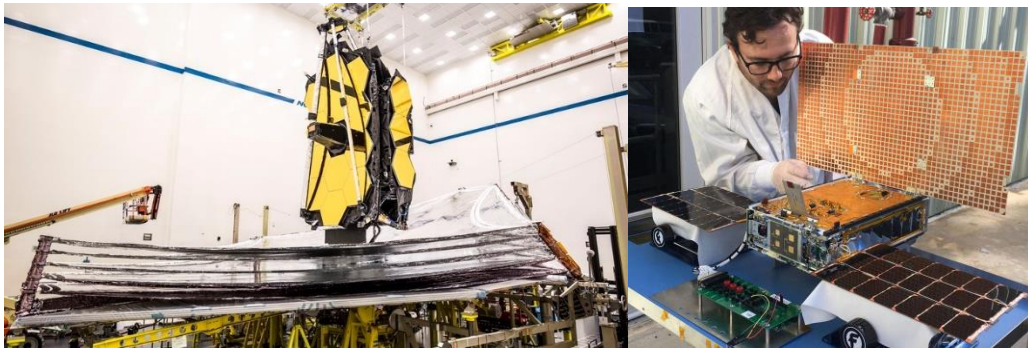


## 7. Δομές και Μηχανισμοί Δορυφόρων

Όταν ένα διαστημικό σκάφος εκτοξεύεται σε τροχιά, δέχεται μια παρόμοια δύναμη με εκείνη που ασκείται από το όχημα εκτόξευσης όταν επιταχύνει προς το διάστημα. Η δομή του διαστημικού σκάφους πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτική ώστε να χειρίζεται όλα αυτά τα υψηλά φορτία και να συγκρατεί όλα τα άλλα υποσυστήματα στη θέση τους. Εκτός από τις στατικές δομές, τα διαστημικά σκάφη έχουν επίσης πολλούς μηχανισμούς που περιστρέφονται, επεκτείνονται και λυγίζουν. Έτσι για παράδειγμα επεκτείνονται διάφορες κεραιές και ηλιακοί συλλέκτες. Σε αυτήν την ενότητα θα δούμε τα είδη δομών που απαιτούνται σε ένα διαστημικό σκάφος και θα μάθουμε μερικές από τις βασικές αρχές της δομικής ανάλυσης ώστε να ανακαλύψουμε τους τύπους δομών και μηχανισμών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση μιας διαστημικής αποστολής.



Σχήμα 1: (Αριστερά) Το Διαστημικό Τηλεσκόπιο James Webb (JWST) σε δοκιμές έκτασης του τηλεσκοπίου και θερμικής ασπίδας (Δεξιά) Ο νανοδορυφόρος (cubesat 6U) Marco της NASA/JPL σε δοκιμές πιστοποίησης

Οι προδιαγραφές σχεδίασης και κατασκευής του υποσυστήματος δομών και μηχανισμών (ΥΔΜ) μπορούν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με:

- Την τροχιά/διαστημικό περιβάλλον
- Επιλογή διαστημικού φορέα/εκτοξευτή (φορτία, δυνάμεις, καταπόνηση, ροπές)
- Υποστήριξη και προστασία διαστημικών οργάνων/υποσυστημάτων (ευθυγράμμιση, ανοχής, θερμική υποστήριξη)

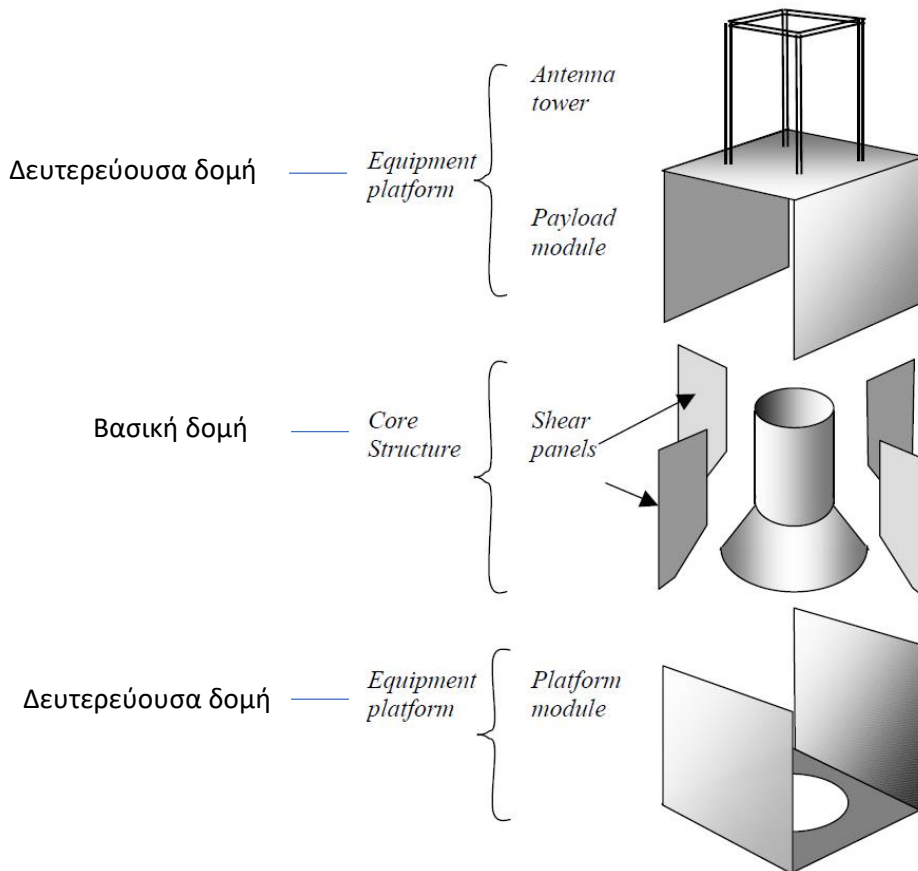
Το ΥΔΜ έχει ιδιαίτερα κρίσιμο ρόλο στις διαστημικές αποστολές καθότι όλη η αποστολή (και η επιτυχία της) μπορεί να βασίζεται ένα στοιχείο του υποσυστήματος όπως ένα μπουλόνι. Για παράδειγμα αν μια ηλιακή συστοιχία/πάνελ εκταθεί όταν ένας δορυφόρος μπει σε τροχιά αλλά αυτή αποκτήσει κάποιο πρόβλημα στην έκταση, στήριξη ή σταθεροποίηση, τότε ο δορυφόρος θα έχει λιγότερη η και καθόλου ισχύει με αποτέλεσμα την μερική ή και ολική απώλεια της αποστολής! Παράδειγμα προβληματικού υποσυστήματος αποτελεί η διπλή αντικατάσταση των ηλιακών συστοιχιών/πάνελ του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble το 1993 λόγω παραμόρφωσης και ταλάντωσης (jitter) αστοχιών καλωδιώσεων το 2002<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> [http://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/How\\_Hubble\\_got\\_its\\_wings](http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/How_Hubble_got_its_wings)



Σχήμα 2: (Αριστερά) Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble με παραμορφωμένες ηλιακές συστοιχίες (Δεξιά) Νέες στιβαρές ηλιακές συστοιχίες που εγκαταστάθηκαν σε αποστολή του Διαστημική Λεωφορείου το 1993 και το 2002<sup>1</sup>

Στους περισσότερους δορυφόρους, το ΥΔΜ πιάνει το 10-20% της 'ξηρής μάζας' του, δηλαδή της μάζας άνευ καυσίμων. Η δομή ενός δορυφόρου αποτελείται από μέρη, την βασική δομή (primary) η οποία διατηρεί την φυσική ακεραιότητα του δορυφόρου. Μεταφέρει τα περισσότερα φορτία που ασκούνται στον δορυφόρο (πίεσης, ταλαντώσεων, έλξης). Η δευτερεύουσα δομή περιλαμβάνει τα διαστημικά όργανα, καλωδιώσεις, σωλήνες και υποστηρίγματα διαφόρων υποσυστημάτων του δορυφόρου.

