



# 7<sup>ο</sup> ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Βόλος 29- 30/09 & 01/10 2011

Εκτίμηση της στροφικής ικανότητας χαλύβδινων δοκών στις υψηλές θερμοκρασίες θεωρώντας την επιρροή των αρχικών γεωμετρικών ατελειών

Δάφνη Παντούσα και Ευριπίδης Μυστακίδης



Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

## Εισαγωγή (1)

- Κατά την επίλυση των κατασκευών στα πλαίσια της πλαστικής καθολικής ανάλυσης, πρέπει να διασφαλίζεται ότι στα μέλη υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης πλαστικών αρθρώσεων με στροφική ικανότητα μεγαλύτερη από την απαιτούμενη
- Συμφωνά με τον Ευρωκώδικα 3, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω της κατάταξης των διατομών
- Συγκεκριμένα, θεωρείται πως ένα μέλος έχει επαρκή στροφική ικανότητα, όταν η διατομή είναι κατηγορίας I
- Στην περίπτωση του σχεδιασμού έναντι πυρκαγιάς, η κατάταξη των διατομών πραγματοποιείται σχεδόν όπως και στην κανονική θερμοκρασία. Η μόνη διαφορά έγκειται στην εισαγωγή ενός μειωτικού συντελεστή που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = 0.85 \left[ 235 / f_y \right]^{0.5}$$

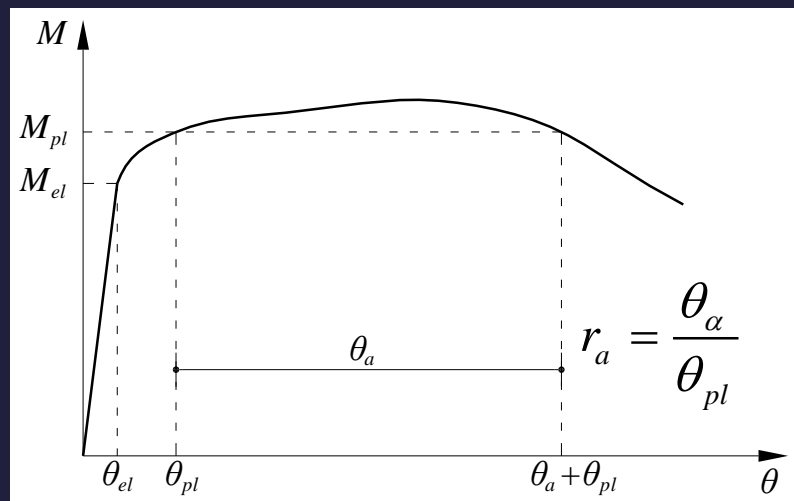
όπου  $f_y$  είναι η τάση διαρροής του χάλυβα στους 20°C.

## Εισαγωγή (2)

Αλλά:

- Η προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη κάποιους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την στρωφική ικανότητα των χαλύβδινων μελών στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως η έλλειψη του κλάδου σκλήρυνσης στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα μετά τους 400°C, η επιρροή των αρχικών γεωμετρικών ατελειών κτλ.
- Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να οδηγήσουν σε πρώιμο τοπικό ή πλευρικό λυγισμό στην πλαστική περιοχή, με αποτέλεσμα τη μείωση της στρωφικής ικανότητας των μελών

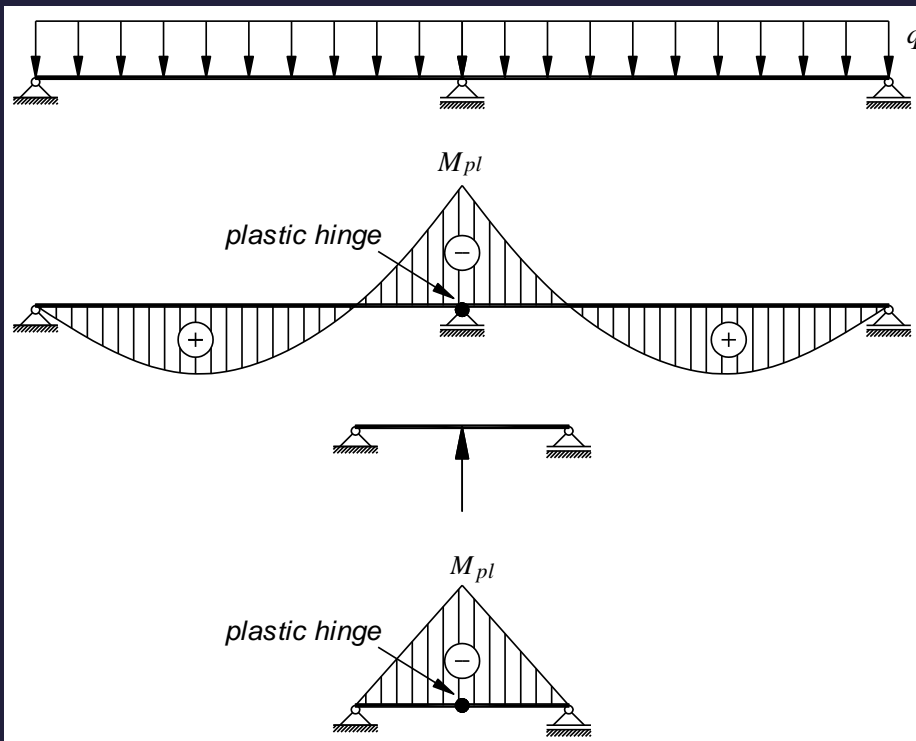
### Ορισμός της στρωφικής ικανότητας



- ✓  $\theta_a$  είναι το εύρος της στρωφής κατά το οποίο η ροπή είναι μεγαλύτερη ή ίση από την πλαστική ροπή αντοχής της διατομής
- ✓  $\theta_{pl}$  είναι η στρωφή που αντιστοιχεί στην πλαστική ροπή αντοχής της διατομής και υπολογίζεται από τη σχέση  $M_{pl,T} = f_{y,T} W_{pl}$

