

# Φέρουσες Κατασκευές Αλουμινίου

Αρχές Σχεδιασμού  
και Παραδείγματα  
στο Πλαίσιο  
του Ευρωκώδικα 9

Χ. Κ. Μπανιωτόπουλος  
Θ. Ν. Νικολαΐδης

ISBN 978-960-456-448-4

© Copyright, Ιούνιος 2016, Χ. Μπανιωτόπουλος, Θ. Νικολαΐδης, Εκδόσεις Ζήτη

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**  
**Εκτύπωση**  
**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ**

18<sup>ο</sup> χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς  
Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19  
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**www.ziti.gr**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:**

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305  
e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:**

Χαριλάου Τρικούπη 22 - 106 79, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210 3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

## Πρόλογος

Οι φορείς από δομικό αλουμίνιο, όλο και περισσότερο σήμερα, σχεδιάζονται ώστε να ικανοποιούν τα κριτήρια αντοχής των κατασκευών, τις αυξημένες αισθητικές, μορφολογικές και λειτουργικές απαιτήσεις και τους δείκτες βιώσιμου σχεδιασμού. Ταυτόχρονα πρέπει να αποτελούν οικονομικές λύσεις στο πλαίσιο ενός βιομηχανικού κατά βάση σχεδιασμού με έντονη την ανάπτυξη της προκατασκευής.

Απαραίτητη προϋπόθεση για έναν τέτοιο σχεδιασμό είναι η ακριβής εκτίμηση της στατικής λειτουργίας του φορέα, η τήρηση των προδιαγραφών σχεδιασμού που τίθενται κάθε φορά για το εκάστοτε έργο και η ανάλυση του φορέα με τη βοήθεια του κανονιστικού πλαισίου των Ευρωκωδίκων.

Υπό το πρίσμα αυτό το παρόν βιβλίο φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο βοήθημα για την εκμάθηση, εμβάθυνση και ανάλυση της διαδικασίας σχεδιασμού φερουσών κατασκευών από κράματα αλουμινίου.

Πέρα από την ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου και των κανονιστικών προτύπων, το βιβλίο προχωρά στην ανάλυση χαρακτηριστικών παραδειγμάτων σχεδιασμού φορέων από αλουμίνιο, όπως είναι αυτά που θα συναντήσει τόσο ο σπουδαστής, όσο ο μηχανικός στην πράξη.

Σήμερα, η δυνατότητα ανάλυσης των κατασκευών με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή έχει φτάσει σε πολύ ψηλά επίπεδα, οπότε ο μηχανικός με τη βοήθεια του βιβλίου θα μπορεί να προσομοιώσει και να διαστασιολογήσει ορθότερα την κατασκευή, αλλά και να αποτιμήσει σωστά τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Τα παραδείγματα που χρησιμοποιούνται προς τούτο δεν αποτελούν πρότυπα σχεδιασμού κατασκευών, αλλά έχουν το χαρακτήρα αντιπροσωπευτικών –και στις πιο πολλές περιπτώσεις εφαρμοσμένων– περιπτώσεων σχεδιασμού ώστε να γίνει κατανοητή, ανάλογα με τον τύπο φορέα, η διαδικασία και τα στάδια υπολογισμού των φερουσών κατασκευών αλουμινίου.

Η διάρθρωση των κεφαλαίων και οι θεματικές ενότητες του βιβλίου αποτελούν προϊόν γόνιμης αναζήτησης των αναγκών όπως αυτές διαμορφώνονται από την εφαρμογή των Ευρωκωδίκων, τόσο στον τομέα της παραγωγής προϊόντων διέλασης από τις βιομηχανίες αλουμινίου που να καλύπτουν τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές, όσο και στον τομέα της μελέτης και ανέγερσης κατασκευών, αλλά και της συναφούς εκπαίδευσης και εξειδίκευσης των σπουδαστών.

Η διαμόρφωση και ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής έγινε με τη συμπαράσταση και την συναδελφική συνεργασία των επιστημονικών μελών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ.

Επίσης ευχαριστίες εκφράζονται προς την Δρα Φ. Πρεφτίτση και τους αποφοιτήσαντες φοιτητές και νυν συναδέλφους Γ. Μουτσανίδη, και Γ. Γέρμανο, οι οποίοι αρχικά στο πλαίσιο εκπόνησης της διπλωματικής τους εργασίας και στη συνέχεια με την συμμετοχή τους στην προετοιμασία επιστημονικών ανακοινώσεων σε θέματα σχεδιασμού φορέων αλουμινίου βοήθησαν ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και εποπτικό υλικό που χρησιμοποιούνται στο σύγγραμμα αυτό.

Θεσσαλονίκη, Μάιος 2016

Χ.Κ. Μπανιωτόπουλος & Θ.Ν. Νικολαΐδης

## Περιεχόμενα

### Μέρος Ι

#### ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΕΡΟΥΣΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

#### Κεφάλαιο 1

##### Εισαγωγή

..... 15

#### Κεφάλαιο 2

##### Το αλουμίνιο και τα κράματά του

2.1	Εισαγωγή .....	19
2.1.1	Γενικά στοιχεία .....	19
2.1.2	Το αλουμίνιο και η επεξεργασία του .....	21
2.2	Τα κράματα αλουμινίου .....	23
2.2.1	Γενικά στοιχεία για την παραγωγή κραμάτων αλουμινίου.....	23
2.2.2	Κατάταξη κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου .....	23
2.2.3	Κατάταξη χυτών κραμάτων αλουμινίου.....	26
2.2.4	Κατεργασία κραμάτων αλουμινίου .....	27
2.2.5	Βασικές μορφές κατεργασίας κραμάτων αλουμινίου .....	30
2.2.6	Συμβολισμός κραμάτων αλουμινίου ανάλογα με την κατεργασία.....	35
2.2.7	Σύγκριση και κριτήρια επιλογής κραμάτων αλουμινίου .....	38
2.2.8	Κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στις συνδέσεις .....	40
2.3	Φυσικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά αντοχής του αλουμινίου .....	42
2.3.1	Ίδιον βάρος αλουμινίου.....	42
2.3.2	Ελαστικές σταθερές αλουμινίου .....	43
2.3.2.1	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου αλουμινίου .....	43
2.3.2.2	Καταστατικοί νόμοι υλικού .....	44
2.3.2.3	Συνεχή και κατά τμήματα γραμμικά διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης .....	45
2.3.2.4	Συνεχή γραμμικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης .....	46
2.3.2.5	Ο νόμος του Baehre .....	47

2.3.2.6	Ο νόμος του Mazzolani.....	47
2.3.2.7	Συνεχή γραμμικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης Ramberg - Osgood .....	47
2.3.2.8	Προσεγγίσεις με κατά τμήματα γραμμικά διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης.....	51
2.3.2.9	Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σε κράματα ελάχιστης αντοχής.....	53
2.3.3	Θερμική συμπεριφορά.....	54
2.3.4	Ηλεκτρική αγωγιμότητα .....	54
2.3.5	Αντίσταση σε οξείδωση .....	54
2.4	Το αλουμίνιο στις κατασκευές.....	58
2.4.1	Ιστορικά στοιχεία – Οι πρώτες εφαρμογές.....	58
2.4.2	Εφαρμογές του αλουμινίου .....	60
2.4.2.1	Φέρουσες κατασκευές αλουμινίου .....	60
2.4.2.2	Εφαρμογές του αλουμινίου στις μεταφορές .....	62
2.4.2.3	Εφαρμογές του αλουμινίου σε παράκτιες και θαλάσσιες κατασκευές.....	64
2.4.2.4	Εφαρμογές στην αρχιτεκτονική και τη δόμηση κτιρίων.....	65
2.4.3	Χαρακτηριστικές εφαρμογές αλουμινίου σε έργα Πολιτικού Μηχανικού.....	67
2.5	Αλουμίνιο και χάλυβας – Σύγκριση και επιλογή.....	69
2.5.1	Γενικά συγκριτικά στοιχεία .....	69
2.5.2	Σύγκριση αλουμινίου-χάλυβα και κριτήρια επιλογής.....	70
2.5.2.1	Πλεονεκτήματα επιλογής αλουμινίου σε σχέση με το χάλυβα.....	70
2.5.2.2	Μειονεκτήματα επιλογής αλουμινίου σε σχέση με το χάλυβα .....	71

### Κεφάλαιο 3

#### Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού και δράσεις για φορείς από αλουμίνιο

3.1	Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού φορέων από αλουμίνιο .....	75
3.1.1	Θεμελιώδεις συνδυασμοί και συντελεστές ασφαλείας για τις Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (Ο.Κ.Α.).....	76
3.1.2	Θεμελιώδεις συνδυασμοί για τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού και για κατάσταση σεισμικού σχεδιασμού .....	77
3.1.3	Συνδυασμοί δράσεων για τις Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.).....	78
3.1.4	Μειωτικοί συντελεστές συνδυασμού μεταβλητών φορτίων στις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού .....	79
3.2	Φορτία σχεδιασμού φορέων από αλουμίνιο .....	82
3.2.1	Γενικά φορτία λειτουργίας .....	82
3.2.1.1	Μόνιμα φορτία.....	82

3.2.1.2	Επιβαλλόμενα ή κινητά φορτία λειτουργίας.....	83
3.2.2	Φορτίο ανέμου.....	88
3.2.2.1	Πίεση ταχύτητας αιχμής.....	88
3.2.2.2	Πιέσεις ανέμου στις επιφάνειες της κατασκευής.....	89
3.2.3	Φορτίο χιονιού .....	97
3.2.3.1	Χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού στο έδαφος .....	97
3.2.3.2	Χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού στην κατασκευή.....	99
3.2.4	Φορτία θερμοκρασίας.....	100
3.2.4.1	Φορτία θερμοκρασίας κτιριακών έργων.....	100
3.2.4.2	Εκτίμηση φορτίων θερμοκρασίας γεφυρών αλουμινίου.....	102

