



ARISTOTLE UNIVERSITY
OF THESSALONIKI

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ελαστοπλαστική συμπεριφορά

3η Εργασία - Ειδικά Κεφάλαια Πεπερασμένων Στοιχείων

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΜΙΧΑΗΛ

LMEMD Laboratory of
Machine Elements &
Machine Design
Aristotle University of Thessaloniki

Υπεύθυνος: Γάκιος Χρήστος
Email: vasilepi@meng.auth.gr
AEM: 6920

11 Ιουνίου 2025

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Παρουσίαση προβλήματος	1
2	Μοντελοποίηση	2
2.1	Μονοτονική συμπεριφορά	2
2.2	Κυκλική συμπεριφορά	4
2.3	Θραύση	5
3	Αποτελέσματα Και Συζήτηση	7
3.1	Αποτελέσματα	7
3.2	Συμπεράσματα	9

1 Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Στη παρόν εργασία μελετάται η ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού τόσο σε κυκλική φόρτιση όσο και σε καθαρό εφελκυσμό. Σκοπός είναι, η αναπαγωγή των πειραματικών δεδομένων του υλικού και πιο συγκεκριμένα της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης μονοτονικής συμπεριφοράς αλλά και των βρόγχων υστέρησης, δηλαδή της σταθεροποιημένης καμπύλης υλικού κυκλική συμπεριφοράς. Η όλη μελέτη γίνεται σε κύβο $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ διαστάσεων που φορτίζεται εφελκυστικά.

Η επιλογή του υλικού ήταν ανοιξείδωτος χάλυβας 316L σύμφωνα με την [1]. Στη συγκεκριμένη μελέτη δίνονται οι σταθερές κυκλικής συμπεριφοράς για διάφορα δοκίμια του υλικού. Παρακάτω φαίνονται οι σταθερές του υλικού που ακολουθούν το μοντέλο:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν ήταν προφανώς μόνο για δοκίμια πάχους 10 χιλιοστών ενώ για τη μοντελοποίηση έπειτα χρησιμοποιήθηκαν οι average τιμές.

Spec. #	t [mm]	l. rate	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	$\sigma_{1.0}$ [MPa]	σ_u [MPa]	elong %	E_0 [GPa]	n
LT1R	10	3	252.8	296.3	585.7	50	185.5	7.9
LT2R	10	0.3	244.7	288.6	586.5	47	187.8	7.9
LT3R	10	30	265.1	307.4	584.8	52	195.4	5.8
LT4R	10	3	262.6	303.6	588.1	48	194.6	7.5
LT5R	10	0.3	248.1	291.1	590.3	49	189.4	9.8
LT6R	10	30	295.6	319.7	588.9	48	200.1	6.7
LT7R	10	3	260.6	295.3	579.5	52	196.9	8.8
Average	10	-	272.5	311.3	583.9	47.9	192.8	7.1

Πίνακας 1: Πειραματικά αποτελέσματα 316L υπό εφελκυστική φόρτιση.

Ζητούνται πιο συγκεκριμένα:

- Θα δημιουργήσετε έναν κύβο διαστάσεων $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ και θα τον διακριτοποιήσετε με τουλάχιστον 3 στοιχεία σε κάθε διαστασή του.
- Θα εφαρμόσετε κατάλληλες οριακές συνθήκες ώστε να φορτίζεται σε καθαρό εφελκυσμό.
- Υπό εφελκυστική φόρτιση, θα εξεταστεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά, ακολουθώντας τις εξής παραδοχές:
 - Τέλεια πλαστική συμπεριφορά
 - Γραμμική κράτυνση
 - Εκθετική κράτυνση (δημιουργώντας καμπύλη με πολλά σημεία)

Θα πρέπει να αναπαράγετε με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια για κάθε παραδοχή, τα δεδομένα του υλικού που έχετε επιλέξει. Επίσης, θα πρέπει να εξετάσετε τις παραμέτρους προεκβολής που δίνει ως επιλογή ο επιλυτής.

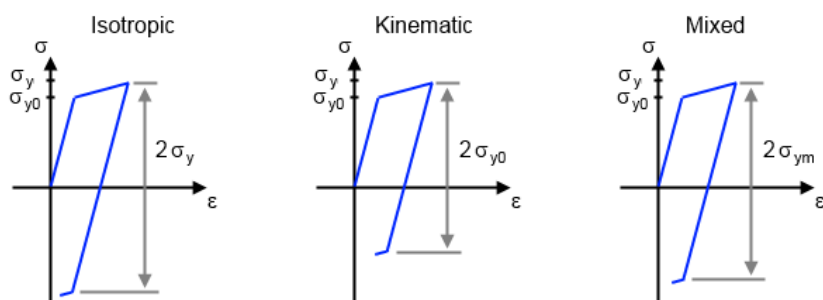
- Υπό εναλλασσόμενη φόρτιση θα εξετάσετε την σταθεροποιημένη κυκλική συμπεριφορά του υλικού, ακολουθώντας τις εξής παραδοχές:

- Ισοτροπική κράτυνση, σε συνδυασμό με τις παραδοχές ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του ερωτήματος 3.
- Κινηματική κράτυνση, σε συνδυασμό με τις παραδοχές ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του ερωτήματος 3.
- Η κυκλική συμπεριφορά θα πρέπει να εξεταστεί στην περίπτωση ελέγχου δύναμης και ελέγχου μετατόπισης.

Θα πρέπει να αναπαράγετε με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια για κάθε παραδοχή, τα δεδομένα του υλικού σε κυκλική φόρτιση που έχετε επιλέξει.

