

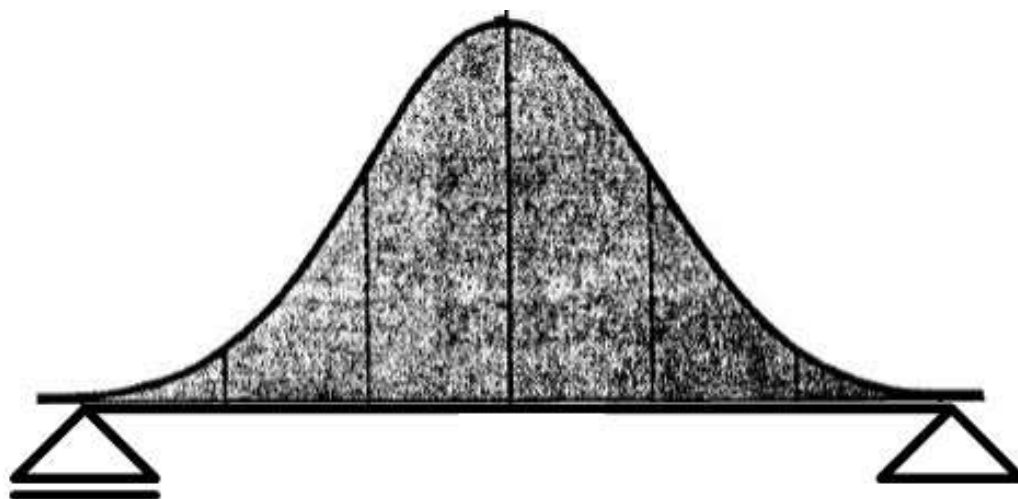


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

Αξιοπιστία στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων



Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Τρέζος

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

Αξιοπιστία στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης
Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Τρέζος

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Copyright © Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του Κωνσταντίνου Θεόδωρου Τσαλουχίδη. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του Κωνσταντίνου Θεόδωρου Τσαλουχίδη (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Konstantinos Theodoros Tsalouchidis, 2016
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης (2016)

Αξιοπιστία στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos Theodoros Tsalouchidis (2016)

Structural reliability of reinforced concrete elements according to the Eurocodes provisions
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επι τη ευκαιρία νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε κάποιους ανθρώπους που η στήριξη και η βοήθειά τους υπήρξαν καθοριστικές.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Τρέζο, Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Οι συμβουλές και η καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας υπήρξαν πολύτιμες, και ευελπιστώ σε μια μελλοντική συνεργασία.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την κ. Ελισσάβητ Βιτζηλαίου, Καθηγήτρια του τομέα Δομοστατικής και τον κ. Χρήστο Ζέρη Αναπληρωτή Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ ακόμα όλους μου τους φίλους και συμφοιτητές για τη στήριξη τους, και ιδιαίτερα τη Σοφία για την ανεκτίμητη βοήθειά της στη διεκπαιρέωση της παρουσίασης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, τις αδελφές μου και όλη μου την οικογένεια, που με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια.

*Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης
Ιούλιος 2016*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιοπιστία στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων

Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσαλουχίδης
Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Τρέζος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκει τη διερεύνηση της αξιοπιστίας δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυροδέμα, υπο τις διατάξεις των Ευρωκωδίκων (EN 1990, EN 1991, EN 1998).

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έννοια της στοχαστικής - πιθανοτικής μεθόδου ανάλυσης των κατασκευών, και αναλύονται οι βασικές αρχές της θεωρίας πιθανοτήτων και της στατιστικής, καθώς και οι μέθοδοι προσδιορισμού της αξιοπιστίας κατασκευών που εφαρμόστηκαν στη συνέχεια (προσομοιώσεις Monte Carlo, μέθοδος γραμμικοποίησης της επιφάνειας αστοχίας πρώτης τάξης F.O.R.M.). Παρουσιάζονται ακόμα στατιστικά στοιχεία για τα εμπλεκόμενα μεγέθη των δράσεων, των αντοχών και των αβεβαιοτήτων των προσομοιωμάτων, στον σχεδιασμό και τη λειτουργία της κατασκευής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διερεύνηση των πιθανοτικών χαρακτηριστικών της αντοχής δοκών και υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος σε ορθή και διατμητική ένταση. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν καλύπτουν επαρκώς κάθε δυνατή διαμόρφωση των στοιχείων ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, τις αναλογίες των υλικών που τα απαρτίζουν, καθώς και τα χαρακτηριστικά των κατανομών των υλικών αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εξετάζεται η αξιοπιστία δοκού (σε κάμψη και διάτμηση) υπό τον σχεδιασμό με τις εξισώσεις {6.10} ή {6.10a και 6.10β} όπως ορίζεται από τον EN 1990, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του δεύτερου κεφαλαίου για τα πιθανοτικά χαρακτηριστικά της αντοχής της.

Στο τέταρτο, πέμπτο και έκτο κεφάλαιο, αναλύονται οι ικανοτικοί έλεγχοι τέμνουσας δοκού, τέμνουσας υποστυλώματος και κόμβου αντίστοιχα. Αξιοποιώντας και εδώ τα αποτελέσματα του δεύτερου κεφαλαίου εξάγονται συμπεράσματα για την αξιοπιστία των ικανοτικών ελέγχων.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, συγκρίνονται οι βαθμοί αξιοπιστίας κάθε περίπτωσης που εξετάστηκε και προτείνονται τρόποι για βελτιστοποίηση της χρήσης των διατάξεων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF REINFORCED CONCRETE

DIPLOMA THESIS

Structural reliability of reinforced concrete elements according to the Eurocodes provisions

Konstantinos Theodoros Tsalouchidis
Supervisor: Konstantinos Trezos

ABSTRACT

The broad objective of this study is to examine the reliability of the structural elements of reinforced concrete, according to the Eurocodes provisions (EN 1990, EN 1991, EN 1998).

In the first chapter there is an introduction to the broad sense of the stochastic-probabilistic method in structural analysis. Moreover, the fundamentals of the probability theory and statistics, as well as the methods of structural reliability subsequently applied, are analyzed (Monte Carlo simulations and first order reliability method - F.O.R.M). Furthermore, statistic data for the distributions of the load effects, materials strength and the models uncertainty factors that affect the structure design and function, are presented.

In the second chapter there is an examination of the probabilistic characteristics of reinforced concrete beams and columns resistance, both in normal and shear stress. The cases examined in the study include adequately every possible configuration of the elements, as far as their geometric features, the analogies of the materials constituting these elements, as well as the features of the distribution of these materials is concerned.

The third chapter discusses and investigates the beam reliability, both in bending and shear stress, according to the applying equations (6.10) or (6.10a and 6.10b) as defined by the EN1990. To do so, the results on the probabilistic characteristics of beams resistance, included in the second chapter, have been taken into account.

Chapters four, five and six analyze the capacity design requirements for beams in shear strength, columns in shear strength and columns in bending at beam/column joints respectively. Once again, the results of the second chapter have been used, in order to reach conclusions on capacity design reliability.

Finally, in the seventh chapter all conclusions derived from the results included in the previous chapters are briefly discussed. Also, there is a comparison among the reliability of each examined case, as well as recommendations to better use the Eurocodes provisions.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Λατινικοί χαρακτήρες

b: πλάτος δοκού
c: επικάλυψη (κάτω οπλισμού)
COV: συντελεστής μεταβλητότητας
d: στατικό ύψος
d₁: επικάλυψη (πάνω οπλισμού)
E: δράση (ως τυχαία μεταβλητή)
E_d: δράση σχεδιασμού
f_c: αντοχή σκυροδέματος (ως τυχαία μεταβλητή)
f_{cd}: τιμή σχεδιασμού αντοχής σκυροδέματος
f_y: όριο διαρροής χάλυβα (ως τυχαία μεταβλητή)
f_{yd}: τιμή σχεδιασμού ορίου διαρροής χάλυβα
G: μόνιμα φορτία
h: ύψος διατομής
M_E: δρώσα ροπή (ως τυχαία μεταβλητή)
mean(.): μέση τιμή
M_{Ed}: δρώσα ροπή σχεδιασμού
M_R: ροπή αντοχής (ως τυχαία μεταβλητή)
M_{Rd}: ροπή αντοχής σχεδιασμού
P_f: πιθανότητα αστοχίας
P_{fc}: πιθανότητα αστοχίας θλιπτήρων σκυροδέματος
P_{fy}: πιθανότητα αστοχίας συνδετήρων
Q: κινητά φορτία
R: αντίσταση (ως τυχαία μεταβλητή)
R_d: αντίσταση σχεδιασμού
std(.): τυπική απόκλιση
V_E: δρώσα τέμνουσα (ως τυχαία μεταβλητή)
V_{Ed}: δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού
V_R: τέμνουσα αντοχή (ως τυχαία μεταβλητή)
V_{Rd}: τέμνουσα αντοχή σχεδιασμού
x: ύψος θλιβόμενης ζώνης

Ελληνικοί χαρακτήρες

ε_{cu3}: μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος (3.5‰)
ε_{s1}: ανηγμένη παραμόρφωση οπλισμού (άκρο 1)
ε_{s2}: ανηγμένη παραμόρφωση οπλισμού (άκρο 2)
μ_R: ανηγμένη ροπή (ως τυχαία μεταβλητή)
μ_{Rd}: ανηγμένη ροπή αντοχής σχεδιασμού
ν_R: ανηγμένη αξονική δύναμη αντοχής (ως τυχαία μεταβλητή)
ν_{Rd}: ανηγμένη αξονική δύναμη αντοχής σχεδιασμού
ξ: x/d
ω₁: ποσοστό οπλισμού (άκρο 1)
ω₂: ποσοστό οπλισμού (άκρο 2)
ω_{tot}: συνολικό ποσοστό οπλισμού

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

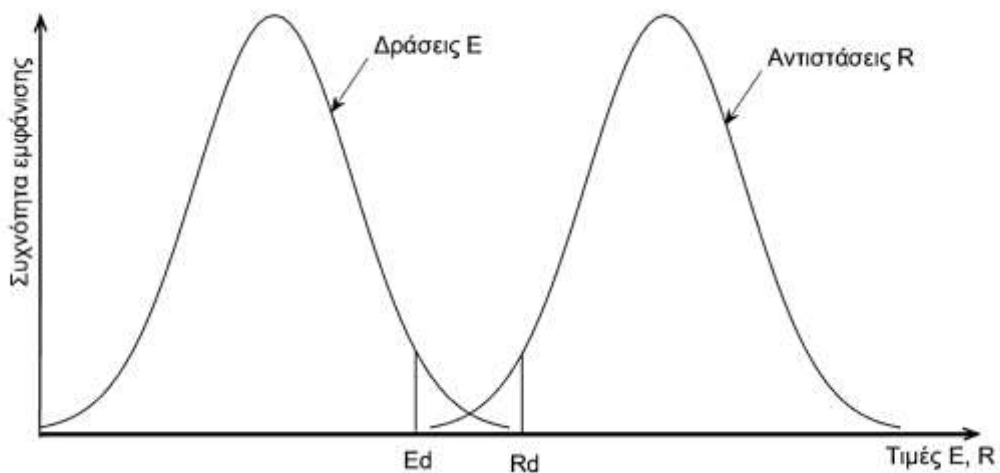
1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	1
1.1	Σχεδιασμός Κατασκευών – Περιθώριο ασφαλείας	1
1.2	Διαδικασίες υπολογισμού επιπέδου ασφαλείας	2
1.2.1	Βασικές μεταβλητές και επιφάνεια αστοχίας	3
1.2.2	Προσομοιώσεις – Μέθοδος Monte Carlo	3
1.2.3	Γραμμικοποίηση επιφάνειας αστοχίας - First Order Reliability Method (FORM)	4
1.3	Χαρακτηριστικά Κατανομών	5
1.3.1	Ιδίο βάρος	7
1.3.2	Ωφέλιμα φορτία	8
1.3.3	Αντοχές υλικών	10
1.3.4	Συντελεστές αβεβαιότητας προσομοιωμάτων	11
2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ	13
2.1	Εισαγωγή	13
2.2	Στοιχεία υπο ορθή ένταση	15
2.2.1	Δοκοί (αξονική $v=0$)	17
2.2.2	Υποστυλώματα (αξονική $v \neq 0$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$)	33
2.3	Στοιχεία υπό διατμητική ένταση	46
3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EN 1990 (ΕΞ. 6.10, 6.10Α, 6.10Β)	49
3.1	Σχεδιασμός με τις εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β	49
3.2	Πιθανοτικά Χαρακτηριστικά δρώντων μεγεθών	51
3.3	Μόρφωση εξίσωσης αστοχίας $g(X)=0$	53
3.4	Αξιοπιστία δοκού οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη	54
3.5	Αξιοπιστία δοκού οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση	60
4	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998)	65
4.1	Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος	65
4.2	Εξίσωση αστοχίας	66
4.3	Κατακόρυφα φορτία κατά τον σεισμό – οιονεί μόνιμα φορτία	67
4.4	Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού	68
5	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998)	77
5.1	Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας υποστυλώματος οπλισμένου σκυροδέματος	77

5.2	Εξίσωση αστοχίας	78
5.3	Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος.....	79
6	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟ ΟΡΘΗ ΕΝΤΑΣΗ (ΚΟΜΒΟΥ) ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998).....	83
6.1	Ικανοτικός σχεδιασμός κόμβου οπλισμένου σκυροδέματος.....	83
6.2	Εξίσωση αστοχίας	84
6.3	Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου κόμβου	86
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 Σχεδιασμός Κατασκευών – Περιθώριο ασφαλείας

Η έννοια της ασφαλείας στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού βρίσκεται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Οι καθαρά προσδιορισμικές (deterministic) μέθοδοι υπολογισμού των αντοχών και των δράσεων, που αποτελούν τις συνήθειες ως σήμερα μεθόδους ελέγχου, βασίζονται στην μακροχρόνια εμπειρία δόμησης και εφαρμόζονται μέσω της χρήσης συντελεστών ασφαλείας, είτε αθροιστικά στα μοντέλα αντοχών και δράσεων είτε στις επιμέρους συνιστώσες τους. Κατά συνέπεια, αδυνατούν να εκφράσουν την άμεση σύνδεση σχεδιασμού και επιπέδου ασφαλείας, καθώς ο μελετητής υλοποιεί τους υπολογισμούς με τις τιμές σχεδιασμού E_d και R_d , οι οποίες εκφράζουν ένα ποσοστμόριο (όχι απαραίτητα γνωστό) των κατανομών της δράσης και αντίστασης αντίστοιχα, αγνοώντας την πιθανότητα αστοχίας $P(R - E \leq 0)$.

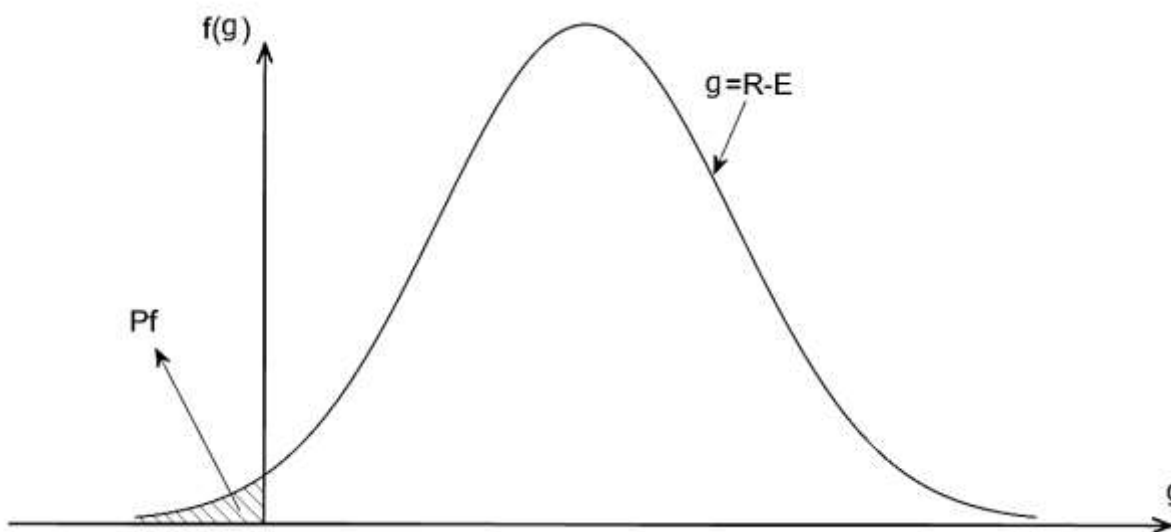


Εικόνα 1: Κατανομές δράσεων και αντιστάσεων

Για να σταθμιστεί ο βαθμός ασφαλείας των κατασκευών, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όλοι οι παράγοντες (αντοχών, δράσεων, ακρίβειας προσομοιώματος κλπ.) που επηρεάζουν τον σχεδιασμό έχουν χαρακτήρα μεταβαλλόμενο. Συνεπώς, κάνοντας χρήση των μεθόδων της πιθανοτικής θεωρίας, υπολογίζεται η κατανομή της συνάρτησης αστοχίας:

$$g(x) = R - E$$

Με αποτέλεσμα τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής $P(g \leq 0)$.



Εικόνα 2: Κατανομή συνάρτησης αστοχίας $g(X)=0$, και πιθανότητα αστοχίας $p_f=P(g<0)$

Συγκεκριμένα αν η τυχαία μεταβλητή $g = R - E$ ακολουθεί την κανονική κατανομή και ορίσουμε ως 'αστοχία' τη συνθήκη $g < 0$ τότε η πιθανότητα αστοχίας θα είναι:

$$p_f = P(g < 0) = P(g - \text{mean} < -\text{mean}) = P\left(\frac{g - \text{mean}}{\text{std}} < -\frac{\text{mean}}{\text{std}}\right) = \text{Erf}\left(-\frac{\text{mean}}{\text{std}}\right) = \text{Erf}(-\beta)$$

Όπου

$\text{Erf}(\cdot)$: η συνάρτηση κατανομής της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $N(0,1)$, και

β : ο δείκτης ασφαλείας ο οποίος μετρά την απόσταση του σημείου mean από την αρχή των αξόνων όταν std είναι η μονάδα μετρήσεως, με $\beta = -\text{Erf}^{-1}(p_f)$

Πίνακας 1: Συσχέτιση συντελεστή αξιοπιστίας β με πιθανότητα αστοχίας p_f

p_f	0.5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	0	1.28	2.33	3.09	3.72	4.26	4.75	5.20

1.2 Διαδικασίες υπολογισμού επιπέδου ασφαλείας

Διακρίνουμε διάφορα επίπεδα ελέγχου της ασφαλείας των κατασκευών:

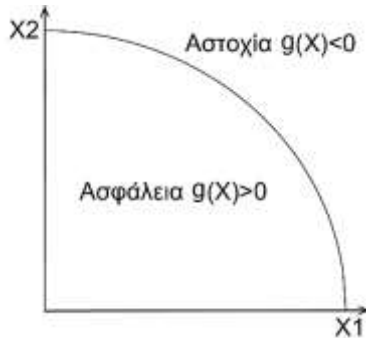
1.Το Επίπεδο 3: Είναι το πλέον προχωρημένο, διότι γίνεται πιθανοτική ανάλυση βασισμένη στις ακριβείς κατανομές των βασικών μεταβλητών, ενώ απαιτείται η γνώση της από κοινού συναρτήσεως κατανομής.

2.Το Επίπεδο 2: Γίνονται διάφορες απλοποιήσεις σε σχέση με το επίπεδο 3, η βασικότερη από τις οποίες είναι ότι γίνεται γραμμικοποίηση της επιφάνειας αστοχίας στην περιοχή του σημείου σχεδιασμού στον χώρο των τυποποιημένων κανονικών μεταβλητών.

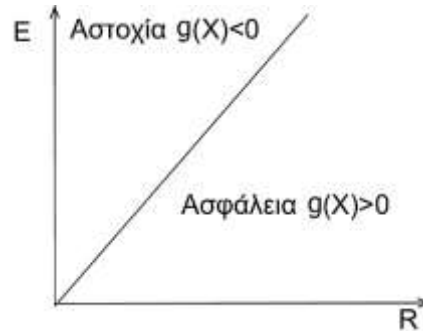
3.Το Επίπεδο 1: Είναι η μέθοδος των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας, με τους οποίους λαμβάνεται υπόψη ο πιθανοτικός χαρακτήρας των δράσεων. Ο έλεγχος είναι προσδιοριστικός.

