



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING
SHIPBUILDING TECHNOLOGY LABORATORY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF A STEEL-TO-COMPOSITE ADHESIVE JOINT UNDER BENDING MOMENTS

Andrianakis Andreas



Δομή της Παρουσίασης

- Σκοπός της εργασίας.
- Λίγα λόγια για συνδέσεις με κολλητικά μέσα.
- Εξήγηση Cohesive Zone Model.
- Περιγραφή κατασκευής δοκιμίων και πειραματικής διαδικασίας.
- Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων από πειραματική διαδικασία.
- Παρουσίαση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και παράμετροι αυτού.
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων του μοντέλου και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα.
- Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



Σκοπός της Εργασίας

- Πειραματική μελέτη σύνδεσης με κολλητικό μέσο.
- Εξαγωγή cohesive laws
- Εισαγωγή τους σε Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων
- Μέσω της σύγκρισης πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων θα γίνει έλεγχος ορθότητας της διαδικασίας

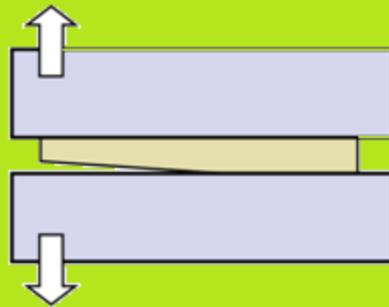


Σύνδεση με κολλητικά μέσα

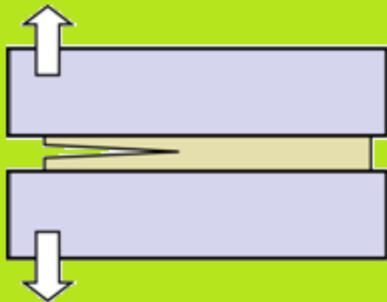
- Αρχαιότερο εύρημα σύνδεσης υλικών με κολλητικό μέσο το 200.000 π.Χ.
- Τον 20^ο αιώνα ξεκινάει η βιομηχανική εκμετάλλευση τους
- Σημαντικά πλεονεκτήματα: μειωμένο βάρος, συγκόλληση ανόμοιων υλικών, μονωτικές ιδιότητες, πιο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων
- Σημαντικά μειονεκτήματα: ειδική προετοιμασία επιφανειών, μικρότερη αντοχή από μέταλλα, ιδιότητες εξαρτώνται έντονα από θερμοκρασία



Αστοχία συνδέσεων με κολλητικά μέσα

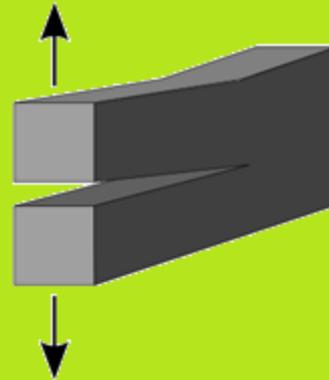


Interfacial Failure

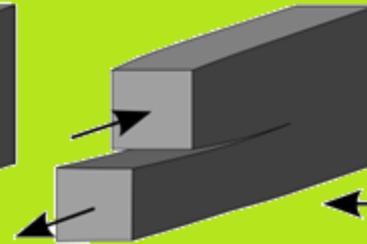


Cohesive Failure

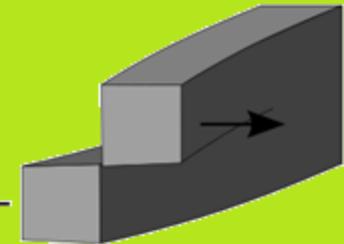
Τρεις τρόποι σχετικής μετατόπισης των επιφανειών της ρωγμής:



Mode I



Mode II



Mode III



Cohesive Zone Model

Cohesive laws: νόμοι τάσεων-μετατοπίσεων

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_n(\delta_n, \delta_t) \\ \sigma_t &= \sigma_t(\delta_n, \delta_t) \end{aligned} \right\} \text{ Cohesive Law Concept} \left| \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_n(\delta_n) \\ \sigma_t &= \sigma_t(\delta_t) \end{aligned} \right.$$

Δυνατός ο υπολογισμός των τάσεων μέσω του J-integral:

$$J = \int_0^{\delta_n^*} \sigma_n(\delta_n, \delta_t) d\delta_n + \int_0^{\delta_t^*} \sigma_t(\delta_n, \delta_t) d\delta_t \quad [\text{Sørensen B.F., Kirkegaard P.}]$$

Mode I

$$\sigma_n(\delta_n^*) = \frac{\partial J}{\partial \delta_n^*}$$

Mode II

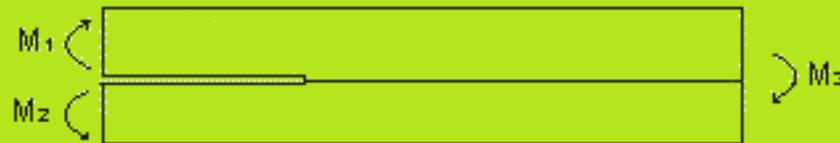
$$\sigma_t(\delta_t^*) = \frac{\partial J}{\partial \delta_t^*}$$



Κατασκευή Δοκιμίων

○ Δοκίμιο DCB-UBM

Σύνδεση δύο ανόμοιων υλικών με κολλητικό μέσο.



Υλικά:

- CFRP 22 στρώσεις από CST200 composite material textile

	Ply thickness	Weight
CST	0.4mm	200gr/m ²

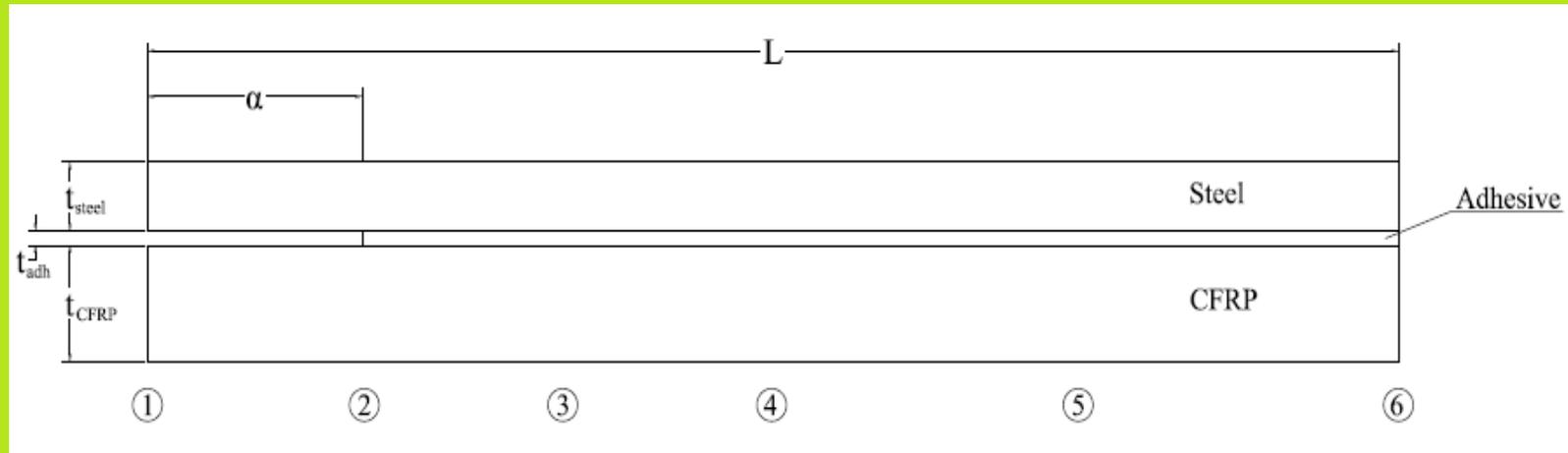
- Steel

- Araldite 2015



Κατασκευή Δοκιμίων

Αρχική Γεωμετρία Δοκιμίου

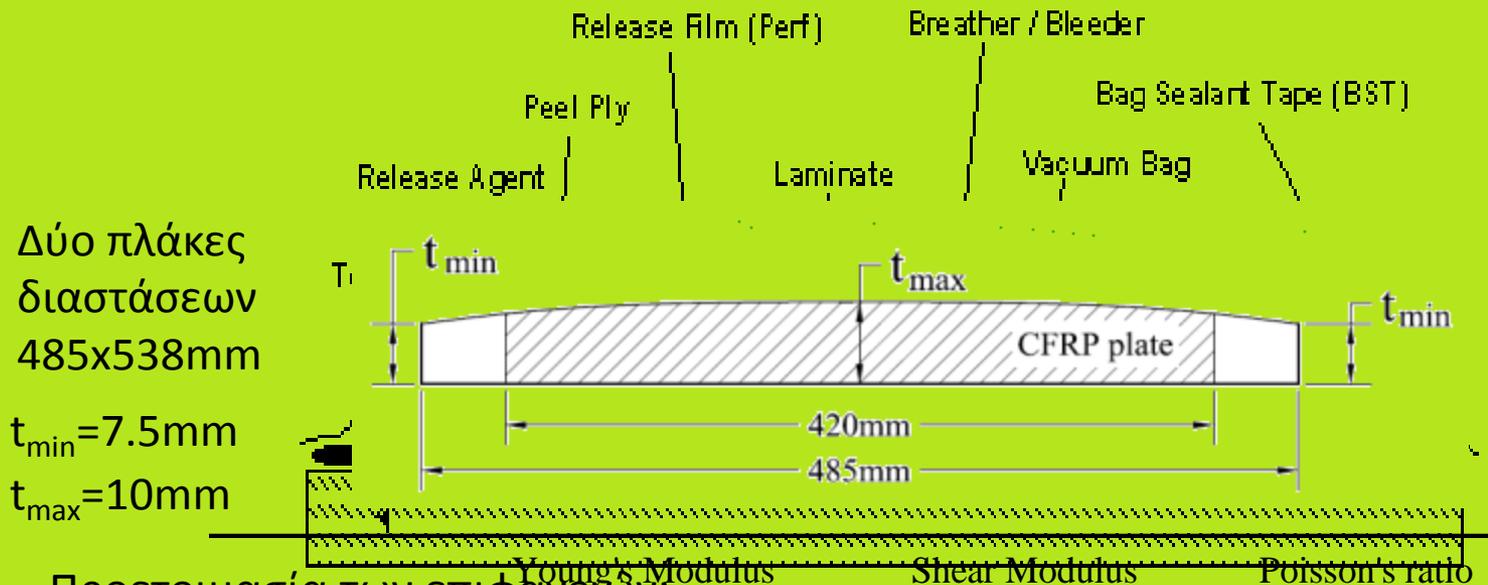


t_{CFRP} (mm)	t_{steel} (mm)	t_{adh} (mm)	L (mm)	α (mm)	w (mm)
9.5	5	0.9	420	60	30



Κατασκευή Δοκιμίων

Vacuum Bagging



Προετοιμασία των επιφανειών:

Αμμοβολή του χάλυβα και τρίψιμο με γυαλόχαρτο του CFRP.
Καθαρισμός επιφανειών από υδρολείμματα ελαίων με την χρήση αετών και Loctite 7063.

