

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΤΩΝ ΕΜΜΕΣΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.

1. Εισαγωγή.

Παράλληλα με την βαθμονόμηση των Εμμέσων Μεθόδων σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, μελετήθηκε και η επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών (πυρκαγιά) στην αντοχή του σκυροδέματος. Ειδικότερα μελετήθηκε η μείωση της αντοχής του σκυροδέματος καθώς και η διαφοροποίηση των ενδείξεων των Εμμέσων Μεθόδων (κρουσίμετρο και υπέρηχοι) σε δοκίμια σκυροδέματος εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής με άλλες [82], [4], [77].

2 Μεθοδολογία.

Κατασκευάστηκαν εννέα οκτάδες κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 15*15*15cm. Από κάθε οκτάδα τα μισά δοκίμια τοποθετούνταν σε φούρνο για ορισμένο χρονικό διάστημα. Στην συνέχεια, μετά την απόψυξη των τεσσάρων, όλα τα δοκίμια δοκιμαζόντουσαν σε θλίψη αφού προηγουμένως είχαν γίνει μετρήσεις με κρουσίμετρο και υπέρηχους. Κατασκευάστηκαν σκυροδέματα με τρεις διαφορετικές συνθέσεις στις οποίες ο λόγος νερού/τσιμέντο κυμαινόταν από w/c=0.50 έως 0.70. Τα αδρανή ήταν ασβεστολιθικά της περιοχής Αθηνών. Η σύνθεση του σκυροδέματος κάθε οκτάδας φαίνεται στον Πίνακα 1.

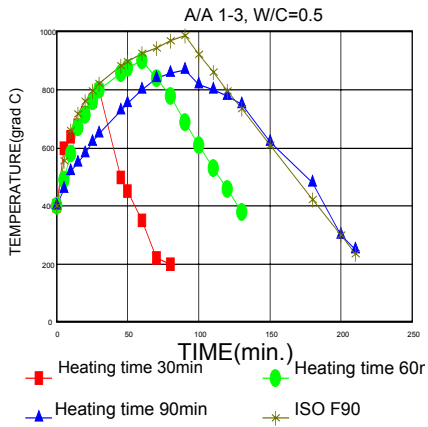
Πίνακας 1 Αναλογίες υλικών

A/A	Τσιμέντο	Νερό	w/c	Αμμος	Γαρμπίλι	Χαλίκι
	(kg)	(kg)		(kg)	(kg)	(kg)
f1	12.0	6.0	0.5	28.5	14.0	15.0
f2	12.0	6.0	0.5	28.5	14.0	15.0
f3	12.0	6.0	0.5	28.5	14.0	15.0
f4	10.0	6.0	0.6	29.0	15.0	15.0
f5	10.0	6.0	0.6	29.0	15.0	15.0
f6	10.0	6.0	0.6	29.0	15.0	15.0
f7	12.0	8.5	0.7	27.0	13.0	13.0
f8	12.0	8.5	0.7	27.0	13.0	13.0
f9	12.0	8.5	0.7	27.0	13.0	13.0

Ο φούρνος στον οποίον τοποθετούνταν τα δοκίμια έχει εσωτερικές διαστάσεις πλάτος/ ύψος/ βάθος = 450/ 300/ 900mm και δυνατότητα να αναπτύξει μέγιστη θερμοκρασία 1150°C. Κατά την θέρμανση του φούρνου γινόταν προσπάθεια ώστε η καμπύλη της θερμοκρασίας των αερίων συναρτήσει του χρόνου να προσεγγίζει την πρότυπη καμπύλη ISO834 και ειδικότερα τις καμπύλες ISO F30, F60 και F90 όπου οι αριθμοί αναφέρονται

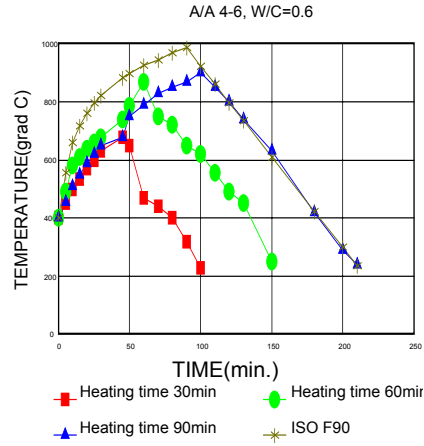
στην διάρκεια θέρμανσης του φούρνου σε min (Σχήματα 1 έως 3). Μετά την περίοδο θερμάνσεως του φούρνου, τα δοκίμια παρέμεναν στον φούρνο μέχρις ότου η θερμοκρασία των αερίων πέσει στους 100°C.

