

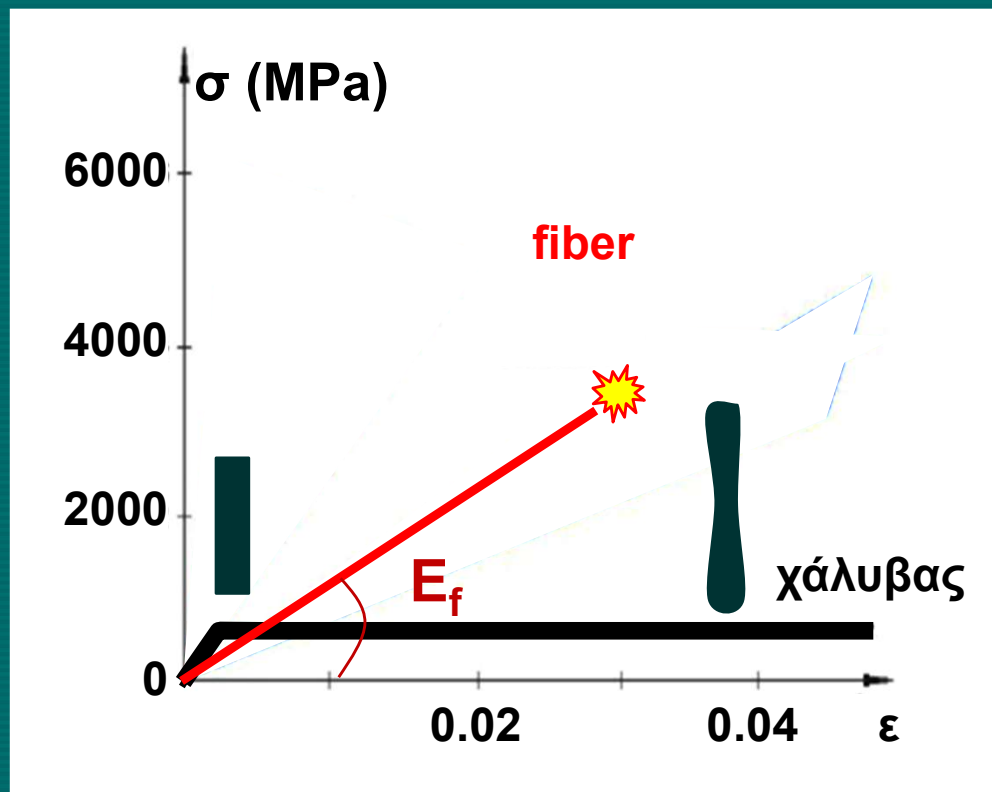
# Σύνθετα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

## 2<sup>ο</sup> μάθημα



# ΙΟΠ = **ΪΝΕΣ** + συνδετικό υλικό

- Παραλαμβάνουν το φορτίο: **ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ**
- Ελαστικά / ψαθυρά υλικά μέχρι την αστοχία
- Μηχανικές ιδιότητες: % των ινών (50 ÷ 70)



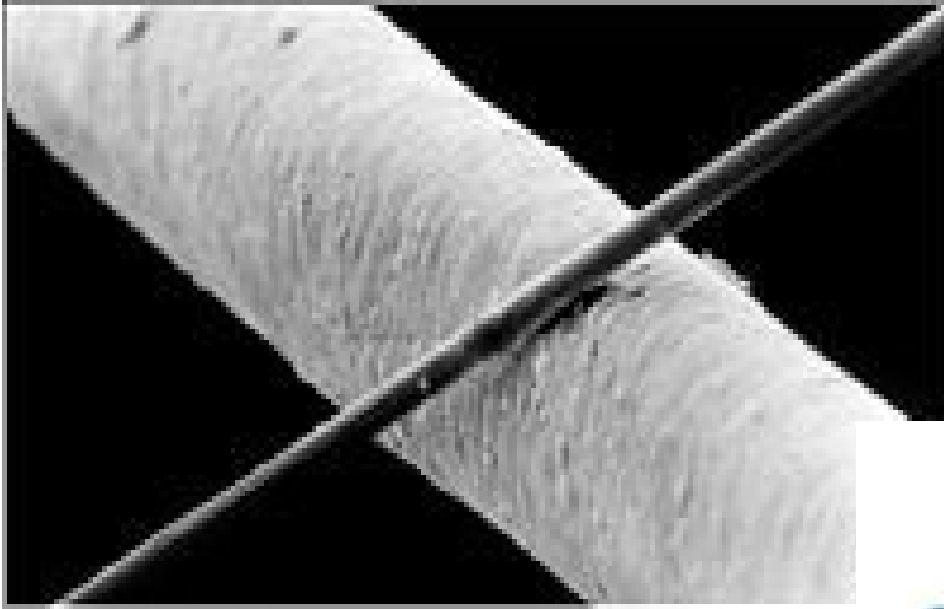
# Τεχνολογία Ινών

- Γυαλί (glass)
- Άνθρακας (carbon)
- Αραμίδιο (aramid)
- Βασάλτης (basalt)

**Thermoset materials**  
**(θερμική κατεργασία)**



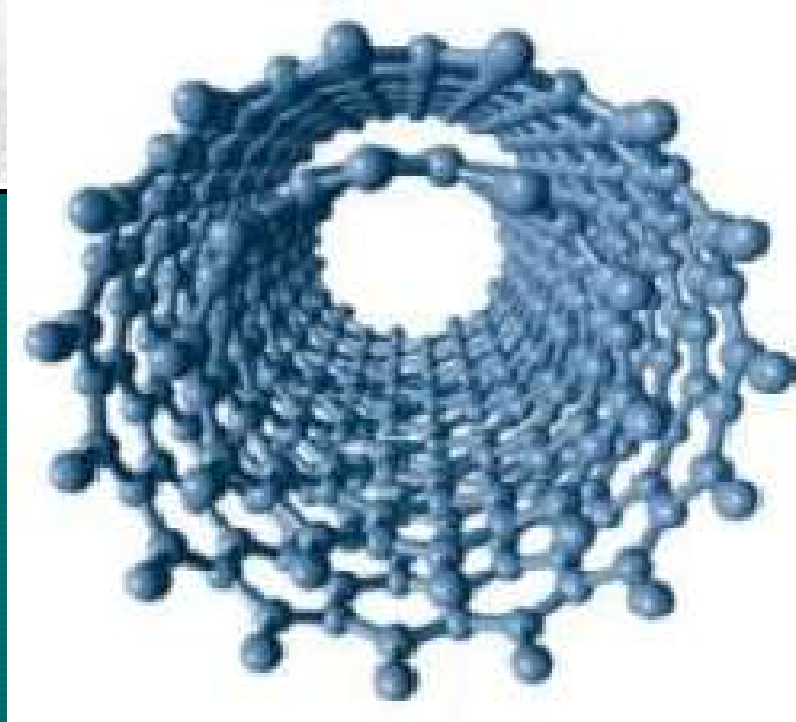
# Η γεωμετρία της ίνας



Μονοστρωματική  
(monofilament)



Πολυστρωματική  
(multifilament)



- **Γυαλί (ανόργανο):** δομή πυριτίου,  $\rho=1.2-2\text{tn/m}^3$   
Τεχνολογία: melt-spinning-cooling & continuous extrusion

**E-Glass (electrical):** ↑↑ Al, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si, CaO, MgO,

χαμηλή  
αντίσταση σε  
αλκάλια,  $\text{pH}>7$

• **S-Glass (stiffer & stronger):** Si, Al, MgO

Π.χ. εμφάνιση σε αλκαλικό περιβάλλον 12.8pH, στους 60 °C για 90 μέρες: η απομένουσα εφελκυστική αντοχή είναι 80% της αρχικής ( $E_{f,G}$  ανεπηρέαστο...)

**Οξείδιο Ζιρκονίου → AR-Glass (ανθεκτικά σε αλκάλια)**



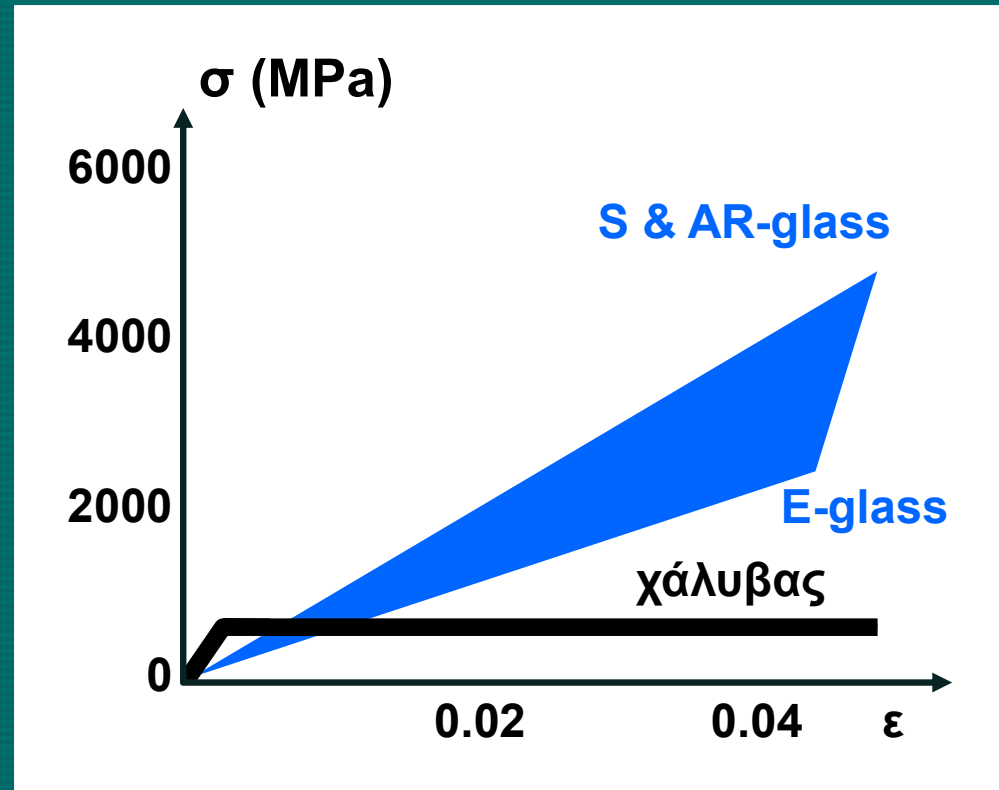
Γιατί μας ενδιαφέρει η  
αλκαλικότητα

Σκυρόδεμα:  
 $\text{pH}>12$



- **Γυαλί (ανόργανο):** δομή πυριτίου,  $\rho=1.2-2\text{tn/m}^3$

Μηχανικές ιδιότητες →



Ανθεκτικές σε συνθήκες διάβρωσης

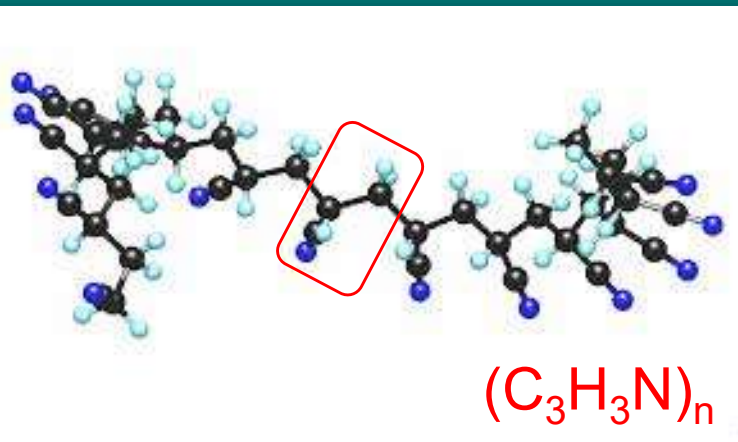
Ηλεκτρικά ουδέτερες

Οι πλέον οικονομικές ίνες

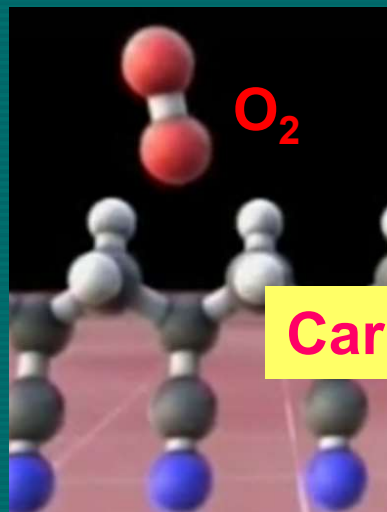
- **Άνθρακας (100% C, οργανικό):** κρυσταλλική δομή ατόμων άνθρακα που διατάσσονται αλυσιδωτά (κατά τον άξονα της ίνας)