1.2.1 Βασικές μεταβλητές και επιφάνεια αστοχίας

Καθορίζονται οι σπουδαιότερες μεταβλητές (που καλούνται και βασικές), όπως οι γεωμετρικές μεταβλητές, οι αντοχές των υλικών, οι εξωτερικές δράσεις και ότι άλλο απαιτείται ώστε να ορίζεται η επιφάνεια αστοχίας από το σύνολό τους. Αν n είναι το πλήθος των βασικών αυτών μεταβλητών (με $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ τυχαίο διάνυσμα και X_i οι βασικές μεταβλητές) τότε η επιφάνεια αστοχίας διαιρεί τον χώρο των n διαστάσεων σε δύο περιοχές: την ασφαλή περιοχή και την περιοχή αστοχίας. Η υπερ-επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται από την εξίσωση της μορφής $g(X)=0$, στην οποία με θετικές τιμές υποδηλώνεται η ασφαλής περιοχή και με μη θετικές η αστοχία. Στον χώρο των δύο διαστάσεων θα είχαμε:



Εικόνα 3: Ασφαλής περιοχή και περιοχή αστοχίας



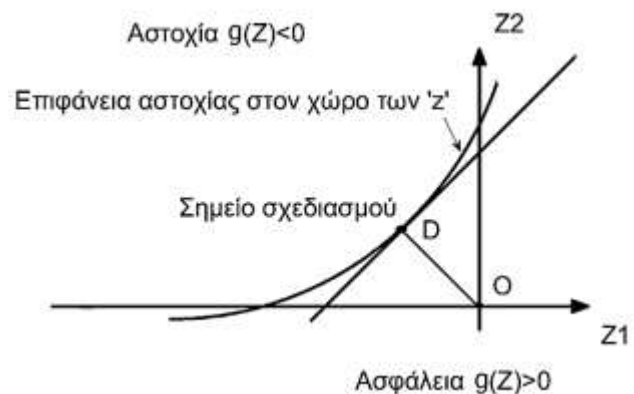
Εικόνα 4: Γραμμική εξίσωση αστοχίας

Για την περίπτωση γραμμικής εξισώσεως αστοχίας και κανονικών βασικών μεταβλητών, ο δείκτης ασφαλείας β δίνεται όπως γνωρίζουμε από τη σχέση $\beta = \text{mean}(Y)/\text{std}(Y)$, όπου $Y=R-E$, οπότε:

$$\beta = \frac{\text{mean}(R) - \text{mean}(E)}{\sqrt{[\text{std}(R)]^2 + [\text{std}(E)]^2}}$$

Συνεπώς, αν η εξίσωση αστοχίας είναι γραμμική και οι βασικές μεταβλητές είναι κανονικές, ο δείκτης ασφαλείας ορίζεται από την παραπάνω γνωστή σχέση.

Γενικώς, η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι γραμμική (και δεν αποτελείται εξ' ολοκλήρου από κανονικές τυχαίες μεταβλητές), με αποτέλεσμα το β να ορίζεται σύμφωνα με την προσέγγιση των Hasofer - Lind ως η μικρότερη απόσταση της αρχής των αξόνων από την επιφάνεια αστοχίας στον χώρο των τυποποιημένων κανονικών μεταβλητών Z_i , όπου $Z_i = (X_i - \mu_{X_i})/\sigma_{X_i}$. Με αυτόν τον γραμμικό μετασχηματισμό έχουμε μια νέα επιφάνεια αστοχίας στον χώρο των z όπου τα Z_i έχουν μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία τυπική απόκλιση.



Εικόνα 5: Γραμμικοποίηση επιφάνειας αστοχίας

1.2.2 Προσομοιώσεις – Μέθοδος Monte Carlo

Προσομοίωση είναι η τεχνική με την οποία δημιουργούμε με τεχνητό τρόπο (συνήθως στον Η/Υ), ένα δείγμα μιας μεταβλητής Y , η οποία στη συνήθη περίπτωση είναι συνάρτηση άλλων τυχαίων μεταβλητών X_i , οι οποίες ακολουθούν γνωστούς νόμους κατανομής. Στη συνέχεια, το δείγμα των

τιμών Y_i που προκύπτει, το χειριζόμαστε ως ένα τυχαίο στατιστικό δείγμα το οποίο επεξεργαζόμαστε ώστε να εκτιμήσουμε διάφορα στοιχεία της τυχαίας μεταβλητής Y (π.χ. την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Y , τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, την πιθανότητα $p_f = P(Y < a)$ κλπ.).

Για την προσομοίωση των τυχαίων μεταβλητών X_i που ακολουθούν δεδομένη κατανομή, δηλαδή για τη δημιουργία δείγματος n τιμών X_1, \dots, X_n , χρησιμοποιούνται γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Αυτό βέβαια ακούγεται ως παράδοξο, μιας και τα προγράμματα H/Y είναι αλληλουχίες προσδιορισμικών – ντετερμινιστικών εντολών οι οποίες εκτελούνται σε ένα προσδιορισμικό μηχάνημα. Ωστόσο, παρόλο που η ακολουθία των δημιουργούμενων αριθμών είναι προσδιορισμική, και με δυνατότητα να επαναλαμβάνεται όσες φορές θέλουμε, έχει την εμφάνιση ως να ήταν τυχαία, με την έννοια ότι αν ένας τρίτος, ο οποίος δεν γνωρίζει την προέλευση αυτού του δείγματος των αριθμών, εξετάσει το δείγμα θα αποφανθεί ότι πρόκειται για ένα τυχαίο δείγμα). Αυτοί οι ψευδο-τυχαίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται στις πιθανοτικές προσομοιώσεις (οι οποίες πολλές φορές λέγονται και προσομοιώσεις Monte Carlo)

Με τη μέθοδο της προσομοίωσης, τα συμπεράσματα που εξάγουμε (π.χ. η μέση τιμή της Y , ή η πιθανότητα $p_f = P(Y < a)$) βασίζονται στην επεξεργασία ενός στατιστικού δείγματος. Αρά, αυτό που υπολογίζουμε είναι μια εκτιμήτρια του μεγέθους που μας ενδιαφέρει και όχι η ακριβής τιμή του. Το ερώτημα λοιπόν που τίθεται είναι πόσος πρέπει να είναι ο απαιτούμενος αριθμός των προσομοιώσεων ώστε τα μεγέθη που υπολογίζουμε να μην αποκλίνουν από την πραγματική τιμή πάνω από ένα αποδεκτό όριο. Για να υπολογίσουμε σχετικά μικρές πιθανότητες (όπως είναι οι πιθανότητες αστοχίας) κρατώντας ταυτόχρονα χαμηλά και την αβεβαιότητα της εκτιμήτριας οδηγούμαστε πολύ γρήγορα σε πολύ μεγάλους αριθμούς προσομοιώσεων. Εναλλακτικώς, εκείνο στο οποίο μπορούμε να αρκεσθούμε είναι να εκτιμήσουμε την συνάρτηση κατανομής της Y (π.χ. κανονική κατανομή ή κατανομή ακροτάτων κλπ) καθώς και τις παραμέτρους της κατανομής (μέση τιμή και τυπική απόκλιση), στοιχεία που απαιτούν πολύ μικρότερο αριθμό προσομοιώσεων.

Αν λοιπόν αρκεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για να προσδιοριστεί η πιθανότητα αστοχίας (όπως στην περίπτωση της γραμμικής επιφάνειας αστοχίας κανονικών βασικών μεταβλητών), τότε με μικρό αριθμό προσομοιώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε το β , ενώ για άλλης μορφής επιφάνεια αστοχίας θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων ώστε να υπολογίσουμε απ' ευθείας την πιθανότητα αστοχίας.

1.2.3 Γραμμικοποίηση επιφάνειας αστοχίας - First Order Reliability Method (FORM)

Στην περίπτωση που η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι γραμμική (και/ή δεν αποτελείται από κανονικές μεταβλητές), το β υπολογίζεται από μια επαναληπτική διαδικασία. Στην περίπτωση μη γραμμικής επιφάνειας (Εικόνα 5), η απόσταση β και το μοναδιαίο διάνυσμα $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ των συνημιτόνων κατευθύνσεως των μεταβλητών Z_i (με $DO = \beta\alpha$), όπου D είναι το σημείο σχεδιασμού, προσδιορίζονται υπολογίζοντας τις εξής $n+1$ εξισώσεις με διαδοχικές προσεγγίσεις:

$$\alpha_i = \frac{-\frac{dg}{dz_i}(\beta\alpha)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \left[\frac{dg}{dz_k}(\beta\alpha) \right]^2}} \quad g(\beta\alpha) = g(\beta\alpha_1, \beta\alpha_2, \dots, \beta\alpha_n) = 0$$

Στην περίπτωση που υπάρχουν και μη κανονικές μεταβλητές, χρησιμοποιούμε τον μετασχηματισμό Rackwitz-Fiessler για τον υπολογισμό των ισοδύναμων παραμέτρων κανονικής κατανομής, έτσι ώστε οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και οι συναρτήσεις κατανομής να συμπίπτουν στο σημείο σχεδιασμού:

$$f_{X_i}(X_i^*) = \frac{1}{\text{std}'(X_i)} \varphi \left(\frac{X_i^* - \text{mean}'(X_i)}{\text{std}'(X_i)} \right) \quad F_{X_i}(X_i^*) = \text{Erf} \left(\frac{X_i^* - \text{mean}'(X_i)}{\text{std}'(X_i)} \right)$$

Όπου $A=(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)$ το σημείο σχεδιασμού και $\text{mean}'(X_i)$, $\text{std}'(X_i)$ οι άγνωστες παράμετροι της κανονικής κατανομής και φ , Erf οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής κατανομής της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Από την επίλυση των παραπάνω προκύπτει:

$$\text{mean}'(X_i) = X_i^* - \text{Erf}^{-1}[F_{X_i}(X_i^*)] \text{std}'(X_i) \quad \text{std}'(X_i) = \frac{\varphi[\text{Erf}^{-1}[F_{X_i}(X_i^*)]]}{f_{X_i}(X_i^*)}$$

Δηλαδή για τον προσδιορισμό των β , α υπολογίζονται εκτός από τις προηγούμενες $n+1$ εξισώσεις και οι δύο τελευταίες

1.3 Χαρακτηριστικά Κατανομών

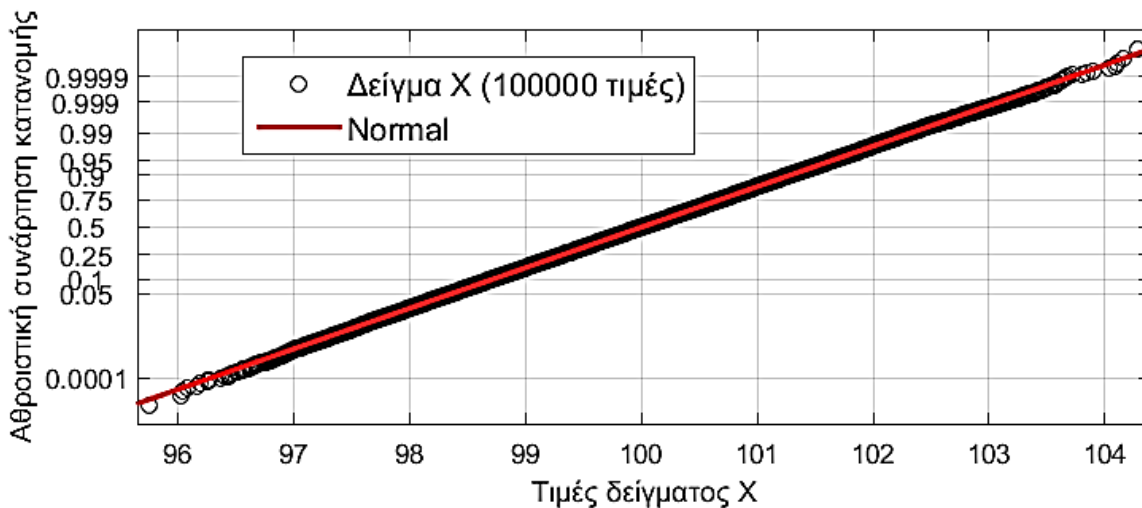
Όπως αναφέρθηκε, προϋπόθεση για να συνταχθεί η εξίσωση της επιφάνειας αστοχίας είναι η γνώση των χαρακτηριστικών των τυχαίων μεταβλητών που την ορίζουν. Στατιστικά στοιχεία χρόνων και πιθανοτικά προσομοιώματα δράσεων και αντοχών έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την προσέγγιση της λειτουργίας των κατασκευών καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους και απότερο στόχο την κατανόηση της εν δυνάμει αστοχίας τους.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τυχαίων μεταβλητών που πρέπει να προσδιοριστούν είναι:

- 1) Η κατάταξη τους σε κάποια γνωστή κατανομή είτε με ακρίβεια είτε με επαρκή προσέγγιση:
Ο καλύτερος τρόπος για να επιβαιβεωθεί ότι ένα δείγμα μιας τυχαίας μεταβλητής ακολουθεί μια γνωστή κατανομή είναι η σύγκριση της αθροιστικής συνάρτησης του τυχαίου δείγματος με την αθροιστική συνάρτηση της κατανομής που προσεγγίζει καλύτερα το δείγμα. Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση, τροποποιείται η κλίμακα του άξονα y ώστε το γράφημα της αθροιστικής συνάρτησης της κατανομής να προκύπτει ευθύγραμμο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία παραδείγματα όπου ακολουθείται αυτή η μεθοδολογία.
- 2) Η εκτίμηση των παραμέτρων τους με κυριότερες τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, ή την διασπορά, αλλά και άλλες όπως την κυρτότητα και την λοξότητα

Παράδειγμα 1^ο: Κατασκευή δείγματος X 10^5 τιμών που να ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(100,1)$, με μέση τιμή 100 και τυπική απόκλιση 1 (με την εντολή `random` του προγράμματος Matlab) και εξακρίβωση του αποτελέσματος (δηλαδή της μεσης τιμής και της τυπικής απόκλισης που απαιτήθηκε).

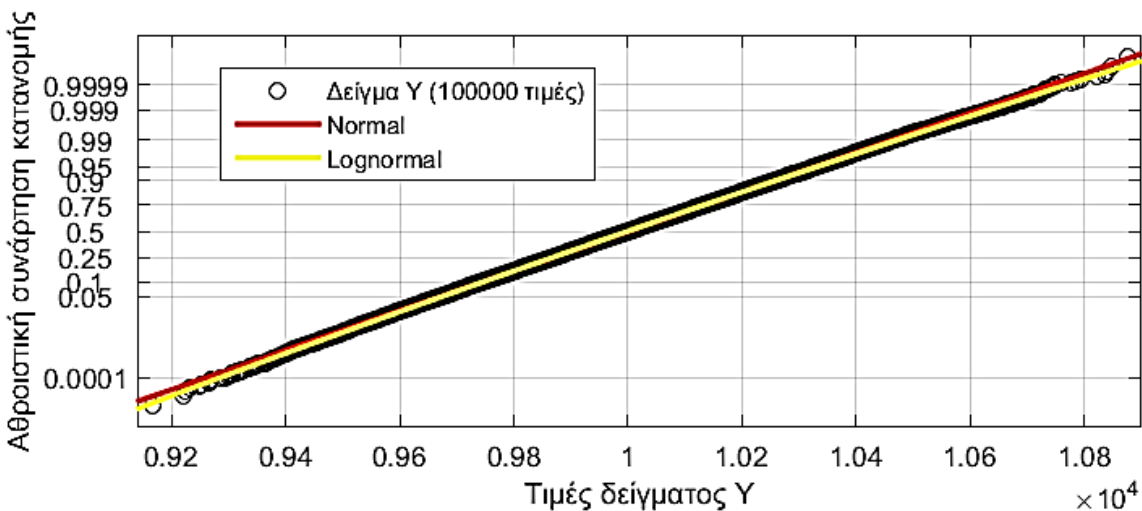
Παρατηρούμε πως η κανονική κατανομή που προσεγγίζει το δείγμα συμπίπτει ακριβώς με τις τιμές του δείγματος X (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Παράδειγμα 1 – κατάταξη δείγματος X σε γνωστή κατανομή

Παράδειγμα 2^ο: Κατασκευή του δείγματος $Y=X*X$, όπου X το δείγμα του παραδείγματος 1. Έλεγχος και κατάταξη του δείγματος Y.

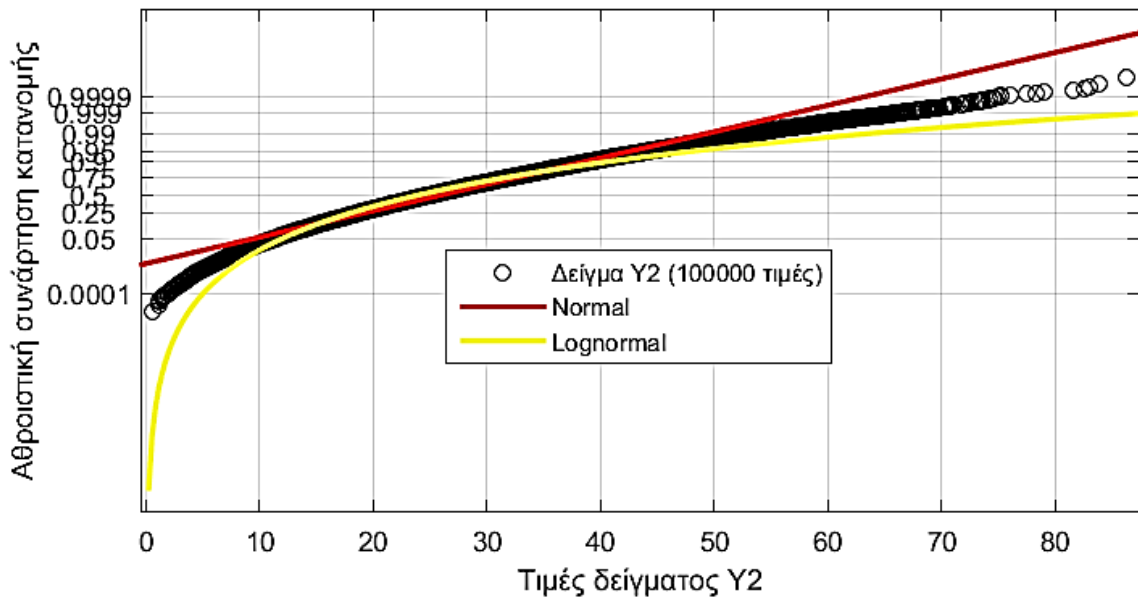
Η κανονική κατανομή προσεγγίζει ακριβώς το δείγμα (Εικόνα 7). Αυτό είναι αναμενόμενο αν αναλογιστούμε πως μια κανονική κατανομή σχεδόν ταυτίζεται με μια λογαριθμοκανονική όταν απέχουν αρκετά (συγκεκριμένα ο λόγος μ/σ) από το 0. Το γινόμενο δύο λογαριθμοκανονικών κατανομών δίνει λογαριθμοκανονική κατανομή, άρα προσεγγιστικά μπορούμε να πούμε πως και το γινόμενο δύο κανονικών μεταβλητών αν 'απέχουν αρκετά από το 0' ακολουθεί την κανονική κατανομή.



Εικόνα 7: Παράδειγμα 2 – κατάταξη δείγματος $Y=X*X$ σε γνωστή κατανομή

Παράδειγμα 3^ο: Κατασκευή του δείγματος $Y2=X2*X2$, όπου $X2=(X-95)$, X το δείγμα του παραδείγματος 1, δηλαδή το δείγμα $X2$ ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(5,1)$. Έλεγχος και κατάταξη του δείγματος $Y2$.

Αντίθετα με την περίπτωση του παραδείγματος 2, επειδή η κατανομή που ακολουθεί το δείγμα $X2$ δεν απέχει πολύ από το 0, δεν ισχύουν οι υποθέσεις περι ομοιότητας κανονικής και λογαριθμοκανονικής κατανομής και κατά συνέπεια το δείγμα Y δεν προσεγγίζεται (τουλάχιστον στον ίδιο βαθμό) με κάποια από τις δύο αυτές κατανομές (αλλά μπορούμε να δούμε ότι είναι κάτι ενδιάμεσό τους).



Εικόνα 8: Παράδειγμα 3 – κατάταξη δείγματος $Y_2=X_2^2$ σε γνωστή κατανομή

Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε δείγμα που κατασκευάστηκε με στόχο την προσομοίωση κάποιων τυχαιών μεταβλητής.

1.3.1 Ιδιο βάρος

Οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση του ίδιου βάρους μιας κατασκευής οφείλονται στις αβεβαιότητες του ειδικού βάρους των υλικών που την απαρτίζουν και των διαστάσεών της.