TEMPERATURE=f (T



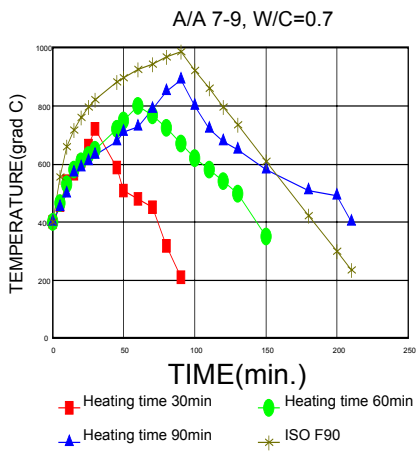
Σχήμα 1 Θέρμανση δοκιμίων w/c=0.5

TEMPERATURE=f (T



Σχήμα 2 Θέρμανση δοκιμίων με w/c=0.6

TEMPERATURE=f (T



Σχήμα 3 Θέρμανση δοκιμίων με w/c=0.6

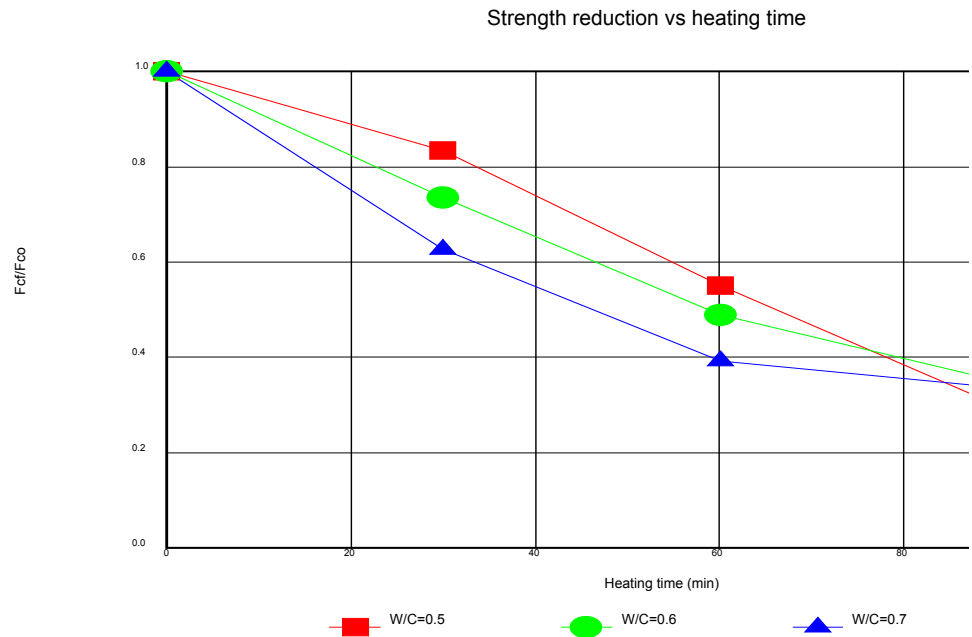
Πίνακας 2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα (κάθε ένδειξη είναι ο μέσος όρος τεσσάρων δοκιμίων)

A/A	Διάρκεια Θέρμανσης	maxT	w/c	Λόγος καμένων προς μη καμένα						Καμένα δοκίμια						Μη καμένα δοκίμια					
				G _f /G _o	F _f /F _o	t _f /t _o	R _f /R _o	V _f /V _o	f _{c,f} /f _{c,o}	G _f	F _f	t _f	R _f	V _f	f _{c,f}	G _o	F _o	t _o	R _o	V _o	f _{c,o}
	min	C°								lbs	t	μs		km/s	MPa	lbs	t	μs		km/s	MPa
1	2	3	4	5= 11/17	6= 12/18	7= 13/19	8= 14/20	9= 15/21	10= 16/22	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
f1	30	800	0.5	0.94	0.83	1.92	1.05	0.53	0.83	16.4	61.8	65.1	29.8	2.3	27.5	17.4	74.2	33.9	28.4	4.4	33.0
f2	60	900	0.5	0.95	0.90	2.23	1.08	0.45	0.90	16.0	67.3	72.3	29.4	2.1	29.9	16.9	75.2	32.4	27.2	4.6	33.4
f3	90	870	0.5	0.93	0.30	*	0.84	*	0.30	15.9	19.2	*	21.4	*	8.53	17.0	63.9	33.4	25.5	4.5	28.4
f4	30	680	0.6	0.96	0.74	2.29	0.96	0.44	0.74	16.6	33.9	82.7	22.1	1.8	15.1	17.3	46.1	36.1	23.0	4.2	20.5
f5	60	870	0.6	0.96	0.49	4.09	0.86	0.25	0.49	16.5	21.5	145.1	18.4	1.0	9.53	17.1	43.9	35.5	21.3	4.2	19.5
f6	90	900	0.6	0.94	0.35	*	0.89	*	0.35	16.1	20.1	*	19.6	*	8.9	17.2	57.3	34.2	22.0	4.4	25.5
f7	30	720	0.7	0.95	0.63	1.91	0.94	0.52	0.63	15.7	26.1	70.3	19.6	2.1	11.6	16.6	41.6	36.8	20.9	4.1	18.5
f8	60	800	0.7	0.93	0.39	6.50	0.81	0.18	0.39	15.1	17.9	244.6	17.4	0.7	7.9	16.2	45.4	37.6	21.4	4.0	20.2
f9	90	890	0.7	0.94	0.34	*	0.73	*	0.34	15.5	18.7	*	15.7	*	8.3	16.5	55.4	36.0	21.6	4.2	24.6

