

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΔΟΚΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Βαρβάρα Χαραλαμπίδη

Διδάκτορας Δ.Π.Θ., vcharal@civil.duth.gr

Θεόδωρος Ρουσάκης

Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ., trousak@civil.duth.gr

Αθανάσιος Καραμπίνης

Καθηγητής Δ.Π.Θ., karabin@civil.duth.gr

Εισαγωγή

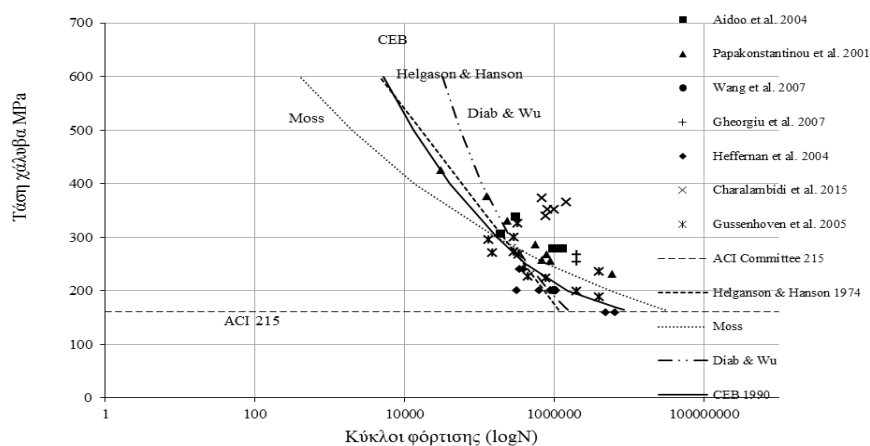
Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι καμπύλες S – N ή καμπύλες Wöhler. Οι καμπύλες αυτές έχουν ως συνιστώσες την τάση του χάλυβα και τον αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία (N), δηλαδή την διάρκεια ζωής σε κόπωση, του υλικού. Η επιρροή της μέγιστης τάσης καθώς και του εύρους ελάχιστης - μέγιστης τάσης που ασκούνται στον εφελκόμενο οπλισμό εξετάστηκε στην πλειοψηφία των δημοσιευμένων εργασιών όπως των Parakonstantinou et al. (2001) και Kim και Heffernan (2008) μεταξύ άλλων. Έχει γίνει σαφές από τα πειραματικά αποτελέσματα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας ότι το ευπαθές υλικό ενός δομικού μέλους ωπλισμένου σκυροδέματος που υπόκειται σε επαναλαμβανόμενη καταπόνηση είναι ο χάλυβας. Οι διαθέσιμες σχέσεις σχεδιασμού έναντι κόπωσης προβλέπουν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης στην αστοχία συναρτήσει του εύρους της φόρτισης (Helgason & Hanson 1974, Moss 1982, CEB 1990, Mallet 1991, Parakonstantinou et al. 2001, Diab & Wu 2008, μεταξύ άλλων) υποθέτοντας έμμεσα ένα σταθερό φορτίο μεταξύ του ελαχίστου και μέγιστου ορίου φόρτισης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αναλυτική σχέση υπολογισμού των κύκλων φόρτισης κόπωσης δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με σύνθετα υλικά. Στόχος της έρευνας είναι ο υπολογισμός του αριθμού των κύκλων κόπωσης δοκών στην αστοχία, με μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με υφιστάμενες σχέσεις της βιβλιογραφίας (Parakonstantinou et al. 2001, Diab et al. 2008, μεταξύ άλλων) στις οποίες λαμβάνεται υπόψη μόνο το εύρος τάσεων στο χάλυβα. Κρίσιμο υλικό στις δοκιμές κόπωσης, ακόμη και στις περιπτώσεις ενισχύσεων με σύνθετα υλικά, παραμένει ο χάλυβας. Ωστόσο, η εκτίμηση των κύκλων φόρτισης μίας δοκού ωπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένης με ιωπλισμένα πολυμερή γίνεται ακριβέστερη αν ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς η δυστένεια των οπλισμών χάλυβα ($k_s=A_sE_s$) και ΙΩΠ ($k_f=A_fE_f$), η τάση που ασκείται στο χάλυβα (σ_{max}) και το όριο διαρροής του (f_y). Για τον σκοπό αυτό συστάθηκε βάση πειραματικών δεδομένων τα οποία επιλέχθηκαν από την υπάρχουσα διεθνή πειραματική βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένων των αποτελεσμάτων της παρούσας πειραματικής διερεύνησης (Πίνακας 1).