## Κεφάλαιο 4

### Σχεδιασμός μελών από αλουμίνιο

4.1	Γενικοί κανόνες σχεδιασμού μελών από αλουμίνιο στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9 .....	105
4.1.1	Εισαγωγή.....	105
4.1.2	Ορολογία, συμβάσεις και υλικά στον Ευρωκώδικα 9 .....	108
4.1.2.1	Ορολογία.....	108
4.1.2.2	Προσανατολισμός αξόνων δομικών στοιχείων από αλουμίνιο.....	109
4.1.3	Αρχές σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9.....	110
4.1.4	Μηχανικές ιδιότητες και παράμετροι αντοχής προτύπων κραμάτων αλουμινίου.....	111
4.1.4.1	Ιδιότητες υλικού ελατών κραμάτων.....	111
4.1.4.2	Ιδιότητες υλικού κραμάτων χύτευσης.....	115
4.1.4.3	Ελαστικές σταθερές και τιμές σχεδιασμού κραμάτων αλουμινίου.....	116
4.1.4.4	Ανθεκτικότητα.....	117
4.1.5	Στατική ανάλυση φορέων από αλουμίνιο .....	119
4.1.5.1	Γενικά .....	119
4.1.5.2	Μορφές προσομοίωσης κόμβων .....	119
4.1.5.3	Επιρροή της παραμορφωμένης γεωμετρίας του φορέα.....	119
4.1.5.4	Επιρροή των ατελειών του φορέα.....	120
4.1.5.5	Μέθοδοι ανάλυσης φορέων .....	124
4.1.5.6	Οριακές Καταστάσεις Σχεδιασμού .....	124
4.1.6	Κατάταξη διατομών.....	125
4.1.6.1	Οριακές Καταστάσεις Διατομής .....	125
4.1.6.2	Κατάταξη σε Κατηγορίες (Κλάσεις) διατομών.....	125
4.1.6.3	Τοπικός λυγισμός και παράμετροι λυγηρότητας .....	127
4.1.6.4	Αντίσταση σε τοπικό λυγισμό για μέλη κατηγορίας 4 .....	133
4.1.6.5	Ο Ρόλος της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ ).....	135

4.2	Αντίσταση διατομών από αλουμίνιο στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9.....	139
4.2.1	Γενικοί έλεγχοι διατομών .....	139
4.2.1.1	Αντοχή διατομής σε εφελκυσμό .....	140
4.2.1.2	Αντοχή διατομής σε θλίψη .....	141
4.2.1.3	Αντοχή διατομής σε κάμψη.....	141
4.2.1.4	Ανάλυση διατομής κατηγορίας 4 σε κάμψη.....	143
4.2.1.5	Αντοχή διατομής σε διάτμηση.....	144
4.2.2	Σύνθετοι έλεγχοι διατομών.....	145
4.2.2.1	Αντοχή διατομής σε στρέψη .....	145
4.2.2.2	Αντοχή διατομής σε διάτμηση και στρέψη .....	148
4.2.2.3	Αντοχή διατομής σε κάμψη και διάτμηση.....	149
4.2.2.4	Αντοχή διατομής σε κάμψη και αξονική δύναμη .....	150
4.2.2.5	Αντοχή διατομής σε κάμψη διάτμηση και αξονική δύναμη.....	152
4.2.3	Έλεγχος αντοχής διατομής σε λυγισμό .....	152
4.2.3.1	Αντοχή διατομής σε καμπτικό λυγισμό.....	152
4.2.3.2	Αντοχή διατομής σε στρεπτοκαμπτικό (πλευρικό) λυγισμό.....	161
4.2.3.3	Αντοχή διατομής υπό αλληλεπίδραση κάμψης και αξονικής θλίψης .....	174
4.2.3.4	Αντοχή διατομής υπό αλληλεπίδραση στρεπτοκαμπτικού (πλευρικού) λυγισμού και αξονικής θλίψης .....	175
4.3	Αντίσταση κατασκευών αλουμινίου σε φωτιά στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9.....	177
4.3.1	Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου σε φωτιά .....	177
4.3.2	Υπολογισμός της ανάπτυξης θερμοκρασίας διατομής αλουμινίου σε πυρκαγιά .....	180
4.3.3	Δυναμική προσομοίωση φωτιάς .....	182
4.4	Αντίσταση κατασκευών αλουμινίου ευαίσθητων σε κόπωση .....	183
4.4.1	Ορισμός και περιγραφή του φαινομένου της κόπωσης .....	183
4.4.2	Κριτήρια σχεδιασμού κατασκευών αλουμινίου ευαίσθητων σε κόπωση.....	184
4.4.2.1	Ασφαλής ζωή σε κόπωση.....	184
4.4.2.2	Κατηγορίες λεπτομερειών σε κόπωση.....	186
4.4.3	Οριακή κατάσταση αστοχίας σε κόπωση.....	189
4.4.4	Καμπύλες κατηγοριών λεπτομερειών .....	190

## Κεφάλαιο 5

### Σχεδιασμός μελών από κράματα αλουμινίου

5.1	Σχεδιασμός συνδέσεων μελών από αλουμίνιο .....	205
5.1.1	Γενικά .....	205
5.1.2	Συνδέσεις κόμβων .....	206



5.2	Κοχλιωτές και ηλωτές συνδέσεις .....	209
5.2.1	Διάταξη οπών για κοχλίες και ήλους .....	209
5.2.2	Απομείωση των μελών σύνδεσης λόγω οπών κοχλίωσης.....	212
5.2.3	Χαρακτηριστικές περιπτώσεις κοχλιωτών συνδέσεων.....	214
5.2.4	Ηλωτές συνδέσεις και συνδέσεις κοχλιών βυθισμένης κεφαλής.....	216
5.2.5	Δυνάμεις μοχλού .....	217
5.2.6	Συνδέσεις με βλήτρα.....	218
5.3	Συγκολλήσεις .....	220
5.3.1	Γενικά για τις μεθόδους συγκόλλησης.....	220
5.3.2	Σχεδιασμός συγκολλητών συνδέσεων .....	221
5.3.3	Σχεδιασμός εσωραφών .....	223
5.3.4	Σχεδιασμός εξωραφών .....	224
5.3.5	Αντοχή σχεδιασμού στη ΘΕΖ .....	227

## Μέρος II

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΦΕΡΟΥΣΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

## Κεφάλαιο 6

### Σχεδιασμός ναλοπετασμάτων αλουμινίου

6.1	Περιγραφή και χαρακτηριστικά της κατασκευής .....	231
6.2	Περιγραφή Ευρωπαϊκών προδιαγραφών προτύπου προϊόντων ναλοπετασμάτων.....	238
6.2.1	Γενικές αρχές .....	238
6.2.2	Εύρος εφαρμογής προτύπου EN 13830 .....	238
6.2.3	Απαιτήσεις και προϋποθέσεις σχεδιασμού .....	241
6.2.3.1	Αντίσταση σε φορτία ανέμου .....	241
6.2.3.2	Ίδιον βάρος .....	241
6.2.3.3	Αντίσταση σε κρούση .....	242
6.2.3.4	Αεροδιαπερατότητα.....	242
6.2.3.5	Στεγανότητα .....	242
6.2.3.6	Ηχομόνωση .....	242
6.2.3.7	Θερμοπερατότητα .....	242
6.2.3.8	Συμπεριφορά στη φωτιά.....	242
6.2.3.9	Ανθεκτικότητα.....	243
6.2.3.10	Υδρατμοπερατότητα.....	243

6.2.3.11	Εξίσωση διαφοράς δυναμικού (ισοδυναμικότητα).....	243
6.2.3.12	Αντίσταση σε σεισμική διέγερση .....	243
6.2.3.13	Αντίσταση σε θερμική διέγερση.....	243
6.2.3.14	Αντίσταση σε οριζόντια επιβαλλόμενα φορτία .....	244
6.2.4	Αποτίμηση της συμμόρφωσης των κριτηρίων σχεδιασμού υαλοπετασμάτων .....	244
6.2.5	Απαιτήσεις για τα ειδικά τεμάχια σύνδεσης υαλοπετάσματος .....	244
6.3	Ανάλυση και διαστασιολόγηση κύριων δομικών τμημάτων υαλοπετάσματος αλουμινίου .....	246
6.3.1	Περιγραφή κτιρίου εφαρμογής και απαιτήσεων σχεδιασμού .....	246
6.3.1.1	Ανάλυση δομικού συστήματος υαλοπετάσματος .....	246
6.3.1.2	Προδιαγραφές υλικών δομικού συστήματος.....	248
6.3.1.3	Διατομές κύριων μελών πλαισίου υαλοπετάσματος.....	249
6.3.2	Προσδιορισμός των φορτίων σχεδιασμού .....	254
6.3.2.1	Ανάλυση φορτίσεων .....	254
6.3.3	Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση Κύριας Δοκού (ΚΔ) πλαισίου υαλοπετάσματος.....	263
6.3.3.1	Στατική επίλυση.....	263
6.3.3.2	Έλεγχος διαστασιολόγησης Κύριας Δοκού σε Ο.Κ.Λ. ....	263
6.3.3.3	Έλεγχος διαστασιολόγησης Κύριας Δοκού σε Ο.Κ.Α. ....	265
6.3.4	Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση Δευτερεύουσας Δοκού (ΔΔ) πλαισίου υαλοπετάσματος .....	278
6.3.4.1	Στατική επίλυση.....	278
6.3.4.2	Έλεγχος διαστασιολόγησης Δευτερεύουσας Δοκού σε Ο.Κ.Λ. ....	279
6.3.4.3	Έλεγχος διαστασιολόγησης Δευτερεύουσας Δοκού σε Ο.Κ.Α. ....	280
6.4	Συνδέσεις υαλοπετάσματος.....	284
6.4.1	Έλεγχος διαστασιολόγησης ειδικών τεμαχίων σύνδεσης.....	284
6.4.1.1	Έλεγχος γωνιακού τεμαχίου σύνδεσης.....	285

## Κεφάλαιο 7

### Σχεδιασμός πλαισίου στήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων

7.1	Περιγραφή και χαρακτηριστικά της κατασκευής.....	291
7.2	Ανάλυση συστημάτων στήριξης φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων.....	295
7.2.1	Σύστημα στήριξης για κεραμοσκεπείς στέγες .....	295
7.2.2	Σύστημα στήριξης για βιομηχανικές στέγες .....	296
7.2.3	Σύστημα διαμόρφωσης και στήριξης για δώμα και εξωτερικούς χώρους .....	297
7.3	Στατικός υπολογισμός Κύριας Δοκού συστήματος Φ/Β στοιχείων .....	300
7.3.1	Περιγραφή και χαρακτηριστικά διατομής Κύριας Δοκού στήριξης.....	300
7.3.2	Ανάλυση φορτίσεων.....	304

7.3.2.1 Περιγραφή φορτίσεων και ανάλυση τιμών εφαρμογής φορτίων.....	304
7.3.2.2 Συνδυασμοί φόρτισης.....	308
7.3.3 Έλεγχοι διαστασιολόγησης Κύριας Δοκού.....	309