Πρώτη ύλη: → **PAN (polyacrylonitrile)** / πίσσα

C (60%), H, N (άζωτο)

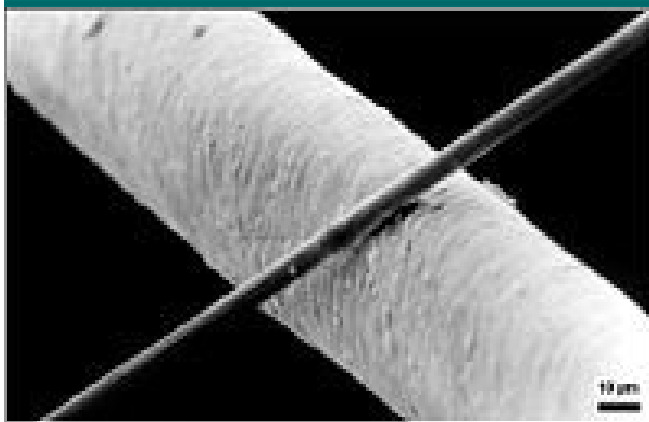


Κλίβανο οξειδωσης: πύρωση (300°C, 1/2 - 2hrs) → ΠΥΡΟΝΙΟ (>70%C)



**Carbonization**

Διάμετρος ίνας: 5-8  $\mu\text{m}$  (έλαση)



Πύρωση

1500-2000°C,  ~~$O_2$~~

**100% C, υψηλή εφελκυστική αντοχή**

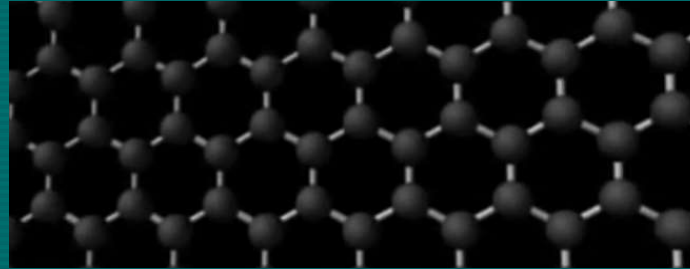
**( $f_{f,C}$ =3500-6000MPa,  $E_{f,C}$ =220GPa)**

- **Άνθρακας (100% C, οργανικό):** κρυσταλλική δομή ατόμων άνθρακα που διατάσσονται αλυσιδωτά (κατά τον άξονα της ίνας)

Πρώτη ύλη: → PAN / **πίσσα (πετρέλαιο ή γαιάνθρακες)**

Πύρωση

2500-3000°C, ~~O<sub>2</sub>~~



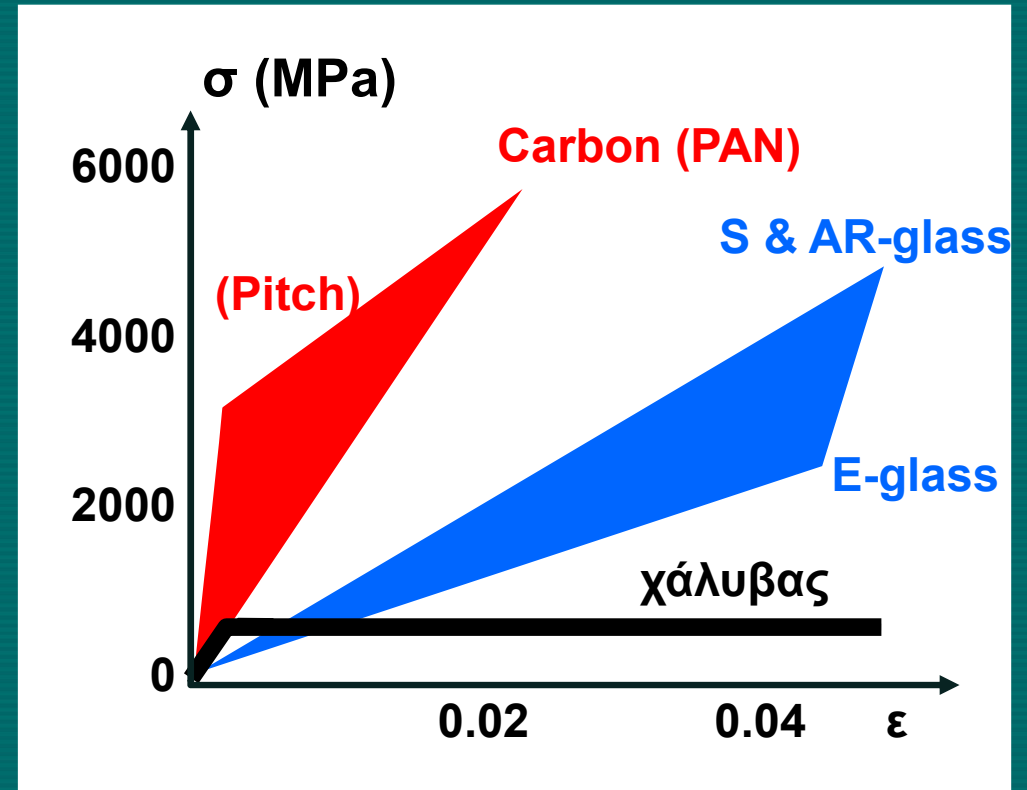
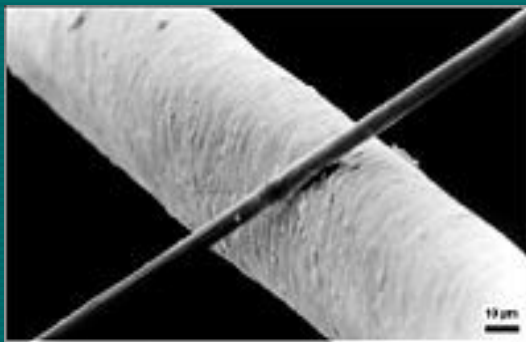
Τεχνολογία: melt-spinning-cooling

**υψηλό μέτρο ελαστικότητας**

( $f_{f,C} = 2000-3000\text{MPa}$ ,

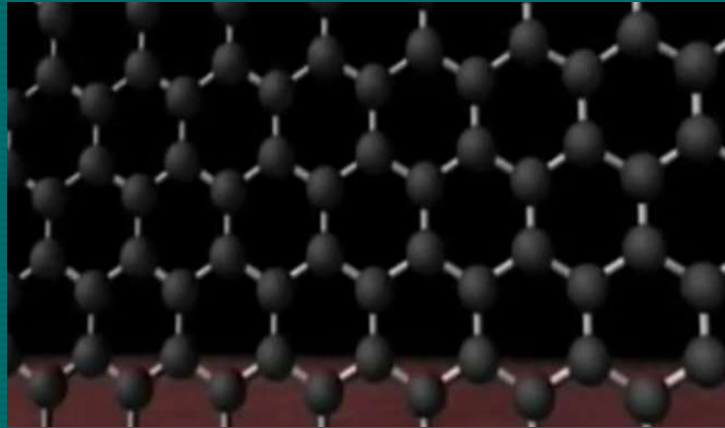
$E_{f,C} = 350-700\text{GPa}$ )

Διάμετρος ίνας: 9, 18  $\mu\text{m}$   
(μερική έλαση)





- Ίνα άνθρακα  
(υψηλή πύρωση,  
εξαεδρική δομή)

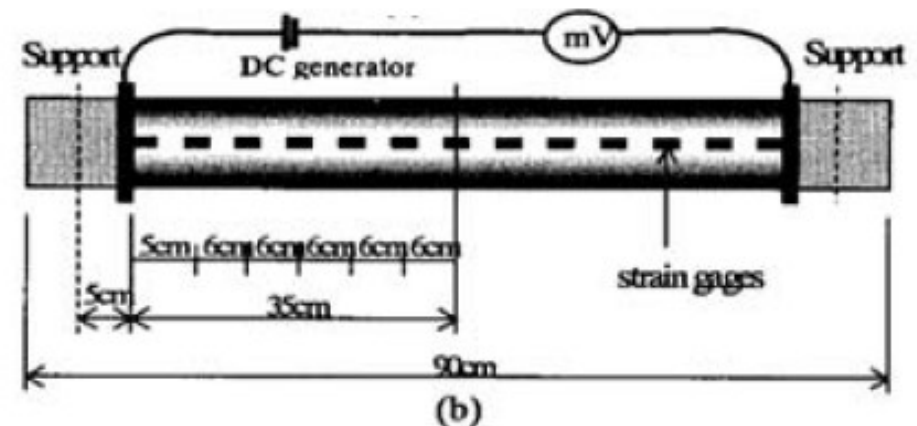
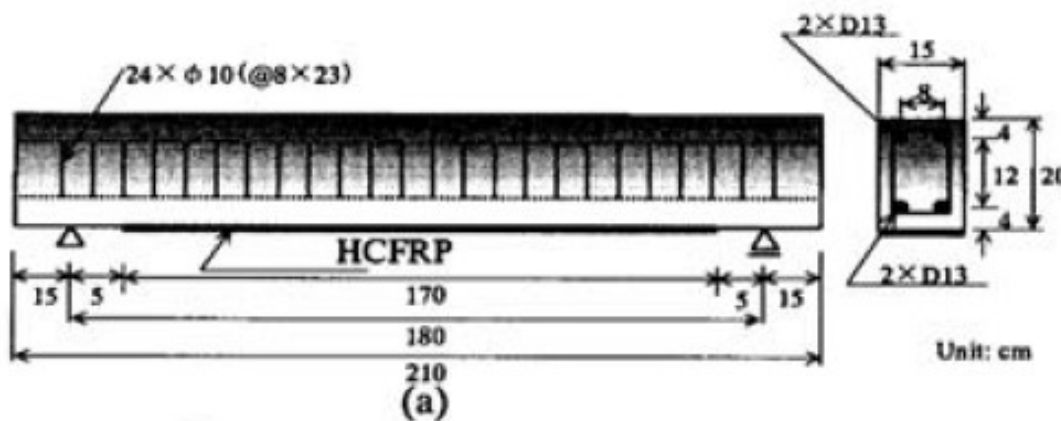


- Διαμάντι (ισχυρή  
συμπίεση & πύρωση,  
τετραεδρική διάταξη)



# Άνθρακας (100% C, οργανικό): Ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό

- Εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Ταυτόχρονα μέσο όπλισης + **Monitoring**
- **Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες: όταν ασκείται ένταση η ίνα επιμηκύνεται και αλλάζει η αντίσταση**