*Αδύνατη μέτρηση λόγω επιφανειακής αλλοιώσεως των δοκιμίων

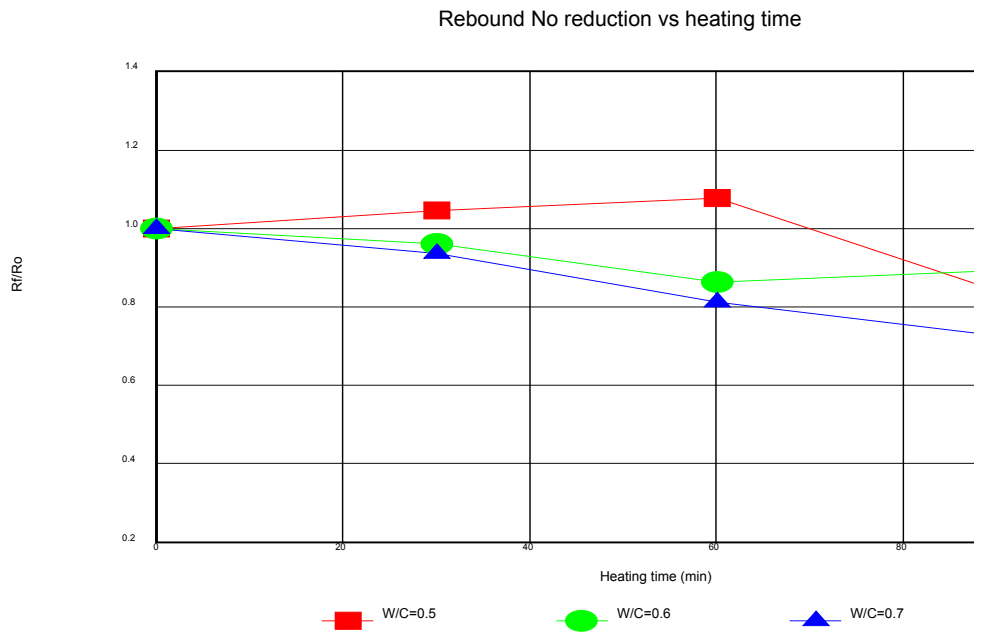
3 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα (μέσες τιμές τεσσάρων δοκιμίων) για κάθε μια οκτάδα δοκιμίων (f1 έως f9). Στο Σχήμα 4 φαίνεται η μείωση της αντοχής των δοκιμίων του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου θερμάνσεως του φούρνου για τις τρεις τιμές του λόγου w/c. Από τα αποτελέσματα φαίνεται μια περίπου γραμμική μείωση της αντοχής συναρτήσει του χρόνου θερμάνσεως του φούρνου με πιο έντονη την μείωση για μεγάλες τιμές του λόγου w/c.