- Να εξετάσετε παραμέτρους του επιλυτή που αφορούν την αστοχία του υλικού σε κάποια μέγιστη τιμή τάσης ή/και παραμόρφωσης.
- Θα πρέπει να είστε σε θέση να ποσοτικοποιήσετε τις αποκλίσεις που θα παρατηρήσετε καθώς και να τις εξηγήσετε κατάλληλα.
- Οποιοδήποτε φαινόμενο παρατηρήσετε στα αποτελέσματά σας, θα πρέπει να το χαρακτηρίσετε και να το εξηγήσετε με τις κατάλληλες βιβλιογραφικές αναφορές.
- Είστε ελεύθεροι να χρησιμοποιήσετε οποιαδήποτε άλλη παράμετρο προσφέρει ο επιλυτής.

Σχετικά με τα διαφορετικά πλαστικά μοντέλα, αυτό που αναμένεται από την επίλυση, είναι κανένα από αυτά να μην προσεγγίσει τέλεια τη κυκλική συμπεριφορά του υλικού. Όσο αναφορά τη μονοτονική καμπύλη, η γραμμική κράτυνση παραμορφώνει πλαστικά το υλικό ακολουθώντας γραμμική καμπύλη, η τέλεια πλαστική διατηρεί την ίδια τάση με αυξανόμενη παραμόρφωση, ενώ η εκθετική κράτυνση ακολουθεί τη καμπύλη Ramberg-Osgood. Όπως παρατηρείται και από το Σχ. 1, τα διαφορετικά ήδη πλαστικότητας εμφανίζουν αρκετά διαφορετική δυναμική συμπεριφορά. Το μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα όπως φαίνεται τη τυπική συμπεριφορά των βρόγχων υστέρησης είναι η μίξη της κινηματικής και της ισοτροπικής κράτυνσης.

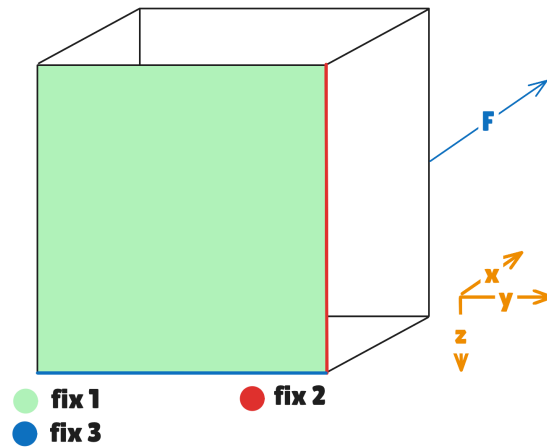


Σχήμα 1: Μοντέλα πλαστικότητας υπό κυκλική εναλλασσόμενη φόρτιση.

2 Μοντελοποίηση

2.1 Μονοτονική συμπεριφορά

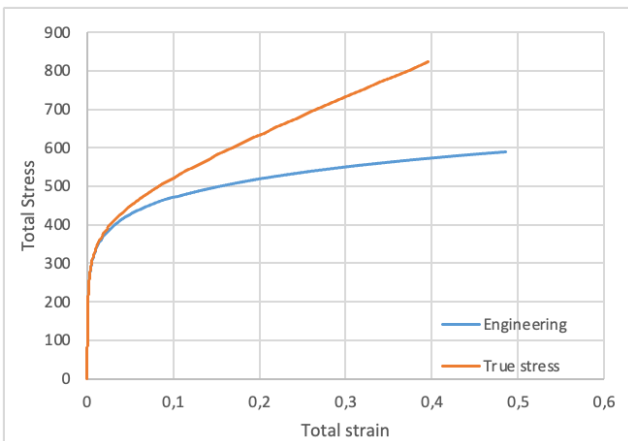
Όσο αναφορά τη μονοτονική συμπεριφορά, δημιουργείται κύβος με 5 στοιχεία σε κάθε ακμή. Για τις οριακές συνθήκες, ώστε να επιτευχθεί καθαρός εφελκυσμός, η μια πλευρά του κύβου περιορίζεται στον άξονα εφαρμογής της δύναμης, στο ίδιο επίπεδο που βρίσκεται αυτή η επιφάνεια περιορίζονται δύο ακμές του κύβου στους άλλους δύο άξονες (με τις ακμές να είναι κάθετες στον άξονα στον οποίο περιορίζονται). Γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό και από το Σχ. 2. Οι ίδιες οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν προφανώς και για τη θράυση αλλά και για τη κυκλική φόρτιση.



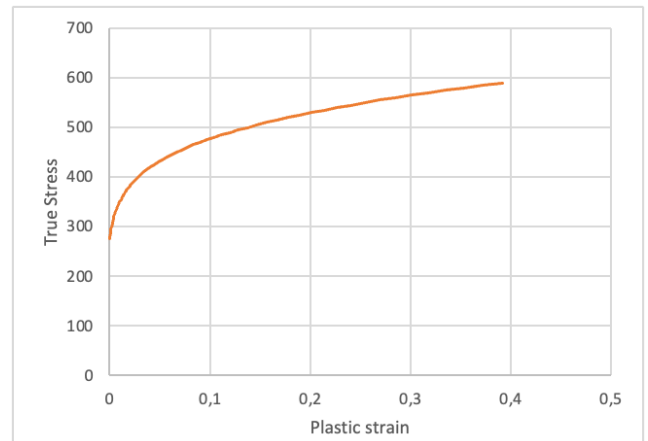
Σχήμα 2: Οριακές συνθήκες για επίτευξη καθαρού εφελκυσμού κύβου.