# Περιγραφή του προβλήματος

Στην εργασία αυτή εξετάζεται μια συνεχής δοκός δύο ανοιγμάτων, διατομής IPE, που φορτίζεται με ένα ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο



Σημείωση:

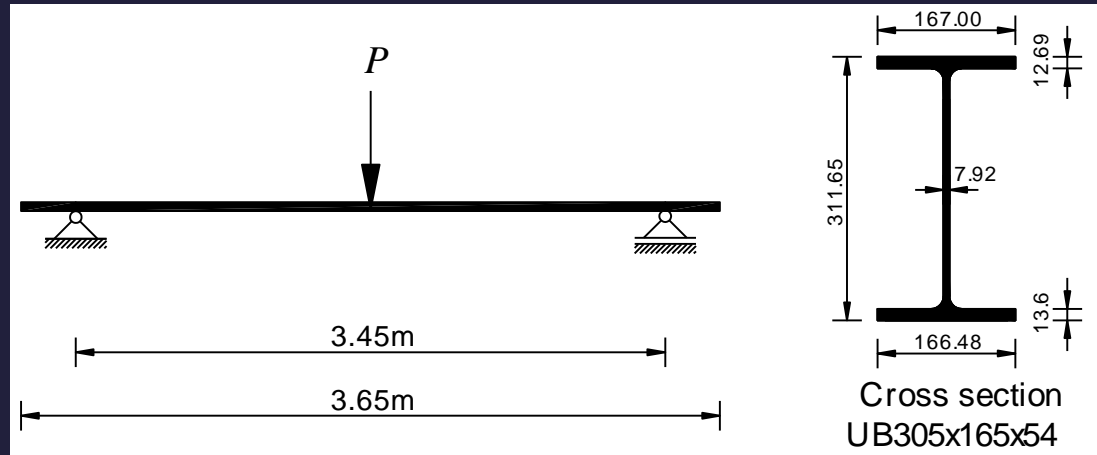
✓ Το στατικό σύστημα που εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη, είναι ένα τυπικό σύστημα δοκού της πειραματικής εργασίας των R.B. Dharma και K.H. Tan.

✓ Όλες οι διαστάσεις και οι ιδιότητες των υλικών θεωρούνται σύμφωνα με τη πειραματική εργασία.

➔ Για λόγους απλοποίησης, το πρόβλημα ανάγεται στη μελέτη μιας αμφιέριστης δοκού υπό την επιρροή ενός συγκεντρωμένου φορτίου στο μέσο του ανοίγματος.

## Στόχος της εργασίας

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η εκτίμηση της στρωφικής ικανότητας μιας αμφιέριστης δοκού διατομής IPE σε κατάσταση πυρκαγιάς

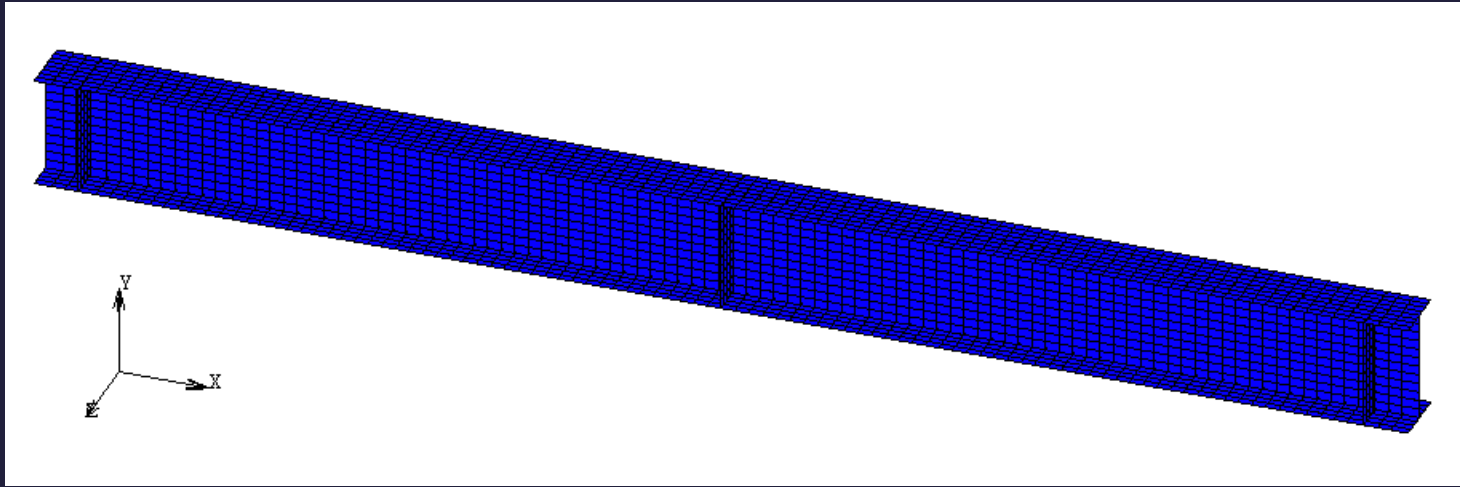


Συγκεκριμένα:

- ο εξάγονται οι καμπύλες ροπής – στρωφής σε διαφορετικά επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών. Η καμπύλες αυτές αποκτώνται βάση της θεώρησης ότι η θερμοκρασία της δοκού είναι σταθερή και ομοιόμορφη κατά μήκος της δοκού
- ο διεξάγονται παραμετρικές αναλύσεις, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά εύρη αρχικών γεωμετρικών ατελειών

# Το αριθμητικό μοντέλο

Το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιεί στοιχεία κελύφους τεσσάρων κόμβων



Η τάση διαρροής, το όριο αναλογίας και το μέτρο ελαστικότητας είναι εξαρτημένα από τη θερμοκρασία και είναι σύμφωνα τα μοντέλα που προτείνονται στον Ευρωκώδικα 3- Μέρος 1.2

και στην αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιείται το κριτήριο Von – Mises για τις πλαστικές παραμορφώσεις.