## Κεφάλαιο 8

### Σχεδιασμός πεζογέφυρας από αλουμίνιο

8.1 Το αλουμίνιο ως κύριο δομικό υλικό στη γεφυροποιία.....	319
8.1.1 Εισαγωγή του αλουμινίου στη γεφυροποιία.....	319
8.1.2 Πεζογέφυρες από αλουμίνιο – Σύγχρονες τάσεις σχεδιασμού .....	324
8.2 Περιγραφή της κατασκευής.....	327
8.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού.....	327
8.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, διατομές μελών και υλικά δομικού συστήματος.....	329
8.2.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	329
8.2.2.2 Γενική περιγραφή διατομών μελών .....	331
8.2.2.3 Προδιαγραφές υλικών .....	335
8.2.3 Χαρακτηριστικά αντοχής διατομών μελών .....	336
8.2.3.1 Χαρακτηριστικά αντοχής διατομής μελών δικτύματος και ακραίων στύλων βάθρων.....	336
8.2.3.2 Χαρακτηριστικά αντοχής διατομής μελών ορθότροπης πλάκας με κλειστές τριγωνικές νευρώσεις.....	339
8.3 Προσδιορισμός φορτίων σχεδιασμού .....	342
8.3.1 Ανάλυση φορτίσεων.....	342
8.3.1.1 Μόνιμα φορτία .....	342
8.3.1.2 Επιβαλλόμενα φορτία.....	344
8.3.1.3 Περιβαλλοντικές δράσεις.....	346
8.3.1.4 Σεισμική δράση.....	350
8.3.2 Συνδυασμοί φορτίσεων – Οριακές Καταστάσεις Σχεδιασμού .....	359
8.3.2.1 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.).....	359
8.3.2.2 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.).....	360
8.4 Ανάλυση και διαστασιολόγηση κύριων δομικών τμημάτων .....	363
8.4.1 Αριθμητική προσομοίωση υπολογιστικού μοντέλου.....	363
8.4.2 Έλεγχοι διαστασιολόγησης κρίσιμων μελών .....	365
8.4.2.1 Έλεγχος διαστασιολόγησης σε Ο.Κ.Λ.....	365
8.4.2.2 Έλεγχος διαστασιολόγησης σε Ο.Κ.Α.....	368
8.4.3 Ανάλυση κρίσιμων μελών σε κόπωση.....	381
8.4.3.1 Ανάλυση σχεδιασμού Οριακής Κατάστασης Κόπωσης.....	381
8.4.3.2 Έλεγχος σε κόπωση ελάσματος διαγωνίου ράβδου δικτύματος .....	383
8.4.3.3 Έλεγχος σε κόπωση συγκόλλησης εσωραφής διαγωνίου ράβδου δικτύματος προς το πέλμα .....	387

## Παραρτήματα

---

A	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών και βυθίσεων τυπικών δοκών από αλουμίνιο .....	393
A.1	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών και βυθίσεων τυπικών ισοστατικών δοκών .....	393
A.2	Διαγράμματα εντατικών μεγεθών και βυθίσεων τυπικών υπερστατικών δοκών .....	398
B	Φέρουσα ικανότητα κοχλιών και ήλων σε συνδέσεις αλουμινίου .....	404
B.1	Φέρουσα ικανότητα κοχλιών και ήλων σε διάτμηση .....	404
B.2	Φέρουσα ικανότητα κοχλιών και ήλων σε εφελκυσμό .....	406
Γ	Βοηθητικός πίνακας σταθερών στρέψης και θέσης κέντρου διάτμησης για χαρακτηριστικές διατομές αλουμινίου .....	408
Δ	Βοηθητικοί πίνακες συντελεστών κρίσιμης ροπής στρέβλωσης .....	409
	<i>Βιβλιογραφία</i> .....	411
A	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	411
B	Διεθνής Βιβλιογραφία .....	413
	Δικτυογραφία .....	416

# 1<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

### Εισαγωγή

Στο βιβλίο αυτό παρουσιάζονται τόσο θεωρητικά, όσο και μέσα από συγκεκριμένους πρακτικούς κανόνες εφαρμογής οι βασικές αρχές και οι μέθοδοι διαστασιολόγησης των μελών κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών από δομικό αλουμίνιο στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9.

Στο πρώτο τμήμα του συγγράμματος αυτού παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες και οι αρχές σχεδιασμού που απαιτούνται για τη διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων από κράματα αλουμινίου και των συνδέσεών τους. Συγκεκριμένα, στο Κεφ. 2 περιγράφεται αναλυτικά το αλουμίνιο ως δομικό υλικό, αλλά και ως κύριο υλικό κραμάτων με τις ιδιότητες, τις μορφές και τις δυνατές χρήσεις του. Στη συνέχεια στο Κεφ. 3 αναλύεται ο σχεδιασμός των οριακών καταστάσεων, οι συνδυασμοί δράσεων και τα συνήθη φορτία των κατασκευών από αλουμίνιο στο πλαίσιο των Ευρωκωδίκων 0 και 1, [ΕΛΟΤ EN1990], [ΕΛΟΤ EN1991] (βλ. [7]÷[15]), έτσι ώστε οι κατασκευές αυτές να ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια επάρκειας. Ακολουθεί στο Κεφ. 4 η αναλυτική περιγραφή των πιο σημαντικών σημείων των αρχών σχεδιασμού κατασκευών από αλουμίνιο στο πλαίσιο του Ευρωκώδικα 9 [ΕΛΟΤ EN1999] [18],[19],[20]. Η περιγραφή αυτή περιλαμβάνει τις αρχές και τις απαιτήσεις για ασφάλεια και λειτουργικότητα των κατασκευών αλουμινίου, τις βασικές αρχές του σχεδιασμού και των ελέγχων επάρκειάς τους, αλλά και ιδιαίτερα θέματα σχεδιασμού όπως είναι η απόκριση σε φωτιά και ο έλεγχος σε κόπωση. Τέλος στο Κεφ. 5 αναλύεται ο σχεδιασμός των συνδέσεων μεταξύ μελών από κράματα αλουμινίου στο πλαίσιο των Ευρωκωδίκων. Αναλύονται λοιπόν οι κυριότερες και συνηθέστερες μορφές συνδέσεων, δηλαδή οι κοχλιώσεις, ηλώσεις ή αγκυρώσεις και οι συγκολλήσεις και επικολλήσεις.

Στο δεύτερο τμήμα του βιβλίου περιγράφονται χαρακτηριστικά παραδείγματα σχεδιασμού φορέων και μελών από κράματα αλουμινίου. Η επιλογή των παραδειγμάτων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε, μαζί με την εφαρμογή των αρχών και κανόνων σχεδιασμού και διαστασιολόγησης χαρακτηριστικών μελών, να παρουσιάζεται και το πλαίσιο οδηγιών και σχεδιασμού φορέων χαρακτηριστικών κατασκευών από

αλουμίνιο. Συγκεκριμένα στο Κεφ. 6 η παρουσίαση των γενικών οδηγιών και προτύπων σχεδιασμού υαλοπετασμάτων αλουμινίου συνοδεύεται από συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής. Το παράδειγμα αυτό περιλαμβάνει την ανάλυση φορτίσεων, το σχεδιασμό των οριακών καταστάσεων και τους κύριους ελέγχους σχεδιασμού των κύριων δομικών μελών υαλοπετάσματος. Ακολουθεί στο Κεφ. 7 αντίστοιχη παρουσίαση και παράδειγμα εφαρμογής για διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων για παραγωγή ρεύματος με πλαίσια στήριξης από αλουμίνιο. Τέλος στο Κεφ. 8 μέσα από την ανάλυση αρχών σχεδιασμού, αλλά και συγκεκριμένου παραδείγματος, παρουσιάζεται η δυνατότητα χρήσης του αλουμινίου και για μια κύρια φέρουσα κατασκευή όπως είναι μια πεζογέφυρα. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να επεκταθεί κανείς και στην τυποποίηση και τον σχεδιασμό και άλλων αντίστοιχων κατασκευών που απαιτούν αυξημένες απαιτήσεις έναντι διάβρωσης και μείωση του ίδιου βάρους τους.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι η χρήση του βιβλίου αυτού δεν υποκαθιστά σε καμιά περίπτωση την ανάγκη συνεχούς αναζήτησης στα κείμενα των προτύπων κανονισμών των Ευρωκωδίκων, των Εθνικών Κειμένων Εφαρμογής και Εθνικών Προσαρτημάτων τους, όπως και όσων άλλων προτύπων ΕΝ αναφέρονται στο σχεδιασμό κατασκευών αλουμινίου, όπως αυτά εκδόθηκαν για την Ελλάδα. Όμως η χρήση του βιβλίου αυτού, μπορεί να διευκολύνει τον φοιτητή, τον ερευνητή και τον μηχανικό της πράξης στο να αναγνώσει κριτικά ευκολότερα τους σχετικούς κανονισμούς και να τους εφαρμόσει σωστά στην πράξη. Μπορεί επιπρόσθετα να δημιουργήσει το ερέθισμα για μεγαλύτερη και σε βάθος αναζήτηση των κανονισμών αυτών με στόχο τον σχεδιασμό αειφόρων κατασκευών από αλουμίνιο.

Επιπρόσθετα τονίζεται εδώ ότι οι περιπτώσεις και οι μορφές των κατασκευών που παρουσιάζονται δεν αποτελούν πρότυπα κατασκευής, καθώς κάτι τέτοιο θα ακύρωνε το ρόλο του μηχανικού στο σχεδιασμό ενός έργου, αλλά περιγράφουν τη διαδικασία, τη μεθοδολογία και την ανάλυση που απαιτείται να γίνεται προκειμένου να υλοποιηθεί με επιτυχία ο σχεδιασμός έργων από αλουμίνιο.

Σε συγκεκριμένες μελέτες τεχνικών έργων, ο μηχανικός οφείλει να χρησιμοποιήσει τις επικαιροποιημένες διατάξεις, πίνακες και διαγράμματα των Ευρωκωδίκων, καθώς το περιεχόμενο του βιβλίου με τα σχήματα και τους πίνακές του πρέπει να χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά, για συμβουλευτικούς και διδακτικούς σκοπούς.



## 2.4

## Το αλουμίνιο στις κατασκευές

### 2.4.1 Ιστορικά στοιχεία – Οι πρώτες εφαρμογές

Από τα πρώτα κιάλας χρόνια μετά την πρώτη παραγωγή του αλουμινίου κατέστη εμφανές ότι το καθαρό μέταλλο αλουμίνιο δεν είχε ικανοποιητικές αντοχές και ότι εφόσον η αντοχή του βελτιωνόταν, αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών.

Το 1909 ο Γερμανός μεταλλουργός A. Wilm, ανακάλυψε ότι ορισμένα κράματα αλουμινίου, ενώ αμέσως μετά την παραγωγή τους ήταν χαμηλής αντοχής, στη συνέχεια όταν έμεναν για ορισμένο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία δωματίου η αντοχή τους αυξανόταν έντονα. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων το 1909 ανακάλυψε το κράμα Al-CuMgMn με την ονομασία ντουραλουμίνιο (duralumin) με αντοχή παρόμοια με αυτή του μαλακού χάλυβα. Το κράμα αυτό ουσιαστικά αντιστοιχεί στο αρχικό κράμα της σειράς 2xxx των κραμάτων αλουμινίου.