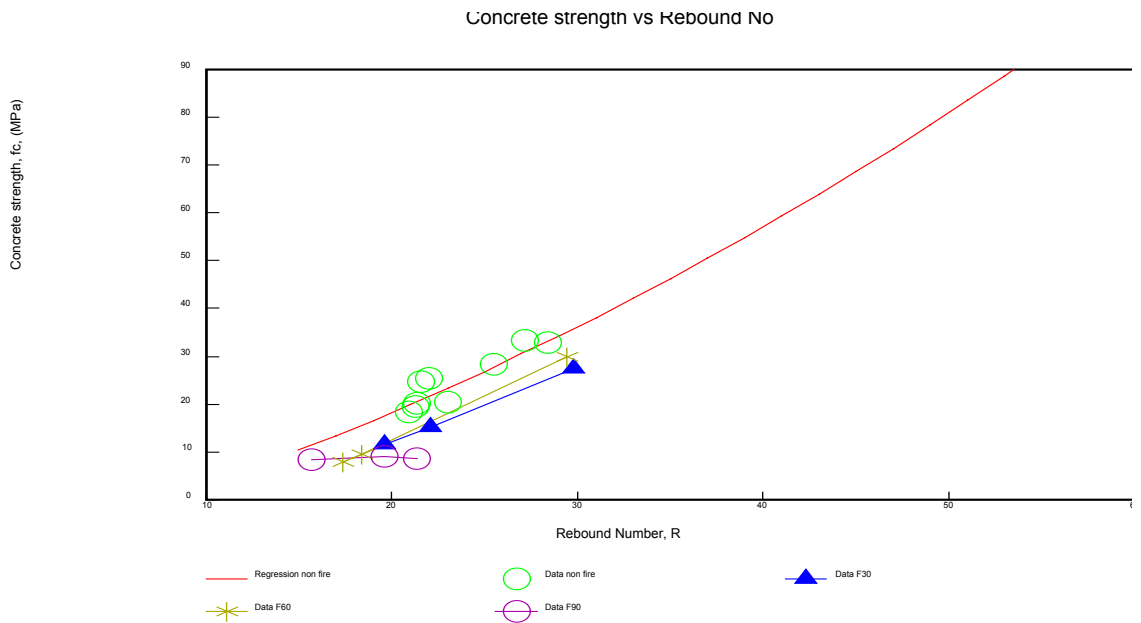


Σχήμα 4 Μεταβολή της αντοχής των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου θερμάνσεως του φούρνου για διάφορες τιμές του λόγου w/c.

Η μεταβολή του δείκτη κρουσιμετρήσεως R δεν είναι σημαντική (Σχ 5), παρουσιάζει μάλιστα μικρή αύξηση για χρόνο θέρμανσης μέχρι 60min και λόγο w/c=0.5. Η μικρή μείωση του δείκτη κρουσιμετρήσεως σε συνδυασμό με την εντονότερη μείωση της αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας σημαίνει ότι η κρουσιμέτρηση σε επιφάνειες σκυροδέματος μετά από πυρκαγιά υπερεκτιμά την αντοχή του σκυροδέματος. Γι αυτό η καμπύλη συσχέτισεως μεταξύ δείκτη κρουσιμετρήσεως R και αντοχής f_c πρέπει να τροποποιηθούν μετατοπιζόμενες προς τα δεξιά (Σχ 6).



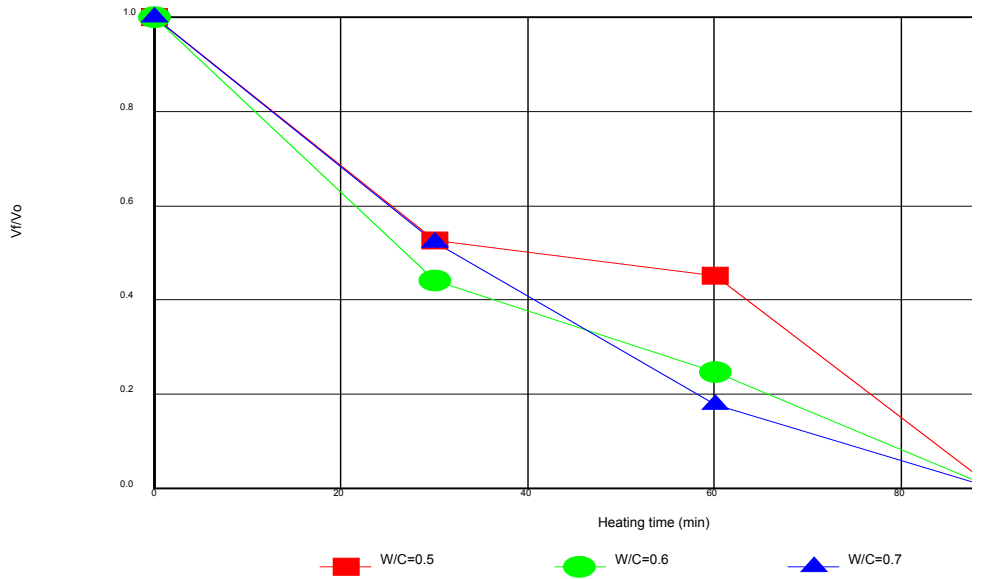
Σχήμα 5



Σχήμα 6

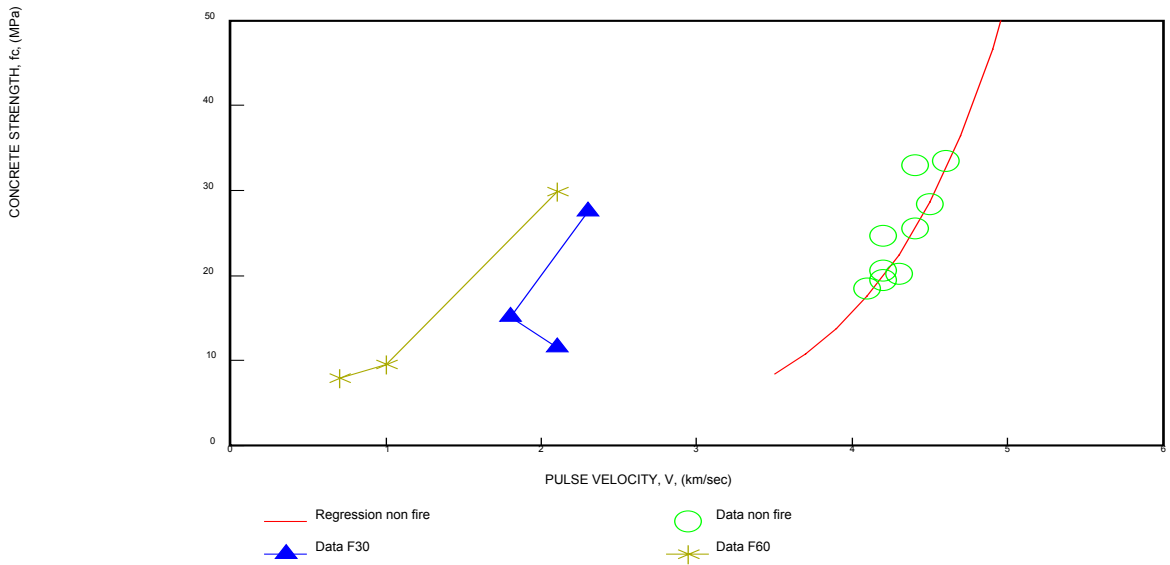
Αντιθέτως η ταχύτητα των υπερήχων παρουσιάζει σημαντική μείωση (Σχ. 7) (Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της αντοχής και έτσι η καμπύλη συσχέτισης μεταξύ της ταχύτητας των υπερήχων V και της αντοχής f_c πρέπει να μετατοπισθεί προς τα αριστερά Σχ. 8))