## Η αριθμητική ανάλυση (1)

Στη γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου ενσωματώνονται αρχικές ατέλειες, με σκοπό την πιο ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της χαλύβδινης δοκού.

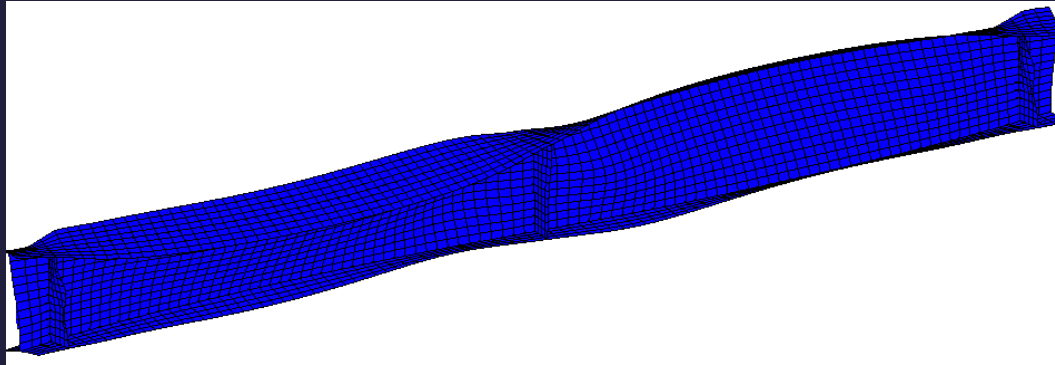
Στη μελέτη αυτή οι αρχικές ατέλειες εισάγονται σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Αρχικά διεξάγεται μια ιδιομορφική ανάλυση
2. Οι κανονικοποιημένες ιδιομορφές που εξάγονται, πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή μεγέθυνσης με σκοπό να αποκτηθεί το επιθυμητό εύρος των αρχικών ατελειών
3. Οι «μετατοπίσεις» που προκύπτουν προστίθενται στις αρχικές συντεταγμένες του δομικού μέλους

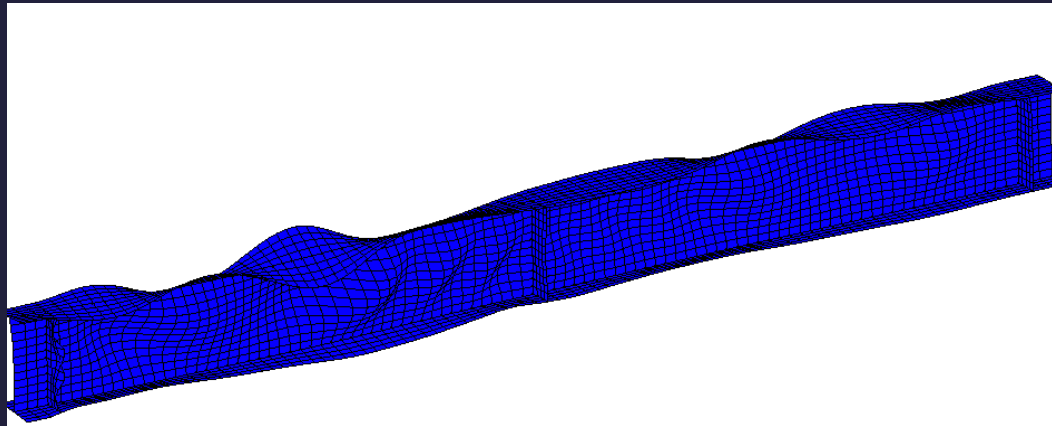
## Η αριθμητική ανάλυση (2)

Στην αριθμητική ανάλυση συνδυάζονται δύο τύποι ιδιομορφών:

- ιδιομορφή που σχετίζεται με τον πλευρικό λυγισμό της δοκού



- Ιδιομορφή που σχετίζεται με τον τοπικό λυγισμό του άνω πέλματος της δοκού



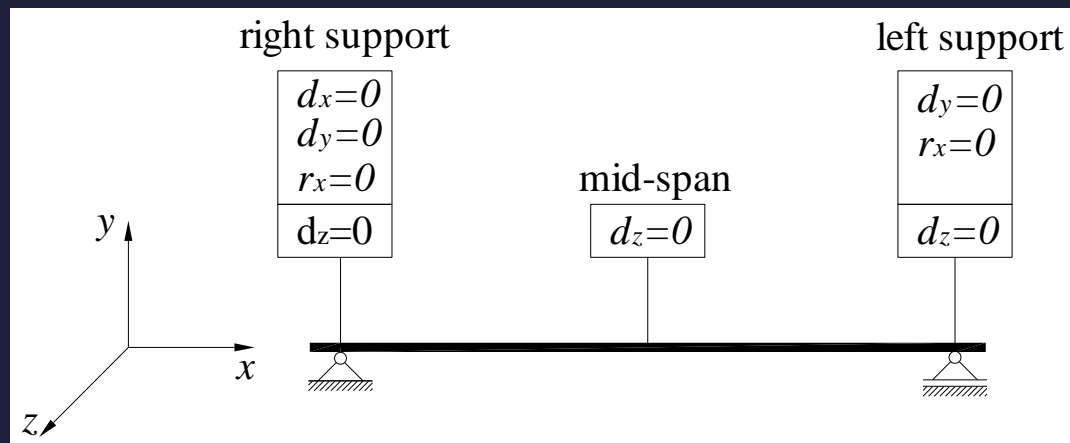


## Η αριθμητική ανάλυση (3)

Η αριθμητική ανάλυση έχει δύο στάδια:

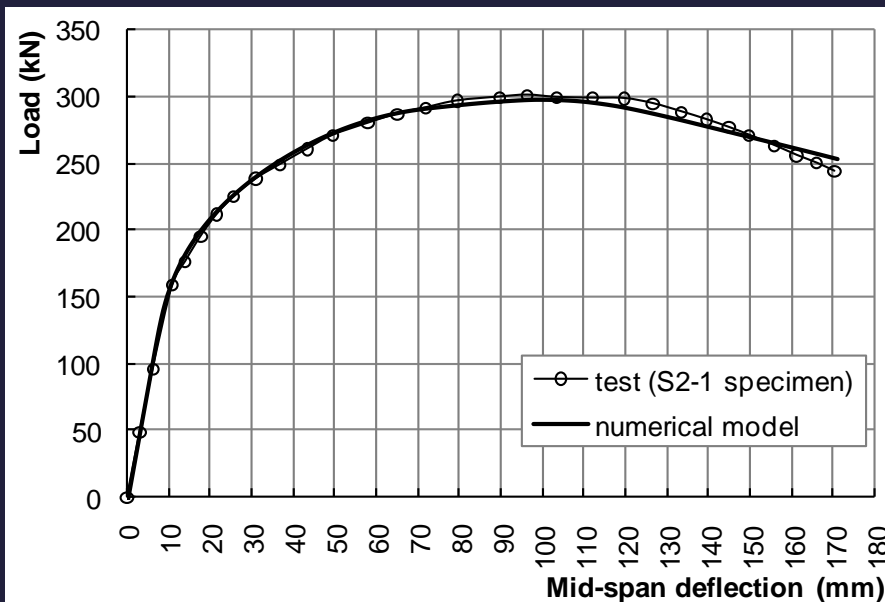
- Στο πρώτο στάδιο αυξάνεται η θερμοκρασία της δοκού με ρυθμό  $7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία  $T$ . Κατά τη διάρκεια αυτού σταδίου θεωρείται πως η θερμοκρασία της δοκού είναι ομοιόμορφη
- Στο δεύτερο στάδιο η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και επιβάλλεται η μηχανική φόρτιση μέχρι την αστοχία

## Οι συνοριακές συνθήκες



## Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου (1)

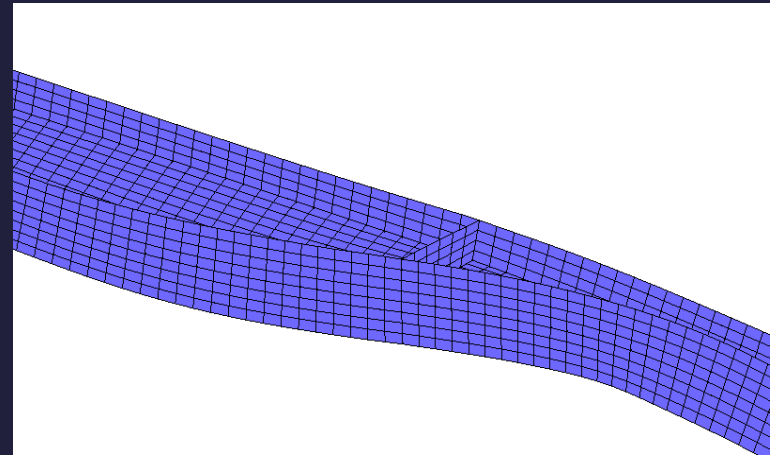
Ο πρώτος στόχος είναι η επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου σε σχέση με τα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας των R.B. Dharma και K.H. Tan



- ✓ Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων τόσο για την αρχική δυσκαμψία όσο και για το μέγιστο φορτίο
- ✓ Ο φθίνοντας κλάδος προσεγγίζεται με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια

## Επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου (2)

Η μορφή αστοχίας που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση είναι πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα



Και στις δύο περιπτώσεις η αστοχία οφείλεται στον πλευρικό λυγισμό της δοκού

## Παραμετρικές αναλύσεις

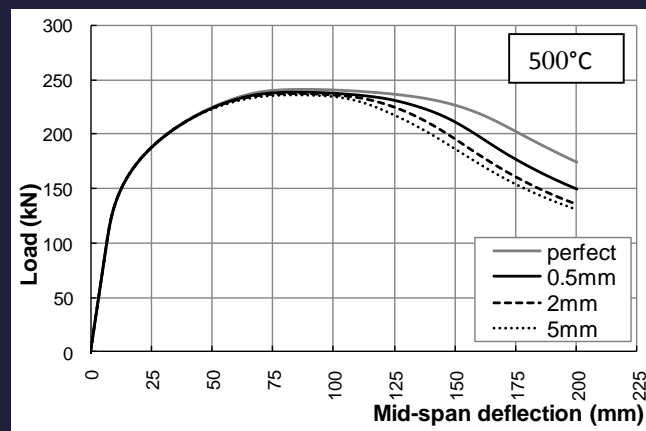
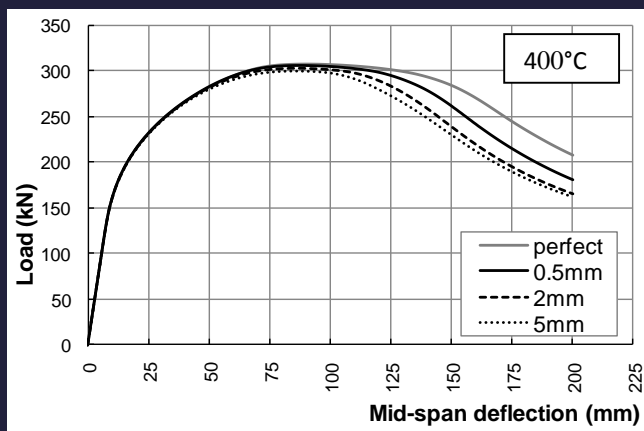
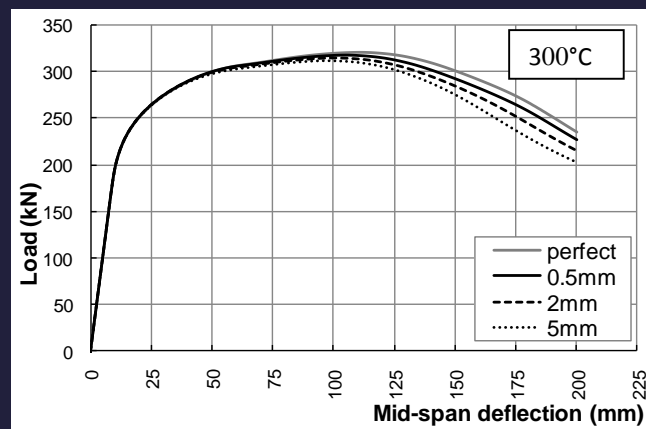
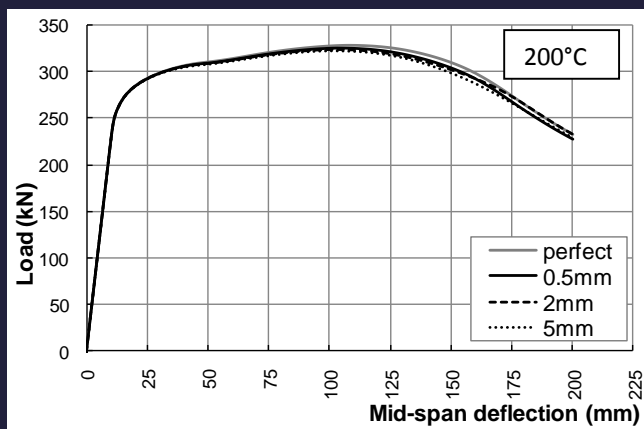
Οι παραμετρικές αναλύσεις που διεξάγονται σε διάφορα επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών, σκοπεύουν στην διερεύνηση της επιρροής των αρχικών ατελειών στην διαθέσιμη στροφική ικανότητα των μεταλλικών δοκών σε κατάσταση πυρκαγιάς.

Ειδικότερα:

- ✓ Οι αναλύσεις διεξάγονται για θερμοκρασίες από 200°C έως 900°C.
- ✓ Σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας διεξάγονται αναλύσεις για:
  - δοκούς χωρίς αρχικές ατέλειες, που αποκαλούνται «τέλειες»
  - δοκούς με αρχικές ατέλειες. Το εύρος των αρχικών ατελειών λαμβάνεται ίσο με 0.5mm, 2mm and 5mm τόσο για την ιδιομορφή που σχετίζεται με τον πλευρικό λυγισμό όσο και για την ιδιομορφή του τοπικού λυγισμού.

