

Μελέτη ετερογενών υλικών με χρήση ανάλυσης πολλών κλιμάκων

Γεώργιος Α. Δροσόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης





The research project is implemented within the framework of the Action «Supporting Postdoctoral Researchers» of the Operational Program "Education and Lifelong Learning" (Action's Beneficiary: General Secretariat for Research and Technology), and is co-financed by the European Social Fund (ESF) and the Greek State.

Βασικά σημεία παρουσίασης

- Εισαγωγή: Ετερογενή υλικά και ομογενοποίηση
- Προτεινόμενα μοντέλα υπολογιστικής ομογενοποίησης:

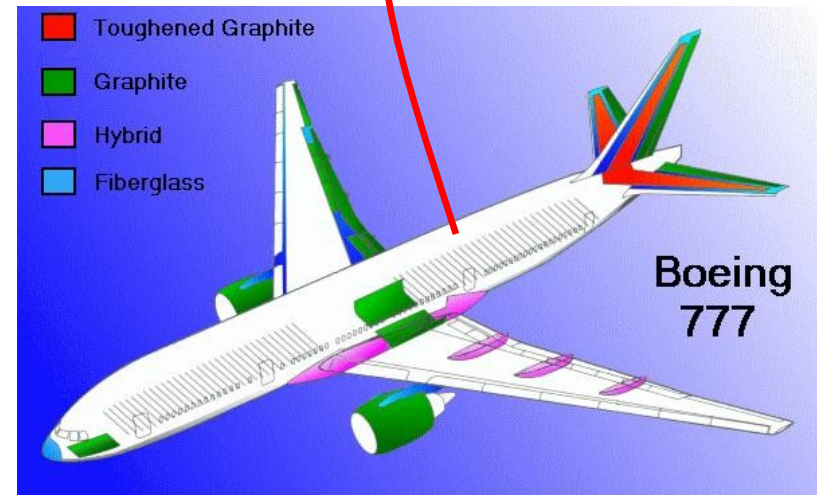
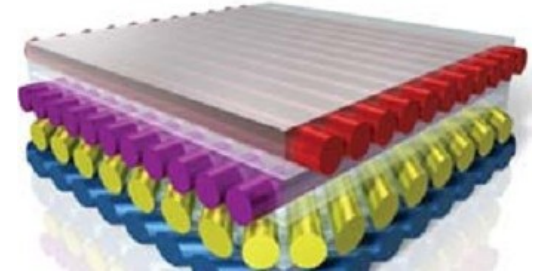
A. Σύνθετα υλικά

B. Τοιχοποιία

- Τοπολογική βελτιστοποίηση και ομογενοποίηση
- Συμπεράσματα

Ετερογενείς κατασκευές

- «Παραδοσιακά» υλικά: τοιχοποιία, σκυρόδεμα
- «Σύγχρονα» υλικά: σύνθετα υλικά, νανοϋλικά



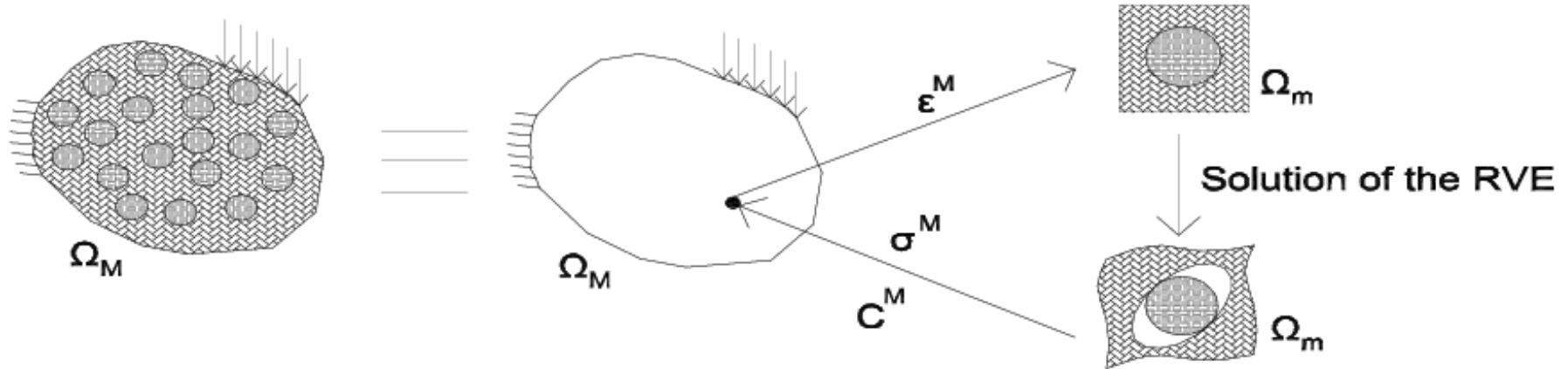
- Πολυπλοκότητα λόγω ετερογένειας → Ανάγκη εισαγωγής σύγχρονων μεθόδων

Ομογενοποίηση

- Βήμα 1
 - Μελέτη Αντιπροσωπευτικού όγκου αναφοράς (RVE)
 - Εξαγωγή ομογενοποιημένων ιδιοτήτων
- Βήμα 2
 - Χρήση ομογενοποιημένων ιδιοτήτων σε μακροδομή

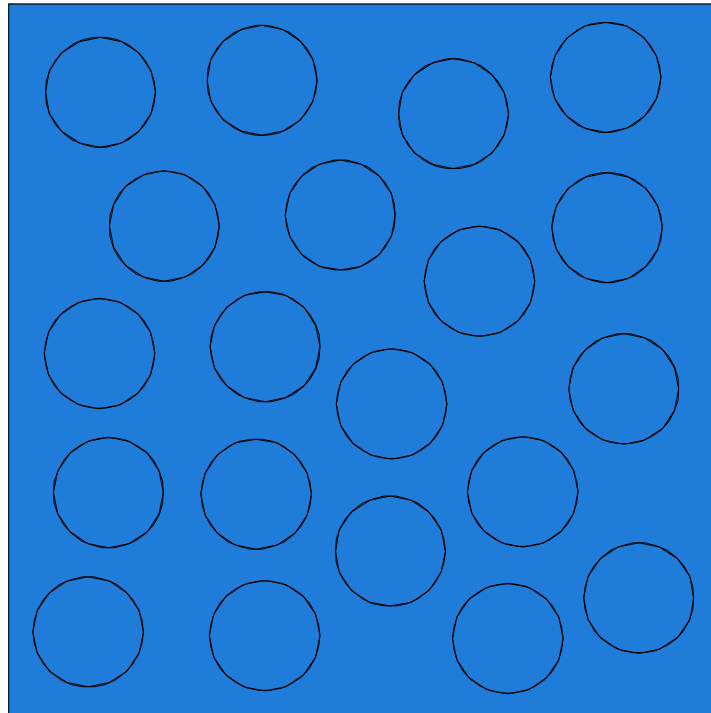
Υπολογιστική ομογενοποίηση πολλών κλιμάκων (FE²)

Α. Σύνθετα υλικά



Περιγραφή μεθόδου

- Μικροδομή σύνθετου υλικού
 - Μήτρα
 - Ίνες ενίσχυσης
 - Νόμος μονόπλευρης επαφής στις διεπιφάνειες μήτρας - ίνας



Για την υλοποίηση της μεθόδου:

Kouznetsova V.G. (2002), *Computational Homogenization for the Multi-Scale Analysis of Multi-Phase Materials*, PhD thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands

Miehe C., Koch A. (2002), “Computational micro-to-macro transitions of discretized microstructures undergoing small strains,” *Arch. Appl. Mech.* 72, pp. 300 – 317

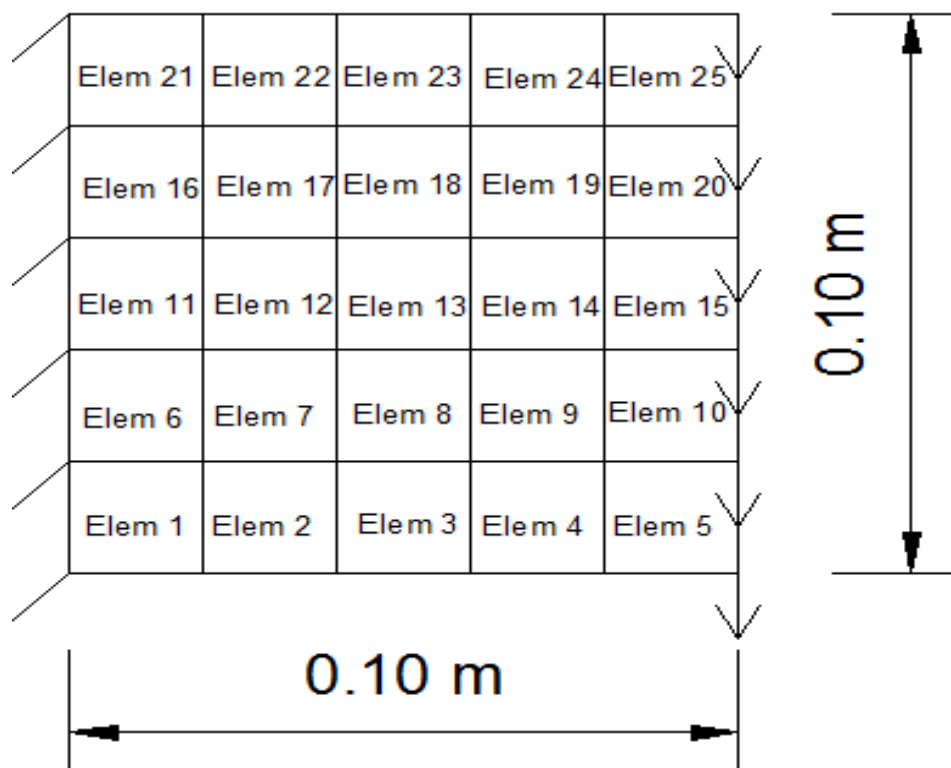
Wriggers P., Computational Contact Mechanics, Springer, The Netherlands (2006)

Mistakidis E.S., Stavroulakis G.E. (1998), *Nonconvex Optimization in Mechanics. Algorithms, Heuristics and Engineering Applications by the F.E.M.*, Springer, Wien, New York

Drosopoulos G.A., Wriggers P, Stavroulakis G.E., Contact analysis in multi-scale computational homogenization, in: M. Jir’asek, O. Allix, N. Moes, J. Oliver (Eds.), *Proceedings of 3rd international conference on computational modeling of fracture and failure of materials and structures (CFRAC)*, Prague, Czech Republic (2013)

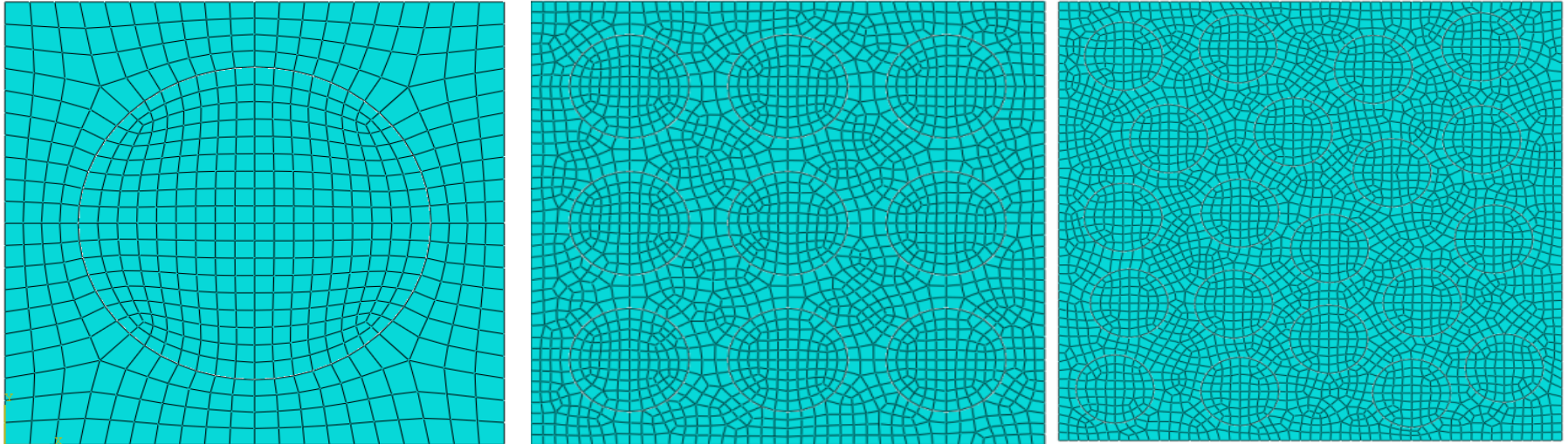
Παραδείγματα (1)

Μακροδομή:



Παραδείγματα (1)

