



ΣΧΟΛΗ: ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΘΕΜΑΤΟΣ:

«ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ»

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : ΚΟΝΤΑΡΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΜ:5532

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Παναγιώτης Κακαβός – Παπανιάρος

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΑΤΡΑ,2020

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σε αυτό το σημείο είμαι στην θέση να ευχαριστήσω εκείνους τους ανθρώπους που με στήριξαν καθόλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας καθώς και σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη την συμπαράσταση τους στην διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον εποπτεύων καθηγητή μου **Δρ. Παναγιώτης Κακαβός – Παπανιάρος** για την πολύτιμη βοήθεια του, την κατανόηση και την καθοδήγηση του. Οι συμβουλές του και οι οδηγίες του με βοήθησαν στο να βελτιώσω πολλά σημεία της εργασίας μου.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω το Εκπαιδευτικό άλλα και το Διοικητικό προσωπικό του Τεχνολογικού και Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών για τις ευκαιρίες που μου έδωσαν, τις γνώσεις και τα εφόδια που μου πρόσφεραν τα χρόνια των σπουδών μου για να έχω ένα καλύτερο μέλλον και να εξελιχτώ στην επιστήμη που αγαπώ!

«Η παιδεία είναι ο δεύτερος ήλιος για τους ανθρώπους»

-Πλάτων

«Διπλά βλέπουν όσοι έμαθαν γράμματα»

-Πυθαγόρας

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη εξέλιξη στις κατασκευαστικές επιστήμες. Αυτό οφείλεται χωρίς αμφιβολία στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους τομείς της. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών και αποτελεί ισχυρό εργαλείο στην μελέτη των κατασκευών αφού θεωρείται η προσεγγιστική και αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, συνεχούς μέσου αυθαίρετης γεωμετρίας, οριακών συνθηκών και φορτίων. Βασίζεται στον συνδυασμό μεταβλητών μεθόδων και τοπικών προσεγγίσεων που ισχύουν σε περιορισμένη περιοχή του πεπερασμένου στοιχείου για την διακριτοποίηση του προβλήματος.

Πρώτο μέλημα του μηχανικού και ίσως και η πιο σημαντική του απόφαση είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής, τόσο ακριβέστερη είναι η λύση του αλλά επίσης και πιο δαπανηρή είναι η κατασκευή. Ωστόσο ο μελετητής είναι σημαντικό να γνωρίζει ποιες είναι οι πηγές των πιθανών σφαλμάτων έτσι ώστε να ακολουθεί τις κατάλληλες διαδικασίες- προγράμματα για την αποφυγή του.

Ο Πολιτικός Μηχανικός έχει στα χέρια του χρήσιμα σύγχρονα εργαλεία, μέσω Ηλεκτρονικού Υπολογιστή που τον βοηθούν στην γρηγορότερη και ασφαλέστερη μελέτη των κατασκευών που αναλαμβάνει. Καλείται να επιλέξει τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό την βέλτιστη λύση. Γι αυτόν τον λόγο γίνεται εκτενής αναφορά στην επιλογή αλουμινίου, την ανάλυση αυτού και των κραμάτων του. Τέλος αναφέρεται η χρήση του στον χώρο της Γεωργίας και συγκεκριμένα στον κλάδο των θερμοκηπίων.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω εργασία θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων φυσικής – μηχανικής – ανάλυσης κατασκευών κ.α.

Στο 1<sup>ο</sup> (πρώτο) κεφάλαιο αναφέρεται η θεωρητική τους αφετηρία και πως οι επιστήμονες έχουν καταφέρει να σημειώσουν τεράστια πρόοδο στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διαφόρων πολύπλοκων προβλημάτων. Επιπλέον στο πρώτο κεφάλαιο τονίζεται πως η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Επίσης αναλύονται οι τέσσερις συνθήκες που απαιτούνται για να ικανοποιηθεί η συνθήκη που θα δώσει τα αποτελέσματα με τα λιγότερα σφάλματα.

Στο 2<sup>ο</sup> (Δεύτερο) κεφάλαιο επικεντρώθηκα στο αλουμίνιο ως υλικό. Αναφέρεται η γενική του χρήση, καθώς και τα πλεονεκτήματα που έχει ως μέταλλο και μας οδηγούν στην επιλογή του. Αναλύεται η πρωτοεμφάνιση του στον χώρο της οικοδομής, η διαδικασία χύτευσης αυτού αλλά και η χρησιμότητα των κραμάτων του σε έργα πολιτικού μηχανικού. Σπουδαίο αναφοράς θεωρήθηκε η παραπομπή σε έργα του παρελθόντος και παραδείγματα του σήμερα από την καθημερινότητα μας μέχρι και την αρχιτεκτονική κτηρίων.

Στο 3<sup>ο</sup> (τρίτο) κεφάλαιο αναφέρονται οι συνθήκες που επικρατούν τα τελευταία χρόνια με τις κλιματικές αλλαγές στον πλανήτη, που οδηγούν με τη σειρά τους στην αύξηση της ζήτησης της δόμησης των θερμοκηπίων. Ιδιαίτερο ρόλο στην ανθεκτικότητα της κατασκευής παίζει η κατάλληλη προδιαγραφή των υλικών που επιλέγονται για την σύσταση των θερμοκηπίων. Για αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στους Ευρωκώδικες και τη σημασία που παρέχουν στην αξιοπιστία της κατασκευής. Χαρακτηριστικά ο Ευρωκώδικας 9 εστιάζει στις σημαντικές προδιαγραφές, ώστε να επιτευχθεί ο πιο σωστός και ασφαλής σχεδιασμός των κατασκευών από αλουμίνιο.

Στο 4<sup>ο</sup> (Τέταρτο) και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται εστίαση σε λογισμικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων και εκτενής ανάλυση στο ANSYS. Αναφέρονται βασικές πληροφορίες για αυτό το πρόγραμμα και συμπεραίνουμε πόσο χρήσιμο είναι στον χώρο της μηχανικής, της αεροναυπηγικής αλλά και της βιομηχανίας αυτοκινήτων. Ανάλυση των σταδίων τα οποία ακολουθούν όλα τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την μοντελοποίηση μιας κατασκευής αλλά και επεξήγηση αυτών. Γίνεται σύντομη ανάλυση σε επιπλέον προγράμματα που αφορούν την επιστήμη των Πολιτικών Μηχανικών και τους βοηθούν το κάθε ένα με ξεχωριστό τρόπο.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

ΔΟΜΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

ΥΛΙΚΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ

ANSYS

FEM DESIGN

GT STRUGL

CAE CAD

CAE ANSA

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ LANGRANGE

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εξώφυλλο.....	1
Ευχαριστίες.....	2
Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	4
Λέξεις Κλειδιά.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Αρκτικόλεξο.....	8
Κατάλογος Φωτογραφιών.....	9
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> «Πεπερασμένα Στοιχεία».....</b>	
1.1 Γενικά για τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	10
1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	10
1.3 Ειδικότερα για τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	11
1.3.1 Βασικές έννοιες της μεθόδου.....	12
1.4 Διαφορές Αναλυτικής Μεθόδου και πεπερασμένων Στοιχείων.....	14
1.5 Σφάλματα.....	15
1.6 Βήματα για λύση Συνεχούς προβλήματος.....	15
1.7 Πεπερασμένα Στοιχεία και προσομείωση.....	17
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> «Το Αλουμίνιο».....</b>	
2.1 Γενική Χρήση και Ανάλυση του Αλουμινίου.....	19
2.1.1 Γένεση του Αλουμινίου.....	20
2.2 Παραγωγή Αλουμινίου.....	21
2.2.1 Χύτευση Αλουμινίου.....	22
2.2.2 Κράματα Αλουμινίου και Κατάταξη Αυτών.....	23
2.3 Κατασκευές Αλουμινίου.....	23
2.4 Εφαρμογές Αλουμινίου στην αρχιτεκτονική και δόμηση κτηρίων.....	27
2.5 Χαρακτηριστικές Εφαρμογές σε έργα Πολιτικού Μηχανικού.....	27
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> «Κατασκευή Θερμοκηπίου και Ευρωκώδικες».....</b>	
3.1 Κλιματική αλλαγή.....	29

3.2 Τύποι θερμοκηπίων .....	29
3.3 Συχνή κίνδυνοι θερμοκηπίων.....	31
3.3.1 Φορτία Σκελετού Θερμοκηπίων.....	31
3.3.2 Φορτία από χιόνι.....	31
3.3.3 Λοιπά Φορτία.....	31
3.4 Υλικά σκελετού.....	32
3.4.1. Σκελετοί από αλουμίνιο πλεονεκτήματα- μειονεκτήματα.....	32
3.5 Ευρωκώδικες και η σημασία τους.....	33
3.6 Κανόνες σχεδιασμού μελών αλουμινίου.....	34
3.7 Βασικές αρχές σχεδιασμού.....	35
3.8 Εθνικά προσδιοριζόμενες παράμετροι.....	36
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> « Χρήσιμα Προγράμματα Πολιτικών Μηχανικών».....</b>	
4.1 Βασικές Πληροφορίες για το ANSYS.....	40
4.1.1 Ενδεικτική Ανάλυση των Σταδίων Υλοποίησης.....	40
4.2 Χρήσιμα Λογισμικά και Προγράμματα για Πολιτικούς Μηχανικούς.....	43
4.2.1 Τα προγράμματα MENTAT και MARC.....	43
4.2.2 FEM Design.....	43
4.2.3 Το Πρόγραμμα GT STRUDL.....	45
4.2.4 Τα Λογισμικά CAE και CAD.....	45
4.2.5 Το Λογισμικό Πακέτο CAE ANSA.....	46
4.2.6 Πολλαπλασιαστές Langrange.....	47
Συμπεράσματα.....	48
Βιβλιογραφία.....	49
Επίσημοι Ιστότοποι.....	50

## ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΟ

F.A.O. = Food and Agriculture Organization

C.E.N = Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης

E.E. = Ευρωπαϊκή Ένωση

E.N. = Ευρωπαϊκών Προτύπων

E.O.K = Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα

E.Λ.Ο.Τ = Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης

Φ.Ε.Κ. = Εφημερίδα κυβέρνησης

Θ.Ε.Ζ.= Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών

m= Μέτρα

Km= Χιλιόμετρα

Mm= Χιλιοστά

C = κελσίου

h = Ώρα

k = Κιλά

p= πυκνότητα

Sh= φύλλο

Pl=πλάκα

ET= σωλήνες διέλασης

EP= προφίλ διέλασης

ΥΠΕΧΩΔΕ : Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων



**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ**

- ✚ Εικόνα 2.2.1: Διαδικασία Παραγωγής Αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.2.1.1: Χύτευση Αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.3.1: Οικονομικά αποδοτική γέφυρα αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.3.2: Υπεράκτια Κατασκευή Αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.3.3: Αλουμινένιες βάσεις φωτοβολταϊκών πάνελ
- ✚ Εικόνα 2.3.4: Καλώδιο Αγωγών Αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.3.5: Σκεύος Αλουμινίου μιας χρήσης
- ✚ Εικόνα 2.3.6: Τραπέζι Αλουμινίου
- ✚ Εικόνα 2.5.1: Βέλγικη ναυτιλιακή εταιρία, Αμβέρσα 1957
- ✚ Εικόνα: 2.5.2: Κέντρο Αλουμινίου Hoyten ,2001, Ολλανδία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## «Πεπερασμένα Στοιχεία»

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων φυσικής και εφαρμοζομένων επιστημών και μηχανικής. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για την ανάλυση κατασκευών, μηχανική των ρευστών, μετάδοση θερμότητας, ηλεκτρομαγνητισμό και άλλα.

Για προβλήματα που περιλαμβάνουν πολύπλοκες γεωμετρίες, φορτίσεις και ιδιότητες υλικού είναι δύσκολο να βρεθεί ακριβείς αναλυτική μαθηματική λύση. Οι αναλυτικές λύσεις είναι αυτές που περιλαμβάνονται από μια μαθηματική έκφραση που δίνει τις τιμές των επιθυμητών αγνώστων ποσοτήτων σε κάθε τοποθεσία ενός σώματος και ισχύει σε κάθε σημείο του σώματος. Αυτές οι αναλυτικές λύσεις απαιτούν την επίλυση μιας συνήθους ή μερικής διαφορικής εξίσωσης η οποία στην περίπτωση πολύπλοκων γεωμετριών, φορτίσεων και ιδιοτήτων υλικού δεν είναι εφικτή.

Ωστόσο, προσεγγιστικές λύσεις μπορούν να βρεθούν εάν βασιστεί η επίλυση σε αριθμητικές μεθόδους όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η διατύπωση του προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων αντί για ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Αυτές οι αριθμητικές μέθοδοι δίνουν προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων σε διακριτά σημεία στο συνεχές μέσο. Η διαδικασία της μοντελοποίησης ενός σώματος με τον διαχωρισμό του σε ένα ισοδύναμο σύστημα μικρότερων σωμάτων διασυνδεδεμένων σε κοινά σημεία (κομβικά σημεία) ή/και σε συνοριακές γραμμές και επιφάνειες, καλείται χωρική διακριτοποίηση. Γενικά, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, διατυπώνονται οι εξισώσεις για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και συνδυάζονται για να ληφθεί ένα σύστημα εξισώσεων για ολόκληρο το σώμα.

1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα Πεπερασμένα Στοιχεία έχουν θεωρητική αφετηρία στις αρχές του εικοστού αιώνα και είναι συνυφασμένα με τον Γερμανό μαθηματικό W. Ritz το 1909 και τον Ρώσο μαθηματικό B. G. Galerkin το 1915. Η απουσία όμως του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και την περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία ανάπτυξη σε μεγαλύτερους ρυθμούς άρχισε από το 1940 και έπειτα.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου γεννήθηκε στην αεροναυπηγική λόγω της ανάγκης εύρεσης λύσεων στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το 1940 ο Hrenikoff (1940) εισήγαγε την καλούμενη μέθοδο του πλαισίου (framework method) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών.