Επίσης, για μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την επίλυση, χρησιμοποιήθηκε μετατόπιση και όχι φορτίο ώστε να επιτευχθεί η παραμόρφωση του κύβου. Η μετατόπιση που πρέπει να δοθεί στην επιφάνεια του κύβου είναι προφανώς $u = \epsilon_{max} \cdot 10$, ώστε να φτάσει το υλικό αυτή τη παραμόρφωση που εμφανίζεται και στην Ramberg-Osgood. Η μέγιστη παραμόρφωση υπολογίζεται από την Ramberg-Osgood αναλυτικά έως την τάση σ_u του υλικού, δηλαδή $\epsilon_{max} = \epsilon_u$.

Για τον ορισμό της πλαστικότητας του υλικού ορίζονται πίνακες πλαστικότητας σύμφωνα με τις προδιαγραφές του επιλυτή. Παρακάτω φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα καθώς και μόνο η πλαστική παραμόρφωση του υλικού, δηλαδή οι τιμές εισαγωγής στον επιλυτή.



(α) Αναλυτική καμπύλη Ramberg-Osgood 316L.

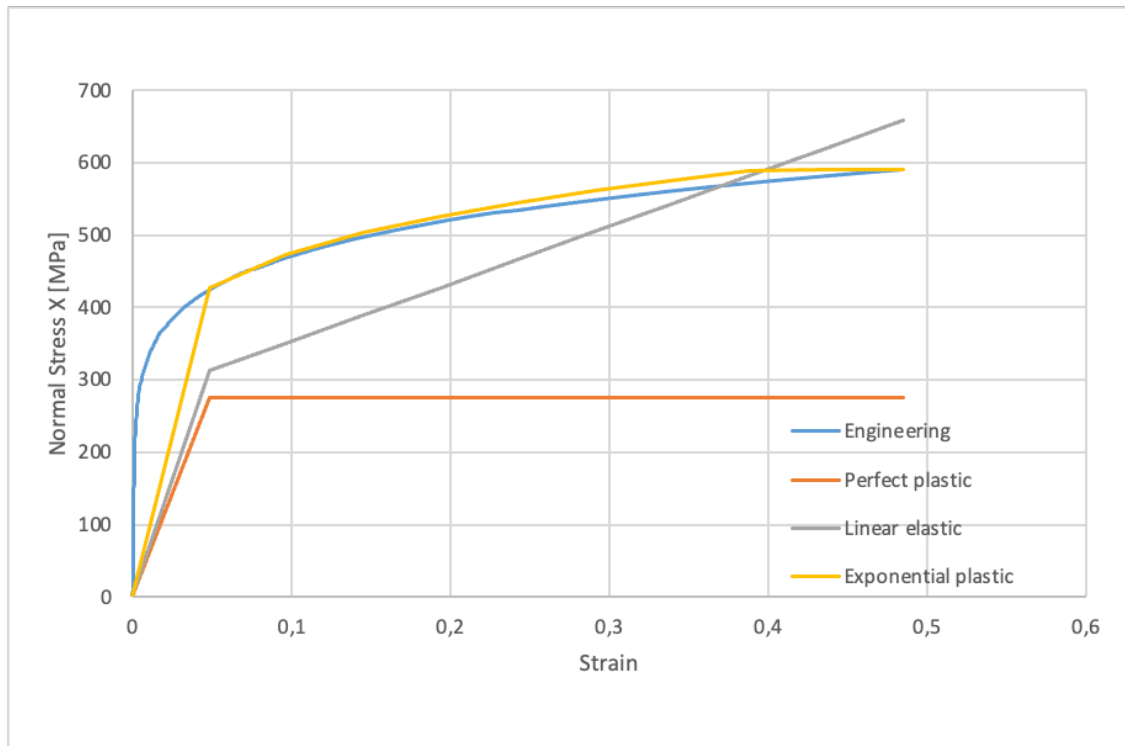


(β) Πλαστική παραμόρφωση 316L.

Σχήμα 3: Αναλυτικές καμπύλες μονοτονικής συμπεριφοράς ανοιξείδωτου χάλυβα 316L.

Για τις επιλύσεις τέλει πλαστικότητας και γραμμικής πλαστικότητας δίνονται μόνο το πρώτο σημείο της καμπύλης πλαστικής παραμόρφωσης και το πρώτο και τελευταίο σημείο της καμπύλης αντίστοιχα.

Όσο αναφορά την κατάστροψη της επίλυσης, είναι πολύ σημαντική η επιλογή του βήματος επίλυσης. Στην αρχή η επίλυση έγινε με $TIME_INC = 0.1$ και αποδείχθηκε, ότι δεν προσαρμόζεται σωστά η αριθμητική καμπύλη στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Έτσι, το μοντέλο επιλύεται δεύτερη φορά με μικρότερο βήμα.