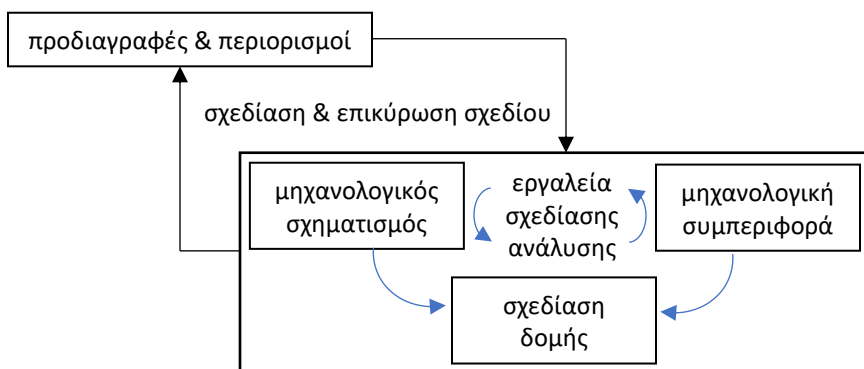


Σχήμα 3: Η βασική δομή (primary) και δευτερεύουσα δομή (secondary) δορυφόρων

Στο σχήμα 3 φαίνεται ο κύλινδρος, ο κώνος που μαζί με τα πάνελ διάτμησης συνθέτουν την βασική δομή. Ο κώνος περικλείει τον πυραυλοκινητήρα (arogee motor) και μέσα στο κύλινδρο βρίσκονται δύο δεξαμενές καυσίμων. Υπάρχουν δύο πρόσθετα διαμερίσματα/δομές που περικλείουν τα διαστημικά όργανα και τα υποσυστήματα της πλατφόρμας και αποτελούν και τα δύο δευτερεύουσες δομές.

Οι διάφοροι μηχανισμοί καταλαμβάνουν ένα μικρό ποσοστό της μάζας του δορυφόρου αλλά η επιτυχία ή αποτυχία τους καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό της συνολικής απόδοσης και λειτουργίας μια διαστημικής αποστολής. Μπορούμε να κατανείμουμε τους μηχανισμούς ανάλογα με τον αριθμό που αυτά χρειαστεί να λειτουργήσουν. Μηχανισμοί με χαμηλό κύκλο λειτουργίας είναι αυτοί που λειτουργούν μία ή δύο φορές όπως οι μηχανισμοί δοκού (booms) , ο μηχανισμός διαχωρισμού του δορυφόρου από τον εκτοξευτή. Για τέτοιες λειτουργίες χρησιμοποιούνται πυροτεχνικοί επενεργητές που έχουν πολύ μικρές ποσότητες εκρηκτικών ώστε να κόψουν βίδες ή/και μπουλόνια ώστε να συγκρατήσουν κατασκευές μαζί χωρίς να είναι ανάγκη να συγκολληθούν και που θα πρέπει να κινούνται όταν μπει ο δορυφόρος σε τροχιά ή που πρέπει να εκταθούν/κινούνται. Μηχανισμοί με υψηλό κύκλο λειτουργίας (με επαναληψτικότητα) είναι ηλεκτροκινητήρες που περιστρέφουν κεραίες, ηλιακά πάνελ, βαλβίδες προωθητών αλλά και επενεργητών, γυροσκοπίων κλπ.

Για να κατανοήσουμε πώς το ΥΔΜ πρέπει να ανταποκριθούν στις προδιαγραφές μιας διαστημικής αποστολής θα πρέπει να κατανοήσουμε την διαδικασία μηχανικής συστημάτων (systems engineering) για την δομή δορυφόρων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Μηχανική συστήματος και σχεδίαση δομής δορυφόρου

## 7.1 Βασικές Έννοιες Μηχανικής

Ανεξάρτητα αν φτιάχνουμε μία γέφυρα, αυτοκίνητο, δορυφόρο η μηχανική δομών είναι περίπου η ίδια. Μία δομή είναι οτιδήποτε μπορεί να μεταφέρει ένα φορτίο. Για τον άνθρωπο για παράδειγμα, ο σκελετός μας, μυς και ο ιστός μας αποτελούν την δομή του σώματός μας. Η δομή αυτή μας επιτρέπει με ενσωματωμένους παράγοντες ασφάλειας να κινούμαστε ακόμα και με ακραίες κινήσεις με μεγάλα φορτία εξαιτίας και της βαρύτητας με ασφαλή τρόπο.

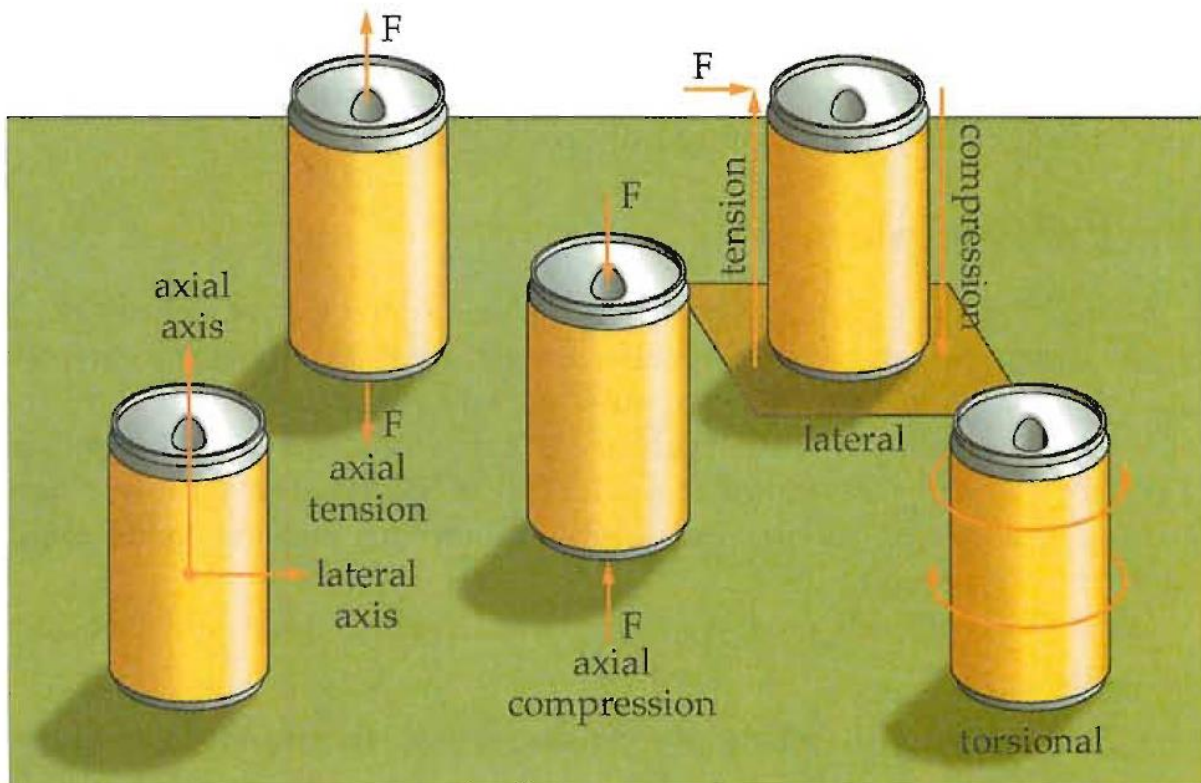
Τα φορτία που ενεργούν και πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας είναι