Steel $E=170\text{GPa}$ $G=65\text{GPa}$ $\nu=0.3$

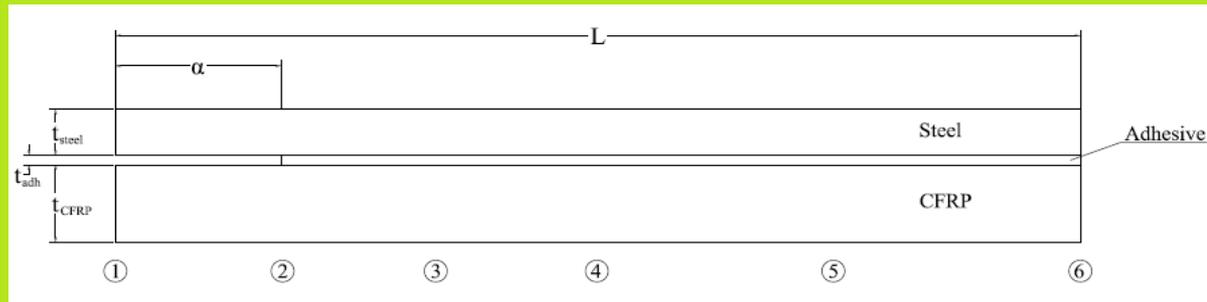
Τα δοκίμια κόπηκαν από τις πλάκες με χρήση water jet cutting.

Adhesive $E=2\text{GPa}$ $G=0.9\text{GPa}$ $\nu=0.33$



Κατασκευή Δοκιμίων

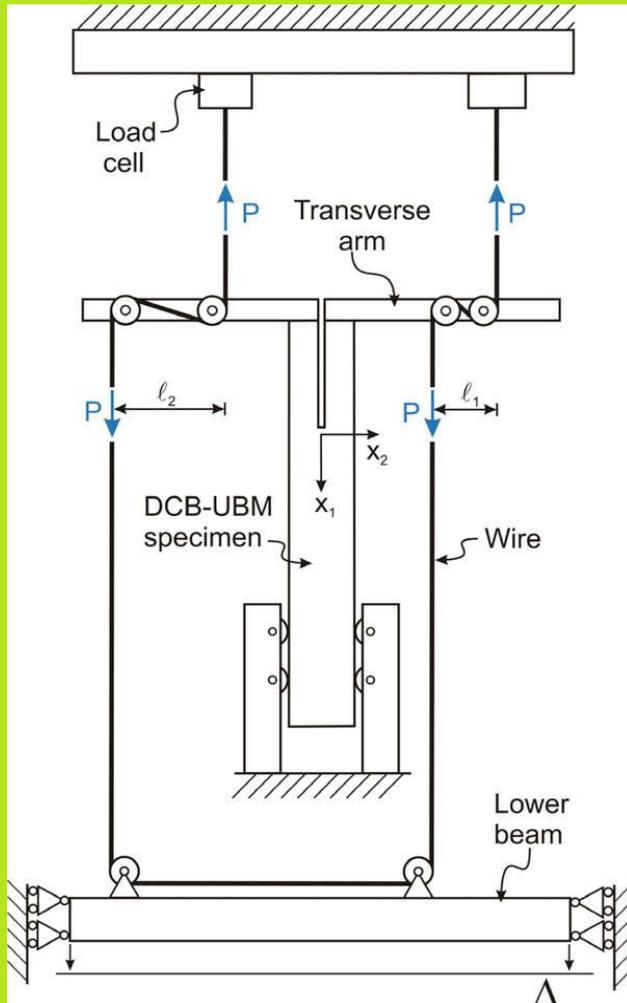
Τελική Μέση Γεωμετρία Δοκιμίου



t_{CFRP} (mm)	t_{steel} (mm)	t_{adh} (mm)	L (mm)	α (mm)	w (mm)
9.5	5	0.9	419	60	30



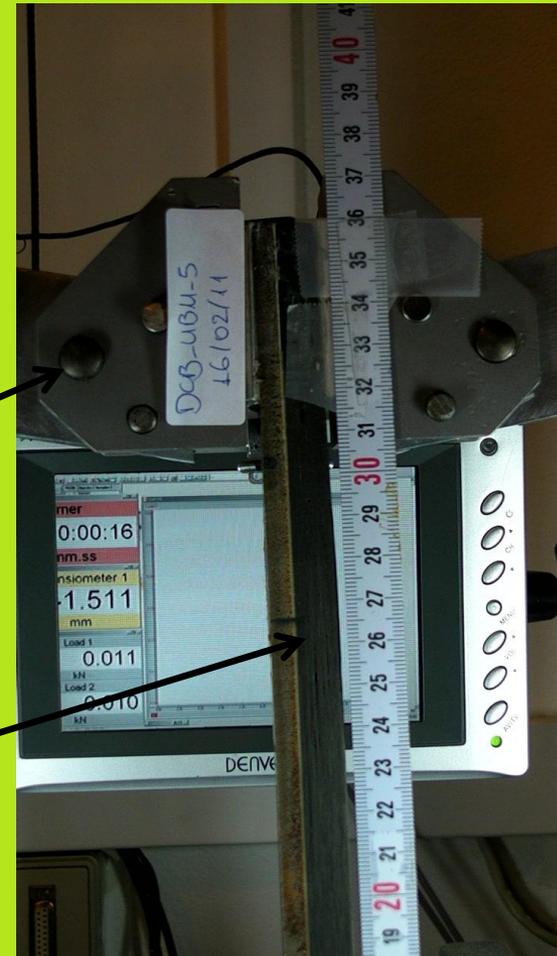
Επισκόπηση πειραματικής διαδικασίας



[Sørensen BF, Jacobsen T.K.]

Transverse
Arm

DCB-UBM
specimen



Μετρητικά Όργανα

- Δυναμόμετρο: Μέτρηση φορτίου P
- Extensometer: INSTRON 2620-602, range $\pm 2.5\text{mm}$
- 2 LVDT: LDI 8/1

$$\delta_n = (\bar{d} + \Delta^{Ext}) \sin \theta_5 - \bar{d} \cos \theta_4$$

$$\delta_t = (\bar{d} + \Delta^{Ext}) \cos \theta_5 + \frac{d_2 - d_1}{2} \sin \theta_4$$



Λόγοι Ροπών

Εξετάστηκαν τρεις λόγοι ροπών με σκοπό την επίτευξη τριων διαφορετικών τύπων αστοχίας:

1. $\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = +2$  Mode I

2. $\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$  Mixed mode

3. $\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -3.4$  Mode II



CFRP #1



Steel #2



Αποτελέσματα Πειραμάτων

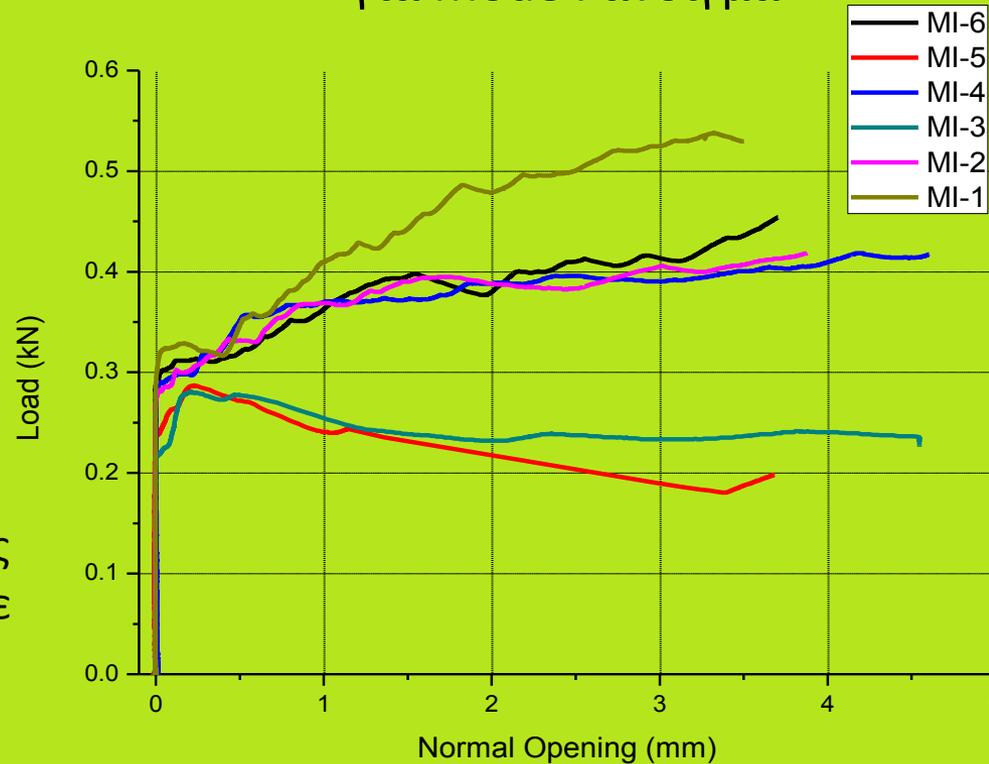
$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = +2$$

Οι καμπύλες παρουσιάζουν δύο διαφορετικές σταθερές τιμές.

Πιθανές αιτίες:

1. Αλλαγή απο cohesive failure σε interfacial failure.
2. Μείωση πάχους κόλλας οδήγησε σε αύξηση αντοχής.
3. Αύξηση πάχους του CFRP.

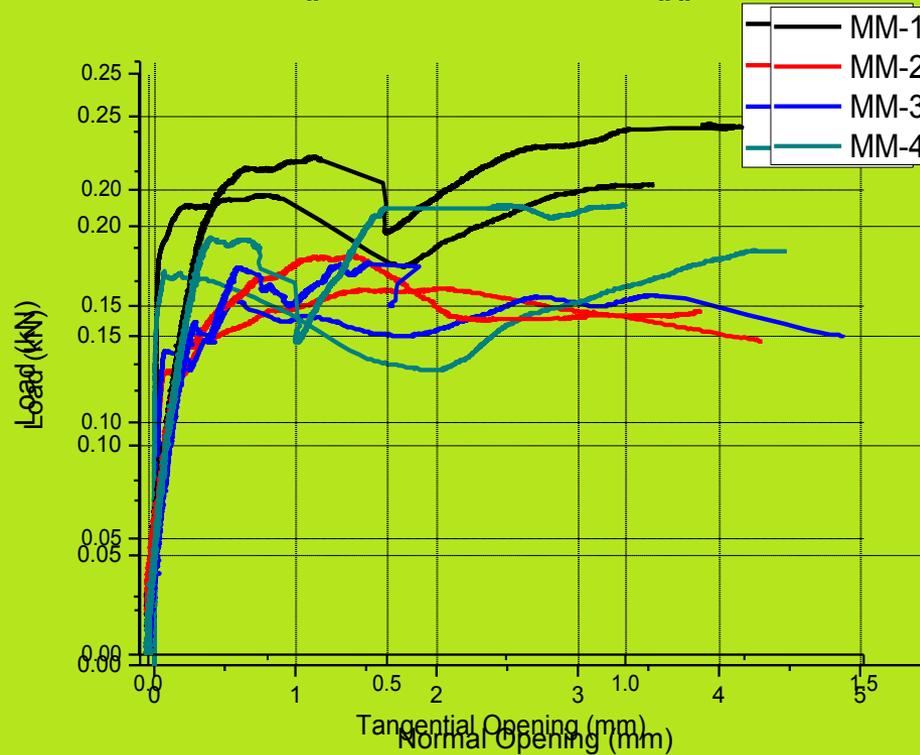
Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για Mode I άνοιγμα