Πίν. 1 Καταγραφή πειραματικών δοκιμών σε κόπωση

Συγγραφείς	Δοκίμιο	Μέγιστη τάση χάλυβα (MPa)	Εύρος τάσης χάλυβα (MPa)	σ_{max}/f_y	k_s/k_f	Πειραματικοί κύκλοι στην αστοχία
Papakonstantinou et al. (2001)	S-2	255	255	0.60	4.9	880000
	S-5	267	267	0.63	4.9	800000
	S-7	286	286	0.67	4.9	570000
	S-9	330	330	0.77	4.9	235000
	S-6	376	376	0.88	4.9	126000
	S-8	425	425	1.00	4.9	30500
	S-10	257	257	0.60	4.9	685000
	S-11	231	231	0.54	4.9	6000000
Aidoo et al. (2004)	RS1	380	338	0.87	2.7	308879
	RS2	279	279	0.63	2.7	1280000
	RF1	380	306	0.87	2.8	193160
	RF2	279	279	0.63	2.8	960000
Heffernan et al. (2004)	MS Cfa	280	200	0.55	6.7	900000
	MS CFb	280	200	0.55	6.7	890000
	HS Cfa	320	240	0.63	6.7	340000
	HS CFb	320	240	0.63	6.7	390000
	CF-2	280	200	0.58	14.1	312000
	CF-4	280	200	0.58	7.1	627000
	CF-6	280	200	0.58	4.7	1049000
Gussenhoven et al. (2005)	A-1-4-80	332	295	0.79	7.2	131619
	A-1-4-70	316	272	0.75	7.2	287594
	A-1-4-60	265	224	0.63	7.2	778734
	B-1-2-80	347	300	0.83	12.6	290307
	B-1-2-70	309	268	0.74	12.6	336873
	B-1-2-60	283	236	0.67	12.6	4000000
	B-2-2-70	328	270	0.78	3.1	150000
	B-2-2-60	256	199	0.61	3.1	2000000
	C-1-2-80S	320	326	0.76	12.6	326775
	C-1-2-70S	298	226	0.71	12.6	440193
	C-1-2-60S	227	189	0.54	12.6	4000000
Wang et al. (2007)	C1	280	200	0.89	5.3	1000000
	C2	280	200	0.89	5.3	1000000
Gheorghiu et al. (2007)	H2000A	327	254	0.55	1.4	2000000
	H2000B	345	267	0.57	1.4	2000000
Charalambidi et al. (2015)	REX20-H	402	352	0.77	6.1	990147
	REX40-H	414	365	0.80	6.1	1450105
	RNSM20-H	403	352	0.77	12.2	807437
	RNSM40-H	416	373	0.80	12.2	696500
	TNSM20-H	396	340	0.76	12.2	774411

Αξιολόγηση υφιστάμενων σχέσεων υπολογισμού κύκλων φόρτισης σε κόπωση έως την αστοχία

Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ των θεωρητικών σχέσεων πρόβλεψης διάρκειας ζωής σε κόπωση που παρουσιάστηκαν παραπάνω, με τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας. Οι σχέσεις που προτείνονται από τους Helgason και Hanson (1974) και Moss (1982), παρέχουν συντηρητικά αποτελέσματα πρόβλεψης διάρκειας ζωής για δοκίμια κατασκευασμένα με χάλυβα υψηλής αντοχής. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Papakonstantinou et al. (2001), Aidoo et al. (2004) και Gheorgiu et al. (2007), τοποθετούνται κυρίως στα δεξιά των καμπυλών S-N του Διαγράμματος 1. Στην περίπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Charalambidi et al (2015), όλες οι θεωρητικές σχέσεις παρέχουν συντηρητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, όλα τα διαθέσιμα θεωρητικά προσομοιώματα πρόβλεψης παρέχουν συντηρητικά αποτελέσματα για όλα τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, τα πειραματικά δοκίμια των Heffernan et al. (2004), Gussenhoven et al. (2005) και Wang et al (2007) αστόχησαν σε τιμές χαμηλότερες από ότι οι προβλέψεις των σχέσεων Helgason and Hanson, Moss, CEB 1990 και Diab & Wu. Τα προσομοιώματα των Helgason and Hanson, Moss, CEB 1990 και Diab & Wu δίδονται στον Πίνακα 2.



Διάγρ. 1 Απεικόνιση των θεωρητικών καμπυλών τάσεων – διάρκειας ζωής (S-N curves) και των πειραματικών καταγραφών της βιβλιογραφίας

Πιν. 2 Δημοσιευμένες σχέσεις υπολογισμού διάρκειας ζωής σε κόπωση

Προσομοίωμα	Σχέση υπολογισμού
Helgason & Hanson	$\log(N) = 6.969 - 0.0055\sigma_r$
Moss	$N\sigma_r^m = K$
CEB 1990	$\sigma_r^5 N = 4.0841 \cdot 10^{17}$
Diab & Wu	$\log(N) = 12.806 - 2.9869 \cdot \log \sigma_r$

N: ο αριθμός των κύκλων στην αστοχία

σ_r : το εύρος τάσης του χάλυβα (MPa)

σ_r^m : η ανάστροφη κλίση της λογαριθμικής καμπύλης $\log \sigma_r - \log N$,

K: ίσο με 0.11×10^{29} για το σχεδιασμό της μέσης τιμής της καμπύλης και ίσο με 0.59×10^{27} για τη μέση τιμή μείον δύο τυπικές αποκλίσεις

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι προβλέψεις κύκλων φόρτισης, θεωρητικές και πειραματικές. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Papakonstantinou et al. (2001), οι θεωρητικές προβλέψεις ήταν συντηρητικές για έξι από τα οκτώ δοκίμια. Στο δοκίμιο S-6, οι προβλέψεις των Diab και Wu οδηγούν σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα πειραματικά αποτελέσματα και στο δοκίμιο S-8, οι πειραματικοί κύκλοι ζωής είναι χαμηλότεροι από των προβλέψεις των θεωρητικών σχέσεων εκτός από αυτές των CEB 1990 και Moss 1982. Οι θεωρητικές προβλέψεις είναι συντηρητικές και όσον αφορά στα πειραματικά αποτελέσματα των

Aídoo et al. (2004). Εξάιρεση αποτελεί το δοκίμιο RF1, για το οποίο οι Diab και Wu και Helgason και Hanson παρέχουν πρόβλεψη για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των δοκιμίων όπως αυτή παρουσιάζεται στο πειραματικό πρόγραμμα των Heffernan et al. είναι χαμηλότερη από τις θεωρητικές προβλέψεις όλων των δοκιμίων. Στην περίπτωση των δοκιμίων της εργασίας των Gussenhoven et al. (2005), η πειραματική διάρκεια ζωής είναι χαμηλότερη από τις προβλέψεις σχεδόν όλων των θεωρητικών σχέσεων. Ειδικότερα τα δοκίμια A-1-4-80, B-2-2-70 και C-1-2-70 αστόχησαν σε τιμές χαμηλότερες από όλες τις προβλέψεις.