Pulse velocity reduction vs heating time



Σχήμα 7

Concrete strength vs Pulse velocity

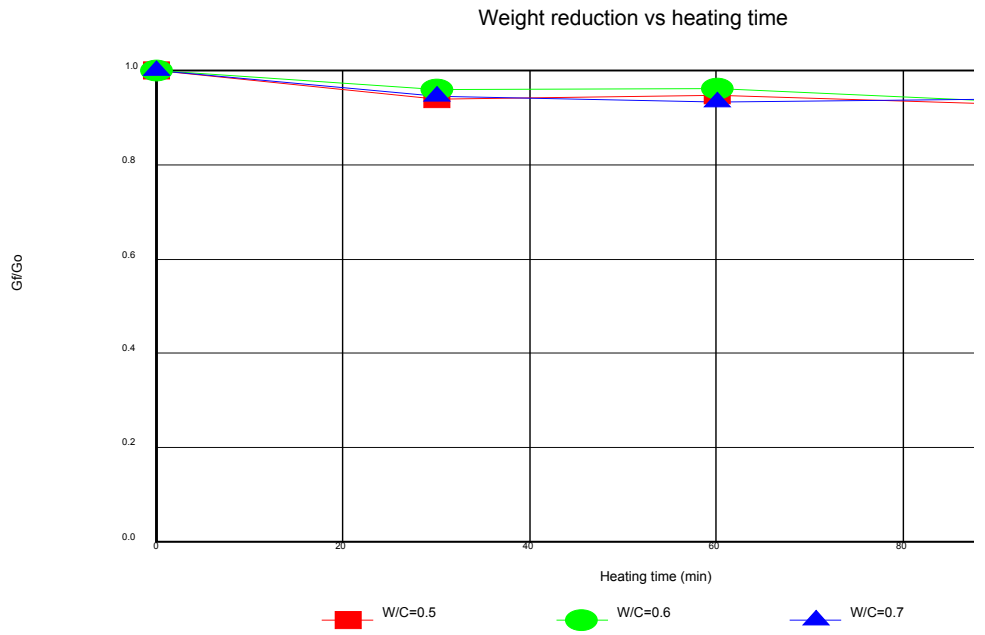


Σχήμα 8

Τέλος στο Σχήμα 9 φαίνεται η μείωση του βάρους των δοκιμίων, η οποία δεν υπερβαίνει το 6-7%. Παρατηρούμε επίσης ότι το μεγαλύτερο μέρος της μείωσης έχει συμβεί ήδη από τα πρώτα 30min της καύσεως (Δοκίμια 15*15*15cm).