Θεωρούμε πως το ίδιο βάρος (π.χ. μιας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος) ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή την χαρακτηριστική τιμή g_k και τυπική απόκλιση $0.1 \cdot g_k$ (δηλαδή μεταβλητότητα – Covariance=0.10). Θυμόμαστε πως η κανονική κατανομή ορίζεται ως η κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

όπου:

e: η βάση των νεπέρειων λογαρίθμων ($\cong 2,71828$),

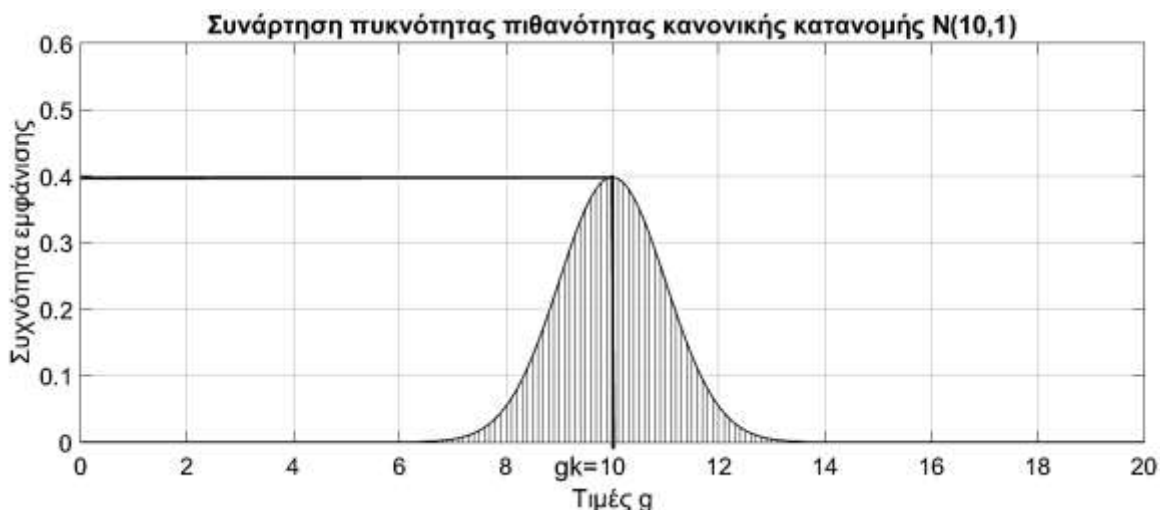
π : η γνωστή μαθηματική σταθερά ($\cong 3,14159$),

μ : ο μέσος του πληθυσμού,

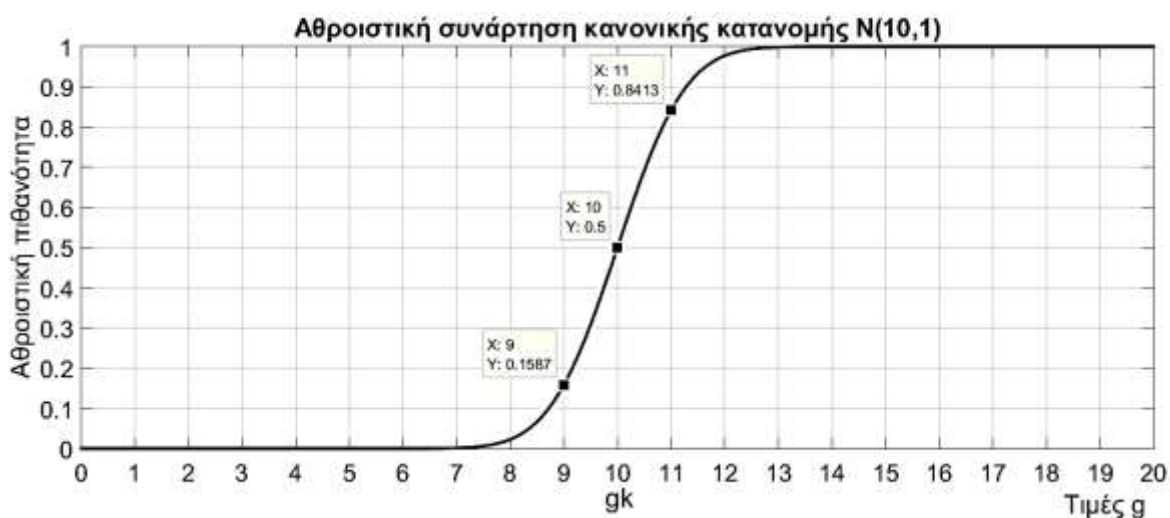
σ : η τυπική απόκλιση του πληθυσμού και

x : μια τιμή της συνεχούς τυχαιάς μεταβλητής στο διάστημα $-\infty$ έως $+\infty$.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση της κανονικής κατανομής του ίδιου βάρους g μιας δοκού με $g_k=10\text{kN/m}$ ανηγμένο φορτίο δοκού, οπότε $\text{mean}(g)=10\text{kN/m}$, $\text{std}(g)=1\text{kN/m}$.



Εικόνα 9: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ίδιου βάρους g



Εικόνα 10: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ίδιου βάρους g

Όπως είναι γνωστό, στο διάστημα $[\text{mean}-\text{std}, \text{mean}+\text{std}]$ δηλαδή μια τυπική απόκλιση εκατέρωθεν της μέσης τιμής μιας κανονικής κατανομής συγκεντρώνονται το $0.8413-0.1587 \approx 0.682$ ή 68,2% των παρατηρήσεων.

1.3.2 Ωφέλιμα φορτία

Τα ωφέλιμα φορτία προσομοιώνονται με ένα στοχαστικό πεδίο, όπου γίνεται η παραδοχή ότι ο τρόπος με τον οποίο φορτίζονται τα δάπεδα δεν μεταβάλλεται με τα χρόνια, ούτε γεωγραφικώς από περιοχή σε περιοχή. Διακρίνονται σε μόνιμα και πρόσκαιρα, με το άθροισμά τους να αποτελεί το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των ωφέλιμων φορτίων είναι 1) η χρήση του εκάστοτε χώρου (κατοικία, γραφείο, αποθήκη κλπ), 2) η διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της κατασκευής, κατά τη διάρκεια της οποίας θα γίνουν m εναλλαγές χρηστών. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο αριθμός m είναι σταθερός και προκύπτει λαμβάνοντας έναν σταθερό μέσο χρόνο παραμονής T του ενός χρήστη στην κατασκευή (π.χ. $T=5\div 8$ χρόνια), οπότε $m=[N/T]+1$ και επομένως η συνάρτηση κατανομής $F_{mx}(x)$ για m χρήστες δίνεται από την σχέση: $F_{mx}(x) = [F_x(x)]^m$, όπου $F_x(x)$ η συνάρτηση

κατανομής του ενός χρήστη. Οι χαρακτηριστικές τιμές σχεδιασμού για τα ωφέλιμα φορτία προέρχονται από την κατανομή των m χρηστών $F_{m\chi}(x)$

Η κατανομή των ωφέλιμων φορτίων προκύπτει ακροτάτων τύπου I (Gumbell) μεγίστων τιμών ανεξαρτήτως χρήσης, δηλαδή έχει:

Αθροιστική συνάρτηση κατανομής: $F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}}$

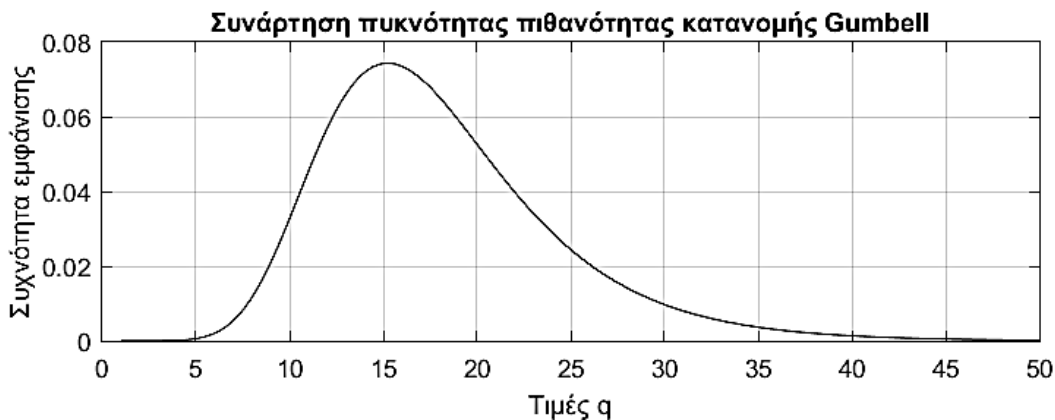
Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας: $f(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma} + e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}\right)}$

Όπου μ , σ οι παράμετροι της κατανομής ακροτάτων τύπου I που συνδέονται με τη μέση τιμή (mean) και την τυπική απόκλιση (std) ως εξής:

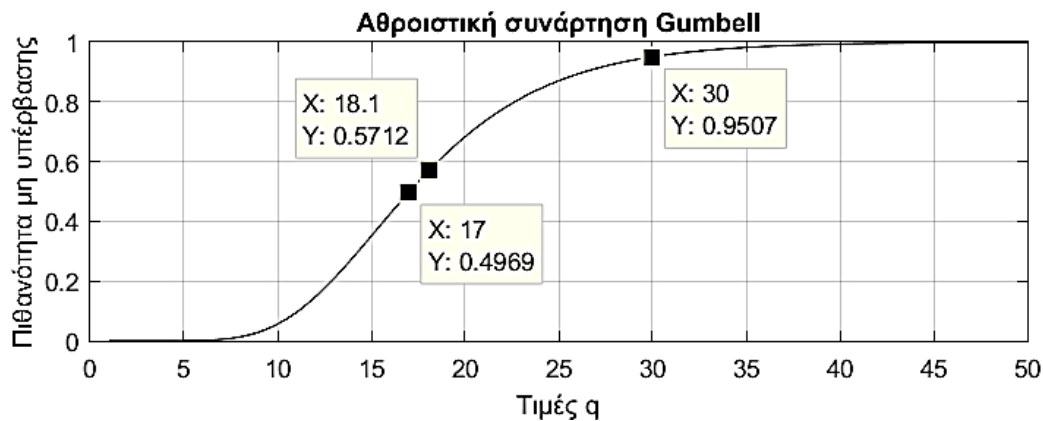
$$\text{std}(\chi) = \pi \cdot \sigma / \sqrt{6} \Rightarrow \sigma = \text{std}(\chi) \cdot \sqrt{6} / \pi$$

$\text{mean}(\chi) = \mu + \sigma \cdot \gamma \Rightarrow \mu = \text{mean}(\chi) - \sigma \cdot \gamma$, με $\gamma \cong 0.57721$ η σταθερά των Euler-Mascheroni

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής Gumbell του κινητού φορτίου q σε μια δοκό (έστω $q_k = 30 \text{ kN/m}$ ανηγμένο κινητό φορτίο δοκού). Θεωρώντας ότι η χαρακτηριστική τιμή q_k του κινητού φορτίου εκφράζει ποσοστιαίο 95%, δηλαδή $F(30) = 0.95$, και με την υπόθεση ότι $\text{COV}q = \text{std}/\text{mean} = 0.35$ επιλύουμε τις παραπάνω εξισώσεις και προκύπτει ($\mu = 15.23$ και $\sigma = 4.95$) ή ($\text{mean}(q) = 18.09$ και $\text{std}(q) = 6.35$)



Εικόνα 11: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κινητού φορτίου q



Εικόνα 12: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής κινητού φορτίου q

1.3.3 Αντοχές υλικών

Μια δοκός οπλισμένου σκυροδέματος αποτελείται από σκυρόδεμα και χάλυβα. Θεωρούμε συγκεκριμένα για το κάθε υλικό τα εξής:

Χάλυβας

Οι κατηγορίες χάλυβα είναι οι A, B και C και η χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής f_{yk} κυμαίνεται από 400 ως 600 MPa. Η 'πιθανότητα μη συμμόρφωσης' είναι 5% δηλαδή η τιμή f_{yk} πρέπει να αντιστοιχεί σε ποσοστμόριο 5% ή $F(f_{yk})=0.05$ (αν F η αθροιστική συνάρτηση του ορίου διαρροής του χάλυβα οπλισμού). Εύλογα μπορούμε να υποθέσουμε ότι η κατανομή που ακολουθεί το όριο διαρροής του χάλυβα είναι κανονική (η λογαριθμοκανονική), με συντελεστή μεταβλητότητας COV_{fy} , που αναμένεται να κυμαίνεται από 0.05 έως 0.10. Θυμόμαστε ακόμα ότι η απόσταση της μέσης τιμής από την τιμή που εκφράζει ποσοστμόριο 0.05 είναι $Z=1.6449$ τυπικές αποκλίσεις.

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία χάλυβα οπλισμού είναι η B500C (η οποία και χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια χωρίς άρση της γενικότητας), οπότε έχουμε:

Για $COV_{fy}=0.05$ έχουμε:

Μέση τιμή: $f_{ym}=f_{yk}/(1+Z\gamma*COV_{fy})$

$\Rightarrow f_{ym}=500/(1-1.6449*0.05)=544.8\text{MPa}$

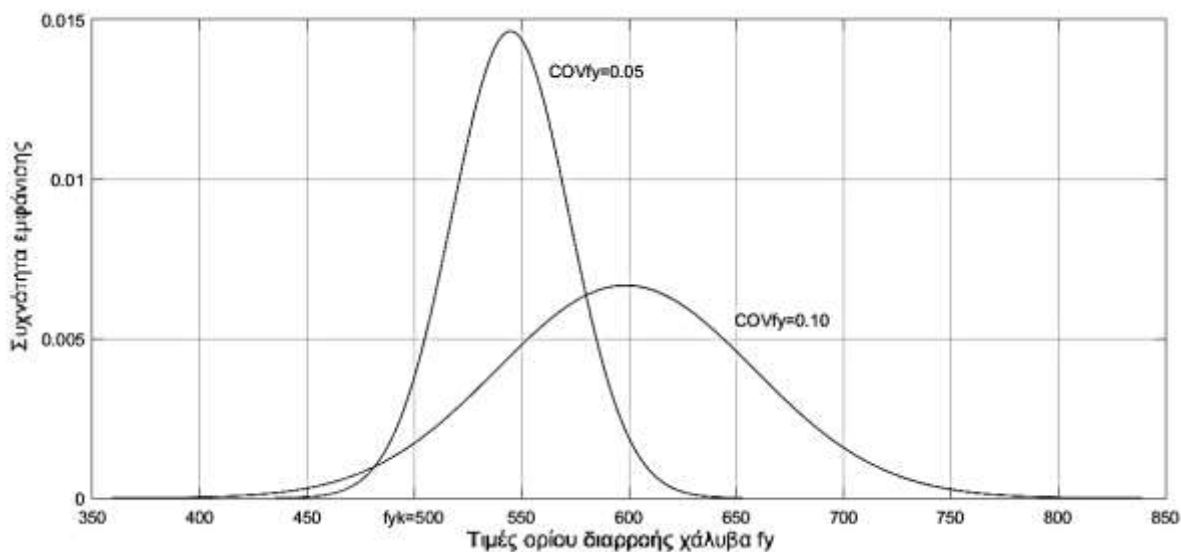
Τυπική απόκλιση: $\sigma_{fy}=f_{ym}*COV_{fy}=27\text{MPa}$

Για $COV_{fy}=0.10$ έχουμε:

Μέση τιμή: $f_{ym}=f_{yk}/(1+Z\gamma*COV_{fy})$

$\Rightarrow f_{ym}=500/(1-1.6449*0.10)=598.4\text{MPa}$

Τυπική απόκλιση: $\sigma_{fy}=f_{ym}*COV_{fy}=59.8\text{MPa}$



Εικόνα 13: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας χάλυβα ποιότητας B500C

Σκυρόδεμα

Τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης του σκυροδέματος διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία αντοχής του (C12/15 – C90/105), όμως για κατηγορίες έως και C50/60 η μέγιστη δυνατή παραμόρφωση είναι σταθερή $\epsilon_{cu2}(\%)=3.5$. Για το λόγο αυτό, θεωρούμε μια κατηγορία αντοχής στο διάστημα αυτό (στα επόμενα κεφάλαια θεωρούμε κατηγορία C30/37, χωρίς άρση της γενικότητας) και εξετάζουμε την κατανομή της αντοχής που αναμένουμε. Όπως και στην περίπτωση του χάλυβα, θεωρούμε πως η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή και πως η χαρακτηριστική τιμή της εκφράζει ποσοστμόριο 5%, δηλαδή $F(f_{ck})=0.05$, αν F η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της αντοχής του σκυροδέματος. Όσον αφορά το συντελεστή μεταβλητότητας, ως ανώτατο όριο μπορεί να θεωρηθεί η τιμή $COV_{fy_{max}}=0.20$, και αντίστοιχα ως κατώτατο η τιμή

$COVf_{y_{\min}}=0.10$. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές της αντοχής του σκυροδέματος για τις δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις.

Για $COVfc=0.10$ έχουμε:

Μέση τιμή: $f_{cm}=f_{ck}/(1+Z_c*COVfc)$

$\Rightarrow f_{cm}=30/(1-1.6449*0.10)=35.9\text{MPa}$

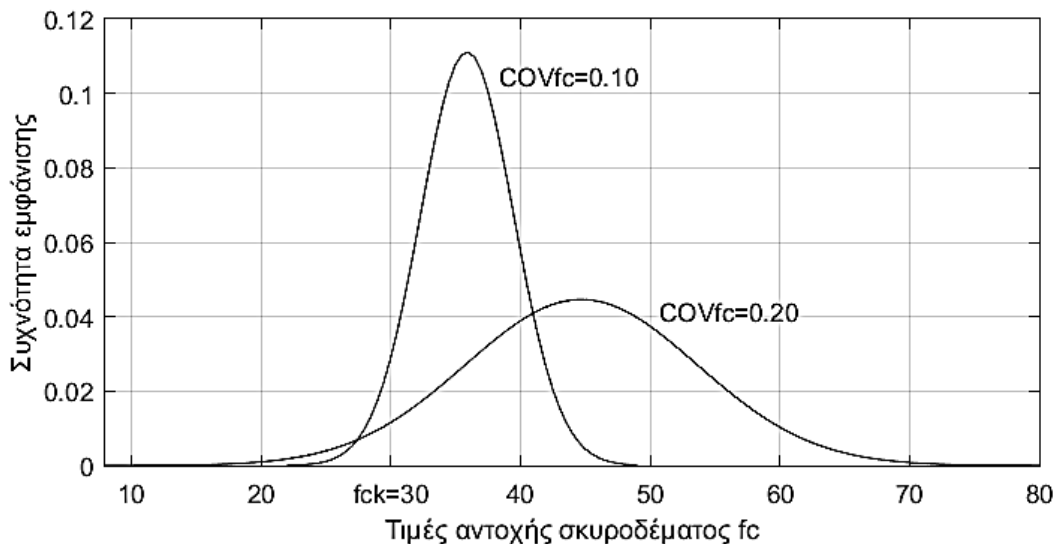
Τυπική απόκλιση: $\sigma_{fc}=f_{cm}*COVfc=3.6\text{MPa}$

Για $COVfc=0.20$ έχουμε:

Μέση τιμή: $f_{cm}=f_{ck}/(1+Z_c*COVfc)$

$\Rightarrow f_{cm}=30/(1-1.6449*0.20)=44.7\text{MPa}$

Τυπική απόκλιση: $\sigma_{fc}=f_{cm}*COVfc=8.9\text{MPa}$



Εικόνα 14: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας σκυροδέματος ποιότητας C30/37

1.3.4 Συντελεστές αβεβαιότητας προσομοιωμάτων

Προκειμένου να υπολογιστεί η απόκριση μιας κατασκευής με συγκεκριμένες (τυχαίου χαρακτήρα) ιδιότητες υπό την επίδραση συγκεκριμένων (τυχαίου χαρακτήρα) δράσεων, χρησιμοποιούνται κάποια προσομοιώματα. Ένα τέτοιο προσομοίωμα (π.χ η γραμμική θεωρία ελαστικής ευστάθειας), που λαμβάνει υπόψη του τις βασικές μεταβλητές $X=(X_1,X_2,\dots,X_n)$ και υπολογίζει την απόκριση της κατασκευής g , μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: $g = f(X_1,X_2,\dots,X_n)$.

Ωστόσο, το κάθε προσομοίωμα f υπολογίζει την απόκριση g με κάποιες παραδοχές, γεγονός που καθιστά το αποτέλεσμα μια προσέγγιση και όχι μια ακριβή λύση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό, η διατύπωση της σχέσης υπολογισμού της πραγματικής απόκρισης g' μετατρέπεται ως εξής:

$$g' = f(X_1,X_2,\dots,X_n,\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_n).$$

Όπου θ_i συμβολίζονται οι τυχαίες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ως παράμετροι για να λάβουν υπόψη τις αβεβαιότητες των προσομοιωμάτων. Τέτοιες αβεβαιότητες είναι οι τυχαίες δράσεις που παραλείπονται (στο προσομοίωμα δράσεων), απλοποιήσεις στις μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν τη σύνδεση των βασικών μεταβλητών (όπως οι θεωρίες υπολογισμού των αντοχών, αγνόηση φαινομένων μεγαλύτερων τάξεων) κλπ.