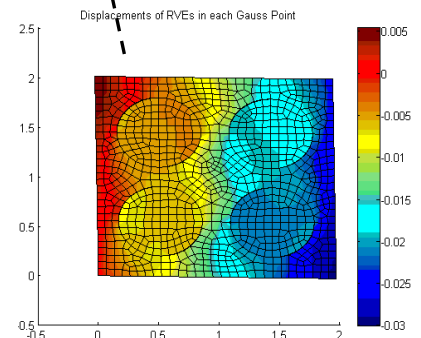
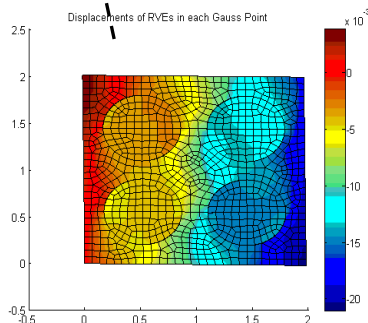
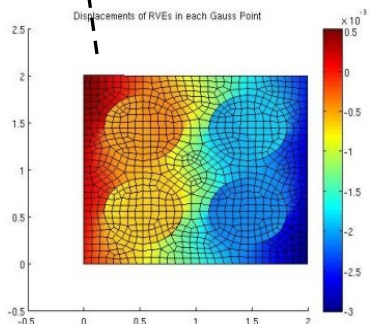
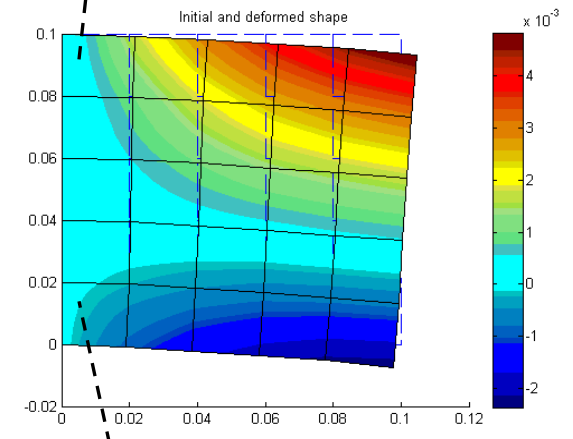
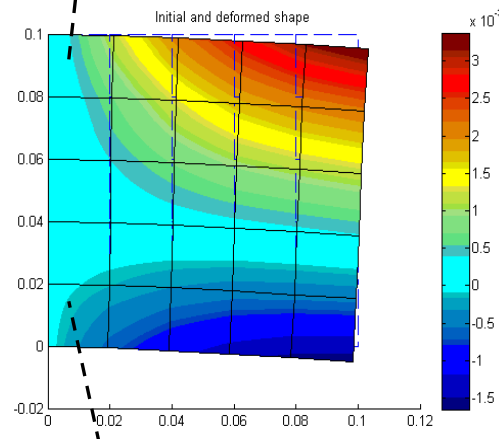
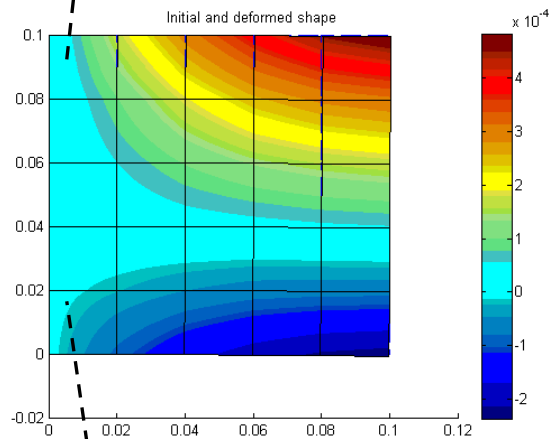
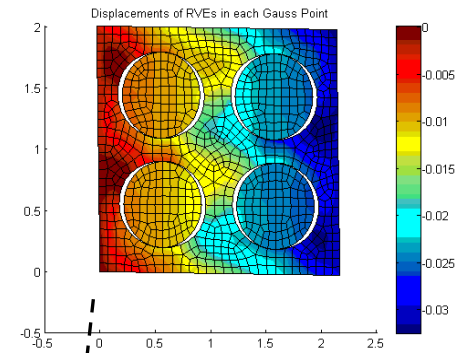
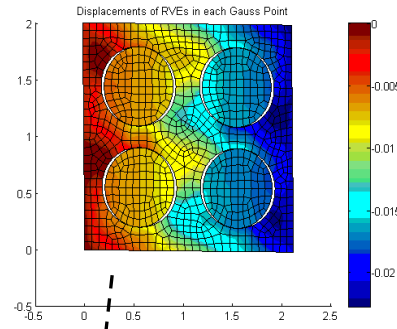
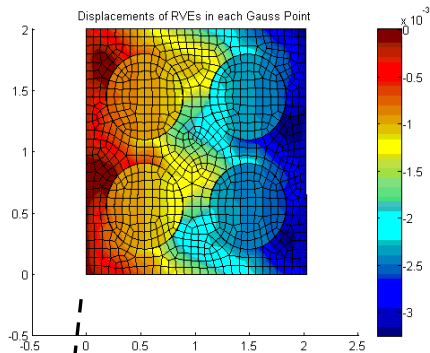
- Μικροδομή: 1 ή 4 ή 9 ή 20 ίνες



- Μήτρα: $E_m = 68.89$ GPa, $n_m = 0.33$
Ίνες: $E_f = 413.040$ GPa, $n_f = 0.2$

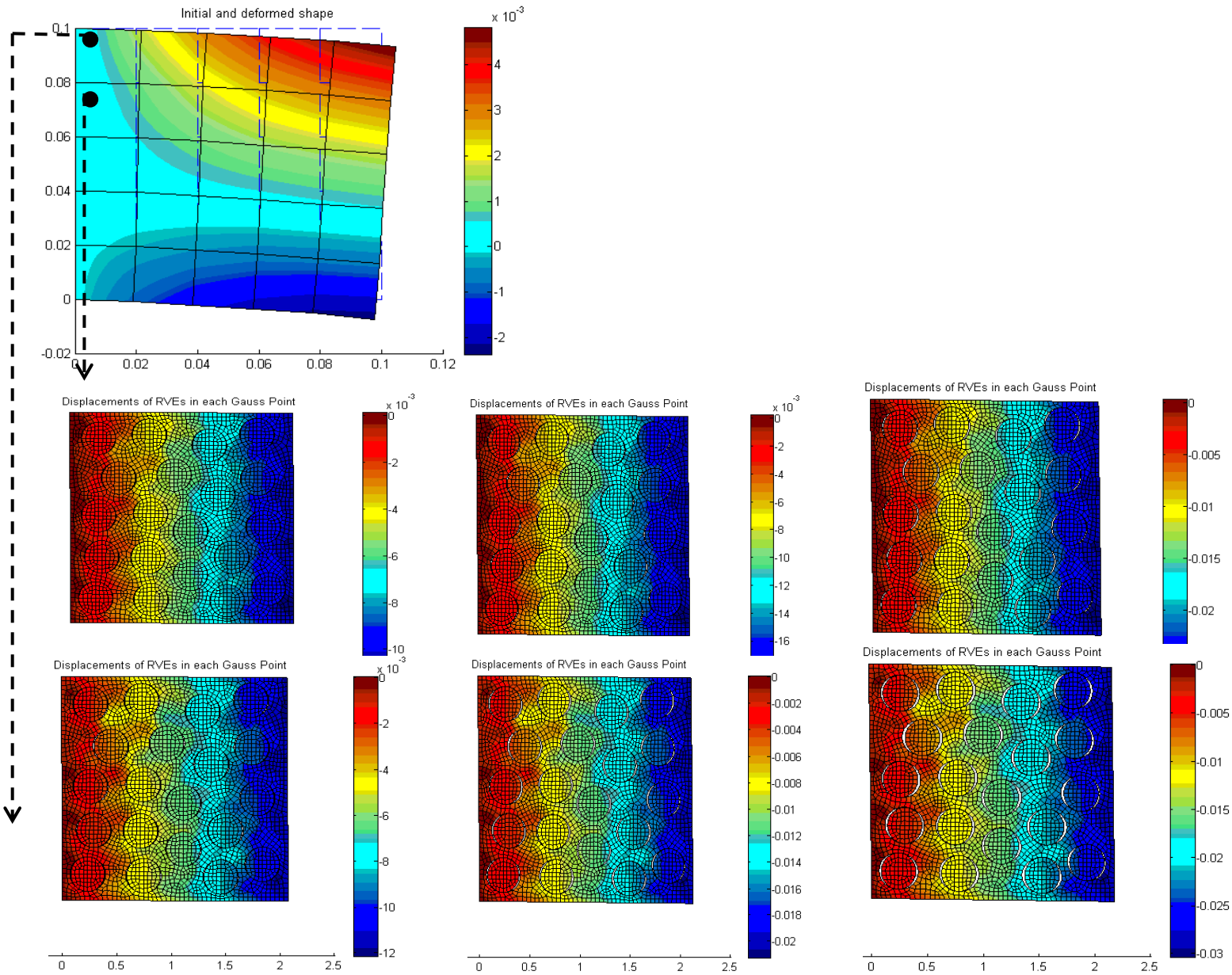
Αποτελέσματα

- Μάκρο μετατοπίσεις σε 3 επαυξητικά βήματα: 4 μικρο ίνες



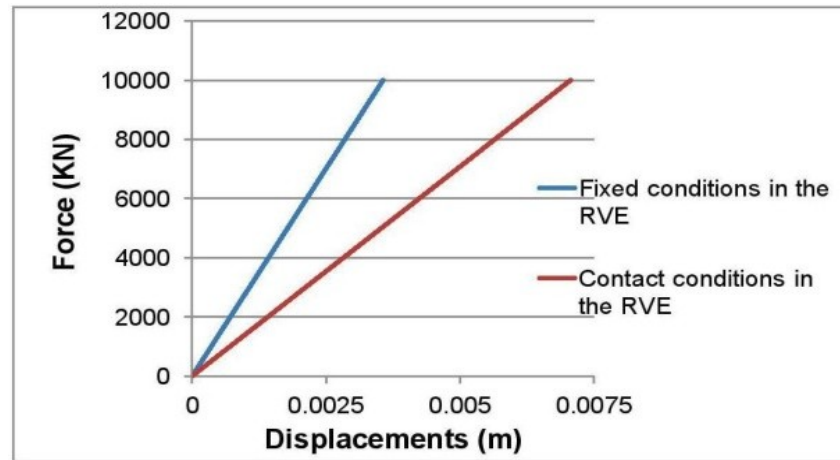
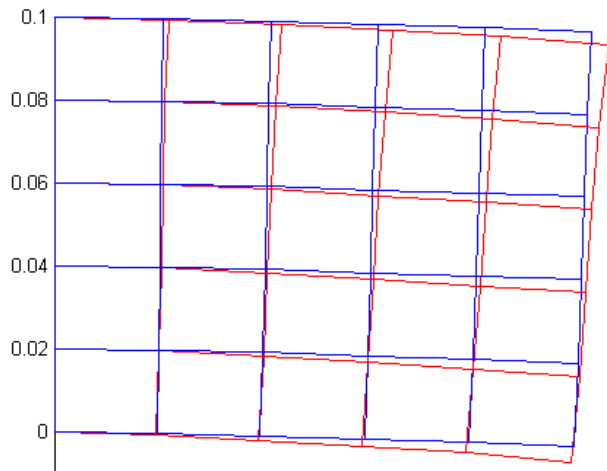
Αποτελέσματα

- Μάκρο μετατοπίσεις σε 3 επαυξητικά βήματα: 20 μικρο ίνες

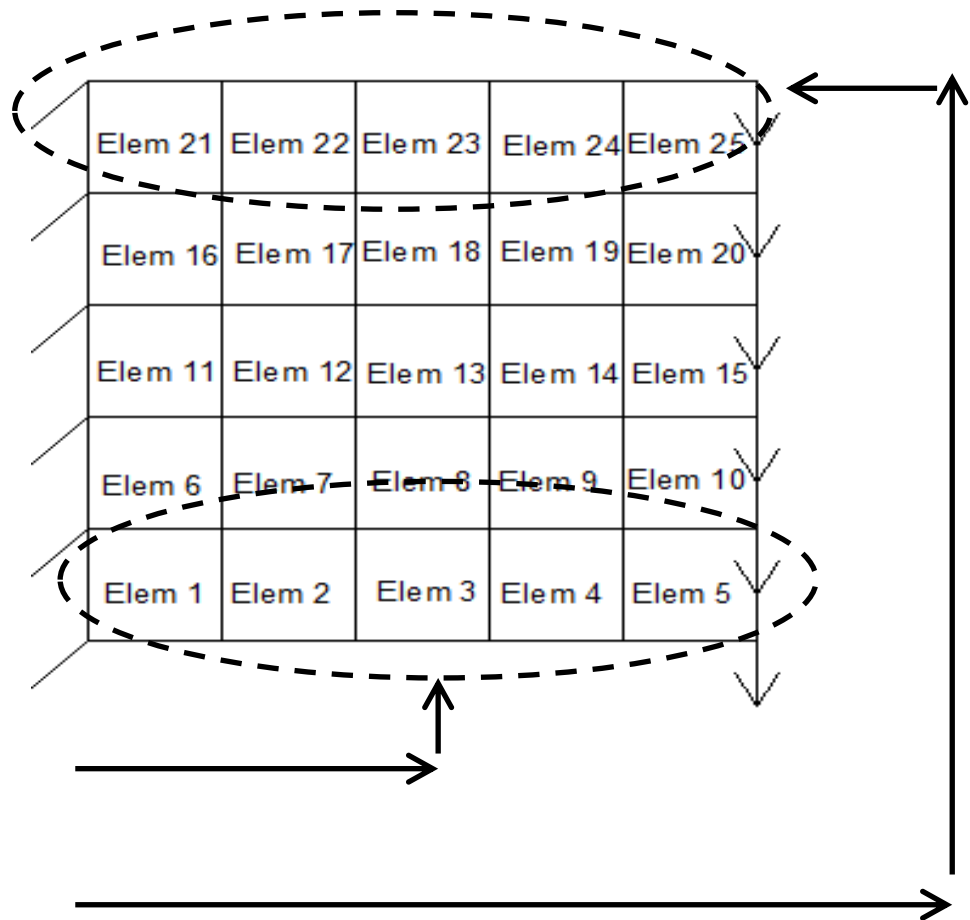


Επίδραση αποκόλλησης υλικών σε μικροδομή

Μείωση ακαμψίας μάκρο φορέα

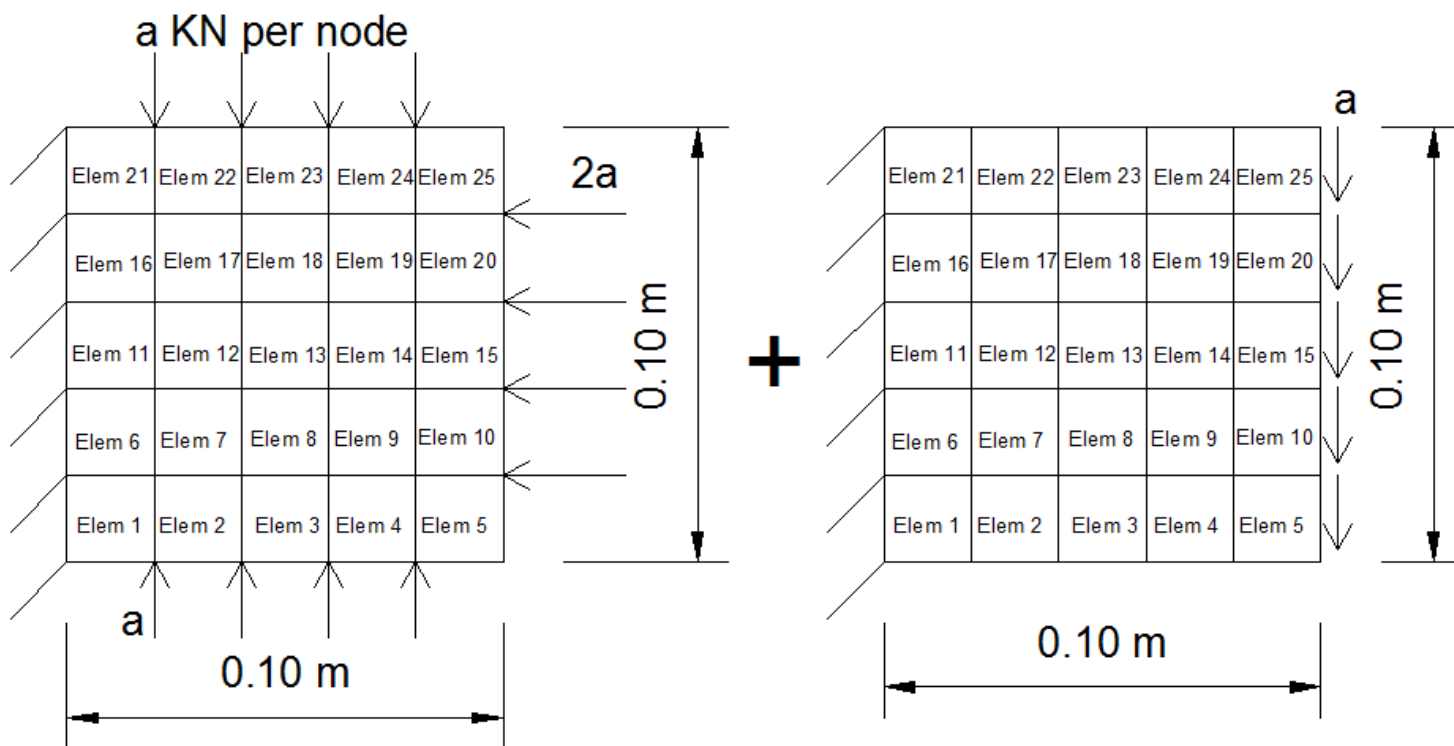


- Μάκρο στοιχεία α
- Μάκρο στοιχεία β



Παραδείγματα (2)