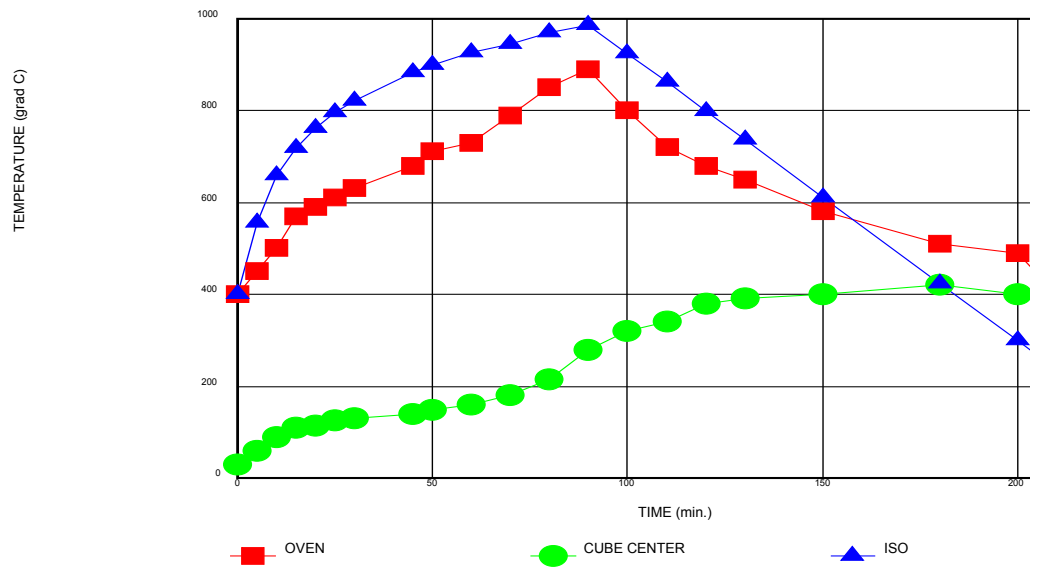
Στο Σχήμα 10 φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο του δοκιμίου για την επίσης εικονιζόμενη θερμοκρασία αερίων στον φούρνο (Πυρκαγιά ISO F90). Παρατηρούμε ότι όταν η θερμοκρασία των αερίων/επιφάνειας σκυροδέματος κατά το πέρας του χρόνου θερμάνσεως (90min) είναι ίση προς ~900°C η θερμοκρασία στο κέντρο του δοκιμίου είναι ~300°C παρουσιάζεται δηλαδή μια **μέση** θερμοκρασιακή κλίση της τάξεως των ~40°C/cm. Δεδομένου μάλιστα ότι η θερμοκρασιακή κλίση για μια πυρκαγιά τύπου "ISO834" δεν είναι σταθερή (Σχ 11), είναι προφανές ότι ένα μικρό επιφανειακό στρώμα σκυροδέματος επηρεάζεται από

την υψηλή θερμοκρασία. Εν γένει το πάχος αυτό εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια, την διάρκεια εκθέσεως στην πυρκαγιά και από την θερμοκρασιακή κλίση εντός της διατομής.



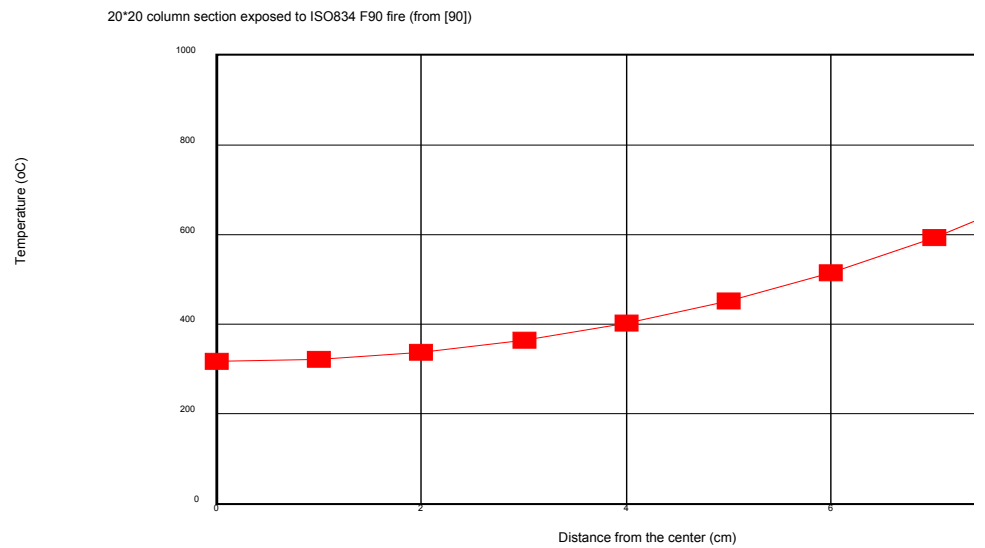
Σχήμα 9

TEMPERATURE IN THE CUBE CENTER



Σχήμα 10

Temperature profile



Σχήμα 11

4 Αναλυτικός υπολογισμός της μείωσης της αντοχής υποστυλώματος για έκθεση σε πυρκαγιά ISO.

Κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, η θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός υποστυλώματος δεν είναι ομοιόμορφη. Κατά συνέπεια για τον υπολογισμό της μείωσης της αντοχής του υποστυλώματος μετά από μια πυρκαγιά, δεν αρκεί μόνον η γνώση του τρόπου μείωσης της αντοχής του σκυροδέματος συναρτήσει της (ομοιόμορφης μέσα στην μάζα-του) θερμοκρασίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη και η κατανομή των θερμοκρασιών μέσα στην μάζα του υποστυλώματος.