Αποτελέσματα Πειραμάτων

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$$

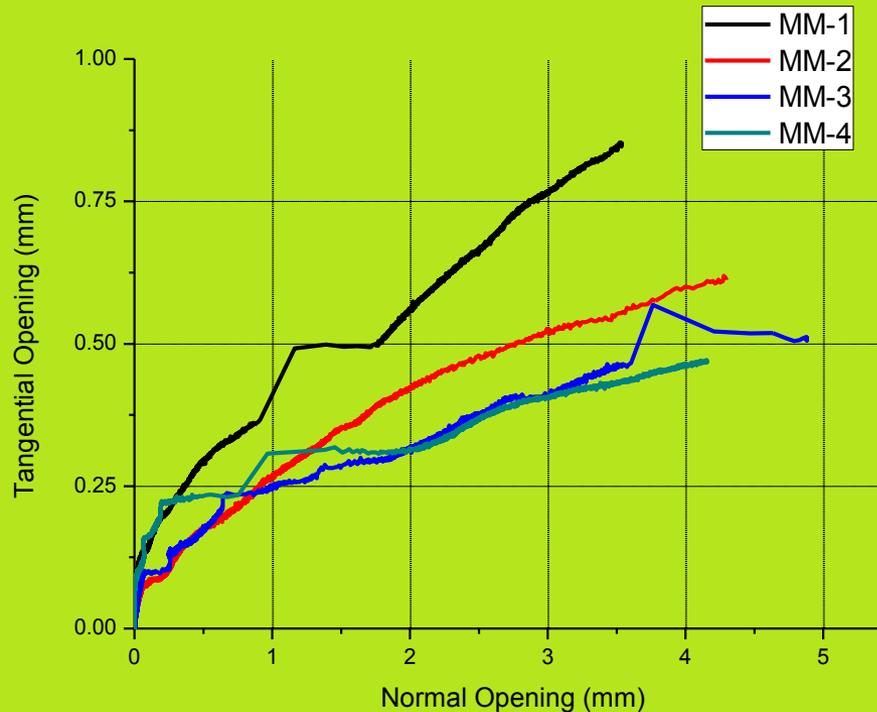
Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης
για Mode III άνοιγμα



Αποτελέσματα Πειραμάτων

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$$

Σύγκριση Μετατοπίσεων



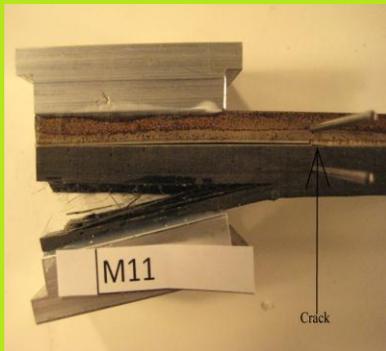
$$\frac{\delta_n}{\delta_t} = 10$$



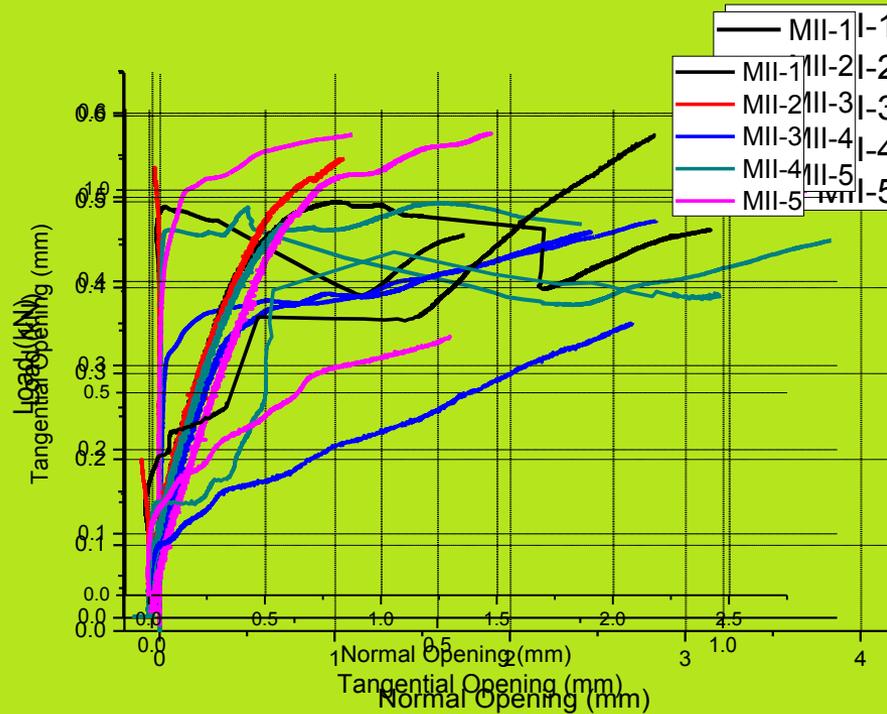
Αποτελέσματα Πειραμάτων

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -3.4$$

$$M_{CFRP\max} = 150Nm$$



Διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης για Mode III άνοιγμα



$$\frac{\delta_n}{\delta_t} = 2$$

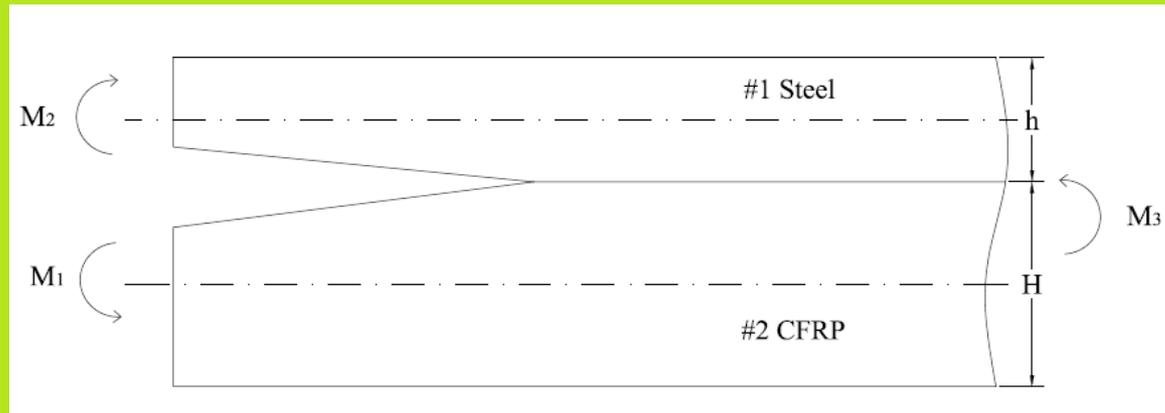
Δεν επιτεύχθηκε
Mode II άνοιγμα.



Υπολογισμός Energy Release Rate

$$G = \frac{c_2}{16h^3} \left(\frac{M_1^2}{I_1} + \frac{M_2^2}{I_2} - \frac{(M_1 - M_2)^2}{I_3} \right) \quad [\text{Ostergaard R.C., Sørensen B.F.}]$$

$c_2, h, I_1, I_2, I_3 = f(\text{γεωμετρίας, ιδιότητες υλικών}) \longrightarrow$ Πλήρως ορισμένα



Υποθέσεις:

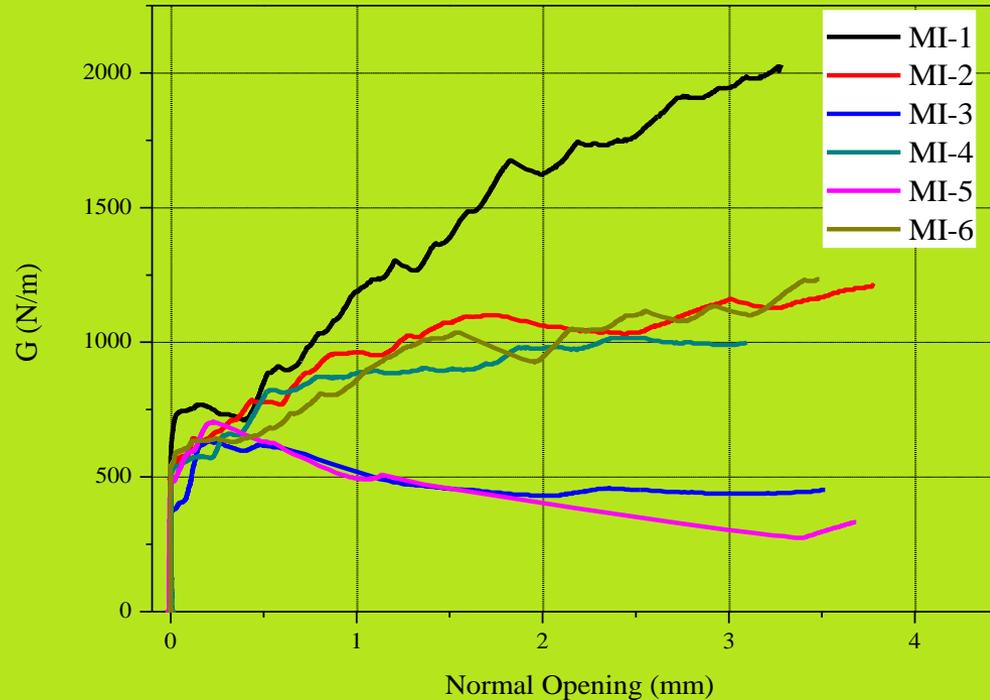
- Γραμμική Ελαστική Θεωρία ($\mathbf{G=J}$)
- Επίπεδη Εντατική κατάσταση (plane stress)
- Αμελείται η στρώση της κόλλας



