ενέργειας όπως είναι οι αφροί, μπορούμε να βελτιώσουμε την απόκριση του παλμού της κρούσης τμημάτων οχήματος όπως είναι το εμπρόσθιο τμήμα και η καμπίνα.

#### 4.3.1 Υλικά – κατασκευές που δοκιμάσαμε σε κρούση και σε τι προσομοιάζουν

Επιχειρώντας να κάνουμε μία πρώτη προσέγγιση προσομοίωσης παραμορφούμενων τμημάτων του οχήματος χρησιμοποιήσαμε:

- 1) Αφρώδες υλικό υψηλής απορρόφησης ενέργειας Comfor Foam με σχετική πυκνότητα  $\rho = 0.108 \text{gr/cm}^3$  και έντονο βισκοελαστικό χαρακτήρα.
- 2) Αναζητήσαμε κάποια κατασκευή που θα μπορούσε να υποτεθεί ότι εξομοιώνει υπό κλίμακα κάποια παραμορφούμενα μέρη οχήματος, όπως για παράδειγμα την καμπίνα των επιβατών ή το εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος (crash box) το οποίο προορίζεται για να παραμορφωθεί σε περίπτωση σύγκρουσης.

Ως τέτοια κατασκευή, επιλέξαμε την συσκευασία αλουμινίου των κοινών αναψυκτικών αφού έχει διαστάσεις πολύ βολικές έτσι ώστε θα μπορούσε υπό κλίμακα να συγκριθεί με κάποια μέρη οχήματος. Ακόμη, είναι ένα δοκίμιο το οποίο μπορούμε να έχουμε σε μεγάλο πλήθος. Επιπλέον, οι συσκευασίες αυτές είναι κατασκευασμένες με σταθερές διαστάσεις και με σταθερές μηχανικές ιδιότητες. Μπορούμε λοιπόν να θεωρούμε ότι μιλάμε για όμοια δοκίμια.

Δοκιμάσαμε λοιπόν τα παρακάτω υλικά, κατασκευές και συνδυασμούς αυτών επιχειρώντας να κάνουμε κάποιες συγκρίσεις.

Στον πίνακα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε τις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και μία σχηματική περιγραφή της εκάστοτε προσομοίωσης και της εκάστοτε σύγκρισης που πραγματοποιήθηκε.

## Πίνακας Πειραματικών Προσομοιώσεων

Περιγραφή	Δοκιμές κρούσης	Τι προσομοιώνει	Σχηματική περιγραφή	Παρατηρήσεις	
<b>Πειραματική προσομοίωση 1</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	ΣΥΓΚΡΙΣΗ: Εμπρόσθιο παραμορφώσιμο τμήμα οχήματος από α) αλουμίνιο β) αφρώδες υλικό	συσκευασία αλουμινίου	εμπρόσθιο τμήμα	 ανένδοτη καμπίνα	βάρος αφρώδους υλικού ~ βάρος συσκευασίας αλουμινίου
	αφρώδες υλικό	εμπρόσθιο τμήμα	 ανένδοτη καμπίνα		
<b>Πειραματική προσομοίωση 2</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	ΣΥΓΚΡΙΣΗ: Όχημα από α) αλουμίνιο β) αλουμίνιο + αφρώδες υλικό	συσκευασία αλουμινίου	ολόκληρο το όχημα		
		συσκευασία αλουμινίου + αφρώδες υλικό 1.7cm	ολόκληρο το όχημα		
<b>Πειραματική προσομοίωση 3</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	ΣΥΓΚΡΙΣΗ: α) Εμπρόσθιο τμήμα από αλουμίνιο + καμπίνα οχήματος επίσης από αλουμίνιο β) Εμπρόσθιο τμήμα από αφρώδες υλικό + καμπίνα οχήματος από αλουμίνιο	δύο συσκευασίες αλουμινίου διαφορετικού βάρους	εμπρός τμήμα + καμπίνα επιβατών		βάρος αφρώδους υλικού ~ βάρος συσκευασίας αλουμινίου εμπροσθίου τμήματος
		συσκευασία αλουμινίου + αφρός 5.2cm	εμπρός τμήμα + καμπίνα επιβατών		
<b>Πειραματική προσομοίωση 4</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	ΣΥΓΚΡΙΣΗ: α) Εμπρόσθιο τμήμα από αλουμίνιο + καμπίνα οχήματος επίσης από αλουμίνιο β) Εμπρόσθιο τμήμα από αφρώδες υλικό + καμπίνα οχήματος από αλουμίνιο	δύο συσκευασίες αλουμινίου διαφορετικού βάρους	εμπρός τμήμα + καμπίνα επιβατών		όγκος αφρώδους υλικού ~ όγκος συσκευασίας αλουμινίου εμπροσθίου τμήματος
		συσκευασία αλουμινίου + αφρός 10.4cm	εμπρός τμήμα + καμπίνα επιβατών		

## 4.3.2 Πειράματα – αξιολόγηση αποτελεσμάτων

### 4.3.2.1 Πειραματική προσομοίωση 1

Εμπρόσθιο παραμορφώσιμο τμήμα οχήματος προσομοιούμενο στην πρώτη περίπτωση από κατασκευή αλουμινίου και στη δεύτερη από αφρώδες υλικό. Η καμπίνα των επιβατών θεωρείται ανένδοτη.

Η συσκευασία αναψυκτικού παίζει τον ρόλο του εμπρόσθιου τμήματος, του τμήματος δηλαδή που είναι σχεδιασμένο για να παραλάβει την παραμόρφωση κατά την κρούση.

Το αφρώδες υλικό παίζει και αυτό τον ίδιο ρόλο.

Υποβάλουμε και τα δύο δοκίμια μόνα τους σε κρούση με την ίδια ταχύτητα και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Ως καμπίνα επιβατών σε αυτή την περίπτωση θεωρείται η ανένδοτη μεταλλική πλάκα.



Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά των δύο δοκιμίων:

ΤΥΠΟΣ Α: (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Βάρος	14gr
Μήκος	11.52cm
Διάμετρος	6.6cm

ΑΦΡΩΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΟ

Βάρος	16.6gr
Μήκος	5.2cm
Διάμετρος	6.3cm



α) 1<sup>η</sup> δοκιμή κρούσης – συσκευασία αλουμινίου

Το δοκίμιο φαίνεται στις φωτογραφίες πριν και μετά την κρούση.



πριν την κρούση (δοκίμιο 1)



μετά την κρούση (δοκίμιο 1)

Μετράμε το τελικό μήκος του δοκιμίου και έχουμε τελικά την παραμόρφωσή του  $d_l=2.02\text{cm}$

**Επαναλαμβάνουμε** την δοκιμή κρούσης άλλες δύο φορές με καινούργια δοκίμια  
Βλέπουμε στη συνέχεια την τελική παραμόρφωση των δύο επαναλήψεων.



2η επανάληψη (δοκίμιο 2)



3η επανάληψη (δοκίμιο 3)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των τριών δοκιμών.

πρίν την κρούση



δοκίμιο 1

δοκίμιο 2

δοκίμιο 3

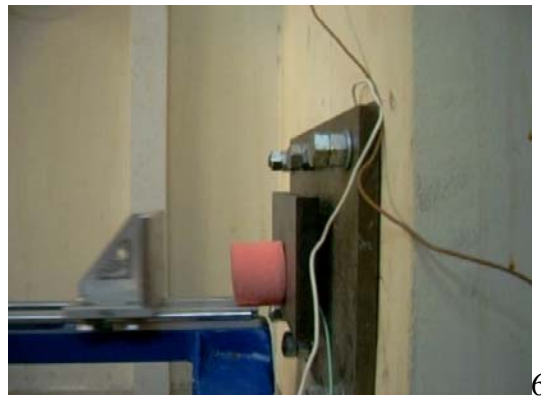
Βλέπουμε ότι το μήκος της τελικής παραμόρφωσης δεν είναι ίδιο για τις τρεις επαναλήψεις. Βέβαια, στην συγκεκριμένη κατασκευή και όσον αφορά τον τρόπο που αυτή καταρρέει, πιθανώς να παίζει σημαντικό ρόλο και ο παράγοντας τύχη, εφόσον δεν είναι μελετημένη για να καταρρέει ομαλά.

Βράχυνση dl δοκίμιο 1	2.02cm
Βράχυνση dl δοκίμιο 2	1.89cm
Βράχυνση dl δοκίμιο 3	1.5cm

Σε επόμενη φάση θα κατασκευάσουμε διαγράμματα της δύναμης που δέχεται το δυναμόμετρο ως προς το χρόνο της κρούσης και της επιτάχυνσης του βαγονιού ως προς το χρόνο. Ίσως τότε μπορέσουμε να εξάγουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα και να παρατηρήσουμε κάποιο πιθανό κοινό χαρακτηριστικό που να διατηρείται και να χαρακτηρίζει και τις τρεις επαναλήψεις.

β) 2<sup>η</sup> δοκιμή κρούσης – αφρώδες υλικό

Παρουσιάζεται η χρονική αλληλουχία των στιγμών της κρούσης



Είναι εμφανή τα βισκοελαστικά χαρακτηριστικά του αφρώδους δοκιμίου καθώς, κατά την επιστροφή του βαγονιού και ενώ αυτό δεν έχει πλέον επαφή με το δοκίμιο, το δεύτερο διατηρεί μία παραμόρφωση η οποία αποκαθίσταται σταδιακά, με ταχύτητα όμως μικρότερη από αυτή του βαγονιού. Βέβαια η επιστροφή στο αρχικό μήκος δεν παίρνει περισσότερο από μισό δευτερόλεπτο.

Πάντως παρότι η παραμόρφωση δεν παραμένει για πολύ, κάποιες άλλες ιδιότητες του υλικού επηρεάζονται από τις συνεχόμενες φορτίσεις, για τον λόγο αυτό το συγκεκριμένο υλικό δεν πρέπει να φορτίζεται επαναλαμβανόμενα για να μην αλλοιώνονται αυτές οι ιδιότητες. Έτσι, το ιδανικό είναι να αφήνουμε αρκετό χρόνο μετά από μια δοκιμή κρούσης προτού υποβάλλουμε ξανά το ίδιο δοκίμιο σε επόμενη δοκιμή.

Επίσης, το υλικό μας επηρεάζεται πάρα πολύ από τη θερμοκρασία και χρειάζεται να βρίσκεται περίπου στους  $22^{\circ}\text{C}$  για διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες.