Η θερμοκρασιακή κατανομή σε μια διατομή υπολογίζεται από την γνωστή διαφορική εξίσωση του Fourier:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\text{div}(\text{grad}T)+w$$

όπου:

- c= ειδική θερμότητα του υλικού
- ρ = πυκνότητα του υλικού
- T= θερμοκρασία
- t= χρόνος
- λ = θερμική αγωγιμότητα του υλικού
- w= θερμικές απώλειες

Λύνοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση υπολογίζεται η θερμοκρασιακή κατανομή σε διατομές που εκτίθενται σε πυρκαγιά. (Πίνακας 3) (Από το [90], [82])

Πίνακας 3 Κατανομή θερμοκρασιών σε υποστυλώμα 20*20cm για πυρκαγιά ISO διάρκειας 60min

Απόσταση από το κέντρο (cm)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	109	114	130	162	209	268	341	430	541	678	851
1	114	119	135	168	215	273	345	433	543	680	851
2	130	135	154	186	231	287	356	443	551	685	853
3	162	168	186	216	257	310	376	460	564	694	857
4	209	215	231	257	294	343	405	484	583	706	862
5	268	273	287	310	343	387	444	517	608	724	868
6	341	345	356	376	405	444	495	560	642	746	877
7	430	433	443	460	484	517	560	615	686	775	887
8	541	543	551	564	583	608	642	686	742	812	900
9	678	680	685	694	706	724	746	775	812	858	915
10	851	851	853	857	862	868	877	887	900	915	932

Στο σχήμα 12 φαίνεται η μείωση της αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως προτείνεται στην διεθνή βιβλιογραφία (από το_N[4]).

Σ

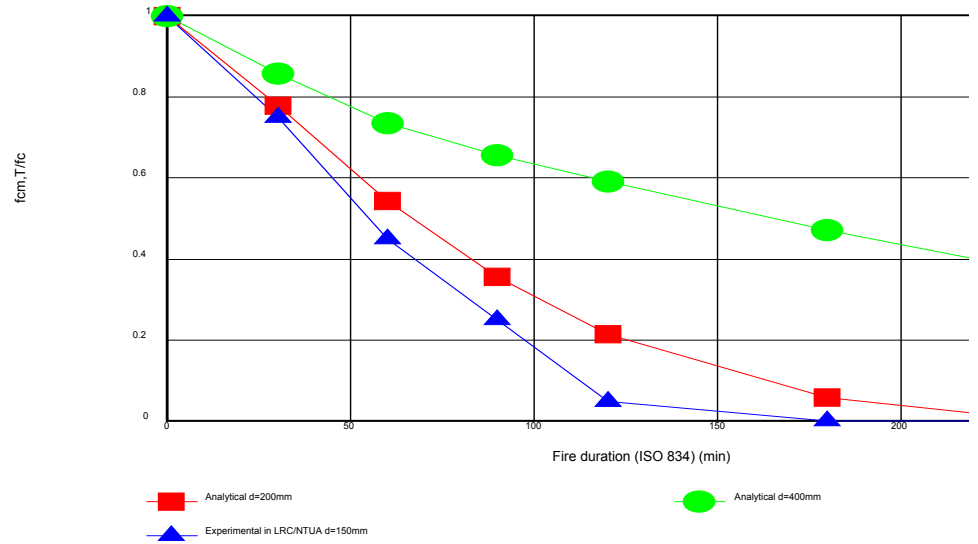
Δεχόμενοι μια γραμμική μείωση της αντοχής του σκυροδέματος συναρτήσει της θερμοκρασίας από τους $\sim 200^{\circ}\text{C}$ (καμμία μείωση) έως τους $\sim 800^{\circ}\text{C}$ (μηδενική αντοχή), όπως άλλωστε προτείνεται και στα [90] και [82], μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση αντοχή υποστυλωμάτων για διάφορους χρόνους εκθέσεως σε πυρκαγιά τύπου ISO834 ολοκληρώνοντας την απομένουσα αντοχή στην διατομή του υποστυλώματος. Ενδεικτικά στο Σχήμα 13 φαίνεται η κατανομή των θερμοκρασιών στην διατομή του υποστυλώματος ενώ στο Σχήμα 14 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή της απομένουσας αντοχής (ως ποσοστό της αρχικής αντοχής). Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία, υπολογίζεται η μείωση της αντοχής συναρτήσει της διάρκειας πυρκαγιάς ISO, για διάφορες διαστάσεις τετραγωνικών υποστυλωμάτων (20 έως 40cm) (Σχήμα 15). Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι τιμές από τα πειράματα.