- Έλξη, ώθηση, συστροφή, κάμψη που δημιουργούν πίεση, τάση και διάτμηση
- Ταλάντωση
- Αλλαγή θερμοκρασίας – δημιουργία θερμικών τάσεων

### 7.1.1 Τύποι Φορτίων

Τα φορτία μπορεί να έχουν στατική και δυναμική μορφή σε σχέση με τον χρόνο. Μπορούμε επίσης να τα διακρίνουμε και ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται στον άξονα περιστροφής μια κατασκευής. Οι τύποι Φορτίου (F) είναι:

- Στατικό (static) φορτίο – Φορτίο/Δυνάμεις που παραμένουν σταθερές
- Δυναμικό (dynamic) φορτίο - Φορτίο/Δυνάμεις που μεταβάλλονται
- Αξονικό (Axial) φορτίο – Φορτίο ευθυγραμμισμένο/παράλληλο με τον διαμήκη άξονα μιας κατασκευής/δομής
- Πλευρικό (Lateral) φορτίο - Φορτίο κάθετο στον διαμήκη άξονα μιας κατασκευής/δομής
- Φορτίο στρέψης (torsional) – Φορτίο που εφαρμόζει ροπή σε μια κατασκευή
- Θλιπτικό (compression) φορτίο – Φορτίο που έχει τη τάση να συμπιέζει/συνθλίβει
- Φορτίο (tension) εφελκυσμού - Φορτίο που έχει τη τάση να τεντώνει/εκτείνει



Σχήμα 5: Τύποι Φορτίων

Σε ένα σώμα που εφαρμόζονται αξονικά ή πλευρικά φορτία δημιουργούνται ροπές στρέψης. Θεωρούμε ότι μια δύναμη που εφαρμόζεται σε κάποια απόσταση μέσω ενός σημείου σύνδεσης δίνει ροπή κάμψης ίση με:

$$M = F d$$

Όπου,

F = η δύναμη (N)

D = η απόσταση του φορτίου από τα σημεία που εφαρμόζεται η δύναμη

Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα στην ανάλυση δομών όταν αναλύουμε μία κατασκευή είναι αν θα 'σπάσει'. Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό θα δούμε 3 παραμέτρους που ποσοτικοποιούν τις αλλαγές σε μία δομή στην οποία εφαρμόζονται φορτία τάση (stress), καταπόνηση (strain), διάτμηση (shear stress). Αυτές είναι:

Τάση ( $\sigma$ ), δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας.

$$\sigma = F / A \text{ (Nm}^2\text{)}$$

F = Δύναμη (F)

A = επιφάνεια ( $\text{m}^2$ )

Καταπόνηση ( $\epsilon$ ) (strain), μεταβολή μήκους προς το αρχικό μήκος.

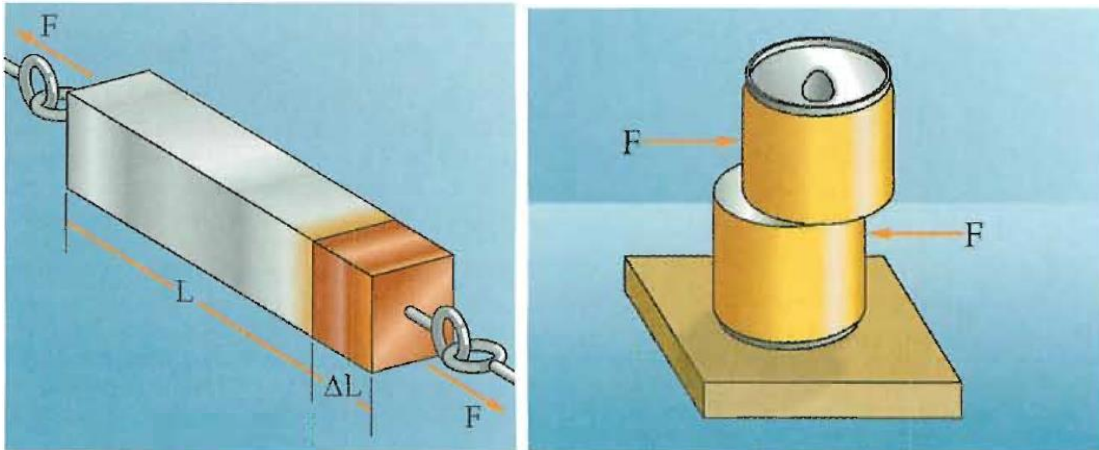
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$\epsilon$  = καταπόνηση (m/m - αδιάστατο)

μεταβολή μήκους (m)

αρχικό μήκος (m)

Διάτμηση (shear stress) ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονα του.



Σχήμα 6 Καταπόνηση ( $\epsilon$ ) (strain) και Διάτμηση (shear stress)

Όπως έχουμε δει, οι δορυφόροι υπόκεινται σε εξωτερικές διαταραχές από το διαστημικό περιβάλλον. Για παράδειγμα οι θερμικοί κύκλοι (σε τροχιά LEO φτάνουν τις 16 ανά ημέρα) είναι συχνοί και προκαλούν προβλήματα όπως στην περίπτωση του διαστημικού τηλεσκοπίου Hubble όπου η θερμική διαστολή και συστολή της δομής των ηλιακών συστοιχιών/πάνελ εξαιτίας των εκλείψεων σε κάθε τροχιά δημιούργησαν μικρές ταλαντώσεις σε όλη την δομή του δορυφόρου. Τα υλικά αντικείμενα έχουν την τάση να διαστέλλονται όταν θερμαίνονται και να συστέλλονται όταν ψύχονται. Το μέγεθος της διαστολής/συστολής εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής του αντικειμένου  $\alpha$ , το αρχικό του μήκος L και τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T$ :