Μια δεκαετία αργότερα, το 1920, ανακαλύφθηκε μια ακόμη ομάδα κραμάτων αλουμινίου, η ομάδα Al-MgSi με εφελκυστική αντοχή της τάξης των  $300 \text{ N/mm}^2$ . Η σειρά αυτή αντιστοιχεί στη σειρά κραμάτων 6-xxx και γενικά παρουσιάζει αντοχή ελαφρά χαμηλότερη από τη σειρά 2xxx. Την ίδια δεκαετία ανακαλύφθηκαν τα κράματα της σειράς Al-Mg τα οποία παρουσιάζουν αφενός βελτιωμένη αντοχή μέσω εν ψυχρώ κατεργασίας και αφετέρου μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, και αντιστοιχούν στη σειρά κραμάτων 5xxx. Τη δεκαετία του 1930 ανακαλύφθηκαν ακόμη δύο σειρές κραμάτων αλουμινίου με βελτιωμένη αντοχή: η σειρά σουπερντουράλ (superdural) η οποία αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του ντουραλουμίν (2xxx) με εφελκυστική αντοχή η οποία φθάνει τα  $450 \text{ N/mm}^2$  και η σειρά κραμάτων Al-ZnMg (σειρά 7xxx) η οποία αποτελεί τη σειρά κραμάτων αλουμινίου με τη μεγαλύτερη αντοχή μέχρι σήμερα και μάλιστα, με εφελκυστική αντοχή της τάξης των  $500 \text{ N/mm}^2$ . Μέχρι τις αρχές του 1939 είχαν ανακαλυφθεί όλες οι μέχρι σήμερα γνωστές σειρές κραμάτων αλουμινίου, εκτός των συγκολλησιμων κραμάτων 7xxx τα οποία αναπτύχθηκαν μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Κατά τη δεκαετία του 1940 αποδείχθηκε ότι τα κράματα αλουμινίου μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δομικό υλικό των φερουσών κατασκευών αλουμινίου με βελτιωμένες ιδιότητες. Κύρια εφαρμογή υπήρξαν τα αεροπλάνα τα οποία κατασκευάστηκαν κατά χιλιάδες κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Σ' αυτά τόσο τμήματα του σκελετού τους, όσο και όλο το κέλυφός τους αποτελούνταν από κομμάτια αλουμινίου συνδεδεμένα το ένα με το άλλο με μεγάλο αριθμό ηλώσεων. Αρ-



χικά, τα δομικά τους στοιχεία ήταν ογκώδη ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη αντοχή, όμως με την πάροδο των χρόνων και με τη χρήση κραμάτων αλουμινίου συνεχώς υψηλότερης αντοχής και προηγμένων μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού τους, τα μέλη αυτά γινόνταν συνεχώς λεπτότερα και ισχυρότερα. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι είχαν προηγηθεί οι πρώτες προσπάθειες χρήσης αλουμινίου σε φέρουσες κατασκευές από τον Γερμανό F. von Zeppelin ο οποίος το 1900 κατασκεύασε το πρώτο αερόπλοιο/αερόστατο το οποίο είχε σκελετό κατασκευασμένο από διατομές καθαρού αλουμινίου, ενώ συνέχισε τις προσπάθειες του με το σχεδιασμό διαφόρων αερόπλοιων με φέροντα οργανισμό από ντουραλουμίνιο. Μεταξύ αυτών κατασκευάστηκαν ιδιαίτερα ογκώδη αερόπλοια όπως για παράδειγμα, το R101 με μήκος 230 m . Το πλήθος όμως των ατυχημάτων τα οποία συνέβησαν σ' αυτά λόγω της χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμου, οδήγησαν ουσιαστικά λίγο πριν από τη δεκαετία του '40 σε εγκατάλειψή τους μέχρι πρόσφατα που επανασχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για συγκεκριμένες αποστολές.

Κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, η παγκόσμια κατανάλωση σε αλουμινίου έφθασε ακόμη και τα δύο εκατομμύρια τόνους το έτος 1943 η οποία προοριζόταν κυρίως για την κατασκευή πολεμικών αεροπλάνων. Αμέσως μετά τη λήξη του Πολέμου που η κατασκευή αεροπλάνων περιορίστηκε, το αλουμίνιο βρήκε πλήθος άλλων εφαρμογών, μεταξύ των οποίων προεξάρχουσα θέση κατέχει η χρήση του σε συσκευασίες τροφίμων, ποτών κτλ. Φυσικά, η βιομηχανία κατασκευής αεροπλάνων αποτελεί έναν από τους κύριους χρήστες δομικού αλουμινίου, όμως ταυτόχρονα εμφανίστηκε πλήθος άλλων βιομηχανικών εφαρμογών του όπως είναι πχ. η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία κουφωμάτων κ.ά. Είναι χαρακτηριστικό ότι κατά τη διάρκεια των μεταπολεμικών δεκαετιών, η κατανάλωση αλουμινίου από τη βιομηχανία διπλασιαζόταν κάθε επτά χρόνια. Η αλματώδης αυτή ανάπτυξη στη χρήση του αλουμινίου οφείλεται στα τεχνολογικά άλματα τα οποία έγιναν μετά τον 2° Παγκόσμιο Πόλεμο. Συγκεκριμένα, οι εξελίξεις αυτές στην τεχνολογία των κατασκευών αλουμινίου ήταν συνοπτικά οι εξής:

- Η εισαγωγή των **κραμάτων** 5xxx και 6xxx σε αντικατάσταση της σειράς 2xxx η οποία παρέμεινε μόνον σε εφαρμογές της αεροναυπηγικής, καθώς και η ανακάλυψη των **συγκολλησιμων κραμάτων** της σειράς 7xxx.
- Η αντικατάσταση των μικρών ήλων οι οποίοι χρησιμοποιούνταν στην αεροναυπηγική από **ήλους μεγάλων διαστάσεων** στις κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού, και ακολούθως η αντικατάστασή των τελευταίων από **συγκολλήσεις**.
- Η ανακάλυψη γύρω στο 1950 μεθόδων συγκόλλησης ελασμάτων αλουμινίου: της μεθόδου TIG με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (tungsten) με ανεξάρτητο υλικό πλήρωσης, της ημιαυτόματης μεθόδου MIG με ηλεκτρόδιο με συνεχή πλήρωση, αμφότερες με την παρουσία αδρανούς αερίου (ηλίου ή αργού), και πρόσφατα η καθιέρωση και άλλων εξειδικευμένων πρωτοποριακών μεθόδων συγκόλλησης.

- Η διαδικασία **διέλασης** (extrusion) για την παραγωγή διατομών (κυρίως από κράματα σειράς 6-xxx) με πολύπλοκα σχήματα ώστε να επιτρέπεται χρήση πολύ λεπτών ελασμάτων με χρήση στοιχείων δυσκαμψίας τα οποία να προσδίδουν την απαραίτητη δυσκαμψία στο μέλος σε συνδυασμό με τη χρήση από πρέσες μεγάλης ισχύος από τις οποίες μπορούν να παραχθούν διατομές με πλάτος το οποίο πλησιάζει το 1 m.
- Η ανακάλυψη της τεχνολογίας **συνδέσεων συνάφειας** (adhesive joining) με την οποία ελάσματα αλουμινίου συγκολλώνται με τη βοήθεια ισχυρών ρητινών, οπότε δεν υπάρχουν τα γνωστά προβλήματα απώλειας αντοχής στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες (heat affected zones).

Οι προηγούμενοι παράγοντες επέδρασαν ευνοϊκά και οδήγησαν σύντομα σε έντονη ανάπτυξη στις δομικές εφαρμογές του αλουμινίου [51], [58].

## 2.4.2 Εφαρμογές του αλουμινίου

### 2.4.2.1 Φέρουσες κατασκευές αλουμινίου

Ως φέρουσες κατασκευές αλουμινίου (load bearing aluminium structures) χαρακτηρίζονται εκείνες οι κατασκευές των οποίων ο φέρων οργανισμός ή επιμέρους τμήματά τους είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου. Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου στην κατασκευή φερουσών κατασκευών αλουμινίου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1930 στις Η.Π.Α. με την κατασκευή γερανογεφυρών και συναφών φορέων με τη χρήση κραμάτων της σειράς 2xxx (ντουραλουμίνιο) τα οποία όμως λίγο αργότερα αντικαταστάθηκαν από κράματα άλλων σειρών (π.χ. της σειράς 6xxx). Στις αρχές της δεκαετίας του 1940 η χρήση του αλουμινίου επεκτάθηκε στην κατασκευή (φερουσών) οροφών σε οριζόντια ανεπτυγμένα κτίρια, ενώ η χρήση του συνεχίστηκε σε γερανογέφυρες κάθε είδους, τύπου και μήκους ανοίγματος.

Ταυτόχρονα, το αλουμίνιο άρχισε να χρησιμοποιείται στην κατασκευή γεφυρών (βλ. Σχ. 2.4.1) όπου και σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για γέφυρες σε απομακρυσμένα μέρη οι οποίες μεταφέρονται με ελικόπτερο και τοποθετούνται με τον τρόπο αυτόν εύκολα, και σε έντονα οξειδωτικό περιβάλλον όπου με τη χρήση κατάλληλου κράματος δεν απαιτείται βαφή. Επίσης, το δομικό αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε στρατιωτικές γέφυρες οι οποίες λόγω του μικρού βάρους του αλουμινίου έχουν το πλεονέκτημα της ταχύτατης κατασκευής και αποκαθίλωσης. Γενικά, η χρήση του αλουμινίου στη γεφυροποιία οδηγεί σε φορείς με μικρό βάρος, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μεγιστοποίηση των ανοιγμάτων των αντιστοίχων γεφυρών.

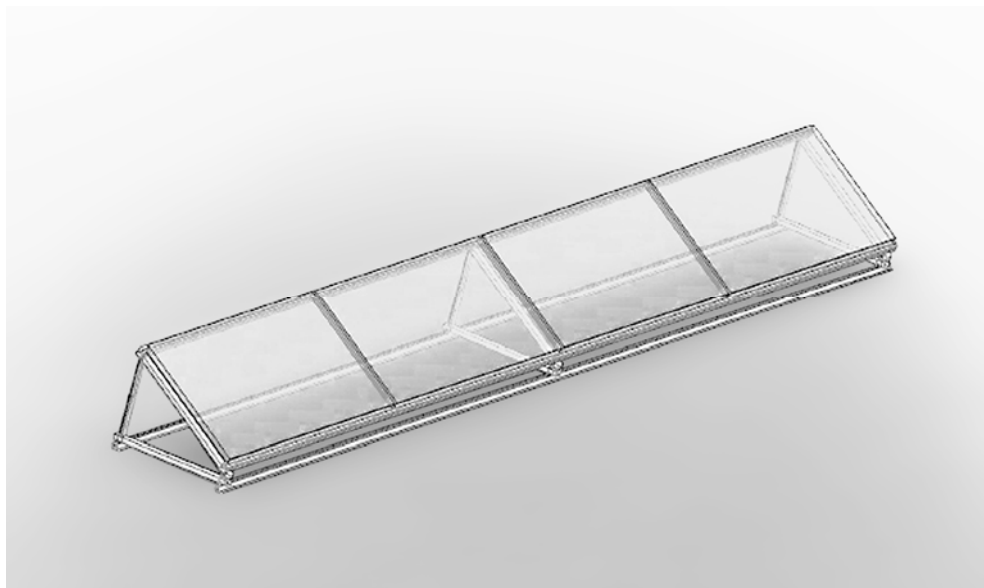


Σχ. 2.4.1: Η πρώτη γέφυρα αλουμινίου για αυτοκίνητα στην Arvida του Κεμπέκ (1949) [Δ4].