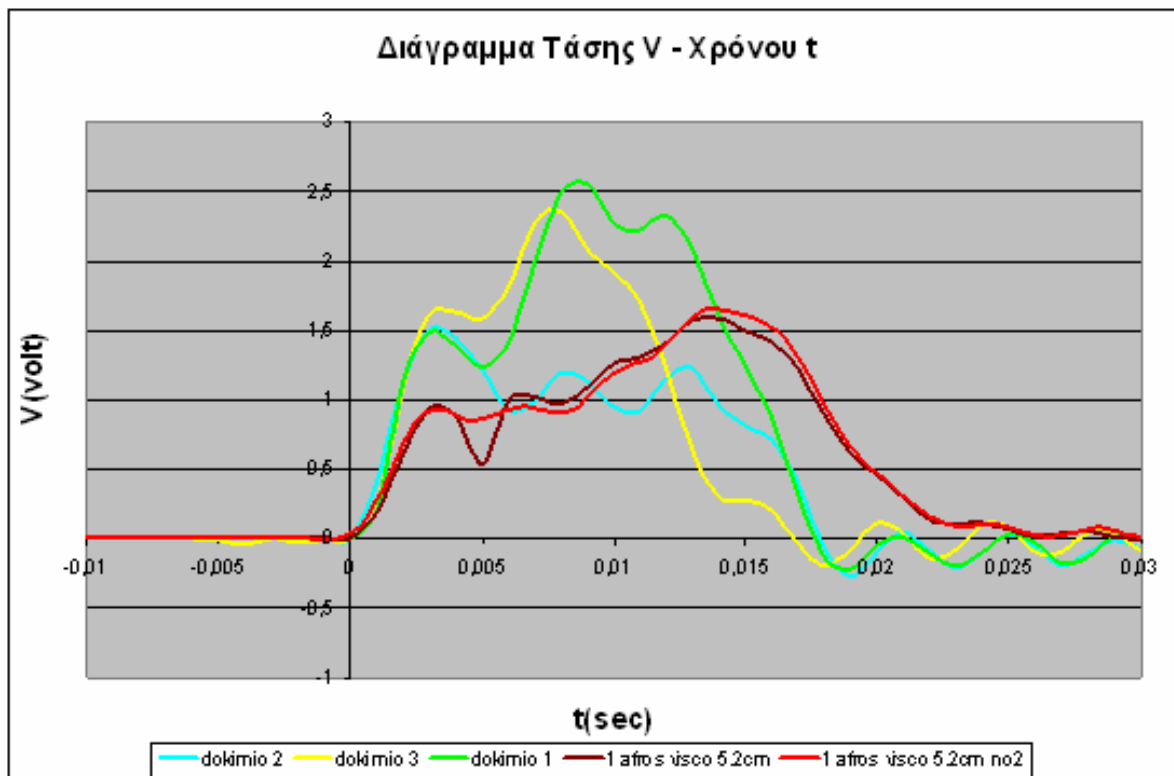
Η δοκιμή κρούσης του αφρώδους υλικού επαναλαμβάνεται 1 φορά, αφού το έχουμε αφήσει να ηρεμήσει για 24 ώρες.

Η εικόνα που παρουσιάζει το δοκίμιο πριν και μετά την κρούση είναι αντίστοιχη της πρώτης επανάληψης.

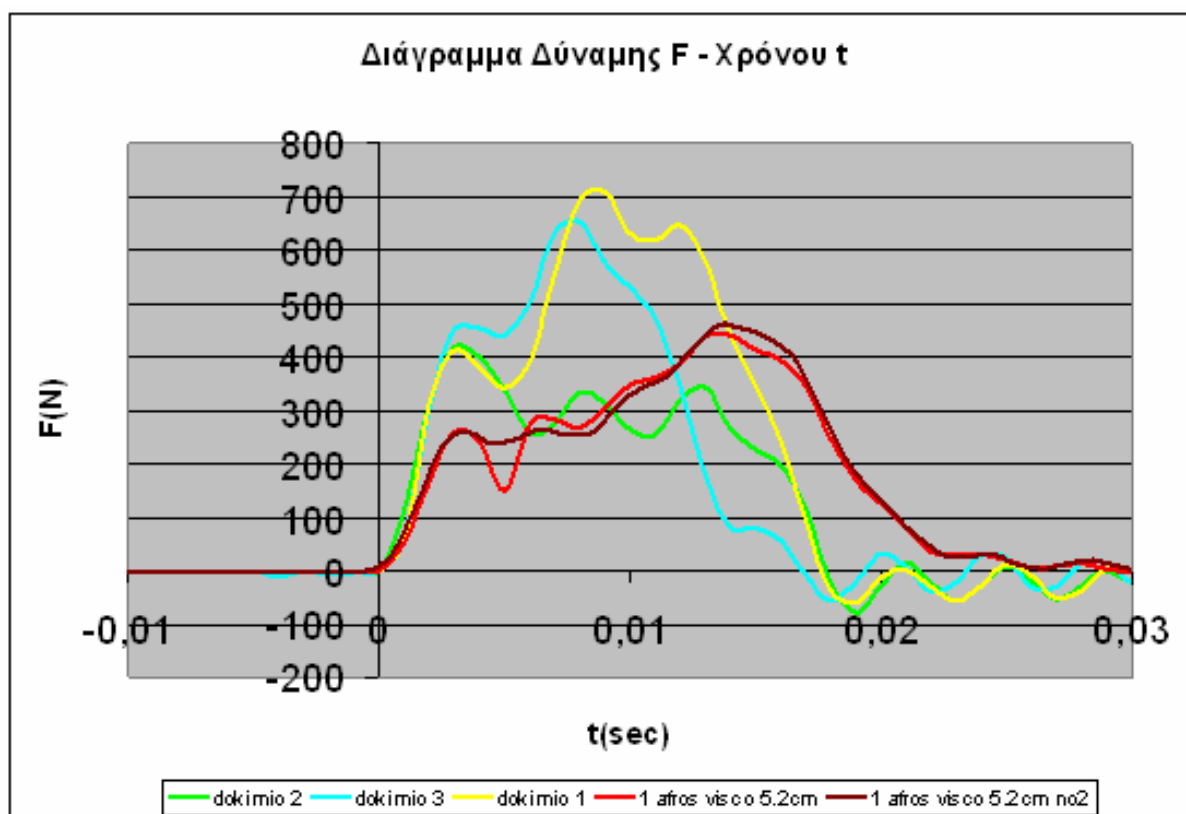
Αφού λοιπόν ολοκληρώσουμε τις δοκιμές, εξάγουμε σε Excel τα δεδομένα που έχουμε καταγράψει στο LabView και κατασκευάζουμε σε πρώτη φάση τα διαγράμματα **τάσης V(volt) – χρόνου t(sec)** για τις δύο δοκιμές και για όλες τις επαναλήψεις.

Μετατοπίζουμε κατάλληλα στο χρόνο τα διαγράμματα ώστε να έχουμε την έναρξη του παλμού κρούσης στην αρχή των αξόνων ώστε να μπορούμε ευκολότερα να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους.

Προβάλλουμε όλα τα διαγράμματα σε κοινούς άξονες και έχουμε την παρακάτω εικόνα.



Γνωρίζοντας ότι 1V αντιστοιχεί σε 277.8N, κατασκευάζουμε το διάγραμμα δύναμης F (N) – χρόνου t (sec).



Τέλος, από τη σχέση  $F=m \cdot a$ ,

όπου

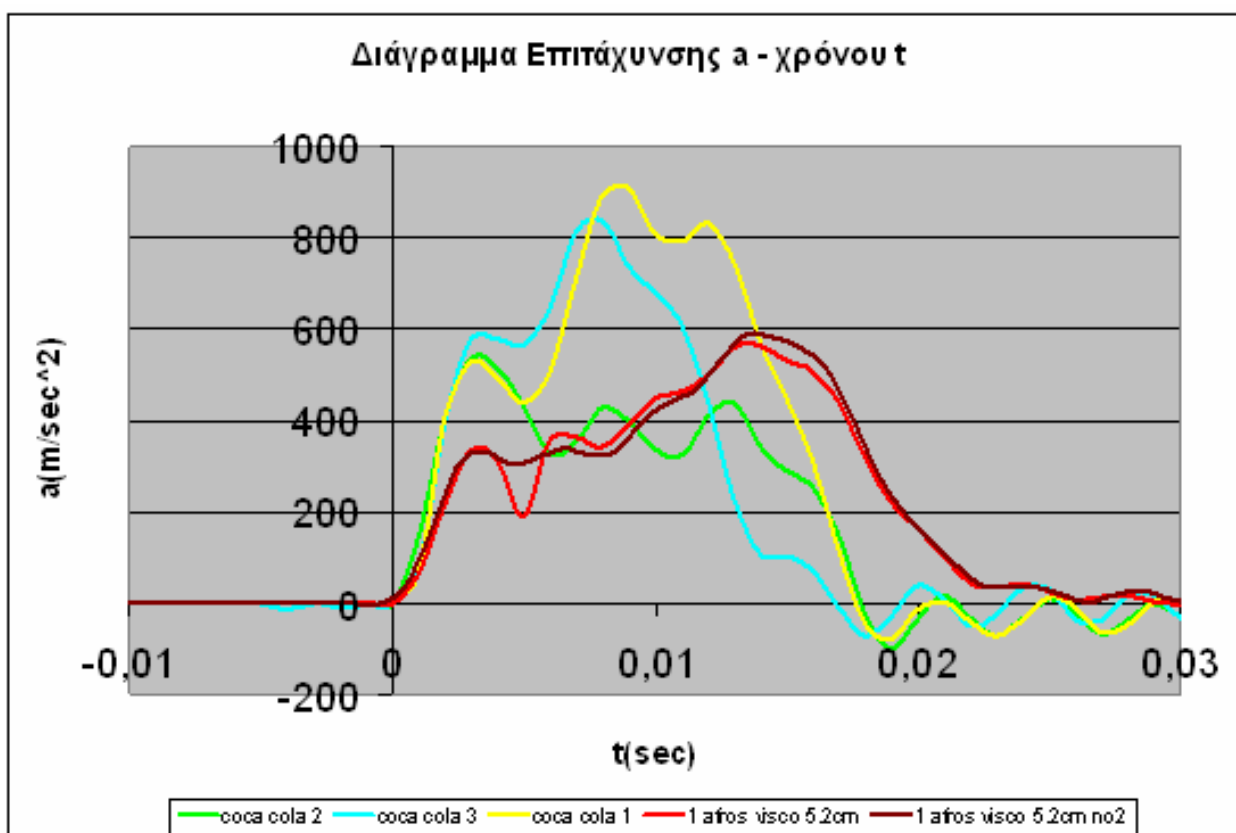
$F$ =δύναμη που μετράμε,

$m$ =μάζα βαγονιού,

$a$ =επιτάχυνση (ή επιβράδυνση) βαγονιού

μπορούμε να πάρουμε την επιτάχυνση  $a=F/m$  αφού η μάζα του βαγονιού είναι γνωστή (0.7795kgf) και σταθερή.