Ακολούθησε, το 1943 ο Courant όπου έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Λόγω του ότι εκείνη την εποχή δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε έως ότου ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής όπου οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο. Το 1954 ο Argyris και Kelsey ανέπτυξαν μεθόδους μητρωϊκής δοκιμής ανάλυσης βασισμένες σε ενεργειακές μεθόδους. Μετά από δυο χρόνια ο Turner και οι συνεργάτες του υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου.

Το όνομα «Πεπερασμένα στοιχεία» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1960 από τον Clough, καθηγητή του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley', στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία. Ωστόσο, έχουν σημειωθεί τεράστιες πρόοδοι στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διάφορων πολύπλοκων προβλημάτων. Ωστόσο, μηχανικοί, μαθηματικοί και άλλοι επιστήμονες θα συνεχίσουν για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών.

### 1.3 ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα "απεικόνισης" της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα "προσομοίωσης" της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανικού.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων.

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού, όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου, είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από τη διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην h version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην p version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση.

Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling). Στην κλασική μέθοδο (στην h version), εάν  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων, τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι  $2n$  και  $3n$  για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, αντίστοιχα. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση.

Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη). Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Topp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Courant (1943),

Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών την περίοδο 1954-60. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz, και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση. Για προβλήματα κατασκευών υπάρχει τώρα ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια.

### 1.3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Οι απαιτήσεις αυτές ανάγονται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, η συμβιβαστότητα μεταξύ των στοιχείων. Σε μία συνεχή κατασκευή όπως το έλασμα του ισχύει συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων. Συνεπώς στο αριθμητικό μοντέλο (πεπερασμένα στοιχεία) δεν επαρκεί να ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας των μεταβολών.

#### *Ειδικότερα*

Στην κλασική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται h-version, χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ορισμένου βαθμού, οπότε η αύξηση της ακρίβειας επιτυγχάνεται με μείωση της μέσης διάστασης (π.χ. της ακτίνας, h, του περιγεγραμμένου κύκλου) των στοιχείων, με άλλα λόγια με αύξηση του πλήθους αυτών (πύκνωση πλέγματος).

Στη λεγόμενη p-version, χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα αλλά επιτρέπεται η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού p της συνάρτησης μορφής. Στην p-version, οι συντελεστές του εν λόγω υψηλού βαθμού πολυωνύμου είναι επίσης άγνωστοι που υπολογίζονται σαν τμήμα της διαδικασίας επίλυσης.

#### *Βασικές έννοιες της μεθόδου*

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα.

Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται

λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.

Εάν δηλαδή δεν διατυπωθούν περιορισμοί στις μετατοπίσεις κατά μήκος των ορίων των στοιχείων το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής θα είναι περισσότερο εύκαμπτο επειδή θα δημιουργηθούν κενά. Ένας τρόπος να περιορισθεί το σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία διότι έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία στα οποία θα ικανοποιείται η συμβιβαστότητα. Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων 92 Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβιβαστότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους.

Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ' όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου. Θα γίνει αναφορά σε ορισμένα θέματα σχετικά με την υποδιαίρεση και σε συνέχεια, για να γίνει κατανοητός ο τρόπος επιλογής της συνάρτησης εσωτερικής συμπεριφοράς θα μελετηθούν ορισμένα απλά στοιχεία τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα και βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα λεπτότοιχων κατασκευών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση.

## 1.4 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι κύριες διαφορές μεταξύ της αναλυτικής μεθόδου και των πεπερασμένων στοιχείων έγκειται στο τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν την κατασκευή και τον τρόπο που ακολουθούν στη διαδικασία επίλυσης. Οι αναλυτικές μέθοδοι δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν προβλήματα στα οποία η γεωμετρία είναι περίπλοκη.

Επιπλέον δεν έχουν καταστρωθεί εξισώσεις έτσι ώστε να μπορούν να συμπεριλάβουν όλα τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, ένα σημαντικό πρόβλημα της μη συμπερίληψης όλων των φαινομένων είναι το ψηλό υπολογιστικό κόστος που χρειάζεται. Στο πλαίσιο αυτό έρχεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για να καλύψει το κενό που προκύπτει από τις αδυναμίες που δημιουργούνται από τις αναλυτικές μεθόδους. Οι αναλυτικές μέθοδοι θεωρούν την κατασκευή συνεχή που περιγράφεται από τμηματικές ή συνεχείς κοινές εξισώσεις.

Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια αριθμητική τεχνική προσέγγισης της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Έτσι ώστε, η κατασκευή αναπαρίσταται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων και σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, υπολογίζονται τα ζητούμενα μεγέθη σε οποιοδήποτε κόμβο. Ωστόσο, κατά την ανάλυση κάποιου προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνεται υπόψη ολόκληρη η κατασκευή και όχι ένα στοιχειώδες τμήμα της, όπως συμβαίνει με τις αναλυτικές.



## 1.5 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Με τον όρο «σφάλμα» ορίζουμε την ασυμφωνία του αποτελέσματος που υπάρχει μεταξύ της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και του αποτελέσματος από κάποιο μαθηματικό μοντέλο. Ωστόσο, ο μελετητής είναι σημαντικό να γνωρίζει ποιες είναι οι πηγές των πιθανών σφαλμάτων, έτσι ώστε να ακολουθεί τις κατάλληλες διαδικασίες για την αποφυγή τους. Οι πηγές σφαλμάτων μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

**Σφάλμα κατά την μοντελοποίηση (Modeling error).** Αναφέρεται στο στάδιο μετατροπής του φυσικού προβλήματος σε μοντέλο (μαθηματική διατύπωση του προβλήματος) για την επίλυση του. Το σφάλμα αυτό μπορεί να προκύπτει λόγω των ιδιοτήτων του υλικού, η εφαρμογή των φορτίων και ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών.

**Σφάλμα κατά τη διακριτοποίηση (Discretization error).** Η επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων κατά τη διακριτοποίηση είναι μια διαδικασία πολύ μεγάλης σημασίας για τη δημιουργία του μοντέλου, γιατί είναι ο παράγοντας όπου καθορίζεται η ορθότητα αλλά και η σύγκλιση της ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο ότι οι διαστάσεις των στοιχείων καθορίζουν τον αριθμό των στοιχείων του μοντέλου. Όταν ο αριθμός των στοιχείων είναι μεγάλος τότε η επίλυση συγκλίνει πάρα πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Επιπρόσθετα όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων αυξάνεται και ο χρόνος ανάλυσης.

Ωστόσο, οι διαστάσεις των στοιχείων πρέπει να είναι τέτοιες, όπου θα λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος αλλά και η σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

**Αριθμητικό Σφάλμα (Numerical error).** Ένα από τα σημαντικότερα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Σε κάθε υπολογισμό, οι πραγματικοί αριθμοί αποθηκεύονται με ακρίβεια ενός δεδομένου αριθμού ψηφίων, τα οποία όλα συμβάλουν κατά την εκτέλεση των αριθμητικών πράξεων.

Ωστόσο, μετά από ένα αριθμό πράξεων η αρχική ακρίβεια δεν θα είναι η ίδια αλλά θα έχει ελαττωθεί, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα υπολογιστικό σφάλμα.

## 1.6 ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΛΥΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η λύση ενός γενικού συνεχούς προβλήματος με την πεπερασμένη μέθοδο στοιχείων πάντα ακολουθεί μια τακτική βήμα-προς-βήμα διαδικασία. Με αναφορά στα στατικά προβλήματα, η βήμα-προς-βήμα διαδικασία αναπτύσσεται ως εξής:

### **Βήμα 1:** Διακριτοποίηση της δομής

Το πρώτο βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι να διαιρεθεί η δομή ή η περιοχή λύσης σε υποδιαίρεσεις ή στοιχεία (elements). Ως εκ τούτου, η δομή θα διαμορφωθεί και θα μοντελοποιηθεί κατάλληλα με πεπερασμένα στοιχεία. Ο αριθμός, το είδος, το μέγεθος και τη διάταξη των στοιχείων, πρέπει να αποφασιστούν.

### **Βήμα 2:** Επιλογή κατάλληλης προσέγγισης ή μοντέλου μετατόπισης

Δεδομένου ότι η μετατόπιση μιας περίπλοκης δομής υπό οποιοσδήποτε καθορισμένες συνθήκες φόρτισης δεν μπορεί να υπολογιστεί επακριβώς, υποθέτουμε κάποια κατάλληλη λύση, σε κάποιο

στοιχείο για την προσέγγιση του άγνωστου. Η υποτιθέμενη λύση θα πρέπει να είναι μία σχετικά απλή φόρμουλα, από υπολογιστική σκοπιά, αλλά θα πρέπει επίσης να ανταποκρίνονται σε ορισμένες απαιτήσεις σύγκλισης. Σε γενικές γραμμές, η λύση που λαμβάνεται για την μετατόπιση βρίσκεται σε πολυωνυμική μορφή.

**Βήμα 3:** Παραγωγή των μητρώων μάζας, στιβαρότητας και των διανυσμάτων διέγερσης και μετασχηματισμός συντεταγμένων, εάν αυτός είναι απαραίτητος.

Από το δεδομένο μοντέλο μετατόπισης το μητρώο μάζας  $[M(e)]$  στιβαρότητας  $[K(e)]$  και το διάνυσμα διέγερσης  $P^T(e)$  ενός στοιχείου προκύπτουν χρησιμοποιώντας είτε τις οριακές συνθήκες είτε μια κατάλληλη μεταβλητή αρχή.

**Βήμα 4:** Το σύνολο των εξισώσεων που εξήχθησαν από τα element θα δώσουν τις ολικές

εξισώσεις του συστήματος.

Εφόσον η κατασκευή αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό στοιχείων, θα πρέπει τα στοιχειακά μητρώα και διανύσματα διέγερσης να συντεθούν σωστά και οι ολικές εξισώσεις ισορροπίας να είναι της μορφής:

$$K \cdot \Phi^T = P^T$$

Όπου  $[K]$  το ολικό μητρώο στιβαρότητας,  $\Phi$  το διάνυσμα της διέγερσης κόμβων και  $P$  το διάνυσμα των φορτίσεων κόμβων για ολόκληρη τη δομή.

**Βήμα 5:** Επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις κόμβων

Στις ολικές εξισώσεις ισορροπίας επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

Στη συνέχεια οι εξισώσεις ισορροπίας εκφράζονται ως:

$$[K] \cdot \Phi^T = P^T$$

Για γραμμικά προβλήματα το μηδενικό διάνυσμα επιλύεται σχετικά εύκολα. Μη γραμμικά προβλήματα η λύση λαμβάνεται με μία σειρά βημάτων, στα οποία γίνεται επεξεργασία του μητρώου στιβαρότητας  $[K]$  και/ή του διανύσματος φορτίσεων.

**Βήμα 6:** Υπολογισμός τάσεων και φορτίων των στοιχείων

Από τις γνωστές μετατοπίσεις κόμβων, εάν ζητείται μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις και τα φορτία στα element με την χρήση των απαραίτητων εξισώσεων μηχανικής κατασκευών.



## 1.7 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι (nodes) συνήθως βρίσκονται στα άκρα της γεωμετρίας. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις.

Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβατότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους.

Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Εισάγεται, δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι συνοριακές συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης.

Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβατότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ' όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβατότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την διακριτοποίηση της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ.). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του

προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση.

Η προσομοίωση είναι εξαιρετικά χρήσιμη διότι, επιτρέπει τη σχεδίαση και τη δοκιμή κατασκευών πριν την πραγμάτωση τους σε προσεγγιστικά πραγματικές συνθήκες, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν εξαρχής γλιτώνοντας αστοχίες καθώς και έξοδα για τον κατασκευαστή.

Τα βήματα τα οποία θα πρέπει να ακολουθούν για την επίλυση ενός μοντέλου σε software πεπερασμένων στοιχείων είναι:

1. Κατανόηση του προβλήματος
2. Απλοποίηση του προβλήματος με εργαλεία εκεί που αυτό είναι δυνατόν, όπως επαναλήψεις της γεωμετρίας, συμμετρικότητες κ.α.
3. Γνώση των φυσικών εξισώσεων που σχετίζονται με το πρόβλημα
4. Κατάστρωση του προβλήματος σε προ-επεξεργαστή (pre-processor)
  - i. Γεωμετρία
  - ii. Υλικά χρήσεως και ιδιότητες τους
  - iii. Δημιουργία βέλτιστου πλέγματος (Meshing)
  - iv. Inputs εξισώσεων
5. Γνώση και διατύπωση του κατάλληλου ερωτήματος ώστε να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα
6. Λύση του προβλήματος από τον επιλεγμένο λύτη (solver)
7. Λήψη αποτελεσμάτων και προβολή τους στον μετα-επεξεργαστή (post-processor)
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων, προτάσεις βελτιστοποίησης κατασκευής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

«Το Αλουμίνιο στις κατασκευές και εφαρμογές»

2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το Αλουμίνιο(Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al. Έχει ατομικό αριθμό 13 και είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Είναι ένα ελαφρύ αλλά ακριβό υλικό. Έκανε την εμφάνιση του στην τεχνολογία υπό μορφή κραμάτων, τα τελευταία 80 (ογδόντα) χρόνια. Η χρήση του στην οικοδομή είναι όλο και συχνότερη με σκοπό την κατασκευή στεγών, θυρών, διαχωριστικών παραπετασμάτων, και διακοσμητικό εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών. Τι το κάνει όμως τόσο χρήσιμο και σημαντικό για την βιομηχανία;

Το Αλουμίνιο ξεχωρίζει για την υψηλή του αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και για την εξαιρετική αντοχή που έχει στην διάβρωση σε συνθήκες συνήθους περιβάλλοντος ( $2,7-2,85 \text{ g/cm}^3$ ), η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Παρουσιάζει επίσης πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και οι μηχανικές του ιδιότητες βελτιώνονται ακόμα περισσότερο με την προσθήκη κραματικών στοιχείων όπως σίδηρος ή χαλκός. Έχει ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών όπως θα δούμε παρακάτω.