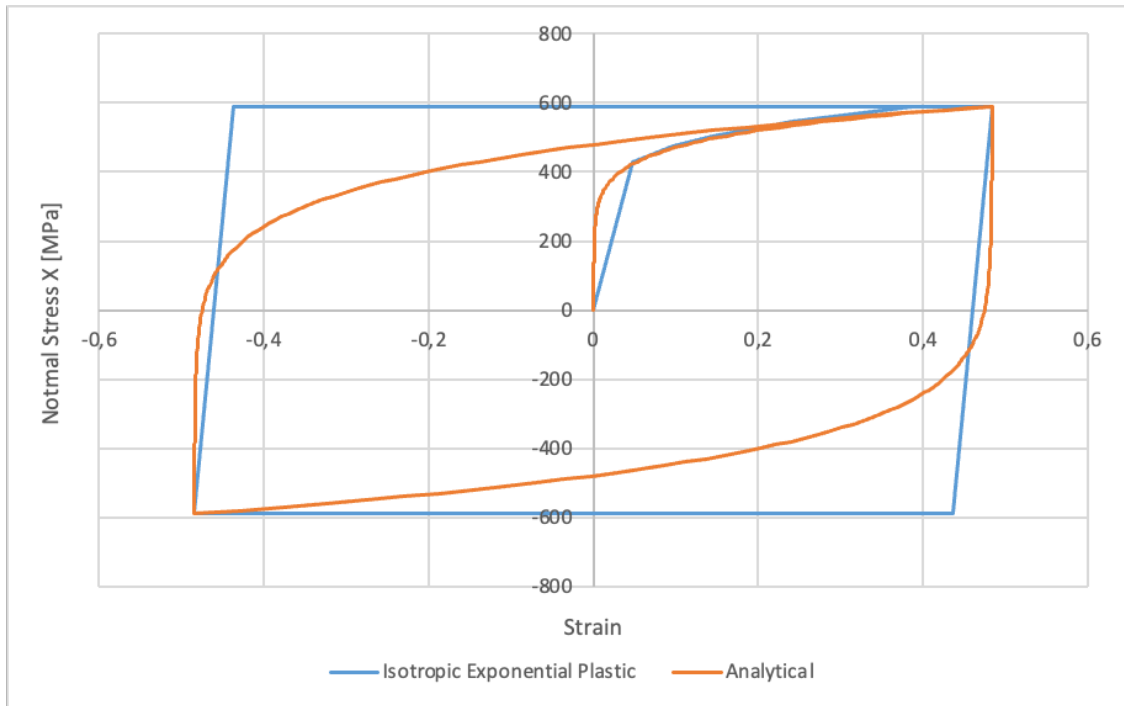


Σχήμα 4: Μη καλή προσέγγιση μονοτονικής συμπεριφοράς λόγω μεγάλου βήματος επίλυσης.

2.2 Κυκλική συμπεριφορά

Για την επίλυση της κυκλικής φόρτισης, γίνεται πιο πυκνό πλέγμα με 8 στοιχεία σε κάθε ακμή ώστε να επιτευχθεί πιο σταθερή λύση. Εδώ, το πλάτος μετατόπισης αλλάζει ώστε να επιτευχθεί η κυκλική φόρτιση. Για την αναλυτική προσέγγιση χρησιμοποιούνται οι κυκλικές σταθερές από τη πηγή για τη δημιουργία του βρόγχου υστέρησης του υλικού. Ακολουθώντας τα διαφορετικά μοντέλα πλαστικότητας, αναμένεται η επιστροφή από τη μέγιστη μετατόπιση στην ελάχιστη να έχει διαφορετική τιμή εύρους τάσης με $\sigma_y = \sigma_{0,2}$.

Είναι σημαντικό στην κυκλική φόρτιση, να δοθεί σωστός πίνακας πλαστικότητας. Στην ισοτροπική πλαστικότητα για παράδειγμα θα πρέπει να δοθεί εκτεταμένος πίνακας, με περισσότερες τιμές και όχι έως το όριο $\sigma_{0,2}$, καθώς τόσο κατά την αποφόρτιση όσο και κατά την επαναφόρτιση, το ισοτροπικό μοντέλο φτάνει όλο και πιο ψηλά με κάθε κύκλο φόρτισης. Σε λανθασμένη επίλυση με το συγκεκριμένο μοντέλο, δώθηκε μη εκτεταμένος πίνακας και το υλικό ανταποκρινόταν σε συνθήκες τέλει πλαστικότητας από τη στιγμή που ξεπερνούσαν το όριο τάσης του πίνακα πλαστικότητας. Αυτό γίνεται εμφανές και παρακάτω, όπου μόλις η τάση φτάνει στο όριο του πίνακα πλαστικότητας $\sigma_{0,2}$, το υλικό φέρεται σαν τέλεια πλαστικό.



Σχήμα 5: Λανθασμένη επίλυση με μη εκτεταμένο πίνακα πλαστικότητας και ιστροπικό μοντέλο.

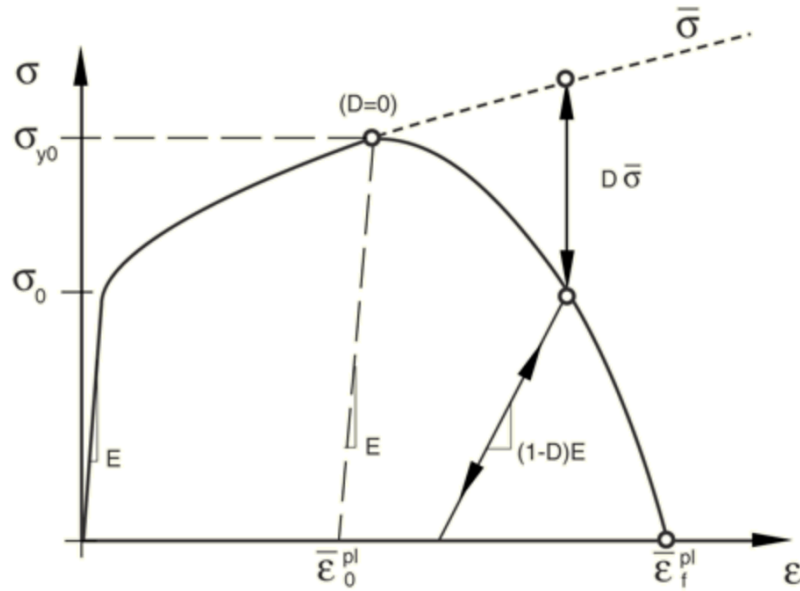
2.3 Θραύση

Σχετικά με τη θραύση, αναζητώνται παράμετροι του επιλυτή. Ο επιλυτής προσφέρει διάφορες δυνατότητες σχετικά με αναλύσεις που αφορούν τη θραύση του υλικού. Εδώ θα εξεταστεί η εξέλιξη της θραύσης και η διαγραφή στοιχείων που αστοχούν. Μετά το όριο σ_u και εφόσον συνεχίζει να αυξάνεται η φόρτιση, η στιβαρότητα του υλικού τείνει να φθίνει έως ότου επέλθει η θραύση. Ρυθμίζοντας κατάλληλες παραμέτρους στον επιλυτή, μπορεί να συνυπολογίζεται το damage του υλικού καθώς αυξάνει η δύναμη φόρτισης, να οριστεί ένα όριο μέγιστης υποβάθμισης (MAX DEGRADATION) του υλικού μετά από το οποίο θα επέλθει η θραύση, αλλά και πως θα συνεχίσει η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης μετά από το όριο σ_u .