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν στις εργασίες των Wang et al. (2007) και Gheorgiu et al. (2007) δεν αστόχησαν κατά τους προκαθορισμένους κύκλους κόπωσης, και η πειραματική διαδικασία διακόπηκε. Παρόλα αυτά, οι προβλέψεις από τις σχέσεις των Moss (1982) και CEB 1990 επιβεβαίωσαν τα πειραματικά αποτελέσματα, αντίθετα οι προβλέψεις των Diab και Wu (2008), και Helgason και Hanson (1974) ήταν συντηρητικές. Στην περίπτωση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Gheorgiu et al. (2007), όλα τα μοντέλα παρείχαν χαμηλότερες προβλέψεις διάρκειας ζωής.

Τέλος, η διάρκεια ζωής των πειραματικών αποτελεσμάτων των Charalambidi et al (2015) ήταν πιο υψηλή από ότι οι θεωρητικές σχέσεις προέβλεπαν. Ο λόγος της μέγιστης τάσης του χάλυβα προς το όριο διαρροής του σ_{max}/f_y κυμαινόταν από 0.76 ως 0.80 και ο λόγος δυστένειας χάλυβα προς ΙΩΠ k_s/k_f ήταν ίσος με 6.09 για δοκίμια με εξωτερικά ελάσματα και ίσος με 12.18 για τα δοκίμια με ελάσματα εγκοπής (Πίνακας 1). Επιπλέον, όλες οι δοκοί είχαν διατμητική ενίσχυση με συνεχή υφάσματα ΙΩΠ και διατμητικό άνοιγμα ίσο με $a/d=1.82$ για τα δοκίμια REX20-H, RNSM20-H, TNSM20-H και $a/d=1.90$ για τα δοκίμια REX40-H, RNSM40-H, παράμετρος που δεν είχε συμπεριληφθεί στα περισσότερα από τα πειραματικά δοκίμια της βιβλιογραφίας.

Επιρροή του λόγου σ_{max}/f_y και του εύρους φόρτισης σ_r

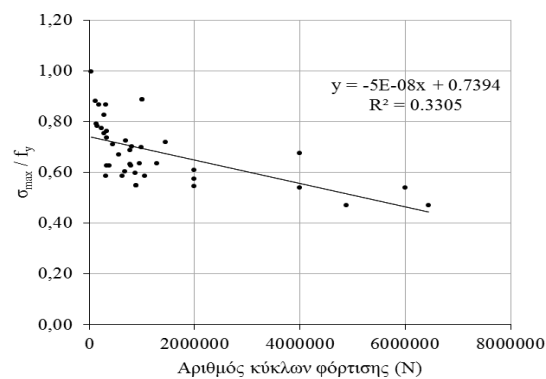
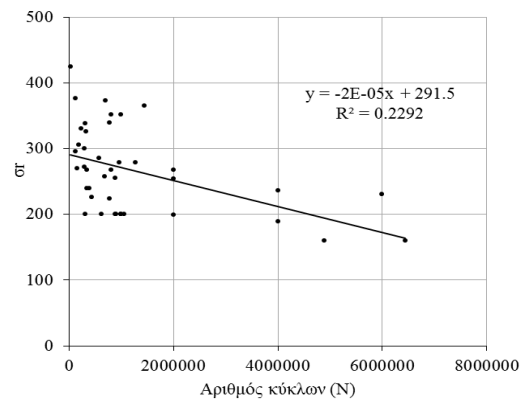
Στόχος της παρούσας διερεύνησης ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων εκείνων που εφόσον ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης των στοιχείων που υποβάλλονται σε κόπωση, θα μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερο ακριβείς προβλέψεις του αριθμού κύκλων διάρκειας ζωής ως την αστοχία (N).

Αρχικά διερευνήθηκε η επιλογή της μέγιστη τάσης (σ_{max}) του χαλύβδινου οπλισμού και του ορίου διαρροής του (f_y), έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό η επιρροή των διαφορετικών αντοχών χάλυβα. Σχεδιάζοντας διαγράμματα σ_{max}/f_y προς διάρκεια ζωής (Διάγραμμα 2) και εύρους τάσεων (σ_r) προς τη διάρκεια ζωής (Διάγραμμα 3), φαίνεται η διασπορά των αποτελεσμάτων να είναι βελτιωμένη στην περίπτωση του Διαγράμματος 2.