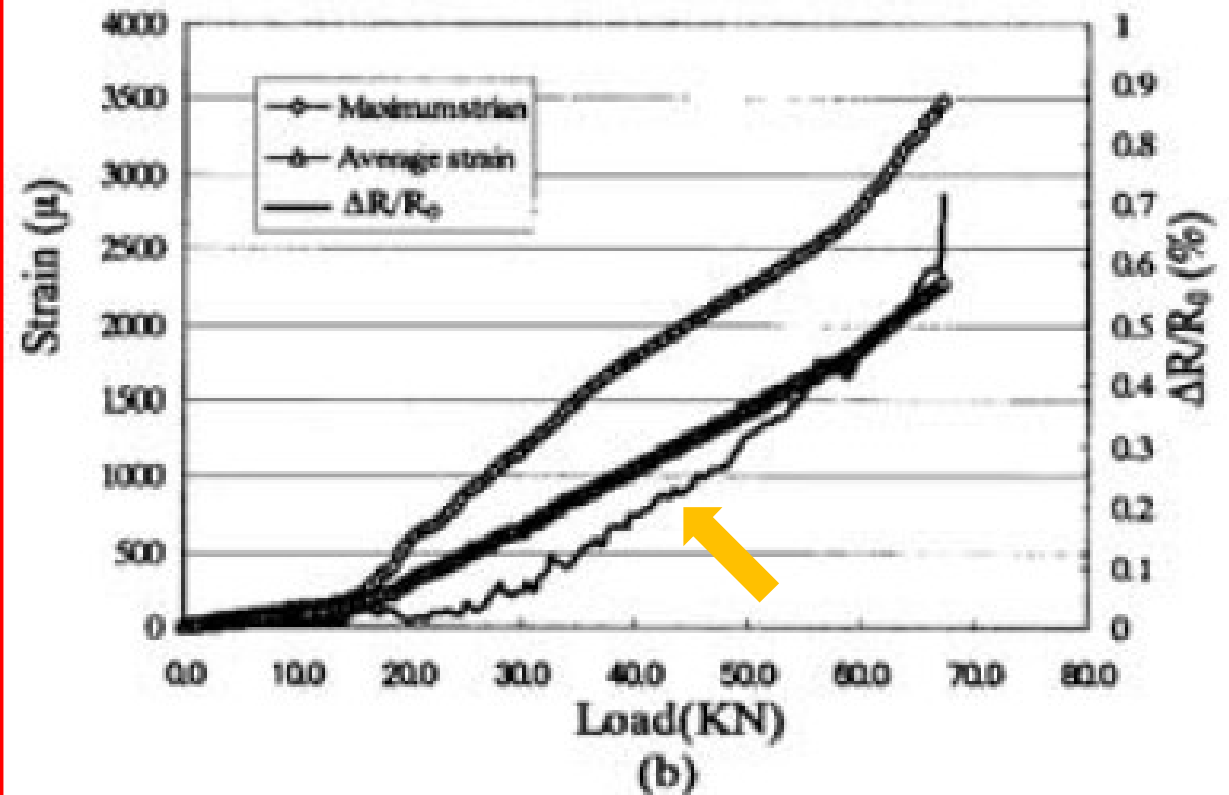
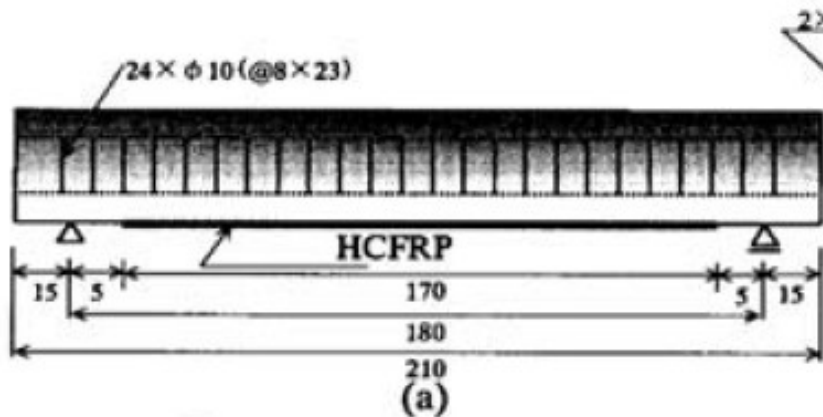
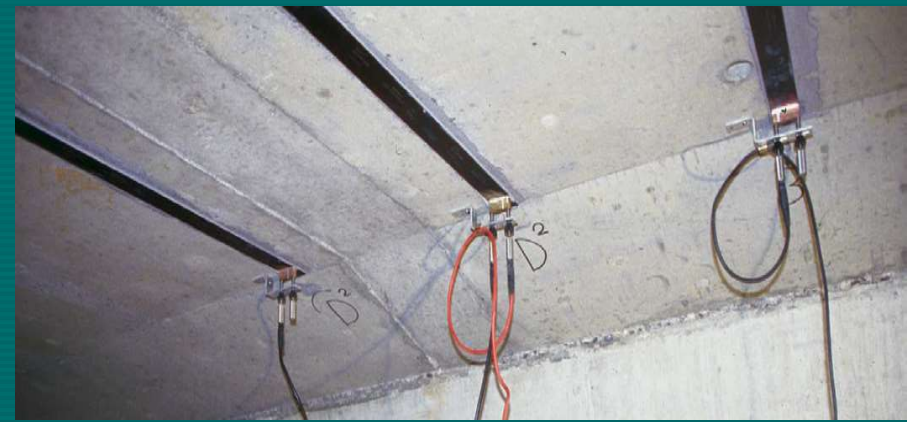


Στην εφελκυσόμενη παρειά δοκού επικολλήθηκε έλασμα από CFRP, στα άκρα του οποίου εφαρμόσθηκε Δυναμικό (κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα) ώστε κατά την καμπύλωση του φορέα από την φόρτιση, η μεταβολή του μήκους του ελάσματος να καταγραφεί και ως μεταβολή της αντίστασής του.

Για επιβεβαίωση επικολλήθηκαν και συμβατικά όργανα (strain gages) που καταγράφουν την ανηγμένη παραμόρφωση του ελάσματος

# Άνθρακας (100% C, οργανικό): Ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό

- Εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Ταυτόχρονα μέσο όπλισης + **Monitoring**
- **Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες: όταν ασκείται ένταση η ίνα επιμηκύνεται και αλλάζει η αντίσταση**



Η κλίση του διαγράμματος μεταβολής της αντίστασης  $\Delta R/R$  (CFRP monitoring) πλησιάζει την κλίση της παραμόρφωσης Strain (από συμβατικά όργανα)

# Άνθρακας (100% C, οργανικό): Ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό

- Εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Ταυτόχρονα μέσο όπλισης + **Monitoring**
- **Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες: όταν ασκείται ένταση η ίνα επιμηκύνεται και αλλάζει η αντίστασή**

## Γαλβανική διάβρωση

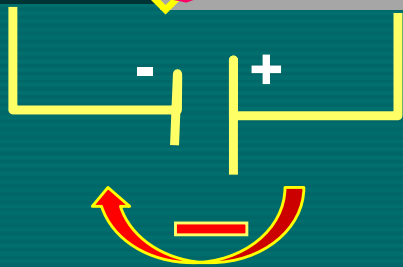
ηλεκτρολύτης  
συνήθως,  $H_2O$ ,  $O_2$  &  $Cl^-$

Ανθρακόνημα  
(100% C)

Κάθοδος

Χάλυβας  
(95% C)

Άνοδος



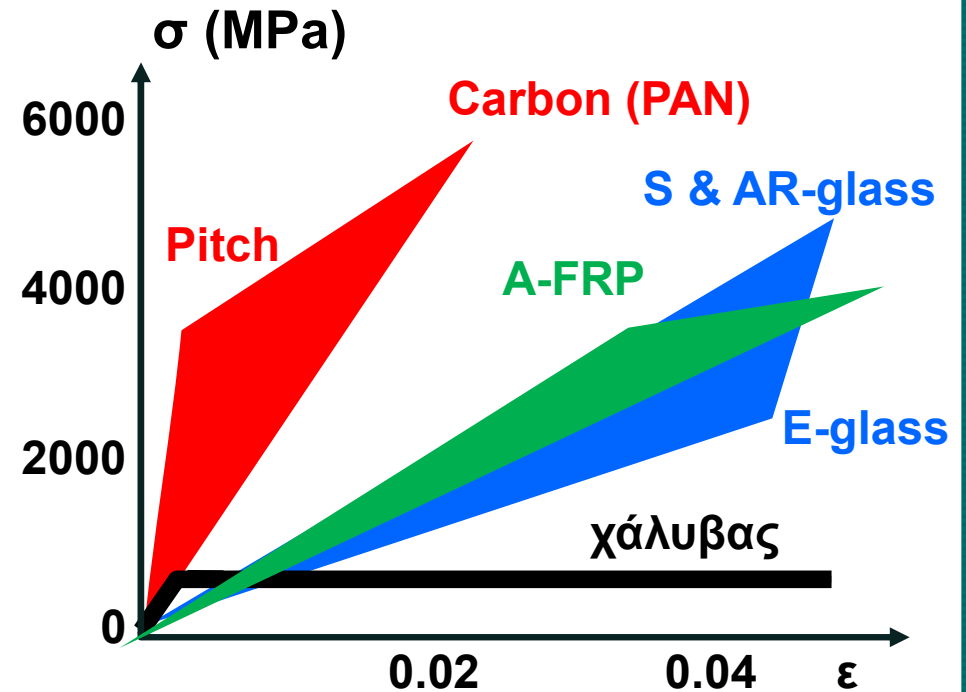
- **Αραμίδιο (συνθετικό): 1970...**  
Kevlar, Technora, Twaron



- Σε θλίψη: πλάσιμη συμπεριφορά (αντοχή έως και 60% εφελκυστικής)
- Καλή συμπεριφορά σε **κρούση**

→ Στρατός - βαλλιστική

- Αντίσταση σε: **θερμοκρασία** (εξασθενεί 500°C), χημικά και χλώριο



Υδατο-απορροφητικές (έως και 7%)  
Ευπαθείς σε UV ακτινοβολία (έως 70% Εφ. Αντοχής)

Υψηλό κόστος

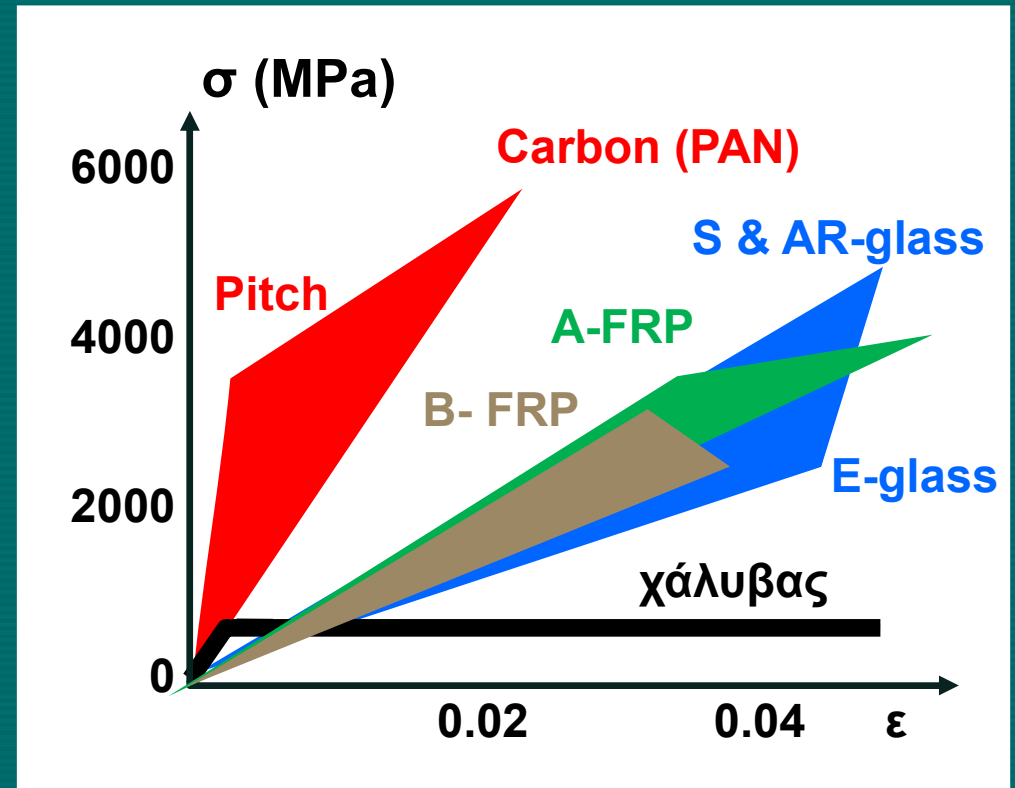
- **Βασάλτης (ανόργανο):** ηφαιστειογενές ορυκτό (πυριτικό άλας)

Νεότερες ίνες: Δεν έχουν μελετηθεί αρκετά...