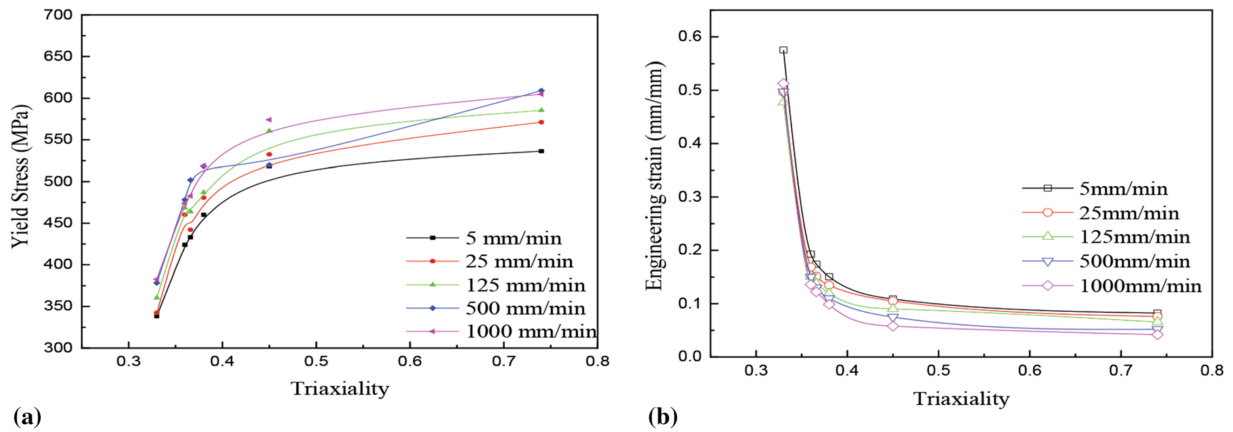
Οι παράμετροι αυτοί είναι οι παράμετροι εκκίνησης βλάβης και εξέλιξης της (DAMAGE INITIATION, DAMAGE EVOLUTION). Ο επιλυτής αναφέρει ότι η εκκίνηση της βλάβης εξαρτάται από το μοντέλο που θα επιλεγεί για την εκκίνηση. Εδώ επιλέγεται το κριτήριο ολκιμότητας (DUCTILE CRITERION), σύμφωνα με το οποίο η πλαστική παραμόρφωση στην έναρξη της βλάβης εξαρτάται από την τριαξονικότητα (triaxiality) και τον ρυθμό παραμόρφωσης (strain rate). Όσο αναφορά το triaxiality αυτό ορίζεται ως:

$$\eta = -\frac{p}{q} \quad (2)$$

Όπου, p είναι η πίεση λόγω της τάσης και q η ισοδύναμη Von-Mises τάση. Στην [3] δίνεται από πειραματικά δεδομένα η υπολογισμένη triaxiality και αντίστοιχη τάση εκκίνησης της βλάβης για διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης. Έτσι, επιλέγοντας έναν συγκεκριμένο ρυθμό παραμόρφωσης και μια συγκεκριμένη τιμή triaxiality μπορεί να υπολογιστεί από το Σχ. 7 η παραμόρφωση στην οποία εμφανίζεται για πρώτη φορά η βλάβη.



Σχήμα 6: Εξέλιξη βλάβης έως θράυση υλικού όπως αναγράφεται στο εγχειρίδιο του ABAQUS.

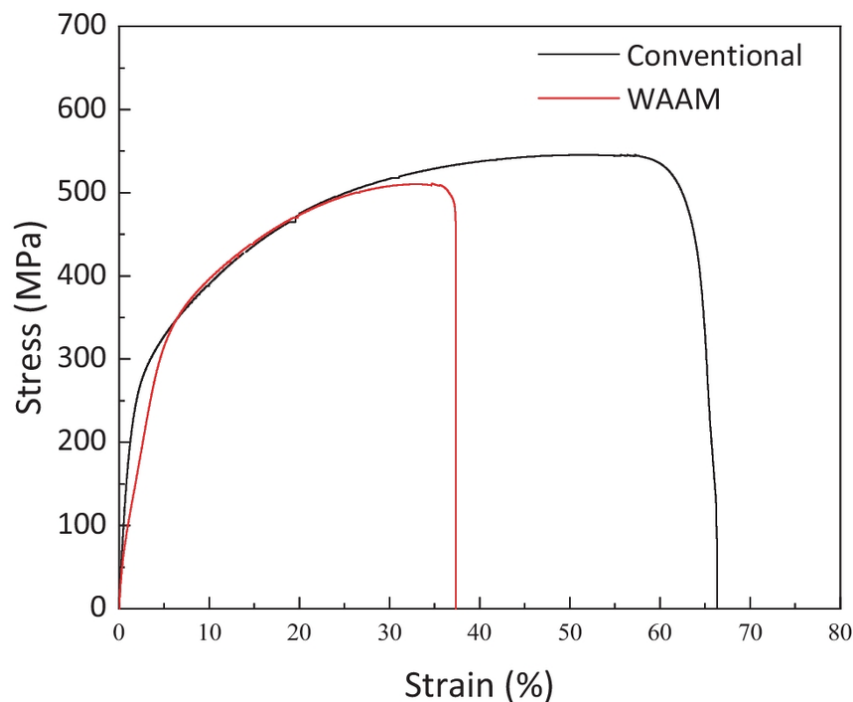


Σχήμα 7: Triaxiality για διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης για ανοξείδωτο χάλυβα 316L σύμφωνα με την [3].