Έτσι, παίρνουμε τελικά το διάγραμμα **επιτάχυνσης  $a(m/sec^2)$  – χρόνου  $t(sec)$** .



### Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα βγάζουμε κάποια **συμπεράσματα**.

Βλέπουμε ότι η μέγιστη δύναμη για το αφρώδες υλικό δεν έφτασε σε τόσο υψηλά επίπεδα όσο για τη δοκίμιο από αλουμίνιο.

Το ίδιο συνέβη και για την επιτάχυνση.

Είχαμε λοιπόν γενικά μικρότερες δυνάμεις και επιταχύνσεις. Επίσης είχαμε **μικρότερο ρυθμό αύξησης αυτών των μεγεθών** αφού, αν δούμε τα διαγράμματα F-t και a-t, βλέπουμε ότι η **κλίση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης** είναι μικρότερες για το αφρώδες δοκίμιο σε σχέση με αυτές για το δοκίμιο αλουμινίου.

Οι δύο ρυθμοί αυτοί ανάπτυξης των μεγεθών της δύναμης και τις επιτάχυνσης είναι πολύ σημαντικοί για την αυτοκινητοβιομηχανία και ειδικά για την παθητική ασφάλεια των οχημάτων. Είναι λογικό, καθώς πολλές συσκευές ασφαλείας στα οχήματα ενεργοποιούνται με αισθητήρες.

Δεν είναι λοιπόν αρκετό ο αισθητήρας να επεξεργάζεται μόνο τις επιβραδύνσεις που έχουμε σε μία κρούση και ανάλογα να στέλνει σήμα στους αερόσακους ότι πρέπει να ανοίξουν.

Ίσως όταν έχουμε πολύ μεγάλες επιβραδύνσεις να είναι πια πολύ αργά. Το θέμα είναι εκείνη τη στιγμή οι αερόσακοι να είναι ήδη ανοικτοί.

Πιο χρήσιμο μέγεθος λοιπόν είναι ο ρυθμός ανάπτυξης των παραπάνω επιβραδύνσεων, ο οποίος, εάν είναι πολύ μεγάλος σημαίνει ότι οι αερόσακοι θα πρέπει να ανοίξουν ενώ αν δεν είναι μεγάλος, ίσως να μην φτάσει το όχημα σε μεγάλες επιβραδύνσεις και ίσως να μην χρειαστεί οι αερόσακοι να ανοίξουν.

Ειδικότερα, η κλίση της επιτάχυνσης καλείται διεθνώς jerk και συμβολίζεται με j. [9]

Στην παράγραφο «ανάλυση αποτελεσμάτων» θα εξετάσουμε ξανά αυτό το μέγεθος.

### **Εκτίμηση αποτελέσματος πειραματικής προσομοίωσης 1**

Μια εκτίμηση που μπορούμε να κάνουμε λοιπόν είναι ότι το αφρώδες υλικό είχε **καλύτερη συμπεριφορά** στην κρούση και θα προστάτευε καλύτερα τους επιβάτες. Το βάρος του είναι περίπου το ίδιο με αυτό της συσκευασίας αλουμινίου.

Ο όγκος του ωστόσο ήταν περίπου ο μισός επομένως, κατά μία έννοια, έχει «συμπυκνωμένη» ικανότητα απορρόφησης της κρούσης.

Λογικά ένα υλικό που **δεν αυξάνει το βάρος** ενός οχήματος και με **μικρό όγκο** καταφέρνει να **μειώνει τον κίνδυνο** τραυματισμού των επιβατών, θα πρέπει να είναι χρήσιμο στην αυτοκινητοβιομηχανία.



#### 4.3.2.2 Πειραματική προσομοίωση 2

Όχημα σε κρούση προσομοιούμενο στην πρώτη περίπτωση από κατασκευή αλουμινίου και στη δεύτερη από κατασκευή αλουμινίου ενισχυμένη με αφρώδες υλικό.



Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά της συσκευασίας αλουμινίου και της αφρώδους επέκτασης:

**ΤΥΠΟΣ Α: (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Βάρος	14gr
Μήκος	11.52cm
Διάμετρος	6.6cm

**ΑΦΡΩΔΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗ**

Βάρος	6.5gr
Πάχος	1.7cm
Επιφάνεια	6.55cm*5.2cm

α) 1η δοκιμή κρούσης – συσκευασία αλουμινίου

Το είδος δοκιμίου που χρησιμοποιούμε στη δοκιμή αυτή είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην 1η δοκιμή της πειραματικής προσομοίωσης 1. Οπότε δεν επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και προχωράμε στην 2η δοκιμή κρούσης.

β) 2η δοκιμή κρούσης – συσκευασία αλουμινίου + αφρώδες υλικό 1.7cm

Παρακάτω βλέπουμε το δοκίμιο και τον αφρό πριν και μετά την κρούση.



Μετράμε το τελικό μήκος του δοκιμίου και παίρνουμε τελικά την παραμόρφωσή του  $d_l=0.62\text{cm}$

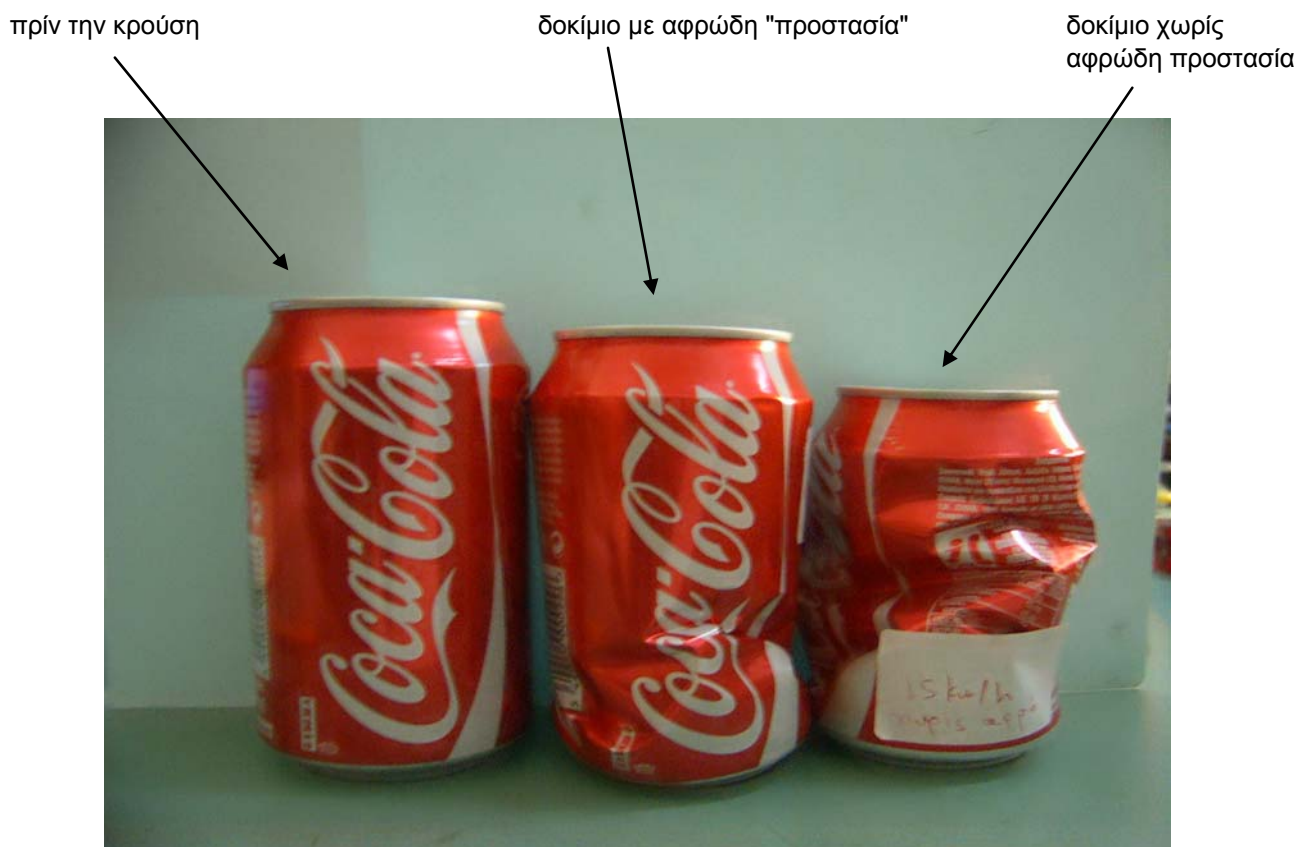
Η διαδικασία **επαναλαμβάνεται δύο φορές**. Παίρνουμε τελικά:

Βράχυνση $d_l$ δοκίμιο 4 + 1.7cm αφρού	0.62cm
Βράχυνση $d_l$ δοκίμιο 5 + 1.7cm αφρού	1.89cm

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των δύο δοκιμών μετά την κρούση.

Για τη σύγκριση επιλέξαμε την πρώτη επανάληψη από τις δοκιμές χωρίς το αφρώδες υλικό και επίσης την πρώτη επανάληψη από τις δοκιμές με την αφρώδη «προστασία».

Φαίνεται καθαρά και με το μάτι ότι η παραμόρφωση του δοκιμίου υπό την προστασία του αφρώδους υλικού ήταν περίπου το 1/3 αυτής του «απροστάτευτου» δοκιμίου. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε η πρώτη επανάληψη από κάθε είδος δοκιμών.