Πίν. 3 Προβλέψεις υφιστάμενων προσομοιωμάτων δοκιμών κόπωσης

Συγγραφείς	Δοκίμια	CEB 1990	Helgason & Hanson	Moss	Diab & Wu	Πειραμ. κύκλοι στην αστοχία
Papakonstantinou et al. (2001)	S-2	378407	368553	682264	414863	880000
	S-5	300680	316592	457303	361621	800000
	S-7	213221	248886	251459	294497	570000
	S-9	104253	142561	72407	192066	235000
	S-6	54290	79616	23266	130068	126000
	S-8	29425	42806	8014	90212	30500
	S-10	363910	359335	637432	405295	685000
	S-11	411667	499459	1612233	557349	6000000
Aídoo et al. (2004)	RS1	92486	128825	58786	178805	308879
	RS2	75269	271957	311958	317121	1280000
	RF1	152073	193197	139661	240657	193160
	RF2	241345	271957	311958	317121	960000
Heffernan et al. (2004)	MS CFa	1275000	739605	5647953	857143	900000
	MS CFb	1275000	739605	5647953	857143	890000
	HS CFa	512394	445656	1156150	497218	340000

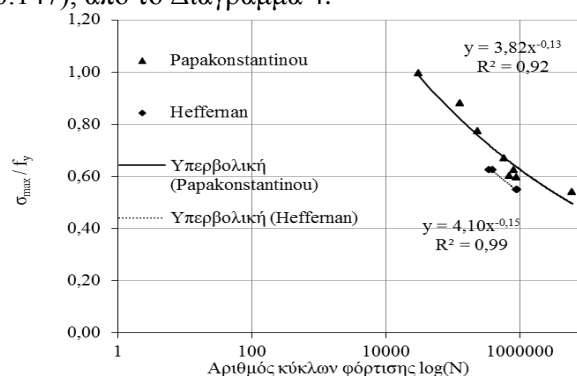
	HS CFb	512394	445656	1156150	497218	390000
	CF-2	1275000	739605	5647953	857143	312000
	CF-4	1275000	739605	5647953	857143	627000
	CF-6	1505859	739605	5647953	857143	1049000
Gussenhoven et al. (2005)	A-1-4-80	182621	222075	192044	268466	131619
	A-1-4-70	274041	297167	389137	342126	287594
	A-1-4-60	723469	545758	2107144	611004	778734
	B-1-2-80	167901	208449	165919	255321	290307
	B-1-2-70	295112	312608	442669	357605	336873
	B-1-2-60	339505	468813	1338189	522816	4000000
	B-2-2-70	284342	304789	414942	349751	150000
	B-2-2-60	1575349	749031	5899704	870073	2000000
	C-1-2-80S	110808	149968	80512	199191	326775
	C-1-2-70S	692019	532108	1950332	594995	440193
	C-1-2-60S	2505522	850159	9239199	1014930	4000000
Wang et al. (2007)	C1	1275000	739605	5647953	857143	1000000
	C2	1275000	739605	5647953	857143	1000000
Gheorghiu et al. (2007)	H2000A	177836	375241	716228	421841	2000000
	H2000B	110977	315711	454038	360732	2000000
Charalambidi et al. (2015)	REX20-H	75607	108031	41400	158526	990147
	REX40-H	6772	91981	30412	142597	1450105
	RNSM20-H	75607	108031	41400	158526	807437
	RNSM40-H	56889	83224	25238	133753	696500
	TNSM20-H	90195	126081	56276	176145	774411


 Διάγρ. 2 Λόγος σ_{\max} / f_y προς κύκλους φόρτισης για τα πειραματικά αποτελέσματα του Πίνακα 3

 Διάγρ. 3 Λόγος εύρους τάσεων χάλυβα σ_f προς κύκλους φόρτισης για τα πειραματικά αποτελέσματα του Πίνακα 3

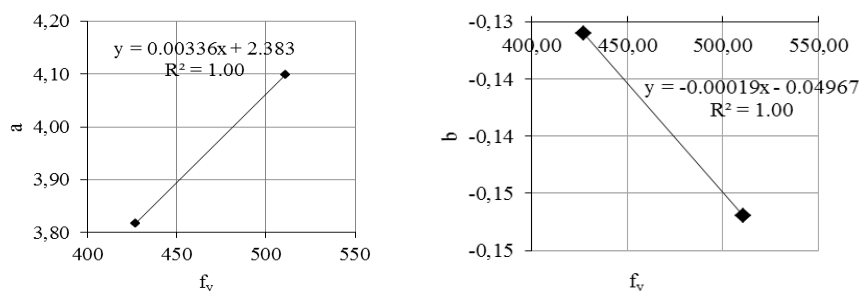
Επιρροή του ορίου διαρροής του χάλυβα f_y

Η μορφή του Διαγράμματος 2 επιβεβαιώνει ότι η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στον εφελκυσμένο χάλυβα έχει επιρροή στη διάρκεια ζωής των ενισχυμένων δοκών (αν και ο συντελεστής συσχέτισης είναι χαμηλός). Μια περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων των Papakonstantinou et al. (2001) και Heffernan et al. (2004) επιβεβαιώνει ότι η διάρκεια ζωής των δοκιμών επηρεάζεται από το όριο διαρροής του χάλυβα. Τα δύο πειραματικά προγράμματα αφορούν χάλυβα οπλισμού ορίου διαρροής 427 MPa και 511 MPa, αντίστοιχα. Το εύρος των τάσεων του χάλυβα για τους Papakonstantinou et al. κυμαίνεται μεταξύ 231 MPa και 425 MPa, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τα δοκίμια των Heffernan et al. κυμαίνονται από 200 MPa έως 240 MPa (Πίνακας 1). Ομοίως, η μέγιστη τάση που ασκείται στο χάλυβα κυμαίνεται από 231 MPa ως 425 MPa, για τους Papakonstantinou et al., και από 280 MPa ως 320 MPa, για τους Heffernan et al. (Πίνακας 1).