- Ξεχωρίζει για το χαμηλό ειδικό του βάρος όπως προαναφέρθηκε. Μόλις το 1/3 εκείνου του σιδήρου.
- Αλλάζει μορφές, ελάσσεται, συγκολλάται και διελάσσεται. Συνεπώς αποτελεί ιδανικό μέταλλο για κατασκευές. Το μέτρο ελαστικότητας του σιδήρου είναι 3 φορές υψηλότερο από εκείνο του αλουμινίου (70.000 MPa) και αυτό μας δείχνει έμπρακτα πως μια αλουμινένια κατασκευή παρουσιάζει 3 φορές μεγαλύτερη επιμήκυνση από μια σιδερένια.
- Θεωρείται ανθεκτικό σε πολλές μορφές διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου είναι καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αργιλίου και αποτελεί αποτελεσματικό εμπόδιο εξάπλωσης της διάβρωσης. Επηρεάζεται άκρως θετικά η επιλογή του αλουμινίου από τον συνδυασμό του χαμηλού κόστους συντηρήσεως και του χαμηλού ειδικού βάρους.
- Είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.
- Δεν καίγεται και δεν μαγνητίζεται. Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα σε κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου)
- Είναι αδιαπέραστο για διάφορα περιβάλλοντα μέσα και δεν είναι τοξικό.
- Λόγω της σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνει η χρήση των προϊόντων αλουμινίου, υπάρχει θετική οικολογική επίπτωση.

## ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Χρησιμοποιείται σε σύνθετα πάνελ αλουμινίου- πολυαιθυλενίου για εσωτερικές ή εξωτερικές δομικές επενδύσεις, φύλλα για ψευδοροφές, πάνελ για πόρτες αλουμινίου και ψευδοτοίχους, κατασκευή αεραγωγών και εξωτερικών υδρορροών. Χρήσιμο βρίσκεται σε κάθε είδους μονωτικές επενδύσεις, σε αυλακωτά φύλλα για στέγες και πλαγιοκαλύψεις. Συχνά το συναντάμε σε βαμμένα φύλλα & ταινίες ειδικών προδιαγραφών, για εξωτερικές επικαλύψεις παλαιών και νέων κτιρίων. Σε συστήματα σκίασης κτηρίων ,σε γκαραζόπορτες αλλά και σε πινακίδες σήμανσης.

## ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το σημείο τήξης για το καθαρό αλουμίνιο είναι 660° C ενώ για τα κράματα εκ αυτού, λίγο χαμηλότερα. Το σημείο βρασμού του είναι 1800° C. Γνωστό για την πολύ καλή του θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται ως εναλλακτική λύση προς άλλους καλούς αγωγούς όπως ο χαλκός.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο έχει πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως εναλλακτική σε σχέση με άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός που επίσης εμφανίζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η προσθήκη ενός εξωτερικού μανδύα από αλουμίνιο στην δόμηση των κτηρίων, βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Μελέτες έχουν δείξει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 50% τον χειμώνα και 25% το καλοκαίρι. Αποτελεί ιδανικό υλικό για σκίασμό κτηρίων και στήριξης φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η διάρκεια ζωής των αλουμινένιων κατασκευών είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του χάλυβα ενώ το κόστος συντήρησης είναι ελάχιστο.

### 2.1.1 ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Στην αρχαία Ελλάδα και Ρώμη γνώριζαν το διπλό θειικό άλας αργιλίου και καλίου και το χρησιμοποιούσαν. Το 1761 ο Γκιτόν ντε Μορβό πρότεινε το όνομα «αλουμίνα» για το οξείδιο του αργιλίου. Το αργίλιο ως στοιχείο ανακαλύφθηκε το 1808 από τον Σερ Χαμφρι Ντέιβι, ο οποίος και το ονομάτισε αρχικά «αλούμιο» και μετέπειτα «αλουμίνιο». Το 1825 ο Δανός επιστήμονας Χανς Κρίστιαν Ερστεντ απομόνωσε το αργίλιο για πρώτη φορά όταν κατεργάστηκε το χλωριούχο αργίλιο με αμάλγαμα καλίου. Το 1827 ο Φρήντριχ Βέλερ περιέγραψε αναλυτικά την μέθοδο παρασκευής του αργιλίου σε σκόνη από άνυδρο χλωριούχο αργίλιο και κάλιο.

Ο Pierre Berthier ανακάλυψε ότι στον βωξίτη περιέχεται αλουμίνιο και πέτυχε την εξόρυξη του μετάλλου από το ορυκτό. Το 1854 ο Ανρί Σεν- Κλερ Ντεβίλ επινόησε την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής του. Αρχικά το κόστος του αργιλίου ήταν υψηλότερο ακόμη και από εκείνο του χρυσού ή του λευκόχρυσου. Γι αυτό το λόγο σε γεύματα του Ναπολέοντος της Γαλλίας, οι πιο σημαντικοί καλεσμένοι έτρωγαν σε αλουμινένια πιάτα!

Το 1886 ήρθε η μεγάλη επανάσταση στην παραγωγή του αργιλίου, οπότε εφευρέθηκε μια μέθοδος κατά την οποία μέρος του μίγματος κρυολίθου αργιλίου και οξειδίου ηλεκτρολύεται με συνεχές ρεύμα. Το τηγμένο αργίλιο συγκεντρώνεται στο βυθό του ηλεκτρολυτικού λουτρού. Το αλουμίνιο ανά τον κόσμο παράγεται με την παραπάνω μέθοδο.

Το 1889 ο Bayer επινόησε μια μέθοδο κατά την οποία καθάριζε τον βωξίτη ο οποίος θα παρασκευαζόταν σε αλουμίνιο με την χρήση καυστικού νατρίου. Αυτό ήταν η αρχή για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αλουμινίου καθώς το 1900 η παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου έφτασε τους 8000 τόνους! Έκτοτε αυξήθηκε ακόμη περισσότερο και με ταχύρρυθμους ρυθμούς, με πιο πρόσφατη την μέτρηση του 1999 που έφτασε τα 24 εκατομμύρια τόνους.

## 2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Όπως τα περισσότερα μέταλλα έτσι και το αργίλιο βρίσκεται στην φύση υπό μορφή ορυκτών. Από βιομηχανική άποψη το πλέον σημαντικό είναι ο βωξίτης στο οποίο όμως κρύβεται το αργίλιο υπό μορφή οξειδίων.

Το Πρωτόχυτο Αλουμίνιο είναι το μέταλλο που παράγεται μετά την ηλεκτρόλυση της αλουμίνας είτε ως καθαρό αλουμίνιο είτε μέσω κραμάτων αυτού. Από ενεργειακή άποψη, πολύ σημαντική πηγή αλουμινίου είναι η επανάτηξη και η επαναχύτευση των ήδη χρησιμοποιημένων κομματιών (SCRAP) το οποίο προέρχεται από διάφορα κομμάτια αλουμινίου που έχει πάψει η χρήση τους όπως πόρτες ή κάρτερ αυτοκινήτων, κουτιά αναψυκτικών ή μπύρας κτλ. Αυτό θεωρείται το OLD SCRAP ενώ το NEW SCRAP δημιουργείται από αποκόμματα αλουμινίου κατά την επεξεργασία του προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο, το καθαρό οξείδιο του αργιλίου απομονώνεται από το βωξίτη με τη χρήση πυκνού διαλύματος καυστικού νατρίου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση και στη συνέχεια αφού αφαιρεθεί και το καυστικό νάτριο, πυρώνεται στους  $1100^{\circ}\text{C}$ , σε ειδικούς αποστειρωμένους χώρους.

Στη συνέχεια διαλύεται σε τήγμα κρυσταλλικού, το οποίο βρίσκεται σε ηλεκτρολυτική λεκάνη με άνοδο ηλεκτρόδιο άνθρακα και κάθοδο την επένδυση της λεκάνης από ανθεκτικό μέταλλο και στο τελευταίο στάδιο γίνεται η ηλεκτρόλυση, μια διαδικασία, κατά την οποία μέσα από το ηλεκτρόδιο περνάει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης αλλά υψηλής έντασης, οπότε παράγεται αλουμίνιο 99,5 – 99,8% ποσοστού καθαρότητας. Έπειτα, το ρευστό υλικό μεταφέρεται σε καλούπια, ψύχεται και μορφοποιείται σε στερεά τεμάχια, έτοιμα για την κατασκευή προϊόντων καθαρού αλουμινίου, χάλυβα αλουμινίου και κραμάτων αλουμινίου. Το Δευτερόχυτο Αλουμίνιο με την σειρά του, προέρχεται από την επανάτηξη του Αλουμινίου. Αν ακολουθηθεί ο σωστός τρόπος παραγωγικής διαδικασίας, το Δευτερόχυτο Αλουμίνιο έχει τις ίδιες ιδιότητες με το Πρωτόχυτο.





Εικόνα 2.2.1: Διαδικασία Παραγωγής Αλουμινίου

### 2.2.1 ΧΥΤΕΥΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Χυτεύεται το πρωτογενές Αλουμίνιο σε καλούπια και γίνεται η μεταφορά του σε πελάτες ή γίνεται αναγκαία η χρήση του για παραγωγή κραμάτων με στόχο διάφορους σκοπούς. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για τον μεγαλύτερο αριθμό προϊόντων όπως κινητά, ατράκτους αεροπλάνων, ακόμη και διαστημόπλοια. Το πόσο εύπλαστο είναι το αλουμίνιο μας δείχνει ξεκάθαρα πως έχει την μορφή ρολού. Από εκεί προέρχονται τα φύλλα αλουμίνιο, τα κουτιά αναψυκτικών όπως προαναφέρθηκε



Εικόνα 2.2.1.1: Χύτευση Αλουμινίου

Σημείωση : Ο βωξίτης, ο οποίος βρίσκεται άφθονος στο φλοιό της γης, θεωρείται ότι κατέχει επαρκή αποθεματική βάση για τους επόμενους δύο αιώνες. Στην Ελλάδα, η ζώνη Ελικώνα-Παρνασσού-Γκιόνας διαθέτει τα σημαντικότερα γνωστά κοιτάσματα βωξίτη που εκτιμώνται σε περίπου 100 εκατομμύρια τόνους. Πλέον η Ελλάδα κατέχει περίοπτη θέση στην παραγωγή αλουμινίου στην Ευρώπη

### 2.2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΥΤΩΝ

Τα κράματα αλουμινίου, αναπτύχθηκαν για την αύξηση της αντοχής του βασικού μετάλλου. Σε αντίθεση με τους χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου απαιτούν μια μικρή ποσότητα θερμικής ενέργειας για τη παραγωγή τους, καθώς και μικρές ποσότητες βασικών επιπρόσθετων στοιχείων. Τέτοια στοιχεία είναι το μαγνήσιο, το πυρίτιο, ψευδάργυρος, χαλκός και το μαγγάνιο. Νικέλιο, κοβάλτιο, χρώμιο, σίδηρος, τιτάνιο και ζιρκόνιο χρησιμοποιούνται σαν δευτερεύοντα στοιχεία των σχετικών Κραμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, ισχύουν συνοπτικά τα ακόλουθα:

- \* Το Μαγνήσιο μειώνει το σημείο τήξης στους 451° C, γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται και ως μέταλλο συγκόλλησης, αυξάνει την αντοχή στην διάβρωση από το νερό θαλάσσης.
- \* Το Πυρίτιο αυξάνει την αντοχή και την ολκιμότητα και μειώνει το σημείο τήξης. Σε συνδυασμό με μαγνήσιο επιτρέπει την κράτυνση λόγω καθίζησης και συμπύκνωσης
- \* Ο Ψευδάργυρος αυξάνει την αντοχή και επιτρέπει κράτυνση λόγω καθίζησης και συμπύκνωσης τόσο στις ψυχρές θερμοκρασίες όσο και στις θερμές
- \* Ο Χαλκός προσδίδει ακόμα μεγαλύτερη αντοχή, μειώνει την αντοχή σε διάβρωση, τη συγκολλησιμότητα και την ολκιμότητα.

Κατά τη βιομηχανική παραγωγή, τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στα χυτά κράματα και στα κατεργασμένα κράματα. Στα χυτά κράματα πρέπει να γίνει ξανά η τήξη και μετέπειτα να γίνει εκ νέου διαδικασία χύτευσης. Στα κατεργασμένα κράματα, η κατεργασία γίνεται είτε σε ψυχρό είτε σε θερμό κλίμα και δεν απαιτείται επανάτηξη.

### 2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Σημαντικό ρόλο παίζει το εξεταζόμενο υλικό στην ανακαίνιση παλαιών κτηρίων αλλά και στην βιωσιμότητα των νέων. Συμβάλλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και στην ασφάλεια χάρη στις ιδιότητές του.

Φέρουσες κατασκευές αλουμινίου ονομάζονται εκείνες στις οποίες ο φέρων οργανισμός ή κάποια τμήματα αυτών είναι από κράμα αλουμινίου. Αυτή η διαδικασία ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1930 στην Αμερική καθώς με την χρήση κραμάτων σειράς 2xxx επιτεύχθηκε η κατασκευή γερανογεφυρών και συναφών φορέων. Αργότερα αντικαταστάθηκαν με κράματα άλλων σειρών.

Στις αρχές του 1940 επεκτάθηκε η χρήση του αλουμινίου στην κατασκευή ορόφων σε οριζόντια κτήρια ενώ συνεχίζει να εμφανίζεται σε γερανογέφυρες κάθε είδους, τύπου αλλά και μήκους ανοίγματος. Την ίδια στιγμή το αλουμίνιο ξεκίνησε να χρησιμοποιείται σε κατασκευές γεφυρών όπου μέχρι και σήμερα η μεταφορά αυτών γίνεται μέσω ελικοπτέρου και γίνεται η εύκολη τοποθέτησή τους. Το δομικό αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε στρατιωτικές γέφυρες όπου το μικρό βάρος του καθιστά γρήγορη την εγκατάσταση και την αποκαθίλωση αυτών. Συμφέρει η χρήση του αλουμινίου γενικότερα στην κατασκευή γεφυρών καθώς οδηγεί σε φορείς με μικρό βάρος και έτσι μεγιστοποιούνται τα ανοίγματα.