Διαγράμματα Energy Release Rate-Μετατόπιση

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = +2$$

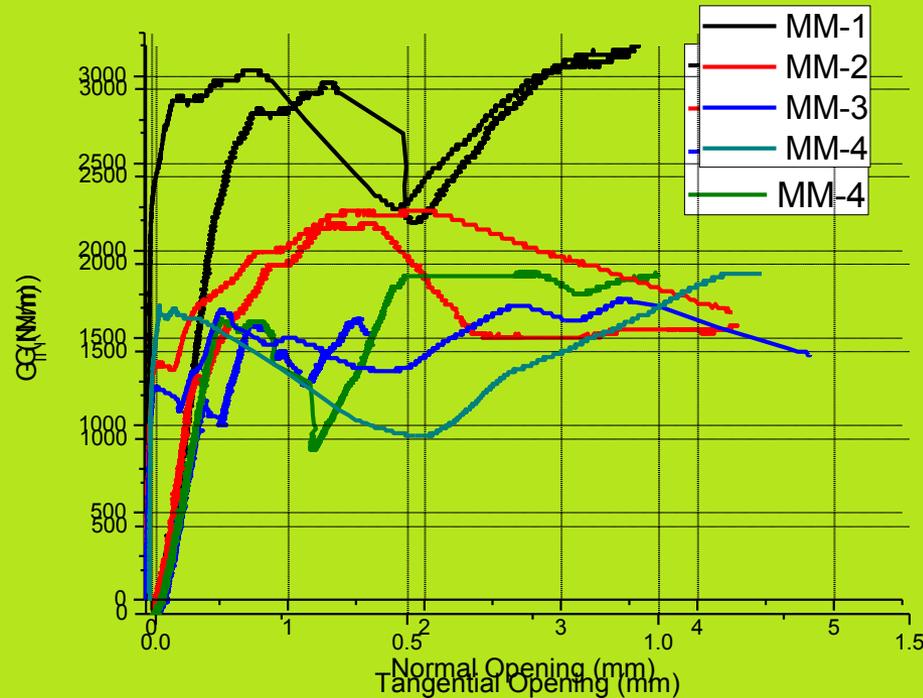
Mode I άνοιγμα



Διαγράμματα Energy Release Rate-Μετατόπιση

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$$

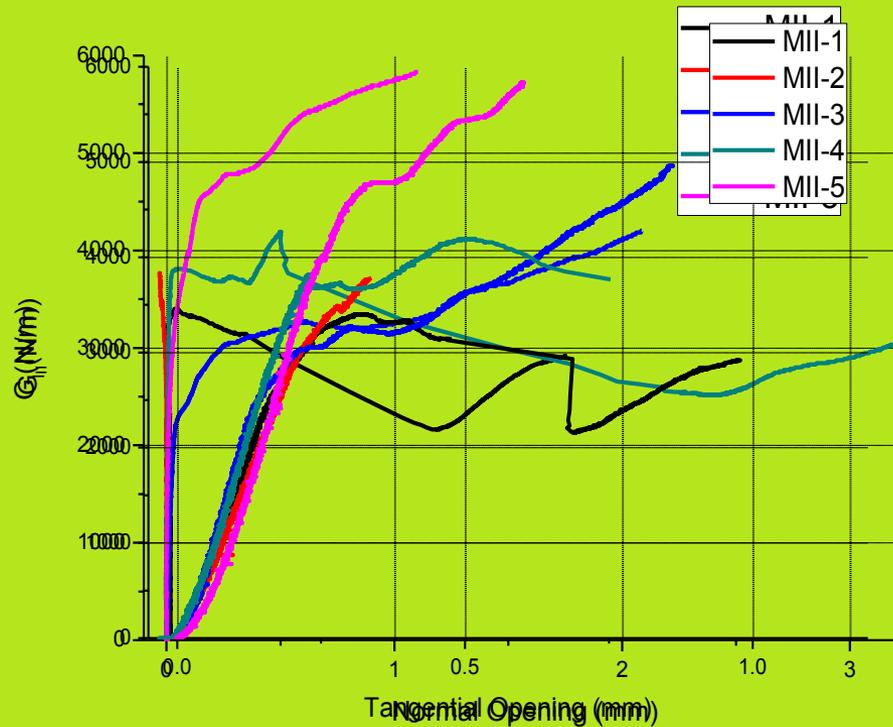
Mode II Διαγράμματα



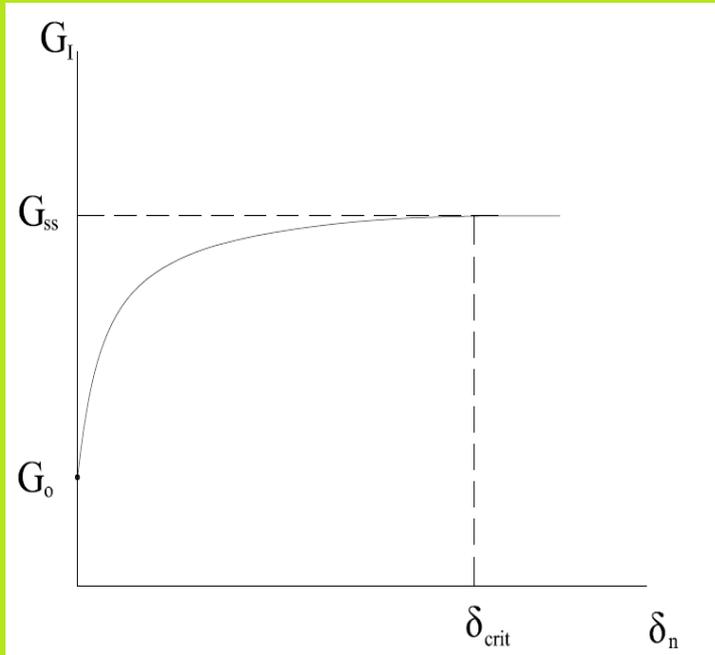
Διαγράμματα Energy Release Rate-Μετατόπιση

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -3.4$$

Mode II **Διάγραμμα**

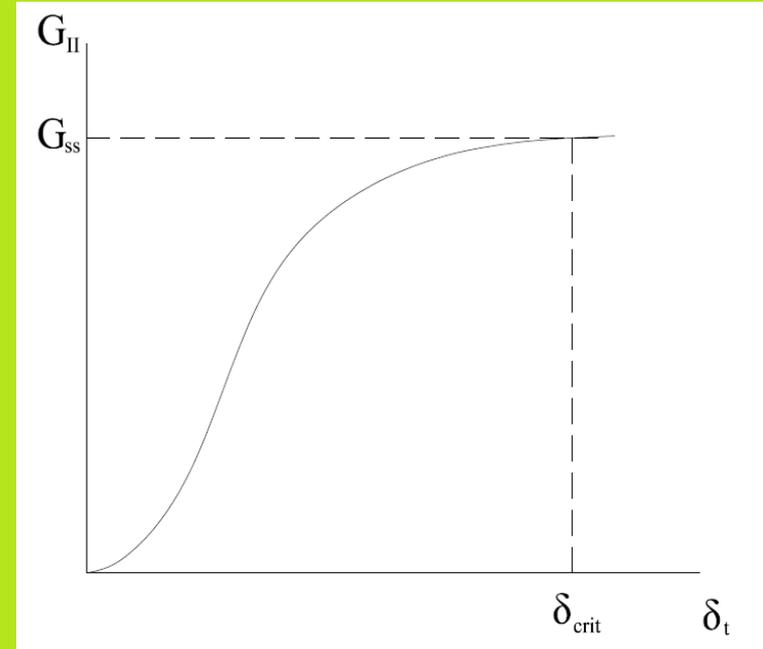


Παρεμβολή Καμπυλών



Mode I

$$G_{coh} = G_{ss} - G_0$$

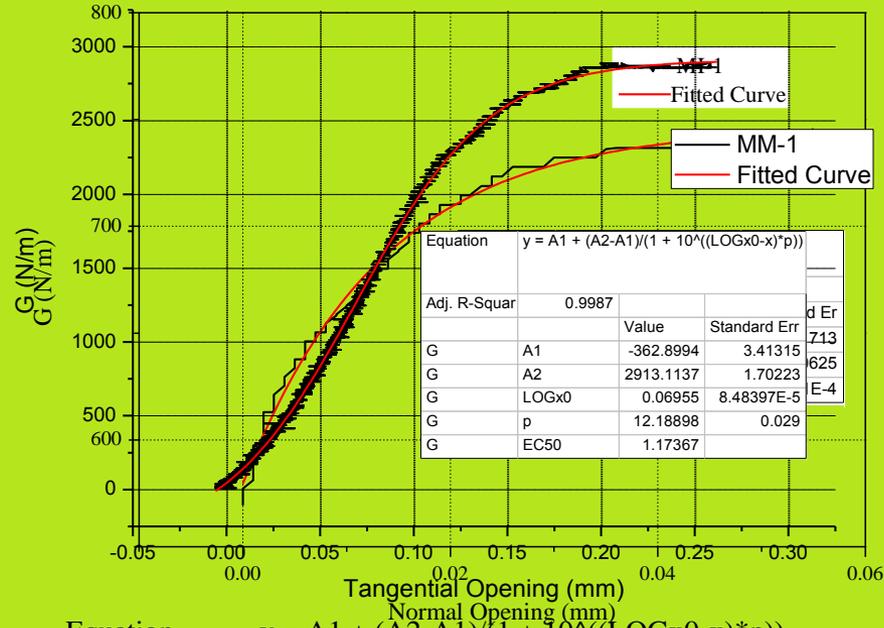


Mode II

$$G_{coh} = G_{ss}$$



Παρεμβολή Καμπυλών

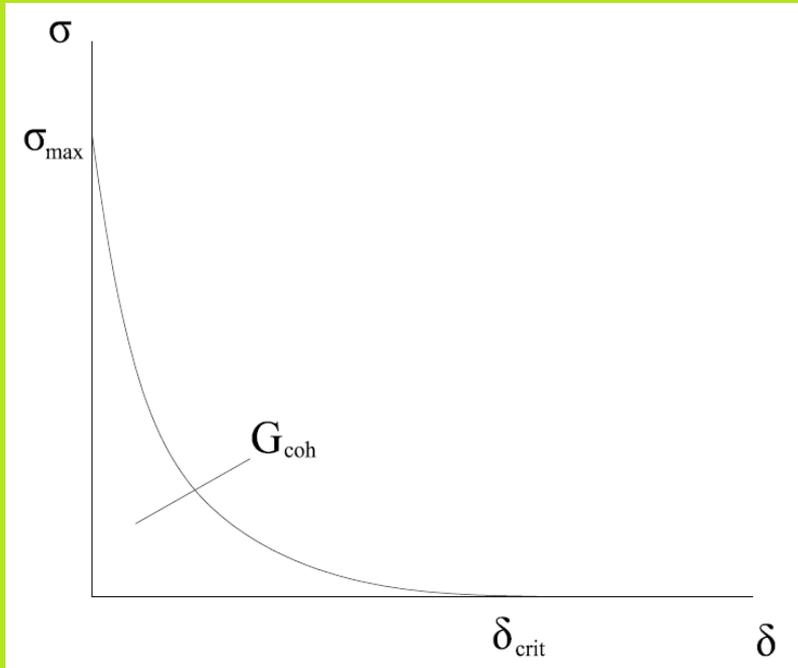


Adjusted R-square > 0.9

Equation	$y = A1 + (A2-A1)/(1 + 10^{((\text{LOG}x0-x)^p))}$		
Equation	$y = A1 * \exp(-x/t1) + y0$		
Adj. R-Square	0.9987		
Adj. R-Square	0.99387		
	Value	Value	
A1	-362.89947		
y0	746.77609		
A2	2913.11371		
A1	-167.33415		
LOGx0	0.06955		
t1	0.01346	12.18898	
p			
EC50		1.17E+00	