Τεχνολογία: melt-spinning-cooling & extrusion όμως **χαμηλότερη ενέργεια παραγωγής απ' ότι απαιτούν οι ίνες γυαλιού**

**Αντίσταση σε: φωτιά, αλκάλια, όξινα, χλωριόντα → ???**

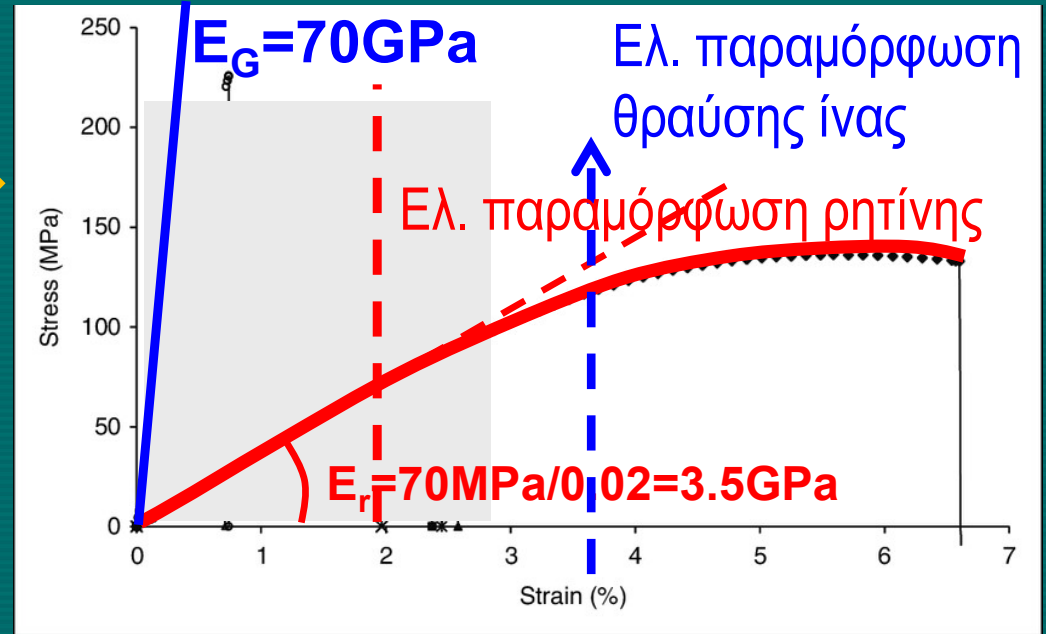
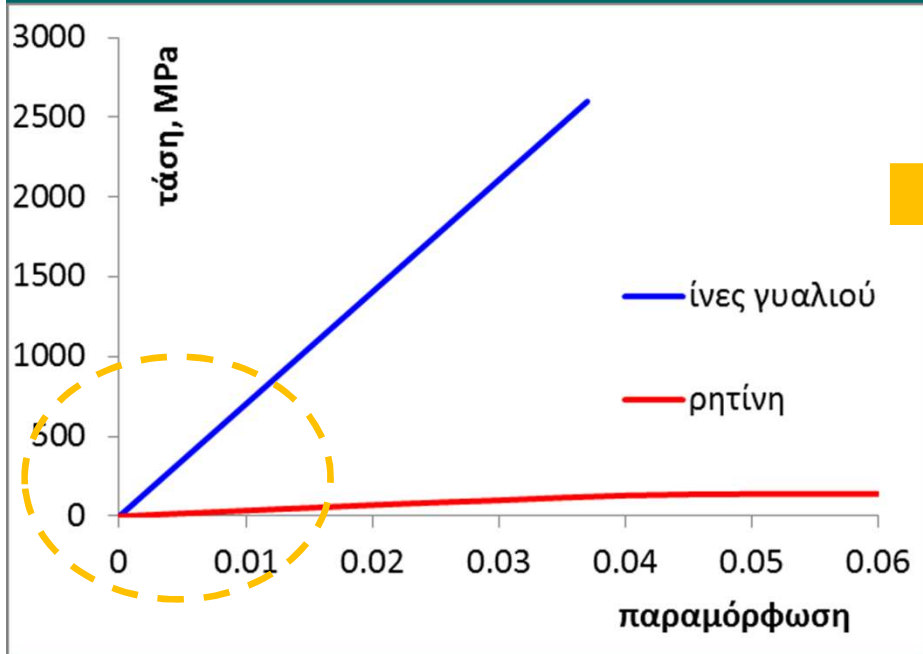
οπλισμός  
σκυροδέματος



# Παράδειγμα προσδιορισμού ιδιοτήτων ΙΟΠ ράβδου

# Συμμετέχουν όλα τα συστατικά (ίνες και μήτρα) – βιομηχανικό υλικό

	Glass	Resin (vin.ester)
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	70.3	3.5
Παραμόρφ. θραύσης $\epsilon_u$ , %	3.7 (el.)	2 (el) – 6 (pl)
τάση αστοχίας, MPa	2600	140



## Μέτρο ελαστικότητας (Κανόνας αναλογιών)

$$E = \sum_i V_i \cdot E_i$$

Τάση θραύσης,  $\sigma_u \approx E \cdot \epsilon$  όπου  $\epsilon \rightarrow (\epsilon_{el,r} - \epsilon_{u,f})$

# Παράδειγμα προσδιορισμού ιδιοτήτων ΙΟΠ ράβδου

# Συμμετέχουν όλα τα συστατικά (ίνες και μήτρα) – βιομηχανικό υλικό

$$\sigma_u = E \times \epsilon_{u,f}$$

	Glass	Resin (vin.ester)
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	70.3	3.5
Παραμόρφ. θραύσης $\epsilon_u$ , %	3.7 (el.)	2 (el) – 6 (pl)
τάση αστοχίας, MPa	2600	140

Προϊόν	$V_f$	$V_r$
A	60%	40%
B	70%	30%
Γ	80%	20%

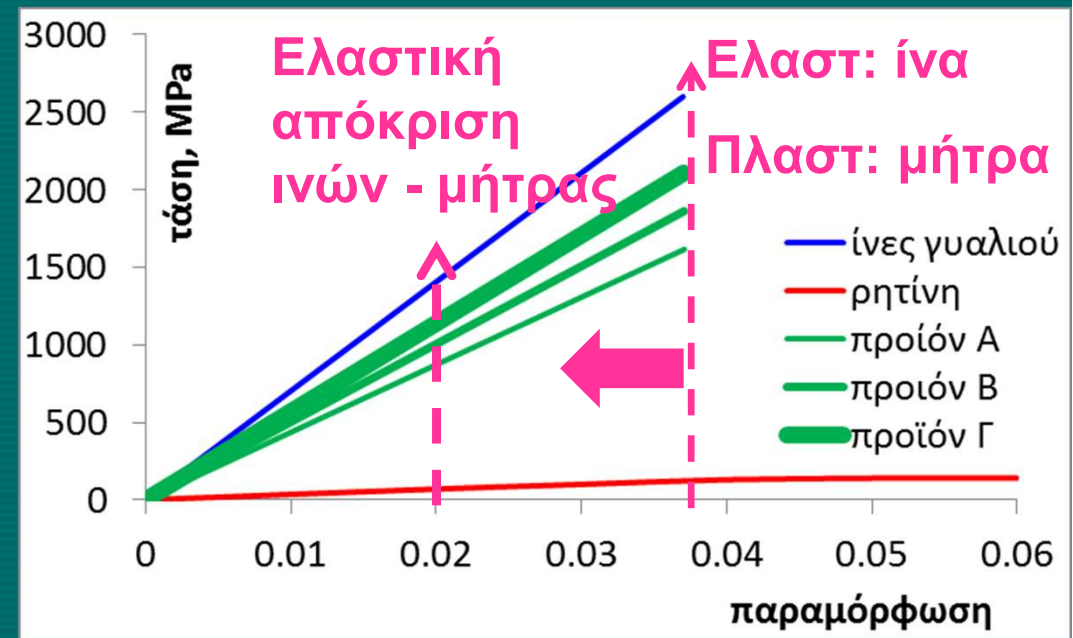
E	$\sigma(u)$
43.6	1616
50.2	1862
56.9	2108

## Μέτρο ελαστικότητας

$$E = \sum_i V_i \cdot E_i$$

## Τάση θραύσης:

$$\sigma_u \approx E \times \epsilon \text{ όπου } \epsilon \rightarrow (\epsilon_{el,r} - \epsilon_{u,f})$$



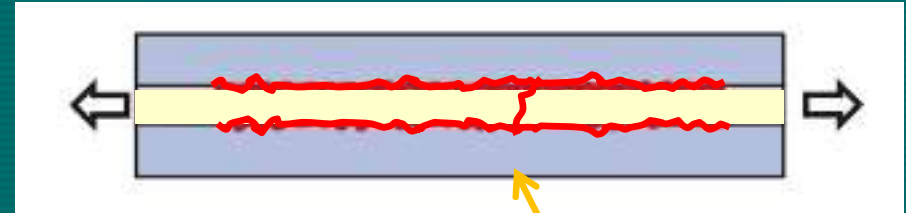
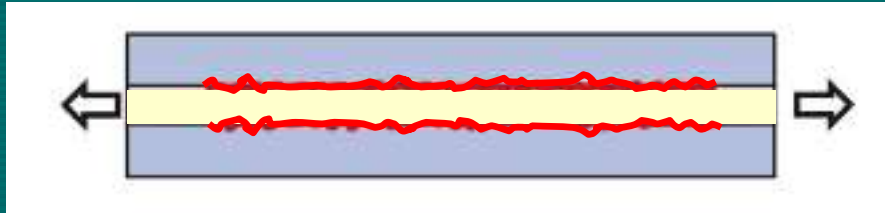
Η  $\sigma_u$  με  $\epsilon_{u,f}$  είναι μη συντηρητική εκτίμηση, απαιτείται πειραματική τεκμηρίωση.