Εικόνα 2.3.1: Οικονομικά αποδοτική γέφυρα αλουμινίου

Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες η βιομηχανική παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε και οδήγησε στην κατασκευή πολλών υπεράκτιων χτισμάτων. Το αλουμίνιο εμφανίστηκε έντονα στα κτήρια προ-κατ, τα οποία διαθέτουν χώρους για την στέγαση προσωπικού, σε σταθερές πλατφόρμες.



Εικόνα 2.3.2 : Υπεράκτια Κατασκευή Αλουμινίου

Εμφανής είναι η συνεισφορά του αλουμινίου και στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας από ηλιακές πηγές. Την δεκαετία του 1940 το κράμα που χρησιμοποιούνταν ήταν σειράς 2xxx. Εμφανίστηκε μια



σειρά από αστοχίες οφειλόμενες σε φαινόμενα κόπωσης ή σε έντονη οξείδωση, αυτό μας οδήγησε στο συμπέρασμα πως για φέρουσες κατασκευές πρέπει να χρησιμοποιούνται κράματα σειράς 6xxx και τα συγκολλησίμα της σειράς 7xxx. Σε αυτή τη κατηγορία εντάχθηκαν οι κατασκευές στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ που θα φανούν παρακάτω. Όλο και περισσότερη γίνεται η ζήτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό την παραγωγή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε το αλουμίνιο ξεκίνησε να χρησιμοποιείται έντονα ως βάση στήριξης. Είναι ιδανικό για κατοικίες, ύπαιθρο και βιομηχανικά κτήρια.



Εικόνα 2.3.3: Αλουμινένιες βάσεις φωτοβολταϊκών πάνελ

Σε ηλεκτρικές και θερμικές εφαρμογές η χρήση του αλουμινίου οφείλεται:

- Στις καλές αγωγιμότητες των κραμάτων σειράς 1xxx για ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Σειράς 3xxx,5xxx,6xxx για θερμική αγωγιμότητα
- Το μικρό βάρος
- Την αναλογία αντοχής-βάρους
- Αντοχή στην διάβρωση

Εναέριες γραμμές υψηλής τάσης αλλά και πολλές υπόγειες είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και θεωρείται ο οικονομικότερος τρόπος στις μέρες μας για την μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας και εκεί στοχεύουμε. Εφαρμογές βλέπουμε καθημερινά στα εναέρια καλώδια και εξαρτήματα στις κολώνες, σε πετυρία ψύξης, σε κεραίες και συμπυκνωτές.



Εικόνα 2.3.4: Καλώδιο Αγωγών Αλουμινίου

Η μοντέρνα εμφάνιση του σχεδιασμού του, οι μηχανικές του ιδιότητες και η υψηλή θερμική του αγωγιμότητα είναι κάποιες ιδιότητες που έχει ως μέταλλο οι οποίες το καθιστούν χρηστικό για καθημερινή χρήση. Εφαρμογές του βρίσκουμε σε έπιπλα, σκεύη , εξοπλισμός κάμπινγκ, κατσαρόλες τηγάνια , μαχαιροπίρουνα, φωτιστικά κορνίζες ή λαβες ντουλαπιών, κοσμήματα κτλ



Εικόνα 2.3.5: Σκεύος Αλουμινίου μιας χρήσης



Εικόνα 2.3.6: Τραπέζι Αλουμινίου

Τέλος, χρησιμοποιείται για πούδρες και ως χρωστική για χρώματα και πλαστικά ενώ οι κόκκοι του χρησιμοποιούνται για αποξείδωση του χάλυβα και σε άλλα ειδικά προϊόντα.

## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

Το αλουμίνιο ως υλικό μπορεί να ανταποκριθεί σε κάθε ιδέα του αρχιτεκτονικού κλάδου και σε κάθε απαίτηση μηχανικών αντοχών, ηχομόνωσης και θερμομόνωσης δίνοντας μας το καλύτερο αποτέλεσμα αισθητικής αλλά και λειτουργικότητας. Με την διαδικασία της ανοδίωσης ή της βαφής του αλουμινίου βγάζουμε εις πέρας τις διακοσμητικές απαιτήσεις και αυξάνουμε την αντοχή σε καιρικές συνθήκες για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ως υλικό δεν θεωρείται τοξικό, η ανακύκλωση του αγγίζει το 95% της εξοικονόμησης ενέργειας και απαιτεί το ελάχιστο κόστος συντήρησης.

Η χρήση του αλουμινίου στην οικοδομή σε σημεία που θα αναφερθούν παρακάτω λύνουν τα χέρια πολλών τόσο σε κατασκευές μοντέρνων κτηρίων αλλά και σε περιπτώσεις ανακαίνισης ή συντήρησης παλαιών κτηρίων με ιστορική αξία.

### Συγκεκριμένα:

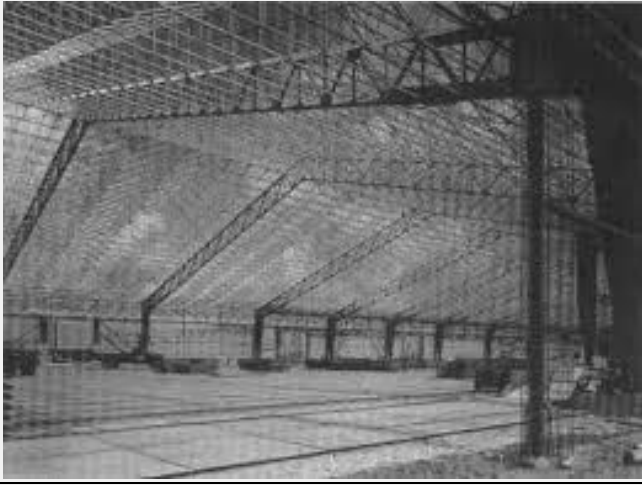
- 1 Σε αρχιτεκτονικά συστήματα για πόρτες ή παράθυρα
- 2 Σε συστήματα υαλοπετασμάτων
- 3 Σε συστήματα σκίασης, περσίδες και ρολά.
- 4 Σε Γκαραζόπορτες, Κάγκελα
- 5 Σε εξωτερικές επικαλύψεις κτηρίων
- 6 Σε Αίθρια
- 7 Σε Ψευδοροφές, δάπεδα
- 8 Σε εξαρτήματα

## 2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΕΡΓΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Στην δεκαετία του 1950 έκαναν την εμφάνιση τους τα κράματα αλουμινίου σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού ως μια διαφορετική λύση στην κατασκευή κτηρίων που ως τότε κατασκευάζονταν από δομικό χάλυβα. Από τις πρώτες κατασκευές με φέροντα οργανισμό αλουμινίου αναφέρονται οι εξής: Η Γέφυρα στο Κεμπέκ του Καναδά 1949, Τα υπόστεγα του αεροδρόμιου Heathrow του Λονδίνου 1950, το Διεθνές Εκθεσιακό Κέντρο στο Ρίο Ιανέιρο 1978, το Εκθεσιακό κέντρο στο Σάο Πάολο 1969, και το πιο πρόσφατο αλλά και εντυπωσιακό παράδειγμα το Κέντρο Αλουμινίου στο Hoyten 1991.

Η παντελής έλλειψη προδιαγραφών, σχεδιασμού και κανονισμών περιόρισε το εύρος αυτού του είδους αλουμινίου καθώς μετέτρεψε το σχεδιασμό των αλουμινένιων κτηρίων σε μια επίπονη εργασία τόσο για τους μελετητές όσο και για τις υπηρεσίες ελέγχου. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο ξεκίνησε να διορθώνεται αυτό από τα αποτελέσματα της ευρύτατης δράσης του ECCS.

Οι συστάσεις που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για όσα κράτη αποφάσισαν να προχωρήσουν σε σύνταξη του Εθνικού Κανονισμού σχεδιασμού φερουσών κατασκευών αλουμινίου. Αξίζει να αναφέρουμε πως δεν λαμβάνονται πλήρως υπόψη οι ιδιαιτερότητες του αλουμινίου από τους μελετητές με σκοπό να αποτελεί εναλλακτική επιλογή του αλουμινίου αντί του χάλυβα σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού.



Εικόνα 2.5.1: Βέλγικη ναυτιλιακή εταιρία, Αμβέρσα 1957



Εικόνα:2.5.2 Κέντρο Αλουμινίου Houten ,2001,Ολλανδία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

«Κατασκευή Θερμοκηπίου και Ευρωκώδικες»

### 3.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ-ΓΕΩΡΓΙΑ

Η Κλιματική αλλαγή, η μείωση διαθέσιμου νερού καθώς και οι συνεχείς απαιτήσεις των καταναλωτών για ασφαλή και ποιοτικά προϊόντα οδήγησαν στην μαζική αύξηση των θερμοκηπίων. Οι παραγωγοί στράφηκαν στην καλλιέργεια υπό κάλυψη γιατί τους παρέχεται η δυνατότητα στο άμεσο μέλλον να παράξουν προϊόντα ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με αποδοτική χρήση .

Σύμφωνα με τον FAO, οι καλλιέργειες στα θερμοκήπια έχουν 3-5 φορές αποτελεσματικότητα χρήσης νερού σε σχέση με τον ανοιχτό .

Έως το 2050, υπολογίζεται πως μισή από τη συνολική διαθέσιμη γεωργική έκταση θα είναι διαθέσιμη για καλλιέργειες , αφού οι υδάτινοι πόροι μέχρι 2025 θα έχουν μειωθεί σημαντικά. Περίπου το 50% του πληθυσμού της γης θα αντιμετωπίσει σημαντικά προβλήματα έλλειψης νερού καθώς και η εξάντληση ενεργειακών πόρων θα επηρεάσει άμεσα την καθημερινότητα τους.

Έως το 2030, η αύξηση κατανάλωσης ενέργειας θα είναι περίπου 45% και εισαγωγές ενέργειας στην Ε.Ε. αναμένεται να καλύπτουν το 70% των συνολικών ενεργειακών μας αναγκών.

Στα επόμενα 35 χρόνια θα υπάρξει και η Υποβάθμιση των εδαφών καθώς και Αύξηση του πληθυσμού κατά 30% οπότε θα επηρεάσει την αύξηση αναγκών σε τροφή κατά 70%.

### ΓΕΩΡΓΙΑ & ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Η γεωργία ανήκει σε εκείνους τους τομείς που επηρεάζονται περισσότερο εξαιτίας της εξάρτησής της από τις καιρικές συνθήκες με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον εφικτή η παραγωγή προϊόντων ποιότητας στην ύπαιθρο. Τα θερμοκήπια διαφέρουν μεταξύ τους, από κατασκευαστικής πλευράς, στο σχήμα και στις διαστάσεις της βασικής τους μονάδας, καθώς και στα χρησιμοποιούμενα υλικά σκελετού και κάλυψης.

Βασική κατασκευαστική μονάδα ενός θερμοκηπίου είναι το μικρότερο πλήρες τμήμα του, το οποίο επαναλαμβάνομενο κατά μήκος και κατά πλάτος σχηματίζει το σύνολο.

### 3.2 ΤΥΠΟΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Ανάλογα με το σχήμα των θερμοκηπίων διακρίνονται σε Αμφίρρικτα, Απλά ή Πολλαπλά

#### ΥΨΟΣ

- ✓ Ελάχιστο ύψος χαμηλής πλευράς (ορθοστατών) στα απλά και της υδρορροής στα πολλαπλά:
- ✓ Τυποποιημένα 2,60 m.

#### ΠΛΑΤΟΣ

- ✓ Ελάχιστο πλάτος κατασκευαστικής μονάδας:
- ✓ Τυποποιημένα 5 m.

## ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΤΥΛΩΝ (ΟΡΘΟΣΤΑΤΩΝ)

- ✓ Ελάχιστο μήκος κατασκευαστικής μονάδας (απόσταση στύλων επί της γραμμής):
- ✓ Τυποποιημένα 3 m

## ΑΜΦΙΚΛΙΝΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Τα πλεονεκτήματα τους είναι πως τα διάφορα στοιχεία του σκελετού τους είναι σχετικά ομοιόμορφα και γι' αυτό τυποποιούνται εύκολα. Είναι επιπλέον ευρύχωρα. Προσφέρουν δυνατότητες για τη κατασκευή καλού παθητικού εξαερισμού οροφής και πλευρικού. Η επιφάνειά τους αποτελείται από επίπεδα και γι'αυτό προσφέρουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των υαλοπινάκων στην κάλυψη του θερμοκηπίου

## ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

### ΤΟΞΩΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

#### ΥΨΟΣ

Ελάχιστο ύψος στην κορυφή 3 m και ελάχιστο ύψος σε απόσταση μισό μέτρο από το σημείο στήριξης στο έδαφος 1,50 m.

#### ΠΛΑΤΟΣ

Ελάχιστο ελεύθερο πλάτος 7 m

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται επαναλαμβανόμενα ομοιόμορφα τόξα και γι' αυτό είναι εύκολα στην κατασκευή. Έχουν ελαφρύτερο σκελετό και επομένως είναι φθηνότερα

#### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

Δεν προσφέρουν ευκολίες στην κατασκευή του παθητικού εξαερισμού οροφής (δημιουργούνται συχνά προβλήματα στεγανότητας). Πιο συγκεκριμένα στις δυο άκρες του τόξου δημιουργούνται δυσκολίες στην εργασία του ανθρώπου, λόγω του χαμηλού ύψους.

Δεν είναι εύκολη η κατασκευή υαλόφρακτων θερμοκηπίων αυτού του σχήματος.

## ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΤΟΞΩΤΑ ΑΠΛΑ Η ΠΟΛΛΑΠΛΑ

#### ΥΨΟΣ

Ελάχιστο ύψος υδρορροής Τυποποιημένα 2,60 m.

Ελάχιστο ύψος στην κορυφή Τυποποιημένα 3,50 m.

#### ΠΛΑΤΟΣ

Ελάχιστο ελεύθερο πλάτος στο έδαφος: 5 m.

### ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΤΥΛΩΝ (ΟΡΘΟΣΤΑΤΩΝ)

Ελάχιστο μήκος κατασκευαστικής μονάδας (απόσταση στύλων ή τόξων επί της γραμμής):-  
Τυποποιημένα : 2 m

### 3.3 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

#### 3.3.1 ΦΟΡΤΙΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Πολλές φορές τα θερμοκήπια αντιμετωπίζουν μεγάλες καταστροφές λόγω του αέρα και πιο συγκεκριμένα τις Ανεμοπιέσεις. Για τον υπολογισμό του φορτίου των ανεμοπιέσεων, θα πρέπει απαραίτητα να λαμβάνεται ταχύτητα ανέμου τουλάχιστον 120 km/h.

Σε επικίνδυνη περιοχή, όπου παρουσιάζεται ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη των 120 km/h (Κρήτη, Μακεδονία, Νησιά του Αιγαίου) συνιστάται η κατασκευή ανεμοθραυστών, η συγκράτηση του υλικού κάλυψης σε πυκνότερα διαστήματα κ.ά. Στις γωνίες των πλευρών και της οροφής θα πρέπει να υπολογιστούν μεγαλύτεροι συντελεστές πίεσης λόγω των επιπλέον φορτίων που εφαρμόζονται στα σημεία αυτά

#### 3.3.2 ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΧΙΟΝΙ

Το φορτίο χιονιού θα πρέπει να υπολογίζεται τουλάχιστον 25 kg/m<sup>2</sup>, εκτός από τις παραλιακές περιοχές Κρήτης και νήσων Νότιας Ελλάδας, που δεν θα υπολογίζεται το φορτίο αυτό.

#### 3.3.3 ΦΟΡΤΙΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Αναρτημένα φορτία

Για βάρος αναρτημένης καλλιέργειας: 15 kg/m<sup>2</sup>

Για φυτά γλάστρας κρεμαστά: 100 Kg/m<sup>2</sup>

#### 3.3.4 ΦΟΡΤΙΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Συγκεντρωμένο κάθετο φορτίο

Τραβέρσας 50 kg.

Υπόλοιπων μερών (υδρορροής κ.λπ.) 100 kg.

Στην περίπτωση εκμηχάνισης (κρεμαστοί οδηγοί) θα υπολογίζεται φορτίο για τη γραμμή μεταφοράς προϊόντων 125 kg

#### 3.3.5 ΛΟΙΠΑ ΦΟΡΤΙΑ

Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και επιβαρύνσεις από συστήματα θέρμανσης, άρδευσης, δροσισμού και λοιπού μηχανολογικού εξοπλισμού, που στηρίζονται στο σκελετό. Οι συνδυασμοί των



διάφορων φορτίσεων και τα αποτελέσματά τους πάνω στην κατασκευή, όσον αφορά στις τάσεις και τις παραμορφώσεις, πρέπει να εξετάζονται σύμφωνα με αποδεκτές μεθόδους υπολογισμού.

### 3.4 ΥΛΙΚΑ ΣΚΕΛΕΤΟΥ

Ο σκελετός του θερμοκηπίου μπορεί να κατασκευασθεί από διάφορα υλικά, τα συνηθέστερα είναι το ξύλο, ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Η προτίμηση του ενός ή του άλλου υλικού εξαρτάται από το επιθυμητό ελεύθερο πλάτος της κατασκευής, το κόστος των υλικών (που διαφέρει σε κάθε περιοχή) και από το μηχανολογικό εξοπλισμό που διαθέτει ο κατασκευαστής.

#### 3.4.1 ΣΚΕΛΕΤΟΙ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

*Κυριότερα πλεονεκτήματα*

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή λεπτών και ελαφρών μερών γυάλινων των γυάλινων θερμοκηπίων, ενώ τα άλλα μέρη κατασκευάζονται από χάλυβα. Σκελετοί εξ ολοκλήρου κατασκευασμένοι από αλουμίνιο σπάνια συναντιούνται.

*Τα κύρια πλεονεκτήματα του αλουμινίου είναι τα ακόλουθα:*

- Είναι ανθεκτικό στην επιφανειακή διάβρωση και δεν έχει ανάγκη σχεδόν καθόλου συντήρησης.
- Οι διατομές των διαφόρων στοιχείων είναι δυνατόν να είναι μικρότερες, γεγονός που αν συνδυασθεί με το μικρό ειδικό βάρος, δίνει πολύ μικρού βάρους κατασκευή.

Επομένως η κατασκευή αυτή απαιτεί επίσης μικρότερης διατομής φέροντα στοιχεία ή παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης λιγότερων τέτοιων στοιχείων. Το γεγονός αυτό έχει σαν συνέπεια τη μειωμένη σκίαση του θερμοκηπίου και την επίτευξη μεγαλύτερων ανοιγμάτων από στύλο σε στύλο

Τα διάφορα λεπτά σκελετικά στοιχεία στα οποία τοποθετούνται οι υαλοπίνακες, επειδή διαμορφώνονται με εξώθηση, μπορούν να κατασκευασθούν σε πολύπλοκες διατομές, ικανές να δώσουν καλή στεγανότητα στο θερμοκήπιο και αποκομιδή του νερού της συμπύκνωσης.

Προσφέρεται πολύ για την κατασκευή των ανοιγμάτων εξαερισμού, γιατί δίνει ελαφρότερα πλαίσια που δεν δημιουργούν προβλήματα λειτουργίας

*Κυριότερα μειονεκτήματα αλουμινίου:*

Τα κύρια μειονεκτήματα του αλουμινίου είναι τα ακόλουθα:

- Όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με χάλυβα ή τσιμέντο, στα σημεία σύνδεσης υπάρχουν προβλήματα διάβρωσης λόγω ηλεκτρόλυσης του αλουμινίου.
- Έχει υψηλό κόστος

*Σημείωση: Όταν γίνεται χρήση του αλουμινίου σαν υλικού κατασκευής του σκελετού πρέπει να έχει τις κατάλληλες διατομές και να είναι κατάλληλα αναδύομενο. Επίσης στα σημεία που έρχεται σε επαφή με άλλα μεταλλικά μέρη ή σκυρόδεμα θα πρέπει να παρεμβάλλεται διαχωριστική μεμβράνη για να αποφεύγεται η διάβρωση*



### 3.5 ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

Οι Ευρωκώδικες είναι μια σειρά δέκα Ευρωπαϊκών Προτύπων (EN) για το σχεδιασμό των κατασκευών που αναπτύχθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN). Οι Ευρωκώδικες αποτελούν σειρά Ευρωπαϊκών Προτύπων που παρέχουν ένα κοινό για όλη την Ε.Ε. σύνολο μεθόδων για τον υπολογισμό της μηχανικής αντοχής των κατασκευαστικών έργων και των στοιχείων τους, τα οποία καλύπτονται από την Οδηγία 89/106/ΕΟΚ. Στόχο έχουν την δημιουργία ενός κοινού πλαισίου, εντός του Ευρωπαϊκού χώρου, για τον σχεδιασμό έργων πολιτικού μηχανικού.

Οι Ευρωκώδικες αναπτύχθηκαν υπό την καθοδήγηση και το συντονισμό της Τεχνικής Επιτροπής CEN/TC250 "Structural Eurocodes". Για την Ελλάδα, η γλωσσική και προτυποτεχνική επιμέλεια στην Ελληνική γλώσσα έγινε από την Τεχνική Επιτροπή του ΕΛΟΤ ΤΕ 67 «Ευρωκώδικες», περιλαμβανομένων Ειδικών Ομάδων Εργασίας, σε στενή συνεργασία με την Επιτροπή Ευρωκωδίκων που συστήθηκε στο τ. ΥΠΕΧΩΔΕ.

Οι Ευρωκώδικες απαρτίζονται από 10 κύρια Ευρωπαϊκά Πρότυπα που συμπεριλαμβάνουν όλους τους τρόπους δόμησης (από σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο, τοιχοποιία, γεωτεχνικά έργα και αλουμίνιο). Οι Ευρωκώδικες ολοκληρώθηκαν το 2007 και με τη σειρά τους υποδιαιρούνται, εκτός από το EN 1990, σε 58 μέρη, στα οποία γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των κατασκευών (κτιρίων, γεφυρών, δεξαμενών, φραγμάτων, πύργων, αγωγών, καπνοδόχων), στο σεισμό ή/και πυρκαγιά.

Τα μέρη είναι:

- ✚ EN 1990: Ευρωκώδικας 0 → Βάσεις σχεδιασμού φερουσών κατασκευών.
- ✚ EN 1991: Ευρωκώδικας 1 → Δράσεις στις Φέρουσες Κατασκευές.
- ✚ EN 1992: Ευρωκώδικας 2 → Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από σκυρόδεμα.
- ✚ EN 1993: Ευρωκώδικας 3 → Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από χάλυβα.
- ✚ EN 1994: Ευρωκώδικας 4 → Σχεδιασμός σύμμικτων φερουσών κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα.
- ✚ EN 1995: Ευρωκώδικας 5 → Σχεδιασμός ξύλινων φερουσών κατασκευών.
- ✚ EN 1996: Ευρωκώδικας 6 → Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από τοιχοποιία.
- ✚ EN 1997: Ευρωκώδικας 7 → Γεωτεχνικός σχεδιασμός.
- ✚ EN 1998: Ευρωκώδικας 8 → Αντισεισμικός σχεδιασμός φερουσών κατασκευών.
- ✚ EN 1999: Ευρωκώδικας 9 → Σχεδιασμός φερουσών κατασκευών από αλουμίνιο.

Οι Ευρωκώδικες θα αντικαταστήσουν τα προϋπάρχοντα εθνικά Πρότυπα, τα οποία προβλέπεται να αποσυρθούν μετά από μια περίοδο παράλληλης εφαρμογής. Με το ΦΕΚ 1457/Β/2014, που εκδόθηκε στις 5 Ιουνίου του 2014 (Αριθμ. ΔΠΠΑΔ/οικ.372) εγκρίθηκε η εφαρμογή και χρήση των Ευρωκωδίκων σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα Εθνικά Προσαρτήματα χωρίς όμως την κατάργηση ισχύος των παλαιότερων κανονιστικών διατάξεων. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει όμως να αναφέρεται ρητά το κανονιστικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε για τη σύνταξη της μελέτης, ενώ αποκλείεται η επιλεκτική χρησιμοποίηση διατάξεων από διαφορετικά κανονιστικά πλαίσια για το ίδιο έργο.

Εκτός από το σχεδιασμό των κατασκευών, οι Ευρωκώδικες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικές προδιαγραφές για την ανάθεση συμβάσεων δημόσιων υπηρεσιών και δημόσιων έργων καθώς και στη διαδικασία βεβαίωσης συμμόρφωσης κατασκευαστικών προϊόντων (σήμανση CE).

Το Αλουμίνιο έχει αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλο υλικό για φέρουσες κατασκευές, για πάνω από 100 χρόνια. Παρ' όλα αυτά, χρειάζονται ειδικές γνώσεις για το σχεδιασμό κατασκευών αυτών. Σε συνδυασμό με τα υλικά και τα χαρακτηριστικά τους, που δίνονται στον Ευρωκώδικα 9, ο σκοπός της

εργασίας αυτής είναι να καλύψει τις κυριότερες παραμέτρους που χρειάζονται για τη μελέτη του αλουμινίου. Καλύπτει τις σημαντικές διαφορές των φυσικών ιδιοτήτων του αλουμινίου σε σύγκριση με τις ιδιότητες του χάλυβα, διαφορές που χρειάζονται να γίνουν κατανοητές ώστε να γίνει ο σωστός σχεδιασμός των κατασκευών αλουμινίου.

Αναλύει, επίσης, την επιρροή της θερμότητας στις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου. Αναπτύσσονται οι βασικές πτυχές της μεταλλουργίας για τη διευκόλυνση της κατανόησης του συστήματος ονοματολογίας των κραμάτων αλουμινίου καθώς και την ιδιοσυγκρασία σχεδιασμού τους. Ασχολείται με τα κράματα που υποδεικνύονται στον Ευρωκώδικα 9 και δίνει βασικές πληροφορίες και συμβουλές για την επιλογή και την εφαρμογή τους στις κατασκευές. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός των παραγόμενων προφίλ και η επιλογή των υλικών βασίζονται στους κανονισμούς που δίνει ο Ευρωκώδικας 9. Ο σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς, η κόπωση του υλικού και η αντοχή στην οριακή κατάσταση αστοχίας καθώς και η γενικότερη σύγκριση των κατασκευών από αλουμίνιο σε σχέση με τις κατασκευές από χάλυβα, είναι τα κυριότερα θέματα που αναλύονται.

Η αξιοπιστία μιας κατασκευής, από απόψεως αντοχής, εξαρτάται από το κατά πόσον αυτή είναι σε θέση να ανταπεξέλθει, χωρίς ή με ελεγχόμενες βλάβες στις εξωτερικές δράσεις, οι οποίες θα της ασκηθούν κατά τη διάρκεια της ζωής της. Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής στηρίζεται στην εκτίμηση:

A) Της φέρουσας ικανότητας των μελών της κατασκευής. Η φέρουσα ικανότητα των μελών επηρεάζεται από την αντοχή του υλικού και της γεωμετρίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του έργου, οι οποίες μπορεί να είναι διαφορετικές σε σχέση με εκείνες που ελήφθησαν αρχικά υπόψη

B) Της συμπεριφοράς της κατασκευής ως συνόλου. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται στην πράξη με δύο οριακές καταστάσεις: την κατάσταση λειτουργικότητας και την κατάσταση οριακής αντοχής. Για να είναι σε θέση κανείς να προσδιορίσει τις δύο αυτές καταστάσεις πρέπει να γνωρίζει τους βασικούς νόμους της μηχανικής και της συμπεριφοράς των υλικών και να είναι γνώστης των μαθηματικών και υπολογιστικών τεχνικών που προσφέρονται για την ανάλυση της κατασκευής και τον υπολογισμό των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών. Επίσης πρέπει να γνωρίζει την επιρροή του εδάφους θεμελιώσεως στην συμπεριφορά των κατασκευών.