Ίδανικά, οι τιμές των συντελεστών θ_i θα πρέπει να προκύπτουν από μια σειρά πειραμάτων. Αν ο αριθμός των πειραμάτων είναι επαρκής και οι μετρήσεις των τιμών των βασικών μεταβλητών X_i και του αποτελέσματος g' εξάγονται με ικανοποιητική ακρίβεια, υπολογίζοντας την διαφοροποίηση της εκτιμώμενης απόκρισης g με το αποτέλεσμα g' , μπορούν να εκτιμηθούν οι διορθωτικές παράμετροι θ_i . Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι εφικτή η διεξαγωγή τέτοιων πειραμάτων, η εκτίμηση των στατιστικών ιδιοτήτων των τυχαίων μεταβλητών θ_i έγκειται στην κρίση του μηχανικού, με τη παραμετρική διερεύνηση των ιδιοτήτων αυτών να αποτελεί το πιο ασφαλές κριτήριο επιλογής τους.

Οι συντελεστές θ_i δύνανται να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους οι οποίοι επηρεάζουν τις ιδιότητες τους, όπως για παράδειγμα να σχετιστεί κάθε τυχαία βασική μεταβλητή X_i με έναν συντελεστή αβεβαιότητας θ_i . Ένας άλλος αρκετά διαδεδομένος τρόπος εισαγωγής των θ_i είναι συσχετίζοντάς τους με τα προσομοιώματα αντοχών και δράσεων συνολικά. Στα επόμενα κεφάλαια εισάγονται οι συντελεστές αβεβαιότητας με τον τρόπο αυτό, δηλαδή χρησιμοποιούνται οι δύο συντελεστές θ_R και θ_E ως εξής:

$$\mathbf{g} = \theta_R * \mathbf{R} - \theta_E * \mathbf{E},$$

όπου,

θ_R : συντελεστής προσομοιώματος αντίστασης

θ_E : συντελεστής προσομοιώματος δράσεων

R: η τυχαία μεταβλητή της αντίστασης

E: η τυχαία μεταβλητή των δράσεων

Οι κατανομές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για τις μεταβλητές θ_R, θ_E είναι λογαριθμοκανονικές (που όμως προκύπτουν όμοιες με κανονικές) με μέση τιμή 1, αφού θεωρούμε πως τα προσομοιώματα δεν αποκλίνουν συστηματικά από την πραγματικότητα και η τυπική απόκλιση λαμβάνεται (σύμφωνα με τον οργανισμό JCSS):

$$\text{std}(\theta_R) = 0.07$$

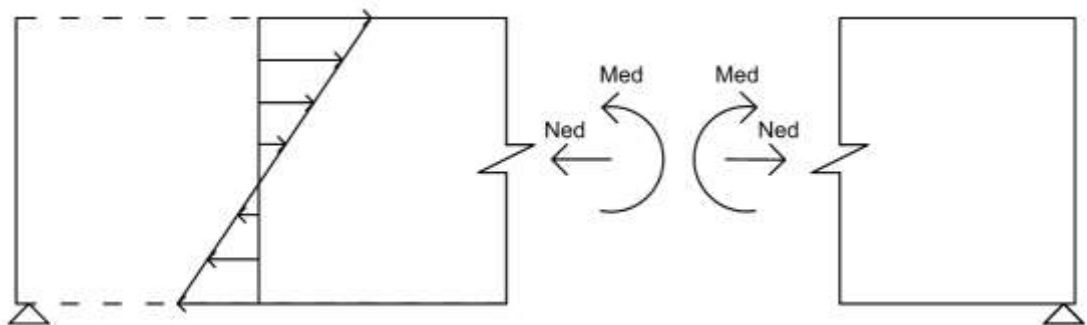
$$\text{std}(\theta_E) = 0.10$$

2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ

2.1 Εισαγωγή

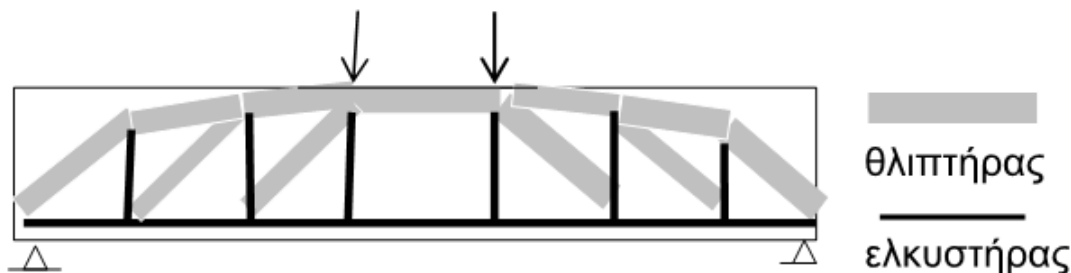
Σε μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούμενη από σκυρόδεμα και χάλυβα, θεωρώντας γνωστές τις κατανομές της αντοχής των υλικών αυτών, μπορούμε να περιγράψουμε την κατανομή της αντίστασης που αναμένουμε στη διατομή μέσω των σχέσεων με τις οποίες σκυρόδεμα και χάλυβας αλληλεπιδρούν.

- 1) Για τους ραβδόμορφους φορείς ισχύει με μεγάλη ακρίβεια (μέχρι την αστοχία) η παραδοχή του Bernoulli περί επιπεδότητας μιας διατομής (Εικόνα 15), η οποία μας διευκολύνει διότι γνωρίζοντας μόνον δύο τιμές από τις ανηγμένες παραμορφώσεις καθ ύψος μιας διατομής, μπορούμε να υπολογίσουμε τις ανηγμένες παραμορφώσεις σε κάθε σημείο της διατομής (και άρα τις τάσεις καθ ύψος της διατομής από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε τα εσωτερικώς αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη). Για το λόγο αυτό, **η αντίσταση μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος υπό ορθή ένταση** (Κεφάλαιο 2.2 Στοιχεία υπο ορθή ένταση) υπολογίζεται με τη μέθοδο αυτή, όπου για το σκυρόδεμα θεωρούμε ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων και αγνοούμε πλήρως την εφελκυστική του αντοχή (Εικόνα 17: Παραμορφώσεις και τάσεις δίπλα οπλισμένης διατομής οπλισμένου σκυροδέματος).



Εικόνα 15: Ορθές παραμορφώσεις και τάσεις με τη θεωρία του Bernoulli

- 2) Ωστόσο, σε περιοχές συγκεντρωμένων δυνάμεων καθώς και σε κάθε είδους διαταραχές, δηλαδή περιοχές ασυνέχειας (D-regions) σύμφωνα με τους Schlaich et al ("Toward a consistent design of structural concrete", PCI journal V.32, No. 2, pp. 72-150), εφαρμόζεται η μέθοδος « θλιπτήρα – ελκυστήρα» (Εικόνα 16: Προσομοίωμα θλιπτήρα – ελκυστήρα σε αμφιέρειστη δοκό), σε αντιδιαστολή με τις υπόλοιπες περιοχές στις οποίες ισχύει η παραδοχή της επιπεδότητας (Bernoulli ή Beam regions, B-regions). Η μέθοδος είναι απλή στην εφαρμογή της όπου η ένταση ενός περίπλοκου δομικού στοιχείου υποκαθίσταται από ένα απλοποιημένο δικτύωμα, του οποίου οι θλιβόμενες ράβδοι είναι οι θλιπτήρες από σκυρόδεμα και οι εφελκυσόμενες ράβδοι είναι οι ελκυστήρες από ράβδους χάλυβα. Και τέλος βέβαια, δεν πρέπει να ξεχάσουμε τους «κόμβους» (από σκυρόδεμα) στις περιοχές εκείνες όπου συναντιούνται οι ράβδοι του δικτυώματος. **Η αντίσταση της διατομής υπό διατμητική ένταση υπολογίζεται με τη μέθοδο αυτή (Κεφάλαιο 2.3 Στοιχεία υπό διατμητική ένταση).**



Εικόνα 16: Προσομοίωμα θλιπτήρα – ελκυστήρα σε αμφιέρειστη δοκό

Προσομοιώσεις:

Ακολουθώντας τη μέθοδο των προσομοιώσεων (Monte Carlo) που αναπτύχθηκε, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κατασκευή των δειγμάτων ώστε αυτά να εκφράζουν την πραγματική φύση του φαινομένου που καλούμαστε να αναλύσουμε. Συγκεκριμένα, στην διερεύνηση της αντίστασης μιας διατομής, πρέπει να ελεγχθεί ο βαθμός συσχέτισης των εμπλεκόμενων παραμέτρων – αντοχών:

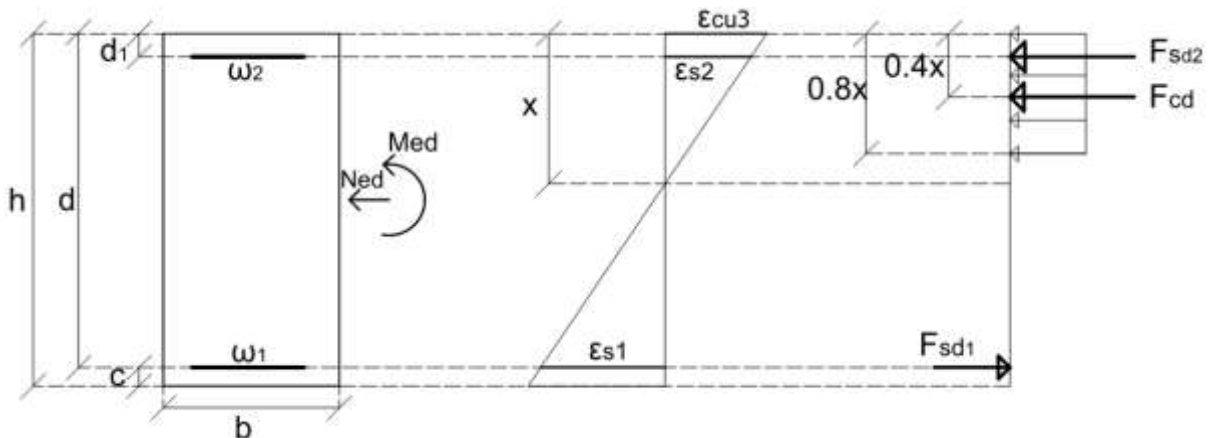
Συσχέτιση δειγμάτων f_{y1}, f_{y2}, f_c :

Όσον αφορά την ανάλυση της **ορθής αντίστασης**, μπορούμε να υποθέσουμε πως τα δύο δείγματα f_{y1}, f_{y2} (αντοχές πάνω και κάτω οπλισμού) είναι: **1) ασυσχέτιστα**, με την λογική πως οι οπλισμοί μεταξύ τους ενδέχεται να μην προέρχονται από την ίδια παρτίδα ή το ίδιο εργοστάσιο και πως οι συνθήκες σκυροδέτησης δεν είναι όμοιες για τις δύο αυτές θέσεις, **2) συσχετισμένα**, με κάποιο βαθμό συσχέτισης, με την λογική πως οι οπλισμοί μεταξύ τους ενδέχεται να προέρχονται από την ίδια παρτίδα και πως οι συνθήκες μεταφοράς τοποθέτησης κλπ είναι ίδιες. Για τη συσχέτισή τους με το δείγμα της αντοχής του σκυροδέματος f_c , εύλογα υποθέτουμε μηδενικό βαθμό συσχέτισης. Οι υποθέσεις 1, 2 εξετάζονται στο Κεφάλαιο 2.2 Στοιχεία υπο ορθή ένταση.

Όσον αφορά την ανάλυση της **διατμητικής αντίστασης**, αυτή αναλύεται σε αντοχή συνδετήρων VR,s με πιθανότητα αστοχίας p_{fy} και αντοχή λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος VR,max με πιθανότητα αστοχίας p_{fc} , που τα χειριζόμαστε ως δύο ανεξάρτητα φαινόμενα, με ανεξάρτητα δείγματα (Κεφάλαιο 2.3 Στοιχεία υπό διατμητική ένταση). Αφού όμως για την αστοχία αρκεί μια εκ των δύο μορφών (συνδετήρες/ λοξοί θλιπτήρες) η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας θα υπολογιστεί ως εξής:

$$p_f = 1 - (1 - p_{fy})(1 - p_{fc}).$$

2.2 Στοιχεία υπο ορθή ένταση



Εικόνα 17: Παραμορφώσεις και τάσεις διπλά οπλισμένης διατομής οπλισμένου σκυροδέματος

Κατά το σχεδιασμό μιας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος που καταπονείται από τις ορθές δράσεις αξονικής δύναμης N_{ed} και καμπτικής ροπής M_{ed} , επιλύοντας τις εξισώσεις ισοδυναμίας έχουμε:

$$N_{Rd} = F_{sd1} - F_{sd2} - F_{cd} \Rightarrow N = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - 0.8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} \Rightarrow$$

$$\frac{N_{Rd}}{bdf_{cd}} = \frac{\omega_1 b d f_{cd}}{bdf_{cd} f_{yd}} \min \left\{ f_{yd}, f_{yd} \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right\} - \frac{\omega_2 b d f_{cd}}{bdf_{cd} f_{yd}} \min \left\{ f_{yd}, f_{yd} \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{d_1}{d} \right) \right\} - \frac{0.8 x b f_{cd}}{bdf_{cd}}$$

οπότε:

$$\Rightarrow v_{Rd} = \omega_1 \cdot \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right\} - \omega_2 \cdot \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{d_1}{d} \right) \right\} - 0.8 \xi$$

Εξίσωση 1: Ανηγμένη αξονική δύναμη αντοχής σχεδιασμού

Ομοίως για την ροπή σχεδιασμού M_{ed} έχουμε:

$$M_{Rd} = F_{sd1} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + F_{sd2} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) - F_{cd} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0.4x \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{cd}} = \frac{F_{sd1}}{bd^2 f_{cd}} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) + \frac{F_{sd2}}{bd^2 f_{cd}} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_1 \right) - \frac{F_{cd}}{bd^2 f_{cd}} \cdot \left(\frac{h}{2} - 0.4x \right)$$

$$\Rightarrow \frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{cd}} = \frac{F_{sd1}}{bdf_{cd}} \cdot \left(0.5 \frac{h}{d} - \frac{d_1}{d} \right) + \frac{F_{sd2}}{bdf_{cd}} \cdot \left(0.5 \frac{h}{d} - \frac{d_1}{d} \right) - \frac{F_{cd}}{bdf_{cd}} \cdot \left(0.5 \frac{h}{d} - 0.4\xi \right)$$

$$\Rightarrow \frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{cd}} = \left(\frac{F_{sd1}}{bdf_{cd}} + \frac{F_{sd2}}{bdf_{cd}} \right) \cdot \left(\frac{0.5d + 0.5d_1 - d_1}{d} \right) - \frac{F_{cd}}{bdf_{cd}} \cdot \left(\frac{0.5d + 0.5d_1}{d} - 0.4\xi \right)$$

$$\begin{aligned} \mu_{Rd} = & \omega_1 \cdot \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right\} \cdot \left(0.5 - 0.5 \frac{d_1}{d} \right) + \omega_2 \cdot \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{d_1}{d} \right) \right\} \cdot \left(0.5 - 0.5 \frac{d_1}{d} \right) \\ & + 0.8 \xi \cdot \left(0.5 + 0.5 \frac{d_1}{d} - 0.4\xi \right) \end{aligned}$$

Εξίσωση 2: Ανηγμένη ροπή αντοχής σχεδιασμού

Θέλοντας να εκφράσουμε τις εξισώσεις ισοδυναμίας ως προς τα δρώντα μεγέθη (και όχι τα μεγέθη σχεδιασμού) θεωρώντας ως τυχαίες μεταβλητές το όριο διαρροής του χάλυβα f_y και την αντοχή του

σκυροδέματος f_c , τα μεγέθη αξονικής δύναμης και ροπής θα είναι και αυτά τυχαίες μεταβλητές και οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$\Rightarrow v_R = \omega_1 \frac{f_{y1}}{f_{yd}} * \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right\} - \omega_2 \frac{f_{y2}}{f_{yd}} * \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{d_1}{d} \right) \right\} - 0.8 \frac{f_c}{f_{cd}} \xi$$

Εξίσωση 3: Ανηγμένη αξονική δύναμη αντοχής

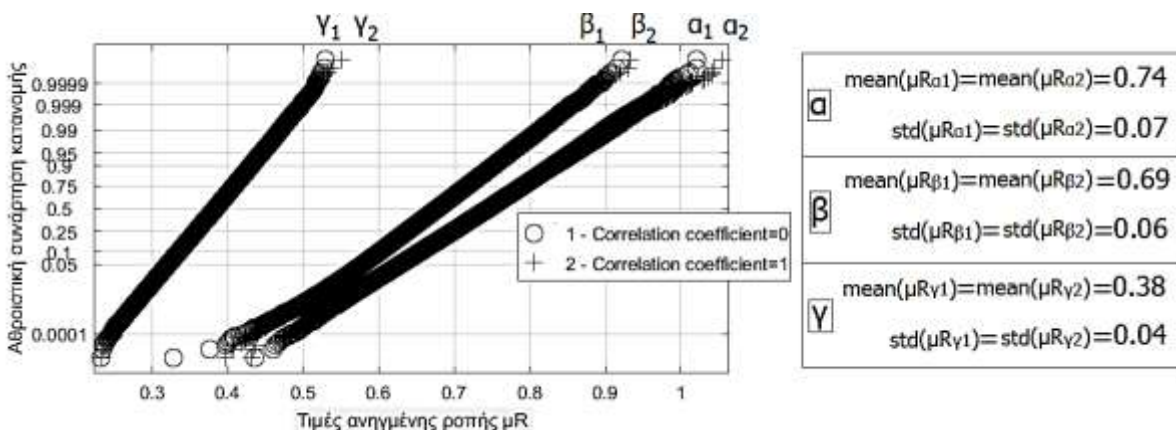
$$\mu_R = \omega_1 \frac{f_{y1}}{f_{yd}} * \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \right\} * \left(0.5 - 0.5 \frac{d_1}{d} \right) + \omega_2 \frac{f_{y2}}{f_{yd}} * \min \left\{ 1, \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{sy}} \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{d_1}{d} \right) \right\} * \left(0.5 - 0.5 \frac{d_1}{d} \right) + 0.8 \frac{f_c}{f_{cd}} \xi * \left(0.5 + 0.5 \frac{d_1}{d} - 0.4 \xi \right)$$

Εξίσωση 4: Ανηγμένη ροπή αντοχής

Από τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται αντιληπτό πως για μια δεδομένη αξονική δύναμη v που δρα σε μια διατομή, η καμπτική ροπή είναι μια συνάρτηση των βασικών μεταβλητών των αντοχών των υλικών f_y , f_c , του μεγέθους d_1/d και των ποσοστών οπλισμού ω_1 , ω_2 .

Για το ζήτημα της συσχέτισης των δειγμάτων f_{y1} , f_{y2} έγινε η εξής ανάλυση:

Διεξάγονται προσομοιώσεις (100000) για τον υπολογισμό της ανηγμένης ροπής αντοχής δοκού ($v=0$, για διάφορα ποσοστά οπλισμών ω_1 , ω_2 με $d_1/d=0.10$, $COV_{fy}=0.10$, $COV_{fc}=0.15$) 1) με ασυσχέτιστα δείγματα f_{y1} , f_{y2} (correlation coefficient=0) και 2) με πλήρως συσχετισμένα δείγματα f_{y1} , f_{y2} για τις τιμές του ορίου διαρροής εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού (correlation coefficient=1). Τα τρία παραδείγματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 18: Δείγματα ανηγμένης ροπής αντοχής δοκού μ_R είναι: α) $\omega_1=0.6$, $\omega_2=0.3$, β) $\omega_1=0.6$, $\omega_2=0.05$ και γ) $\omega_1=0.3$, $\omega_2=0.6$. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα δείγματα μ_R για τις περιπτώσεις 1, 2 σε κάθε περίπτωση α, β, γ προκύπτουν όμοια (ίσες μέσες τιμές μ_{μ_R} και τυπικές αποκλίσεις σ_{μ_R}) και ακολουθούν την κανονική κατανομή (αφού η αθροιστική τους συνάρτηση κατανομής προκύπτει ευθεία σε τροποποιημένους άξονες). Συνεπώς δεν απαιτείται να εξετασθούν διαφορετικά οι υποθέσεις 1 και 2 περί συσχέτισης δειγμάτων όσον αφορά την ροπή αντοχής δοκού και για την οποία θα θεωρούμε ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή.