Τις τελευταίες δεκαετίες κατά τις οποίες η έκρηξη στη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας οδήγησε στην κατασκευή πολύ μεγάλου πλήθους **υπεράκτιων κατασκευών** (offshore structures), το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα στην κατασκευή προκατασκευασμένων κτιρίων, τα οποία διαθέτουν γραφεία και χώρους για τη στέγαση του προσωπικού πάνω σε σταθερές πλατφόρμες.

Τη δεκαετία του 1940 σε όλες τις προαναφερόμενες κατασκευές ειδικότητας Πολιτικού Μηχανικού, το κράμα το οποίο χρησιμοποιούνταν ήταν αυτό της σειράς 2xxx. Μια σειρά όμως αστοχιών σε τέτοιου είδους φορείς οι οποίες οφειλόταν είτε σε φαινόμενα **κόπωσης** (fatigue), είτε σε φαινόμενα έντονης οξείδωσης οδήγησε στο συμπέρασμα ότι για φέρουσες κατασκευές αλουμινίου Πολιτικού Μηχανικού τα κράματα τα οποία πρέπει να χρησιμοποιούνται είναι αυτά της σειράς 6xxx και τα συγκολλησίμα κράματα της σειράς 7xxx.

Στην κατηγορία αυτή εντάχθηκαν τα τελευταία χρόνια και οι κατασκευές στήριξης φωτοβολταϊκών στοιχείων (βλ. Κεφ. 7) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το κριτήριο για την επιλογή του υλικού στις εφαρμογές αυτές, πέρα από τη διάβρωση και την προκατασκευή, θέματα που αναλύθηκαν προηγουμένως, είναι και η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής των εγκαταστάσεων



Σχ. 2.4.2: Άποψη συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων με πλαίσια στήριξης από αλουμίνιο.

παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η ελαχιστοποίηση αυτή οδηγεί σε τιμές παραγωγής ρεύματος που δεν είναι αντιοικονομικές, άρα συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη.

#### 2.4.2.2 Εφαρμογές του αλουμινίου στις μεταφορές

Ένας από τους τομείς όπου τα κράματα αλουμινίου βρήκαν πλήθος εφαρμογών τις τελευταίες δεκαετίες είναι αυτός των μεταφορών. Μετά την επίτευξη αύξησης της αντοχής του αλουμινίου μέσω των κραμάτων του, η βιομηχανία κατασκευής σιδηροδρομικών οχημάτων, φορτηγών αυτοκινήτων, λεωφορείων, επιβατικών αυτοκινήτων κτλ. ξεκίνησε τη χρήση τους στην παραγωγή αρχικά εξαρτημάτων και μελών και στη συνέχεια ολόκληρων πλαισίων οχημάτων. Ο λόγος είναι ότι τα κράματα είναι πολύ (περίπου τρεις φορές) ελαφρότερα, ενώ η αντοχή τους είναι παρόμοια με αυτή του χάλυβα, και ταυτόχρονα δεν παρουσιάζουν προβλήματα λόγω οξείδωσης όπως στην περίπτωση του χάλυβα. Έτσι σήμερα η χρήση του αλουμινίου στον τομέα των μεταφορικών μέσων έχει μεγιστοποιηθεί διότι λόγω του μικρού βάρους των αντίστοιχων οχημάτων, η κατανάλωση ενέργειας ελαχιστοποιείται, ενώ ταυτόχρονα η οικονομία λόγω μειωμένης συντήρησης είναι σημαντικότερη.

Με την λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ξεκίνησε η παραγωγή των πρώτων **σιδηροδρομικών οχημάτων** (railway carriages) στα οποία ο φέρων οργανισμός δια-

μορφωνόταν με συγκόλληση κοιλοδοκών αλουμινίου από διέλαση. Η παραγωγή αυτή πολύ σύντομα αντικατέστησε σχεδόν ολοσχερώς την παραγωγή των κλασικών πλαισίων από χάλυβα στα οχήματα των σιδηροδρόμων. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα σιδηροδρομικά οχήματα μεταφοράς μεταλλευμάτων τα οποία σήμερα στη Β. Αμερική είναι κατασκευασμένα σε ποσοστό άνω του 90% από κράματα αλουμινίου. Γενικά, στο σκελετό τέτοιων οχημάτων υπάρχει πάντοτε μέριμνα να διατηρούνται οι τάσεις παντού σε χαμηλά επίπεδα ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα κόπωσης. Έτσι, στις φέρουσες αυτές κατασκευές καθίσταται δυνατή η χρήση οικονομικών κραμάτων, όπως είναι παραδείγματος χάριν τα κράματα με την χαμηλότερη αντοχή της σειράς 6xxx τα οποία αφενός είναι ιδιαίτερα οικονομικά και αφετέρου είναι εύκολα διελάσιμα.

Λίγο αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του '50, ξεκίνησε η παραγωγή του σώματος μεγάλων ή μικρών **φορτηγών αυτοκινήτων** (lorries/vans) από κράματα αλουμινίου (συνήθως από τα ισχυρά κράματα της σειράς 6xxx), η οποία ακόμη και μέχρι σήμερα συνεχίζεται με παρόμοιο τρόπο. Η φέρουσα αυτή κατασκευή επικάθεται στο σύστημα κίνησης (chassis) των φορτηγών και είναι συνδεδεμένη μέσω ηλώσεων, κοχλιώσεων και σπανίως συγκολλήσεων. Στα ανατρεπόμενα όμως σώματα φορτηγών, η κατασκευή αυτή συνήθως γίνεται πλήρως με συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου από κράματα της σειράς 5xxx.

Μετά από την επιτυχή παραγωγή όλων των προαναφερόμενων οχημάτων για πολλές δεκαετίες, ήταν αναμενόμενο τα κράματα αλουμινίου να βρουν επιτυχή εφαρμογή και στα **επιβατικά αυτοκίνητα**. Επίσης, το σώμα της πλειονότητας των **λεωφορείων** κατασκευάζεται από κράματα αλουμινίου. Και στην περίπτωση αυτή το μικρό βάρος του δομικού υλικού (αλουμινίου) αποτελεί πολύ μεγάλο πλεονέκτημα διότι μειώνει την κατανάλωση των καυσίμων στα αντίστοιχα αυτοκίνητα. Ενώ για πολλές δεκαετίες το αλουμίνιο χρησιμοποιούνταν για περιορισμένη παραγωγή εξαρτημάτων κυρίως σε ακριβά αυτοκίνητα, στο τέλος της δεκαετίας του '90 ξεκίνησε η παραγωγή **αυτοκινήτων** τα οποία είναι κατασκευασμένα πλήρως από αλουμίνιο. Τούτο έγινε εφικτό με το σχεδιασμό ευφών λύσεων στο σχεδιασμό και τη χρήση νέων τεχνολογιών συγκολλήσεων και συνδέσεων συνάφειας, οπότε οι φέρουσες κατασκευές αλουμινίου οι οποίες χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα να παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά αντοχής και δυσκαμψίας με αυτά του χάλυβα. Σημειώνεται επίσης ότι οι νέες αυτές λύσεις δεν φαίνεται να είναι ακριβότερες από τον παραδοσιακό σχεδιασμό χαλύβδινων στοιχείων καθώς τα στοιχεία αλουμινίου έχουν φθηνότερη τελική επεξεργασία, μικρότερο κόστος βαφής διότι δεν έχουν προβλήματα οξείδωσης, ενώ το κόστος συντήρησης είναι αμελητέο.

### 2.4.2.3 Εφαρμογές του αλουμινίου σε παράκτιες και θαλάσσιες κατασκευές

Τα κράματα δομικού αλουμινίου χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες ευρύτατα στην κατασκευή στεγασμένων χώρων, γραφείων και υπνοδωματίων με σύστημα εμβάτη (modular system) επάνω σε παράκτιες ή υπεράκτιες κατασκευές άντλησης πετρελαίου [64], φυσικού αερίου κ.τ.λ. (βλ. Σχήμα 2.4.3).

Καθώς οι κατασκευές αυτές αλουμινίου είναι συγκριτικά με άλλες ελαφρότερες, επιλέγονται λόγω του ότι η ανέγερσή τους έχει σαφή οικονομικά πλεονεκτήματα στο κόστος της συνολικής κατασκευής η οποία είναι συνάρτηση του συνολικού βάρους της.

Είναι επίσης ευρέως γνωστό ότι τα κράματα αλουμινίου των σειρών 5xxx και 6xxx χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες στην κατασκευή μεγάλων δομικών τμημάτων του φέροντος οργανισμού εμπορικών, επιβατηγών και πολεμικών πλοίων.

Πολύ πρόσφατα μάλιστα, όλα τα ταχύπλοα πλοία τελευταίας τεχνολογίας (βλ. Σχ. 2.4.4) είναι κατασκευασμένα αποκλειστικά από κράματα αλουμινίου (συνδυασμός πλακών αλουμινίου σειράς 5xxx και μελών σειράς 6xxx).



Σχ. 2.4.3: Θαλάσσια εξέδρα πετρελαίου στην οποία το κύριο κτίριο αλλά και η εξέδρα του ελικοδρομίου κατασκευάστηκαν με φέροντα οργανισμό από αλουμίνιο [Δ5].