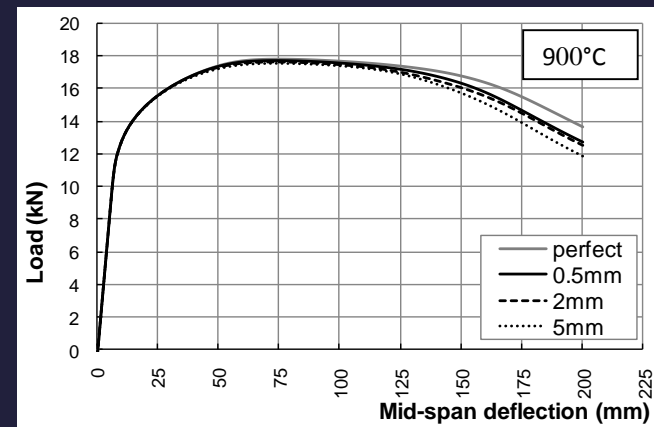
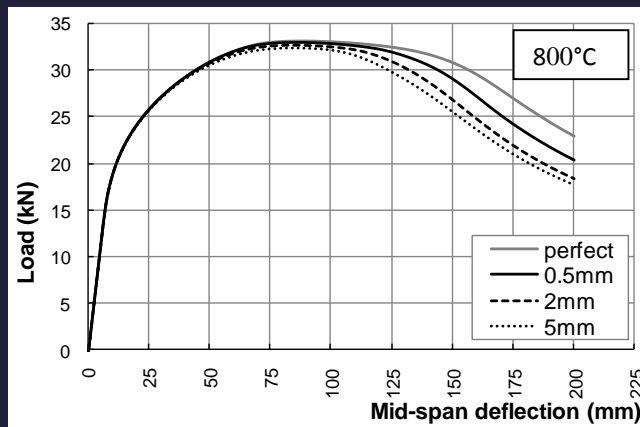
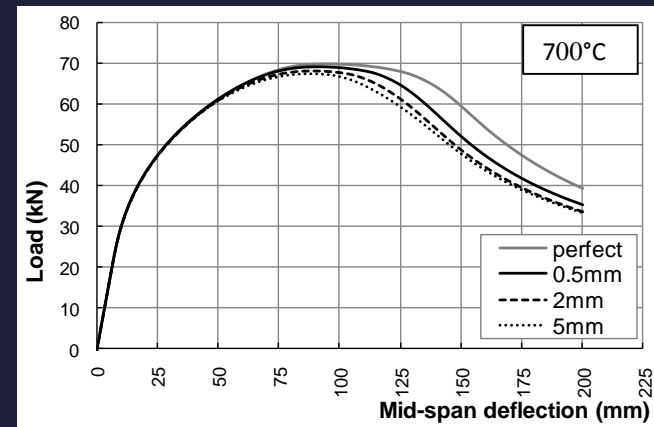
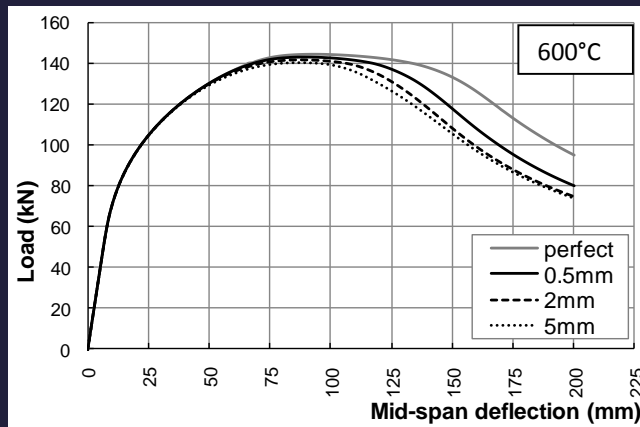
# Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (1)

Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σε όρους καμπυλών δύναμης – μετακίνησης, για διάφορα επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών



## Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (2)

Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σε όρους καμπυλών δύναμης – μετακίνησης, για διάφορα επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών



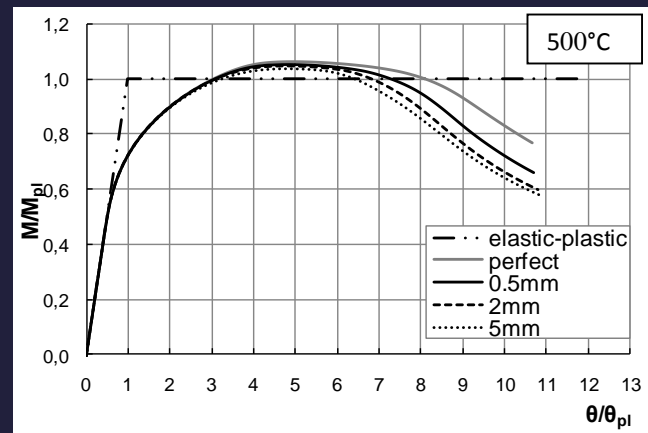
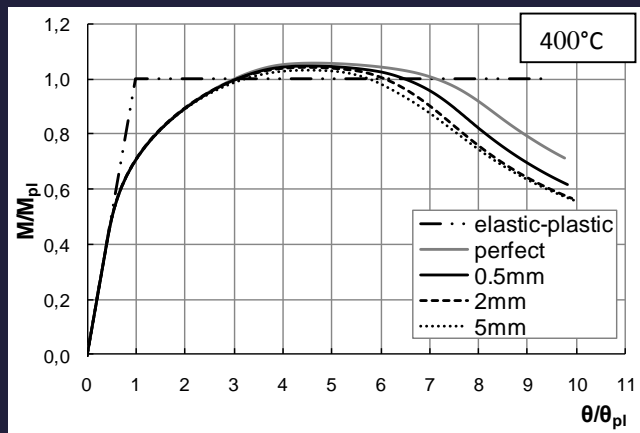
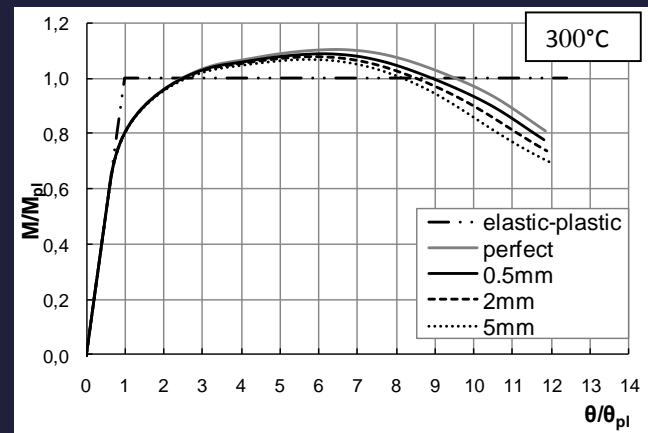
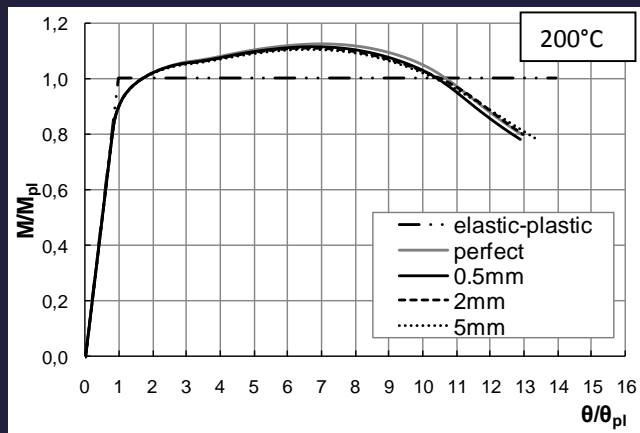
## Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (3)