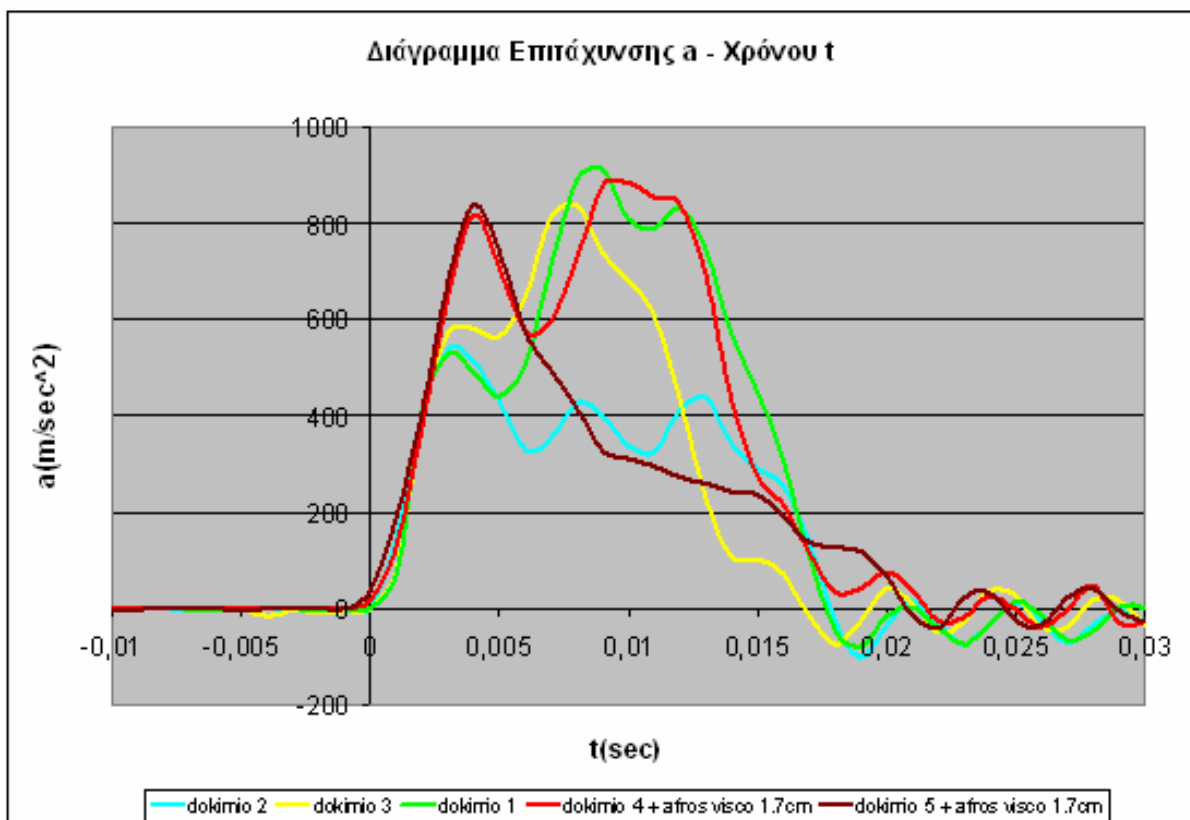
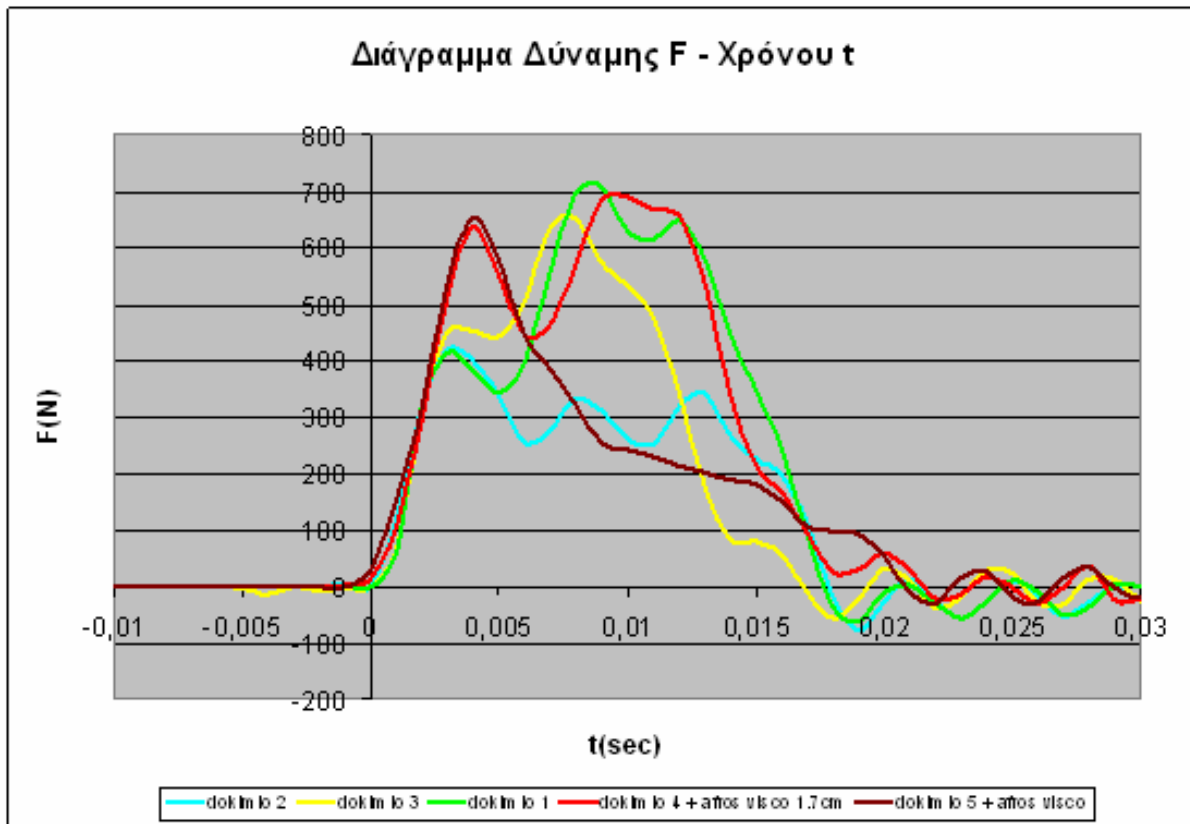


	δοκίμιο 1	δοκίμιο 4 + αφρός 1.7cm
αρχικό μήκος (cm)	11.52	11.52
τελικό μήκος (cm)	9.5	10.9
βράχυνση dl (cm) δοκιμίου	2.02	0.62

Τις μετρήσεις από τις δύο δοκιμές κρούσεις (**τρεις επαναλήψεις** το δοκίμιο χωρίς αφρό και **δύο επαναλήψεις** το δοκίμιο με αφρό) τις παίρνουμε στο LabView, τις εξάγουμε σε Excel και στη συνέχεια τις προβάλλουμε στο ίδιο διάγραμμα για να έχουμε τη σύγκριση.

Για να πάρουμε την έναρξη όλων των παλμών κρούσης στην αρχή των αξόνων, τα μετατοπίζουμε κατάλληλα στο χρόνο, όπως ακριβώς κάναμε και στην προηγούμενη πειραματική προσομοίωση.

Τα διαγράμματα δύναμης  $F(N)$  – χρόνου  $t(sec)$  και επιτάχυνσης  $a(m/sec^2)$  – χρόνου  $t(sec)$  που παίρνουμε φαίνονται παρακάτω:



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων πειραματικής προσομοίωσης 2

Στην περίπτωση αυτή όπως βλέπουμε δεν έχουμε κάποια προφανή υπεροχή της περίπτωσης δοκιμίου με προστασία αφρώδους υλικού. Οι μέγιστες τιμές της δύναμης και της επιτάχυνσης φαίνεται να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, όπως επίσης και οι κλίσεις των μεγεθών αυτών δεν φαίνεται να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά.

Παρατηρώντας ωστόσο και την τελική εικόνα των δοκιμίων, από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε ίσως να εξάγουμε κάποιο πόρισμα.

Φαίνεται λοιπόν ότι το **πρώτο τσάκισμα (buckling) συνέβη νωρίτερα** (σε όλες τις επαναλήψεις) στην περίπτωση του δοκιμίου χωρίς αφρό σε σχέση με την περίπτωση του δοκιμίου με προστατευτικό αφρό. Ένας λόγος που ίσως οδήγησε σε αυτό το αποτέλεσμα είναι ότι η αφρώδης επέκταση, πιέζοντας σταδιακά το δοκίμιο αλουμινίου, το βοήθησε να «πατήσει» πολύ συμμετρικά στην πλάκα και να τσακίσει έτσι πιο δύσκολα (εφόσον για να συμβεί η πρώτη κατάρρευση πρέπει να υπάρχει κάποια ατέλεια του υλικού, της θέσης του κλπ, από την οποία θα ξεκινήσει η διαρροή).

Επίσης μοιάζει να παρατάθηκε λίγο ο χρόνος του παλμού κρούσης, πράγμα που θα μπορούσε να μας οδηγήσει στη σκέψη ότι ίσως, στην περίπτωση του δοκιμίου με την αφρώδη επέκταση, είχαμε **μικρότερη μέση επιτάχυνση**.

Γενικά, φαίνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι ασφαλές να προσπαθεί να συγκρίνει κανείς δύο κρούσεις απλά και μόνο από τα διαγράμματα, εκτός και αν είναι πολύ έμπειρος.

Θα ήταν πολύ χρήσιμο να είχαμε έναν τρόπο να συγκρίνουμε τους παλμούς κρούσης και την επικινδυνότητα τους, ανάγοντας τους σε έναν και μόνο αριθμό.

Μια τέτοια μέθοδος θα παρουσιασθεί στην παράγραφο «ανάλυση αποτελεσμάτων».

### Μικρότερη παραμόρφωση οχήματος

Ένα άλλο σημείο που ίσως έχει σημασία είναι ότι ο αφρώδης προφυλακτήρας προστάτευσε από καταστροφή σε μεγάλο βαθμό το όχημα.

Αν λάβουμε υπόψη ότι ο λόγος της μάζας του ως προς την μάζα της καμπίνας ήταν  $6,5\text{gr}/14\text{gr}=46.4\%$  και ο λόγος του μήκους του προς το μήκος της καμπίνας ήταν  $1.7\text{cm}/11.52\text{cm}=14.7\%$ , ενώ ο λόγος της διαφοράς των παραμορφώσεων των δύο δοκιμίων (η παραμόρφωση που απετράπη) προς την παραμόρφωση χωρίς προφυλακτήρα είναι  $(2.02-0.62)\text{cm}/2.02\text{cm}=69.3\%$ , μπορούμε να πούμε ότι η χρήση του αφρώδους υλικού παρουσιάζει ενδιαφέρον.