$$\delta = \alpha (\Delta T) L$$

$\delta$  = μεταβολή μήκους m

$\alpha$  = συντελεστή θερμικής διαστολής  $K^{-1}$

$\Delta T$  = μεταβολή θερμοκρασίας

$L$  = αρχικό μήκος

### 7.1.2 Ταλαντώσεις

Η διαδικασία της εκτόξευσης είναι μία ιδιαίτερα δυναμική διεργασία η οποία υποβάλει το φορτίο-δορυφόρο σε σημαντικές καταπονήσεις. Τα δυναμικά φορτία τα οποία μεταβάλλονται με ευρύ και τυχαίο τρόπο και λέγονται ταλαντώσεις (vibrations). Μας ενδιαφέρουν δύο τύποι επιπτώσεων των ταλαντώσεων. Η πρώτη επίπτωση είναι το σωρευτικό φορτίο που δημιουργείται από την εφαρμογή τυχαίων ταλαντώσεων στο χρόνο. Τέτοιες καταπονήσεις μπορούν να δημιουργήσουν κόπωση (fatigue) αλλά η σύντομη διάρκεια πτήσης σημαίνει ότι το πρόβλημα δεν είναι τόσο μεγάλο. Η δεύτερη επίπτωση είναι πολύ περισσότερη σημαντική και αφορά την απόκριση/αντίδραση της δομής σε ταλαντώσεις που συμβαίνουν σε συγκεκριμένες συχνότητες. Όλα τα αντικείμενα δονούνται σε κάποια θεμελιώδη φυσική συχνότητα  $f$ , γνωστή ως συχνότητα συντονισμού:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Όπου

$f$  = συχνότητα συντονισμού Hz

$k$  = σταθερά ελατηρίου  $Nm^{-1}$

$m$  = αδράνεια αντικειμένου kg

Δυσκαμψία Ελατηρίου – Σταθερά  $k$

Όταν μια εφελκυστική/θλιπτική δύναμη  $F$  εφαρμόζεται σε ένα ελατήριο δυσκαμψίας  $k$ , αυτό εκτείνεται ή συμπιέζεται κατά  $x$ :

$$k = F/x$$

Όπου

$k$  = σταθερά ελατηρίου  $Nm^{-1}$

$F$  = δύναμη N

$x$  = μεταβολή μήκους m

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο ελατήριο ισούται με

$$E = \frac{1}{2} kx^2$$

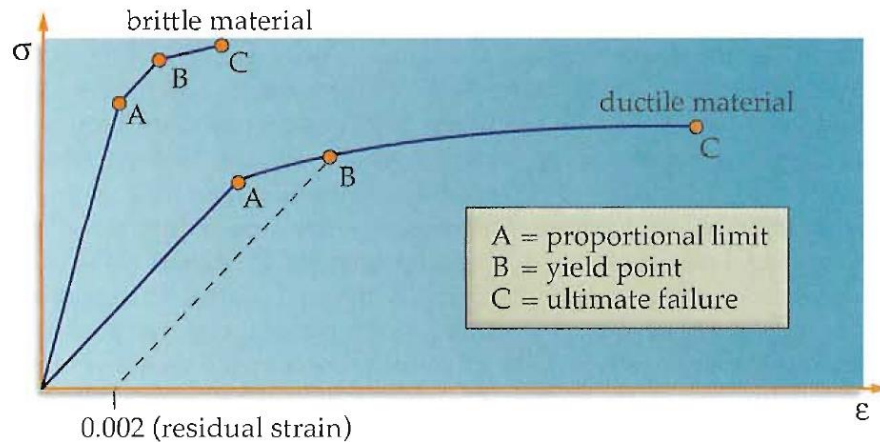
Μία δομή που έχει μεγάλη σταθερά ελατηρίου σημαίνει ότι είναι άκαμπτη και η σταθερά ελατηρίου είναι δείκτης ακαμψίας. Καθότι η συχνότητα συντονισμού είναι σημαντική και μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες. Υπάρχουν δύο τρόποι να αποφευχθεί ο συντονισμός. Ο πρώτος είναι να εξασφαλιστεί ότι η θεμελιώδης συχνότητα της δομής είναι διαφορετική από την συχνότητα της ασκούμενης ταλάντωσης. Ο δεύτερος τρόπος είναι η χρήση αποσβεστήρων στην δομή. Η απόσβεση (damping) είναι ένας παθητικός ή ενεργητικός μηχανισμός να αποσβεστεί η ενέργεια των ταλαντώσεων.

### 7.1.3 Ιδιότητες Υλικών

Η επίδραση της τάση (stress), καταπόνηση (strain), διάτμηση (shear stress), ροπής στρέψης και θερμικών φορτίων εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούμε στην δομή, δηλαδή τις ιδιότητες των υλικών. Χρησιμοποιούμε την ελαστικότητα για να μελετήσουμε τις ιδιότητες, όρια αντοχής και αντίδραση των υλικών, όπου:

Μέτρο ελαστικότητας = Τάση / Καταπόνηση

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (Nm}^{-2}\text{)}$$



Σχήμα 7: Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης για όλκιμα (ductile) και ψαθυρά (brittle) υλικά

Για να περιγράψουμε την αντοχή των υλικών χρησιμοποιούμε διαγράμματα τάσης (stress) και παραμόρφωσης (strain). Ολκιμότητα είναι ο δείκτης του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης που διατηρείται κατά την θραύση. Όλκιμα υλικά (ductile) υφίστανται πλαστική παραμόρφωση πριν από την θραύση. Ψαθυρά υλικά (brittle) ανέχονται μόνον πολύ μικρές πλαστικές παραμορφώσεις. Στην Καμπύλη Τάσης Παραμόρφωσης για όλκιμα (ductile) και ψαθυρά (brittle) υλικά (Σχήμα 7) υπάρχουν 3 κρίσιμα σημεία που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση υλικών:

- Σημείο A: όριο αναλογίας, Μέχρι αυτό το επίπεδο τάσης, η σχέση τάσης παραμόρφωσης διέπεται από τον νόμο του Hooke, οπότε και η γραφική παράσταση είναι γραμμική και η κλίση της αντιπροσωπεύει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού
- Σημείο B: αντοχή διαρροής, Αυτό είναι το πιο χαρακτηριστικό σημείο χαρακτηρισμού της αντοχής των μετάλλων. Μερικά μέταλλα, όπως το μαλακό ατσάλι έχουν δύο όρια διαρροής, το άνω και το κάτω.
- Σημείο C: Αντοχή στην θραύση

#### 7.1.4 Άλλες Βασικές Αρχές Μηχανικής

Για την δομική σταθερότητα της δομής ενός δορυφόρου λαμβάνουμε υπόψιν και τους παρακάτω παράγοντες:

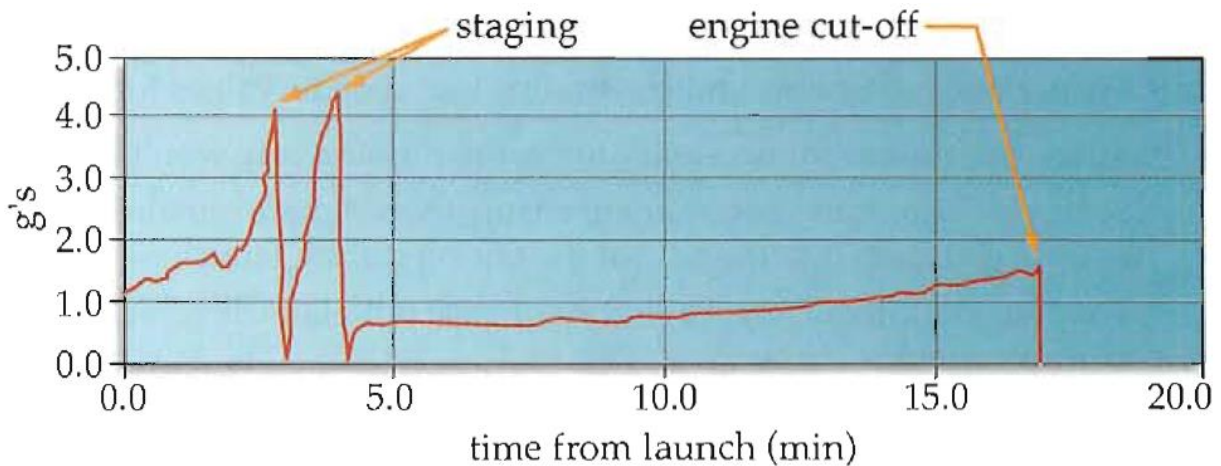
Παράγοντας ποιότητας: Ενίσχυση της ενέργειας ταλάντωσης κοντά στην συχνότητα συντονισμού μιας κατασκευής

Συντελεστής ασφάλειας: Περιθώριο σχεδίασης εφαρμόζεται στις κατασκευές ώστε να παραμένουν ασφαλείς υπό υπολογισμένα φορτία π.χ εάν το υπολογισμένο μέγιστο φορτίο μιας κατασκευής είναι F, η κατασκευή σχεδιάζεται με αντοχή σε φορτίο 1.5F για λόγους ασφαλείας

#### 7.2 Το Περιβάλλον Εκτόξευσης

Κατά την διάρκεια της εκτόξευσης, ο δορυφόρος υποβάλλεται σε ένα σύνολο από βίαια φορτία και δυνάμεις αποτελούμενο από επιταχύνσεις, μηχανικών κρούσεων (shock), θόρυβο και ταλαντώσεις. Η πρώτη προτεραιότητα είναι να μην υπάρξει κάποιο καταστροφικό πρόβλημα με τον δορυφόρο, ειδικά

από τις επιταχύνσεις 'g-load' που αναπτύσσουν θλιπτικές φορτίσεις στον διαμήκη άξονα (μακρύ άξονα) του εκτοξευτή. Στο σχήμα 8 αποτυπώνονται τα φορτία κατά την διάρκεια εκτόξευσης ενός πυραύλου. Φαίνεται ότι τα φορτία αυξάνονται στα 4g στα πρώτα λεπτά, μετά μειώνονται φτάνοντας στο μηδέν πριν αυξηθούν και πάλι. Χρησιμοποιώντας τα στάδια, με τους αντίστοιχους κινητήρες, δομή και δεξαμενές και έχοντας καταναλώσει τα καύσιμά τους, το κάθε στάδιο αποδεσμεύεται, η επιτάχυνση πέφτει στο μηδέν πριν ξεκινήσει η καύση του επόμενου σταδίου και αρχίζει πάλι να αυξάνεται η επιτάχυνση του πυραύλου. Στο σχήμα απεικονίζεται ένας πύραυλος τριών σταδίων. Στο τέλος του τρίτου σταδίου, η επιτάχυνση πέφτει στο μηδέν και μένει εκεί γιατί ο εκτοξευτής έχει φτάσει στην τροχιά του. Όσο αυξομειώνεται η επιτάχυνση η δομή του πυραύλου λειτουργεί όπως ένα ελατήριο όταν αυτό έχει αποδεσμευτεί από μία θέση συμπίεσης. Οι μηχανικοί δομών μελετούν αυτά τα μεταβατικά φορτία χαμηλής συχνότητας με τα φορτία που προκαλούν οι επιταχύνσεις για να βρουν τα ημιαστικά (quasi-static) φορτία.



Σχήμα 8: Φορτία Εκτόξευσης

### 7.3 Μηχανική Διάρθρωση Δορυφόρων

Η σχεδίαση μιας δομής για να επιβιώσει το περιβάλλον εκτόξευσης είναι μια σχετικά βατή διαδικασία. Αλλά η σχεδίαση ενός δορυφόρου με συγκεκριμένη διάρθρωση και προδιαγραφές για τα επιστημονικά όργανα και υποσυστήματα τα οποία πρέπει να φέρει και ταυτόχρονα να προστατεύει από το διαστημικό περιβάλλον, είναι περισσότερο περίπλοκη. Οι προϋπολογισμοί μάζας περιλαμβάνουν την μάζα και τον όγκο και καθορίζονται από την διαστημική αποστολή και την ανυψωτική ικανότητα του εκτοξευτή, όπως και από την διάμετρο του αεροδυναμικού κελύφους (fairing) του πυραύλου. Μία άλλη κρίσιμη προδιαγραφή είναι το κέντρο μάζας και οι ροπές αδράνειας που είναι σημαντικά στοιχεία για το υποσύστημα προσανατολισμού. Άλλες σημαντικές προδιαγραφές είναι ο σχεδιασμός των διεπαφών (interfaces) δορυφόρου των οπτικών πεδίων των οργάνων και αισθητήρων, των θερμικών ιδιοτήτων και της διαδικασίας συναρμολόγησης, ολοκλήρωσης και δοκιμών (assembly, integration and testing – AIT). Η σχεδιαστική διαδικασία του ΥΔΜ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Λειτουργικές απαιτήσεις
- Κατασκευαστικές απαιτήσεις
- Δομές δειγμάτων
- Σχεδιασμός
- Ανάλυση
- Επαλήθευση



Οι λειτουργικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν:

- Υποστήριξη οργάνων ζεύξης και ωφέλιμου φορτίου
- Διεπαφή για την εκτόξευση του οχήματος
- Ευθυγράμμιση μονάδων
- Θερμικός έλεγχος
- Περιβαλλοντική θωράκιση

Η κατασκευή περιλαμβάνει όλα τα μηχανικά στοιχεία. Περιέχει τις μονάδες ζεύξης και το ωφέλιμο φορτίο. Έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε όλα τα αναμενόμενα φορτία κατά τη διάρκεια της αποστολής. Η κατασκευή συνδέεται με το όχημα εκτόξευσης. Διαθέτει σύστημα σύνδεσης και διαχωρισμού και συμμορφώνεται με τους περιορισμούς του πυραύλου (μηχανικό περίβλημα). Η δομή παρέχει ευθυγράμμιση όλων των μονάδων, για σκοπούς αδράνειας, αξονικής περιστροφής, καθώς και προσανατολισμού κάμερας και κεραιάς. Ο θερμικός έλεγχος των μονάδων του διαστημικού σκάφους παρέχεται με παθητικά και ενεργά μέσα. Η δομή προστατεύει τις μονάδες από περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως χειρισμός και μικρο-μετεωρίτες.

Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν:

- Δομικά φορτία
- Συχνότητες συντονισμού
- Λόγος αδράνειας και άξονες
- Χειρισμός
- Ενσωμάτωση
- Προσβασιμότητα υποσυστήματος

Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα δομικά φορτία κατά τη διάρκεια της αποστολής, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών εδάφους, αποστολής, δοκιμής, εκτόξευσης και τροχιάς. Υπάρχουν περιορισμοί για τον εκτοξευτή σχετικά με τις ελάχιστες συχνότητες συντονισμού, για να αποφευχθεί η σύζευξη κραδασμών μεταξύ του εκτοξευτή και του διαστημικού σκάφους. Ο λόγος αδράνειας και οι άξονες περιστροφής είναι σημαντικοί για το μέγεθος του συστήματος ελέγχου προσανατολισμού. Τα υποσυστήματα πρέπει να είναι προσβάσιμα για δοκιμή, αφαίρεση ή τροποποίηση όταν το διαστημικό σκάφος βρίσκεται στο εδάφος. Η δομή πρέπει να έχει ορισμένα σημεία στερέωσης για το χειρισμό του εδάφους, για παράδειγμα σημεία προσάρτησης γερανού. Η ενσωμάτωση του δορυφόρου στον εκτοξευτή πρέπει να ληφθεί υπόψη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση σε όλους τα συνδετικά σημεία και τα σημεία του εξοπλισμού να μην εμποδίζουν κάποια άλλη μονάδα.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός δορυφόρου είναι μία επαναληπτική διαδικασία και απαιτεί συνδυασμό λειτουργικών απαιτήσεων και περιβαλλοντικών περιορισμών. Ο σχεδιασμός είναι μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία έχει ως είσοδο τις απαιτήσεις της αποστολής και τους περιορισμούς εκτοξευτή. Η κύρια δομή σχεδιάζεται, αναλύεται και βελτιστοποιείται ώστε να πληροί όλες τις προδιαγραφές. Η ανάλυση ενός σχεδίου δορυφόρου γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Ανάλυση με τη βοήθεια υπολογιστή
- Μηχανικά μοντέλα δοκιμών (mechanical/test models)
- Ανάλυση συζευγμένου φορτίου
- Ο σχεδιασμός αναλύεται χρησιμοποιώντας μοντέλα σε υπολογιστή.
- Αυτά τα μοντέλα έχουν μαθηματική περιγραφή της δομής και των τμημάτων του διαστημικού σκάφους.

Το μοντέλο υπόκειται σε καταπονήσεις και η απόκριση του συστήματος υπολογίζεται για τον προσδιορισμό της κατανομής της καταπόνησης στον δορυφόρο σε διάφορες συχνότητες. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, προστίθεται ένα μαθηματικό μοντέλο του οχήματος εκτόξευσης και αναλύεται η συνδυασμένη απόδοση. Αυτή η ανάλυση καθορίζει τα δομικά φορτία στη διεπαφή και προβλέπει τα επίπεδα δόνησης που θα δεχτεί το διαστημικό σκάφος κατά την εκτόξευση. Τα επίπεδα δόνησης στις δοκιμές καθορίζονται από αυτά τα αποτελέσματα.

Η δομή του διαστημικού σκάφους είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ πολλών αντικρουόμενων απαιτήσεων. Απαιτείται πλήρης κατανόηση ολόκληρης της αποστολής για να εξασφαλιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα σχεδιασμού. Η δομή του διαστημικού σκάφους είναι ένα σύστημα που διασυνδέεται με όλες τις άλλες ενότητες με πολλούς τρόπους, έτσι ώστε όλες οι ενότητες και τυχόν τροποποιήσεις σε αυτές τις ενότητες να λαμβάνονται συνεχώς υπόψη.

Ένα σχέδιο δορυφόρου είναι απαραίτητο να επαληθευθεί ώστε να διασφαλισθεί η μηχανική ακεραιότητα της δομής αλλά και η συνολική επιτυχία της αποστολής. Αυτό γίνεται με:

- Μηχανική επιβεβαίωση της ανάλυσης σε υπολογιστή με δοκιμή του μηχανικού μοντέλου
- Επανάληψη ανάλυσης συζευγμένου φορτίου σε υπολογιστή μετά την ενημέρωση του μοντέλου με τα δεδομένα δοκιμής
- Δοκιμές στο μοντέλο πτήσης

Ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο του δορυφόρου κατασκευάζεται και δοκιμάζεται σε επίπεδα που είναι 1.5 έως 2 φορές υψηλότερα από τα αναμενόμενα φορτία πτήσης. Αυτό γίνεται για την επαλήθευση των περιθωρίων σχεδιασμού. Η απόκριση αυτής της μηχανικής δομής μετράτε και αναλύεται. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του μοντέλου δομής στον υπολογιστή. Η ανάλυση συζευγμένου φορτίου επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας το ενημερωμένο μοντέλο. Το μοντέλο πτήσης του διαστημικού σκάφους δοκιμάζεται σε επίπεδα ίσα με την αναμενόμενη δόνηση της πτήσης. Δεν πρόκειται για έλεγχο του σχεδιασμού, αλλά για επαλήθευση της κατασκευής.

#### 7.4 Συμπεριφορά υλικών στο Διάστημα

Το διαστημικό περιβάλλον (κενό, ατομικό οξυγόνο, θερμοκρασίες, κοσμικές ακτίνες) δημιουργούν ένα ιδιαίτερο περιβάλλον για τους δορυφόρους άρα και τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε για τα κατασκευάσουμε. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα υλικά είναι:

- Μαγνητισμός
- Εξαέρωση
- Αγωγιμότητα
- Αναλογία δύναμης / βάρους
- Διάβρωση
- Συμβατότητα

Όλα τα υλικά του διαστημικού σκάφους πρέπει να ελέγχονται για να διασφαλίζεται η συμβατότητα με την αποστολή. Τα μαγνητικά υλικά μπορούν να επηρεάσουν τα πειράματα στο διαστημικό σκάφος και τον έλεγχο προσανατολισμού όταν γίνεται με μαγνητικά μέσα. Στο κενό του διαστήματος τα πτητικά συστατικά των υλικών μπορούν να εξατμιστούν και να συμπυκνωθούν σε άλλες επιφάνειες. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει την απώλεια ιδιοτήτων του υλικού και την υποβάθμιση των οπτικών ιδιοτήτων, για παράδειγμα ηλιακών κυψελών, φακών κάμερας και θερμικών επιφανειών ελέγχου. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν είναι:

- Πρέπει να προσδιοριστεί η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των υλικών.
- Ο λόγος αντοχής προς βάρος των υλικών πρέπει να βελτιστοποιηθεί.
- Πρέπει να προσδιοριστεί η σταθερότητα των υλικών έναντι της διάβρωσης και να ληφθούν μέτρα για να αποφευχθεί αυτό.
- Τα υλικά που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους πρέπει να είναι συμβατά - θερμική διαστολή, γαλβανική διάβρωση και χρήση συγκολλητικών.
- Τοξικότητα
- Διαθεσιμότητα
- Μηχανική ικανότητα