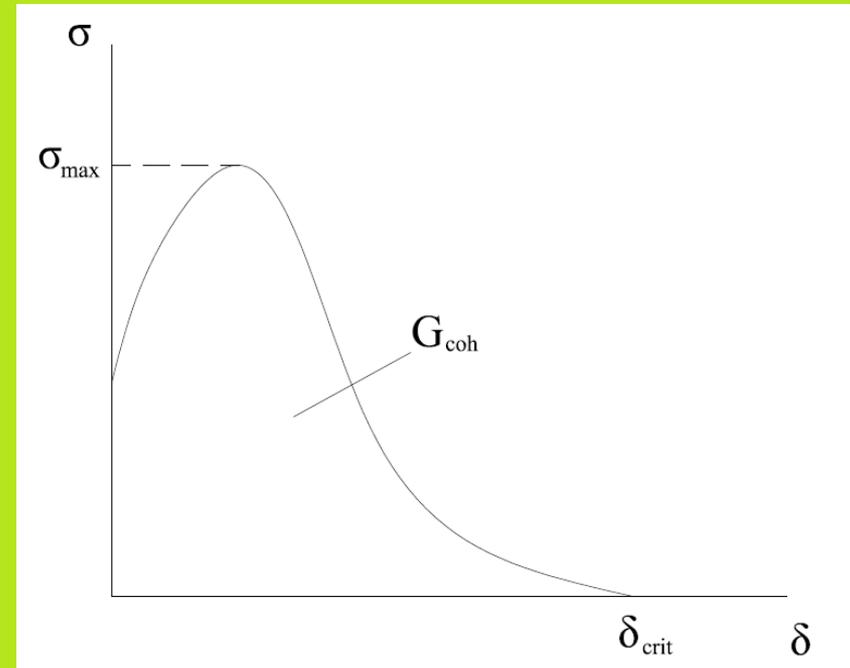


Cohesive Laws-Γενική Μορφή



Mode I

$$\sigma_n(\delta_n^*) = \frac{\partial J}{\partial \delta_n^*}$$



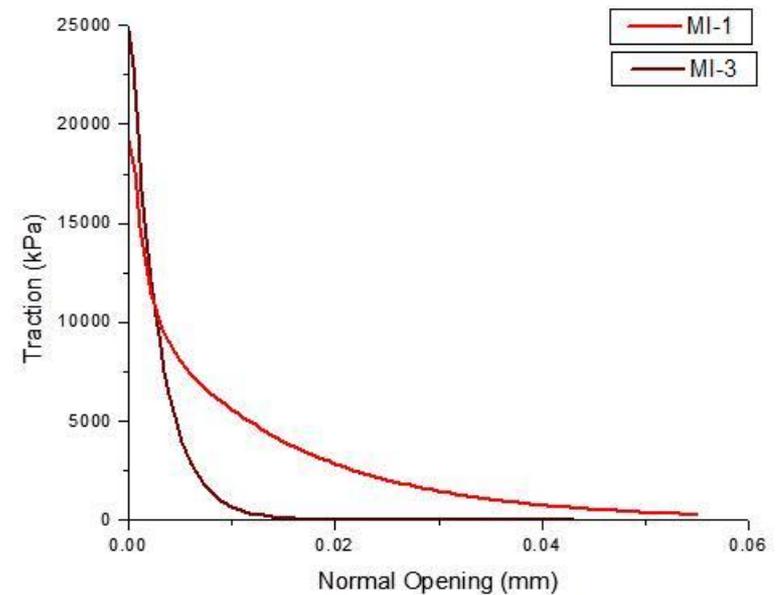
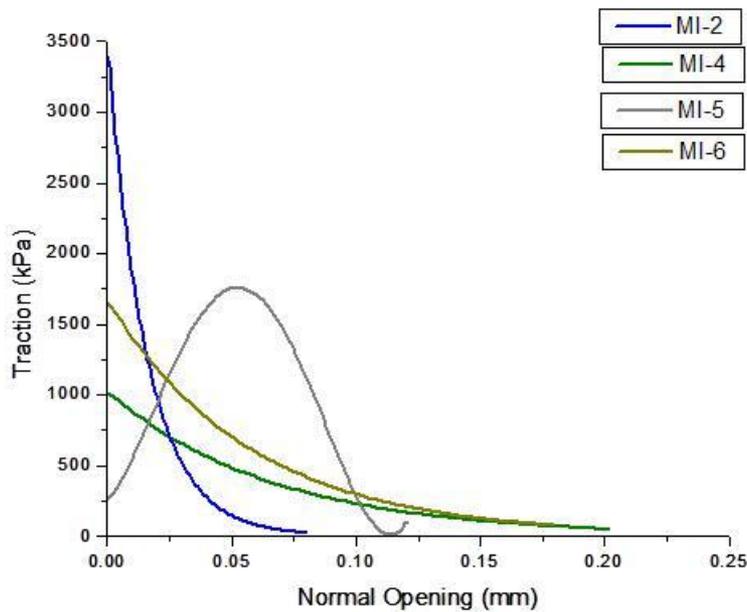
Mode II

$$\sigma_t(\delta_t^*) = \frac{\partial J}{\partial \delta_t^*}$$



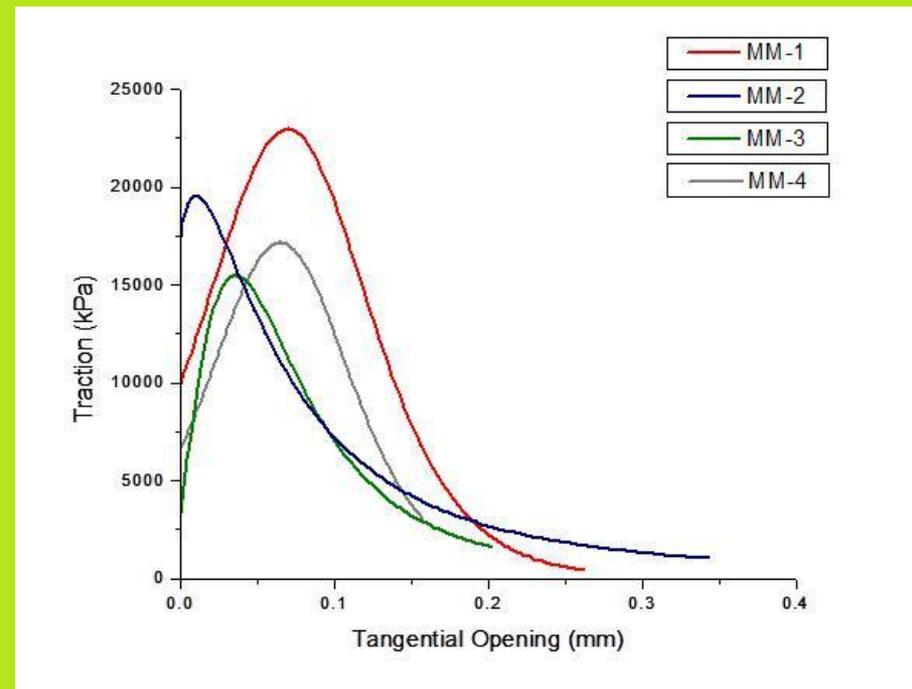
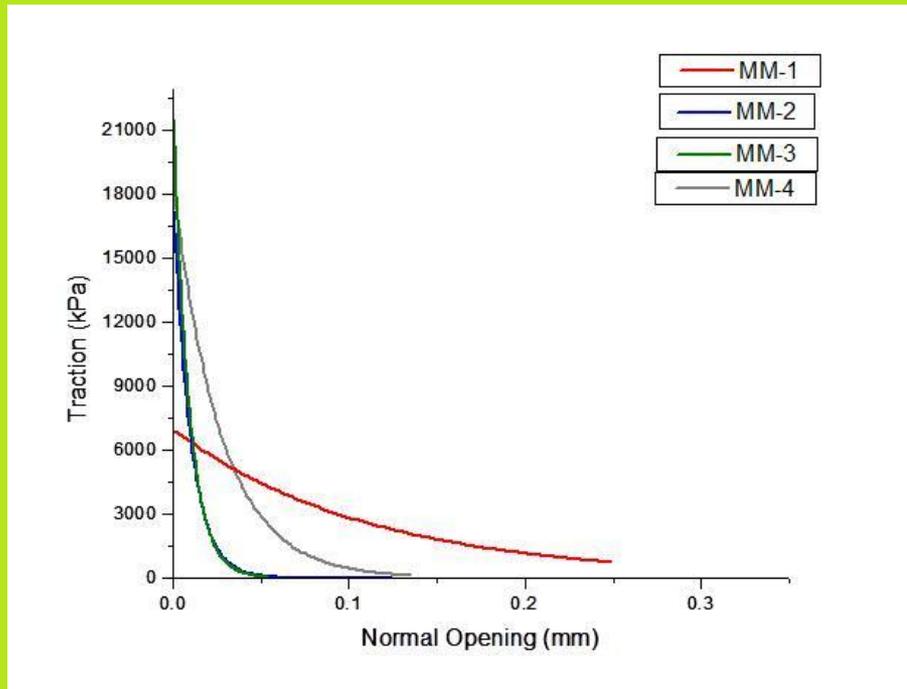
Cohesive Laws

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = +2$$



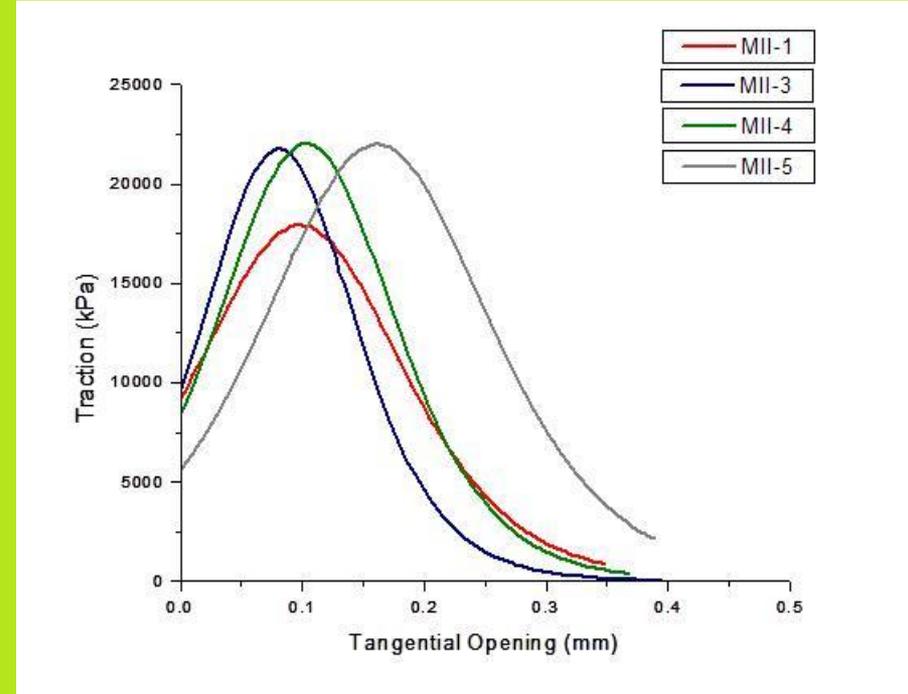
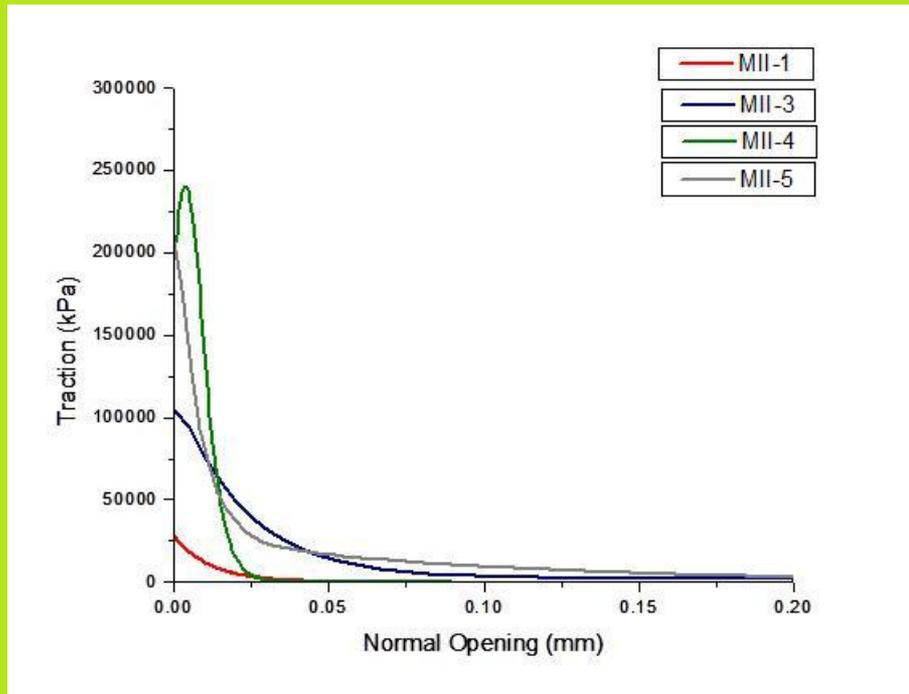
Cohesive Laws