### 4.3.2.3 Πειραματική προσομοίωση 3

Εμπρόσθιο παραμορφώσιμο τμήμα οχήματος προσομοιούμενο στην πρώτη περίπτωση από κατασκευή αλουμινίου και στη δεύτερη από αφρώδες υλικό πάχους 5.2cm. Καμπίνα επιβατών παραμορφώσιμη, προσομοιούμενη και στις δύο περιπτώσεις από κατασκευή αλουμινίου βαρύτερη από αυτήν που προσομοιώνει το εμπρόσθιο τμήμα.

Το πείραμα αυτό είναι παρόμοιο με το προηγούμενο με τη διαφορά ότι η καμπίνα σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ανένδοτη. Έτσι, θα έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε, εκτός από τις επιβραδύνσεις που θα δεχτεί το βαγονάκι, την παραμόρφωση που πιθανώς θα υποστεί η καμπίνα και κατά πόσο θα προστατευτεί σε κάθε περίπτωση.

Το εμπρόσθιο παραμορφούμενο τμήμα του οχήματος έχει στις δύο περιπτώσεις περίπου ίδιο βάρος και προσομοιώνεται:

A) από crash box αλουμινίου

B) από αφρώδες δοκίμιο

Το πλαίσιο της καμπίνας είναι και στις δύο περιπτώσεις ισοδύναμο.



Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά των συσκευασιών αλουμινίου και του αφρώδους υλικού:

**ΤΥΠΟΣ Β: (ΠΡΑΣΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Βάρος	17.3gr
Μήκος	11.32cm
Διάμετρος	6.9cm

**ΤΥΠΟΣ Α: (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Βάρος	14gr
Μήκος	11.52cm
Διάμετρος	6.6cm

**ΑΦΡΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ**

Βάρος	16.6gr
Μήκος	5.2cm
Διάμετρος	6.3cm



α) 1η δοκιμή κρούσης – δύο συσκευασίες αλουμινίου

Παρακάτω βλέπουμε τις συσκευασίες πριν και μετά την κρούση



πριν



μετά

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τρεις φορές και έχουμε τα εξής:

	Συνολική βράχυνση dl των δύο συσκευασιών
Επανάληψη 1	1.2cm
Επανάληψη 2	1.8cm
Επανάληψη 3	1.3cm

Στη φωτογραφία βλέπουμε το αποτέλεσμα των τριών επαναλήψεων

πριν την κρούση

1η επανάληψη

2η επανάληψη

3η επανάληψη



Παρατηρούμε, τόσο από τους αριθμούς, όσο και από την εικόνα, ότι η συνολική βράχυνση των δοκιμίων δεν έχει μεγάλη διακύμανση αλλά παραμένει περίπου σταθερή.

β) 2<sup>η</sup> δοκιμή κρούσης – συσκευασία αλουμινίου + αφρώδες υλικό 5.2cm

Παρακάτω βλέπουμε τη συσκευασία και τον αφρό πριν και μετά την κρούση



πριν



μετά

Η πρώτη εντύπωση είναι ότι το δοκίμιο αλουμινίου δεν υπέστη καμία παραμόρφωση ή φθορά, πράγμα που επαληθεύουμε εξετάζοντάς το προσεκτικά από κοντά.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 2 φορές. Και στις 2 περιπτώσεις έχουμε παραμόρφωση της συσκευασίας αλουμινίου μηδενική.

Φαίνεται καθαρά στην φωτογραφία ότι τα δοκίμια παρέμειναν άθικτα.

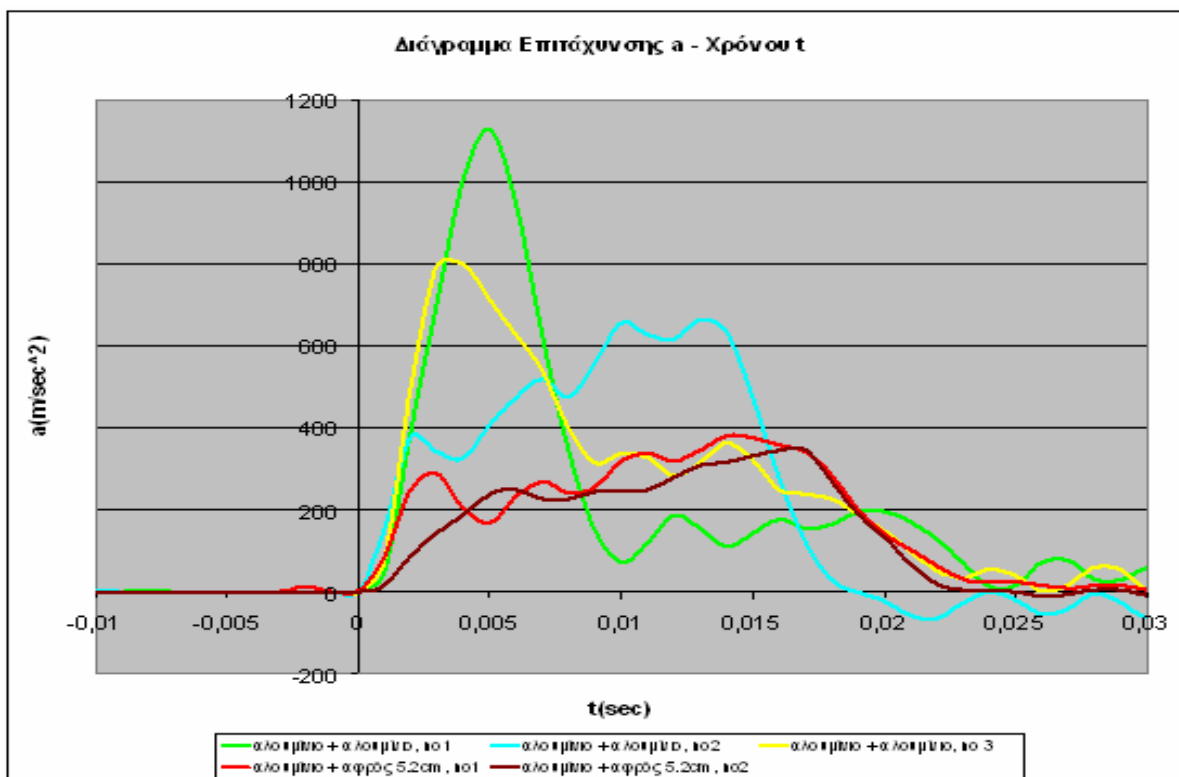
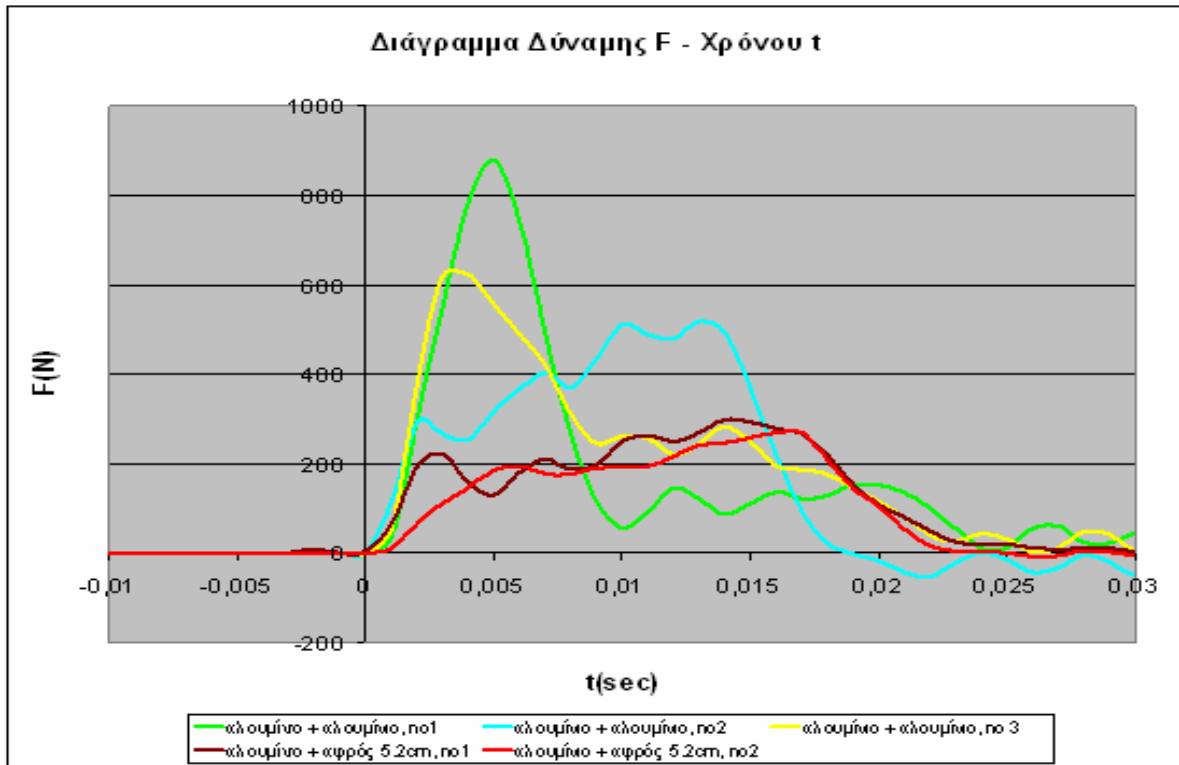
πρίν την κρούση

1η επανάληψη

2η επανάληψη



Τα διαγράμματα δύναμης  $F(N)$  – χρόνου  $t(sec)$  και επιτάχυνσης  $a(m/sec^2)$  – χρόνου  $t(sec)$  που παίρνουμε φαίνονται παρακάτω:



## **Συμπεράσματα**

Είναι ξεκάθαρο σε αυτή την περίπτωση ότι το αφρώδες υλικό συγκρινόμενο με κατασκευή αλουμινίου περίπου ίδιας μάζας, είχε πολύ καλύτερη απόκριση στην κρούση και προστάτεψε πολύ περισσότερο την καμπίνα από καταστροφή.

Βλέπουμε στα διαγράμματα ότι είχαμε πολύ μικρότερες δυνάμεις και επιταχύνσεις και ταυτόχρονα ο παλμός κρούσης είχε λίγο μεγαλύτερη διάρκεια. Οι δύο αυτές παράμετροι δεν μπορούν παρά να βελτιώνουν την κρουστική συμπεριφορά του υποθετικού οχήματος και να μειώνουν την επικινδυνότητα της κρούσης.