Εικόνα 18: Δείγματα ανηγμένης ροπής αντοχής δοκού μ_R

2.2.1 Δοκοί (αξονική $v=0$)

Η παραμετρική διερεύνηση που διεξάγεται για τις δοκούς αφορά τα μεγέθη f_y , f_c και d_1/d και συγκεκριμένα τους όρους $COV_{f_y} = \begin{cases} 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$, $COV_{f_c} = \begin{cases} 0.20 \\ 0.10 \end{cases}$, $d_1/d = \begin{cases} 0.15 \\ 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$. Η διερεύνηση γίνεται για διαφορές

τιμές ποσοστών οπλισμού ω_1 , ω_2 (ω_1 : οπλισμός σε εφελκυσμό, ω_2 : οπλισμός σε θλιψη) και για κάθε περίπτωση, υπολογίστηκαν 100000 προσομοιώσεις βάσει των οποίων εκτιμούνται οι παράμετροι της κατανομής της ροπής αντοχής μR (Εξίσωση 4: Ανηγμένη ροπή αντοχής).

$d_1/d=0.10$, $COV_{f_y}=0.10$, ω_1 : οπλισμός σε εφελκυσμό, ω_2 : οπλισμός σε θλιψη

Πίνακας 2: mean(μR)

$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
		0.05	COV $_{f_c}=0.1$ 0,070	0,134	0,258	0,376	0,487	0,588
0.10	COV $_{f_c}=0.2$ 0,072	0,072	0,135	0,260	0,382	0,496	0,604	0,703
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,071	0,071	0,134	0,258	0,379	0,495	0,600	0,697
0.20	COV $_{f_c}=0.2$ 0,073	0,073	0,136	0,261	0,383	0,501	0,613	0,716
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,071	0,071	0,134	0,258	0,381	0,502	0,617	0,724
0.30	COV $_{f_c}=0.2$ 0,073	0,073	0,136	0,261	0,385	0,506	0,624	0,735
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,072	0,072	0,134	0,258	0,382	0,504	0,625	0,740
0.40	COV $_{f_c}=0.2$ 0,074	0,074	0,136	0,261	0,385	0,508	0,629	0,747
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,072	0,072	0,134	0,258	0,382	0,505	0,628	0,748
0.50	COV $_{f_c}=0.2$ 0,074	0,074	0,136	0,261	0,385	0,508	0,630	0,752
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,072	0,072	0,134	0,258	0,382	0,506	0,629	0,751
0.60	COV $_{f_c}=0.2$ 0,074	0,074	0,136	0,261	0,385	0,508	0,632	0,754
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,072	0,072	0,134	0,258	0,382	0,506	0,629	0,752
	COV $_{f_c}=0.2$ 0,074	0,074	0,136	0,261	0,385	0,508	0,632	0,755
	COV $_{f_c}=0.1$ 0,072	0,072	0,134	0,258	0,382	0,506	0,629	0,752

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακας 2: mean(μR), παρατηρούμε πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος (για τις δύο ακραίες τιμές $COV_{f_c}=0.10$ και 0.20) δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της μέσης τιμής της ανηγμένης ροπής αντοχής μR , με τη μεγαλύτερη επιρροή να εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει αρκετός θλιβόμενος οπλισμός (λογικό αφού τότε το ακυρόδεμα αναλαμβάνει μεγάλο ποσοστό της θλιπτικής εσωτερικής δύναμης), και συγκεκριμένα στην περίπτωση του (ελάχιστου) θλιβόμενου οπλισμού $\omega_2=0.05$ και του (πολύ) εφελκυσμένου $\omega_1=0.6$ όπου η διαφοροποίηση μεταξύ των περιπτώσεων $COV_{f_c}=0.10$ και $COV_{f_c}=0.20$ είναι αισθητή (αλλα παραμένει μικρή).

Πίνακας 3: std(μR)

$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05	COVfc=0.1	0,006	0,013	0,024	0,035	0,043	0,049	0,055
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,036	0,046	0,055	0,065
0.10	COVfc=0.1	0,006	0,013	0,025	0,036	0,045	0,051	0,057
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,036	0,047	0,056	0,065
0.20	COVfc=0.1	0,006	0,012	0,025	0,037	0,048	0,057	0,062
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,037	0,048	0,058	0,067
0.30	COVfc=0.1	0,006	0,013	0,025	0,037	0,049	0,059	0,067
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,037	0,049	0,060	0,070
0.40	COVfc=0.1	0,007	0,013	0,025	0,037	0,049	0,061	0,071
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,037	0,049	0,061	0,072
0.50	COVfc=0.1	0,007	0,013	0,025	0,037	0,049	0,061	0,073
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,037	0,049	0,062	0,073
0.60	COVfc=0.1	0,007	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,073
	COVfc=0.2	0,007	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,074

Ομοίως η τυπική απόκλιση της ανηγμένης ροπής αντοχής μR που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3: std(μR), δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη μεταβολή της μεταβλητότητας του σκυροδέματος COVfc με εξαίρεση την περίπτωση του (ελάχιστου) θλιβόμενου οπλισμού $\omega_2=0.05$ και του (πολύ) εφελκυσμένου $\omega_1=0.6$ όπου η διαφοροποίηση μεταξύ των περιπτώσεων COVfc=0.10 και COVfc=0.20 είναι και εδώ αισθητή (αλλά παραμένει μικρή).

Το εύλογο ερώτημα που εγείρεται είναι κατά πόσο απέχει η μέση τιμή με την τιμή σχεδιασμού σε κάθε περίπτωση των ποσοστών οπλισμού ω_1 , ω_2 δηλαδή ‘με πόση ασφάλεια σχεδιάζουμε’. Υπενθυμίζεται πως η ροπή σχεδιασμού μιας δοκού υπολογίζεται από την Εξίσωση 1 (με $\nu=0$) και την Εξίσωση 2 και προκύπτει:

Πίνακας 4: mean(MR)/MRd

$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05	COV _{fc} =0.1	1,423	1,406	1,407	1,426	1,456	1,490	1,590
	COV _{fc} =0.2	1,452	1,423	1,421	1,445	1,484	1,528	1,643
0.10	COV _{fc} =0.1	1,432	1,408	1,399	1,406	1,432	1,462	1,495
	COV _{fc} =0.2	1,466	1,427	1,413	1,419	1,450	1,490	1,535
0.20	COV _{fc} =0.1	1,437	1,410	1,397	1,392	1,395	1,418	1,445
	COV _{fc} =0.2	1,478	1,433	1,409	1,404	1,407	1,432	1,468
0.30	COV _{fc} =0.1	1,440	1,411	1,395	1,390	1,389	1,389	1,409
	COV _{fc} =0.2	1,483	1,433	1,408	1,400	1,397	1,399	1,421
0.40	COV _{fc} =0.1	1,441	1,412	1,395	1,390	1,387	1,386	1,385
	COV _{fc} =0.2	1,485	1,435	1,408	1,399	1,395	1,393	1,393
0.50	COV _{fc} =0.1	1,443	1,412	1,396	1,389	1,386	1,385	1,384
	COV _{fc} =0.2	1,487	1,436	1,408	1,399	1,394	1,391	1,390
0.60	COV _{fc} =0.1	1,443	1,411	1,395	1,389	1,386	1,384	1,384
	COV _{fc} =0.2	1,489	1,436	1,408	1,399	1,393	1,390	1,388

Οι τιμές του Πίνακας 4: mean(MR)/MRd δείχνουν το λόγο της μέσης ροπής αντοχής με την ροπή σχεδιασμού και κυμαίνονται από 1.38 έως 1.60, αλλά αν προσέξουμε τις τιμές των περιπτώσεων όπου $\omega_{min}/\omega_{max} \geq 0.5$ παρατηρούμε ότι το σύνηθες εύρος είναι περιορισμένο και κυμαίνεται από 1.38 έως 1.42, δηλαδή $1.38 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.42$ ή απλοποιητικά $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \approx 1.40$.

Αντίστοιχα υπολογίζεται και το μέγεθος $\text{std}(\mu\text{R})/\text{MRd}$ στον Πίνακα 5: $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$, και αν επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στις περιπτώσεις όπου $\omega_{min}/\omega_{max} \geq 0.5$ παρατηρούμε πως το σύνηθες εύρος είναι από 0.130 έως 0.135, δηλαδή $0.130 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.135$ ή απλοποιητικά $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \approx 0.133$

Πίνακας 5: $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$

$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
		0.05	COVfc=0.1	0,130	0,132	0,131	0,130	0,127
0.10	COVfc=0.2	0,134	0,133	0,134	0,135	0,136	0,140	0,152
	COVfc=0.1	0,130	0,130	0,130	0,129	0,128	0,123	0,121
0.20	COVfc=0.2	0,135	0,133	0,130	0,133	0,134	0,135	0,138
	COVfc=0.1	0,131	0,130	0,129	0,129	0,128	0,126	0,121
0.30	COVfc=0.2	0,137	0,132	0,131	0,131	0,130	0,131	0,131
	COVfc=0.1	0,132	0,130	0,130	0,130	0,128	0,128	0,125
0.40	COVfc=0.2	0,139	0,133	0,131	0,130	0,129	0,129	0,129
	COVfc=0.1	0,133	0,130	0,130	0,130	0,129	0,128	0,127
0.50	COVfc=0.2	0,141	0,133	0,131	0,130	0,129	0,129	0,129
	COVfc=0.1	0,135	0,130	0,130	0,130	0,130	0,129	0,129
0.60	COVfc=0.2	0,143	0,133	0,131	0,130	0,130	0,130	0,128
	COVfc=0.1	0,137	0,131	0,130	0,130	0,130	0,129	0,129
	COVfc=0.2	0,145	0,133	0,131	0,131	0,129	0,130	0,129
	COVfc=0.1							

Συμπεράσματα για την περίπτωση $\{d_1/d=0.10, \text{COVfy}=0.10\}$ που όμως γενικεύονται για τις δοκούς:

- 1) Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COVfc δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της ροπής αντοχής μιας δοκού ειδικά όταν ενδιαφερόμαστε για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται πλαστιμότητα και υπάρχει εκτός του εφελκυσμένου, σημαντικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού. Κατά συνέπεια, στις διερευνήσεις που ακολουθούν εξετάζεται μόνο μια τιμή μεταβλητότητας σκυροδέματος, (ο μέσος των δύο ακραίων) COVfc=0.15.
- 2) Φαίνεται πως αν ενδιαφερόμαστε για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις, είναι εφικτή μια ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων που ολοκληρώνεται με την πλήρη διερεύνηση των παραμέτρων COVfy και d_1/d .

Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται στη συνέχεια οι 4 πίνακες $\text{mean}(\mu R)$, $\text{std}(\mu R)$, $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$, $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$ για κάθε περίπτωση: $\text{COVfc}=0.15$, $\text{COVfy}=\begin{cases} 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$, $d_1/d=\begin{cases} 0.15 \\ 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$.

A) $\frac{d_1}{d} = 0.05$

Πίνακας 6: mean(μ_R)

		$\frac{d_1}{d} = 0.05$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.10		0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
0.20		0,262	0,264	0,264	0,264	0,265	0,265	0,264	0,239	0,240	0,241	0,241	0,241	0,241	0,241
0.30		0,383	0,389	0,394	0,395	0,395	0,395	0,395	0,351	0,356	0,359	0,360	0,360	0,360	0,360
0.40		0,496	0,506	0,519	0,524	0,526	0,526	0,526	0,456	0,464	0,475	0,478	0,479	0,479	0,479
0.50		0,600	0,614	0,636	0,650	0,654	0,656	0,656	0,554	0,565	0,583	0,593	0,597	0,597	0,598
0.60		0,695	0,714	0,744	0,766	0,779	0,785	0,786	0,644	0,659	0,684	0,702	0,712	0,715	0,716

Πίνακας 7: std(μ_R)

		$\frac{d_1}{d} = 0.05$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
0.10		0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
0.20		0,025	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
0.30		0,036	0,036	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,017	0,017	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
0.40		0,044	0,046	0,049	0,051	0,052	0,052	0,052	0,021	0,022	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024
0.50		0,052	0,053	0,057	0,061	0,064	0,065	0,065	0,026	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,030
0.60		0,059	0,061	0,064	0,069	0,073	0,077	0,078	0,032	0,031	0,031	0,032	0,034	0,035	0,035

Πίνακας 8: $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$

		$\frac{d1}{d}=0.05$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,396	1,397	1,399	1,399	1,399	1,399	1,398	1,275	1,277	1,278	1,279	1,279	1,279	1,278
0.10		1,390	1,388	1,387	1,389	1,387	1,389	1,388	1,269	1,267	1,267	1,267	1,267	1,267	1,266
0.20		1,406	1,388	1,383	1,382	1,383	1,383	1,383	1,285	1,266	1,261	1,260	1,260	1,259	1,260
0.30		1,436	1,413	1,382	1,381	1,381	1,380	1,380	1,317	1,292	1,261	1,258	1,258	1,258	1,258
0.40		1,471	1,443	1,402	1,380	1,381	1,380	1,379	1,352	1,323	1,282	1,258	1,257	1,256	1,256
0.50		1,509	1,475	1,427	1,396	1,378	1,378	1,379	1,393	1,358	1,308	1,276	1,256	1,256	1,256
0.60		1,616	1,514	1,457	1,416	1,390	1,377	1,377	1,498	1,398	1,339	1,298	1,271	1,255	1,255

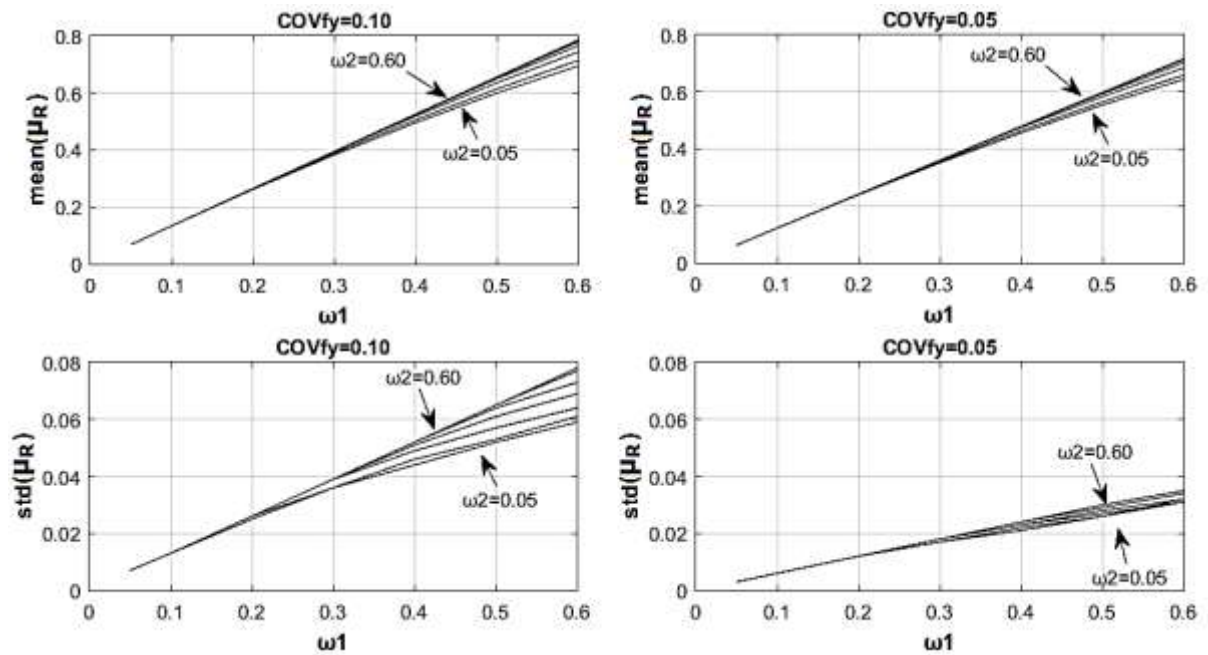
Πίνακας 9: $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$

		$\frac{d1}{d}=0.05$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.10		0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.20		0,135	0,135	0,136	0,137	0,137	0,137	0,137	0,062	0,062	0,062	0,062	0,063	0,062	0,062
0.30		0,133	0,132	0,135	0,136	0,137	0,137	0,137	0,062	0,062	0,062	0,062	0,063	0,062	0,062
0.40		0,131	0,131	0,132	0,134	0,136	0,137	0,137	0,063	0,061	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062
0.50		0,132	0,129	0,128	0,131	0,135	0,136	0,137	0,066	0,063	0,060	0,061	0,062	0,062	0,062
0.60		0,138	0,128	0,125	0,127	0,131	0,135	0,137	0,073	0,065	0,060	0,059	0,061	0,062	0,062

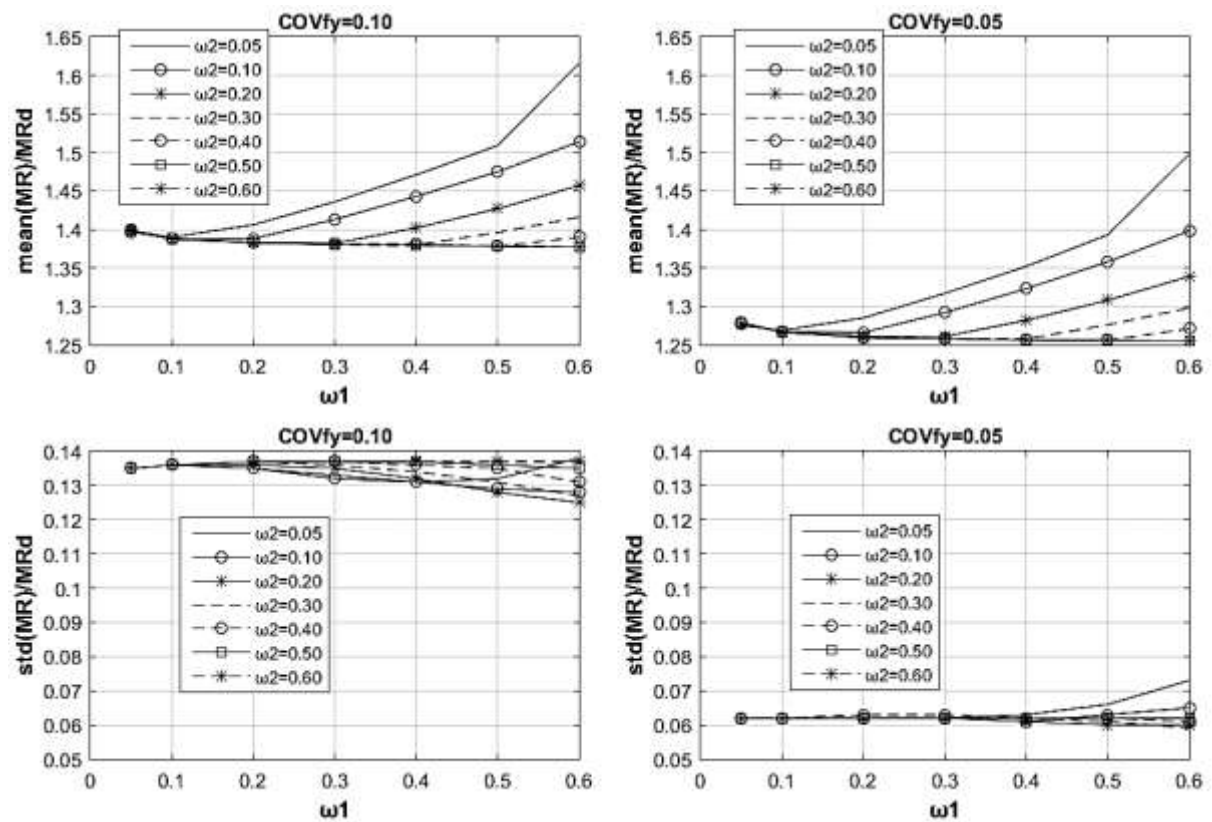
Πίνακας 10: Εύρος τιμών $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$ και $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$ για $d1/d=0.05$

COVfy=0.10	$d1/d=0.05$	COVfy=0.05
$1.377 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.616$		$1.255 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.498$
$0.125 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.138$		$0.059 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.073$

A) $\frac{d1}{d} = 0.05$



Εικόνα 19: Γραφήματα του Πίνακα 6 και Πίνακα 7



Εικόνα 20: Γραφήματα του Πίνακα 8 και Πίνακα 9

$$B) \frac{d1}{d} = 0.10$$

Πίνακας 11: mean(μ_R)

		$\frac{d1}{d} = 0.10$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05	0.05	0,071	0,072	0,072	0,073	0,073	0,073	0,073	0,065	0,066	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
0.10	0.05	0,134	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,123	0,123	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
0.20	0.05	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237	0,237
0.30	0.05	0,379	0,381	0,383	0,383	0,383	0,383	0,383	0,348	0,349	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
0.40	0.05	0,492	0,498	0,504	0,506	0,507	0,507	0,507	0,452	0,457	0,461	0,462	0,463	0,463	0,463
0.50	0.05	0,596	0,607	0,620	0,627	0,629	0,630	0,631	0,551	0,558	0,569	0,573	0,574	0,575	0,575
0.60	0.05	0,692	0,707	0,730	0,743	0,749	0,752	0,753	0,641	0,653	0,671	0,680	0,685	0,687	0,687