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$$



Cohesive Laws

$$\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -3.4$$



Cohesive Laws

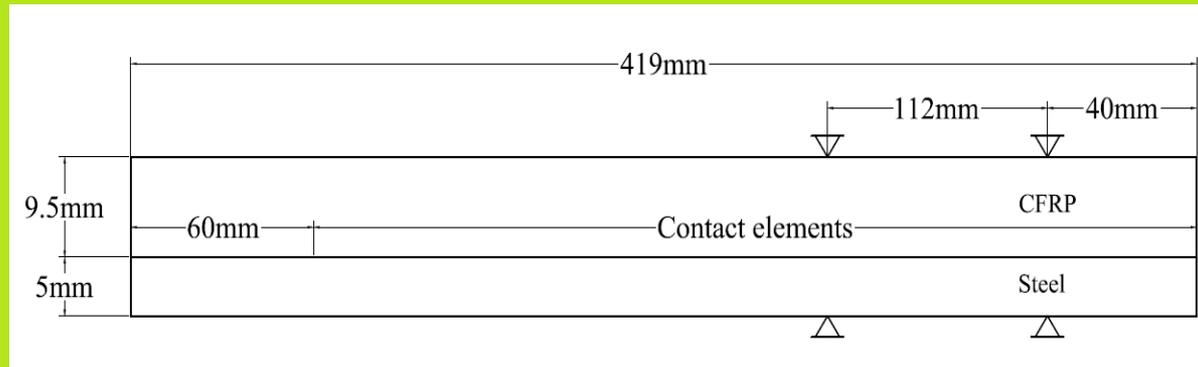
Specimen	MI-1	MI-2	MI-3	MI-4	MI-5	MI-6
G _{ss} (N/m)	746.2	571.7	385.6	577.4	594.7	633.5
G _o (N/m)	573.4	517.1	312.8	512.3	477.7	541.1
G _{coh/data} (N/m)	172.8	54.6	72.8	65.1	117.0	92.4
G _{coh/integrated} (N/m)	172.7	54.6	72.9	65.1	116.9	92.4
Percentage Difference	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.0
Crit. Normal Opening (mm)	0.062	0.08	0.023	0.2	0.12	0.2
σ _{max} (MPa)	19.3	3.4	24.8	1.0	1.7	1.6

- $G_{\text{coh/data}} = G_{\text{ss}} - G_{\text{o}}$
- $G_{\text{coh/integrated}}$ υπολογίζεται μέσω της ολοκλήρωσης των καμπυλών των cohesive laws



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Προεπεξεργασία

Γενική Γεωμετρία



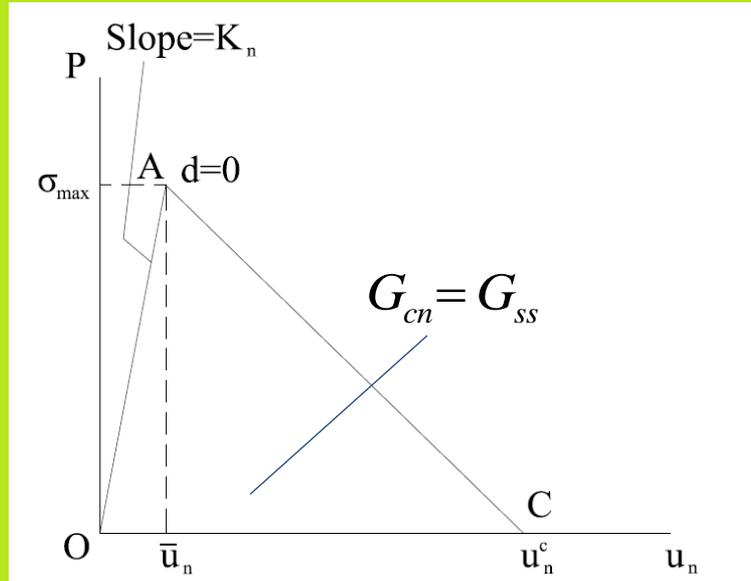
Ιδιότητες Υλικών

	Young's Modulus	Shear Modulus	Poisson's ratio
CFRP	$E_1=35\text{GPa}$	$G_{12}=2\text{GPa}$	$\nu_{12}=0.35$
	$E_2=E_3=3\text{GPa}$	$G_{23}=G_{13}=1.5\text{GPa}$	$\nu_{23}=\nu_{13}=0.3$
Steel	$E=170\text{GPa}$	$G=65\text{GPa}$	$\nu=0.3$



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Προεπεξεργασία

Cohesive Zone Material Model Διγραμμικό Μοντέλο



Mode I

P = normal contact stress

u_n = contact gap

Constant	Symbol	Meaning
C1	σ_{\max}	maximum normal contact stress
C2	G_{cn}	critical fracture energy for normal separation
C3	τ_{\max}	maximum equivalent tangential contact stress
C4	G_{ct}	critical fracture energy for tangential slip



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Προεπεξεργασία

Cohesive Zone Material Model

Διγραμμικό Μοντέλο

Θα μελετηθούν 3 περιπτώσεις:

• 2 πειράματα με $\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = +2$

• 1 πείραμα με $\frac{M_{CFRP}}{M_{Steel}} = -6$

	Case 1	Case 2
Specimen	MI-1	MI-2
G_{cn} (N/m)	746	571.7
σ_{max} (MPa)	19.3	3.4
G_{ct} (N/m)	1784	1784
τ_{max} (MPa)	17.1	17.1

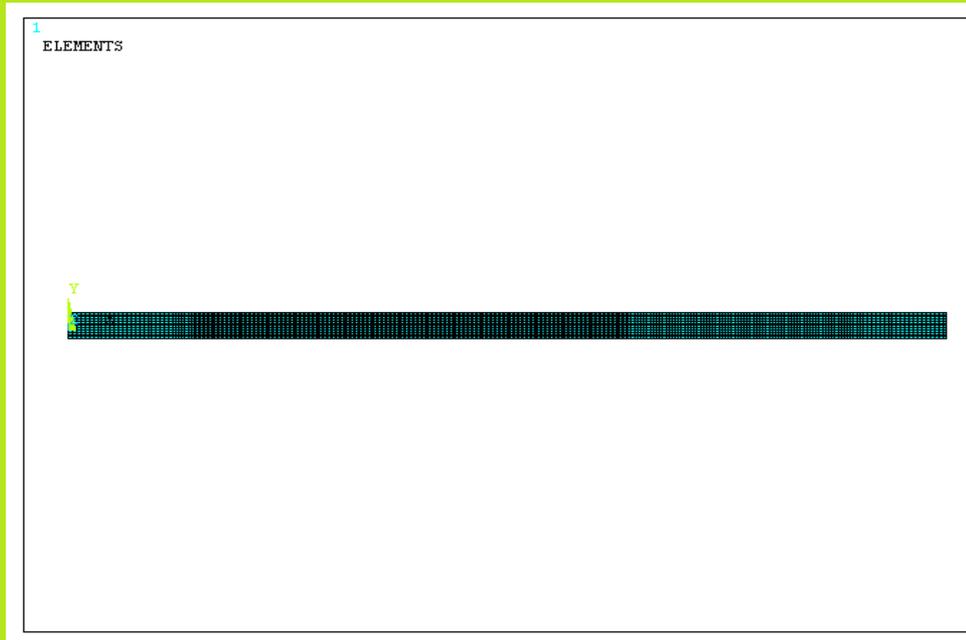
Case 3	
Specimen	MM-4
G_{cn} (N/m)	1666.5
σ_{max} (MPa)	18.1
G_{ct} (N/m)	1784
τ_{max} (MPa)	17.1

Constant	Symbol	Meaning
C1	σ_{max}	maximum normal contact stress
C2	G_{cn}	critical fracture energy for normal separation
C3	τ_{max}	maximum equivalent tangential contact stress
C4	G_{ct}	critical fracture energy for tangential slip



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Προεπεξεργασία

Δημιουργημένος σταφάνειος Δοκιμίου

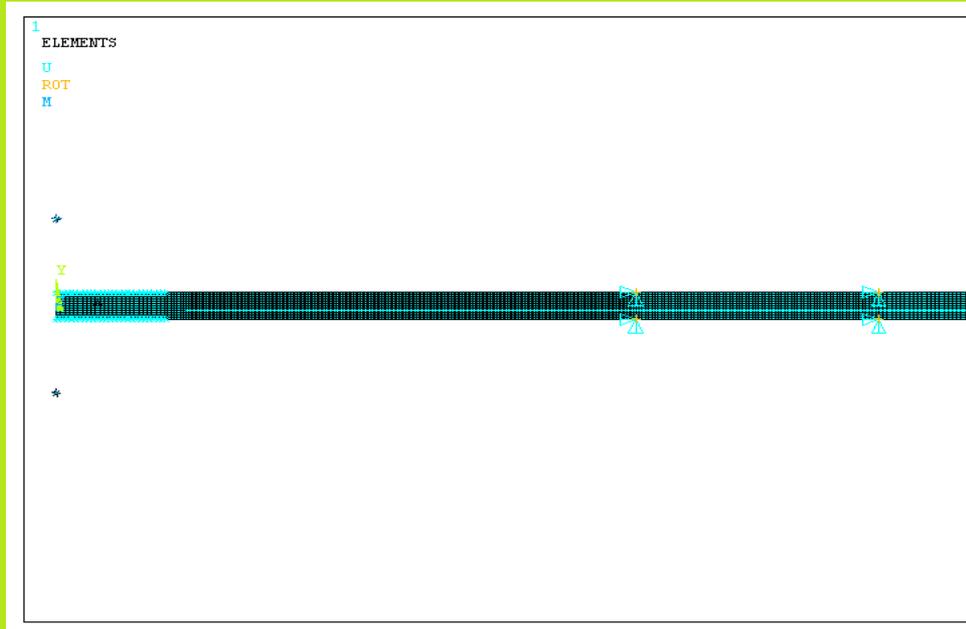


Element Length	Reaction Force (N)	
	Keypoint 1	Keypoint 7
2mm	563.654	-359.899
1mm	598.228	-338.427
0.5mm	599.029	-337.362



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Προεπεξεργασία

Τελικό Μοντέλο



	Case 1	Case 2	Case 3
M_{CFRP} (Nm)	51.5	55.4	100.0
M_{Steel} (Nm)	26.0	26.0	-18.0
M_{CFRP} / M_{Steel} - Model	1.98	2.14	-5.56
M_{CFRP} / M_{Steel} - Experiment	1.98	2.14	-5.54



Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων-Επίλυση

Μη γραμμική ανάλυση-επιβολή φορτίου σε βήματα

	Initial Time Step Size	Minimum step size	Maximum step size
Run 1	1.00E-03	1.00E-09	1.00E-03
Run 2	1.00E-04	1.00E-10	5.00E-04
Run 3	1.00E-05	1.00E-10	1.00E-03

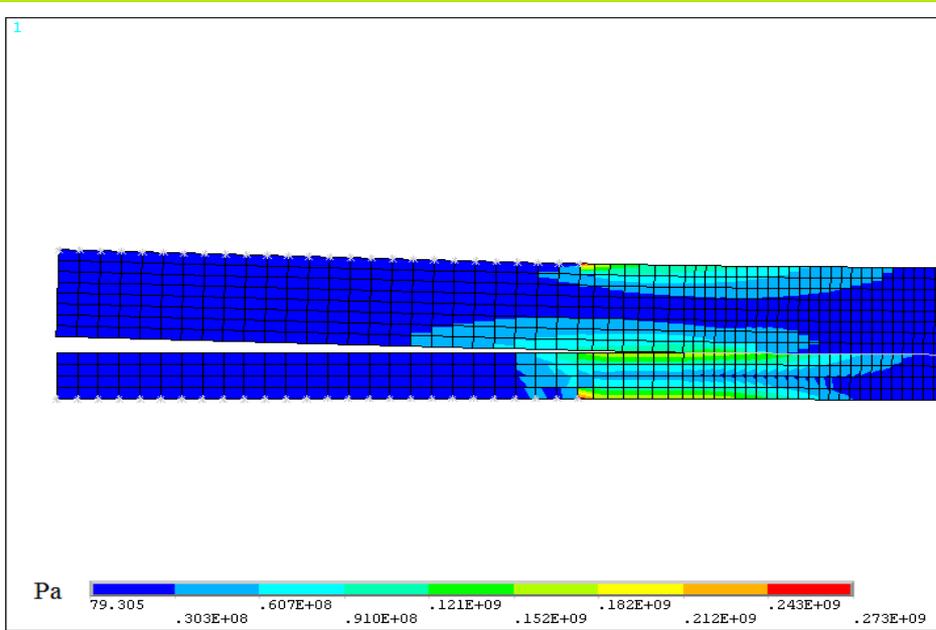
Rotation at time=0.879 (rad) for Case 1 load values.

	Keypoint 42	Keypoint 49
Run 1	-8.69E-02	-5.06E-02
Run 2	-8.74E-02	-5.10E-02
Run 3	-8.67E-02	-5.05E-02

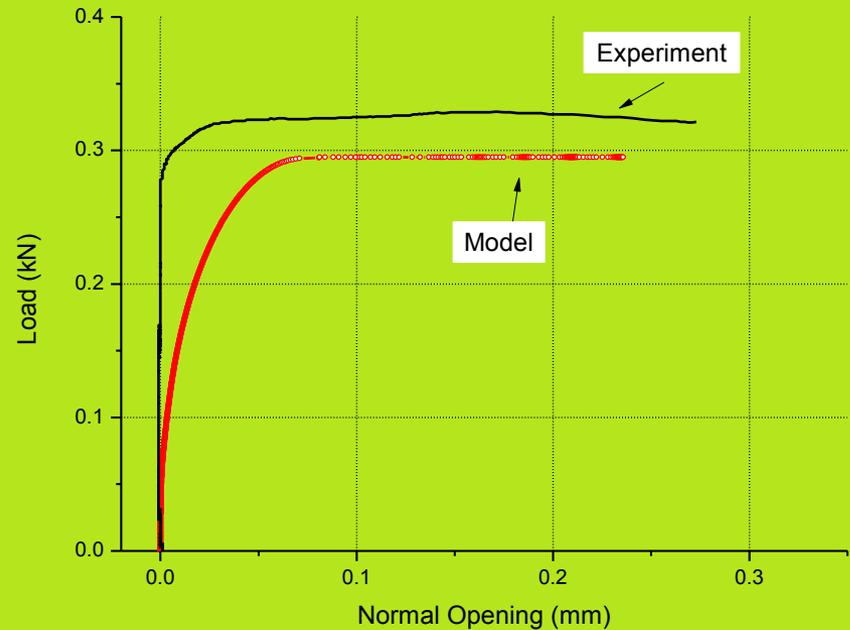


Case 1-Αποτελέσματα

Κατανομή τάσεων στο παραμορφωμένο μοντέλο.



Διαγράμμα Φορτίου-Μετατόπισης Mode I
Σύγκριση μεταξύ μοντέλου-πειράματος

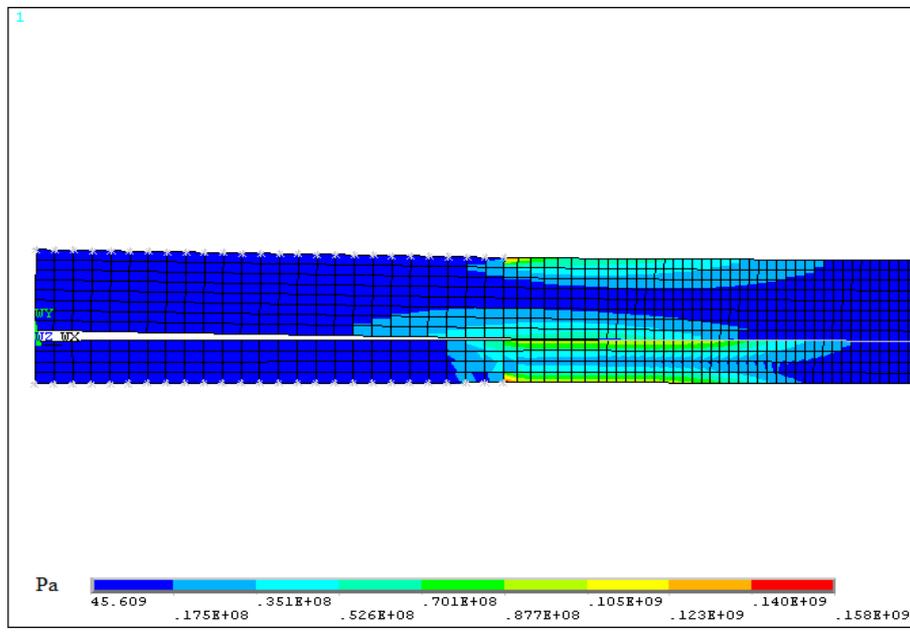


	Model	Experiment
δ_{nc} (mm)	0.06	0.05
Μέγιστο Φορτίο (kN)	0.295	0.33

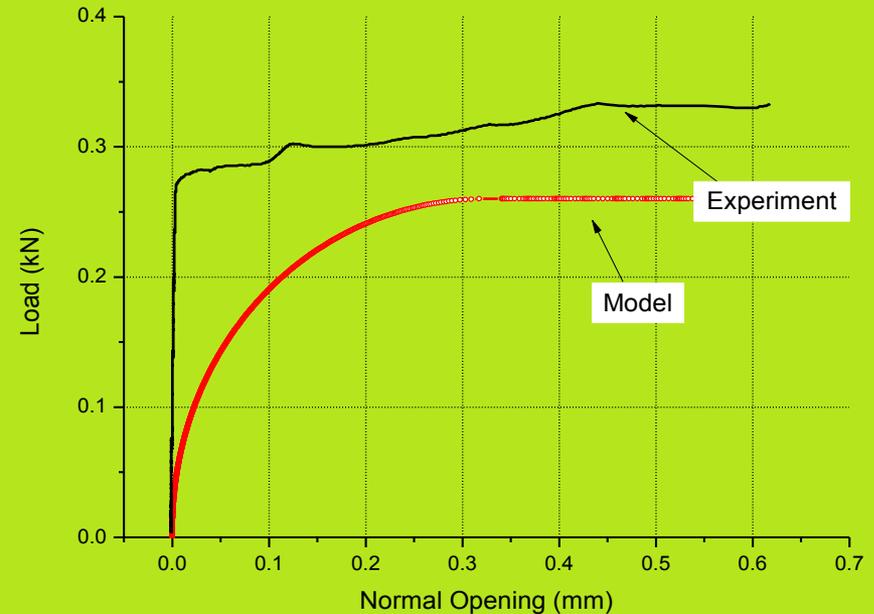


Case 2-Αποτελέσματα

Κατανομή τάσεων στο παραμορφωμένο μοντέλο.