Συνδυασμένη φόρτιση σε μακροδομή

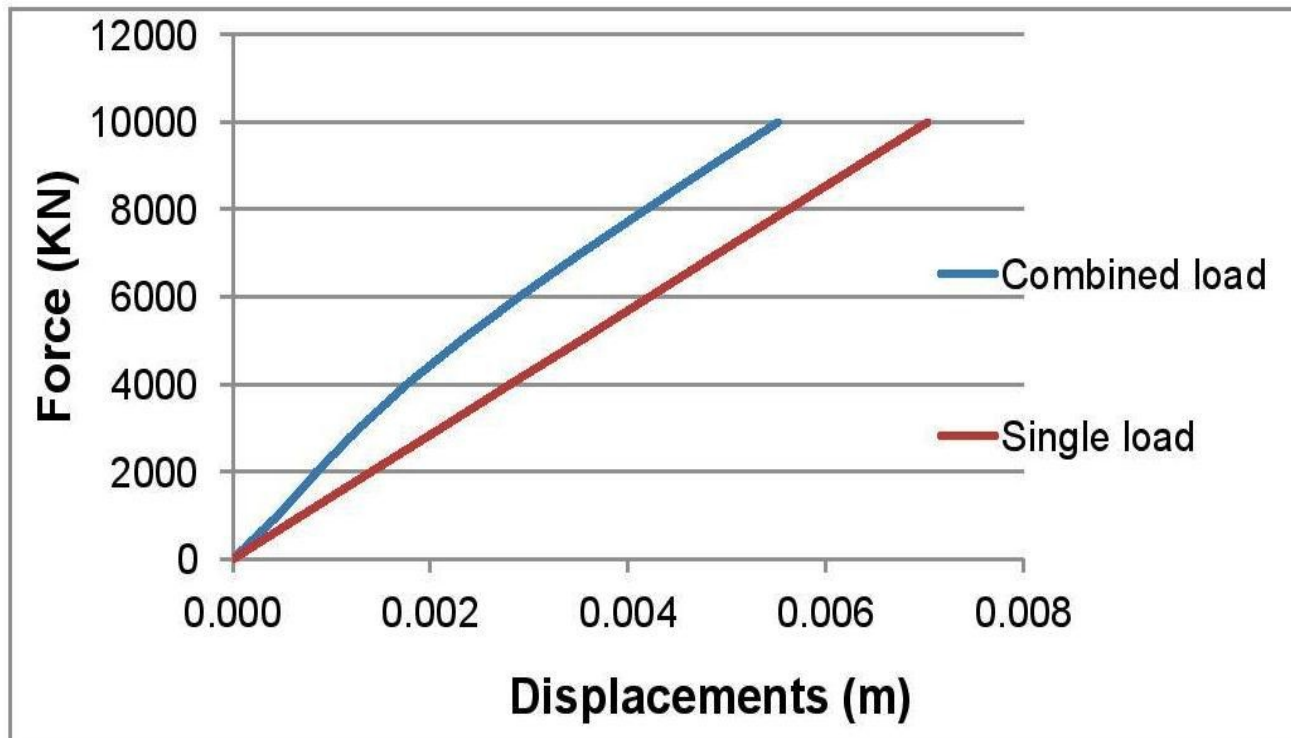


1^ο βήμα φόρτισης: καθολική θλίψη

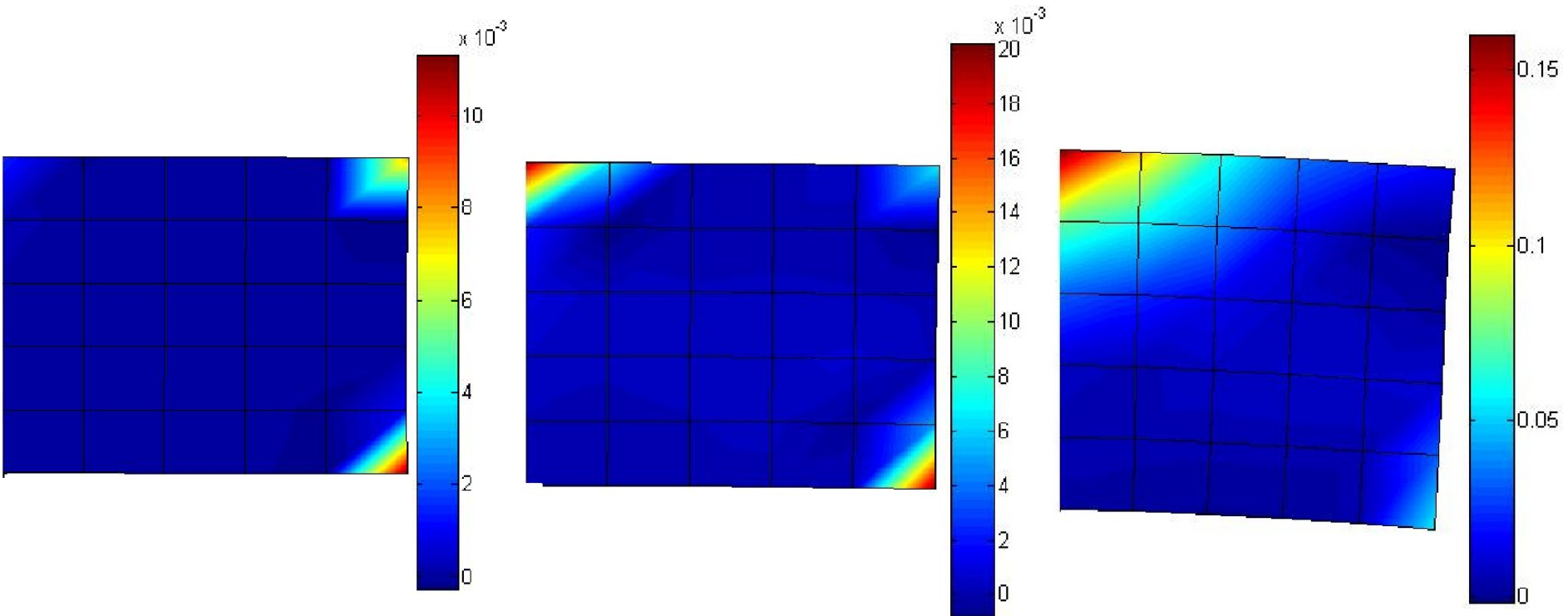
2^ο βήμα φόρτισης: διατμητική
φόρτιση

Αποτελέσματα

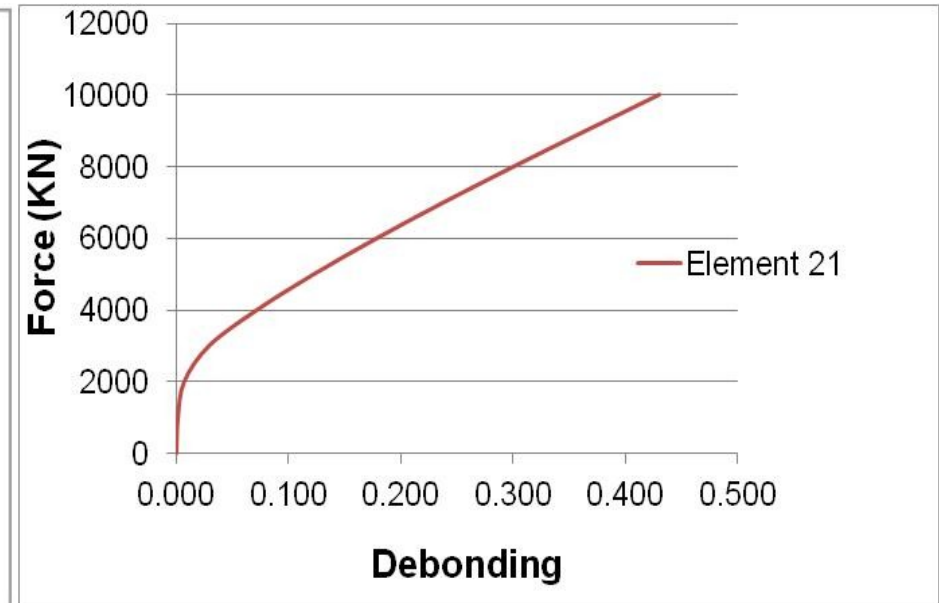
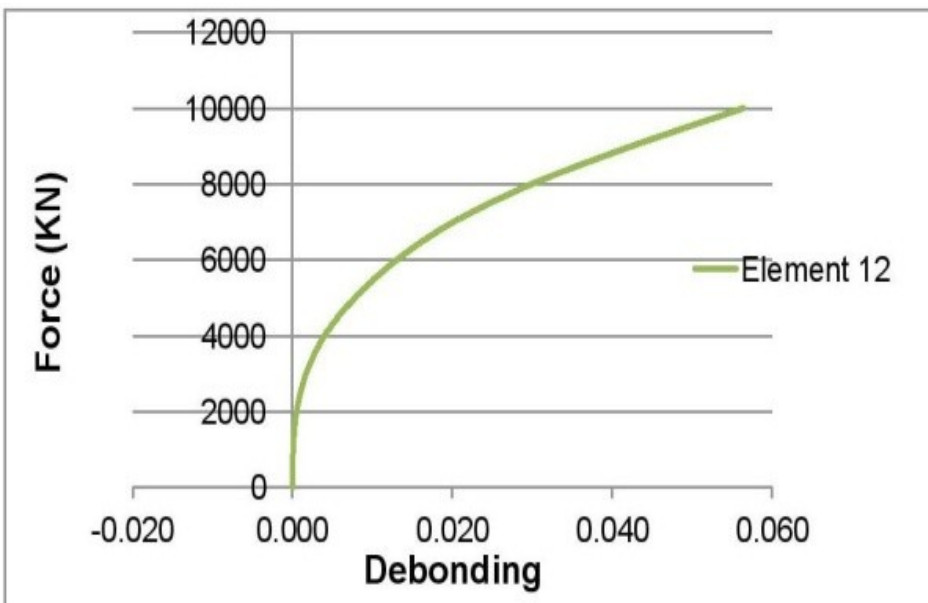
- Αλλαγή σε μικροδομή: Επαφή → Μη επαφή
- Μη γραμμικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Προβολή αποκόλλησης σε μακροδομή: συνδυασμένη φόρτιση



Διαγράμματα (μάκρο) φορτίου – αποκόλλησης: συνδυασμένη φόρτιση



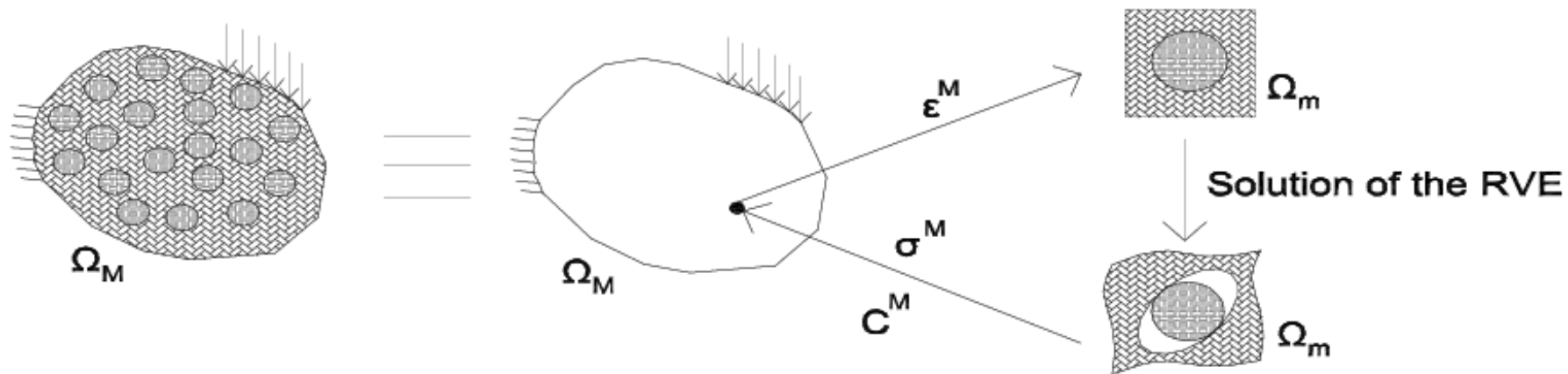
Υπολογιστική ομογενοποίηση πολλών κλιμάκων (FE²)