Σχήμα 13 Κατανομή θερμοκρασιών ($d=20\text{cm}$, $T=60\text{min}$)

Σχήμα 14 Κατανομή απομένουσας αντοχής μετά την πυρκαγιά ($d=20\text{cm}$, $T=60\text{min}$)

Mean strength reduction

of square columns for different fire durations



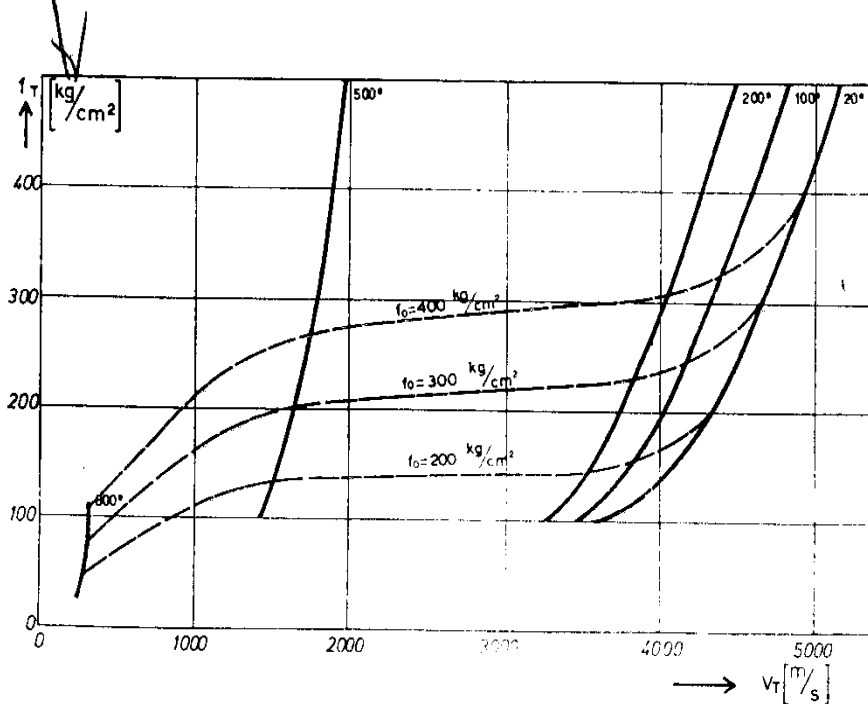
Σχήμα 15 Μεταβολή της αντοχής υποστυλώματος.

5 Σύγκριση με την βιβλιογραφία

Τα αποτελέσματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με άλλα της διεθνούς βιβλιογραφίας μιας και διαφέρει ο τρόπος εκθέσεως στις υψηλές θερμοκρασίες: στην εργασία αυτή ακολουθήθηκε η καμπύλη θερμάνσεως ISO (με την οποία προσομοιώνονται οι συνθήκες πραγματικής πυρκαγιάς) ενώ στις άλλες εργασίες τα δοκίμια παρέμεναν σε φούρνο με **σταθερή** θερμοκρασίας επί μακρό χρονικό διάστημα (πχ 2h) και έτσι αναπτυσσόταν περίπου ομοιόμορφη θερμοκρασία σ' όλη την μάζα του σκυροδέματος.

Στα σχήματα 16 και 17 φαίνονται οι τροποποιημένες καμπύλες συσχέτισεως της αντοχής με τον δείκτη κρουσιμετρήσεως και την ταχύτητα των υπερήχων αντιστοίχως ([4])

Σχήμα 16



Σχήμα 17

Παρ' όλο που δεν είναι εφικτή η ποσοτική σύγκριση μεταξύ των σχημάτων 12, 16 και 17 με τα αντίστοιχα σχήματα 4, 6 και 8, ποιοτικά τα αποτελέσματα φαίνεται ότι συμφωνούν μεταξύ-τους.

Τέλος στο σχήμα 18 φαίνεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο κέντρο και στην επιφάνεια δοκιμίου 15*15 όπως αναφέρεται στην [77] (Σύγκριση του Σχ 18 με το 10)

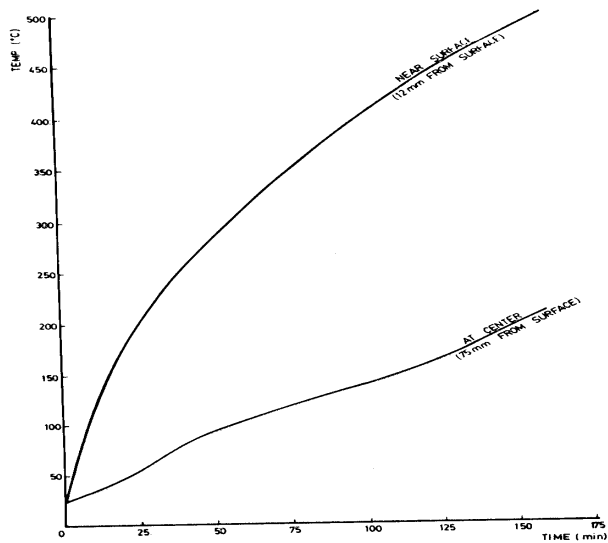


FIG. 4—Increase of temperature during burning.

Σχήμα 18

- Είναι επιτρεπτή η άθροιση των δυνάμεων επειδή η πλαστιμότητα του καμένου σκυρ/τος είναι μεγαλύτερη από του μη καμένου (πχ το 0.2% γίνεται 0.4%)