Όσο αναφορά την εξέλιξη της βλάβης, πρέπει να ορισθεί το μοντέλο χαλάρωσης (SOFTENING). Επιλέγοντας γραμμικό μοντέλο, σημαίνει ότι η παραμόρφωση μειώνεται γραμμικά έως ότου επέλθει η θράυση. Στο γραμμικό μοντέλο αρκεί να δοθεί σαν παράμετρος η ισοδύναμη μετατόπιση η οποία φτάνει το υλικό όταν επέρχεται θράυση. Η ισοδύναμη μετατόπιση είναι σύμφωνα με το Σχ. 6:

$$u_{eq} = L \cdot (\bar{\epsilon}_f^{pl} - \bar{\epsilon}_0^{pl}) \quad (3)$$

Όπου, L είναι το χαρακτηριστικό μήκος του στοιχείου το οποίο είναι $\frac{10}{8}$, το οποίο θεωρείται μονάδα για λόγους ευκολίας. Εν τέλει, με το γραμμικό μοντέλο μετατόπισης όταν η βλάβη γίνει ίση με τη μονάδα, η μετατόπιση του υλικού φτάνει στη τιμή u_{eq} . Στην [2] δίνεται η πλήρης καμπύλη τάσης παραμόρφωσης έως τη θράυση για το υλικό της παρόν εργασίας. Δυστυχώς, δεν βρέθηκαν δεδομένα για το ρυθμό παραμόρφωσης της εν λόγω καμπύλης και εν γένει δεν βρέθηκαν δεδομένα για το υλικό που συνδυάζουν όλους τις παραμέτρους που ζητούνται από τον επιλυτή για τη μελέτη της θράυσης σε μία δημοσίευση. Τελικά, η συγκεκριμένη ανάλυση στον επιλυτή δεν μπορεί να συγκριθεί με κάποιο πείραμα καθώς δεν μπορούσαν να βρεθούν δεδομένα αλλά γίνεται πιο πολύ για χάρην της εξερεύνησης των παραμέτρων που προσφέρει ο ABAQUS.



Σχήμα 8: Εξέλιξη θραύσης για ανοξείδωτο χάλυβα 316L σύμφωνα με την [2].

Επομένως, όσο αναφορά την θραύση, θα πρέπει να οριστεί τόσο η εξέλιξη της βλάβης όσο και η εκκίνηση στον επιλυτή. Επίσης, θα πρέπει να γίνει και επεξεργασία στο SECTION ώστε να είναι δυνατή η διαγραφή των στοιχείων. Εκεί ορίζεται και η μέγιστη βλάβη έπειτα από την οποία διαγράφονται τα στοιχεία. Οι παράμετροι που ορίστηκαν φαίνονται παρακάτω καθώς επιλέχθηκαν για ρυθμό παραμόρφωσης $5 \text{ mm/min} = 0.0833 \text{ mm/s}$, τριαξονικότητα ίση με 0.35. Επίσης από το Σχ. 8 φαίνεται ισοδύναμη μετατόπιση περίπου ίση με 0.16, συνυπολογίζοντας και το μήκος στοιχείου. Τα παρακάτω σημεία πρέπει επίσης να μπουν στο κώδικα του inp.

Παράμετρος	Τιμή
Triaxiality	0.35
Str.Rate	0.0833
Eq.Pl.Strain	0.58
uf.Pl	0.16
MAX DEGRADATION	0.99

Πίνακας 2: Παράμετροι επιλυτή για μελέτη θραύσης υλικού.

```

1 ** DAMAGE INITIATION
2 *DAMAGE INITIATION, CRITERION=DUCTILE
3   0.58, 0.35, 0.0833
4 *DAMAGE EVOLUTION, TYPE=DISPLACEMENT, SOFTENING=LINEAR
5   0.16,
6 **

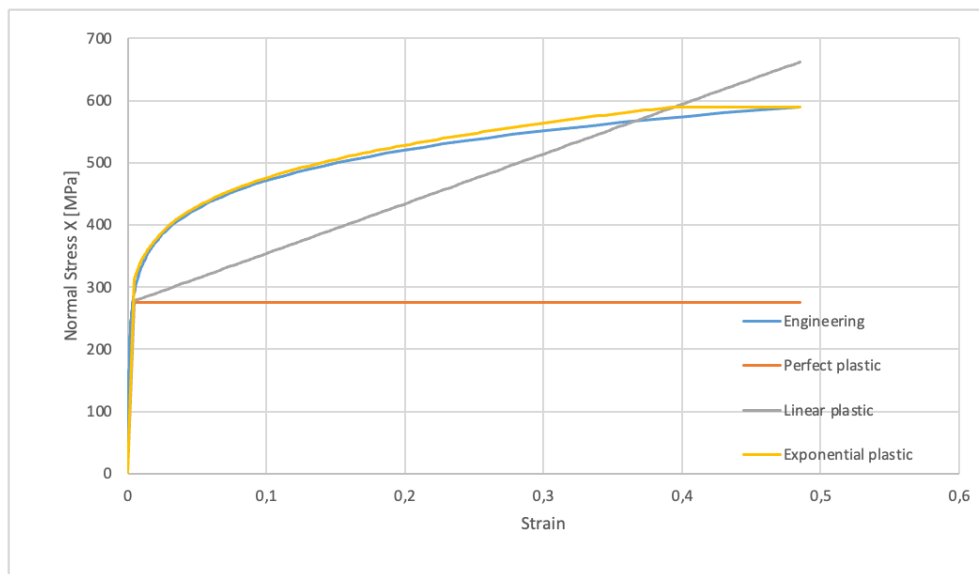
1 *SOLID SECTION, ELSET=P3;Default PSOLID Property, MATERIAL=M3;Default MATERIAL, CONTROLS=C1;Default SECTION
  CONTROLS
2 **
3
4 ...
5
6 ** SECTION CONTROLS
7 *SECTION CONTROLS, NAME=C1;Default SECTION CONTROLS, ELEMENT DELETION=YES, MAX DEGRADATION=0.99