Πίνακας 12: std(μ_R)

		$\frac{d1}{d} = 0.10$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05	0.05	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004
0.10	0.05	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
0.20	0.05	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011
0.30	0.05	0,035	0,036	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
0.40	0.05	0,044	0,046	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,021	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,023
0.50	0.05	0,052	0,054	0,057	0,060	0,061	0,061	0,062	0,026	0,026	0,027	0,028	0,028	0,028	0,028
0.60	0.05	0,060	0,061	0,064	0,069	0,071	0,073	0,074	0,031	0,031	0,031	0,032	0,033	0,034	0,034

Πίνακας 13: mean(MR)/MRd

		$\frac{d1}{d}=0.10$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,436	1,447	1,456	1,460	1,461	1,462	1,464	1,320	1,332	1,342	1,346	1,348	1,350	1,351
0.10		1,414	1,418	1,421	1,421	1,421	1,423	1,423	1,294	1,298	1,302	1,304	1,304	1,305	1,305
0.20		1,413	1,406	1,402	1,401	1,401	1,401	1,401	1,293	1,285	1,281	1,281	1,281	1,281	1,281
0.30		1,435	1,412	1,398	1,395	1,395	1,393	1,394	1,315	1,292	1,277	1,274	1,273	1,272	1,272
0.40		1,471	1,441	1,401	1,393	1,390	1,390	1,389	1,352	1,321	1,280	1,272	1,270	1,268	1,268
0.50		1,510	1,477	1,425	1,394	1,389	1,387	1,387	1,394	1,359	1,305	1,273	1,268	1,266	1,266
0.60		1,617	1,515	1,457	1,415	1,389	1,387	1,386	1,500	1,400	1,339	1,295	1,269	1,265	1,264

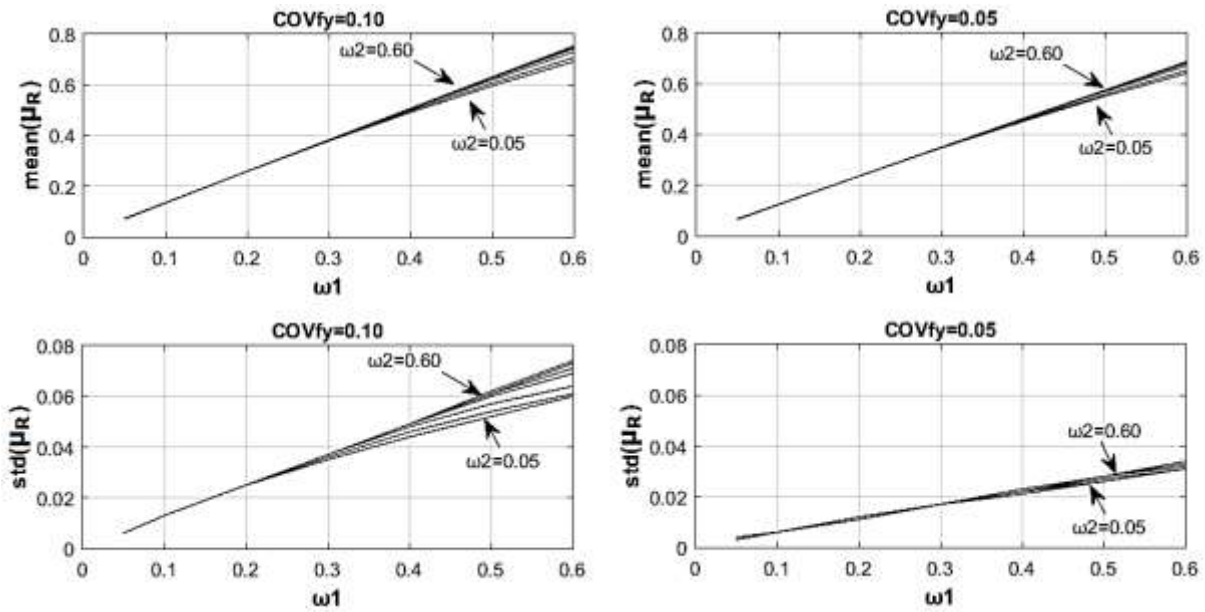
Πίνακας 14: std(MR)/MRd

		$\frac{d1}{d}=0.10$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,130	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129	0,061	0,062	0,064	0,064	0,065	0,065	0,065
0.10		0,133	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.20		0,134	0,135	0,134	0,135	0,135	0,135	0,134	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.30		0,134	0,134	0,135	0,135	0,135	0,135	0,136	0,063	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.40		0,133	0,133	0,133	0,135	0,135	0,136	0,135	0,064	0,063	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062
0.50		0,132	0,131	0,132	0,133	0,134	0,135	0,136	0,066	0,063	0,061	0,061	0,062	0,062	0,062
0.60		0,139	0,130	0,128	0,131	0,132	0,135	0,135	0,074	0,066	0,062	0,061	0,061	0,061	0,062

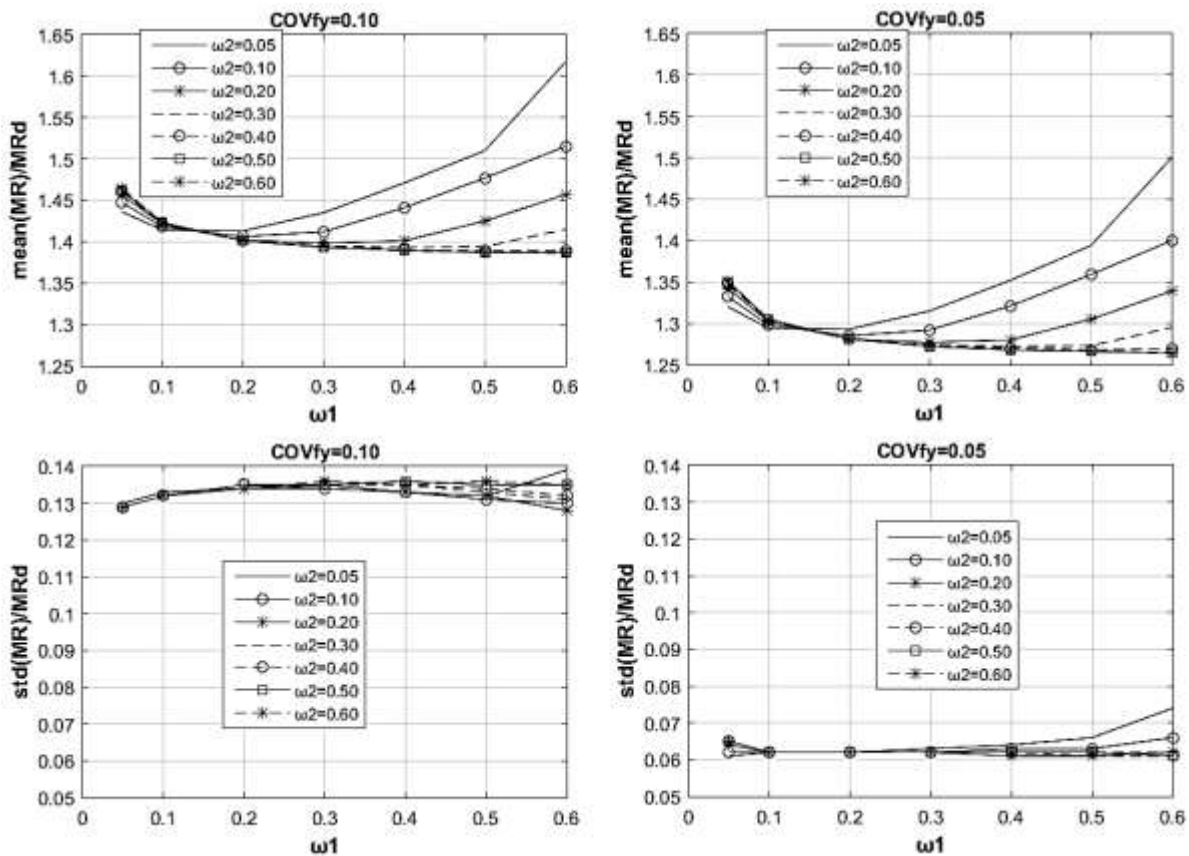
Πίνακας 15: Εύρος τιμών mean(MR)/MRd και std(MR)/MRd για d1/d=0.10

COVfy=0.10	d1/d=0.10	COVfy=0.05
$1.386 \leq \text{mean(MR)/MRd} \leq 1.617$		$1.264 \leq \text{mean(MR)/MRd} \leq 1.500$
$0.128 \leq \text{std(MR)/MRd} \leq 0.139$		$0.061 \leq \text{std(MR)/MRd} \leq 0.074$

B) $\frac{d1}{d} = 0.10$



Εικόνα 21: Γραφήματα του Πίνακα 11 και Πίνακα 12



Εικόνα 22: Γραφήματα του Πίνακα 13 και Πίνακα 14

Γ) $\frac{d_1}{d} = 0.15$

Πίνακας 16: mean(μR)

		$\frac{d_1}{d} = 0.15$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,077	0,079	0,081	0,082	0,082	0,082	0,083	0,071	0,073	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077
0.10		0,138	0,139	0,140	0,141	0,141	0,141	0,142	0,127	0,128	0,130	0,130	0,130	0,131	0,131
0.20		0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,259	0,237	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238
0.30		0,376	0,377	0,377	0,377	0,377	0,377	0,377	0,345	0,345	0,346	0,346	0,345	0,345	0,345
0.40		0,488	0,490	0,493	0,494	0,494	0,494	0,494	0,449	0,450	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452
0.50		0,592	0,598	0,605	0,609	0,610	0,610	0,611	0,546	0,551	0,555	0,557	0,558	0,559	0,559
0.60		0,688	0,699	0,714	0,721	0,724	0,727	0,727	0,638	0,645	0,656	0,661	0,663	0,664	0,665

Πίνακας 17: std(μR)

		$\frac{d_1}{d} = 0.15$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,006	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
0.10		0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
0.20		0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
0.30		0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,036	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017	0,016
0.40		0,044	0,045	0,046	0,047	0,047	0,047	0,047	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,022	0,022
0.50		0,052	0,054	0,056	0,057	0,058	0,058	0,059	0,026	0,026	0,026	0,027	0,027	0,027	0,027
0.60		0,060	0,061	0,064	0,067	0,068	0,069	0,070	0,031	0,031	0,031	0,031	0,032	0,032	0,032

Πίνακας 18: $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$

		$\frac{d1}{d} = 0.15$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,485	1,510	1,531	1,541	1,547	1,550	1,554	1,374	1,401	1,425	1,438	1,445	1,449	1,453
0.10		1,443	1,455	1,465	1,471	1,473	1,475	1,476	1,326	1,341	1,353	1,358	1,362	1,364	1,366
0.20		1,429	1,429	1,429	1,430	1,431	1,430	1,431	1,311	1,311	1,312	1,313	1,314	1,314	1,315
0.30		1,443	1,429	1,419	1,417	1,416	1,415	1,415	1,324	1,310	1,300	1,298	1,297	1,297	1,296
0.40		1,471	1,443	1,418	1,411	1,408	1,407	1,407	1,352	1,324	1,300	1,292	1,289	1,288	1,287
0.50		1,508	1,474	1,426	1,411	1,405	1,403	1,402	1,393	1,356	1,308	1,291	1,285	1,283	1,282
0.60		1,618	1,514	1,452	1,415	1,404	1,401	1,399	1,500	1,399	1,335	1,296	1,285	1,280	1,279

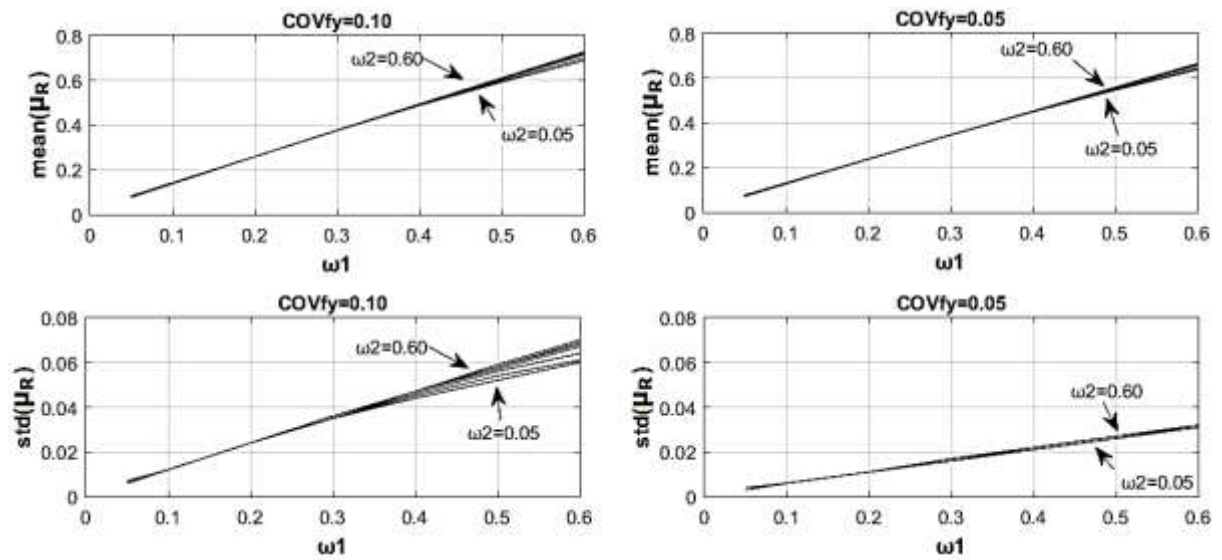
Πίνακας 19: $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$

		$\frac{d1}{d} = 0.15$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
ω_2	ω_1	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		0,124	0,124	0,126	0,126	0,127	0,128	0,128	0,064	0,069	0,074	0,077	0,079	0,080	0,081
0.10		0,130	0,129	0,128	0,128	0,128	0,128	0,129	0,062	0,063	0,064	0,065	0,066	0,066	0,066
0.20		0,134	0,133	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.30		0,133	0,133	0,132	0,133	0,133	0,133	0,133	0,063	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.40		0,133	0,133	0,132	0,133	0,134	0,134	0,134	0,064	0,063	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.50		0,133	0,132	0,131	0,132	0,133	0,134	0,134	0,067	0,064	0,062	0,061	0,062	0,062	0,062
0.60		0,140	0,132	0,131	0,131	0,132	0,133	0,134	0,074	0,066	0,062	0,061	0,061	0,061	0,062

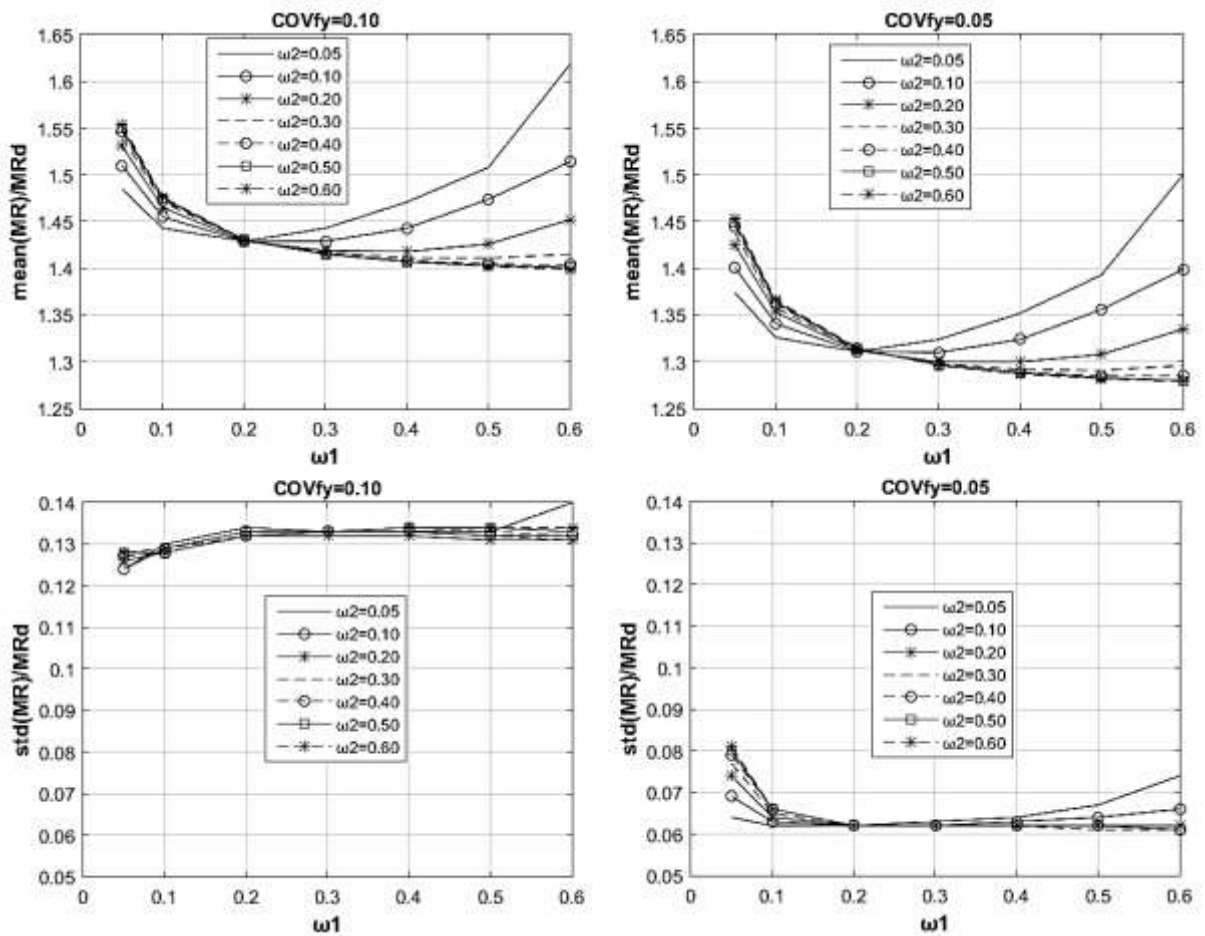
Πίνακας 20: Εύρος τιμών $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$ και $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$

COVfy=0.10	$d1/d=0.15$	COVfy=0.05
$1.399 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.618$		$1.279 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.500$
$0.124 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.140$		$0.061 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.081$

$$\Gamma) \frac{d1}{d} = 0.15$$



Εικόνα 23: Γραφήματα του Πίνακας 16 και του Πίνακας 17



Εικόνα 24: Γραφήματα του Πίνακας 18 και του Πίνακας 19

Συγκεντρώνοντας όλους τους πίνακες μπορούμε να δούμε τα εύρη των τιμών τους για όλες τις περιπτώσεις:

Πίνακας 21: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων τιμών $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$

mean	COVfy=0.10	COVfy=0.05
d1/d=0.05	$1.377 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.616$	$1.255 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.498$
d1/d=0.10	$1.386 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.617$	$1.264 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.500$
d1/d=0.15	$1.399 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.618$	$1.279 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.500$
Εύρος	$1.377 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.618$	$1.255 \leq \text{mean}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 1.500$

Πίνακας 22: Συγκεντρωτικός πίνακας τυπικών αποκλίσεων $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$

std	COVfy=0.10	COVfy=0.05
d1/d=0.05	$0.125 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.138$	$0.059 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.073$
d1/d=0.10	$0.128 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.139$	$0.061 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.074$
d1/d=0.15	$0.124 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.140$	$0.061 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.081$
Εύρος	$0.12 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.14$	$0.06 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.08$
Προσέγγιση	$\text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \approx 0.13$	$\text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \approx 0.07$

Σχόλιο: Ακόμα μια παράμετρος που μας ενδιαφέρει (όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια) είναι το μέγεθος $\Sigma\text{MR}/\Sigma\text{MRd}$ δηλαδή το άθροισμα των MR^+ και MR^- προς το άθροισμα των MRd^+ και MRd^- .