Διαγράμμα Φορτίου-Μετατόπισης Mode I Σύγκριση μεταξύ μοντέλου-πειράματος

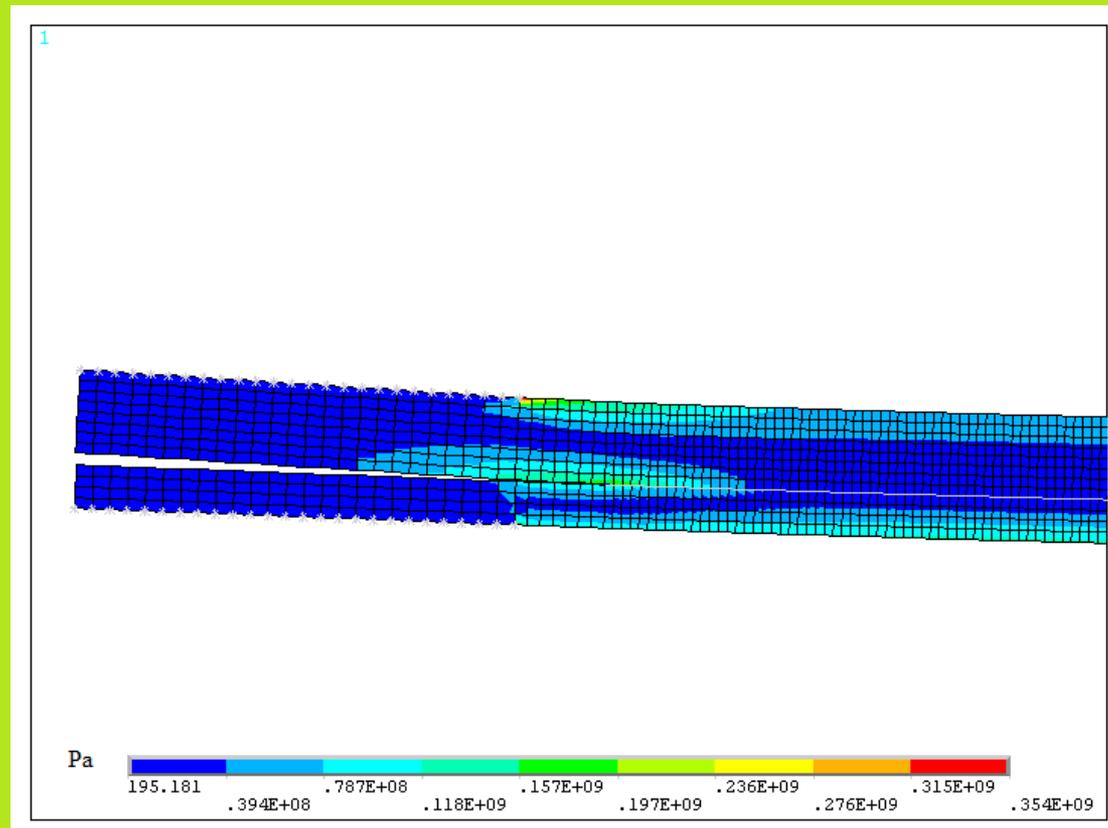


	Model	Experiment
δ_{nc} (mm)	0.30	0.08
Μέγιστο Φορτίο (kN)	0.26	0.30



Case 3-Αποτελέσματα

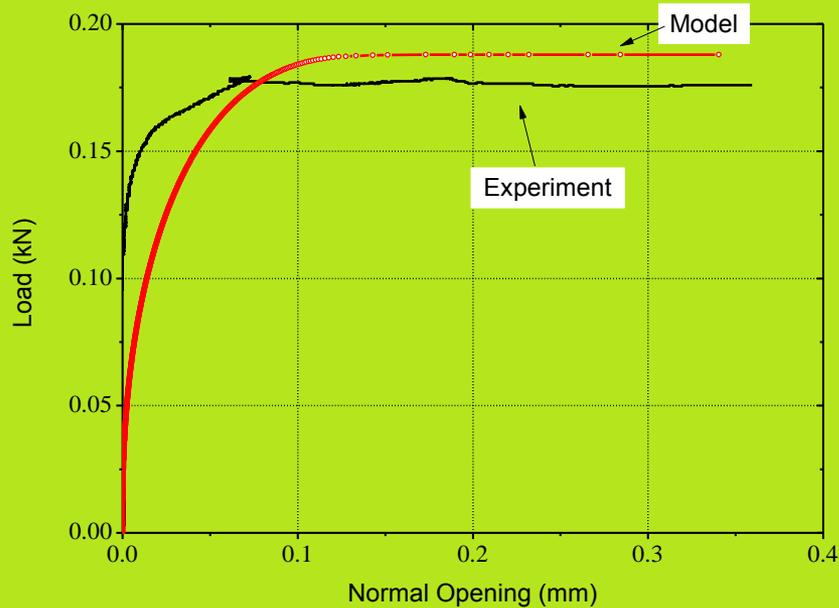
Κατανομή τάσεων στο παραμορφωμένο
μοντέλο.



Case 3-Αποτελέσματα

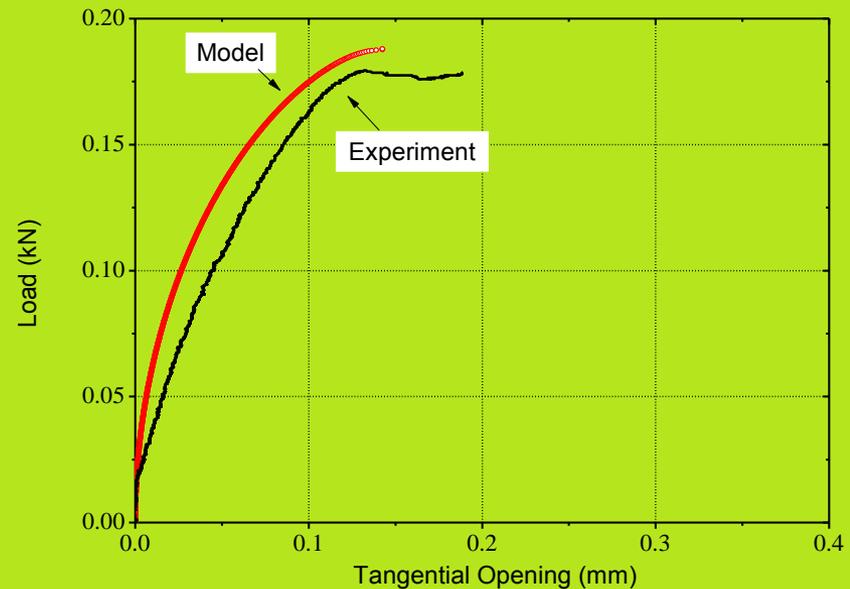
Διαγράμματα Φορτίου-Μετατοπίσεων
Σύγκριση μεταξύ μοντέλου-πειράματος

Mode I



	Model	Experiment
δ_{tc} (mm)	0.11	0.09
Μέγιστο Φορτίο(kN)	0.188	0.18

Mode II



	Model	Experiment
δ_{tc} (mm)	0.15	0.14
Μέγιστο Φορτίο (kN)	0.188	0.175



Συμπεράσματα

- Τα αποτελέσματα των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων αποδεικνύουν την εφικτότητα της διαδικασίας που εφαρμόσθηκε.
- Η έννοια των cohesive laws μπορεί να εφαρμοσθεί για την πρόβλεψη αστοχίας συνδέσεων με κολλητικά μέσα με την βοήθεια μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.
- Δοκίμιο DCB-UBM αποδείχθηκε καλή επιλογή για τον χαρακτηρισμό της φόρτισης και αστοχίας του κολλητικού μέσου.
- Από τις τιμές των αποτελεσμάτων φάνηκε πως όσο το πείραμα πλησιάζει προς Mode II άνοιγμα, τόσο μεγαλώνουν οι μέγιστες τιμές του Energy Release Rate.



Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Να γίνει ανάλυση με λιγότερες υποθέσεις για καλύτερα αποτελέσματα, όπως υπολογισμός του Energy Release Rate χωρίς να αγνοείται το πάχος της κόλλας.
- Να γίνει μελέτη για διαφορετικά πάχη κόλλας.
- Να γίνει χρήση διαφορετικών μορφών cohesive laws στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Να γίνει έλεγχος της διάδοσης της ρωγμής με την χρήση crack starter.

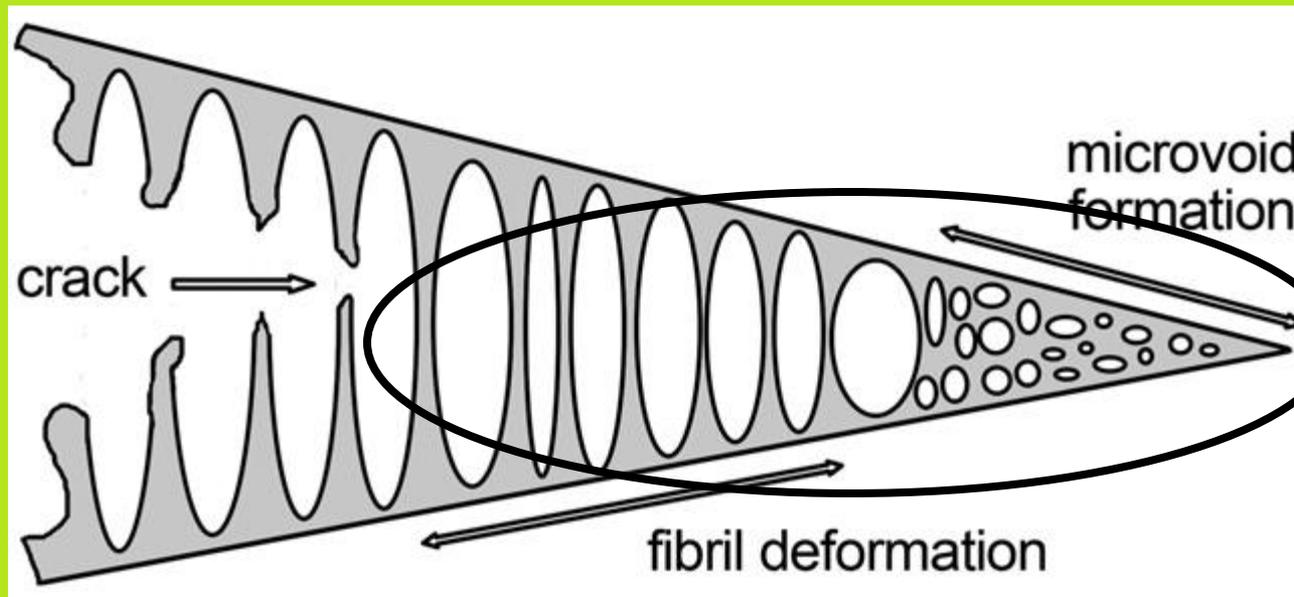


Ευχαριστώ για την προσοχή σας



Εξήγηση φαινομένου cohesive zone

Διάδοση ρωγμής σε κολλητικό μέσο



Failure Process
Zone



Υπολογισμός J-integral

J-integral

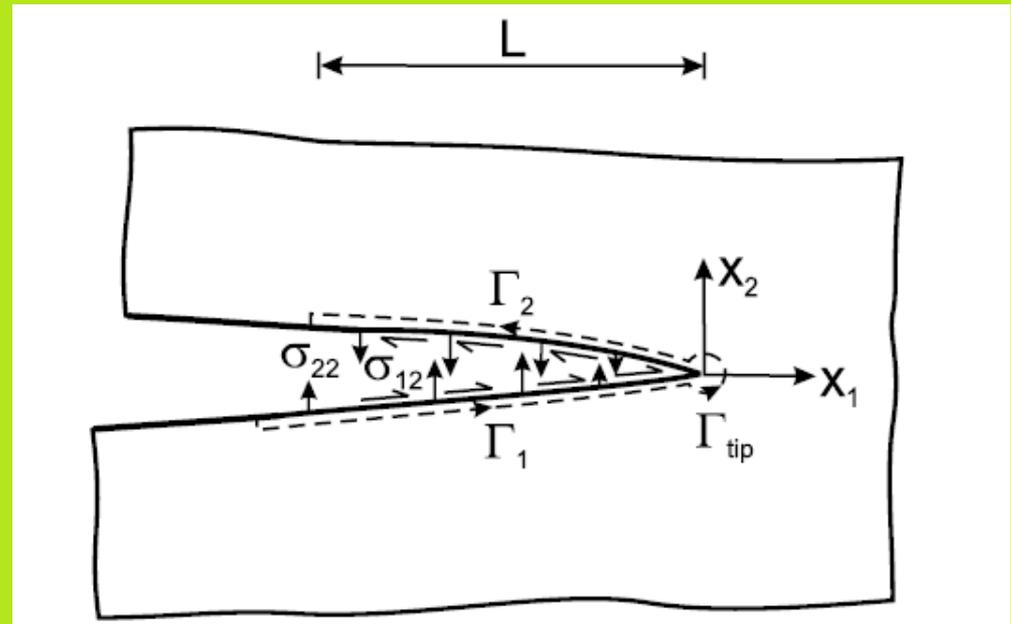
$$J = \int_{\Gamma} W dx_2 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS \quad \longrightarrow \quad J = \int_0^{-L} \sigma_{i2} \left(\frac{\partial u_1^+}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1^-}{\partial x_1} \right) dx_1$$

Strain Energy Density

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

$$\delta_n = u_2^+ - u_2^-$$

$$\delta_t = u_1^+ - u_1^-$$



Απόδειξη $J=G$ για LEFM

Energy Release Rate για μη-ελαστική συμπεριφορά υλικού:

$$-\frac{d\Pi}{d\alpha} = \int_{\Gamma_o} W dx_2 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS$$

J-integral

$$J = \int_{\Gamma} W dx_2 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dS$$

Εφόσον το J-integral είναι ανεξάρτητο της γραμμής ολοκλήρωσης, τότε

$$J = -\frac{d\Pi}{d\alpha}$$