```

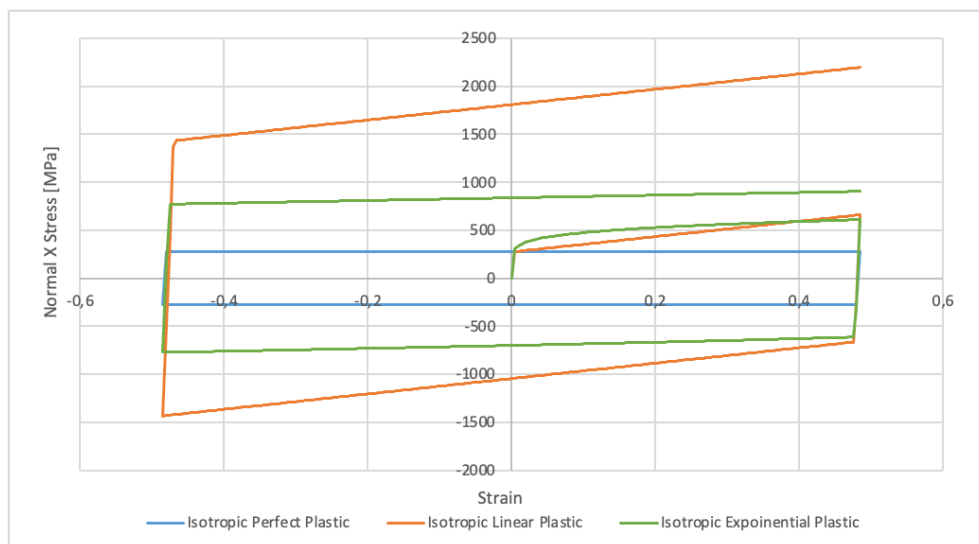
3 Αποτελέσματα Και Συζήτηση

3.1 Αποτελέσματα

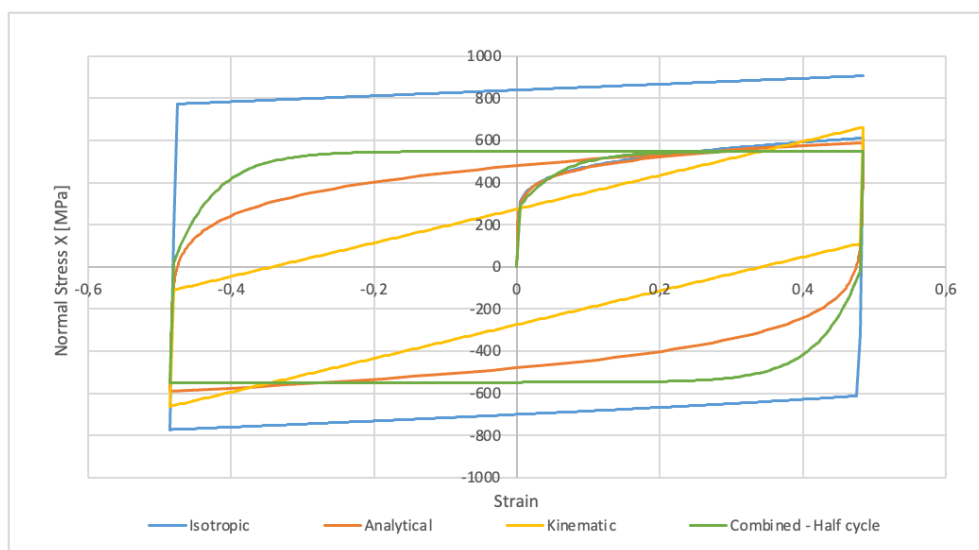
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της εργασίας. Όσο αναφορά τη θραύση, μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχ. 13 τρία διαδοχικά βήματα της επίλυσης. Φαίνεται η συσσώρευση βλάβης στην κλίμακα, ενώ η τρίτη εικόνα παρουσιάζεται κενή καθώς σε εκείνο το "χρονικό" βήμα τα στοιχεία ξεπεράσαν το όριο υποβάθμισης και διαγράφηκαν. Δίνεται επίσης και το πως μεταβάλλεται η βλάβη καθώς αυξάνεται η μετατόπιση του υλικού.