B. Τοιχοποιία

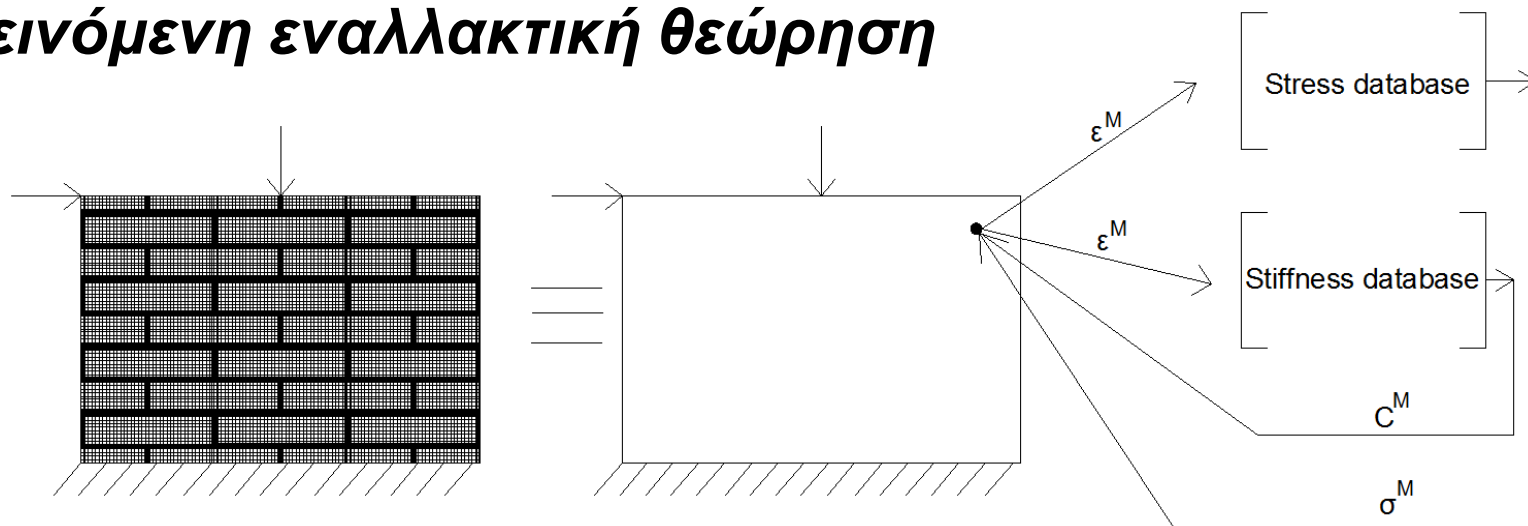
Σε συνεργασία με:

*Δρ. Μαρία Σταυρουλάκη, Επίκουρος Καθηγήτρια,
Πολυτεχνείο Κρήτης*

Υπολογιστική ομογενοποίηση πολλών κλιμάκων (FE²)



Προτεινόμενη εναλλακτική θεώρηση

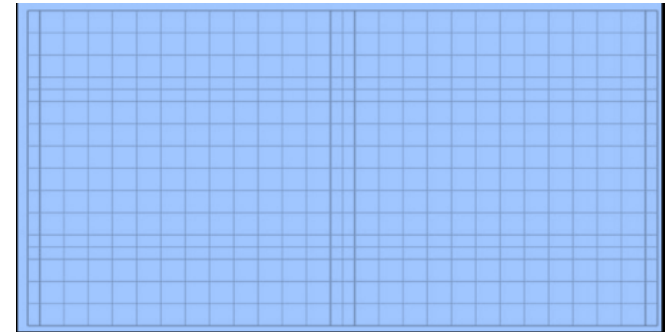
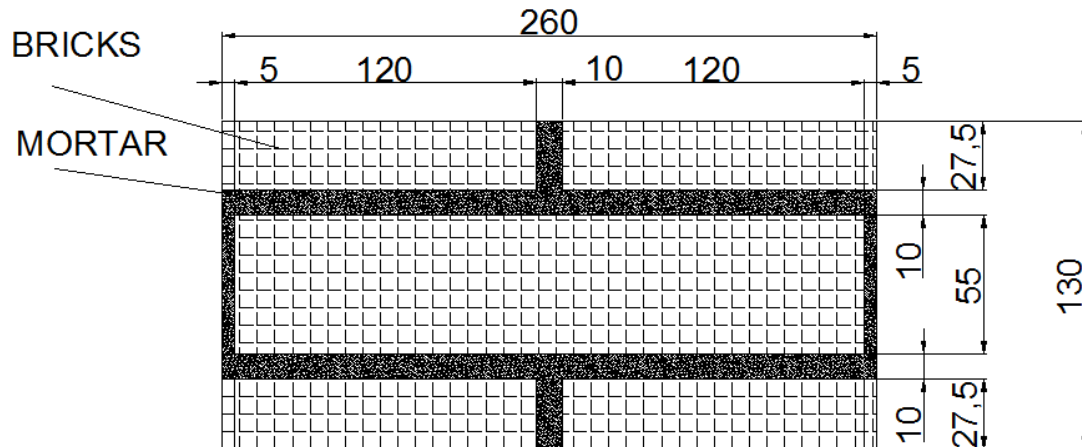


Βήματα εφαρμογής

1. Παραμετρική επίλυση RVE ξεχωριστά
- Χρήση εμπορικού πακέτου

Μη γραμμικός νόμος: σε κονίαμα τοιχοποιίας

2. Υπολογισμός μέσω των τάσεων-τροπών

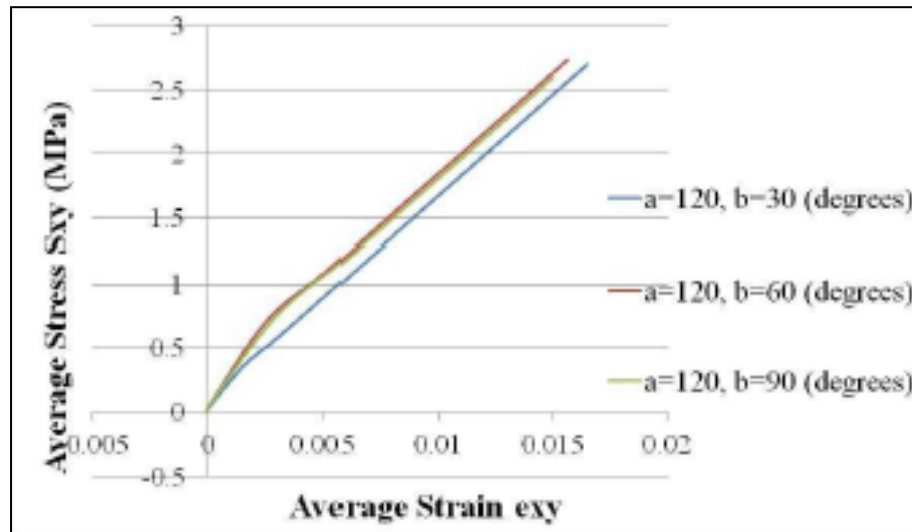
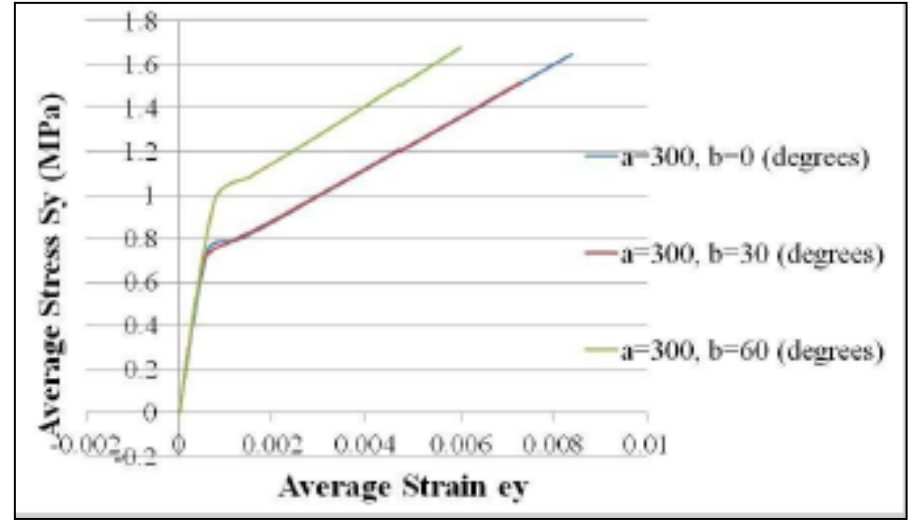
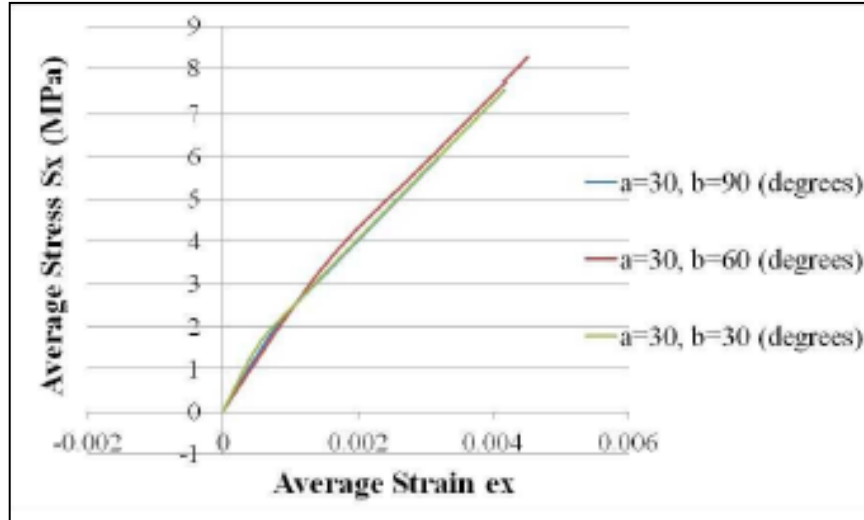


Βήματα εφαρμογής

3. Επανάληψη διαδικασίας για εύρεση μέσης ακαμψίας
4. Δημιουργία 2 βάσεων δεδομένων:
 - 1) Τροπές → Τάσεις
 - 2) Τροπές → Ακαμψία
5. Ενσωμάτωση καθολικού σχήματος σε κώδικα Matlab
6. Επαλήθευση με απ' ευθείας ετερογενές μάκρο μοντέλο, σε εμπορικό πακέτο (Δρ. Μαρία Σταυρουλάκη)

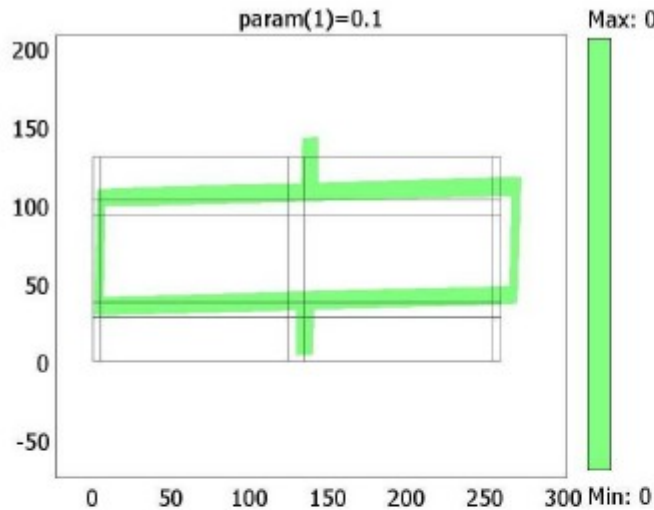
Αποτελέσματα: μικροδομή

Μη γραμμικά διαγράμματα τάσεων-τροπών

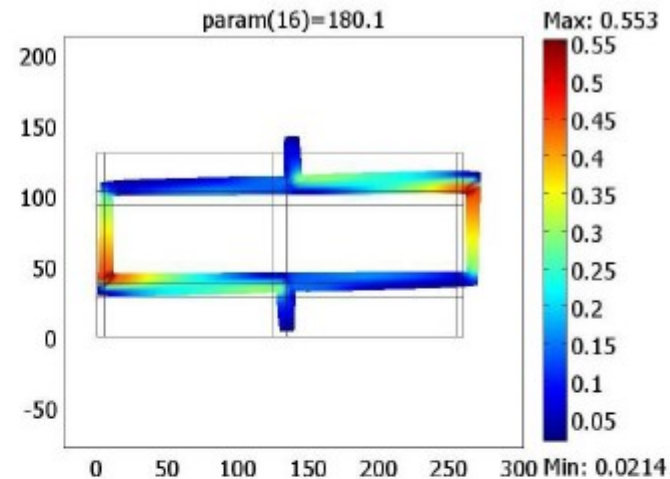


Αποτελέσματα: μικροδομή

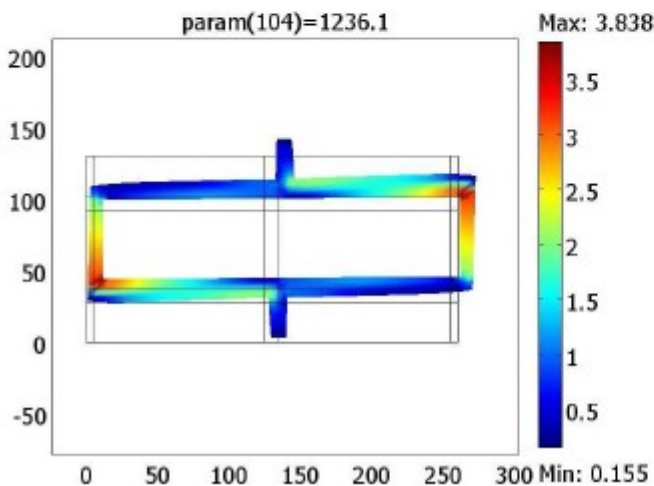
Πλαστικοποίηση σε κονίαμα



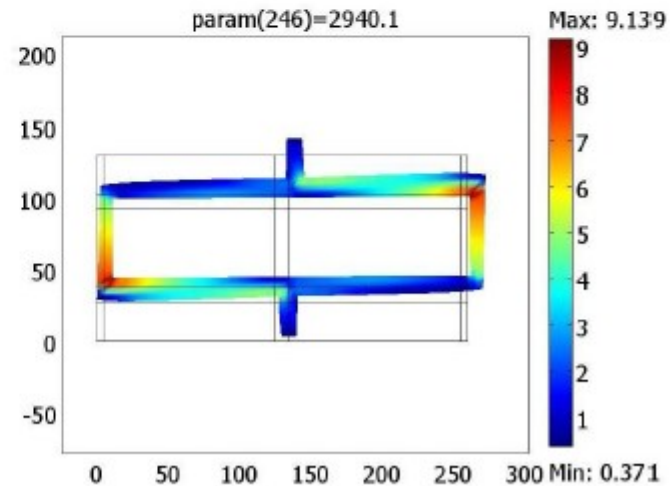
(a)