### 3.6 ΚΑΝΟΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕΛΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

«Καινοτομίες που εισάγονται στον Ευρωκώδικα 9»

- 1) Κατάταξη διατομών
- 2) Έκταση θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών (ΘΕΖ)
- 3) Γενικευμένη διατύπωση για ΟΚΑ για μέλη υπό αξονική φόρτιση
- 4) Γενικευμένη διατύπωση για ΟΚΑ για μέλη υπό κάμψη
- 5) Προσέγγιση καμπυλών λυγισμού για στύλους
- 6) Προσέγγιση τοπικού λυγισμού
- 7) Προσδιορισμός της στροφικής ικανότητας
- 8) Προσέγγιση πλαστικού σχεδιασμού
- 9) Κατάταξη συνδέσεων
- 10) Ισοδύναμο βραχύ Τα για κοχλιωτές συνδέσεις με μετωπικές πλάκες

### 3.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

- ✚ Τιμές σχεδιασμού για τα φορτία παρέχονται στους Ευρωκώδικες 0 και 1
- ✚ Αρχές σχεδιασμού οριακών καταστάσεων
- ✚ Έλεγχος αντοχής με τη μέθοδο των επιμέρους συντελεστών ασφάλειας.

Οι τιμές σχεδιασμού των γεωμετρικών ατελειών που ορίζονται σ αυτόν τον κανονισμό λαμβάνουν υπόψη τις επιρροές των γεωμετρικών ατελειών των μελών, όπως καθορίζονται από τις γεωμετρικές ανοχές σε κανονισμούς προϊόντων ή στον κανονισμό εκτέλεσης.

Τις επιρροές των κατασκευαστικών ατελειών λόγω:

- ✚ Παραγωγής και ανέργειας
- ✚ Παραμενουσών τάσεων
- ✚ Μεταβλητότητας της τάσης διαρροής και των θερμικά επηρεασμένων ζωνών

Για κατασκευές από αλουμίνιο εφαρμόζεται η εξίσωση

$$Rd = \frac{1}{\gamma_M} Rk$$

Όπου:

Rk: Χαρακτηριστική τιμή της συγκεκριμένης αντοχής που προσδιορίζεται με βάση τις χαρακτηριστικές ή ονομαστικές τιμές για τις ιδιότητες και διαστάσεις των υλικών.

$\gamma_M$ : Καθολικός επιμέρους συντελεστής ασφάλειας για τη συγκεκριμένη αντοχή.

#### ΔΟΜΙΚΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Μεγάλο εύρος στα υλικά- κράματα αλουμινίου. Ελατά κράματα και κράματα χύτευσης

«Συμβολισμοί προϊόντων»

- ⊗ SH- Φύλλο (EN 485)
- ⊗ ST- Λωρίδα (EN 485)
- ⊗ PL- Πλάκα (EN 485)
- ⊗ ET- Σωλήνες διέλασης (EN755)
- ⊗ EP- Προφίλ διέλασης (EN755)

#### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΛΑΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Στον Ευρωκώδικα 9 δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του συμβατικού ορίου διαρροής 0,2%  $f_u$  των ελατών κραμάτων αλουμινίου για διάφορες επεξεργασίες και διάφορα πάχη.

- 1 Προϊόντα φύλλων , λωρίδων και πλακών
- 2 Ράβδους, σωλήνες και προφίλ διέλασης και εξηλασμένους σωλήνες
- 3 Προϊόντα σφυρηλάτησης

Επιπρόσθετα δίδονται οι χαρακτηριστικές τιμές για τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες οι συντελεστές απομείωσης, η κατηγορία λυγισμού και ο εκέτης στην έκφραση Ramberg για την πλαστική αντοχή.

### ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σταθερές τιμές που υιοθετούνται στους υπολογισμούς για τα κράματα αλουμινίου

Μέτρο ελαστικότητας	E=70000 N/mm
Μέτρο διάτμησης	G=27000 N/mm <sup>2</sup>
Λόγος Poisson	ν=0.3
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής	α=23*10 <sup>-6</sup> / ° C
Πυκνότητα	ρ=2700 kg/m <sup>3</sup>

### 3.8 ΕΘΝΙΚΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Το ελάχιστο πάχος του υλικού καθορίζεται ως ακολούθως (εάν δεν προσδιορίζεται ρητά σε αυτό το πρότυπο):

- Στοιχεία με πάχη υλικού όχι μικρότερα από 0,6 mm
- Συγκολλητά στοιχεία με πάχη υλικού που δεν είναι μικρότερα από 1,5 mm
- συνδέσεις με:
  - ✖ χαλύβδινους κοχλίες και βλήτρα με διάμετρο που δεν είναι μικρότερη από 5 mm
  - ✖ κοχλίες και βλήτρα από αλουμίνιο με διάμετρο που δεν είναι μικρότερη από 8 mm
  - ✖ ήλοι και βίδες με σπείρωμα διαμέτρου, η οποία δεν είναι μικρότερη από 4,2 mm

### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΛΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Για θερμοκρασίες μεταξύ 80°C και 100°C πρέπει να επιτυγχάνεται η παρακάτω διαδικασία:

Όλες οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής του αλουμινίου ( $f_0$ ,  $f_u$ ,  $f_0$ ,  $h_{az}$  and  $f_u$ ,  $h_{az}$ ) μπορεί να μειωθούν σύμφωνα με τον τύπο:

$$X_{kT} = \left[ \frac{1 - k100(T - 80)}{20} \right] X_k$$

Όπου:

$X_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή της ιδιότητας αντοχής του υλικού

$X_{kT}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού σε θερμοκρασία T μεταξύ 80°C και 100 °C

T είναι η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας της κατασκευής

$k_{100} = 0,1$  για κράματα εργοσκληρυνόμενα (3xxx-κράματα, 5xxx- κράματα και EN AW 8011A)

$k_{100} = 0,2$  για υλικά σκληρυνόμενα λόγω καθίζησης (6xxx- κράματα και EN AW-7020)

Εθνικό Προσάρτημα στο CYS EN 1999-1-1:2007/A1:2009/A2:2003

### Ευρωκώδικας 9:

«Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο»

## ΓΕΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ

### CYS TC 18

Γενικά στους 100°C για όλα τα κράματα αλουμινίου εφαρμόζεται η κατηγορία λυγισμού B. Για θερμοκρασίες μεταξύ 80°C και 100°C θα πρέπει να γίνεται παρεμβολή μεταξύ κατηγορίας A και κατηγορίας B.

Κανένας άλλος κανόνας για τη μείωση των χαρακτηριστικών τιμών παρέχεται.

### «ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ»

Ανάλυση πρώτης τάξης μπορεί να χρησιμοποιείται, εάν η αύξηση των σχετικών εντατικών μεγεθών ή οποιαδήποτε άλλη αλλαγή της συμπεριφοράς του φορέα οφειλόμενη σε παραμορφώσεις, μπορεί να αγνοηθεί. Αυτός ο όρος μπορεί να θεωρηθεί ότι εκπληρώνεται, εάν ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

$$A_{cr} = F_{cr} / F_{ed} > 10$$

όπου:

$A_{cr}$  είναι ο συντελεστής με τη χρήση του οποίου, το φορτίο σχεδιασμού θα αυξηθεί ώστε να προκληθεί καθολική ελαστική αστάθεια

$F_{ed}$  είναι το φορτίο σχεδιασμού του φορέα

$F_{cr}$  είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού για καθολική αστάθεια βασισόμενο στην αρχική ελαστική δυσκαμψία

Κανένα άλλο κριτήριο για το όριο του  $cr$  παρέχεται ώστε να αγνοηθεί η επίδραση φαινομένων δεύτερης τάξης.

ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ  $\gamma_M$  ΓΙΑ ΚΟΜΒΟΥΣ

<i>Αντοχή μελών και διατομών για <math>\gamma_{M1}</math> και <math>\gamma_{M2}</math></i>	
Αντοχή κοχλιωτών συνδέσεων	$\gamma_{M2} = 1,25$
Αντοχή ηλωτών συνδέσεων	$\gamma_{M2} = 1,25$
Αντοχή ελασμάτων σε σύνθλιψη άντυγας	$\gamma_{M2} = 1,25$
Αντοχή συνδέσεων με πείρους	$\gamma_{Mp} = 1,25$
Αντοχή συγκολλητών συνδέσεων	$\gamma_{Mw} = 1,25$
Αντοχή σε ολίσθηση	
-για οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας	$\gamma_{Ms,ser} = 1,1, \gamma_{Ms,ult} = 1,25$
- για οριακές καταστάσεις αστοχίας	
Αντοχή συνδέσεων με επικόλληση	$\gamma_{Ma} > 3,0$
Αντοχή βλήτρων στις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας	$\gamma_{Mp,ser} = 1,0$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

«Χρήσιμα Προγράμματα Πολιτικών Μηχανικών»

4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ANSYS

Το ANSYS είναι ένα κατανοητό και γενικής χρήσης πρόγραμμα υπολογιστή που στηρίζεται στην θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Το ANSYS είναι ικανό να εκτελέσει στατικές και δυναμικές αναλύσεις ή αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας ροής υγρού καθώς και ηλεκτρομαγνητισμού

Το ANSYS υπήρξε ένα πρωτοποριακό FEA πρόγραμμα. Η τρέχουσα έκδοση του ANSYS έχει μια εντελώς νέα μορφή, με πολλαπλά υπολογιστικά συστήματα που ενσωματώνουν το Γραφικό Περιβάλλον του Χρήστη, ανοιγόμενα μενού κουτιά διαλόγου και μια οριζόντια μπόρα με τα εργαλεία. Σήμερα θα βρούμε να χρησιμοποιείται το ANSYS σε πολλούς τομείς, όπως:

- ✚ Της μηχανικής
- ✚ Της αεροναυπηγικής
- ✚ Του ηλεκτρομαγνητισμού
- ✚ Της θερμότητας
- ✚ Της βιομηχανίας αυτοκινήτων

Η προσομοίωση μηχανικής ANSYS για τη βιομηχανία μετάλλων αποδείχθηκε ζωτικής σημασίας για να βοηθήσει τους παραγωγούς και τους κατασκευαστές μετάλλων να ισορροπήσουν το χρόνο, την τιμή, τη βιωσιμότητα και τις πιέσεις ποιότητας. Το ANSYS CDF για τη βιομηχανία μετάλλων και το ηλεκτρομαγνητικό λογισμικό συμβάλλει στη βελτίωση των διαδικασιών, στην εξοικονόμηση κόστους και στην αύξηση της ποιότητας του προϊόντος. Τα λύματα από τις λύσεις ANSYS, συμπεριλαμβανομένου του FEA για τη βιομηχανία μετάλλων, έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που είναι ειδικά για τη βιομηχανία μετάλλων, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης, επεξεργασίας, μοντελοποίησης, διαμόρφωσης, διαμόρφωσης και κατασκευής υλικού.

Οι πλήρεις δυνατότητες εικονικής προτυποποίησης του ANSYS συγκεντρώνουν τη δύναμη της καλύτερης τεχνολογίας προσομοίωσης στην κατηγορία της δυναμικής των υγρών, του μηχανικού μοντέλου, της αλληλεπίδρασης των υγρών δομών και ηλεκτρομαγνητικών σε μια προσαρμοστική αρχιτεκτονική. Η προσομοίωση μηχανικής ANSYS για τη βιομηχανία μετάλλων καθιστά δυνατή τη συλλογή και εφαρμογή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με τη συμπεριφορά των υγρών, στερεών σωματιδίων και αερίων, της μεταφοράς θερμότητας και των φαινομένων στερεοποίησης.

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των εργασιών σε διακεκριμένα στάδια.

Αναλυτικότερα:

**1ο Στάδιο** → Κατασκευή της Γεωμετρίας



**2ο Στάδιο**→Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

**3ο Στάδιο**→ Διακριτοποίηση της Γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών

**4ο Στάδιο**→Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό η γραμμικό μεταβατικό υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

**5ο Στάδιο**→Ανάγνωση και γραφική αναπαράστασή των αποτελεσμάτων. Τα παραπάνω στάδια, υπάρχει δυνατότητα και ίσως κάποιες φορές αναγκαιότητα, να μην πραγματοποιηθούν όλα στο ίδιο λογισμικό.

#### 4.1.1 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Το λογισμικό αυτό δίνει στο χρήστη την δυνατότητα υλοποίησης όλων των παραπάνω σταδίων, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι κάποια από τα προαναφερθέντα στάδια δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε άλλα περιβάλλοντα και τα αποτελέσματά τους να εισαχθούν, στη συνέχεια, στο ANSYS. Τα στάδια μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές μεθοδολογίες εντός του περιβάλλοντος του ANSYS. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ορισμένες επιλογές ώστε να γίνει κατανοητή η πολύπλευρη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων.

**1<sup>ο</sup> Στάδιο:** Κατασκευή γεωμετρίας. Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει , γενικά , με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία γραμμές επιφάνειες και τέλος όγκοι.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών , είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πολύ εύρηστο σε περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους , κυλίνδρους ,ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α.

Στην περίπτωση που η γεωμετρία δημιουργηθεί σε άλλο σχεδιαστικό περιβάλλον η εισαγωγή της ANSYS γίνεται με τη μορφή αρχείου. Τέλος η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει στον προεπεξεργαστή κάποιου άλλου προγράμματος που δίνει αρχείο εισόδου για περιβάλλον ANSYS. Το αρχείο αυτό ονομάζεται ουδέτερο αρχείο. Η επιλογή της κατασκευής της γεωμετρίας σε 'άλλο περιβάλλον μπορεί να είναι πολύ ελκυστική, ιδιαίτερα για όσους γνωρίζουν κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, αλλά πρέπει να δείχνουμε ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή της παραμέτρου της ανοχής ,όταν πρόκειται για \*.igs και να επιβεβαιώνουμε ότι όλα τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν έχουν εισαχθεί σωστά , διαφορετικά πρέπει να γίνεται επιδιόρθωση της γεωμετρίας. Ένα συνηθισμένο πρόβλημα από την εισαγωγή γεωμετρίας στο ANSYS από εξωτερικό πρόγραμμα είναι ότι το μοντέλο μπορεί να εμφανίζει το φαινόμενο ύπαρξης διπλών γραμμών ή σημείων. Τότε πρέπει να γίνει συγχώνευση αυτών με την εντολή merge με την οποία θα ασχοληθούμε αργότερα. Τέλος μπορεί παρότι στο ουδέτερο αρχείο η γεωμετρία είναι με τη μορφή όγκου όταν γίνει εισαγωγή να μην είναι σωστή ή να λείπουν επιφάνειες, τότε πρέπει να γίνει επιδιόρθωση.