Γιατί;



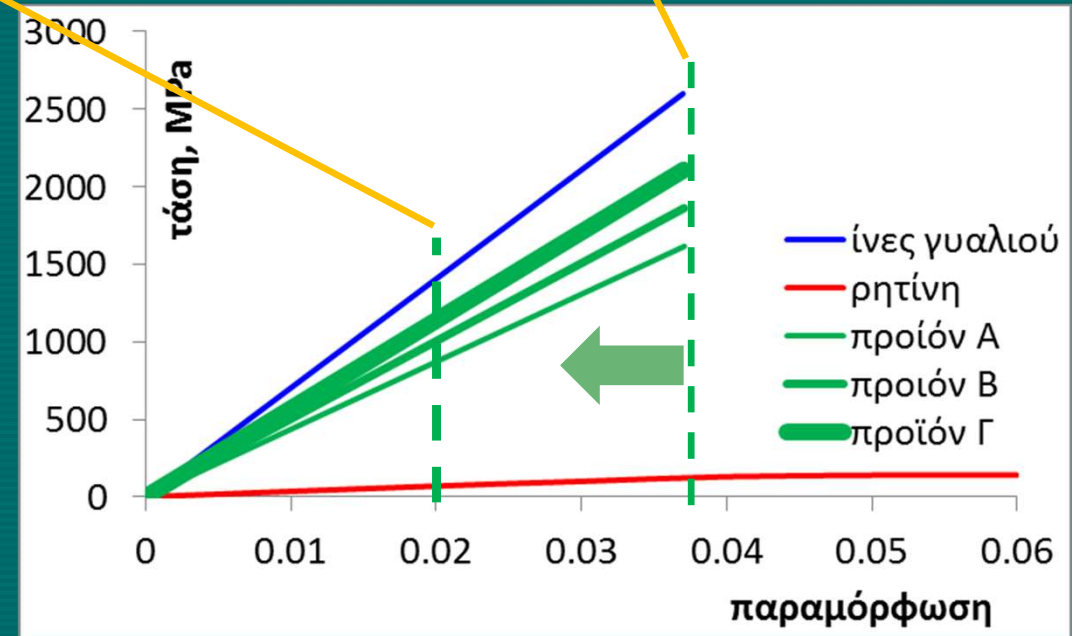
# Παράδειγμα προσδιορισμού ιδιοτήτων ΙΟΠ ράβδου

Για να εκμεταλλευτώ όλη την ικανότητα παραμόρφωσης της ίνας τι ρητίνη θα έπρεπε να διαλέξω (θεωρητικά);



η μήτρα αρχίζει να υφίσταται βλάβες

βλάβες στην μήτρα & θραύση ίνας





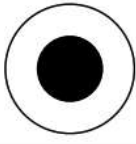

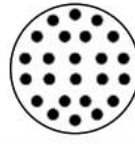
**Άσκηση 3α:** Αν θέλω  $E=47\text{GPa}$ , ποια αναλογία απαιτείται;

Μέτρο ελαστικότητας:

$$E = \sum_i V_i \cdot E_i$$

# Παράδειγμα προσδιορισμού ιδιοτήτων ΙΟΠ ράβδου

You et al. (2007). Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions. Composite Structures, V. 80

Type of FRP rod samples	A	B	C	D	E
Type	A	B	C	D	E
Fiber volume fraction by weight (%)	Glass: 49	Carbon: 39	Glass: 37 Carbon: 23	Glass: 37 Carbon: 23	Glass: 37 Carbon: 23
Carbon fiber placement	None	Full	In core	On surface	Dispersed
Cross-section <sup>a</sup>					

<sup>a</sup> Color key: white (glass fiber), black (carbon fiber).

Material properties of fibers and resins			
Material	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)
Carbon fiber	4900	230.0	2.10
E-glass fiber	2410	79.0	3.04
Vinylester resin	79	3.7	7.00
Unsaturated polyester resin	62	3.1	5.00

εκτίμηση:

$$E_A = 0,49 * 79 + 0,51 * 3,7 \approx 41 \text{ GPa}$$

$$\text{Όμως } E_A < E_A^{\text{exp}} = 47.8 \text{ GPa}$$

Αν ελαστοπλαστική η ρητίνη τότε  
 $\epsilon_{el,r} = 79/3700 = 0.0213$

$$\epsilon_{el,min} = \{0.0213, 0.0304\} = 0.0213$$

$$\sigma_u = E_A * \epsilon_{min} = 41000 * 0.0213 = 873 \text{ MPa}$$

Ή,

$$\sigma_u = E_A * \epsilon_{f,u} = 41000 * 0.0304 = 1246 \text{ MPa}$$

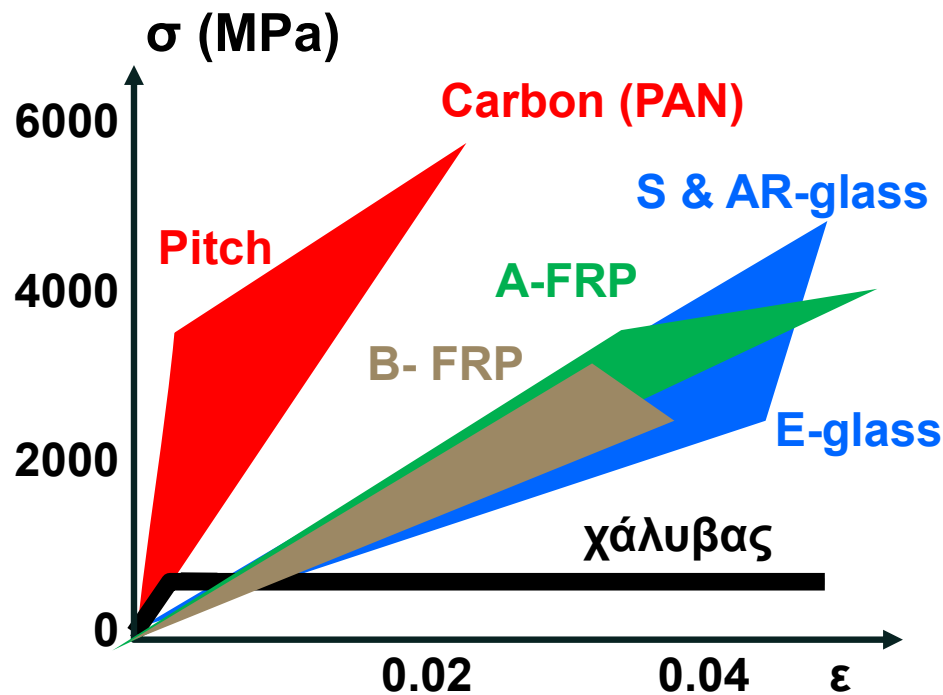
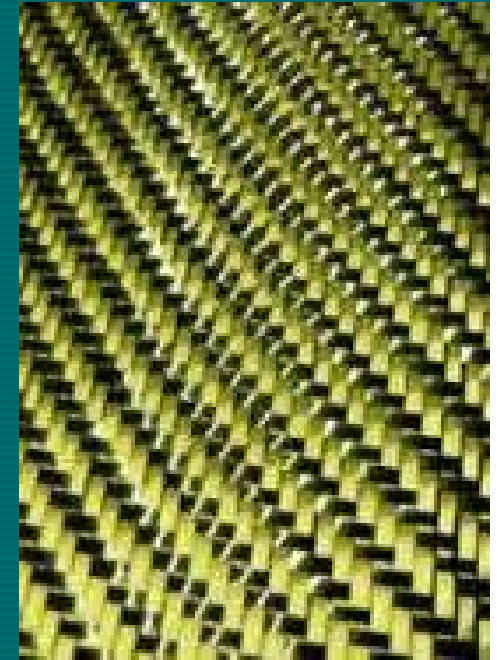
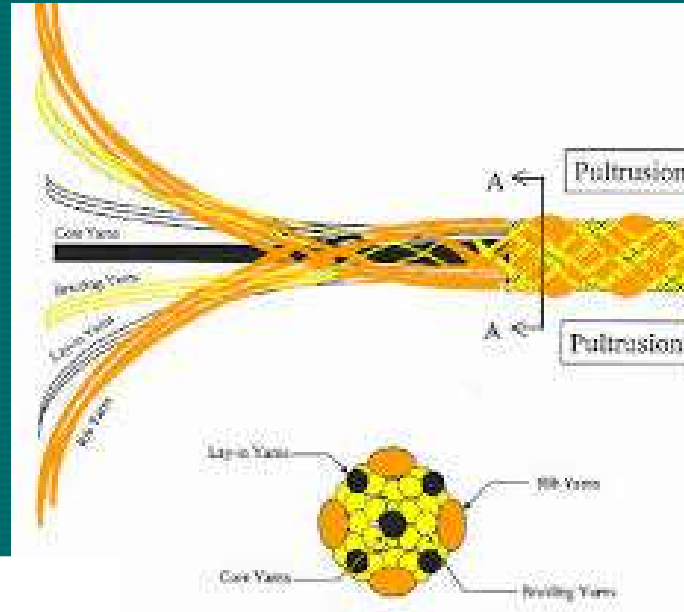
$$873 < \sigma_u^{\text{exp}} = 972 < 1246 \text{ (MPa)}$$

Results of tensile tests for non-hybrid rod specimens					
Type	Experiment				
	Tensile strength		Elastic modulus		Ultimate strain <sup>b</sup>
	(MPa)	COV (%)	(MPa)	COV (%)	
A-VE	972	2.3	47.8	3.7	2.03
A-PE	983	5.4	48.3	0.8	2.03
B-VE	1454	10.6	114.8	4.3	1.27
B-PE	1431	4.0	114.6	3.2	1.25

**Άσκηση 3b:** Ελέγξτε τις περιπτώσεις B-VE και B-PE

# Υβριδικά Υλικά: Συνδυασμός ινών

- Γυαλί
- Άνθρακας
- Αραμίδιο
- Βασάλτης



**Ζητούμενο: βελτίωση ιδιοτήτων & επιτελεστικότητα**

Παραμόρφωση

Ψευδο-Πλαστιμότητα ( $\epsilon_{u,f}$ , πλέξη ινών)

Αύξηση εφελκυστικής αντοχής

Θλιπτική συμπεριφορά

Self-monitoring

# Υβριδικά Υλικά: Παράδειγμα ράβδου

Συμμετέχουν όλα τα συστατικά (ίνες και μήτρα) – βιομηχανικό υλικό

Μέτρο ελαστικότητας υβριδίου:

$$E = \sum_i V_i \cdot E_i$$

	Carbon	Glass	Aramid	Resin
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	236	73	112	4
Παραμόρφ. θραύσης $\epsilon_u$ , %	1.6	3.6	2.4	2(el) – 6(pl)
τάση αστοχίας, MPa	3776	2628	2688	80

Υβρίδιο	Όγκοι				E	$\sigma_{ult}$
	Carbon	Glass	Aramid	Resin		
A	10	50	10	30	72.5	?
B	10	40	30	20	87.2	?
Γ	40	20	20	20	132	?

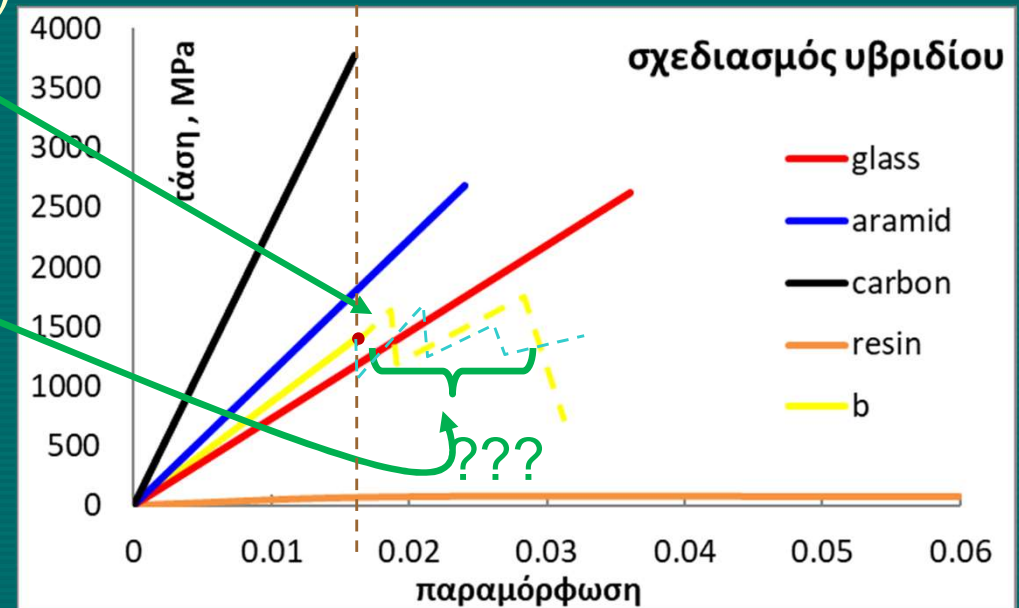
Παραμόρφωση λήξης ελαστ. Συμπεριφοράς  $\rightarrow$  η  $\epsilon_{min}$  των εμπλεκόμενων υλικών