(b)



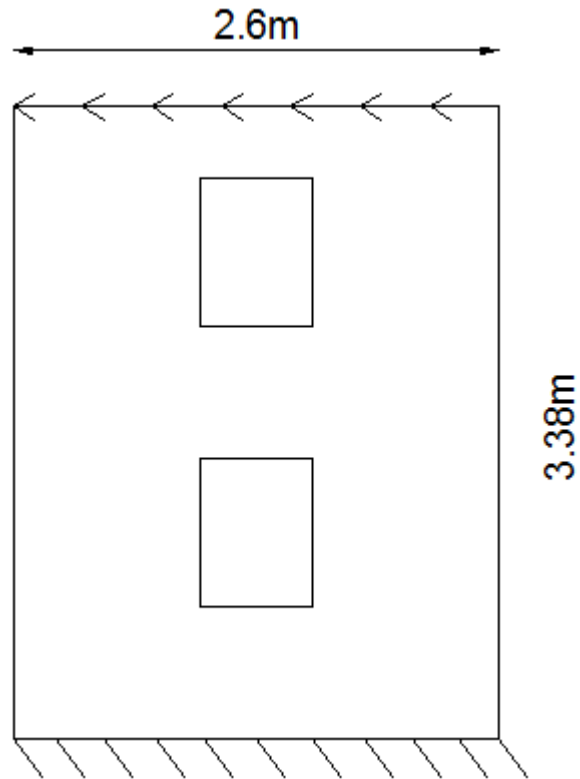
(c)



(d)