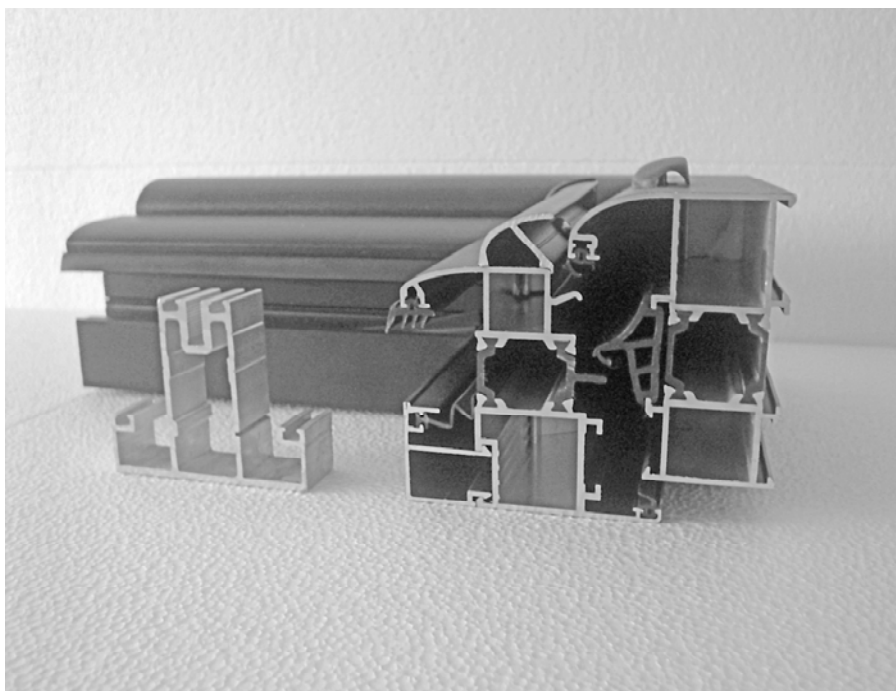
*Σχ. 2.4.4: Ναυπήγηση πλοίου κατασκευασμένου από κράματα αλουμινίου [Δ6].*

#### **2.4.2.4 Εφαρμογές στην αρχιτεκτονική και τη δόμηση κτιρίων**

Από τη δεκαετία του '30 και μέχρι σήμερα τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται (σε ανταγωνισμό με το ξύλο, το χάλυβα και πρόσφατα το πλαστικό) εκτεταμένα στην παραγωγή μελών πλαισίων κουφωμάτων, υαλοπετασμάτων (βλ. Κεφ. 6), αιθρίων κτλ. (βλ. Σχ. 2.4.5). Τα δομικά αυτά στοιχεία σχεδιάζονται και παράγονται με διέλαση με τέτοιον τρόπο ώστε να συντίθενται/συνδέονται χωρίς συγκόλληση με μηχανικά μέσα σύνδεσης [37]. Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο από τα κράματα της σειράς 6xxx με μικρή σχετικά αντοχή και λεπτά τοιχώματα διατομών, καθώς το κριτήριο σχεδιασμού στις φέρουσες αυτές κατασκευές είναι μάλλον η δυσκαμψία, παρά η αντοχή.

Ταυτόχρονα, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενα κεφάλαια, τα ειδικά τεμάχια σύνδεσης αλλά και τα συνδετικά μέρη (κοχλίες κτλ.) παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στο σχεδιασμό των κατασκευών αυτών.

Επίσης, τις τελευταίες δεκαετίες τα φύλλα αλουμινίου (βλ. Σχ. 2.4.6), συνήθως εν μορφή σύνθετης διατομής με μόνωση, χρησιμοποιούνται ως εξωτερική κάλυψη βιομηχανικών κτιρίων, κτιρίων γραφείων και κατοικιών κ.ο.κ.

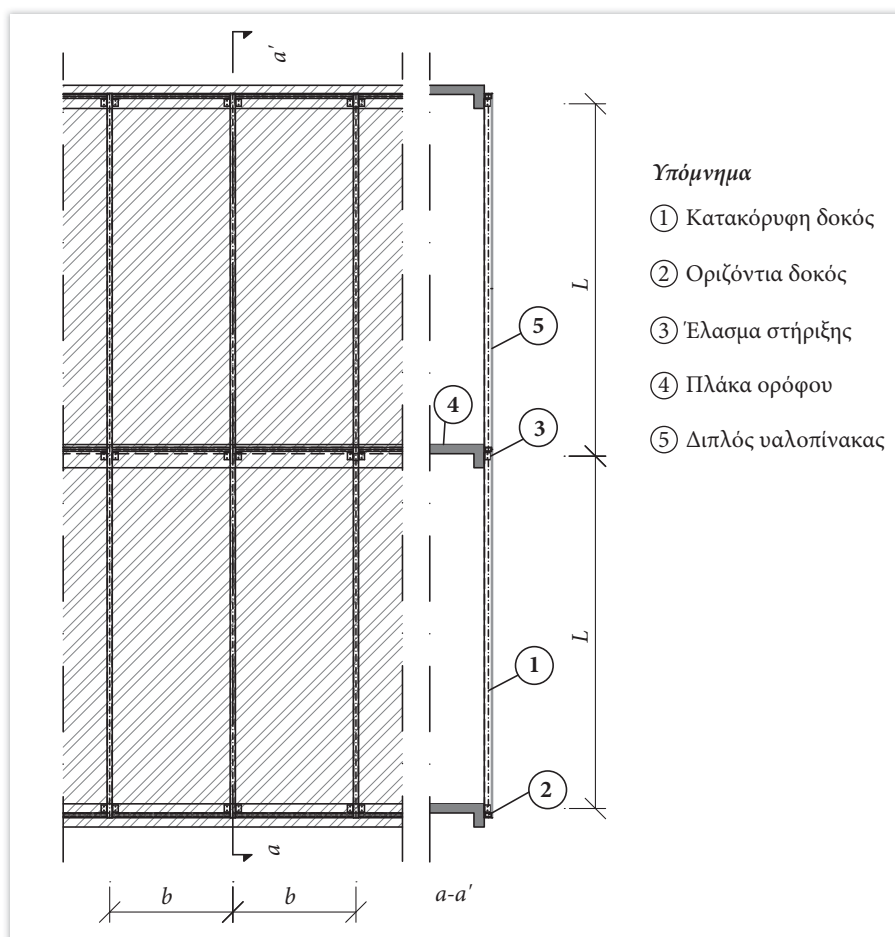


Σχ. 2.4.5: Τυπική διατομή κουφώματος αλουμινίου.



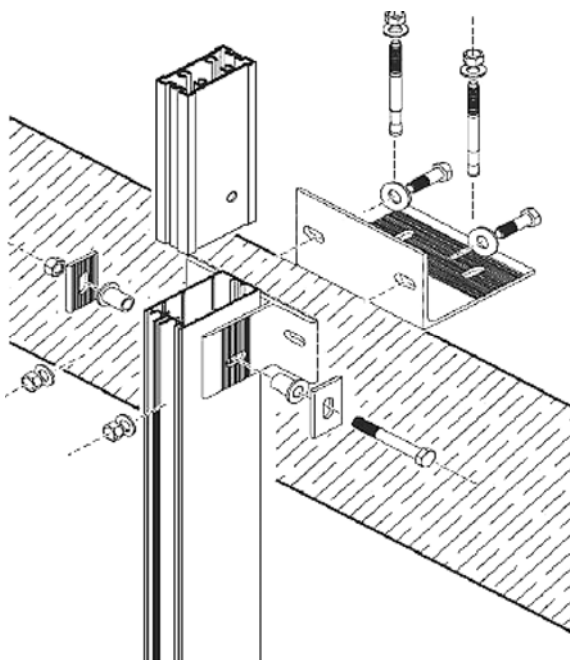
Σχ. 2.4.6: Σύνθετο φύλλο αλουμινίου που χρησιμοποιείται στο εξωτερικό κέλυφος κτιρίων.





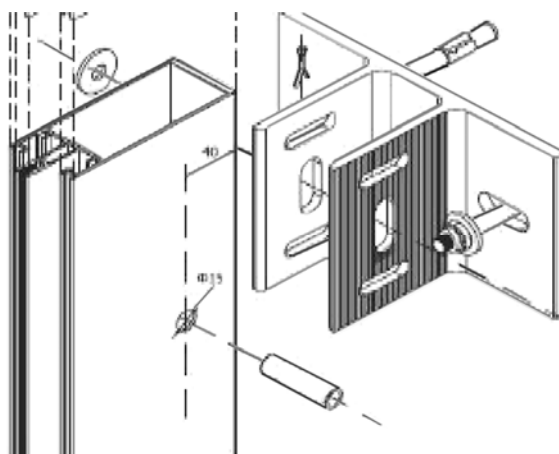
**Σχ. 6.1.2** Σχηματική περιγραφή δομικού συστήματος υαλοπετάσματος πλαγιοκάλυψης κτιρίου.

Σε ένα σύστημα ναλοπετάσματος, η κύρια κατακόρυφη δοκός (ΚΔ) κατάλληλης διατομής από αλουμίνιο καλύπτει συνήθως το ύψος δύο διαδοχικών ορόφων διαμορφώνοντας στατικό σύστημα δοκού δύο ανοιγμάτων [26], [31]. Το πλαίσιο συμπληρώνουν οριζόντιες αμφιέριστες δευτερεύουσες δοκοί (ΔΔ) από αλουμίνιο οι οποίες στηρίζονται στις κατακόρυφες στο ύψος των εκάστοτε ορόφων, ώστε να μη δημιουργούν προβλήματα θέασης και αισθητικής στο κτίριο. Οι κατακόρυφες δοκοί του συστήματος στηρίζονται με κατάλληλα ειδικά ελάσματα στήριξης μορφής  $T$  (απλού ή σύνθετου) και  $L$  (γωνιακού) από αλουμίνιο, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τη θέση εφαρμογής και τον κατασκευαστή, ως την ακριβή διαμόρφωση και λειτουργία και τον τρόπο στήριξης στον φέροντα οργανισμό στο ύψος του ορόφου (βλ. Σχ. 6.1.3).



Σχ. 6.1.3 Τυπικό σύνθετο σύστημα ειδικών τεμαχίων σύνδεσης κατακόρυφης δοκού υαλοπετάσματος.

Συχνά στα προτεινόμενα συστήματα, οι θέσεις των ενδιάμεσων στηρίξεων κατακόρυφης δοκού δύο ανοιγμάτων περιλαμβάνουν ένα μόνο ειδικό τεμάχιο μορφής διπλού ταυ, ώστε ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται η στήριξη της κολώνας με εκατέρω-



Σχ. 6.1.4 Τυπική στήριξη κατακόρυφης δοκού υαλοπετάσματος με ένα μόνο ειδικό τεμάχιο μορφής διπλού ταυ.