(π.χ. B:  $\sigma_{ελ} = E \epsilon_{min} = 87200 * 0,016 = 1395 \text{MPa}$ )

$$\sigma_{ult} = ?$$

Ψευδο-Πλαστιμότητα ( $\epsilon_u$ , πλέξη ινών):

- η αστοχία των ινών μικρότερου  $\epsilon_u$  προηγείται,
- Οι εναπομένουσες ίνες πρέπει να μπορούν να παραλάβουν το επιπλέον φορτίο

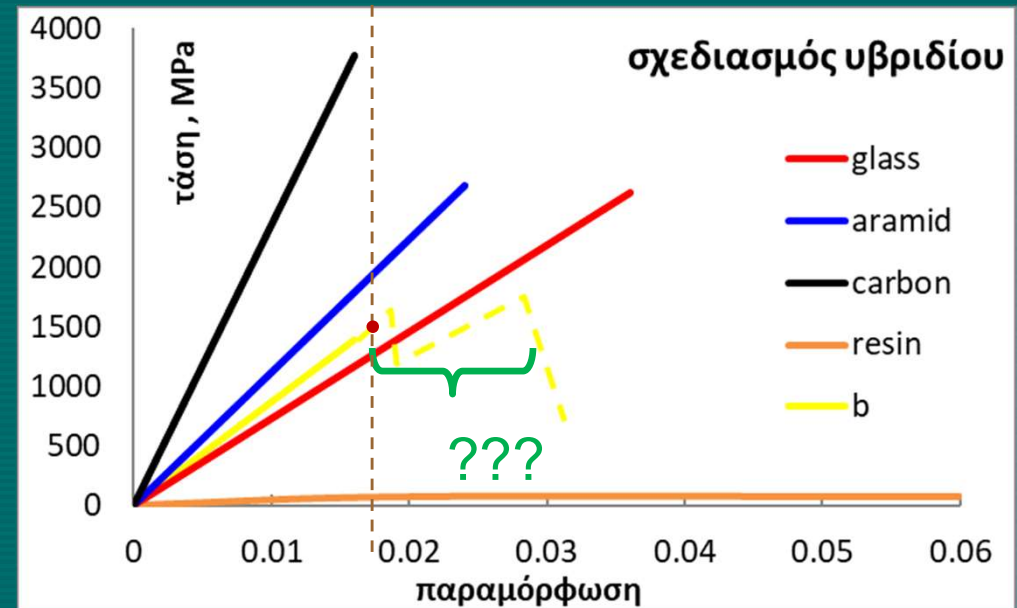
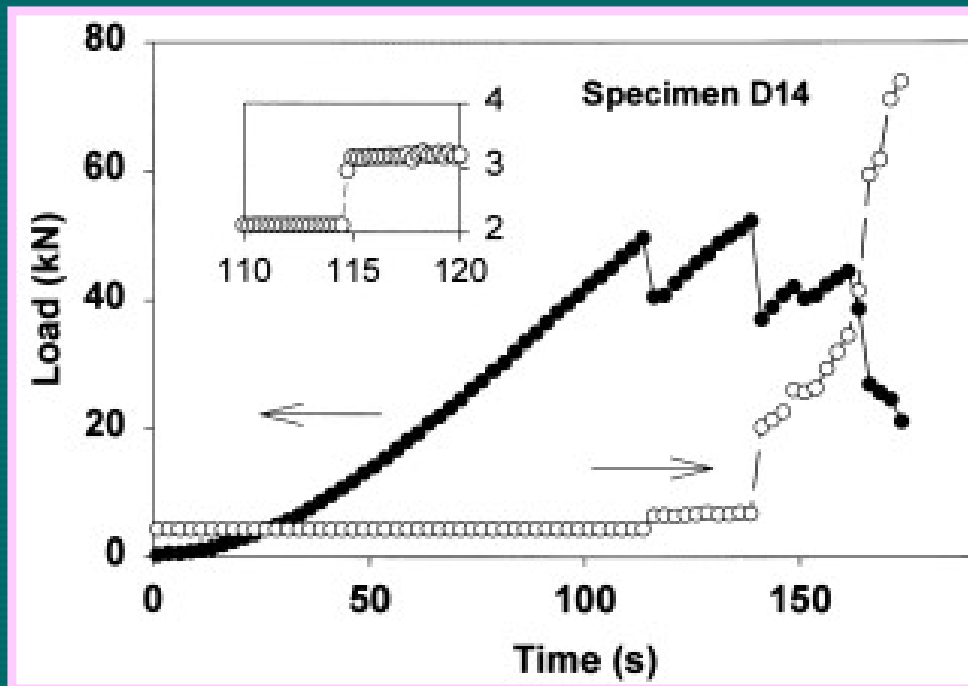


# Υβριδικά Υλικά: Παράδειγμα ράβδου

Συμμετέχουν όλα τα συστατικά (ίνες και μήτρα) – βιομηχανικό υλικό

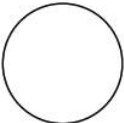



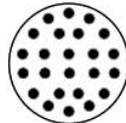
Η πειραματική συμπεριφορά του υβριδίου δηλώνει:

Στην λήξη της ελαστικότητας, ξεκινά η σταδιακή αστοχία των ινών μικρής ικανότητας παραμόρφωσης σε διακριτές θέσεις ενώ και η συνεργασία ινών – μήτρας εξασθενεί (θέση 1<sup>ου</sup> άλματος). Οι άθικτες ίνες είναι ικανές να παραλάβουν το φορτίο που εκλύθηκε από αυτές που έσπασαν και να αναλάβουν και επιπλέον αύξηση του φορτίου (μέχρι την θέση του 2<sup>ου</sup> άλματος).



# Παράδειγμα προσδιορισμού ιδιοτήτων υβριδικής ΙΟΠ ράβδου

You et al. (2007). Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions. Composite Structures, V. 80, No. 1, pp 117-1222

Type of FRP rod samples	A	B	C	D	E
Type	A	B	C	D	E
Fiber volume fraction by weight (%)	Glass: 49	Carbon: 39	Glass: 37 Carbon: 23	Glass: 37 Carbon: 23	Glass: 37 Carbon: 23
Carbon fiber placement	None	Full	In core	On surface	Dispersed
Cross-section <sup>a</sup>					

<sup>a</sup> Color key: white (glass fiber), black (carbon fiber).

Material properties of fibers and resins			
Material	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)
Carbon fiber	4900	230.0	2.10
E-glass fiber	2410	79.0	3.04
Vinylester resin	79	3.7	7.00
Unsaturated polyester resin	62	3.1	5.00

Εκτίμηση :

$$E_C = 0,37 \cdot 79 + 0,23 \cdot 230 + 0,4 \cdot 3,7 \approx 83,6 \text{ GPa}$$

Όμως  $E_A > E_A^{\text{exp}} = 80,4 \text{ GPa}$

Αν ελαστοπλαστική η ρητίνη τότε:

$$\varepsilon_{\text{el,r}} = 79/3700 = 0,0213$$

$$\varepsilon_{\text{el,min}} = \{0,0213, 0,0304, 0,021\} = 0,021 > 0,0159 \text{ (exp)}$$

$$\sigma_u = E_C \cdot \varepsilon_{\text{min}} = 80400 \cdot 0,021 = 1688 \text{ MPa} > 1281 \text{ MPa (exp)}$$

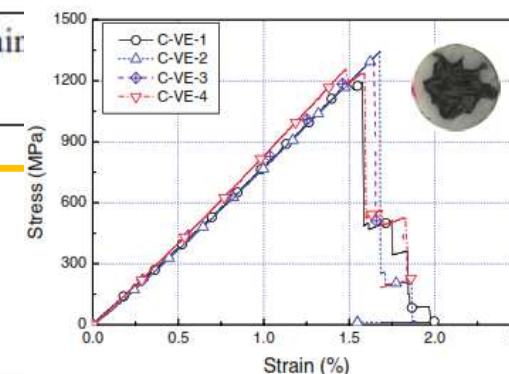
$$E = \sum V_i \cdot E_i$$

**Άσκηση 3c: Ελέγξτε τις περιπτώσεις D-VE και E-PE**

Results of tensile tests for hybrid rod specimens

Type	Tensile strength <sup>a</sup>		Elastic modulus <sup>b</sup>		Ultimate strain (%)
	(MPa)	COV (%)	(GPa)	COV (%)	
C-VE	1281	5.4	80.4	3.1	1.59
C-PE	1331	3.2	83.1	4.2	1.60
D-VE	1083	3.2	78.9	0.5	1.37
D-PE	1128	2.7	79.5	0.4	1.42
E-VE	1045	2.6	62.4	0.4	1.68
E-PE	1213	4.9	84.0	2.3	1.44

Notes:  $c = a/b$ ,  $d = c/\varepsilon_f^{\text{ult}}$  of non-hybrid carbon rod.



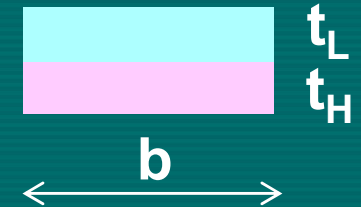
# Υβριδικά Υλικά: Παράδειγμα επι τόπου εφαρμογή

(π.χ. θέλετε να φτιάξετε ένα έλασμα από στρώσεις υφάσματος)

Συμμετέχουν μόνο οι όγκοι των ινών (όχι η μήτρα) =>  $V_L + V_H = 1$  διατομή

Δείκτης  $L$ : ίνες χαμηλής ικανότητας παραμόρφωσης

Δείκτης  $H$ : ίνες υψηλής ικανότητας παραμόρφωσης



Μέτρο ελαστικότητας υβριδίου:

Τάση λήξης ελαστικής συμπεριφοράς υβριδίου:

$$V \times E = \sum_i V_i \times E_i \rightarrow E = \frac{t_H E_H + t_L E_L}{t_L + t_H}$$

$$\sigma = \begin{cases} V_L \sigma_L + V_H E_H \varepsilon_L, & V_H < V_{crit} \\ V_H \sigma_H, & V_H > V_{crit} \end{cases}$$

$$V_{crit} = \frac{\sigma_L}{\sigma_L + \sigma_H - E_H \varepsilon_L}$$

Όταν ισχύει η 1<sup>η</sup> εξίσωση: η παραμόρφωση λήξης της ελαστικής συμπεριφοράς του υβριδίου συμπίπτει με αυτή των ινών χαμηλής ικανότητας παραμόρφωσης,  $\varepsilon_L$  (κανόνας αναλογιών και για την τάση αστοχίας)