Παρατηρείται πως:

- Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες δεν επηρεάζουν τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα της δοκού. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει σε όλο το εύρος των υψηλών θερμοκρασιών
- Για θερμοκρασίες μικρότερες των  $300^{\circ}\text{C}$ , η ενσωμάτωση των αρχικών ατελειών στη γεωμετρία της δοκού έχει μικρή επιρροή στον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης
- Αντιθέτως για εύρος θερμοκρασίας μεταξύ  $400^{\circ}\text{C}$  και  $800^{\circ}\text{C}$ , καθώς αυξάνεται το εύρος των αρχικών ατελειών ο φθίνοντας κλάδος γίνεται πιο «απότομος».

# Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (4)

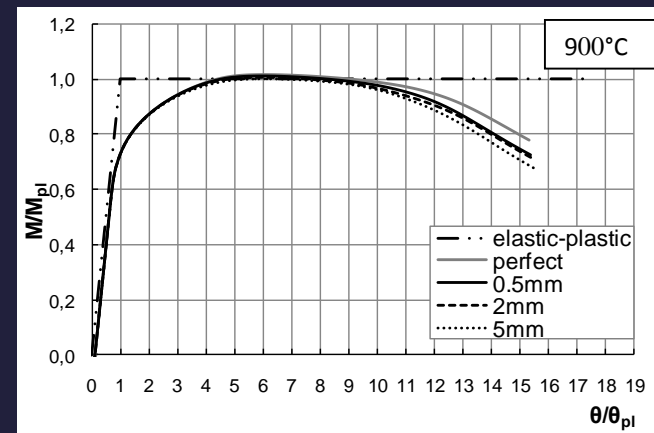
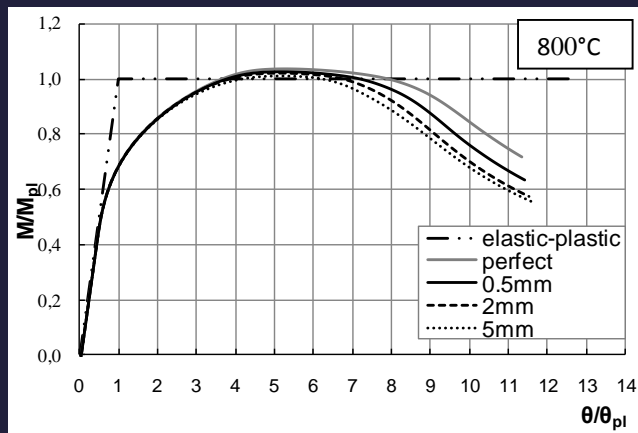
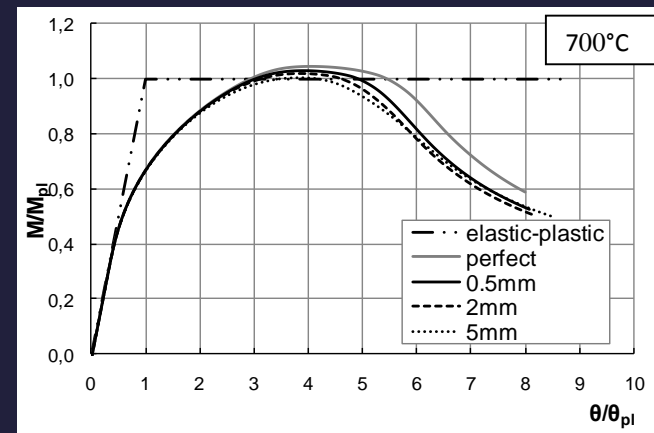
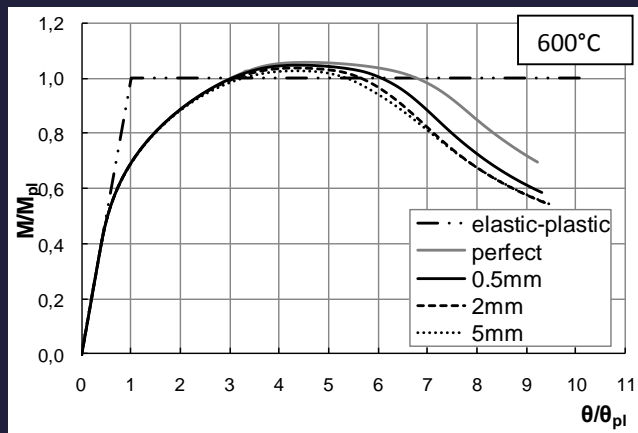
Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σε όρους καμπυλών ροπής – στρωφής, για διάφορα επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών





# Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (5)

Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σε όρους καμπυλών ροπής – στρωφής για διάφορα επίπεδα υψηλών θερμοκρασιών