**2<sup>ο</sup> Στάδιο:** Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι όλες οι μονάδες είναι στο SI εκτός αν τις ορίσουμε εμείς διαφορετικά. Δεν συνίσταται να γίνει αλλαγή μονάδων γιατί υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λάθους. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που μας ενδιαφέρει να κάνουμε. Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση που θα κάνουμε, αυτό δε σημαίνει ότι δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής τους στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι να έχουμε καταλήξει στη διάστασή τους και στο είδος της καταπόνησης.

**3<sup>ο</sup> Στάδιο:** Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών. Αφού έχει γίνει η επιλογή του στοιχείου μένει να γίνει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι αυτόματη δημιουργία πλέγματος, ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές ή ορισμός μεγέθους στοιχείων καθώς και η επιλογή του Smart Size η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση.

Αφού καταλήξουμε στις παραπάνω επιλογές ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος. Γενικά οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα ορίσουμε. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το πρόγραμμα να γνωρίζει τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης που επιθυμούμε άρα πρέπει να επέμβουμε στις προεπιλογές που έχει

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να μην οριστούν γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου στ περιβάλλον του ANSYS και στη συνέχεια να γίνει η διακριτοποίηση, αλλά να κατασκευαστούν απευθείας κόμβοι και πεπερασμένα στοιχεία ή να εισαχθούν αφού έχουν υπολογιστεί με κάποιο άλλο προεπεξεργαστή. Το παραπάνω συνιστά παράκαμψη του 1ου Σταδίου. Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία που μπορούν αυτές να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικά στοιχεία είτε σε στοιχεία του πλέγματος. Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

**4<sup>ο</sup> Στάδιο:** Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος και επίλυση. Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Συνήθως μια γραμμική στατική ανάλυση μικρών μετατοπίσεων καλύπτει τις ανάγκες μας. Παρόλα αυτά είναι δυνατό θέλουμε να διερευνήσουμε κάποιο μεταβατικό φαινόμενο ή τα υλικά που χρησιμοποιούνται να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Ακόμα συμβαίνει συχνά όταν αντιμετωπίζουμε προβλήματα λυγισμού και πτύχωσης τα οποία είναι μη γραμμικά. Όσον αφορά την επίλυση προσφέρονται πολλές δυνατότητες οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης που δεν θα δώσουν αποτέλεσμα αλλά θα έχουν διαφορετικό χρόνο επίλυσης.

Υπάρχουν επιλυτές που χρησιμοποιούν περισσότερο τον σκληρό δίσκο για ενδιάμεσα αρχεία ή την φυσική μνήμη. Είναι προφανές ότι αφού η ταχύτητα της μνήμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου αυτή η μέθοδος είναι και πιο γρήγορη. Υπάρχει όμως περίπτωση να μην υπάρχει

διαθέσιμη η απαιτούμενη για το πρόβλημα φυσική μνήμη ή για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις να μην είναι όλοι οι επιλυτές ικανοί να αντιμετωπίσουν τη φύση του προβλήματος.

**5ο Στάδιο:** Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφονται σε ένα αρχείο. Η ανάγνωση τους είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα αποτελέσματα στους κόμβους και τα αποτελέσματα στα στοιχεία. Στους κόμβους γίνεται δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία είναι κοινός και έχει συνεχή τιμή ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία έχουμε μια τιμή ανά στοιχείο ισοπαραμετρικά μπορούμε να επιλέξουμε επιπλέον αποτελέσματα στα σημεία.

Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή του Element Table μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων βγάζοντας μέσους όρους. Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου έχουμε συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Επιπλέον στοιχεία για τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων στην αρχική τους μορφή είχαν μόνο γραμμή εντολών. Στη γραμμή εντολών γινόντουσαν όλες οι ενέργειες που ήθελε ο χρήστης. Στη συνέχεια με την δημιουργία των παραθυρικών περιβαλλόντων δόθηκε η δυνατότητα να κατασκευάζονται μοντέλα με τη χρήση τους. Η γραμμή εντολών έχει το αρνητικό της απομνημόνευσης των εντολών που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, αν και εμφανίζεται η σύνταξή τους. Το θετικό είναι ότι μπορούν να γίνονται μικρές αλλαγές σε λίστες από εντολές και μετά να τις επανεκτελούμε με αποτέλεσμα να γίνεται πολύ πιο γρήγορα η δουλειά που μας ενδιαφέρει.

Αυτό μπορεί να γίνει και χωρίς να ανοίξουμε το παραθυρικό περιβάλλον, μέσω αρχείων με την μορφή batch δίνοντας ένα αρχείο εισόδου (input) και δηλώνοντας ένα αρχείο εξόδου (output). Το παραθυρικό περιβάλλον έχει τις εντολές με δένδροειδή μορφή και συνεπώς είναι πολύ εύκολο να βρούμε την εντολή που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά. Η μορφή αυτή, είναι ιδιαίτερα βολική για αρχάριους χρήστες, διότι με αυτόν τον τρόπο αποκτούν μια εποπτεία για τις δυνατότητες του προγράμματος. Όταν εργαζόμαστε σε παραθυρικό περιβάλλον όλες οι εντολές που δίνουμε γράφονται με την μορφή της γραμμής εντολών σε ένα αρχείο απλού κειμένου.

Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να αλλάζουμε κάποια στοιχεία σε αυτό και να το επανεκτελέσουμε. Το πρόβλημα σε αυτή τη περίπτωση είναι ότι αν έχουμε κάνει πολλά λάθη τα οποία τα διορθώνουμε στη συνέχεια θα προκύψει ένα πολύ μεγάλο αρχείο που θα είναι δύσκολο να το διαχειριστούμε .

## 4.2 ΧΡΗΣΙΜΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ

### 4.2.1 ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MENTAT ΚΑΙ MARC

Mentat: Το περιβάλλον που αναλαμβάνει τον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση του προβλήματος.

Marc: Το λογισμικό πρόγραμμα που επιτυγχάνει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την επίλυση του προβλήματος.

Το λογισμικό MSC.MARC (2005) δίνει την έγκριση για την επαφή με κάθε διαθέσιμο τύπο πεπερασμένου στοιχείου, αλλά η χρήση κάποιων ειδικών στοιχείων έχει συνέπειες στην ανάλυση. Η ανάλυση επαφής μπορεί να επιτευχθεί με όλους τους τύπους των δομικών, σε σειρά πεπερασμένων στοιχείων, εκτός από τα συμμετρικά εκ περιστροφής με στρέψη.

Στις εξωτερικές επιφάνειες οι κεντρικοί κόμβοι περιορίζονται σε σχέση με τους γωνιακούς αυτομάτως. Συνεπώς, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της μετατόπισης στις επιφάνειες. Τα στοιχεία στο εσωτερικό μέρος του σώματος συμπεριφέρονται με το συμβατικό τρόπο της υψηλότερης τάξης. Χάρη στην ικανότητά τους να αναπαριστούν μεγάλες παραμορφώσεις, τα χαμηλότερης τάξης πεπερασμένα στοιχεία συμπεριφέρονται καλύτερα σε πολλές αναλύσεις μεθόδων κατασκευής και συμπερασματικά συνίσταται για τέτοιου είδους εφαρμογές.

### 4.2.2 F.E.M. Design

Το λογισμικό FEM Design είναι ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο στα χέρια των σημερινών μελετητών μηχανικών. Οι δυνατότητες που προσφέρει αλλά και η ποιότητά του είναι παρόμοια με εκείνη των προηγούμενων και πιο πολυδάπανων προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η τιμή του στην αγορά είναι χαμηλότερη από ότι των κοινών στατικών προγραμμάτων και αυτό οφείλεται στην συμφωνία της Nomitech με την Strusoft AB. Δεν υπάρχει κανένας λόγος να μην προχωρήσετε στην αλλαγή του πακέτου σας με το FEM Design, λόγω των Ευρωκωδίκων και της εφαρμογής του στην χώρα μας και της έγκρισης του προγράμματος από τις πολεοδομίες έχοντας υπόψη ότι:

- ❖ Θα βελτιωθεί σημαντικά ο χρόνος ολοκλήρωσης των στατικών μελετών , σε σχέση με τα πιο δημοφιλή στατικά πακέτα
- ❖ Θα επιτευχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα και θα υπάρχει πλήρης εποπτεία των αποτελεσμάτων, φορτίσεων, δικαιολόγησης
- ❖ Ύπαρξη ασφάλειας κατά την εκπόνηση των μελετών, γνωρίζοντας ότι η δουλειά γίνεται πάνω σε ένα πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται από πολλούς ακόμη χρήστες ανά τον κόσμο και είναι φτιαγμένο με Σουηδική επιμέλεια. Εγγυάται διεξοδικό έλεγχο
- ❖ Εύκολη διαστασιολόγηση σε πολύπλοκες κατασκευές, οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ή να αναλυθούν σωστά με κοινά στατικά προγράμματα
- ❖ Χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης
- ❖ Το πρόγραμμα προσαρμόζεται σε συνεργασία με αρχιτεκτονικά προγράμματα όπως: ArchiCAD, Revit

### ΤΑ ΝΕΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ FEM-Design VERSION 9

### Μοντελοποίηση

Εύχρηστο περιβάλλον εργασίας με απλά CAD εργαλεία για εύκολη δημιουργία και επεξεργασία του μοντέλου

Χρήση OpenGL για γρήγορα αποτελέσματα με κίνηση, και πολλές δυνατότητες κατά την απεικόνιση του μοντέλου σε δύο και τρεις διαστάσεις

Η Διασύνδεση δεδομένων μας δίνει την έγκριση να δημιουργήσουμε το μοντέλο από τα σχέδια του αρχιτέκτονα εισάγοντας αρχεία τύπου IFC, DWG και DXF

Σημειακές, γραμμικές και επιφανειακές στηρίξεις με άκαμπτα, ελεύθερα στοιχεία (ελατήρια)

Επεξεργαστής διατομών, για δημιουργία ειδικών σχημάτων και διάταξης για μέλη δικτύωματος, δοκούς, κολόνες, με αυτόματο υπολογισμό των χαρακτηριστικών της διατομής

### Ανάλυση

Υπάρχουν διαθέσιμοι διάφοροι τύποι φόρτισης, συμπεριλαμβανομένης της σημειακής, γραμμικής, επιφανειακής, θερμοκρασίας, κίνησης στήριξης, και παραμόρφωσης.

Αυτόματος συνδυασμός φόρτισης συνδυάζοντας μόνιμα, κινητά και τυχαία φορτία

Αυτόματη βέλτιστη παραγωγή του κανάβου των πεπερασμένων στοιχείων χωρίς όρια στα στοιχεία και δυνατότητα για πύκνωση στα σημεία φόρτισης εφόσον απαιτείται.

Αυτόματη επίλυση προβλημάτων

### Διαστασιολόγηση

Επιλογή του επιθυμητού κώδικα για διαστασιολόγηση του οπλισμένου σκυροδέματος, των μεταλλικών και ξύλινων κατασκευών από τους Ευρωκώδικες.

Η διαστασιολόγηση των μεταλλικών κατασκευών, συμπεριλαμβάνει και τον έλεγχο του πόσο (%) δουλεύει η διατομή σας σε τάσεις, λυγισμό κορμού και πελμάτων

Η Επιλογή του κατάλληλου τρόπου προβολής των αποτελεσμάτων μεταξύ γραφικών τριών διαστάσεων και γραμμών ίσων τάσεων και διατομών για προβολή αποτελεσμάτων.

Εισαγωγή δεδομένων σε μορφή να ικανά να ανοιχτούν και να γίνεται η επεξεργασία αυτών στο Excel, και εξαγωγή αυτών .

#### 4.2.3 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ GT STRUDL

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων GT STRUDL είναι ειδικό γι πολιτικούς μηχανικούς και έχει εγκριθεί από την Nuclear Regulatory Commission, USA.

Πλέον αξιόπιστο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί το παραπάνω πρόγραμμα για κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού. Συνδέεται και συνεργάζεται με τα 3DR.STRAD και 3DR.STEEL διότι συνδυάζει τις δυνατότητες ανάλυσης του με τη γρήγορη εισαγωγή δεδομένων και εφαρμογή των Ελληνικών Κανονισμών στη διαστασιολόγηση που προσφέρει η 3DR.SUITE.

Επίσημη αντιπρόσωπος στην Ευρώπη είναι η 3DR ενώ η Intergraph- Hexagon αναπτύσσει το πρόγραμμα , δεν οριοθετεί την διαδικασία της πώλησης και καλύπτει την υποστήριξη του προγράμματος και την ανάπτυξη τμημάτων κώδικα.

Αποτελεί την καλύτερη λύση καθώς συνδυάζει την επιστημονική αρτιότητα, ταχύτητα και ευχρηστία!

#### 4.2.4 ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ CAE ΚΑΙ CAD

CAD: (Computer Aided Design) ορίζεται μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την τροποποίηση, δημιουργία και βελτιστοποίηση ενός σχεδιασμού. Συγκεκριμένα πρόκειται για την χρήση λογισμικών βοήθειας των μηχανικών στην κατασκευή και προτυποποίηση τμημάτων των προϊόντων από εργαλειομηχανές. Με το προαναφερόμενο όρο εννοούμε τη δημιουργία απεικονίσεων στον υπολογιστή. Προφανώς όταν αναφερόμαστε σε CAD δεν εννοούμε μόνο την απεικόνιση διδιάστατων (2D) σχεδίων αλλά κυρίως την περίπτωση (3D) απεικόνιση δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός εξαρτήματος μέχρι ο μελετητής να καταλήξει σε μία αποδεκτή λύση.