Το γεγονός μάλιστα ότι είχε περίπου τον μισό όγκο από την κατασκευή αλουμινίου, δίνει στο αφρώδες υλικό ένα επιπλέον συγκριτικό πλεονέκτημα καθιστώντας το ακόμη περισσότερο αποτελεσματικό και πρακτικό.

#### 4.3.2.4 Πειραματική προσομοίωση 4

Εμπρόσθιο παραμορφώσιμο τμήμα οχήματος προσομοιούμενο στην πρώτη περίπτωση από κατασκευή αλουμινίου και στη δεύτερη από αφρώδες υλικό πάχους 10.4cm. Καμπίνα επιβατών παραμορφώσιμη, προσομοιούμενη και στις δύο περιπτώσεις από κατασκευή αλουμινίου βαρύτερη από αυτήν που προσομοιώνει το εμπρόσθιο τμήμα.

Στο πείραμα αυτό προσομοιώνεται το εμπρόσθιο τμήμα από δύο διαφορετικά υλικά-κατασκευές περίπου ίδιου όγκου.



Τα χαρακτηριστικά των συσκευασιών αλουμινίου και του αφρώδους υλικού παρουσιάζονται παρακάτω:

**ΤΥΠΟΣ Β: (ΠΡΑΣΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Βάρος	17.3gr
Μήκος	11.32cm
Διάμετρος	6.9cm

**ΤΥΠΟΣ Α: (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Βάρος	14gr
Μήκος	11.52cm
Διάμετρος	6.6cm

**ΑΦΡΩΔΕΣ ΥΛΙΚΟ**

Βάρος	33.2gr
Μήκος	10.4cm
Διάμετρος	6.3cm



α) 1<sup>η</sup> δοκιμή κρούσης – δύο συσκευασίες αλουμινίου διαφορετικού βάρους

Η δοκιμή αυτή είναι ίδια με την πρώτη δοκιμή της πειραματικής προσομοίωσης 3.

β) 2<sup>η</sup> δοκιμή κρούσης – μία συσκευασία αλουμινίου + αφρώδες υλικό πάχους 10.4cm

Στις φωτογραφίες βλέπουμε την συσκευασία αλουμινίου και το αφρώδες υλικό πριν και μετά την κρούση:



πριν

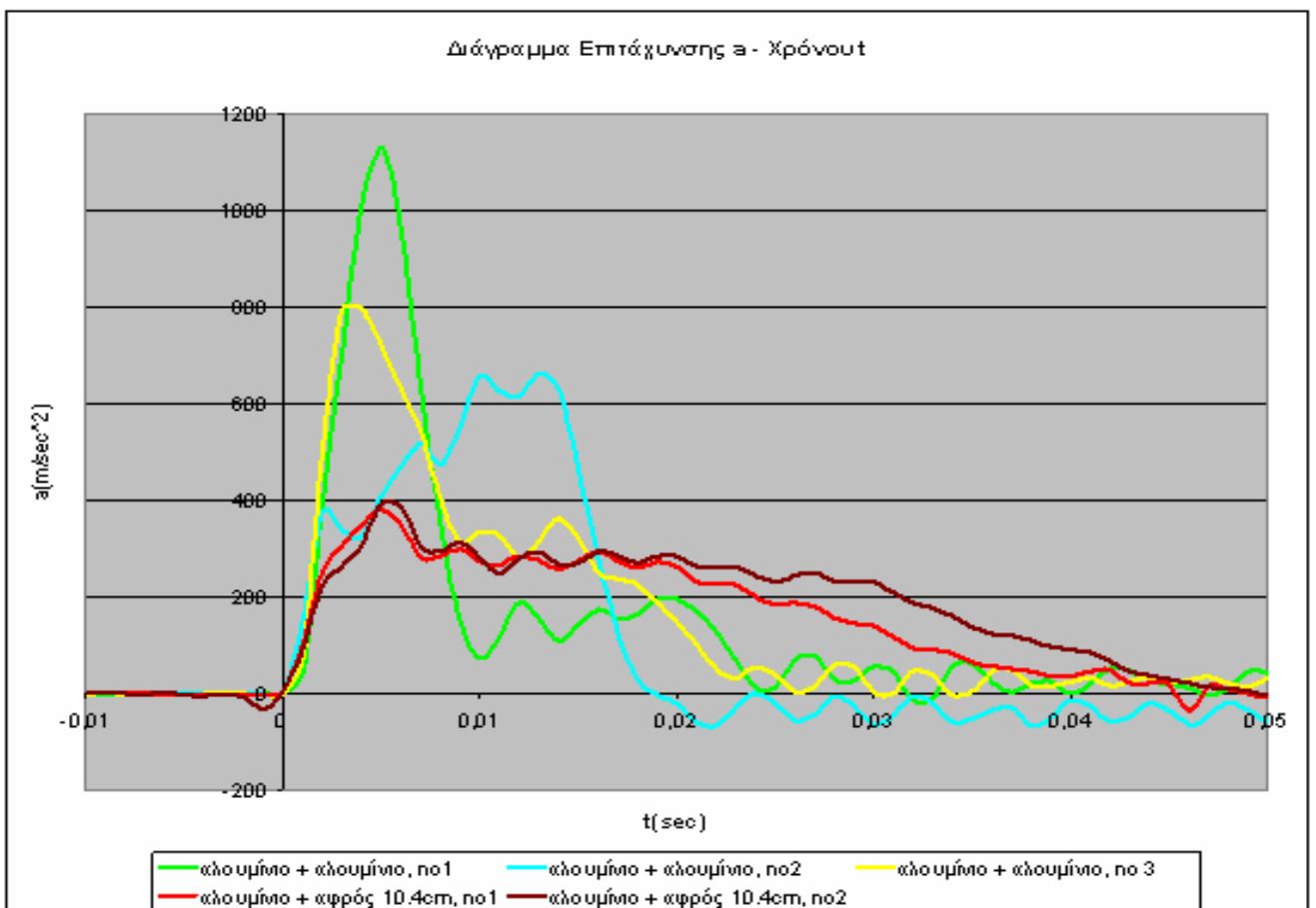
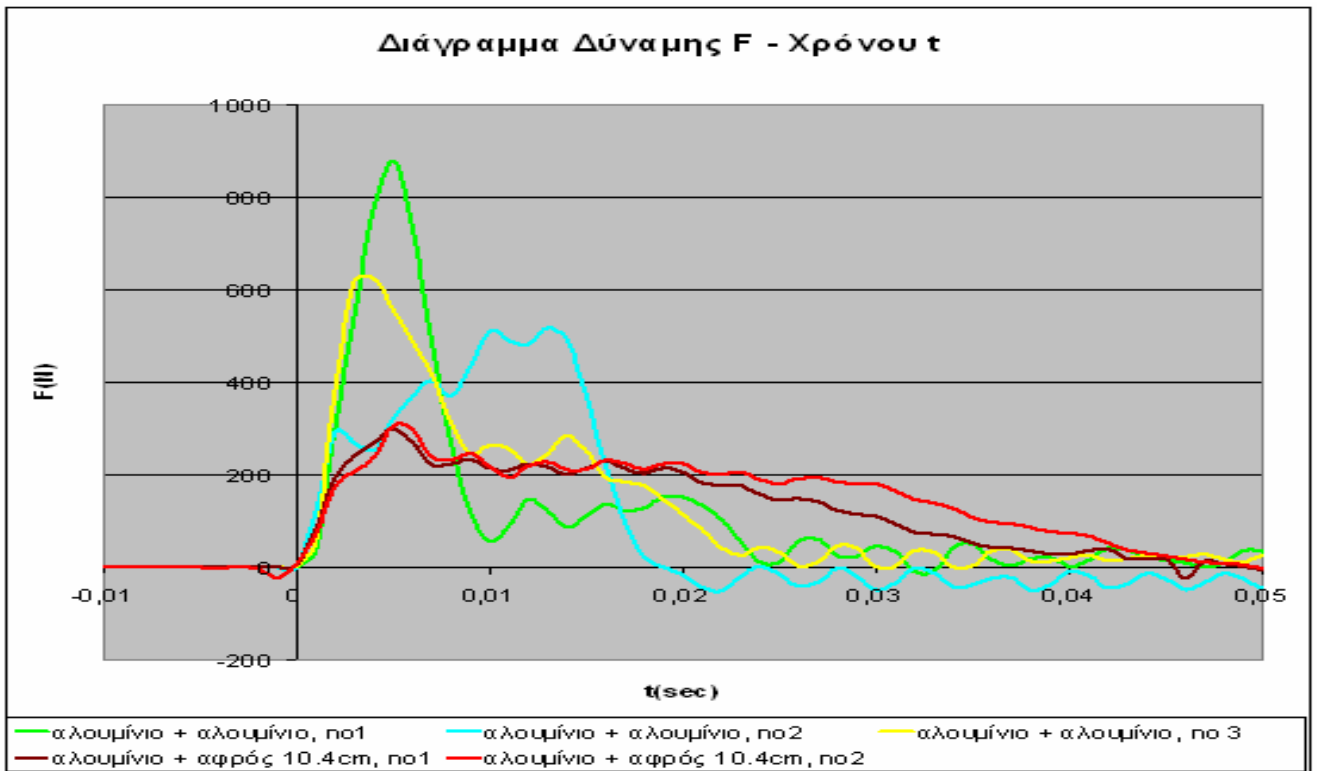


μετά

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο φορές.

Η συσκευασία αλουμινίου παρέμεινε και στις δύο επαναλήψεις άθικτη.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης  $F(N)$  – χρόνου  $t(sec)$  και επιτάχυνσης  $a(m/sec^2)$  – χρόνου  $t(sec)$  που παίρνουμε:



## Συμπεράσματα

Βλέπουμε εδώ ότι η δοκιμή με διπλάσιο μήκος και βάρος αφρού (σε σχέση με την πειραματική προσομοίωση 3) βελτίωσε ακόμη περισσότερο τα αποτελέσματα καθώς, ενώ δεν περιόρισε σημαντικά τις μέγιστες τιμές της δύναμης και της επιτάχυνσης, επιμήκυνε ωστόσο ακόμη περισσότερο τη διάρκεια του παλμού, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια των επιβατών.