## Κεφάλαιο

## Σχεδιασμός πλαισίου στήριξης φωτοβολταϊκών συστημάτων

## 7.1

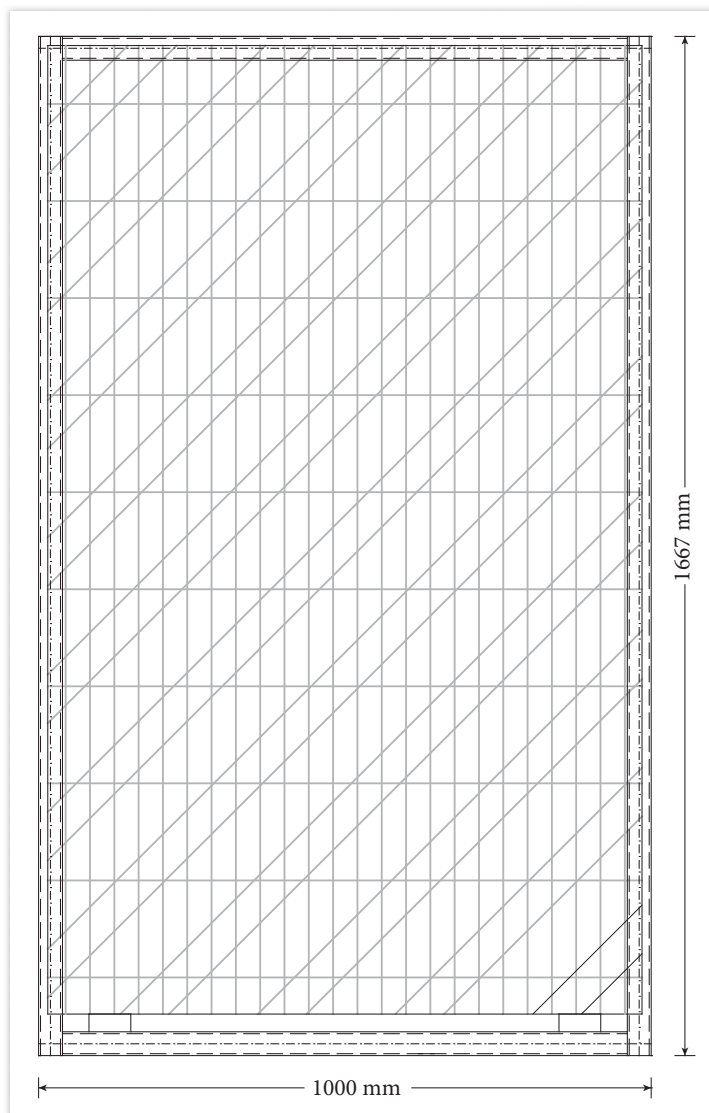
### Περιγραφή και χαρακτηριστικά της κατασκευής

Μια τυπική μονάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος διαμορφώνεται με την παράλληλη διάταξη ομοίων τυπικών μονάδων (βλ. Σχ. 7.1.1).

Η τυπική αυτή μονάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων συνήθως είναι πιστοποιημένη εργοστασιακά και έχει συγκεκριμένες προδιαγραφές τόσο για την στατική της επάρκεια, όσο και για τη λειτουργικότητα της. Κάθε τέτοια μονάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων διαμορφώνεται από την ειδική γυάλινη επιφάνεια με τις ηλιακές κυψέλες και από το περιμετρικό πλαίσιο από συνήθως ανοιχτού τύπου διατομή κράματος αλουμινίου. Η γυάλινη επιφάνεια συνδέεται στην άνω πλευρά της διατομής αυτής (βλ. Σχ. 7.1.2) ενώ εσωτερικά διαμορφώνεται η απαιτούμενη διάταξη του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού λειτουργίας της μονάδας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η κατασκευή αυτή καθώς είναι πιστοποιημένη, δεν απαιτεί έλεγχο της διατομής του περιμετρικού πλαισίου της μονάδας, εκτός από ζητήματα ελέγχου που αφορούν αλληλεπίδραση, με το σύστημα στήριξης και αγκύρωσης της κατασκευής.

Στις γενικές αναφορές πιστοποίησής της μια τυπική μονάδα (βλ. Σχ. 7.1.1) πρέπει να διαθέτει επαρκή φέρουσα ικανότητα για ομοιόμορφο φορτίου χιονιού (snow load)  $5400 \text{ Pa}$ , δηλαδή  $5.4 \text{ kN/m}^2$ , με μέγιστη βύθιση  $5 \text{ mm}$  κατά μήκος της μεγάλης πλευράς, ενώ για την περίπτωση φορτίου ανέμου αναφέρεται ότι πρέπει να διαθέτει επαρκή φέρουσα ικανότητα για ομοιόμορφη πίεση ανέμου  $2400 \text{ Pa}$ , δηλαδή  $2.4 \text{ kN/m}^2$ .

Οι μονάδες αυτές σε μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μικρής ή και μεγάλης ισχύος, τοποθετούνται η μια δίπλα στην άλλη με δυο συνήθως τρόπους:



Σχ. 7.1.1: Τυπική μονάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων διαστάσεων 1670×1000×50 (mm).

- α) με στήριξη σε δυο παράλληλες μεταξύ τους Κύριες Δοκούς (ΚΔ) από προφίλ κράματος αλουμινίου, οι οποίες διατάσσονται στα άκρα (ή κοντά στα άκρα σε απόσταση  $L/6$  από το άκρο) των πλαισίων και κάθετα στην μεγάλη πλευρά τους και
- β) με στήριξη σε δυο παράλληλες μεταξύ τους Κύριες Δοκούς από προφίλ κράματος αλουμινίου, οι οποίες διατάσσονται στα άκρα ή αντίστοιχα κοντά στα άκρα των πλαισίων και κάθετα στην μικρή πλευρά τους.



Κεφάλαιο

## Σχεδιασμός πεζογέφυρας από αλουμίνιο

### 8.1

### Το αλουμίνιο ως κύριο δομικό υλικό στη γεφυροποιία

#### 8.1.1 Εισαγωγή του αλουμινίου στη γεφυροποιία

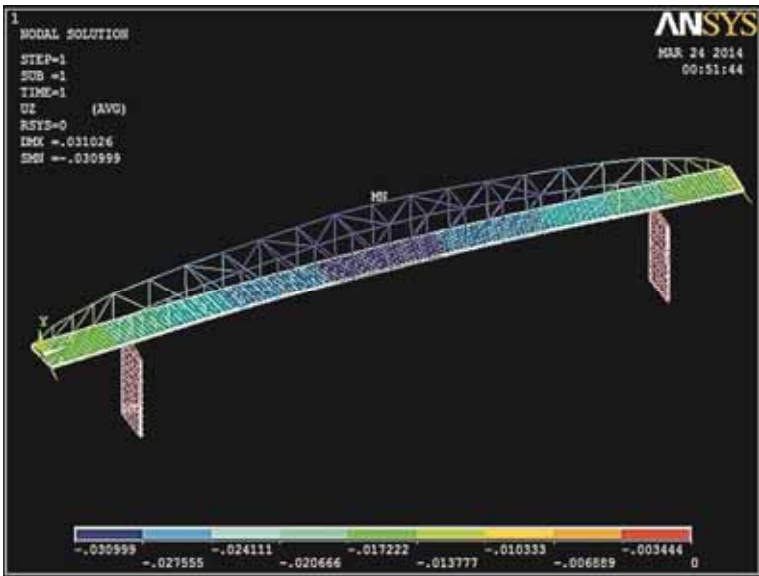
Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου στις κατασκευές γεφυρών ξεκίνησε εδώ και περίπου 70 χρόνια. Η πρώτη χρήση του αλουμινίου έγινε το 1933 στη γέφυρα Smithfield Street στο Pittsburgh των Ηνωμένων Πολιτειών, όταν το υπάρχον φθαρμένο κατάστρωμα από χάλυβα και ξύλο αντικαταστάθηκε με ελαφρότερες πλάκες αλουμινίου. Η μείωση του βάρους του καταστρώματος οδήγησε σε σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας της γέφυρας, ενώ το κατάστρωμα από κράμα της σειράς 2014-T6 λειτούργησε χωρίς σημαντικά προβλήματα μέχρι το 1967. Τότε αντικαταστάθηκε με αντίστοιχο κατάστρωμα κράματος της σειράς 6061-T6 το οποίο παρέμεινε μέχρι το κλείσιμο της γέφυρας το 1995.

Η πρώτη γέφυρα που κατασκευάστηκε πλήρως από αλουμίνιο ήταν η γέφυρα Grasse River (βλ. Σχ. 8.1.1) στην περιοχή Massena της Νέας Υόρκης το 1946.

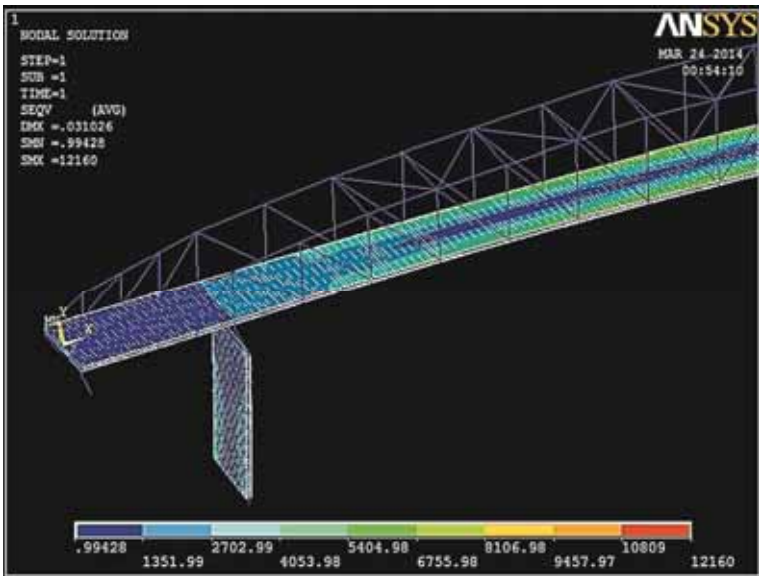


Σχ. 8.1.1: Άποψη της πεζογέφυρας αλουμινίου στον ποταμό Grasse River (1946) [Δ10].

➔ Σεισμός X-X (εγκάρσια διεύθυνση)

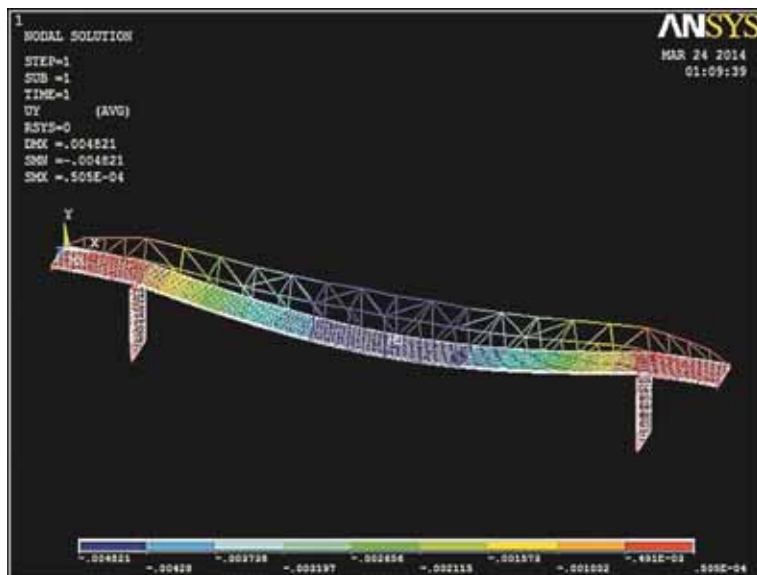


Σχ. 8.3.10: Μετακινήσεις γέφυρας για σεισμό X-X (εγκάρσια διεύθυνση).