Τα υλικά και τα σχέδια πρέπει να ελέγχονται για την αποφυγή προβλημάτων κατά το στάδιο της κατασκευής. Το βηρύλλιο, για παράδειγμα, είναι τοξικό, ορισμένα επικαλύμματα είναι καρκινογόνα - Πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις από τους χειριστές-μηχανικούς. Ορισμένα υλικά και εξαρτήματα έχουν μεγάλο χρόνο παράδοσης, δεκαοκτώ μήνες για κάποιο βύσμα τύπου D δεν είναι υπερβολικό. Πρέπει να είναι δυνατή η κατασκευή των αντικειμένων. Είναι πολύ εύκολο να προσδιοριστούν αδύνατες ανοχές και λειτουργίες. Όταν συναρμολογείτε ένας δορυφόρος η ετοιμάζεται για δοκιμές πρέπει να λάβουμε υπόψη:

- Βαρύτητα
- Καθαρισμός
- Δονήσεις και καταπονήσεις
- Μετακίνηση
- Πρόσβαση
- Σύνδεση και αποσύνδεση
- Σκόνη, υγρασία, θερμοκρασία

Το διαστημικό σκάφος υπόκειται σε ένα ευρύ φάσμα επιρροών. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού και χειρισμού πρέπει να λάβουν όλα αυτά υπόψη, για να διασφαλιστεί ότι το προϊόν θα είναι σωστό. Η βαρύτητα της Γης αλλάζει τις καταπονήσεις στη δομή σε σύγκριση με το διάστημα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι δομές τόσο πιο σημαντικές γίνονται. Τα εξαρτήματα και οι συνδεσμολογίες θα πρέπει να έχουν καθαριστεί. Αυτό μπορεί να γίνει υπερηχητικά, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε καταπονήσεις. Ο γενικός χειρισμός των εξαρτημάτων και των συνδεσμολογιών θα προκαλέσει δονήσεις και καταπονήσεις. Η μετακίνηση θα προκαλέσει δονήσεις, ειδικά όταν εμπλέκονται μεγάλα μέρη ή μεγάλες αποστάσεις ή όταν ο δορυφόρος απαιτεί κλίση Η πρόσβαση πρέπει να είναι δυνατή σε μέρη του δορυφόρου, μερικές φορές αυτό σημαίνει ανύψωση, κλίση ή αφαίρεση εξαρτημάτων. Η σύνδεση και η αποσύνδεση των μονάδων μπορεί να προκαλέσει σοκ και φθορά. Η ατμόσφαιρα στις περιοχές ολοκλήρωσης/ενσωμάτωσης πρέπει να ελέγχεται ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση της σκόνης και των ακραίων θερμοκρασιών και υγρασίας.

Οι δοκιμές εδάφους που απαιτούνται για την πιστοποίηση ενός δορυφόρου είναι:

- Γενική μη μηχανική δοκιμή
- Δόνηση
- Σοκ/Κρούση
- Ανάπτυξη μονάδας
- Ιδιότητες μάζας

Οποιαδήποτε δοκιμή ή λειτουργία με τον δορυφόρο μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση, σοκ και φθορά, π.χ. ηλεκτρική θέρμανση. Στον προσδιορισμό και την εκτέλεση των δοκιμών πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ επαρκούς χαρακτηρισμού των συστημάτων και αποφυγής υπερβολικής πίεσης στα

μέρη της πτήσης. Οι μονάδες και το ολοκληρωμένο διαστημικό σκάφος πρέπει να υποβληθούν σε δοκιμές δόνησης για να ελεγχθεί η κατασκευή και τα ελαττωματικά υλικά. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τυχαίες, ακουστικές και ημιτονοειδείς δονήσεις. Το διαστημικό σκάφος θα υποβληθεί σε δοκιμές σοκ. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα μηχάνημα προσομοίωσης κραδασμών, ή ενεργοποιώντας πραγματικές πυροτεχνικές συσκευές για την προσομοίωση των σοκ κατά την πτήση. Τα πάνελ και οι κεραίες που αναπτύσσονται στο διάστημα πρέπει να δοκιμαστούν στο έδαφος και η βαρύτητα δημιουργεί μεγάλες καταπονήσεις στην κατασκευή. Μετρώνται: οι ιδιότητες της μάζας ως ολική μάζα, ροπές αδράνειας, κύριοι και δευτερεύοντες άξονες και κέντρο βάρους. Αυτές οι δοκιμές προκαλούν κίνηση και δόνηση στη δομή και απαιτούν πολλές εργασίες χειρισμού.

### 7.5 Συμπεράσματα

Κάθε φάση ενός διαστημικού σκάφους έχει το δικό της συγκεκριμένο περιβάλλον. Η επιρροή όλων των περιβαλλοντικών παραγόντων σχετικές με την δομή του, όπως και αυτές που προκύπτουν από την εκτόξευση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο σχεδιασμού και ανάπτυξης για να διασφαλιστεί ότι ο δορυφόρος μπορεί να εκπληρώσει την αποστολή του. Επειδή συχνά οι απαιτήσεις για τις διάφορες φάσεις της αποστολής είναι αντιφατικές, είναι επιτακτική ανάγκη να κατανοηθούν πλήρως όλες οι φάσεις πριν ξεκινήσει η λεπτομερής διαδικασία σχεδιασμού της δομής του δορυφόρου. Μόνο τότε θα είναι δυνατή η επίτευξη των σωστών συμβιβασμών που απαιτούνται για την επιτυχή σχεδίαση του δορυφόρου.

**Παραδείγματα:**

1. Μια ομάδα πανεπιστημίου σχεδιάζει ρίκο-δορυφόρο 1 kg που πρέπει να αποδεσμευτεί με ταχύτητα 0.3m/s σε σχέση με το όχημα εκτόξευσης στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Αυτή η ταχύτητα διαχωρισμού επιτυγχάνεται με ένα ελατήριο, το οποίο μπορεί να συμπιεστεί κατά 2.5 cm.
  - (i) Υποθέτοντας ότι όλη η ενέργεια στο συμπιεσμένο ελατήριο μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του δορυφόρου, υπολογίστε την «ακαμψία» του ελατηρίου (δηλαδή τη σταθερά ελατηρίου, k) που απαιτείται.
  - (ii) Εάν το ελατήριο δεν ευθυγραμμίζεται πλήτως έτσι ώστε η γραμμή δύναμης του να δρα μέσω ενός σημείου 1 mm που εκτοπίζεται από το κέντρο μάζας του διαστημικού σκάφους, υπολογίστε τη μέση δύναμη και την προκύπτουσα μέση ροπή που δρα στον δορυφόρο.
  - (iii) Δεδομένου ότι ο δορυφόρος έχει ροπή αδράνειας  $6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$  για τον κατάλληλο άξονα, υπολογίστε τον ρυθμό ανατροπής του δορυφόρου κατά το διαχωρισμό (σε περιστροφές ανά λεπτό) και σχολιάστε την ανάγκη για ακριβή ευθυγράμμιση του ελατηρίου.