Έχουμε: $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \approx \alpha = \begin{cases} 0.13 \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ 0.07 \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{cases} \Rightarrow \text{std}(\text{MR}^+) = \alpha * \text{MRd}^+ \text{ και } \text{std}(\text{MR}^-) = \alpha * \text{MRd}^-$

και θέτοντας $\text{MRdmin}/\text{MRdmax} = x$ (δηλαδή $0 \leq x \leq 1$) έχουμε:

$$\frac{\text{std}(\Sigma\text{MR})}{\Sigma\text{MRd}} = \frac{\sqrt{\text{std}(\text{MR}^+)^2 + \text{std}(\text{MR}^-)^2}}{\text{MRd}^+ + \text{MRd}^-} = \frac{\alpha * \sqrt{(\text{MRd}^+)^2 + (\text{MRd}^-)^2}}{\text{MRd}^+ + \text{MRd}^-} = \alpha * \frac{\sqrt{x^2+1}}{x+1}$$

x	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
$\frac{\sqrt{x^2+1}}{x+1}$	0.71	0.71	0.71	0.72	0.73	0.75	0.77	0.80	0.85	0.91	1.00

Για τη μέση τιμή της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd}$, η οποία δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από την $\text{mean}(\text{MR})/\text{MRd}$, συγκεντρωτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 23 ο οποίος όπως είναι αναμενόμενο είναι συμμετρικός αφού $(\Sigma\text{MR}/\Sigma\text{MRd})_{i,j} = (\Sigma\text{MR}/\Sigma\text{MRd})_{j,i}$

Πίνακας 23: Τιμές $\frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \cdot \frac{d1}{d} = 0.05$

		$\frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \cdot \frac{d1}{d} = 0.05$													
		COVfy=0.10							COVfy=0.05						
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,396	1,392	1,405	1,431	1,462	1,497	1,593	1,275	1,271	1,284	1,311	1,344	1,381	1,476
0.10		1,392	1,389	1,388	1,407	1,431	1,460	1,493	1,271	1,267	1,266	1,286	1,312	1,341	1,376
0.20		1,405	1,388	1,384	1,383	1,396	1,413	1,436	1,284	1,266	1,261	1,260	1,275	1,294	1,317
0.30		1,431	1,407	1,383	1,381	1,380	1,389	1,405	1,311	1,286	1,260	1,258	1,258	1,269	1,284
0.40		1,462	1,431	1,396	1,380	1,379	1,379	1,386	1,344	1,312	1,275	1,258	1,257	1,257	1,265
0.50		1,497	1,460	1,413	1,389	1,379	1,378	1,378	1,381	1,341	1,294	1,269	1,257	1,256	1,256
0.60		1,593	1,493	1,436	1,405	1,386	1,378	1,378	1,476	1,376	1,317	1,284	1,265	1,256	1,255
		$\frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \cdot \frac{d1}{d} = 0.10$													
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,436	1,425	1,422	1,439	1,470	1,505	1,601	1,320	1,307	1,303	1,320	1,351	1,389	1,484
0.10		1,425	1,418	1,411	1,414	1,437	1,467	1,499	1,307	1,298	1,291	1,295	1,317	1,349	1,384
0.20		1,422	1,411	1,402	1,399	1,401	1,418	1,442	1,303	1,291	1,281	1,279	1,280	1,298	1,323
0.30		1,439	1,414	1,399	1,395	1,394	1,394	1,408	1,320	1,295	1,279	1,274	1,272	1,273	1,287
0.40		1,470	1,437	1,401	1,394	1,390	1,389	1,389	1,351	1,317	1,280	1,272	1,270	1,268	1,269
0.50		1,505	1,467	1,418	1,394	1,389	1,387	1,387	1,389	1,349	1,298	1,273	1,268	1,266	1,265
0.60		1,601	1,499	1,442	1,408	1,389	1,387	1,386	1,484	1,384	1,323	1,287	1,269	1,265	1,264
		$\frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \cdot \frac{d1}{d} = 0.15$													
$\omega_2 \backslash \omega_1$		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
0.05		1,485	1,467	1,452	1,460	1,481	1,513	1,611	1,374	1,353	1,337	1,343	1,365	1,400	1,495
0.10		1,467	1,455	1,441	1,440	1,450	1,474	1,507	1,353	1,341	1,326	1,323	1,332	1,358	1,393
0.20		1,452	1,441	1,429	1,423	1,422	1,427	1,446	1,337	1,326	1,312	1,305	1,305	1,310	1,330
0.30		1,460	1,440	1,423	1,417	1,413	1,413	1,415	1,343	1,323	1,305	1,298	1,294	1,293	1,296
0.40		1,481	1,450	1,422	1,413	1,408	1,406	1,405	1,365	1,332	1,305	1,294	1,289	1,286	1,286
0.50		1,513	1,474	1,427	1,413	1,406	1,403	1,401	1,400	1,358	1,310	1,293	1,286	1,283	1,281
0.60		1,611	1,507	1,446	1,415	1,405	1,401	1,399	1,495	1,393	1,330	1,296	1,286	1,281	1,279

Στον Πίνακα 23: Τιμές $\text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd}$, επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στις περιπτώσεις όπου $\omega_{\min}/\omega_{\max} \geq 0.5$ και $\omega_{\max} \geq 0.1$ δηλαδή σε διατομές όπου υπάρχει σημαντικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού (τουλάχιστον το μισό του εφελκόμενου) και αρκετός εφελκόμενος. Αυτές οι περιπτώσεις συνηθίζονται όταν απαιτείται πλαστιμότητα και παρατηρούμε ότι το εύρος των τιμών του Πίνακα για αυτές είναι αρκετά περιορισμένο:

Πίνακας 24: Συκεντρωτικός πίνακας μέσω των τιμών $\text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd}$ για περιπτώσεις με απαίτηση πλαστιμότητας

mean	COVfy=0.10	COVfy=0.05
d1/d=0.05	$1.38 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.41$	$1.26 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.28$
d1/d=0.10	$1.39 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.42$	$1.26 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.30$
d1/d=0.15	$1.40 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.46$	$1.28 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.34$
Εύρος	$1.38 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.46$	$1.26 \leq \text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \leq 1.34$
Προσέγγιση	$\text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \approx 1.40$	$\text{mean}(\Sigma\text{MR})/\Sigma\text{MRd} \approx 1.30$

Ακολουθώντας την ίδια λογική και επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας για τις περιπτώσεις όπου ισχύουν $\omega_{\min}/\omega_{\max} \geq 0.5$ και $\omega_{\max} \geq 0.1$, η παράμετρος $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$ έχει ακόμα πιο περιορισμένο εύρος από αυτό του Πίνακα 22:

$$\begin{cases} 0.124 \leq \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} \leq 0.137 \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ 0.060 \leq \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} \leq 0.064 \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} \approx 0.131 \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} \approx 0.062 \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{cases}$$

Και όπως αναπτύχθηκε (σελ 30):

$$\frac{\text{std}(\Sigma\text{MR})}{\Sigma\text{MRd}} = \begin{cases} \frac{\sqrt{x^2+1}}{x+1} * 0.13 \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ \frac{\sqrt{x^2+1}}{x+1} * 0.062 \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{cases}$$

Και αφού ενδιαφερόμαστε για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται πλαστιμότητα με $\omega_{\min}/\omega_{\max} \geq 0.5$ τότε $\text{MRdmin}/\text{MRdmax} = x \geq 0.5$ ο συντελεστής $\text{std}(\text{MR})/\text{MRd}$ μπορεί να θεωρηθεί:

$$\bullet \frac{\text{std}(\Sigma\text{MR})}{\Sigma\text{MRd}} = \begin{cases} 0.75 * 0.132 \approx 0.1 \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ 0.75 * 0.062 \approx 0.05 \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{cases}$$

Συνεπώς, καταλήγουμε στις δύο περιπτώσεις:

$$\frac{\text{std}(\Sigma\text{MR})}{\Sigma\text{MRd}} = \begin{cases} \mathbf{0.1 \text{ για } \text{COVfy}=0.10} \\ \mathbf{0.05 \text{ για } \text{COVfy}=0.05} \end{cases}$$

2.2.2 Υποστυλώματα (αξονική $v \neq 0$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$)

Αντίστοιχα με τις δοκούς:

Γίνεται διερεύνηση (για διάφορες τιμές της αξονικής v) της ροπής αντοχής μR υποστυλώματος με συμμετρικό οπλισμό $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$.

Η παραμετρική διερεύνηση που διεξάγεται, όπως και για τις δοκούς, αφορά τα μεγέθη f_y , f_c και d_1/d και συγκεκριμένα τους όρους $COV_{fy} = \begin{cases} 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$, $COV_{fc} = \begin{cases} 0.20 \\ 0.10 \end{cases}$, $d_1/d = \begin{cases} 0.15 \\ 0.10 \\ 0.05 \end{cases}$

Αντίθετα με τις δοκούς:

Όπως φαίνεται στις περιπτώσεις που ακολουθούν, η μεταβλητότητα του σκυροδέματος ($COV_{fc} = 0.10$ ή 0.20) στην περίπτωση των υποστυλωμάτων επηρεάζει τις τιμές των παραμέτρων και κατά συνέπεια δεν θα ληφθεί απλοποιητικά μια μόνο τιμή της ($COV_{fc} = 0.15$) όπως στην περίπτωση των δοκών. Αυτό είναι αναμενόμενο, ειδικά για τις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/ή λίγου ποσοστού οπλισμού, αφού τότε το σκυρόδεμα αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος και κατά συνέπεια η μεταβολή των πιθανοτικών του χαρακτηριστικών επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια σε μορφή Πινάκων τα μεγέθη $mean(MR)/MR_d$ και $std(MR)/MR_d$ που εκφράζουν το λόγο της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της ροπής αντοχής (ανηγμένης ή μη) προς τη ροπή σχεδιασμού (ανηγμένη ή μη αντίστοιχα).

Σχόλιο: Αν επιθυμούμε την διερεύνηση του όρου $\Sigma MR/\Sigma MR_d$, δηλαδή αναζητούμε τις τιμές $mean(\Sigma MR)/\Sigma MR_d$ και $std(\Sigma MR)/\Sigma MR_d$, μιας και για το υποστυλώμα είναι $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$ έχουμε: $MR_d^+ = MR_d^-$, και $MR^+ = MR^-$ οπότε

$$\frac{mean(\Sigma MR)}{\Sigma MR_d} = \frac{mean(MR^+) + mean(MR^-)}{MR_d^+ + MR_d^-} = \frac{2 * mean(MR^+)}{2 * MR_d^+} = \frac{mean(MR)}{MR_d}$$

$$\frac{mean(\Sigma MR)}{\Sigma MR_d} = \frac{mean(MR)}{MR_d}$$

Και από το κεφάλαιο 2.2.1 (σελ 30) έχουμε:

$$\frac{std(\Sigma MR)}{\Sigma MR_d} = \frac{std(MR)}{MR_d} \frac{\sqrt{x^2 + 1}}{x + 1}, \text{ και επειδή } x = \frac{MR_d^+}{MR_d^-} = 1 \text{ έχουμε:}$$

$$\frac{std(\Sigma MR)}{\Sigma MR_d} = \frac{std(MR)}{MR_d} \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι Πίνακες για κάθε περίπτωση:

$$A) \frac{d1}{d}=0.05$$

Πίνακας 25: mean(MR)/MRd για $d1/d=0.05$, $COVfy=0.05$

v \ ω_{tot}		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,262	1,257	1,257	1,255	1,255	1,254	1,253
	COVfc=0.2	1,268	1,260	1,258	1,257	1,256	1,254	1,254
0.2	COVfc=0.1	1,188	1,216	1,226	1,232	1,235	1,238	1,239
	COVfc=0.2	1,196	1,219	1,229	1,234	1,237	1,239	1,241
0.4	COVfc=0.1	1,286	1,273	1,267	1,264	1,261	1,260	1,259
	COVfc=0.2	1,315	1,291	1,280	1,274	1,270	1,267	1,265
0.6	COVfc=0.1	1,590	1,499	1,444	1,407	1,383	1,365	1,351
	COVfc=0.2	1,655	1,540	1,473	1,430	1,402	1,381	1,365
0.8	COVfc=0.1	1,934	1,885	1,742	1,647	1,580	1,533	1,498
	COVfc=0.2	2,063	1,969	1,801	1,692	1,616	1,564	1,524
1.0	COVfc=0.1	2,018	1,934	1,892	1,868	1,781	1,699	1,636
	COVfc=0.2	2,227	2,076	1,999	1,954	1,852	1,758	1,687

Πίνακας 26: std(MR)/MRd για $d1/d=0.05$, $COVfy=0.05$

v \ ω_{tot}		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
	COVfc=0.2	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.2	COVfc=0.1	0,032	0,045	0,049	0,052	0,054	0,054	0,055
	COVfc=0.2	0,033	0,045	0,050	0,053	0,054	0,055	0,056
0.4	COVfc=0.1	0,029	0,037	0,041	0,044	0,046	0,047	0,048
	COVfc=0.2	0,041	0,042	0,044	0,046	0,048	0,049	0,050
0.6	COVfc=0.1	0,046	0,042	0,043	0,044	0,045	0,045	0,046
	COVfc=0.2	0,081	0,060	0,054	0,052	0,051	0,051	0,050
0.8	COVfc=0.1	0,083	0,065	0,057	0,052	0,051	0,049	0,049
	COVfc=0.2	0,155	0,114	0,088	0,076	0,067	0,063	0,060
1.0	COVfc=0.1	0,145	0,113	0,096	0,086	0,078	0,071	0,066
	COVfc=0.2	0,242	0,178	0,146	0,125	0,107	0,093	0,085

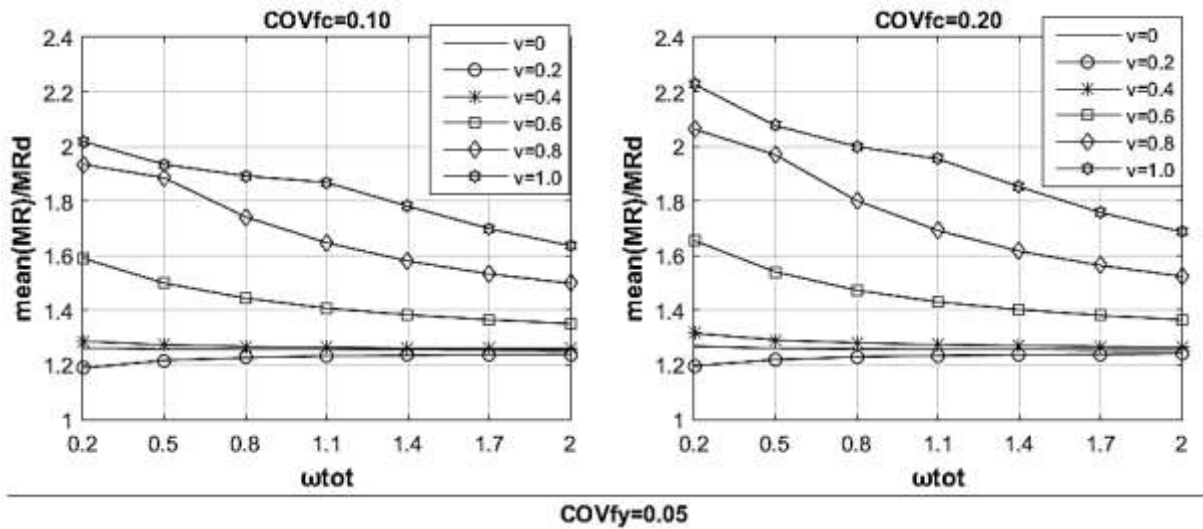
Πίνακας 27: mean(MR)/MRd για d1/d=0.05, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,384	1,379	1,380	1,378	1,377	1,377	1,375
	COVfc=0.2	1,389	1,382	1,381	1,379	1,379	1,378	1,376
0.2	COVfc=0.1	1,252	1,305	1,325	1,335	1,341	1,345	1,347
	COVfc=0.2	1,260	1,309	1,329	1,338	1,343	1,348	1,350
0.4	COVfc=0.1	1,338	1,352	1,357	1,359	1,360	1,360	1,360
	COVfc=0.2	1,366	1,369	1,370	1,370	1,368	1,368	1,367
0.6	COVfc=0.1	1,643	1,580	1,538	1,506	1,485	1,469	1,455
	COVfc=0.2	1,709	1,622	1,568	1,530	1,505	1,486	1,471
0.8	COVfc=0.1	1,993	1,981	1,848	1,757	1,690	1,644	1,606
	COVfc=0.2	2,121	2,066	1,908	1,803	1,729	1,677	1,637
1.0	COVfc=0.1	2,075	2,028	2,002	1,985	1,898	1,813	1,748
	COVfc=0.2	2,284	2,169	2,112	2,078	1,976	1,880	1,808

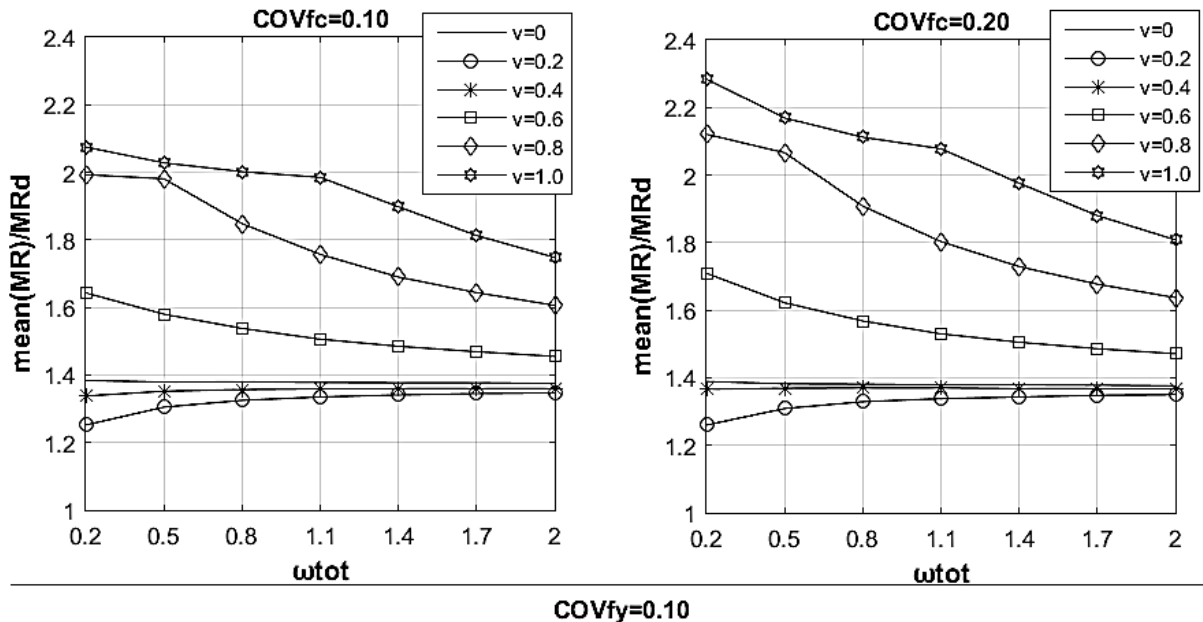
Πίνακας 28: std(MR)/MRd για d1/d=0.05, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,135	0,136
	COVfc=0.2	0,136	0,137	0,137	0,136	0,136	0,136	0,136
0.2	COVfc=0.1	0,070	0,098	0,108	0,114	0,116	0,117	0,119
	COVfc=0.2	0,071	0,099	0,109	0,115	0,118	0,119	0,121
0.4	COVfc=0.1	0,053	0,078	0,089	0,096	0,100	0,103	0,105
	COVfc=0.2	0,062	0,082	0,093	0,100	0,104	0,107	0,109
0.6	COVfc=0.1	0,062	0,078	0,087	0,092	0,095	0,098	0,100
	COVfc=0.2	0,093	0,092	0,096	0,100	0,102	0,104	0,106
0.8	COVfc=0.1	0,094	0,098	0,100	0,101	0,102	0,102	0,103
	COVfc=0.2	0,163	0,136	0,124	0,118	0,115	0,113	0,113
1.0	COVfc=0.1	0,152	0,134	0,131	0,130	0,126	0,121	0,120
	COVfc=0.2	0,249	0,198	0,173	0,160	0,148	0,139	0,132

Στη συνέχεια ακολουθούν γραφήματα και σχόλια για τους πίνακες της περίπτωσης Α) d1/d=0.05.