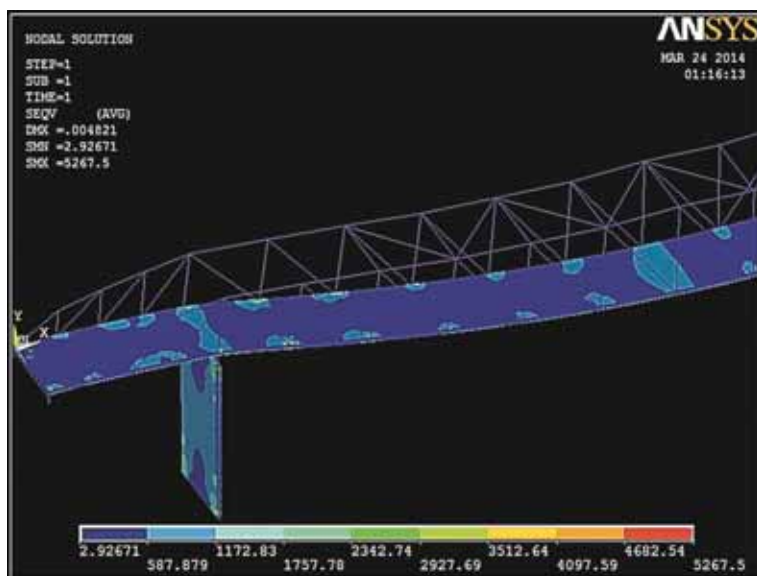


Σχ. 8.3.11: Κατανομή τάσεων Von Mises (kPa) γέφυρας για σεισμό X-X.

⇒ Σεισμός Z-Z (κατακόρυφη διεύθυνση)



Σχ. 8.3.12: Μετακινήσεις γέφυρας για σεισμό Z-Z (κατακόρυφη διεύθυνση).



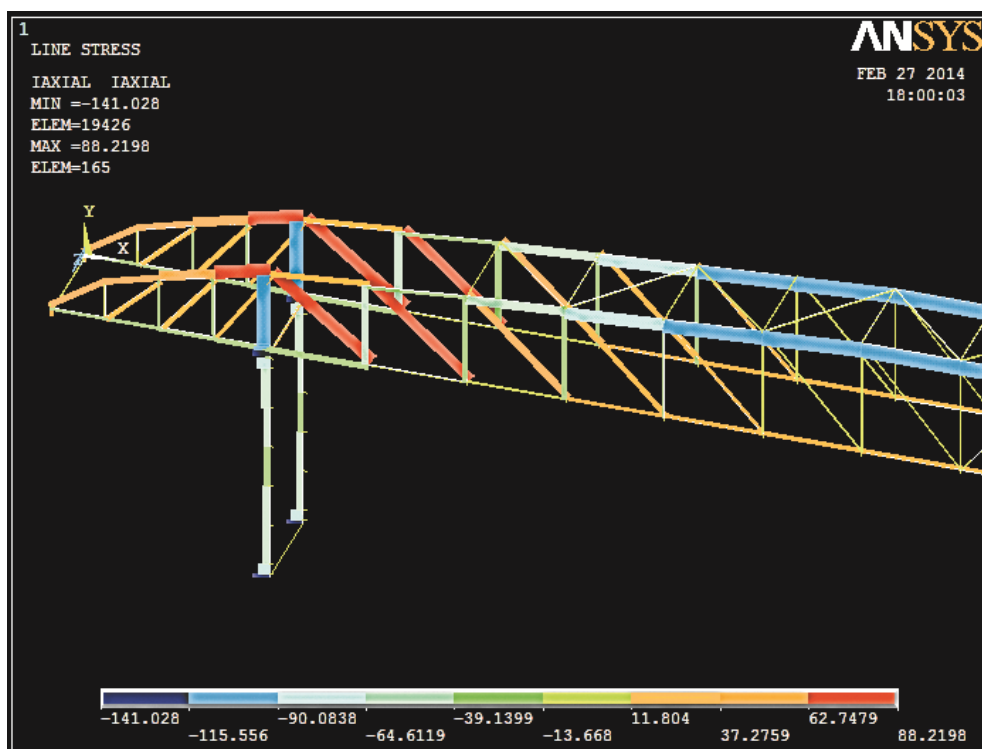
Σχ. 8.3.13: Κατανομή τάσεων Von Mises (kPa) γέφυρας για σεισμό Z-Z.

### 8.4.2.2 Έλεγχος διαστασιολόγησης σε Ο.Κ.Α.

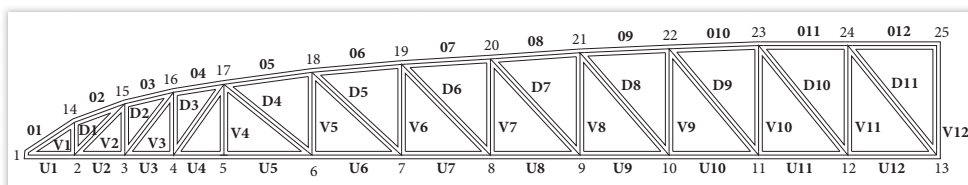
#### 1) Έλεγχος διαστασιολόγησης γραμμικών στοιχείων ανωδομής

Από την επίλυση του φορέα για τους συνδυασμούς φόρτισης και τα φορτία επιβολής που περιγράφησαν (βλ. Πιν. 8.4.3) και αναλύθηκαν προηγουμένως σε Ο.Κ.Α. προκύπτουν οι αξονικές δυνάμεις όλων των μελών του δικτυώματος (βλ. Σχ. 8.4.6) του καταστρώματος αλλά και των βάθρων.

Ιδιαίτερα για τα δικτυώματα, τα αποτελέσματα αυτά εξάγονται (βλ. Σχ. 8.4.7) σύμφωνα με τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του συμμετρικού τμήματος του ζευκτού) για όλους τους συνδυασμούς δράσης που αναλύθηκαν.



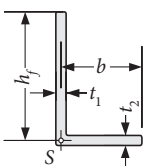
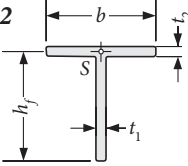
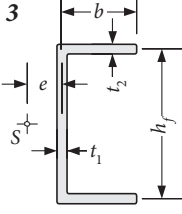
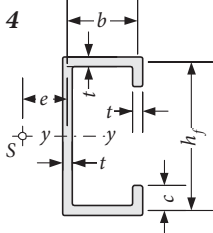
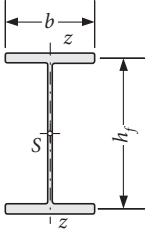
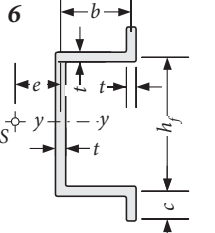
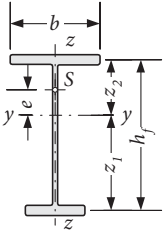
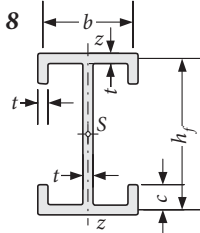
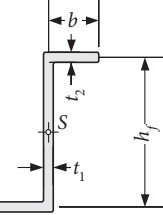
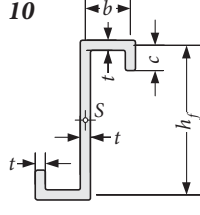
Σχ. 8.4.6: Αξονικές δυνάμεις φορέα πεζογέφυρας για το συνδυασμό C1.



Σχ. 8.4.7: Διακριτοποίηση μελών τμήματος ζευκτού φορέα πεζογέφυρας.



**Βοηθητικός πίνακας σταθερών στρέψης  
και θέσης κέντρου διάτμησης για χαρακτηριστικές  
διατομές αλουμινίου**

<p><b>1</b></p>  $I_w = \frac{h_f^3 \cdot t_1^3 + b^3 \cdot t_2^3}{36}$	<p><b>2</b></p>  $I_w = \frac{h_f^3 \cdot t_1^3}{36} + 2 \cdot \frac{(b/2)^3 \cdot t_2^3}{36}$
<p><b>3</b></p>  $e = \frac{3 \cdot b^2 \cdot t_2}{h_f \cdot t_1 + 6 \cdot b \cdot t_2}$ $I_w = \frac{h_f^2 \cdot b^3 \cdot t_2}{12} \cdot \frac{2 \cdot h_f \cdot t_1 + 3 \cdot b \cdot t_2}{h_f \cdot t_1 + 6 \cdot b \cdot t_2}$	<p><b>4</b></p>  $e = \frac{h_f^2 \cdot b^2 \cdot t}{I_y} \cdot \left( \frac{1}{4} + \frac{c}{2 \cdot b} - \frac{2 \cdot c^3}{3 \cdot h_f^2 \cdot b} \right)$ $I_w = \frac{b^2 \cdot t}{6} (4 \cdot c^3 + 6 \cdot h_f \cdot c^2 + 3 \cdot h_f^2 \cdot c + h_f^2 \cdot b) - e^2 \cdot I_y$
<p><b>5</b></p>  $I_w = \frac{h_f^2 \cdot I_z}{4}$	<p><b>6</b></p>  $e = \frac{h_f^2 \cdot b^2 \cdot t}{I_y} \cdot \left( \frac{1}{4} + \frac{c}{2 \cdot b} - \frac{2 \cdot c^3}{3 \cdot h_f^2 \cdot b} \right)$ $I_w = \frac{b^2 \cdot t}{6} (4 \cdot c^3 - 6 \cdot h_f \cdot c^2 + 3 \cdot h_f^2 \cdot c + h_f^2 \cdot b) - e^2 \cdot I_y$
<p><b>7</b></p>  $e = \frac{z_1 \cdot I_1 - z_2 \cdot I_2}{I_z}$ $I_w = \frac{h_f^2 \cdot I_1 \cdot I_2}{I_z}$ <p>όπου <math>I_1</math> και <math>I_2</math> είναι οι αντίστοιχες ροπές αδράνειας της επιφάνειας των πελμάτων περί του άξονα z-z</p>	<p><b>8</b></p>  $I_w = \frac{h_f^2 \cdot I_y}{4} + \frac{c^2 \cdot b^2 \cdot t}{6} \cdot (3 \cdot h_f + 2 \cdot c)$
<p><b>9</b></p>  $I_w = \frac{h_f^2 \cdot b^3 \cdot t_2}{12} \cdot \frac{2 \cdot h_f \cdot t_1 + b \cdot t_2}{h_f \cdot t_1 + 2 \cdot b \cdot t_2}$	<p><b>10</b></p>  $I_w = \frac{b^2 \cdot t}{12 \cdot (2 \cdot b + h_f + 2c)} \times$ $(h_f^2 \cdot (b^2 + 2 \cdot b \cdot h_f + 4 \cdot b \cdot c + 6 \cdot h_f \cdot c) + 4 \cdot c^2 \cdot (3 \cdot b \cdot h_f + 3 \cdot h_f^2 + 4 \cdot b \cdot c + 2 \cdot h_f \cdot c + c^2))$