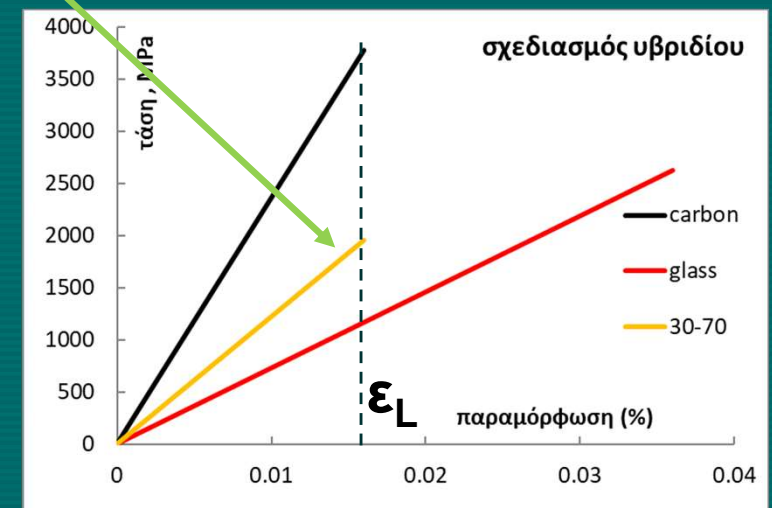
Π.χ. Υβρ. C (30%) – G (70%)

$$E = 236 \text{ GPa} \cdot 0.3 + 73 \text{ GPa} \cdot 0.7 = 121.9 \text{ GPa}$$

$$V_{crit} = 3776 / (3773 + 2628 - 73000 \cdot 0,016) = 0,72 = 72\% > V_H = 70\%$$

$$\sigma = 0,3 \cdot 3776 + 0,7 \cdot 73000 \cdot 0,016 = 1950 \text{ MPa}$$

	Carbon	Glass
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	236	73
Παραμόρφ. θραύσης $\varepsilon_u$ , %	1.6	3.6
τάση αστοχίας, MPa	3776	2628



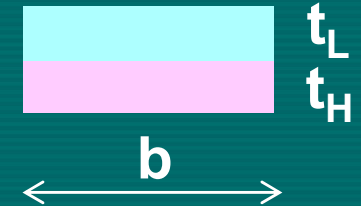
# Υβριδικά Υλικά: Παράδειγμα επι τόπου εφαρμογή

(π.χ. θέλετε να φτιάξετε ένα έλασμα από στρώσεις υφάσματος)

Συμμετέχουν μόνο οι όγκοι των ινών (όχι η μήτρα) =>  $V_L + V_H = 1$  διατομή

Δείκτης  $L$ : ίνες χαμηλής ικανότητας παραμόρφωσης

Δείκτης  $H$ : ίνες υψηλής ικανότητας παραμόρφωσης



Μέτρο ελαστικότητας υβριδίου:

Τάση λήξης ελαστικής συμπεριφοράς υβριδίου:

$$V \times E = \sum_i V_i \times E_i \rightarrow E = \frac{t_H E_H + t_L E_L}{t_L + t_H}$$

$$\sigma = \begin{cases} V_L \sigma_L + V_H E_H \varepsilon_L, & V_H < V_{crit} \\ V_H \sigma_H, & V_H > V_{crit} \end{cases}$$
$$V_{crit} = \frac{\sigma_L}{\sigma_L + \sigma_H - E_H \varepsilon_L}$$

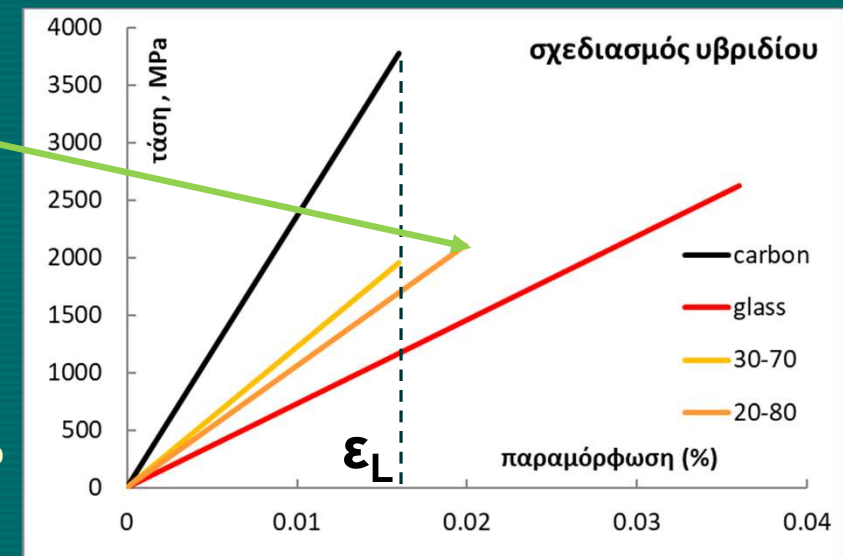
Όταν ισχύει η 1<sup>η</sup> εξίσωση: η παραμόρφωση λήξης της ελαστικής συμπεριφοράς του υβριδίου συμπίπτει με αυτή των ινών χαμηλής ικανότητας παραμόρφωσης,  $\varepsilon_L$  (κανόνας αναλογιών και για την τάση αστοχίας)

Όταν ισχύει η 2<sup>η</sup> εξίσωση: η παραμόρφωση λήξης της ελαστικής συμπεριφοράς του υβριδίου αυξάνει ως προς το  $\varepsilon_L$

Π.χ. Υβρ. C (20%) – G (80%)

$$E = 236 \text{ GPa} \cdot 0.2 + 73 \text{ GPa} \cdot 0.8 = 105.6 \text{ GPa}, \quad V_{crit} = 72\% < V_H = 80\%$$

$$\sigma = 0.8 \cdot 2628 = 2102 \text{ MPa}, \quad \text{άρα } \varepsilon_{\varepsilon_L} = \sigma / E = 2102 / 105.6 = 0.02 < \varepsilon_H$$





# Υβριδικά Υλικά: Παράδειγμα επι τόπου εφαρμογή

(π.χ. θέλετε να φτιάξετε ένα έλασμα από στρώσεις υφάσματος )

Συμμετέχουν μόνο οι όγκοι των ινών (όχι η μήτρα) =>  $V_L + V_H = 1$

$$\sigma = \begin{cases} V_L \sigma_L + V_H E_H \varepsilon_L, & V_H < V_{crit} \\ V_H \sigma_H, & V_H > V_{crit} \end{cases}$$

$$V_{crit} = \frac{\sigma_L}{\sigma_L + \sigma_H - E_H \varepsilon_L}$$

$$E = \sum_i V_i \cdot E_i$$

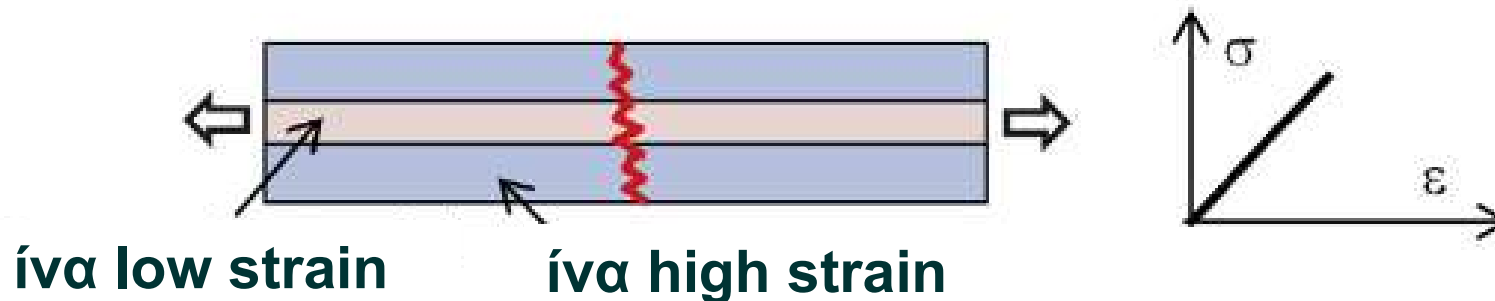
	Carbon	Glass
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	236	73
Παραμόρφ. θραύσης $\varepsilon_u$ , %	1.6	3.6
τάση αστοχίας, MPa	3776	2628

Υβρίδιο	$V_C$	$V_G$	$V_{crit}$	Εξ.	E (GPa)	$\sigma$	$\varepsilon_{el} = \sigma/E$	$\varepsilon_u$
A	30%	70%	72%	1η	121.9	1950	1.6%	
B	20%	80%	72%	2η	105.6	2102	2%	

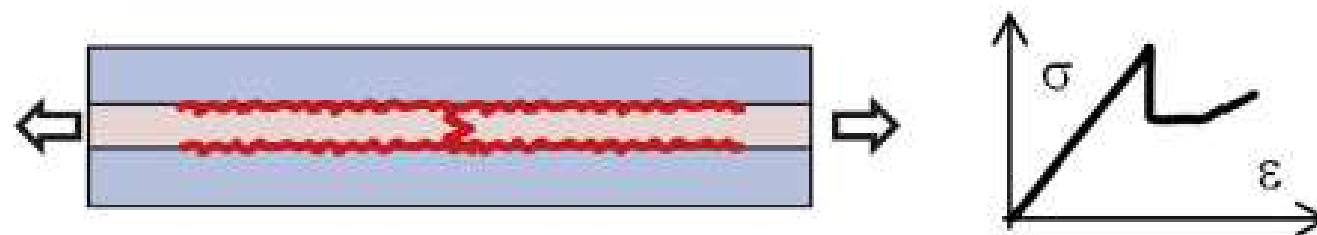
Η μετελαστική συμπεριφορά του υβριδίου (μέχρι ποια  $\varepsilon_u$  φτάνει), αν δεν προηγηθεί κάποια αστοχία στο δομικό στοιχείο στο οποίο θα επικολληθεί, εξαρτάται από → → →