Για την εκτίμηση της επιρροής του διαφορετικού ορίου διαρροής του χάλυβα στην απόκριση των ενισχυμένων δοκών, κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 4 μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο παραπάνω εργασιών. Με γνώμονα τα παραπάνω, στόχος ήταν η πρόταση μιας αναλυτικής σχέσης η οποία θα λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό το λόγο της μέγιστης τάσης που ασκείται στο χάλυβα προς το όριο διαρροής του χάλυβα (σ_{\max}/f_y) ως τη βασικότερη παράμετρο στην πρόβλεψη των κύκλων ζωής δοκιμών σε κόπωση. Προέκυψε σχέση της μορφής $y=a \cdot x^b$. Δυο παράμετροι a , b υπεισέρχονται στο σχεδιασμό οι οποίοι προέκυψαν από ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ αποτελεσμάτων της πειραματικής βιβλιογραφίας (Πίνακας 1). Πραγματοποιήθηκε παλινδρόμηση (Διάγραμμα 5) μεταξύ δύο σημείων (x,y) ίσα με $(427, 3.8165)$ και $(511, 4.0985)$ όπου 427 και 511 είναι οι τιμές του ορίου διαρροής του χάλυβα για κάθε πειραματικό πρόγραμμα, και 3.8165 και 4.0985 προκύπτουν από το Διάγραμμα 4. Η καμπύλη που προέκυψε από την ανάλυση ισούταν με $y = 0.00336x + 2.383$, ενώ για τον προσδιορισμό των παραμέτρων a και b πραγματοποιήθηκε παλινδρόμηση μεταξύ των σημείων $(427, -0.131)$ και $(511, -0.147)$, από το Διάγραμμα 4.



Διάγρ. 4 Πειραματικά δεδομένα των Papakonstantinou και Heffernan ως προς το λόγο σ_{\max}/f_y και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης των δοκιμών



Διάγρ. 5 Προσδιορισμός των παραμέτρων a , b μέσω παλινδρόμησης

Τελικά, το προτεινόμενο προσομοίωμα υπολογισμού έχει την παρακάτω μορφή:

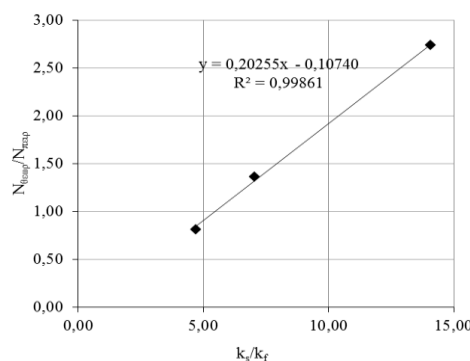
$$\frac{\sigma_{\max}}{f_y} = (0.00336 \cdot f_y + 2.383) \cdot N_{an}^{(-0.00019 \cdot f_y - 0.04967)} \quad (1)$$

όπου σ_{\max} η μέγιστη τάση στον χάλυβα, f_y το όριο διαρροής του χάλυβα και N ο αριθμός των κύκλων έως την αστοχία.

Επιρροή του λόγου δυστένειας χάλυβα προς ΙΩΠ k_s/k_f

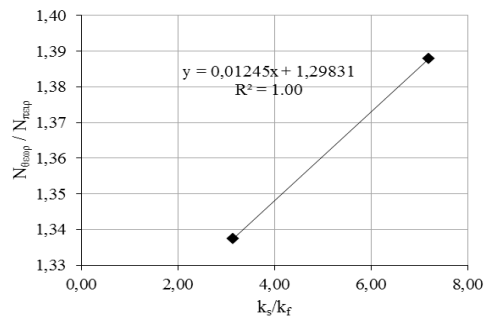
Η επιλογή του φορτίου κόπωσης στις περιπτώσεις του σχεδιασμού δοκών γίνεται συνήθως για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, και για ελαστική συμπεριφορά του χάλυβα και του σκυροδέματος. Έτσι στις περιπτώσεις δοκών με ενίσχυση ινωπλισμένων πολυμερών, κρίσιμη παράμετρος φαίνεται να είναι ο λόγος των δυστενειών χάλυβα προς ΙΩΠ k_s/k_f . Στην εργασία των Ferrigier et al. (2011), φαίνεται μια αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμορφώσεων μεταξύ του χάλυβα οπλισμού και του ινωπλισμένου πολυμερούς. Στην περίπτωση αυτή, για υψηλό αριθμό κύκλων φόρτισης σε κόπωση, οι παραμορφώσεις στο χάλυβα είχαν χαμηλότερη τιμή σε σχέση με αυτές του ελάσματος καμπτικής ενίσχυσης. Αυτή η μείωση των τιμών των παραμορφώσεων του χάλυβα θεωρείται ότι οφείλεται στην τάνυση κυρίως του ελάσματος που λειτουργεί ακόμη ελαστικά, ανακουφίζοντας τον χάλυβα που ήδη έχει συσσωρεύσει σημαντική βλάβη (ρηγμάτωση) λόγω κόπωσης.