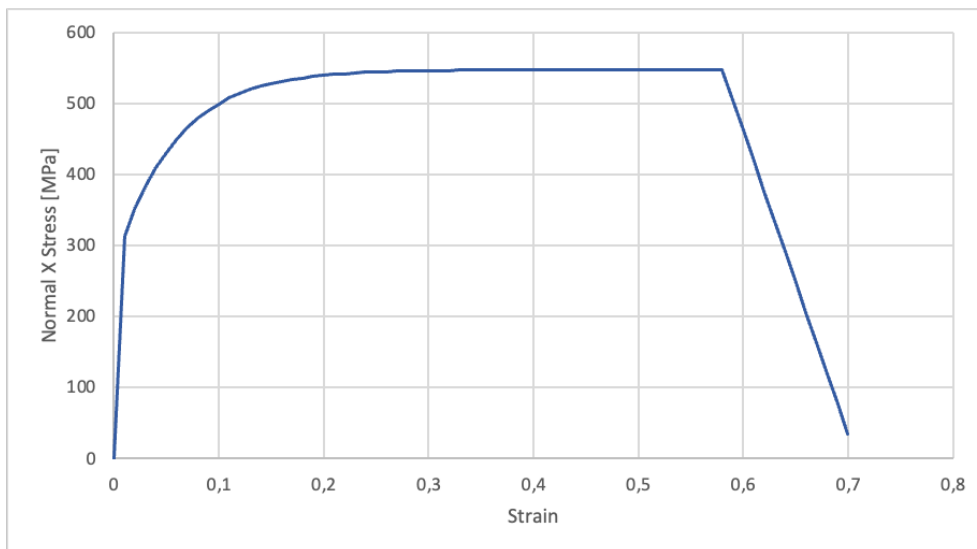
Σχήμα 9: Επίλυση μονοτονικής συμπεριφοράς.



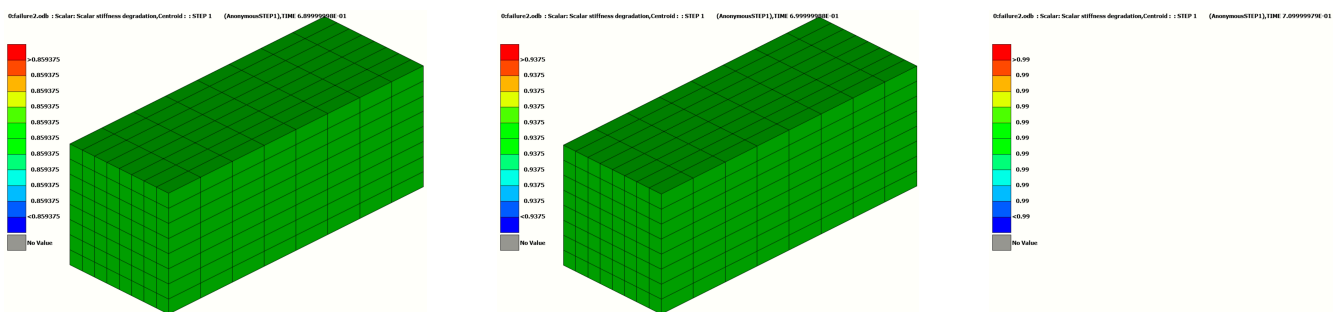
Σχήμα 10: Σύγκριση μοντέλων με ισοτροπική κράτνηση και διαφορετικά μοντέλα πλαστικότητας υπό κυκλική φόρτιση.



Σχήμα 11: Επίλυση κυκλικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 12: Επίλυση εξέλιξης θράυσης υλικού.



(α) Βήμα επίλυσης 70.

(β) Βήμα επίλυσης 71.

(γ) Βήμα επίλυσης 72.

Σχήμα 13: Διαγραφή στοιχείων μέγιστης υποβάθμισης.



Σχήμα 14: Εξέλιξη βλάβης με τη μετατόπιση.

3.2 Συμπεράσματα

Κατάλογος σχημάτων

1	Μοντέλα πλαστικότητας υπό κυκλική εναλλασόμενη φόρτιση.	2
2	Οριακές συνθήκες για επίτευξη καθαρού εφελκυσμού κύβου.	3
3	Αναλυτικές καμπύλες μονοτονικής συμπεριφοράς ανοιξείδωτου χάλυβα 316L.	3
4	Μη καλή προσέγγιση μονοτονικής συμπεριφοράς λόγω μεγάλου βήματος επίλυσης.	4

5	Λανθασμένη επίλυση με μη εκτεταμένο πίνακα πλαστικότητας και ισοτροπικό μοντέλο.	5
6	Εξέλιξη βλάβης έως θράυση υλικού όπως αναγράφεται στο εγχειρίδιο του ABAQUS.	6
7	Triaxiality για διάφορους ρυθμούς παραμόρφωσης για ανοξείδωτο χάλυβα 316L σύμφωνα με την [3].	6
8	Εξέλιξη θράυσης για ανοξείδωτο χάλυβα 316L σύμφωνα με την [2].	7
9	Επίλυση μονοτονικής συμπεριφοράς.	8
10	Σύγκριση μοντέλων με ισοτροπική κράτυνση και διαφορετικά μοντέλα πλαστικότητας υπό κυκλική φόρτιση.	8
11	Επίλυση κυκλικής συμπεριφοράς.	8
12	Επίλυση εξέλιξης θράυσης υλικού.	9
13	Διαγραφή στοιχείων μέγιστης υποβάθμισης.	9
14	Εξέλιξη βλάβης με τη μετατόπιση.	9

Κατάλογος πινάκων

1	Πειραματικά αποτελέσματα 316L υπό εφελκυστική φόρτιση.	1
2	Παράμετροι επιλυτή για μελέτη θράυσης υλικού.	7

Αναφορές

- [1] Kim J.R. Rasmussen. "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys". Στο: *Journal of Constructional Steel Research* 59.1 (2003), σσ. 47–61. issn: 0143-974X. doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00018-4). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X02000184>.
- [2] Lídia Souza κ.ά. "Characterization of an austenitic stainless steel preform deposited by wire arc additive manufacturing". Στο: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 123 (Νοέ. 2022), σσ. 1–14. doi: [10.1007/s00170-022-10382-1](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10382-1).
- [3] Yalcin Tamer, Serkan Toros και Fahrettin Ozturk. "Numerical and Experimental Comparison of Fractural Characteristics of 316L Stainless Steel". Στο: *Journal of Materials Engineering and Performance* 32 (Ιούλ. 2022). doi: [10.1007/s11665-022-07152-1](https://doi.org/10.1007/s11665-022-07152-1).