Ένα άλλο σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι, αν παρατηρήσουμε τα διαγράμματα στις πειραματικές προσομοιώσεις 3 και 4, βλέπουμε ότι τα δοκίμια με αφρώδη επέκταση παρουσιάζουν **πολύ μεγάλη επαναληψιμότητα**. Έχουμε δηλαδή σε διαδοχικές επαναλήψεις, γραφικές απεικονίσεις οι οποίες «πέφτουν» η μία πάνω στην άλλη.

Ως συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι, καθώς το αφρώδες υλικό έχει πολύ πιο σταθερά χαρακτηριστικά ως προς τον τρόπο που παραμορφώνεται σε σχέση με την κατασκευή αλουμινίου, **βελτιώνει τη σταθερότητα της απόκρισης** ολόκληρου του «οχήματος» όταν χρησιμοποιείται ως συστατικό του στοιχείου.

## 5. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Όπως είδαμε παραπάνω, η σύγκριση δύο παλμών κρούσης από την παρατήρηση των διαγραμμάτων δεν είναι πάντα εύκολη. Συχνά είναι αδύνατο να αποφανθεί κανείς για την καταστροφή που θα μπορούσε να επιφέρει η κάθε κρούση και για την επικινδυνότητα της αν μιλάμε για όχημα με επιβάτες.

Στην αξιολόγηση της ασφάλειας οχημάτων χρειάζονται απλά κριτήρια με λίγες παραμέτρους περιγραφής του παλμού κρούσης.

Ακόμη περισσότερο, σε κάποιες περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο οι διάφορες ηλεκτρονικά ενεργοποιούμενες συσκευές ασφαλείας να πάρουν κάποια εντολή για να μπουν σε λειτουργία, καταλαβαίνουμε ότι οι πληροφορίες που λαμβάνουν τα επιταχυνσιόμετρα ή άλλα όργανα που είναι τοποθετημένα στο όχημα, θα πρέπει να μεταφράζονται σε πολύ απλοποιημένες μορφές πληροφορίας και συχνά σε ένα και μόνο νούμερο το οποίο θα περιγράφει την ένταση μίας κρούσης.

Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι απλής προσέγγισης του παλμού κρούσης. [9]

Συχνά η προσέγγιση αυτή αποκαλείται χαρακτηρισμός παλμού κρούσης.

Σε πρώτη φάση εντοπίζεται ένα σύνολο 9 κινηματικών μεταβλητών οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τον παλμό κρούσης. Αυτές είναι:

Κινηματική Μεταβλητή	Μονάδες	Μαθηματική Έκφραση
1. Επιτάχυνση	$m/sec^2$	$a=dv/dt$
2. Ταχύτητα	$m/sec$	$v=\int a*dt=dx/dt$
3. Μετατόπιση	$m$	$x=\int v*dt=\int\int a*dt*dt$
4. Κλίση επιτάχυνσης (Jerk)	$m/sec^3$	$j=da/dt$
5. Ένταση Ενέργειας (Energy Density)	$(m/sec)^2$	$e=(1/2)*(v^2-v_0^2)$
6. Ενέργεια	$kg*m$	$E=(1/2)*m*(v^2-v_0^2)$
7. Ισχύς	$kg*m/sec$	$p_m=dE/dt=m*v*a$
8. Ένταση Ισχύος (Power Density)	$m^2/sec^3$	$p= p_m/m=v*a$
9. Ένταση Κλίσης Ισχύος (Power Rate Density)	$(m/sec^2)^2$	$p'=dp/dt=v*j+a^2$

Οι εκφράσεις κλειστού τύπου των κινηματικών μεταβλητών για κάποιους ειδικούς παλμούς όπως square, haversine και halvesine (των οποίων οι μαθηματικές εκφράσεις φαίνονται στη συνέχεια) περιγράφονται γραφικά στο παρακάτω σχήμα:

*Square:*  $a = A$  (constant)

$$v = At$$

$$j = 0$$

$$p' = vj + a^2 = A^2$$

*Halfsine:*  $a = A \sin \omega t$

$$v = \frac{A}{\omega} (1 - \cos \omega t)$$

$$j = A \omega \cos \omega t$$

$$p' = vj + a^2 = A^2 [1 + \cos \omega t (1 - 2 \cos \omega t)]$$

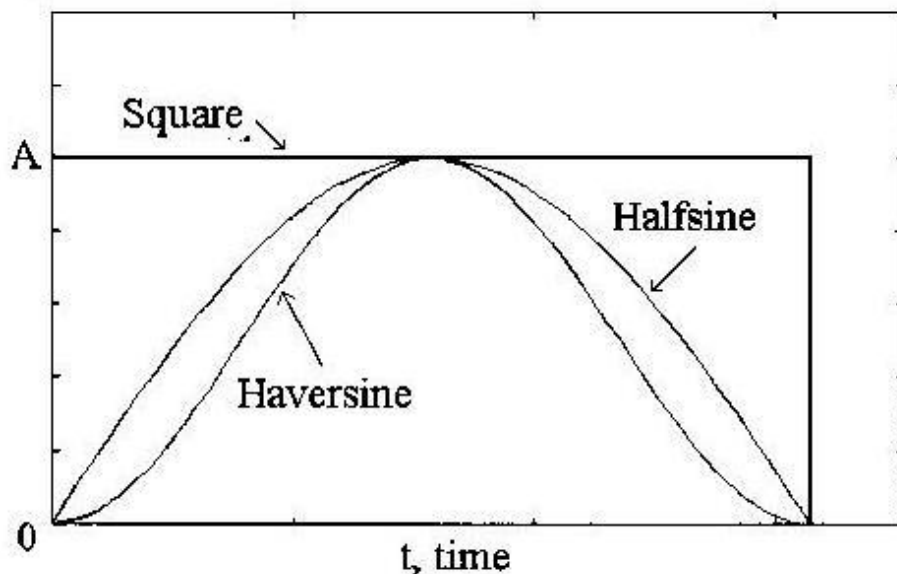
*Haversine:*  $a = \frac{A}{2} (1 - \cos \omega t)$

$$v = \frac{A}{2} \left( t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right)$$

$$j = \frac{A}{2} (\omega \sin \omega t)$$

$$p' = vj + a^2 = A^2 \left[ \frac{\omega \sin \omega t - 2 \cos \omega t (1 - \cos \omega t)}{4} \right]$$

a, acceleration



Σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή, ο παλμός κρούσης αναπαρίσταται γραφικά από μία σειρά Fourier σε halvesines με μεγεθύνσεις που συνδέονται με ένα πολλαπλάσιο της βασικής συχνότητας.

Μια τέτοια αναπαράσταση παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο υπολογισμού της έντασης του ρυθμού ανάπτυξης ισχύος (power rate density) για όλη την κρούση και μας βοηθάει να υπολογίσουμε το μέγεθος της καταστροφής ενός οχήματος σε κρούση. [9]

## 5.1 Προσέγγιση παλμού κρούσης

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εκφράσεις, μπορούμε να προσεγγίσουμε έναν παλμό, παίρνοντας τελικά μία απλούστερη έκφραση. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τους παλμούς μεταξύ τους και να κρίνουμε ποιος είναι πιο καταστροφικός.

Επιλέγοντας την τετραγωνική (square) προσέγγιση, θα πάρουμε τελικά έναν παλμό με μηδενικό jerk (κλίση επιτάχυνσης) δηλαδή με σταθερή επιτάχυνση.

Έχουμε σ' αυτή την περίπτωση:

**a = σταθερή = Equivalent Square Wave (ESW - ισοδύναμη επιτάχυνση)**

**j = 0**

**p' = v\*j + a^2 = (ESW)^2**

Από την ισχύουσα κινηματική σχέση  $a \cdot dx = v \cdot dv$ ,

ολοκληρώνοντας από τη στιγμή της πρώτης επαφής κατά την κρούση μέχρι την μέγιστη παραμόρφωση παίρνουμε τελικά τη σχέση:

$$ESW = 0.4 \cdot (V^2) / C$$

όπου

ESW: equivalent square wave (ισοδύναμη επιτάχυνση) σε g (9.81m.sec<sup>2</sup>)

V: ταχύτητα πριν την κρούση σε mph

C: μέγιστη παραμόρφωση

[9]

Λαμβάνοντας υπόψη ότι 1m = 39.37in και ότι 1 km/h = 1/1.61 mph παίρνουμε τελικά:

$$ESW = 0.0039 \cdot (V^2) / C$$

όπου

ESW σε g (9,81m/sec<sup>2</sup>)

V σε km/h

C σε m

## 5.2 Εφαρμογή

Έχοντας βρει έναν τρόπο να προσεγγίζουμε τους παλμούς κρούσης, μπορούμε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο στις πειραματικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε.

Από τις τέσσερις περιπτώσεις, η πιο «δύσκολη» στην αξιολόγησή της είναι η πειραματική προσομοίωση 2, καθώς τα διαγράμματα για τις δύο διαφορετικές δοκιμές είχαν αρκετά κοντινές τιμές. Έτσι, προσεγγίσουμε με τετραγωνικό παλμό τα διαγράμματά μας για να δούμε αν θα βοηθάει στην εκτίμησή μας.

Θεωρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση του δοκιμίου είναι αυτή που μετράμε μετά τον παλμό, πράγμα που βέβαια δεν είναι 100% αληθές καθώς υπήρχε σίγουρα μία μικρή «επιστροφή» του υλικού μετά τη μέγιστη συμπίεση. Ωστόσο, το δοκίμιό μας θεωρούμε ότι είναι αρκετά πλαστικό ώστε η επιστροφή αυτή να θεωρείται αρκετά μικρή.

Δοκίμιο 1 (χωρίς αφρώδες υλικό):

$$C = \text{αρχικό μήκος δοκιμίου} - \text{τελικό μήκος δοκιμίου} = 11.52\text{cm} - 9.5\text{cm} = \mathbf{2.02\text{cm}}$$

$$ESW = 0.0039 \cdot (15^2) / 0.0202 = \mathbf{43.4\text{g}}$$

$$p' = (ESW)^2 = 43.4^2 = \mathbf{1883.56\text{g}^2} \text{ (power rate density)}$$

Δοκίμιο 4 (με αφρώδες υλικό):

$$C = (\text{αρχικό μήκος δοκιμίου} + \text{αρχικό μήκος αφρού}) - (\text{τελικό μήκος δοκιμίου} + \text{τελικό μήκος αφρού}) =$$

$$= (11.52\text{cm} + 1.7\text{cm}) - (10.9\text{cm} - 0.1\text{cm}) = \mathbf{2.22\text{cm}}$$

$$ESW = 0.0039 \cdot (15^2) / 0.0222 = \mathbf{39.5\text{g}}$$

$$p' = (ESW)^2 = 39.5^2 = \mathbf{1560.25\text{g}^2} \text{ (power rate density)}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι είχαμε μικρότερη ισοδύναμη επιτάχυνση στην κρούση του δοκιμίου με αφρό και ακόμα μικρότερο ένταση του ρυθμού ανάπτυξης ισχύος.