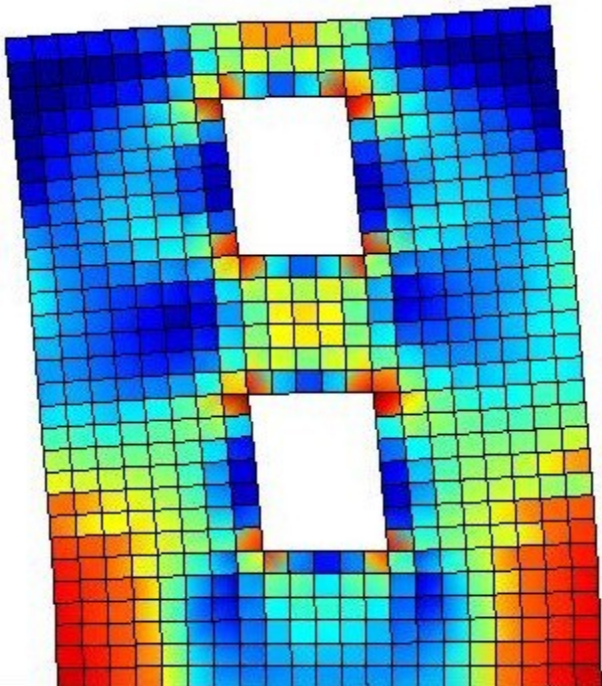
Αποτελέσματα: καθολική ομογενοποίηση

Τοιχοποιία με ανοίγματα

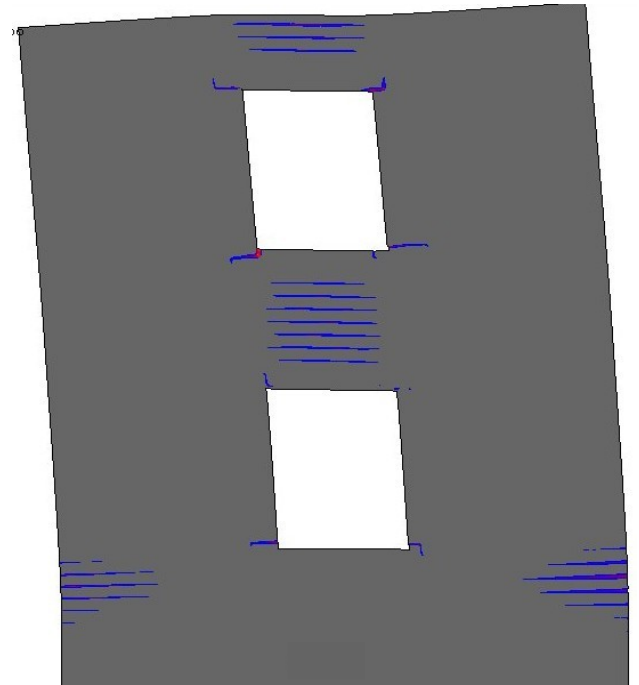


Περιοχές απομείωσης αντοχής

*Προτεινόμενο μοντέλο
ομογενοποίησης*

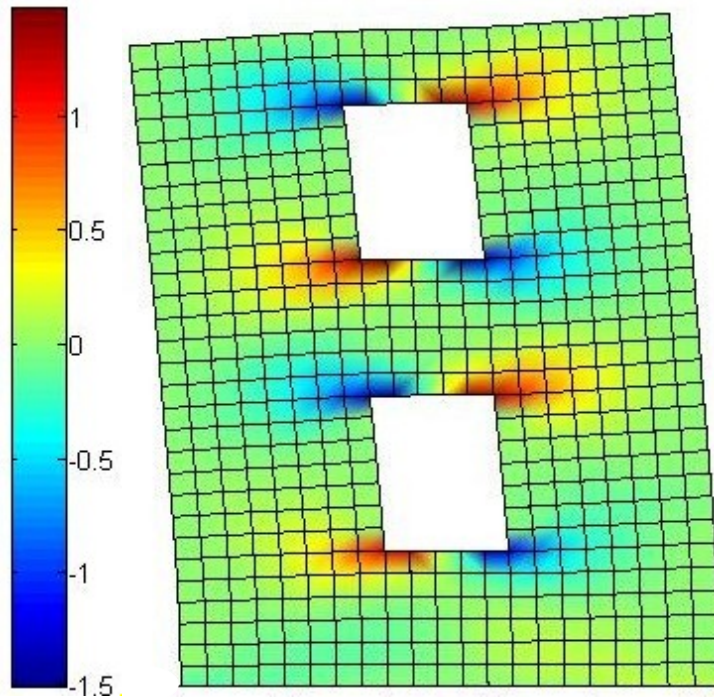


*Απ' ευθείας ετερογενές
μάκρο μοντέλο*

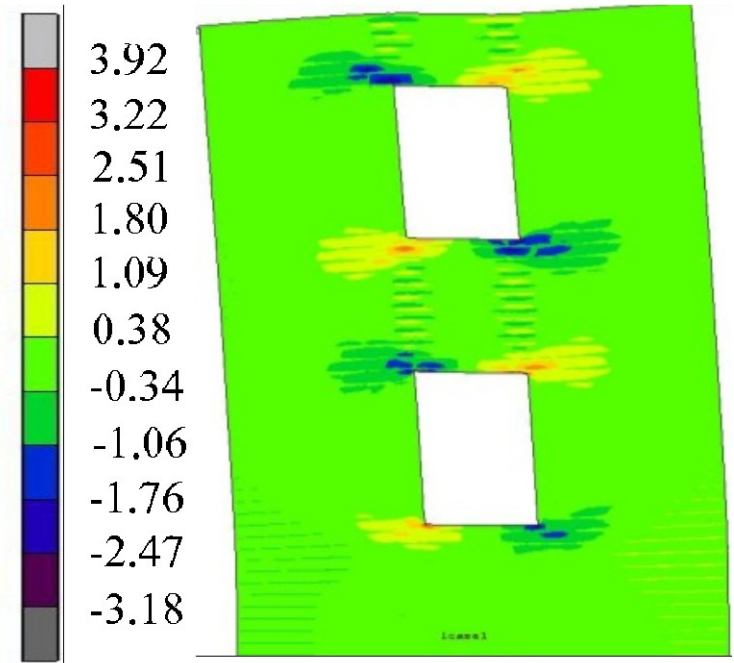


Σύγκριση 2 μοντέλων: τάσεις S_{xx}

*Προτεινόμενο μοντέλο
ομογενοποίησης*

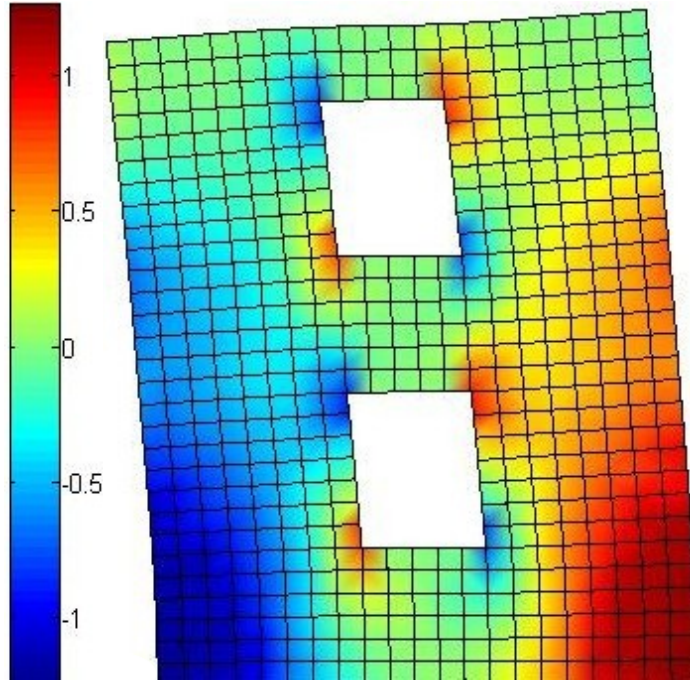


*Απ' ευθείας ετερογενές
μάκρο μοντέλο*

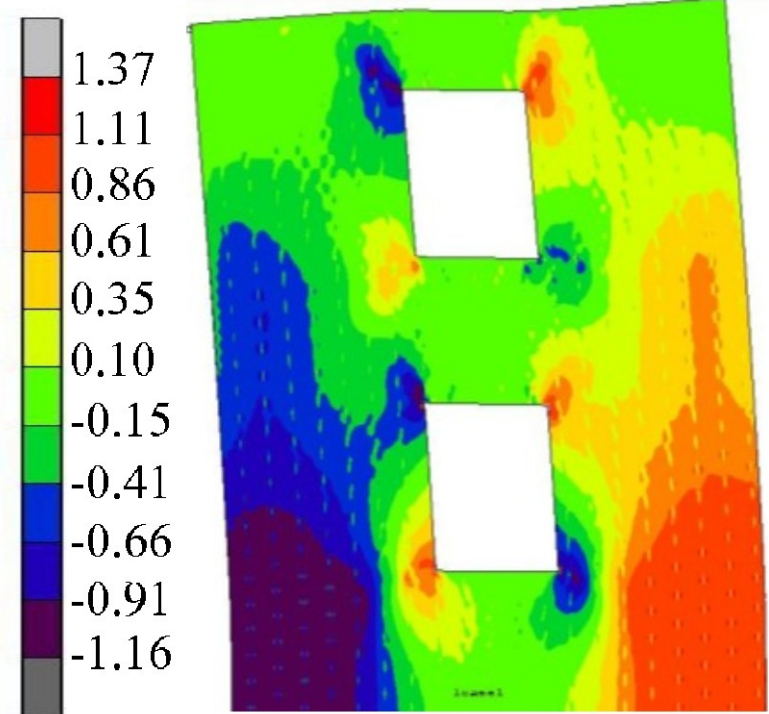


Σύγκριση 2 μοντέλων: τάσεις S_{yy}

*Προτεινόμενο μοντέλο
ομογενοποίησης*

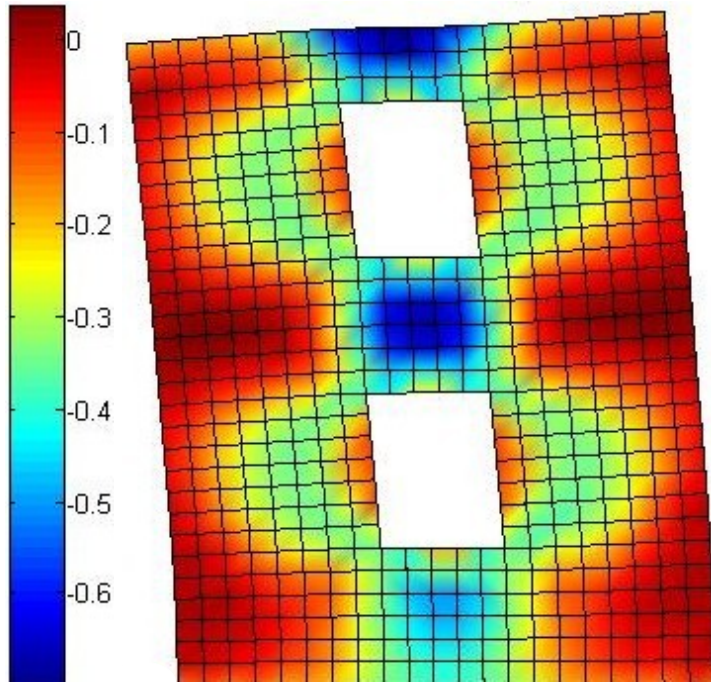


*Απ' ευθείας ετερογενές
μάκρο μοντέλο*

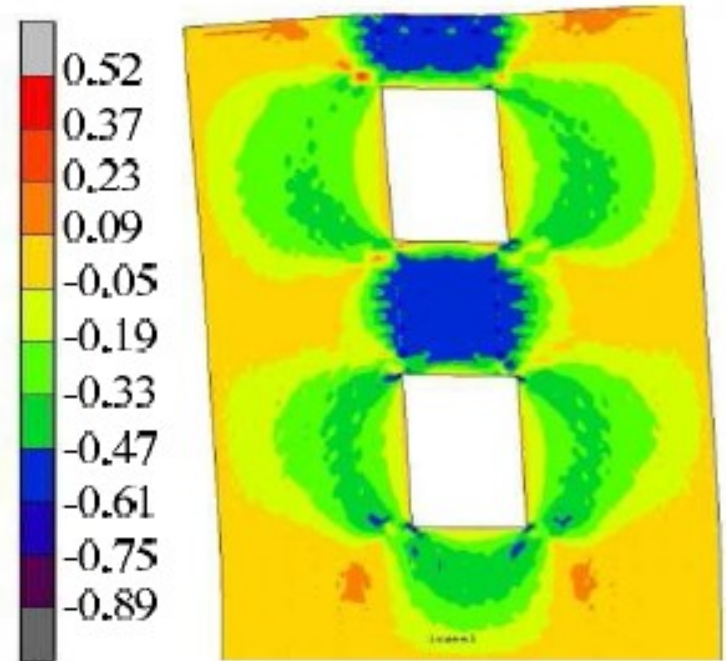


Σύγκριση 2 μοντέλων: τάσεις S_{xy}

*Προτεινόμενο μοντέλο
ομογενοποίησης*



*Απ' ευθείας ετερογενές
μάκρο μοντέλο*



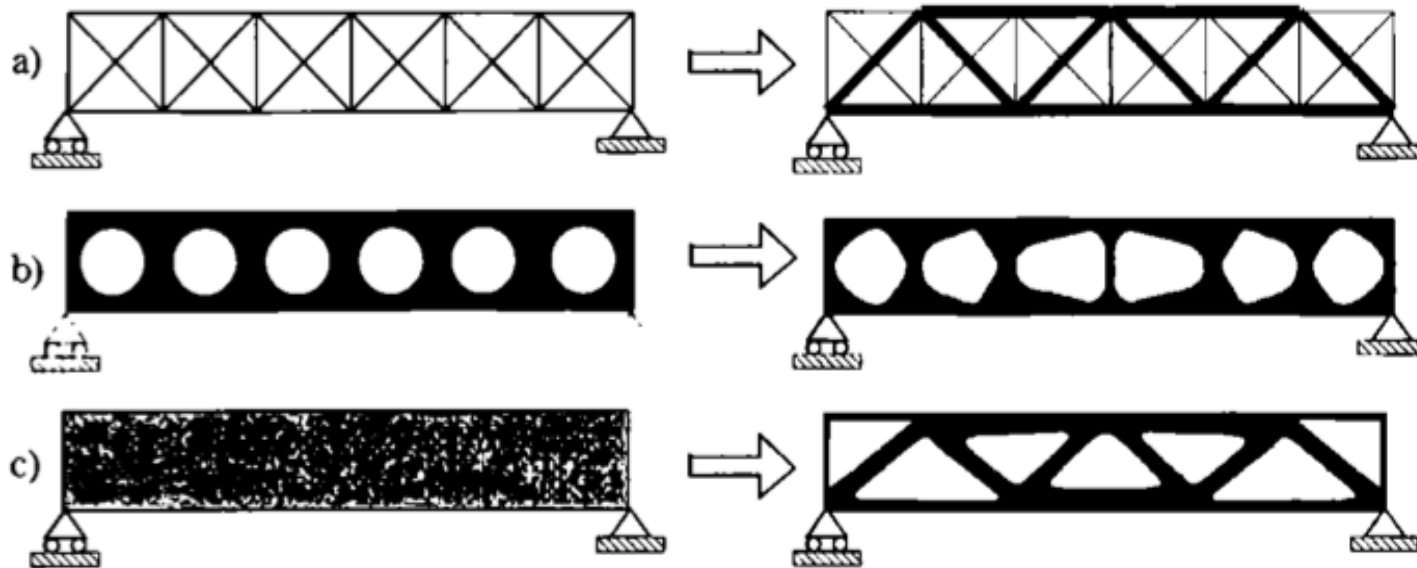
Τοπολογική βελτιστοποίηση και ομογενοποίηση

*Συνδυασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης –
ομογενοποίησης, για τον σχεδιασμό
αυξητικών υλικών*

Σε συνεργασία με:

*Νικόλαος Καμινάκης, Υποψήφιος Διδάκτορας,
Πολυτεχνείο Κρήτης*

Βελτιστοποίηση - Κατασκευές

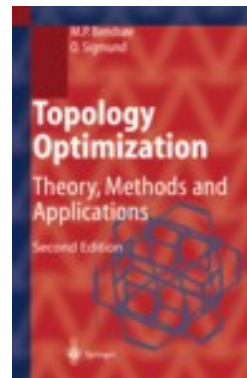


- a) Sizing optimization
- b) Shape optimization
- c) **Topology optimization**

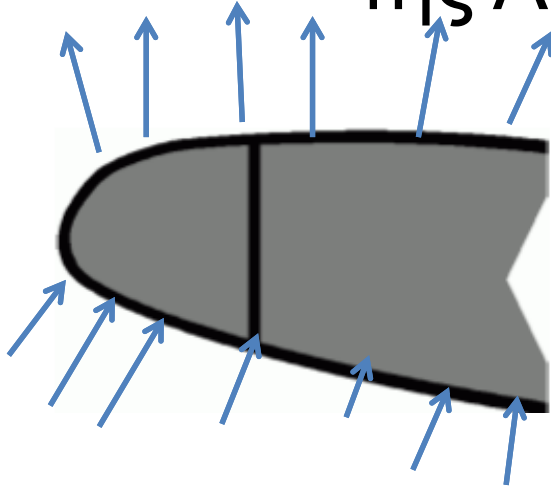
A lot of work has been done from
O. Sigmund
M. Bendsoe

<http://www.topopt.dtu.dk>

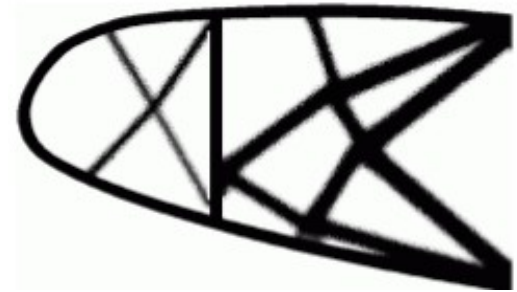
- “A 99 line Topology optimization Code, written in Matlab”, 2001
- Topology Optimization, Theory Methods and Applications



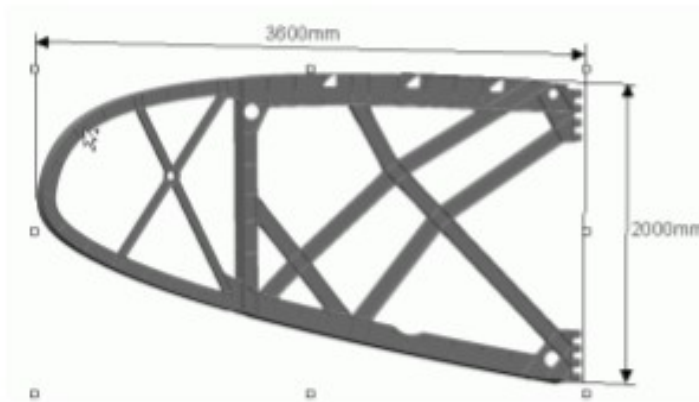
Τοπολογική βελτιστοποίηση: Σχεδιασμός φτερού της Airbus, A380