Επιπλέον, όλα τα CAD διαθέτουν μορφές αρχείων (dxf, iges, step) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο. Αυτά τα λογισμικά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την παραγωγικότητα του σχεδιαστή, να αυξήσουν την ποιότητα του σχεδίου και να φτιάξουν βιβλιοθήκη πρότυπων σχεδίων για την δημιουργία εξαρτημάτων.

Τέτοιου τύπου συστήματα χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση ηλεκτρονικών συστημάτων (Electronic Design Automation EDA), μηχανολογικών συστημάτων (Mechanical Design Automation MDA) αλλά και τη δημιουργία πρόχειρων σχεδίων (Computer Aided Drafting CAD). Τα τεχνικά σχέδια CAD περιλαμβάνουν τις πληροφορίες για το σχήμα , για τα υλικά, διεργασίες διαστάσεις και ανοχή σε σφάλματα. Τα λογισμικά CAM καθιστούν εφικτή την κατασκευή φυσικών μοντέλων χρησιμοποιώντας σχέδια εξαγόμενα από προγράμματα CAD. Τα πιο διάσημα λογισμικά CAM είναι τα Mastercam, OneCNC, Solid Cam, Gibbscam, Visual Mill, Edge cam και SprutCam.

Τα πιο δημοφιλή λογισμικά είναι τα CATIA, AutoCAD, Pro/ENGINEER, Solid Works, Unigraphics, ACIS και Autodesk Inventor.

***Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμό προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου ζωής προϊόντος. Στη συνέχεια, η παραπάνω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.***

CAE: (Computer Aided Engineering) ορίζεται ως η χρήση συστημάτων λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τον μηχανικό.

Σε μία διεθνοποιημένη οικονομία η τεχνολογία και η τεχνογνωσία θεωρείται δεδομένη. Είναι πρόκληση για τον μηχανικό να ανταγωνίζεται και να τα βγάξει πέρα σε ένα διεθνές επίπεδο. Η χρήση των Τεχνολογιών με τη Βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, συμπεριλαμβανομένου του CAE, και έχοντας δεδομένη την ευκολία που έχουν να μεταφέρουν την πληροφορία, είναι στις μέρες μας πολύ γνωστή στον βιομηχανικό κλάδο σε όλα τα έθνη.

Υπάρχουν κάποια εμπόδια τα οποία αποτρέπουν μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις να έχουν πρόσβαση σε αυτές τις τεχνολογίες και να τις εντάξουν στην ζωή των προϊόντων τους. Για παράδειγμα η έλλειψη σωστά εκπαιδευμένων μηχανικών. Για χρόνια η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων θεωρούνταν ίδια με το CAE και έτσι η μηχανικοί με γνώση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αναλάμβαναν και την εφαρμογή τεχνολογιών CAE. Το CAE αναπτύχθηκε σε ένα χώρο πολυμερή και περιλαμβάνει όλες τις φάσεις ανάπτυξης ενός προϊόντος. Από την σύλληψη στην σχεδίαση και ανάλυση αυτού, στην βελτιστοποίηση και στην κατασκευή με βοήθεια Η/Υ.

Κάπως έτσι επιμέρους έννοιες όπως CAM (Computer Aided Manufacturing), CAD (Computer Aided Design), για τον σχεδιασμό και την παραγωγή αντίστοιχα, συμπεριλαμβάνονται μες την παραπάνω έννοια. Μέσω του αρχείου IGES (Initial Graphics Exchange Specification) γίνεται η ανταλλαγή και η αποθήκευση εικόνων. Είναι ένα ουδέτερο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των δύο προαναφερθέντων.

#### 4.2.5 Το Λογισμικό Πακέτο CAE ANSA

Το ANSA της Beta Systems είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω αναφέρονται οι κύριες έννοιες αυτού

1. Μια ορθά επεξεργασμένη γεωμετρία είναι βασική προϋπόθεση για την δημιουργία ενός καλά καθορισμένου πλέγματος. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μοντελοποίησης θα πρέπει να γίνεται η σύνδεση των εξαρτημάτων.
2. Διαφορετικά μοντέλα πλέγματος θα πρέπει να δημιουργούνται στο ίδιο συναρμοσμένο μοντέλο γεωμετρίας.
3. Οι κόμβοι του δικτύου του κελύφους πλέγματος πρέπει να βρίσκονται στις ίδιες συντεταγμένες με τη γεωμετρία της κατασκευής που δίνεται από το CAD.
4. Οι συνηθέστερες εργασίες επεξεργασίας μπορούν να ολοκληρωθούν σε αυτό το λογισμικό, χωρίς τη χρήση κάποιου άλλου.
5. Το λογισμικό αυτό συμβαδίζει με πολλές από τις πλατφόρμες CAD / CAE και τα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία



Τα βασικά εργαλεία του ANSA περιέχουν :

1. Τοπολογία γεωμετρίας CAD και τον καθαρισμό της.
2. 2D και 3D CAD.
3. Διαχείριση μερών , συναρμολόγηση και σύνδεση τους.
4. Ευελιξία στο πλαίσιο της προετοιμασίας πλέγματος της επιφάνειας του κελύφους.
5. Αυτόματη εκτέλεση εντολών.
6. Δημιουργία πλέγματος όγκου με βάση το πλέγμα της επιφάνειας κελύφους.
7. Έλεγχοι ποιότητας πλέγματος και λειτουργίες βελτίωσης του.
8. Πλατφόρμες επεξεργασίας για NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, και RADIOSS.
9. Εργαλείο ανάλυσης διατομής.
10. Εργαλείο ανάλυσης δεξαμενής καυσίμων.
11. Επεξεργασία επιφανειακού πλέγματος και πλέγματος όγκου.

#### 4.2.6 ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ Lagrange

Οι εξεταζόμενοι πολλαπλασιαστές είναι αριθμητικές μέθοδοι που στοχεύουν στην ανάλυση επαφής. Στην ανάλυση επαφής, λύνεται ένα πρόβλημα υπό περιορισμό, τον περιορισμός μη διείσδυσης.

Η παραπάνω τεχνική είναι η πιο κοινή διαδικασία για την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου σε ένα σύστημα. Με την χρήση αυτής της μεθόδου αν υπάρχει ακρίβεια στην γραφή των περιορισμών δεν θα δημιουργηθεί διείσδυση. Οδηγούμαστε σε υπολογιστικές δυσκολίες καθώς η εφαρμογή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αρνητικά ορισμένου συστήματος. Για την εξασφάλιση μιας ακριβούς και σταθερής λύσης απαιτούνται πρόσθετες λειτουργίες με σκοπό την εκτόξευση του κόστους

Με αυτή τη μέθοδο ακόμη μια δυσκολία που αντιμετωπίζουμε είναι η απουσία μάζας στο βαθμό ελευθερίας του πολλαπλασιαστή. Αυτό οδηγεί στην κατασκευή ενός γενικού πίνακα μάζας , χωρίς την ικανότητα να αντιστραφεί. Συνεπώς αυτό συνιστά τη μέθοδο ανίκανη να εφαρμοστεί σε απαιτητικά προβλήματα.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων κρίνεται αναγκαία αφού λόγω της μεγάλης εφαρμογής της στις κατασκευές από πολιτικούς μηχανικούς και όχι μόνο, καταφέρνει να αποκτήσει ακριβέστερη εικόνα και να επιλύσει σειρά προβλημάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καλύπτει τα κενά και τις αδυναμίες που προκύπτουν από άλλες μεθόδους αφού λαμβάνει υπόψη μέχρι και τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Επιπρόσθετα, μέσω από τις πηγές των πιθανών σφαλμάτων διατυπώνεται το πρόβλημα και ακολουθούνται οι κατάλληλες διαδικασίες για την αποφυγή τους. Όταν ο αριθμός των στοιχείων είναι μεγάλος τότε η επίλυση συγκλίνει πολύ κοντά στην πραγματικότητα και περιορίζονται τα σφάλματα. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων τόσο αυξάνεται και ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

Συμπεραίνουμε επίσης πως για την κατασκευή ενός θεμοκηπίου θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν την τοποθεσία το υψόμετρο αλλά και τις καιρικές συνθήκες που μπορεί να υποστεί. Η επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν γίνεται μέσα από μελέτες και γνώσεις που κατέχουμε ως Πολιτικοί Μηχανικοί.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι απαιτείται προσοχή κατά τη διακριτοποίηση της κατασκευής καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tirupathi R. Chandrupatla, Asok D. Belegundu, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ, ΑΘΗΝΑ: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2005
2. Μπιτζιωνης Βασίλειος και Δημητριος, ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΑΘΗΝΑ: ΤΖΙΟΛΑ, 2011.
3. ΔΡ. Π.Α. Κακαβάς, η μέθοδος των πεπερασμένων Στοιχείων ,2013
4. Ανδρέας Ε. Καναράχος «Πεπερασμένα στοιχεία και ανάλυση κατασκευών για μηχανολογία» ,2000
5. Μπιλάλης Νικόλαος ,Μαραβελάκης Εμμανουήλ , Συστήματα CAD/CAM ,Αθήνα Κριτική ,2009
6. Kenwood Lee, Βασικές αρχές συστημάτων CAD/CAM/CAE, Αθήνα

## ΕΠΙΣΗΜΟΙ ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

- ✓ <http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/7696/%CE%A3%CE%A7%CE%95%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3%20%CE%A0%CE%95%CE%96%CE%9F%CE%93%CE%95%CE%A6%CE%A5%CE%A1%CE%91%CE%A3%20%CE%91%CE%9B%CE%9F%CE%A5%CE%9C%CE%99%CE%9D%CE%99%CE%9F%CE%A5%20%CE%A5%CE%A0%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3%20%CE%9C%CE%95%20%CE%A4%CE%9F%20FEDRA%20%CE%95%CE%A5%CE%A1%CE%A9%CE%9A%CE%A9%CE%94%CE%99%CE%9A%CE%91%20%239..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ✓ <https://apothesis.lib.teicrete.gr/bitstream/handle/11713/4229/Stergiou-KapsaliStavrou2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ✓ <https://meteco.gr/metals/news/pos-ginetai-h-paragogh-alouminiou/>
- ✓ <https://www.alfan.gr/wp-content/uploads/2016/04/%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE-%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%85%CE%BC%CE%B9%CE%BD%CE%AF%CE%BF%CF%85.pdf>
- ✓ [file:///C:/Users/FUJITSU/Music/Downloads/Makris-Psylakis\\_Dip\\_2015.pdf](file:///C:/Users/FUJITSU/Music/Downloads/Makris-Psylakis_Dip_2015.pdf)
- ✓ <http://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/13298/P0013298.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ✓ <http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/7690/%ce%91%ce%a1%ce%a7%ce%95%ce%a3%20%ce%a3%ce%a7%ce%95%ce%94%ce%99%ce%91%ce%a3%ce%9c%ce%9f%ce%a5%20%ce%a6%ce%95%ce%a1%ce%9f%ce%a5%ce%a3%ce%a9%ce%9d%20%ce%9a%ce%91%ce%a4%ce%91%ce%a3%ce%9a%ce%95%ce%a5%ce%a9%ce%9d%20%ce%91%ce%9b%ce%9f%ce%a5%ce%9c%ce%99%ce%9d%ce%99%ce%9f%ce%a5%20-%ce%95%ce%a5%ce%a1%ce%a9%ce%9a%ce%a9%ce%94%ce%99%ce%9a%ce%91%ce%a3%20%209%20%ce%95%ce%a6%ce%91%ce%a1%ce%9c%ce%9f%ce%93%ce%95%ce%a3%20%ce%9c%ce%95%20%ce%a4%ce%9f%20%ce%a0%ce%a1%ce%9f%ce%92%ce%9b%ce%97%ce%9c%ce%91%20%ce%a0%ce%95%ce%a0%ce%95%ce%a1%ce%91%ce%a3%ce%9c%ce%95%ce%9d%ce%a9%ce%9d%20%ce%a3%ce%a4%ce%9f%ce%99%ce%a7%ce%95%ce%99%ce%a9%ce%9d%20ANSYS..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ✓ [http://library.tee.gr/digital/m2464/m2464\\_ec9.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2464/m2464_ec9.pdf)
- ✓ <http://library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/1>
- ✓ <https://slideplayer.gr/slide/2010248/>
- ✓ <http://www.sciencedirect.gr/>
- ✓ [http://www.moi.gov.cy/moi/moi.nsf/all/084006C1906DB05EC22584C5004926A9/\\$file/%CE%95%CE%98%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%91%CE%A1%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91\\_CYS%20EN%201999-1-1gr%20-%202019F.pdf?openelement](http://www.moi.gov.cy/moi/moi.nsf/all/084006C1906DB05EC22584C5004926A9/$file/%CE%95%CE%98%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%91%CE%A1%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91_CYS%20EN%201999-1-1gr%20-%202019F.pdf?openelement)
- ✓ <https://oryktos.blogspot.com/2015/07/2014.html>
- ✓ <http://greek.aluminiumconductorcable.com/sale-10831734-high-strength-xlpe>
- ✓ <http://artemis.library.tuc.gr/MT2009-0047/MT2009-0047.pdf>
- ✓ <https://www.michanikos.gr/forums/topic/15402-fem-design-%CF%80%CF%81%CF%8C%CE%B3%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%BC%CE%B1-%CE%B5%CF%80%CE%AF%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CF%8C%CE%B3%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%BC%CE%B5-%CF%80%CE%B5%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-ec/>

- ✓ <https://www.3dr.eu/el/files/stradexamples/13.pdf>
- ✓ <https://dspace.uowm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/76/Charis%20Evangelatou0802.pdf?sequence=1>
- ✓ <https://dspace.uowm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/76/Charis%20Evangelatou0802.pdf;jsessionid=747CBB24B29707828A00C29D47AFFC92?sequence=1>