Ο μηχανισμός ανακατανομής των τάσεων λαμβάνεται υπόψη μέσω του λόγου δυστένειας του χάλυβα οπλισμού ($k_s=A_sE_s$) προς αυτόν του ινωπλισμένου πολυμερούς ($k_f=A_fE_f$), k_s/k_f . Εξετάζοντας την επιρροή της ενίσχυσης με ΙΩΠ, εισάγεται στην Εξίσωση 1 ο λόγος k_s/k_f συναρτηθεί του λόγου σ_{\max}/f_y . Η προτεινόμενη σχέση περιλαμβάνει τον αριθμό κύκλων κόπωσης ως την αστοχία. Στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του λόγου δυστένειας ανάλογα με τις τιμές του λόγου σ_{\max}/f_y και μεταβάλλεται ο αριθμός κύκλων ως την αστοχία. Το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα περιλαμβάνει την επιρροή του λόγου k_s/k_f για $\sigma_{\max}/f_y < 0.62$ σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6 και συσχετίζει το λόγο k_s/k_f με τον τελικό πειραματικό αριθμό κύκλων κάθε δοκιμίου ($N_{\text{πειρ.}}$). Στην εργασία των Heffernan et al. (2004) περιλαμβάνονται τέσσερις διαφορετικές τιμές του λόγου δυστένειας ίσες με 4.70, 6.72, 7.05 και 14.09. Η τιμή 6.72 αντιστοιχεί σε δοκίμιο με λόγο $\sigma_{\max}/f_y = 0.55$ και 0.63 οι υπόλοιπες τιμές σε λόγο $\sigma_{\max}/f_y = 0.58$.

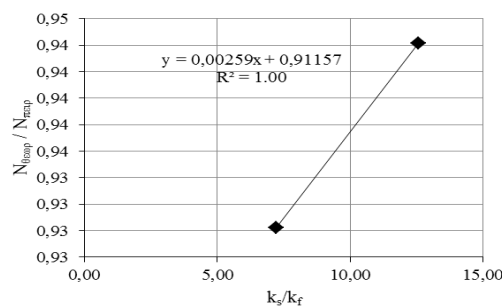


Διάγρ. 6 Ανάλυση παλινδρόμησης για λόγο k_s/k_f ίσο με 4.7, 7.05, 14.09, των πειραματικών δεδομένων από Heffernan et al. 2004

Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μεταξύ των δοκιμίων της βιβλιογραφίας για τιμές του λόγου σ_{\max}/f_y μεγαλύτερες του 0.78. Τα δοκίμια από την πειραματική διερεύνηση των Gussenhoven et al. (2005) περιλαμβάνουν λόγο σ_{\max}/f_y ίσο με 0.76, 0.79, 0.83, τα πειράματα των Papakonstantinou et al. (2001) περιλαμβάνουν λόγο σ_{\max}/f_y ίσο με 0.77, 0.88, 1.00 και τα πειράματα των Aidoo et al. (2004) περιλαμβάνουν λόγο σ_{\max}/f_y ίσο με 0.87. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης για τα δοκίμια από την εργασία των Gussenhoven et al. με σ_{\max}/f_y ίσο με 0.74 και 0.76, και k_s/k_f ίσο με 3.14, 7.20 και 12.57 μεταξύ του πειραματικού αριθμού κύκλων τους και τις θεωρητικές προβλέψεις της Εξίσωσης 1 (Διαγράμματα 7 και 8).

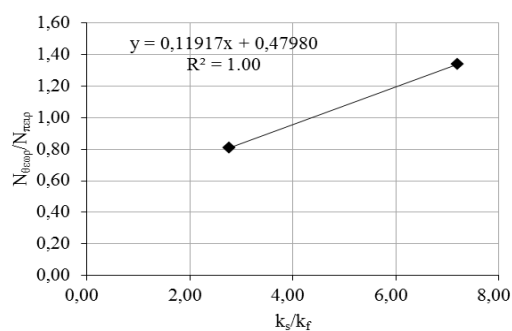


Διάγρ. 7 Παλινδρόμηση για $k_s/k_f = 3.14$ και 7.20 ως προς το λόγο του θεωρητικού προς πειραματικού αριθμού κύκλων, για $\sigma_{max}/f_y > 0.78$



Διάγρ. 8 Παλινδρόμηση για $k_s/k_f = 7.20$ και 12.57 ως προς το λόγο του θεωρητικού προς πειραματικού αριθμού κύκλων, για $\sigma_{max}/f_y < 0.78$

Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη τα δεδομένα της βιβλιογραφίας για τα οποία ο λόγος σ_{max}/f_y ήταν μικρότερος του 0.68. Με την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε προηγουμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από τους Gussenhoven et al. και Aïdoo et al. Για τις παραπάνω εργασίες, ο λόγος k_s/k_f είχε τιμές ίσες με 7.20 και 2.76 αντίστοιχα (Διάγραμμα 9).



Διάγρ. 9 Παλινδρόμηση για k_s/k_f ίσο με 2.76 και 7.20 ως προς το λόγο του θεωρητικού προς πειραματικού αριθμού κύκλων, για $\sigma_{max}/f_y < 0.68$

Τελικά, η προτεινόμενη σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή, και η αποτελεσματικότητά της εκτιμάται μέσω του Διαγράμματος 10.

$$\frac{\sigma_{max}}{f_y} = (0.00336 \cdot f_y + 2.383) \cdot N^{(-0.00019 \cdot f_y - 0.04967)} \quad (2)$$

$$N_{theor} = \left[\left(\frac{\sigma_{max} / f_y}{(0.00336 \cdot f_y + 2.383)} \right)^{(1/(-0.00019 \cdot f_y - 0.04967))} \right] / \left(0.1192 \frac{k_s}{k_f} + 0.4798 \right) \quad (3)$$