**Λύση**

(i) Η ΚΕ του διαχωρισμένου δορυφόρου =  $0.5 \text{ m/s}^2 = 0.5 \times 1 \times 0.32 = 0.045 \text{ J}$  Ενέργεια αποθηκευμένη στο ελατήριο =  $0,5 k x^2$

Έτσι, εξισώνοντας:  $k = 0.09/0.0252 = 144 \text{ Nm}^{-1}$

(ii) Δύναμη = Ενέργεια / απόσταση μετακίνησης =  $0.045 / 0.025 = 1.8 \text{ N}$  (όχι 3.6 N) (Ένα άλλο επιχείρημα είναι ότι  $F = 3.6 \text{ N}$  στην αρχή της ώθησης και μηδέν στο τέλος, οπότε η μέση ώθηση είναι 1.8N).

Ροπή = F επί μετατόπιση από κέντρο μάζας =  $1.8 \times 1 \times 10^{-3} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ Nm}$

(iii)  $T = I d\omega/dt \Rightarrow d\omega/dt = T/I = 1.8 \times 10^{-3} / 6 \times 10^{-4} = 3 \text{ rad s}^{-2}$

Αυτή η γωνιακή επιτάχυνση διαρκεί για  $2s/v = 2 \times 0.025 / 0.3 = 0.167 \text{ s}$  αλλά το  $\Delta\omega = d\omega / dt \times \Delta t, \Rightarrow \omega = 3 \times 0.167 = 0.5 \text{ rad s}^{-1}$

=  $0.5 \times (180 / \pi) \times 60/360 = 4.77 \text{ rpm}$

Ένα μικρό σφάλμα ευθυγράμμισης μπορεί να δώσει μεγάλο ρυθμό εκτροπής!

2. Ένας νανοδορυφόρος διαθέτει έξι σταθερά, ανεπτυγμένα ηλιακά πάνελ, το καθένα με μάζα 20 g.
- (i) Υποθέτοντας ότι τα πάνελ έχουν σταθερά ακαμψίας,  $k = 1000 \text{ Nm}^{-1}$ , υπολογίστε τη συχνότητα συντονισμού τους και σχολιάστε, αιτιολογώντας, σχετικά με το εάν είναι πιθανό να υποστούν ζημιά από τις δονήσεις εκτόξευσης.
- (ii) Τα πάνελ είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο και έχουν μήκος 8.5 cm. Δεδομένου ότι, όταν βρίσκεται σε τροχιά, η θερμοκρασία των πάνελ κυμαίνεται από  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ , υπολογίστε την μεταβολή μήκους λόγω θερμικής διαστολής.  
Δεδομένα: Συντελεστής θερμικής διαστολής αλουμινίου,  $\alpha = 2.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- (iii) Δεδομένου ότι το πάνελ αλουμινίου έχει πολύ υψηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από ότι τα ηλιακά στοιχεία που είναι τοποθετημένα σε αυτό, εξηγήστε πως μπορούμε να απαλλαγούμε από την καταπόνηση που σχετίζεται με αυτήν την αλλαγή.

### Λύση

(i) Φυσική συχνότητα  $= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1000/20 \times 10^{-3}} = 35.6 \text{ Hz}$ .

Υπάρχει σημαντική ενέργεια που σχετίζεται με τις συχνότητες δόνησης εκτόξευσης στα λίγα δέκατα του εύρους Hz, επομένως υπάρχει πιθανό πρόβλημα.

(ii) Για το αλουμίνιο:  $\delta = \alpha (\Delta T) L_{\alphaρχ} = 23 \times 10^{-6} (90) \times 8.5 \times 10^{-2} = 1.76 \times 10^{-4} \text{ m}$

(iii) Η κόλλα που συγκρατεί το κελιά στο πάνελ δημιουργεί κάποιο περιθώριο. Αυτό λύνει το πρόβλημα των καταπονήσεων.

## Προβλήματα

- 7.1** Μια κυλινδρική δοκός από ομοιογενές αλουμίνιο που βρίσκεται σε τροχιά στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS) και θερμαίνεται/ψύχεται κατά την διάρκεια εκλείψεων. Η θερμική διακύμανση της δοκού είναι  $\Delta T = \pm 30^\circ$ . Η δοκός είναι στηριγμένη σταθερά και στις δύο πλαϊνές πλευρές. Αν το μήκος της δοκού είναι  $L = 1$  m και η διάμετρος του είναι  $D = 10$  cm, να βρείτε την καταπόνηση ( $\epsilon$ ), τάση ( $\sigma$ ), την δύναμη θλίψης ( $F_c$ ), εφελκισμού ( $F_t$ ) και να προσδιορίσετε το είδος της παραμόρφωσης της δοκού. Για την δοκό από αλουμίνιο σας δίδονται:  $E = 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, συντελεστής θερμικής διαστολής  $\alpha = 23.2 \cdot 10^{-6}$ ; Όριο αντοχής διαρροής τάσης;  $\sigma_y = 450 \cdot 10^6$  N/m<sup>2</sup>; οριακής αντοχής θραύσης  $\sigma_{tu} = 520 \cdot 10^6$  N/m<sup>2</sup>;  $I = \pi r^4/4$ . Τι θα συμβεί αν διαλέγαμε μία δοκό με διάμετρο 1 cm αντί για 10 cm;
- 7.2** Ένας δορυφόρος με μάζα  $m = 100$  kg είναι συνδεδεμένος με έναν εκτοξευτή με έναν προσαρμογέα (adaptor) με ελατήριο με συντελεστή  $k = 10^4$  N/m. Την στιγμή που σταματά η καύση του κινητήρα, ασκείται στον δορυφόρο μία μηχανική κρούση (shock). Ποια είναι η θεμελιώδη συχνότητα  $f_n$  του δορυφόρου/προσαρμογέα αν η μάζα του πυραύλου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του δορυφόρου και όταν δεν έχει απόσβεση; Ένα υπάρχει απόσβεση και η σταθερά του χρόνου απόσβεσης είναι  $c = 5200$  Ns/m, ποιος είναι ο λόγος απόσβεσης  $\zeta$ ;
- 7.3** Ένας μικροδορυφόρος 15 kg είναι συνδεδεμένος με ένα προσαρμογέα εκτοξευτή με 4 μπουλόνια σιδήρου ( $F_{cy} = 240$  Mpa) τα οποία συγκρατούν τον δορυφόρο στον εκτοξευτή κατά την διάρκεια της εκτόξευσης και θα κοπούν με πυροτεχνικούς μηχανισμούς όταν πρέπει να απελευθερωθεί ο δορυφόρος στην τροχιά του. Ο εκτοξευτής μεταδίδει μέγιστη επιτάχυνση 20g στον εγκάρσιο άξονα κατά την άνοδο. Την στιγμή της μέγιστης επιτάχυνσης δύο από τα τέσσερα μπουλόνια φτάνουν στο όριο εφελκισμού. Οι μηχανικοί σχεδιασμού προτείνουν να χρησιμοποιηθούν μπουλόνια με διάμετρο 10-mm. Να επιβεβαιώσετε αν τα μπουλόνια θα αντέξουν τα φορτία αν πρέπει να έχουν συντελεστή ασφάλειας 10.