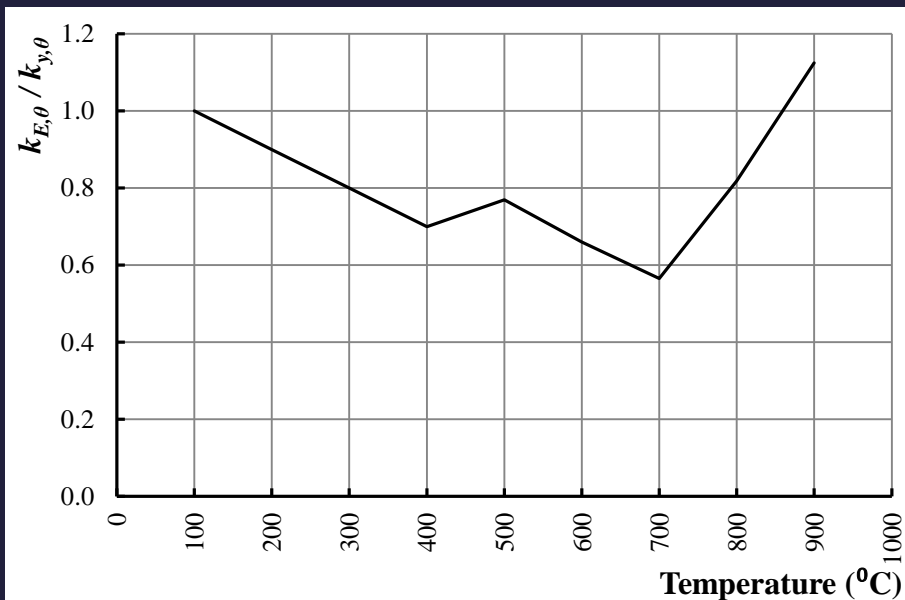
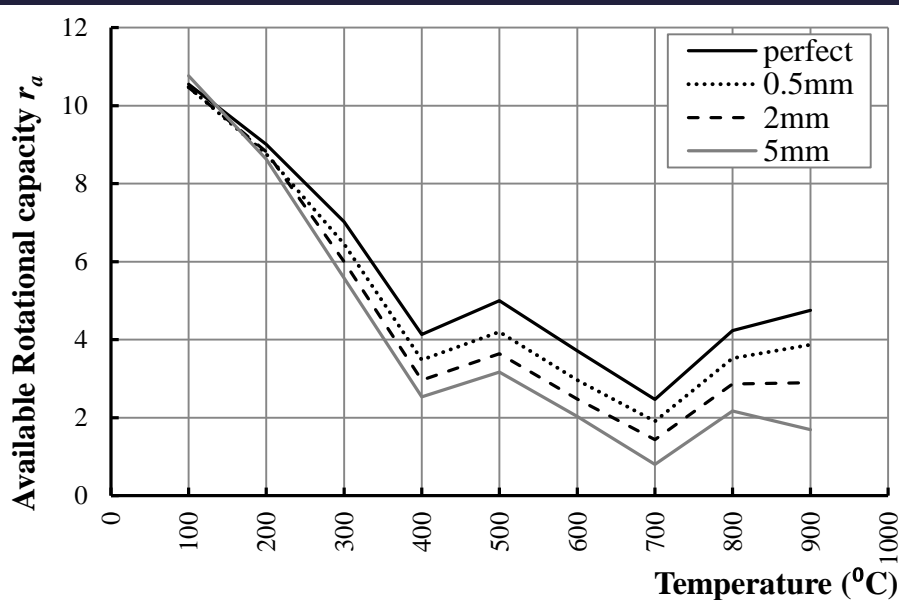
## Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (6)

Παρατηρείται πως:

- Στις υψηλές θερμοκρασίες η δοκός φτάνει την πλαστική ροπή αντοχής αφού δεν εμφανίζονται φαινόμενα τοπικού ή πλευρικού λυγισμού στην ελαστική περιοχή
- Παρά το γεγονός, πως σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 για θερμοκρασίες μεταξύ 20°C και 400 °C , η μέγιστη τάση του χάλυβα είναι 1.4 φορές μεγαλύτερη από την τάση διαρροής, η μέγιστη ροπή που προκύπτει από την αριθμητική ανάλυση είναι 1.1 φορές μεγαλύτερη από τη πλαστική ροπή αντοχής της διατομής για το ίδιο εύρος θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως καθώς αυξάνονται οι μετακινήσεις της δοκού, εμφανίζονται έντονα μη-γραμμικά γεωμετρικά φαινόμενα.
- Είναι προφανές πως για το εύρος θερμοκρασίας από 400°C έως και 900°C, η στροφική ικανότητα των δοκών μειώνεται σημαντικά.
- Η στροφική ικανότητα των μεταλλικών δοκών μειώνεται όσο αυξάνεται το εύρος των αρχικών ατελειών. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο για θερμοκρασίες άνω των 400 °C.

## Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (7)

### Διαθέσιμη στρωφική ικανότητα μεταλλικών δοκών στις υψηλές θερμοκρασίες



Παρατηρείται πως

- Τόσο οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες όσο και η αύξηση της θερμοκρασίας έχουν σημαντική επιρροή στην διαθέσιμη στρωφική ικανότητα των μεταλλικών δοκών
- Η στρωφική ικανότητα αυξάνεται για θερμοκρασίες άνω των  $700^{\circ}\text{C}$ , σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες

## Σύνοψη - Συμπεράσματα

- ✓ Στην εργασία αυτή προτείνεται ένα αριθμητικό μοντέλο με σκοπό τη διερεύνηση της διαθέσιμης στροφικής ικανότητας μεταλλικών δοκών, διατομής IPE, στις υψηλές θερμοκρασίες.
- ✓ Η στροφική ικανότητα μειώνεται σημαντικά μετά τη θερμοκρασία των 400 °C.
- ✓ Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400 °C η στροφική ικανότητα μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται το εύρος των αρχικών ατελειών.
- ✓ Η στροφική ικανότητα αυξάνεται για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 700°C και αυτό σχετίζεται με την τιμή του λόγου του μειωτικού συντελεστή του μέτρου ελαστικότητας προς το μειωτικό συντελεστή της τάσης διαρροής.

---

# Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

---