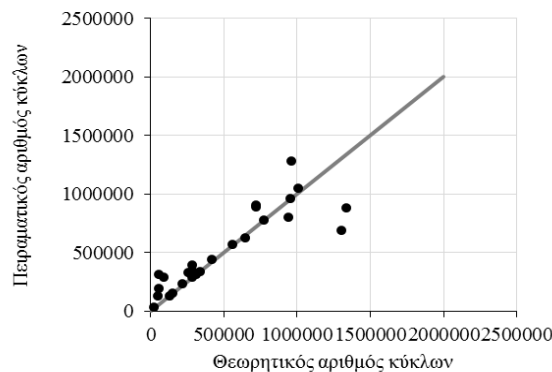
για $0.60 \leq \sigma_{max}/f_y < 0.68$

$$N_{theor} = \left[\left(\frac{\sigma_{max} / f_y}{(0.00336 \cdot f_y + 2.383)} \right)^{(1/(-0.00019 \cdot f_y - 0.04967))} \right] / \left(0.00259 \frac{k_s}{k_f} + 0.91157 \right) \quad (4)$$

για $0.68 \leq \sigma_{max}/f_y \leq 0.78$,

$$N_{theor} = \left[\left(\frac{\sigma_{max} / f_y}{(0.00336 \cdot f_y + 2.383)} \right)^{(1/(-0.00019 \cdot f_y - 0.04967))} \right] / \left(0.0125 \frac{k_s}{k_f} + 1.2983 \right) \quad (5)$$

για $\sigma_{max}/f_y > 0.78$,



Διάγρ. 10 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών τιμών της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού

Ακρίβεια πρόβλεψης της προτεινόμενης σχέσης

Στη βιβλιογραφία, ο προσδιορισμός της αποδοτικότητας των αναλυτικών σχέσεων περιλαμβάνει των μέσο όρο των τιμών πρόβλεψης, την τυπική απόκλιση και την απόκλιση των μέσων τιμών. Επιπρόσθετα κριτήρια απόδοσης συναντώνται στη βιβλιογραφία, από τους De Lorenzis και Terpers (2003), Rousakis et al. (2012), Nistico et al. (2014), μεταξύ άλλων, οι οποίοι χρησιμοποίησαν το κριτήριο του μέσου απόλυτου σφάλματος (Average Absolute Error – AAE), για προσομοιώματα της βιβλιογραφίας.

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^N |E_i|}{N} \quad (6)$$

Όπου, το σφάλμα E, για κάθε θεωρητική πρόβλεψη N_{theor} ως προς τη πειραματική τιμή N_{exp} υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$E(N)\% = \frac{N_{theor} - N_{exp}}{N_{exp}} \cdot 100 \quad (7)$$

Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης σχέσης, εφαρμόστηκαν οι Εξισώσεις 6 και 7 για κάθε θεωρητική σχέση της βιβλιογραφίας. Τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας με τιμές σ_{max}/f_y χαμηλότερες του 0.55 δεν λήφθηκαν υπόψη καθώς πρακτικά τα δοκίμια δεν αστόχησαν σε κόπωση. Στον Πίνακα 4, απεικονίζονται ο λόγος θεωρητικού προς πειραματικού αριθμού κύκλων $N_{θεωρ}/N_{πειρ}$, ο μέσος όρος τους, καθώς και το μέσο απόλυτο σφάλμα AAE για το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων της βιβλιογραφίας. Το προτεινόμενο θεωρητικό προσομοίωμα, έχει απόλυτο σφάλμα ίσο με 23.82% και μέση τιμή λόγου $N_{θεωρ}/N_{πειρ}$ ίση με 0.88. Το σφάλμα της

προτεινόμενης σχέσης είναι μικρότερο από αυτό των υπολοίπων θεωρητικών σχέσεων, παρουσιάζοντας βελτιωμένη απόδοση.

Πίνακας 4. Εκτίμηση αποτελεσμάτων προτεινόμενης σχέσης σχεδιασμού

	Proposed model	CEB 1990	Helgason & Hanson	Moss	Diab & Wu
AAE (%)	23.82	58.11	43.38	229.75	50.19
Average	0.88	1.02	0.90	2.74	1.12

Συμπεράσματα

Με στόχο την ακριβέστερη εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση ενός ενισχυμένου στοιχείου ωπλισμένου σκυροδέματος, μελετήθηκε και προτείνεται στην παρούσα εργασία μια αναλυτική σχέση που περιλαμβάνει τα δεδομένα που προέκυψαν από μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας. Επιδιώχθηκε να εισαχθούν στις παραμέτρους επιρροής της κόπωσης τα μεγέθη της μέγιστης τάσης ως ποσοστό του ορίου διαρροής, σ_{\max}/f_y , και του λόγου δυστένειας του εφελκόμενου χάλυβα ($k_s=A_sE_s$) προς τη δυστένεια του ΙΩΠ ($k_f=A_fE_f$).

Στόχος ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων εκείνων που εφόσον ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης των στοιχείων που υποβάλλονται σε κόπωση θα μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερο ακριβείς προβλέψεις της διάρκειας ζωής. Αρχικά διερευνήθηκε η επιλογή της μέγιστης τάσης (σ_{\max}) του χαλύβδινου οπλισμού και του ορίου διαρροής του (f_y), έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό η επιρροή των διαφορετικών αντοχών χάλυβα. Σχεδιάζοντας διαγράμματα σ_{\max}/f_y προς διάρκεια ζωής και εύρους τάσεων (σ_r) προς τη διάρκεια ζωής φαίνεται η διασπορά των αποτελεσμάτων να είναι βελτιωμένη.