1. Design



2. Optimized Topology



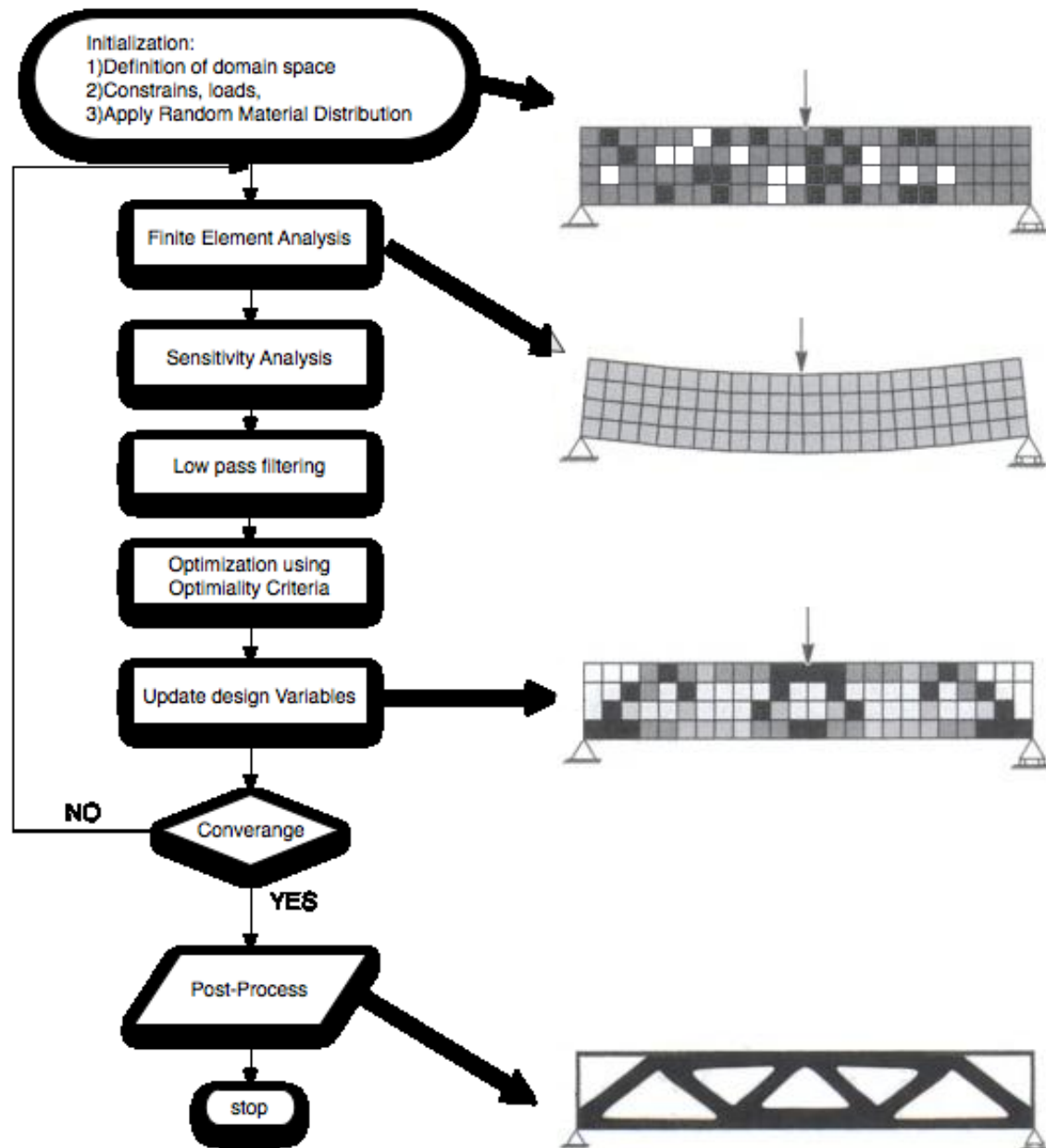
3. Actual Structure



Manufactured wing structure

4. Manufactured wing

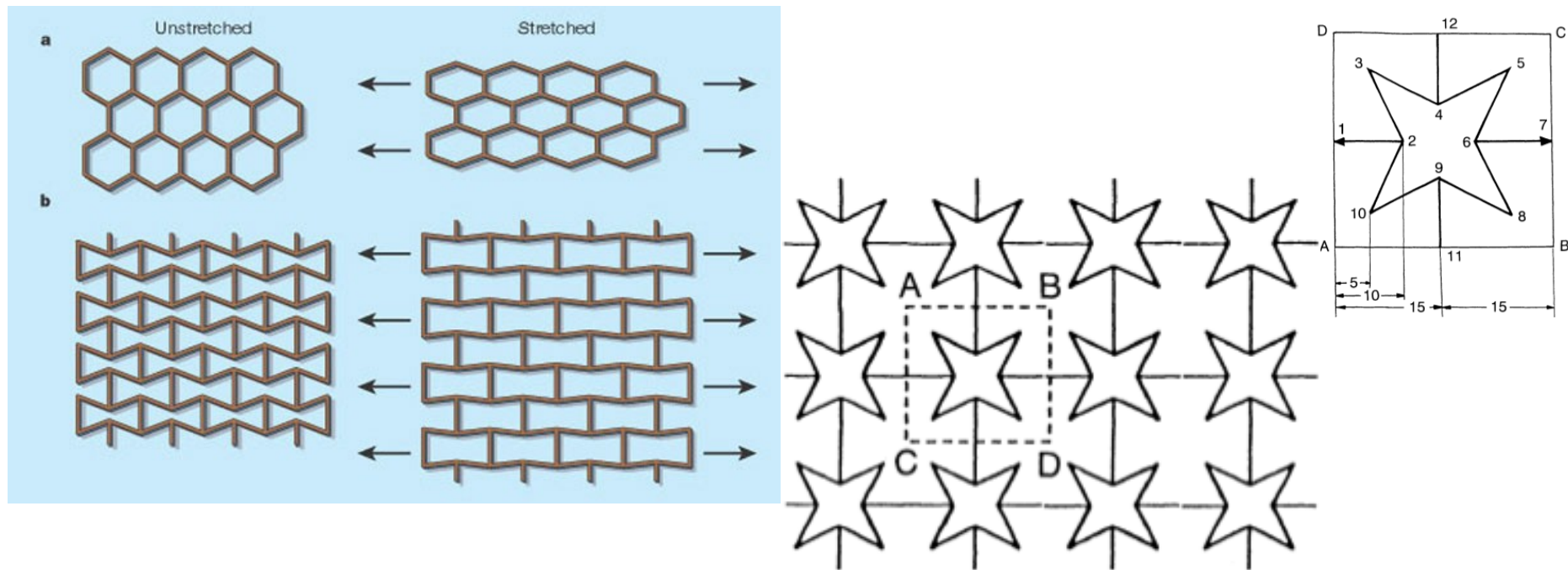
Τοπολογική βελτιστοποίηση: Σχηματικά



Αυξητικά υλικά

Αρνητικός λόγος Poisson

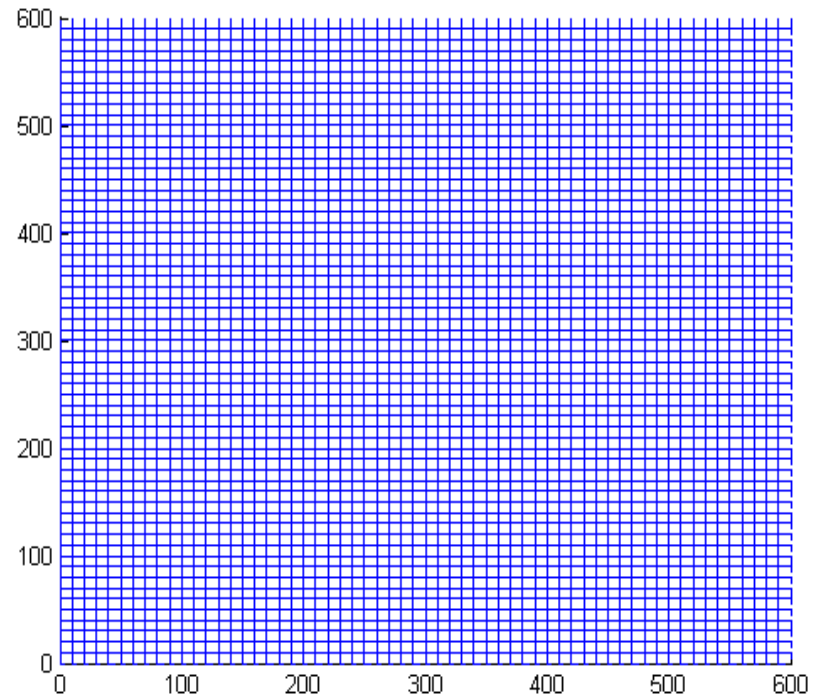
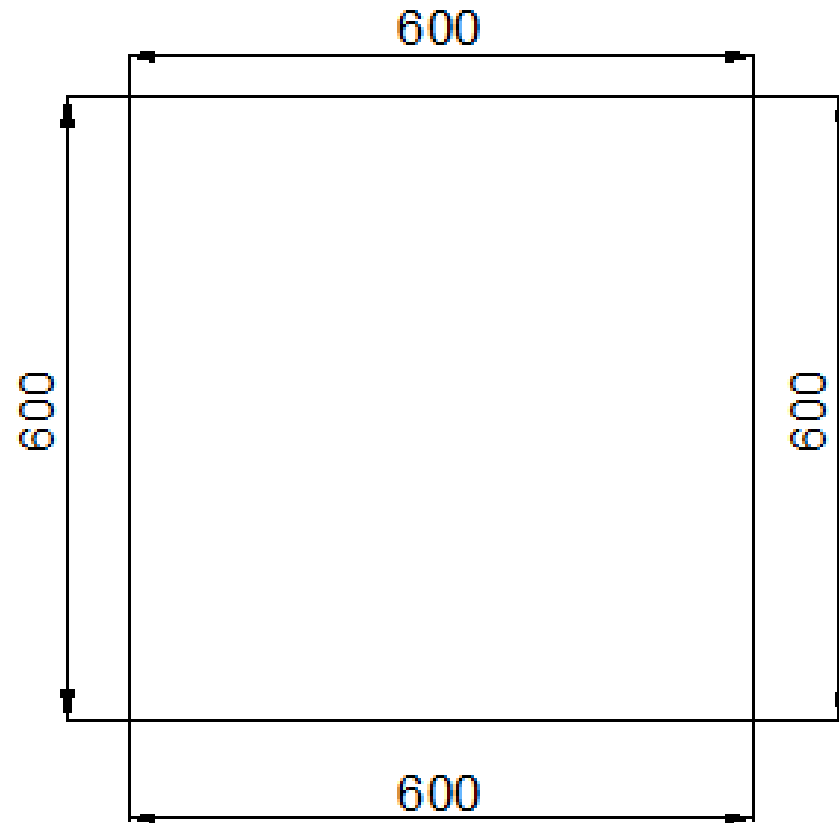
Παράδειγμα: Theocharis, Stavrulakis, Panagiotopoulos, 1997



Προτεινόμενη ιδέα

- 1) Τοπολογική βελτιστοποίηση: Σχεδιασμός <-----^
αυξητικού υλικού
 - 2) Επανάληψη διαδικασίας με γραμμική ομογενοποίηση
- Αρχικό σημείο: Υπάρχει υλικό (σκληρό υλικό) / Δεν υπάρχει υλικό (μαλακό υλικό) ----->
 - Στόχος: Εύρεση ομογενοποιημένων ιδιοτήτων →
Επαλήθευση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης

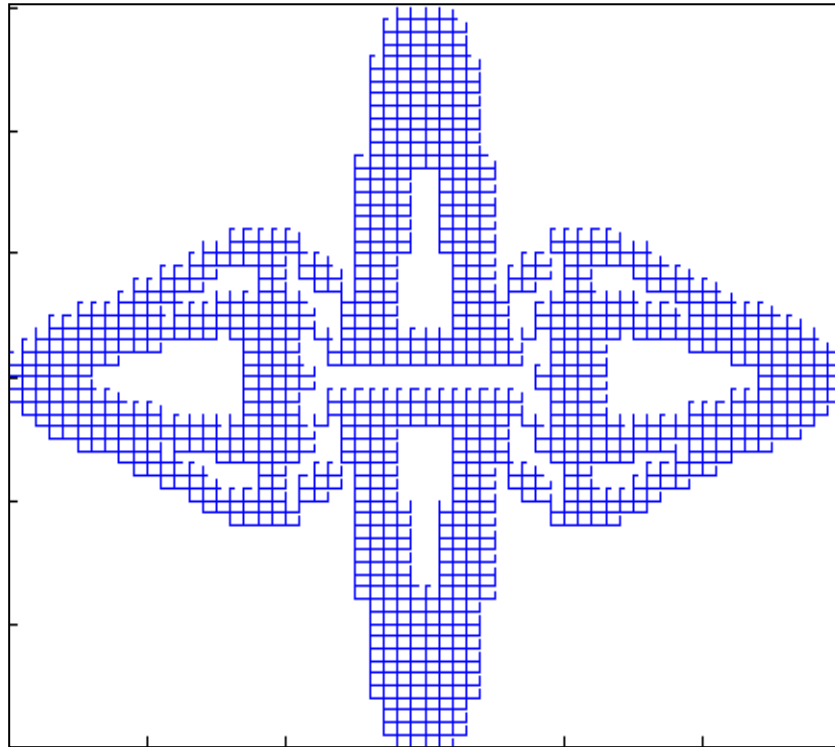
Γεωμετρία δίκτυο πετρερασμένων στοιχείων



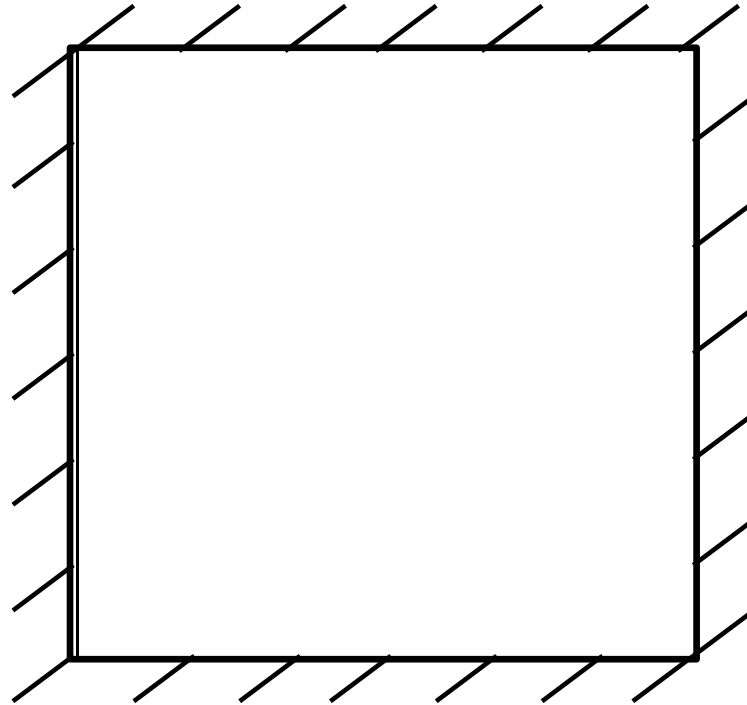
3600 στοιχεία επίπεδης έντασης

Κατανομή σκληρού-μαλακού υλικού: δίνεται από
βελτιστοποίηση

Αυτή λαμβάνεται σε ομογενοποίηση



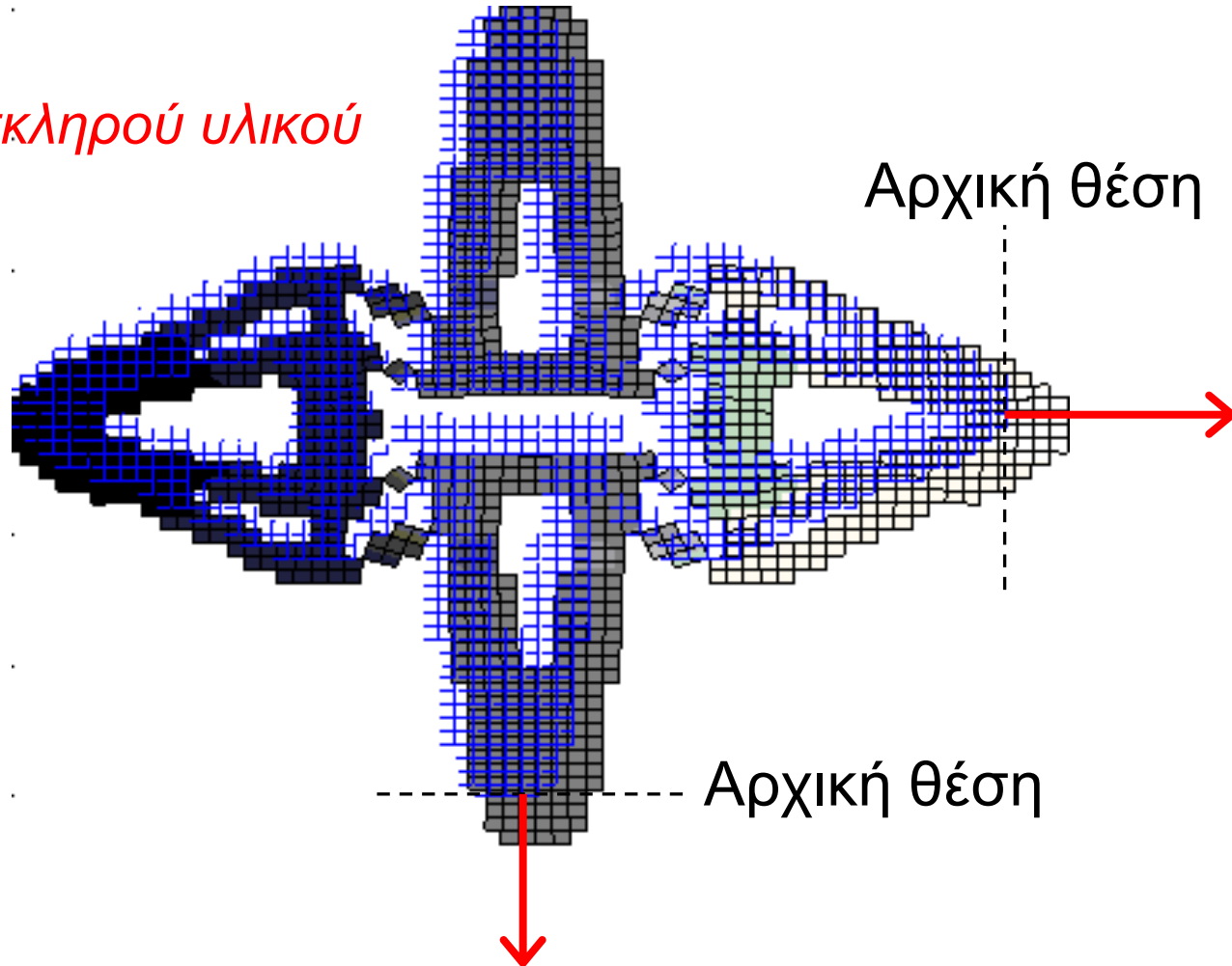
Παράδειγμα (1)



Φόρτιση σε ομογενοποίηση:
γραμμικές συνοριακές συνθήκες

Αυξητική συμπεριφορά

Μετατόπιση σκληρού υλικού

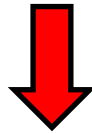


Αποτελέσματα

Με δεδομένα:

A. Σκληρό υλικό (υπάρχει σε διαμόρφωση): $E=1$, $\nu=0.3$

B. Μαλακό υλικό (δεν υπάρχει σε διαμόρφωση):
 $E=0.007$, $\nu=0.007$



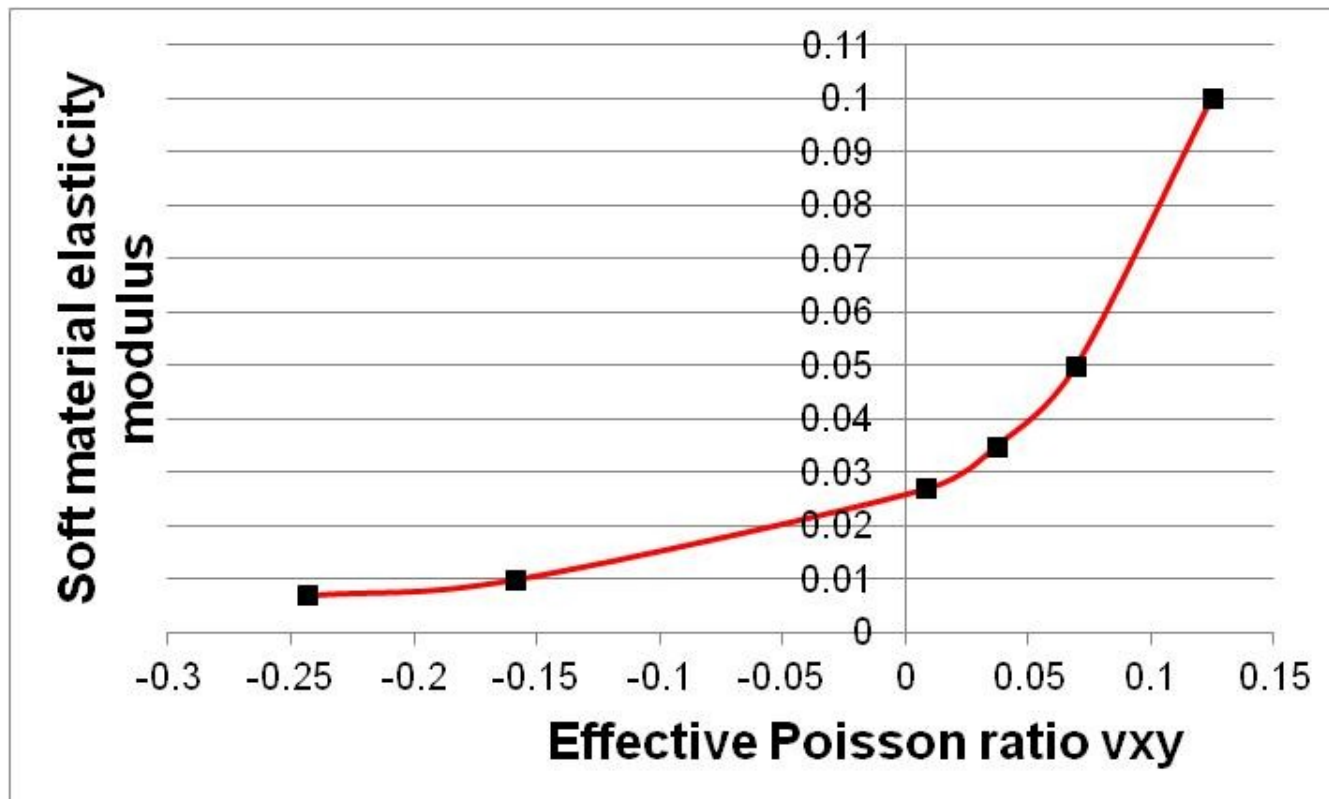
Ομογενοποιημένες ιδιότητες:

E_{xx}	E_{yy}	ν_{xy}	ν_{yx}	G_{xy}
0.066	0.067	-0.2433	-0.2484	0.0117

Ικανοποιητική σύγκριση με αποτελέσματα βελτιστοποίησης:
Ομογενοποιημένος λόγος Poisson = -0.192

Διακύμανση ιδιοτήτων μαλακού υλικού ως προς λόγο Poisson

Σκληρό υλικό: $E=1$, $\nu=0.3$

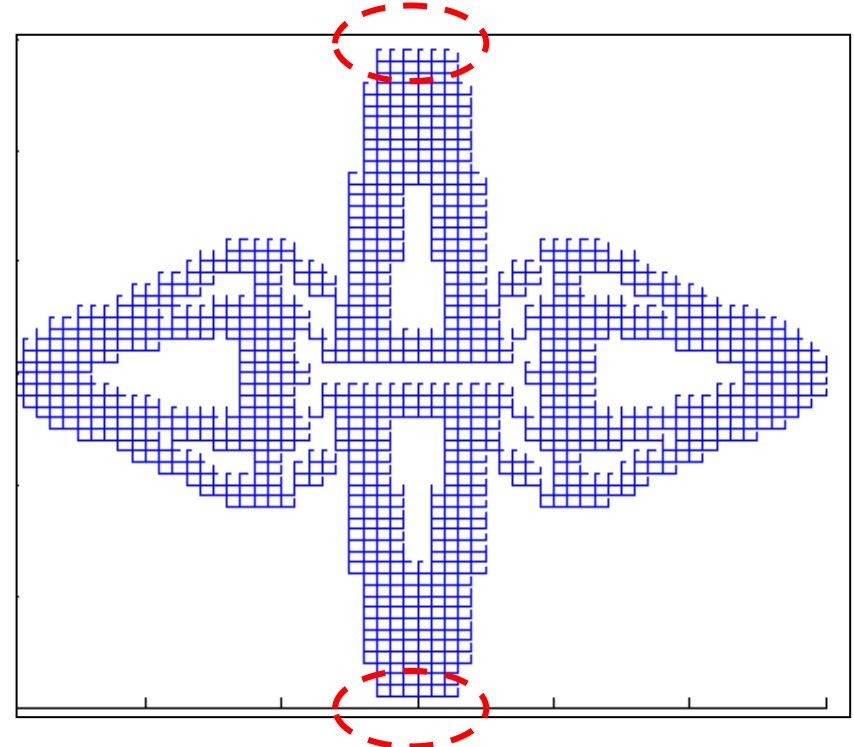
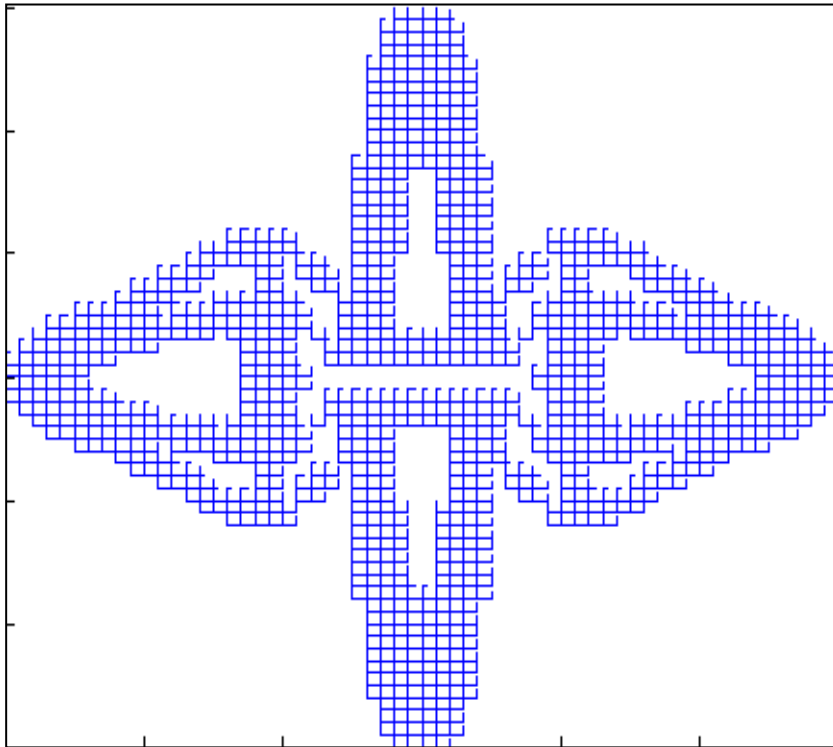


Παράδειγμα (2)

Εναλλακτική θεώρηση ομογενοποίησης:

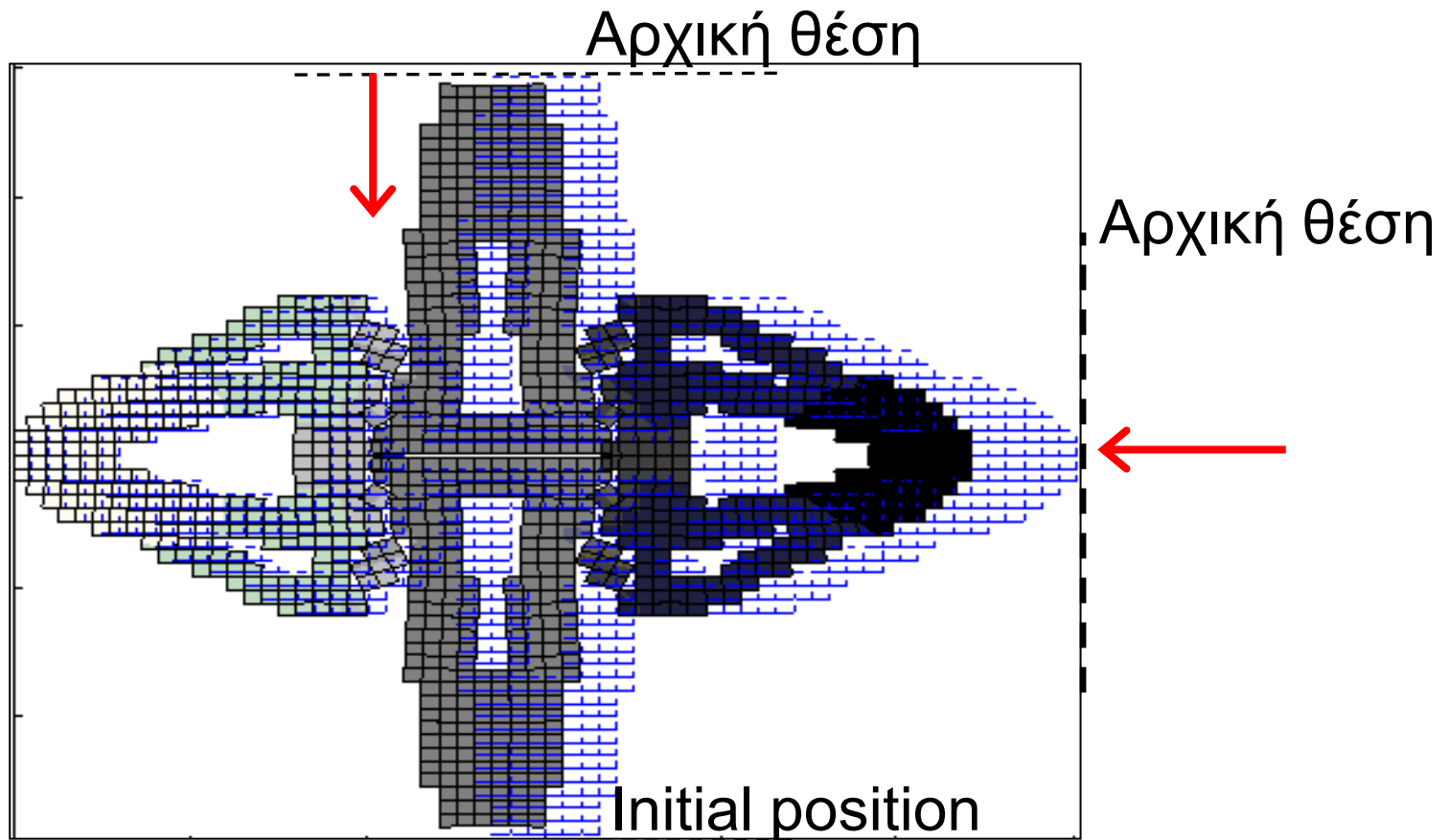
Αφαίρεση σκληρού υλικού από σύνορα φορέα →

Ελεύθερο να κινηθεί εντός του φορέα



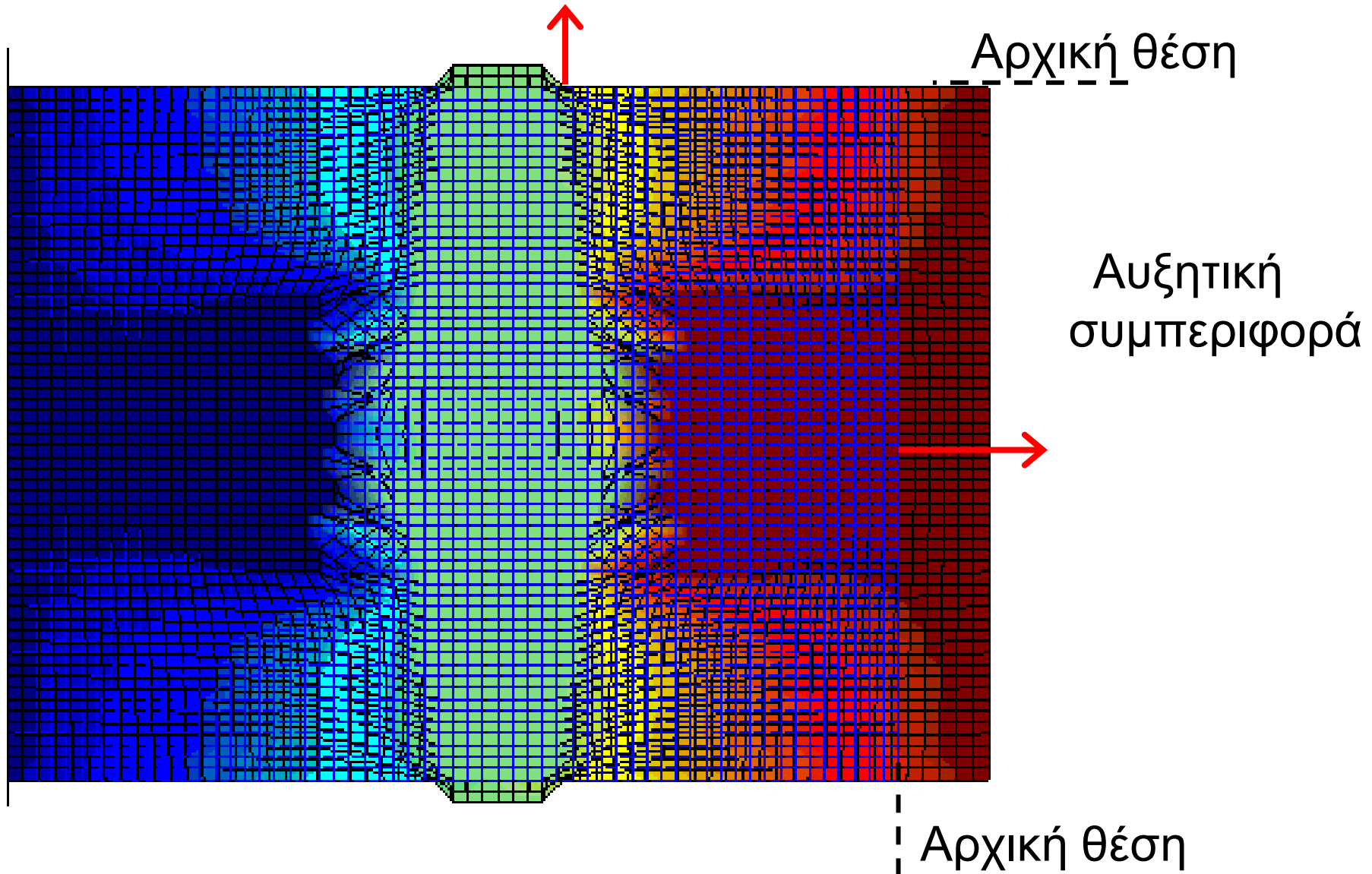
Αποτελέσματα

Αυξητική συμπεριφορά



- Ομογενοποιημένος λόγος Poisson: -0.18
- Καλή σύγκριση με βελτιστοποίηση: -0.192

Μετακινήσεις μαλακού και σκληρού υλικού



Συμπεράσματα

- Ανάπτυξη μεθόδων μη γραμμικής ομογενοποίησης
- Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων/αυξητικών υλικών, τοιχοποιίας
- Ενσωμάτωση νόμων επαφής, νόμων αστοχίας τοιχοποιίας, τοπολογικής βελτιστοποίησης

Μελλοντική έρευνα

- Μελέτη localization
 - Διακριτή μακροδομή (XFEM)
 - Αντοχή σε εφελκυσμό
 - Σύνδεση κλιμάκων
- Ενσωμάτωση ομογενοποίησης σε κώδικα βελτιστοποίησης

+

Προσθήκη μη γραμμικών νόμων (επαφή, μεγάλες μετατοπίσεις)



Κήποι Αννοβέρου

Σας ευχαριστώ πολύ!