# Μεταλαστική συμπεριφορά σχέσης τάσης – παραμόρφωσης υβριδίου, ανάλογα τα σενάρια αστοχίας της δομής του:

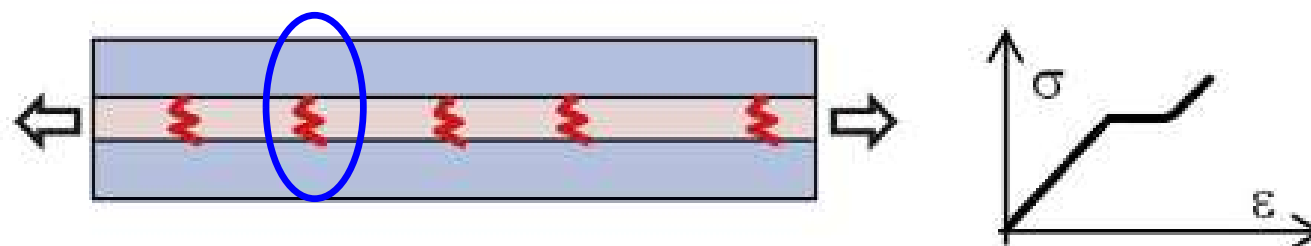
1) Πρόωρη θραύση ινών h



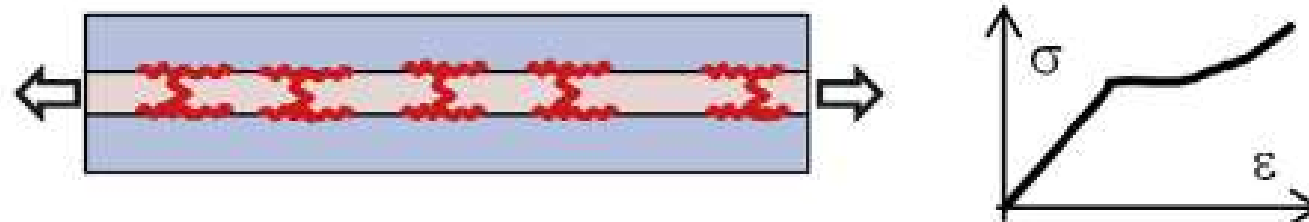
2) αποκόλληση



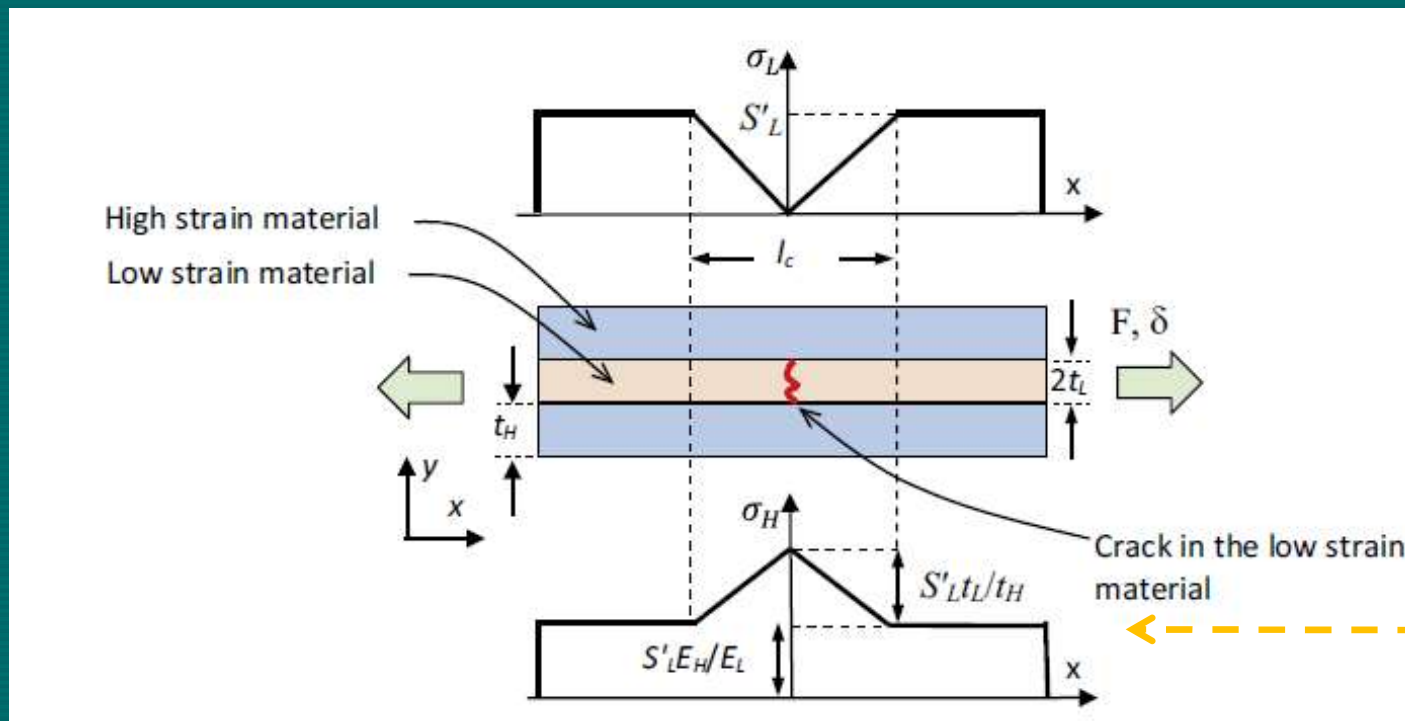
3) Θραύση ινών low strain



4) Θραύση ινών low strain και εκτενής αποκόλληση



# Συμπεριφορά σχέσης τάσης – παραμόρφωσης υβριδίου (επί τόπου εφαρμογή)



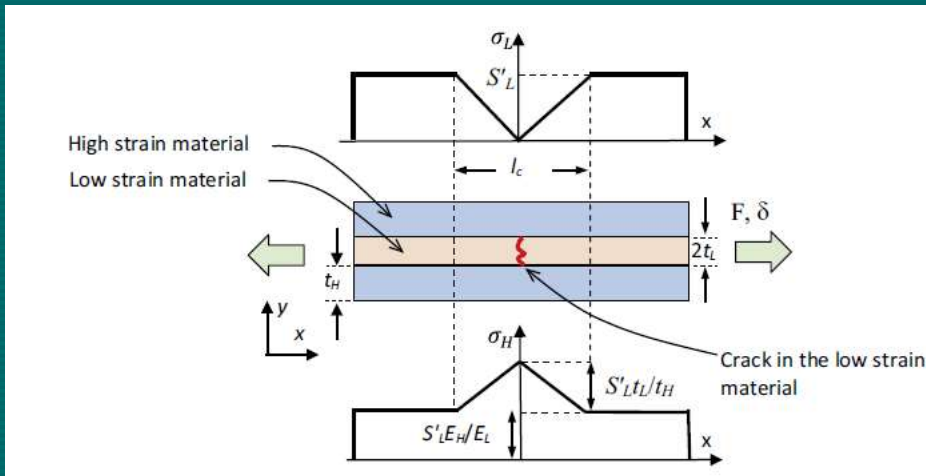
- η τάση της ίνας L μηδενίζεται στην θέση θραύσης και αυξάνει σταδιακά στο μέγιστο αν η συνάφεια με το περιβάλλον υλικό είναι ισχυρή.
- Η τάση της ίνας H εξαναγκάζεται σε αύξηση της τάσης της τοπικά.

Δύναμη ανά μέτρο πλάτους:  $F = 2t_H S_H' + 2t_L S_L' = 2t_H E_H \epsilon + 2t_L E_L \epsilon$

Στην θέση της αστοχίας:  $F = 2t_H \sigma_H$   $S_L' = E_L \epsilon$

$2t_H \sigma_H = 2t_H E_H \epsilon + 2t_L E_L \epsilon \rightarrow \sigma_H = E_H \epsilon + t_L / t_H E_L \epsilon \rightarrow \sigma_H = E_H / E_L S_L' + t_L / t_H S_L'$

# Συμπεριφορά σχέσης τάσης – παραμόρφωσης υβριδίου (επί τόπου εφαρμογή)



Π.χ. Υβρ. C (30%) – G (70%)

$E=121.9\text{GPa}$ ,  $V_{\text{crit}}=72\% > V_H=70\%$

$\sigma=0,3 \cdot 3776 + 0,7 \cdot 73000 \cdot 0,016 = 1950\text{MPa}$  (λήξη ελαστικής συμπεριφοράς στο  $\varepsilon_L=0.016$ )

Οι εναπομένουσες ίνες G:  $\sigma_H = E_H/E_L S'_L + t_L/t_H S'_L = 73/236 \cdot 3776 + 0.3/0.7 \cdot 3776$

$\rightarrow \sigma_H = 2786\text{MPa} > \sigma_u = 2628\text{MPa} \rightarrow$  η  $\sigma_H$  δεν μπορεί να αναπτυχθεί, άμεση αστοχία!

Π.χ Υβρ. C (20%) – G (80%)

$E=105.6\text{GPa}$ ,  $V_{\text{crit}}=72\% < V_H=80\%$

$\sigma=0,8 \cdot 2628 = 2102\text{MPa}$ , άρα  $\varepsilon_{el} = \sigma/E = 2102/105,6 = 0.02 < \varepsilon_H$

εναπομένουσες ίνες G:  $\sigma_H = E_H/E_L S'_L + t_L/t_H S'_L = 73/236 \cdot 3776 + 0.2/0.8 \cdot 3776$

$\sigma_H = 2112\text{MPa} < \sigma_u = 2628\text{MPa} \rightarrow$  η  $\sigma_H$  μπορεί να αναπτυχθεί (ανακατανομή έντασης)

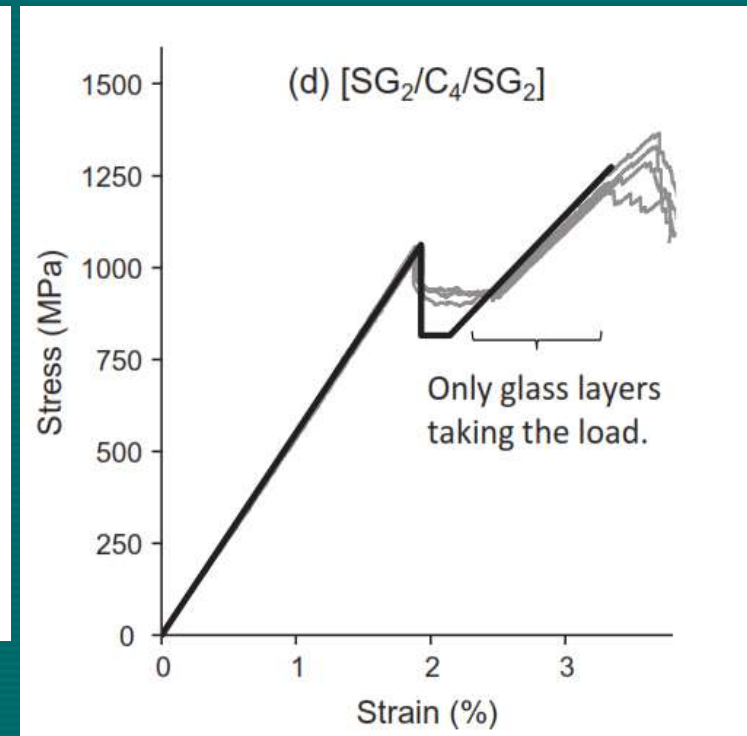
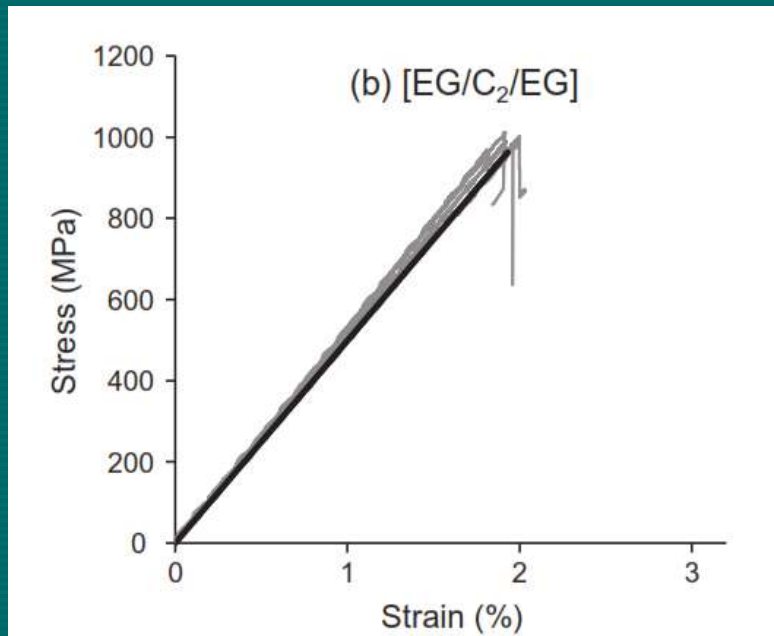
$$2t_H \sigma_H = 2t_H E_H \varepsilon + 2t_L E_L \varepsilon \rightarrow \sigma_H = E_H \varepsilon + t_L/t_H E_L \varepsilon \rightarrow \sigma_H = E_H/E_L S'_L + t_L/t_H S'_L$$

	Carbon	Glass
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	236	73
Παραμόρφ. θραύσης $\varepsilon_u$ , %	1.6	3.6
τάση αστοχίας, MPa	3776	2628

	$E_1$ (GPa)	$\sigma_c$ (MPa)	Ply thickness (mm)
Hexcel E-Glass/913 [24]	38.7 <sup>f</sup>	1548 <sup>f</sup>	0.144
Hexcel S-Glass/913	45.7	2138 <sup>f</sup>	0.155
SkyFlex TR30 carbon epoxy [25]	101.7	1962	0.030

Damage analysis of pseudo-ductile thin-ply UD hybrid composites – A new analytical method. M.Jalalvand, G. Czil, M.R. Wisnom (Composites: Part A, 2015)

## Οι δείκτες δηλώνουν αριθμό στρώσεων ανά υλικό



$$E = \frac{t_H E_H + t_L E_L}{t_H + t_L}$$

**Άσκηση για το σπίτι: 4) Να εκτιμήσετε το E των 2 περιπτώσεων και να αποφανθείτε για το αν μπορούν να παραλάβουν τάση πέραν του ελαστικού ορίου.**