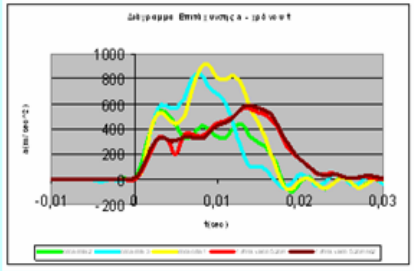


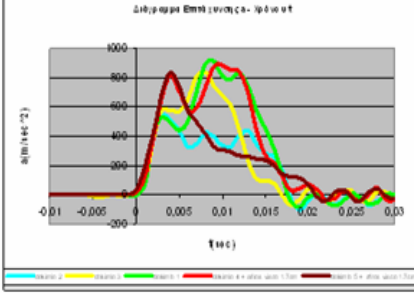


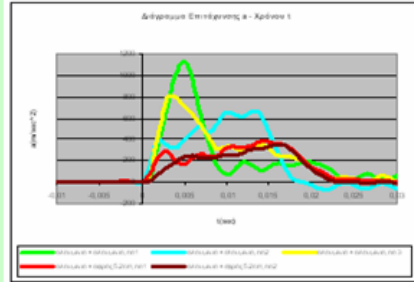


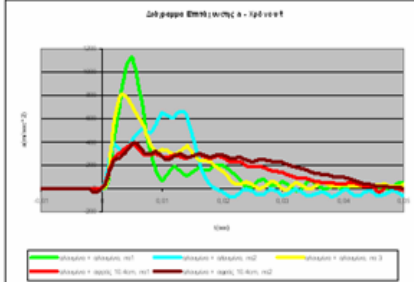
Μπορούμε λοιπόν με ασφάλεια να πούμε ότι η κρούση χωρίς το αφρώδες υλικό ήταν πιο καταστροφική για το όχημα και πιο επικίνδυνη για τους επιβαίνοντες.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο υπολογίζουμε και τις τιμές των **ESW** (Equivalent Square Wave) και **p.r.d.** (Power Rate Density) για τις υπόλοιπες δοκιμές.

Λαμβάνουμε ως μέγιστη παραμόρφωση **C** τον μέσο όρο των μεγίστων παραμορφώσεων όλων των επαναλήψεων για την κάθε δοκιμή. Η μέγιστη παραμόρφωση **C** του αφρώδους υλικού υπολογίστηκε με τον ίδιο τρόπο που υπολογίσαμε την παραμόρφωση του ελατηρίου κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της «μηχανής».

Πήραμε τελικά τις παρακάτω τιμές:

**Πίνακας σύγκρισης «δριμύτητας» κρούσης (crash severity)**

Περιγραφή	Σχηματική περιγραφή	Διάγραμμα $a(m/sec^2) - t(sec)$	ESW (g)	p.r.d. (g <sup>2</sup> )
<b>Πειραματική προσομοίωση 1</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ:</b> Εμπρόσθιο παραμορφωσιμο τμήμα οχήματος από α) αλουμίνιο β) αφρώδες υλικό	 ανένδοτη καρμπίνα	48,75	2376,56
		 ανένδοτη καρμπίνα		29,25
<b>Πειραματική προσομοίωση 2</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ:</b> Οχήμα από α) αλουμίνιο β) αλουμίνιο + αφρώδες υλικό		48,75	2376,56
				39,53
<b>Πειραματική προσομοίωση 3</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ:</b> α) Εμπρόσθιο τμήμα από αλουμίνιο + καρμπίνα οχήματος επίσης από αλουμίνιο β) Εμπρόσθιο τμήμα από αφρώδες υλικό + καρμπίνα οχήματος από αλουμίνιο		38,49	1481,24
				29,25
<b>Πειραματική προσομοίωση 4</b> (πρόσκρουση σε ανένδοτο τοίχωμα, 15km/h)	<b>ΣΥΓΚΡΙΣΗ:</b> α) Εμπρόσθιο τμήμα από αλουμίνιο + καρμπίνα οχήματος επίσης από αλουμίνιο β) Εμπρόσθιο τμήμα από αφρώδες υλικό + καρμπίνα οχήματος από αλουμίνιο		38,49	1481,24
				17,55

όπου  $g = 9.81m/sec^2$  (επιτάχυνση βαρύτητας)

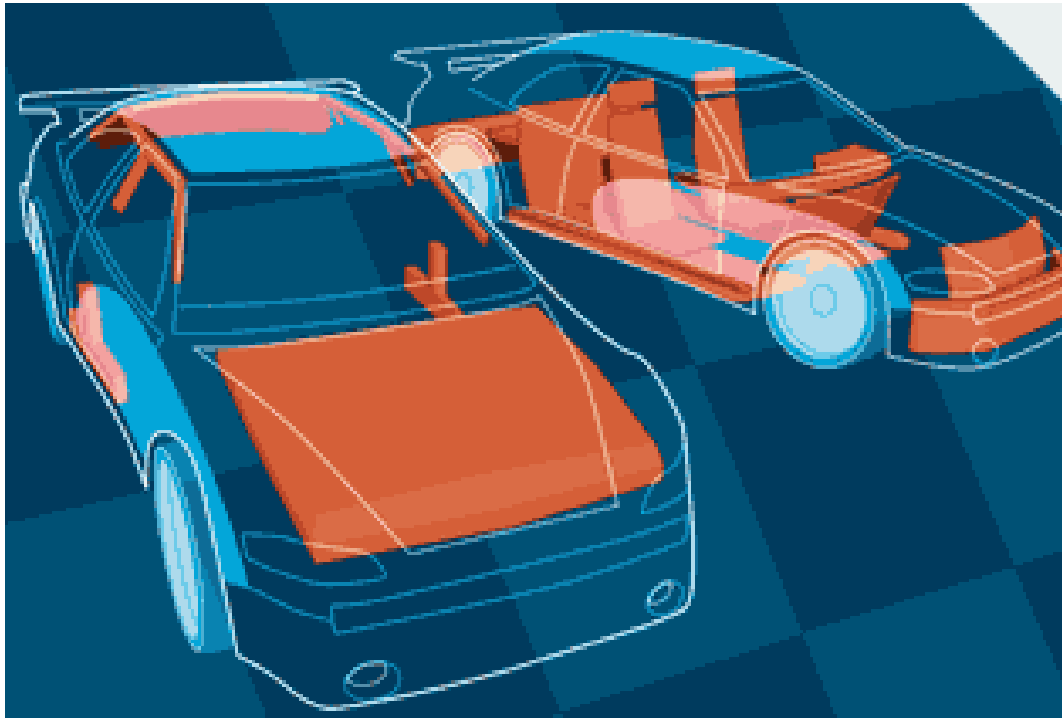


## 6. Αντίστοιχες σκέψεις που έχουν γίνει από άλλους οργανισμούς ανά τον κόσμο – ιδέες για το μέλλον

«Δοκιμές που έχουν γίνει στο Εργαστήριο Κρούσης και Κρουστικής Αντοχής (Impact and Crashworthiness Lab) του MIT έχουν δείξει ότι ο αφρός αλουμινίου ενισχύει την ικανότητα απορρόφησης της κρούσης των μελών των οχημάτων, κάποιες φορές μέχρι και κατά 600%.»

Τονίζεται η πολύ μεγάλη αναλογία της δύναμης που μπορεί να ασκήσει ο αφρός αλουμινίου ως προς το βάρος του.

Εδώ βλέπουμε μία πρόταση της NASCAR (αμερικάνικος οργανισμός αγωνιστικών αυτοκινήτων) για το μέλλον των οχημάτων με τη χρήση αφρώδους υλικού από φυσαλίδες αλουμινίου στο εμπρόσθιο και σε άλλα τμήματα του οχήματος.



[10]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο **NIDO** της **Pininfarina**. Παρακάτω βλέπουμε το σασί του οχήματος. Είναι εμφανές το μπλοκ του αφρού αλουμινίου εμπρός από το απαραμόρφωτο κόκκινο πλαίσιο που προστατεύει τους επιβάτες.



Στη συνέχεια φαίνεται η εικόνα που παρουσιάζει το εσωτερικό του οχήματος. Ο αφρός αλουμινίου είναι κρυμμένος κάτω από ειδικό πλαστικό υλικό.



[11]

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.iihs.org>
- [2] <http://www.euroncap.com/history.aspx>
- [3] [http://www.autotriti.gr/auto/\\_Nea\\_Montela/euroncap](http://www.autotriti.gr/auto/_Nea_Montela/euroncap)
- [4] [www.FEA-Optimisation.com](http://www.FEA-Optimisation.com)
- [5] DEVELOPMENT OF CRASH-BOX FOR PASSENGER CAR WITH HIGH CAPABILITY FOR ENERGY ABSORPTION, Yoshiaki NAKAZAWA, Kenji TAMURA, Michitaka YOSHIDA, Katsutoshi TAKAGI and Mitsutoshi KANO, VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII, Barcelona, 2005
- [6] [www.sae.org/technical/papers/2007-01-0711](http://www.sae.org/technical/papers/2007-01-0711) Developing a Sled Test from Crash Test Data
- [7] SEPTEMBER 2008, CRASH TEST TECHNOLOGY INTERNATIONAL
- [8] [www.hyge.com/about.shtml](http://www.hyge.com/about.shtml) HYGE - applications
- [9] Vehicle Crash Mechanics – Matthew Huang
- [10] <http://www.popsci.com/cars/article/2002-03/foam-crash-box>
- [11] [http://www.supercars.net/Pics?v=y&id=2995&s=c&p=2004\\_Pininfarina\\_NidoConcept5.jpg](http://www.supercars.net/Pics?v=y&id=2995&s=c&p=2004_Pininfarina_NidoConcept5.jpg)
- [12] Instrumentation for Engineering Measurements – James W. Dally, William F. Riley, Kenneth G. McConnell
- [13] A Force Transducer Based on Measurements of Mean Strain in a Compact Body, K. G. Sundin, M. Jonsson, Lulea University of Technology, Sweden