Με γνώμονα τα παραπάνω προτείνεται μια αναλυτική σχέση η οποία λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό το λόγο της μέγιστης τάσης που ασκείται στο χάλυβα προς το όριο διαρροής του χάλυβα (σ_{\max}/f_y) ως βασικότερη παράμετρο στην πρόβλεψη των κύκλων ζωής δοκιμίων σε κόπωση. Επιπλέον, εισάγεται στο σχεδιασμό η επιρροή της καμπτικής ενίσχυσης με ΙΩΠ μέσω του λόγου δυστενείων του χάλυβα προς το ΙΩΠ (k_s/k_f). Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση παρέχει αρκετά βελτιωμένες προβλέψεις της διάρκειας ζωής των δοκιμίων, με απόλυτο σφάλμα ίσο με 23.82% και μέσο όρο λόγου $N_{\text{θεωρ}}/N_{\text{πειρ}}=0.88$. Εντούτοις, εμφανίζεται η ανάγκη να συμπεριληφθούν στην ανάλυση περισσότερα πειραματικά δεδομένα έτσι ώστε να γίνει ικανή η περαιτέρω ενδεδειγμένη έρευνα της συμπεριφοράς σε κόπωση των ενισχυμένων με ΙΩΠ μελών ωπλισμένου σκυροδέματος και των λοιπών παραμέτρων που την επηρεάζουν.

Θέτοντας το όριο διαρροής του χάλυβα ως βασική παράμετρο συμπεριφοράς, είναι αναγκαίο να μελετηθεί η επιρροή των μετά τη διαρροή χαρακτηριστικών του υλικού, δηλαδή της πλαστιμότητας και της κράτυνσης. Επιπλέον, η χρονοϊστορία της φόρτισης και η επιρροή της προφόρτισης του στοιχείου, όχι μόνο από μονότονη καταπόνηση αλλά κυρίως από φόρτιση κόπωσης, θα πρέπει να εκτιμηθεί και να αξιολογηθεί κατάλληλα. Η ασφαλής εκτίμηση του υπόλοιπου της διάρκειας ζωής δοκών σκυροδέματος που έχουν ήδη καταπονηθεί σε φορτίο κόπωσης, είναι πεδίο μελέτης υψηλού ενδιαφέροντος. Σε αυτή την περίπτωση η ενίσχυση μέσω ινωπλισμένων πολυμερών θα μπορούσε να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των στοιχείων αλλά και των κατασκευών των οποίων είναι συστατικά μέλη, μέσω σχεδιασμού ενίσχυσης με κατάλληλο λόγο k_s/k_f . Ο χάλυβας οπλισμού ενός στοιχείου ωπλισμένου σκυροδέματος εμφανίζει σαφώς περιορισμένη απόδοση στη συμπεριφορά υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Η κατάλληλη καμπτική ενίσχυση με οπλισμό με καθαρά ελαστική συμπεριφορά όπως το ΙΩΠ, μπορεί να μειώσει τις τάσεις στο χάλυβα, να οδηγήσει σε περαιτέρω ανακούφιση του χάλυβα μέσω ανακατανομής των παραμορφώσεων, και να εξασφαλίσει σημαντική αύξηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του δομικού στοιχείου υπό τα φορτία σχεδιασμού.

Βιβλιογραφία

- Aidoo, J., Harries, K. a., & Petrou, M. F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer-strengthened reinforced concrete bridge girders. *Journal of Composites for Construction* 2004; 8(6): 501–509
- Charalambidi B., Rousakis T., Karabinis A. Fatigue behavior of large scale reinforced concrete beams strengthened in flexure with fiber reinforced polymer laminates. *Journal of Composites for Construction* 2016; DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000689
- Charalambidi B., Rousakis T., Karabinis A. (2016). Analysis of the fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened in flexure with fiber reinforced polymer laminates. *Composites Part B*, Vol. 96, 69-78
- De Lorenzis L, Tepfers R. Comparative study of models on confinement of concrete cylinders with fiber-reinforced polymer composites. *J Compos Constr* 2003;7(3):219-34.
- Diab H.M., Wu Z. Review of existing fatigue results of beams externally strengthened with FRP laminates. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland
- Ferrier E., Bigaud D., Clément J.C., Hamelin P. (2011) Fatigue-loading effect on RC beams strengthened with externally bonded FRP. *Construction and Building Materials* 25, 539-546
- Gheorgiu C., Labossiere P., Proulx J. (2007) Response of CFRP strengthened beams under fatigue with different load amplitudes. *Construction and Building Materials* 21, 756-763
- Gussenhoven R., Brena S.F. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with different FRP laminate configurations. Proceedings of the Seventh Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS7) Conference, New Orleans, November 2005
- Heffernan P.J., Erki M.A. (2004) Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber reinforced plastic laminates. *Journal of Composites for Construction*. Vol.8, No 2, 132-140
- Kim Y., Heffernan P. Fatigue behavior of externally strengthened concrete beams with fiber reinforced polymers: state of the art. *Journal of Composites for Construction* 2008; 12(3): 246-256
- Nistico N, Pallini F, Rousakis T, Wu Y, Karabinis A. Peak strength and ultimate strain prediction for FRP confined square and circular concrete sections. *Compos Part B* 2014;67:543-54
- Papakonstantinou C.G., Petrou M.F., Harries K.A. (2001) Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 5, No 4, 246-253
- Rousakis T, Rakitzis T, Karabinis A. Design-oriented strength model for FRP confined concrete members. *J Compos Constr* 2012;16(6):615-25
- Wang YC, Lee MG, Chen BC. Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading. *Compos Struct* 2007;81:491-8.