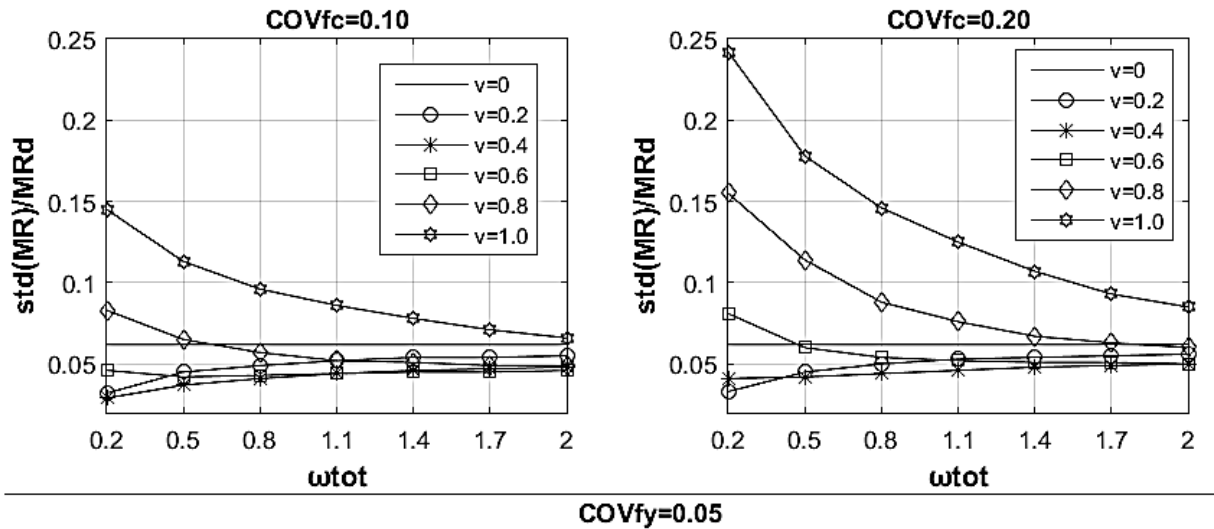
Εικόνα 25: Γράφημα του Πίνακα 25



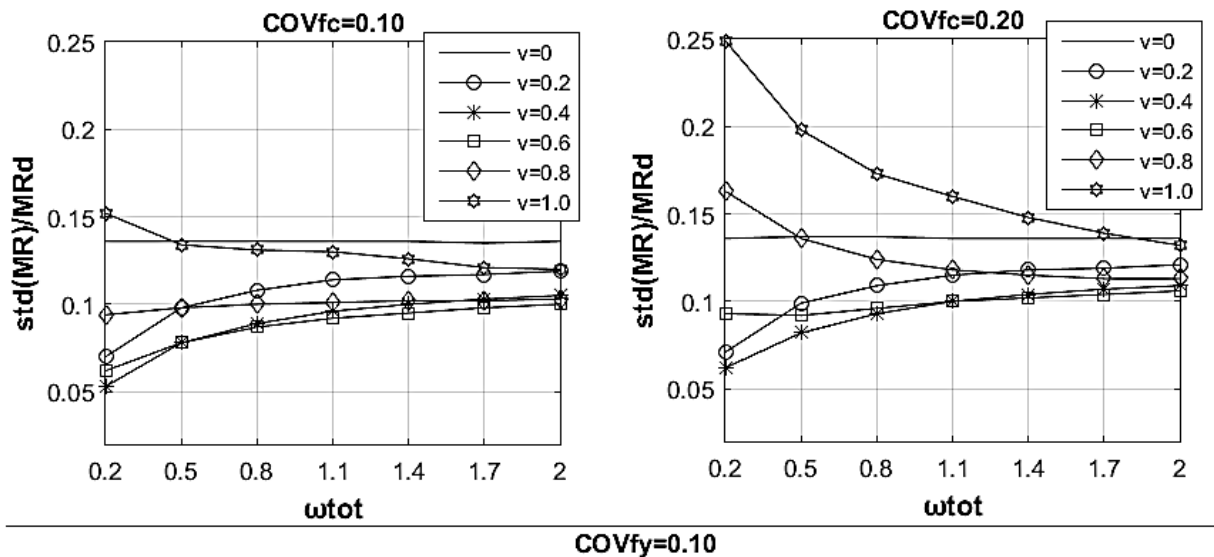
Εικόνα 26: Γράφημα του Πίνακα 27

Σχόλια για την Εικόνα 25 και την Εικόνα 26:

Για την περίπτωση A) $d1/d=0.05$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $1.2 \leq \text{mean}(MR)/MRd \leq 2.3$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλου ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή.



Εικόνα 27: Γράφημα του Πίνακα 26



Εικόνα 28: Γράφημα του Πίνακα 28

Σχόλια για την Εικόνα 27 και την Εικόνα 28:

Για την περίπτωση A) $d1/d=0.05$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $0.03 \leq std(MR)/MRd \leq 0.25$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλου ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή.

$$B) \frac{d1}{d}=0.10$$

Πίνακας 29: mean(MR)/MRd για d1/d=0.10, COVfy=0.05

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,287	1,270	1,265	1,262	1,260	1,259	1,258
	COVfc=0.2	1,306	1,281	1,273	1,268	1,264	1,263	1,261
0.2	COVfc=0.1	1,182	1,209	1,220	1,227	1,230	1,232	1,235
	COVfc=0.2	1,197	1,220	1,228	1,232	1,235	1,236	1,239
0.4	COVfc=0.1	1,272	1,263	1,259	1,257	1,255	1,254	1,253
	COVfc=0.2	1,298	1,278	1,269	1,264	1,261	1,259	1,257
0.6	COVfc=0.1	1,558	1,486	1,438	1,404	1,382	1,364	1,350
	COVfc=0.2	1,621	1,525	1,466	1,426	1,399	1,379	1,363
0.8	COVfc=0.1	1,883	1,853	1,730	1,643	1,579	1,535	1,500
	COVfc=0.2	2,004	1,936	1,789	1,689	1,617	1,566	1,527
1.0	COVfc=0.1	1,986	1,918	1,882	1,860	1,779	1,700	1,640
	COVfc=0.2	2,181	2,055	1,988	1,947	1,851	1,761	1,693

Πίνακας 30: std(MR)/MRd για d1/d=0.10, COVfy=0.05

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061	0,062	0,062
	COVfc=0.2	0,064	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062
0.2	COVfc=0.1	0,032	0,044	0,049	0,052	0,054	0,055	0,056
	COVfc=0.2	0,035	0,045	0,050	0,052	0,054	0,055	0,056
0.4	COVfc=0.1	0,027	0,037	0,042	0,045	0,048	0,050	0,051
	COVfc=0.2	0,039	0,041	0,045	0,047	0,049	0,051	0,052
0.6	COVfc=0.1	0,044	0,041	0,042	0,044	0,045	0,046	0,047
	COVfc=0.2	0,076	0,059	0,054	0,052	0,052	0,052	0,052
0.8	COVfc=0.1	0,079	0,063	0,055	0,052	0,051	0,050	0,049
	COVfc=0.2	0,146	0,110	0,088	0,076	0,068	0,064	0,061
1.0	COVfc=0.1	0,136	0,110	0,095	0,086	0,078	0,071	0,066
	COVfc=0.2	0,229	0,176	0,145	0,126	0,108	0,095	0,086

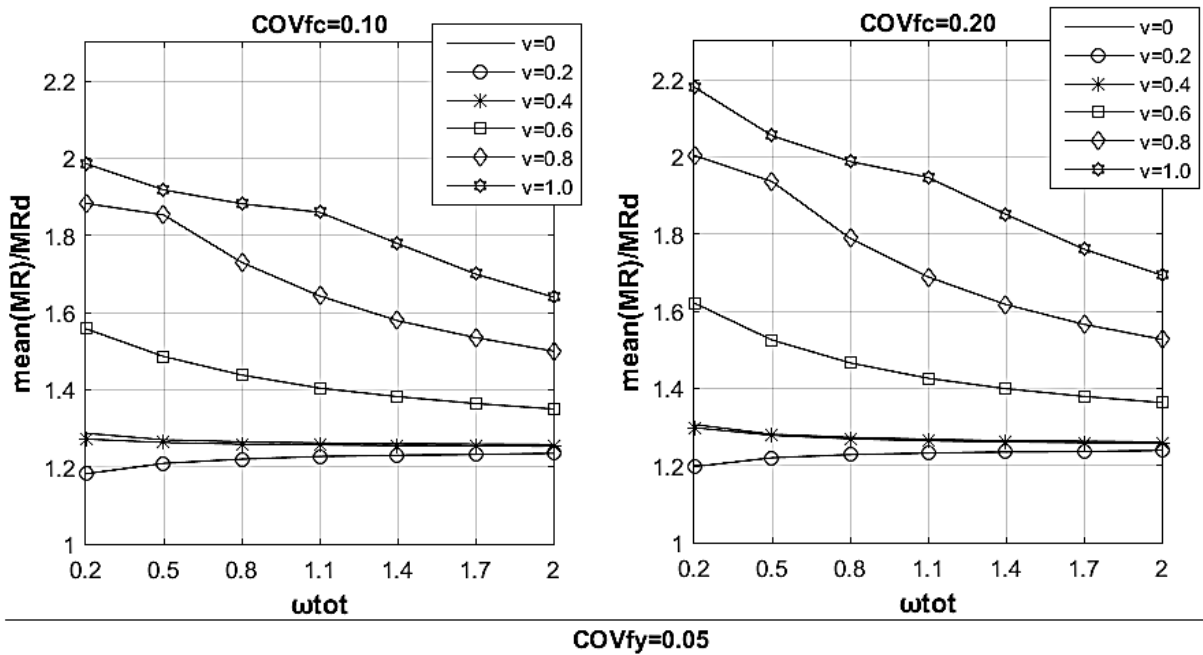
Πίνακας 31: mean(MR)/MRd για d1/d=0.10, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,404	1,391	1,385	1,384	1,381	1,381	1,380
	COVfc=0.2	1,425	1,403	1,394	1,389	1,385	1,385	1,383
0.2	COVfc=0.1	1,243	1,297	1,318	1,330	1,336	1,342	1,345
	COVfc=0.2	1,259	1,307	1,326	1,336	1,341	1,346	1,349
0.4	COVfc=0.1	1,320	1,337	1,345	1,349	1,351	1,352	1,353
	COVfc=0.2	1,345	1,352	1,356	1,358	1,359	1,359	1,360
0.6	COVfc=0.1	1,607	1,563	1,528	1,500	1,480	1,464	1,452
	COVfc=0.2	1,668	1,603	1,556	1,522	1,498	1,480	1,466
0.8	COVfc=0.1	1,935	1,942	1,830	1,749	1,686	1,642	1,606
	COVfc=0.2	2,056	2,025	1,890	1,795	1,725	1,675	1,636
1.0	COVfc=0.1	2,036	2,004	1,985	1,971	1,892	1,811	1,747
	COVfc=0.2	2,233	2,142	2,096	2,064	1,971	1,879	1,809

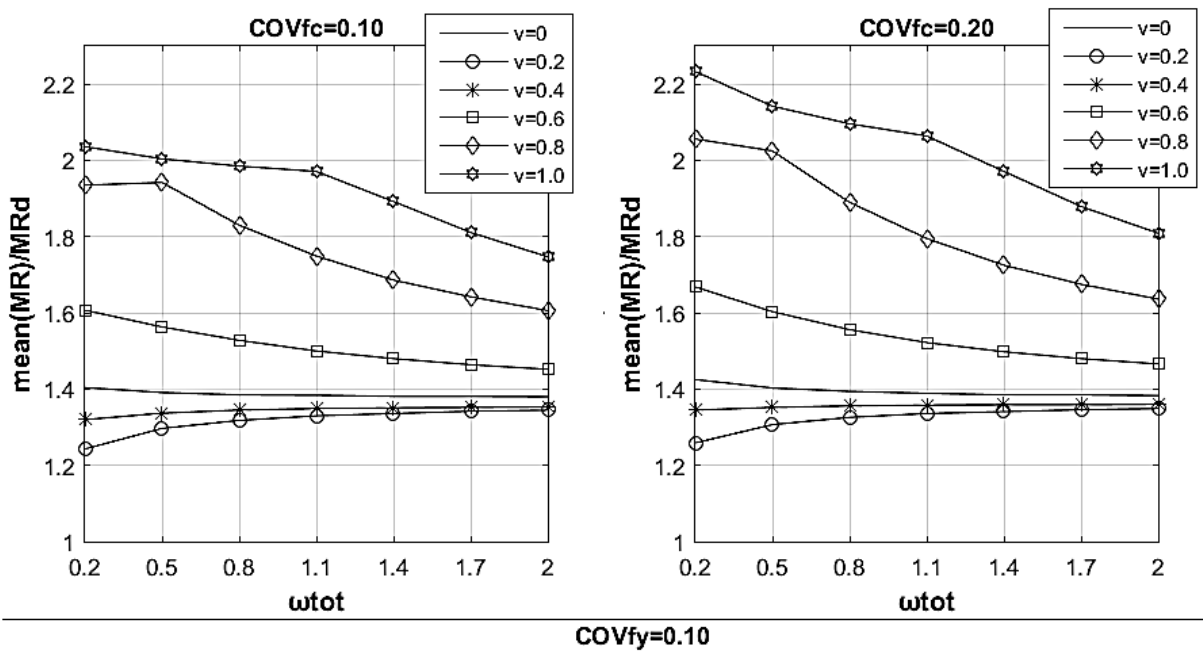
Πίνακας 32: std(MR)/MRd για d1/d=0.10, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,132	0,134	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
	COVfc=0.2	0,134	0,134	0,136	0,136	0,135	0,135	0,135
0.2	COVfc=0.1	0,068	0,096	0,108	0,113	0,116	0,119	0,120
	COVfc=0.2	0,070	0,097	0,108	0,114	0,117	0,120	0,121
0.4	COVfc=0.1	0,051	0,078	0,091	0,099	0,103	0,106	0,108
	COVfc=0.2	0,059	0,082	0,094	0,102	0,106	0,110	0,111
0.6	COVfc=0.1	0,059	0,076	0,086	0,093	0,097	0,100	0,102
	COVfc=0.2	0,088	0,090	0,097	0,101	0,105	0,107	0,109
0.8	COVfc=0.1	0,087	0,093	0,097	0,099	0,101	0,102	0,103
	COVfc=0.2	0,152	0,133	0,122	0,118	0,115	0,115	0,115
1.0	COVfc=0.1	0,143	0,129	0,126	0,126	0,123	0,120	0,118
	COVfc=0.2	0,232	0,190	0,168	0,160	0,147	0,139	0,133

Στη συνέχεια ακολουθούν γραφήματα και σχόλια για τους πίνακες της περίπτωσης B) d1/d=0.10.



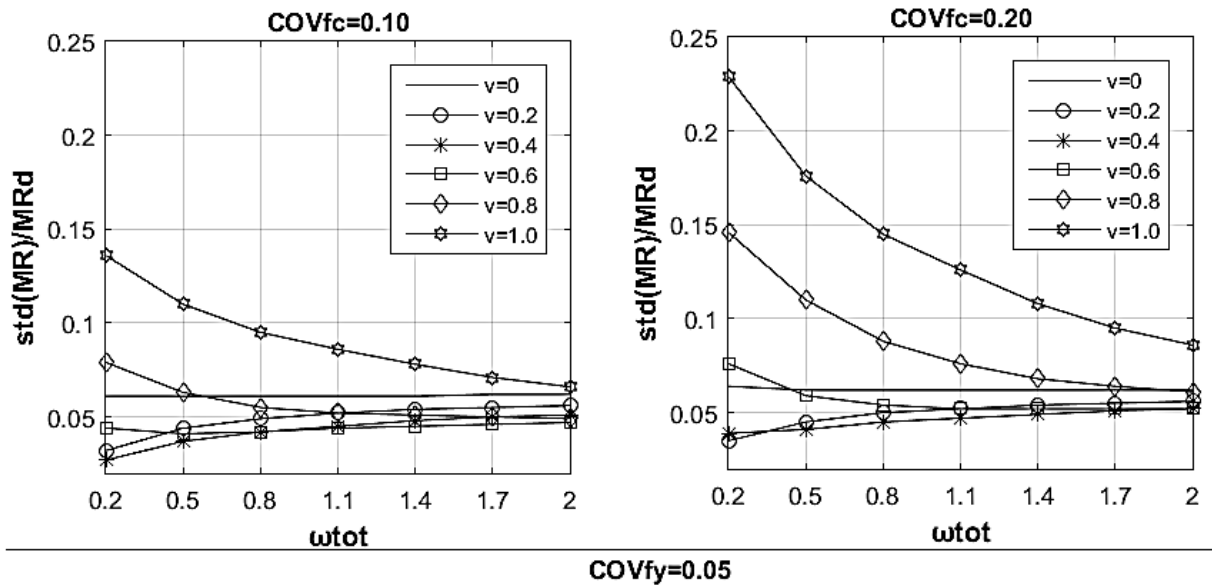
Εικόνα 29: Γράφημα του Πίνακα 29



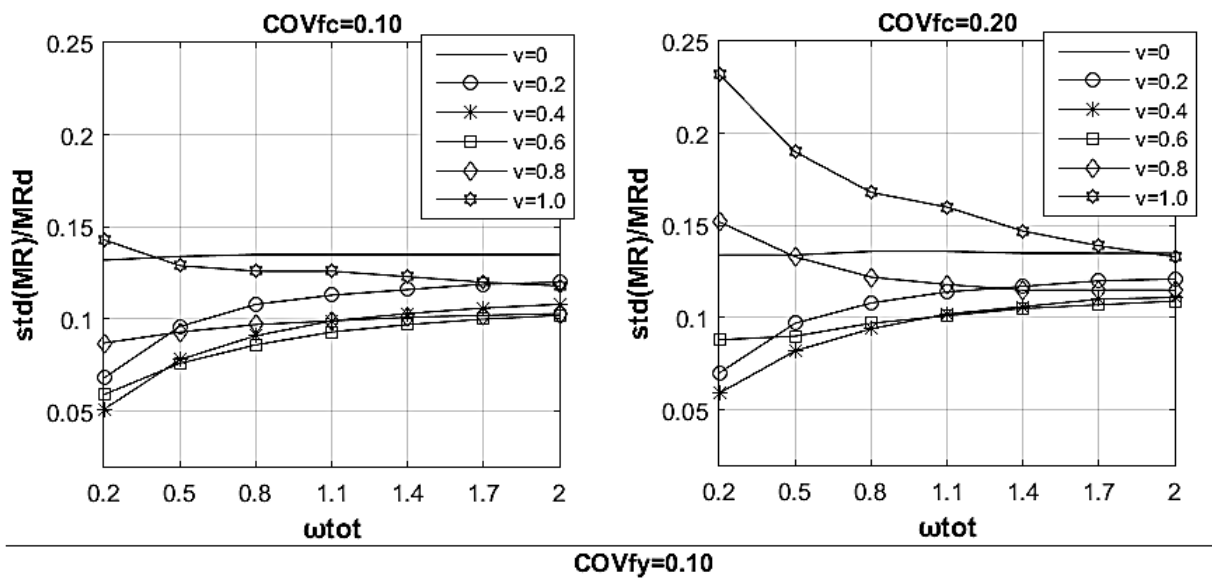
Εικόνα 30: Γράφημα του Πίνακα 31

Σχόλια για την Εικόνα 29 και την Εικόνα 30:

Για την περίπτωση Β) $d1/d=0.10$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $1.2 \leq \text{mean(MR)}/\text{MRd} \leq 2.2$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλο ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή.



Εικόνα 31: Γράφημα του Πίνακας 30



Εικόνα 32: Γράφημα του Πίνακας 32

Σχόλια για την Εικόνα 31 και την Εικόνα 32:

Για την περίπτωση Β) $d1/d=0.10$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $0.03 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.23$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλου ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή.

$$\Gamma) \frac{d1}{d} = 0.15$$

Πίνακας 33: mean(MR)/MRd για d1/d=0.15, COVfy=0.05

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,325	1,295	1,282	1,276	1,271	1,268	1,265
	COVfc=0.2	1,361	1,316	1,298	1,288	1,282	1,277	1,273
0.2	COVfc=0.1	1,205	1,229	1,237	1,241	1,242	1,243	1,244
	COVfc=0.2	1,231	1,249	1,252	1,253	1,252	1,252	1,251
0.4	COVfc=0.1	1,256	1,248	1,245	1,244	1,243	1,243	1,243
	COVfc=0.2	1,289	1,271	1,263	1,258	1,254	1,253	1,251
0.6	COVfc=0.1	1,525	1,467	1,425	1,394	1,373	1,357	1,344
	COVfc=0.2	1,583	1,504	1,451	1,413	1,389	1,369	1,355
0.8	COVfc=0.1	1,838	1,823	1,717	1,639	1,579	1,536	1,502
	COVfc=0.2	1,949	1,897	1,771	1,679	1,612	1,563	1,525
1.0	COVfc=0.1	1,957	1,901	1,872	1,853	1,777	1,703	1,643
	COVfc=0.2	2,140	2,035	1,976	1,939	1,849	1,763	1,696

Πίνακας 34: std(MR)/MRd για d1/d=0.15, COVfy=0.05

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,060	0,061	0,061	0,061	0,061	0,062	0,062
	COVfc=0.2	0,069	0,064	0,063	0,063	0,062	0,062	0,062
0.2	COVfc=0.1	0,033	0,044	0,049	0,052	0,053	0,054	0,055
	COVfc=0.2	0,041	0,048	0,051	0,053	0,054	0,055	0,056
0.4	COVfc=0.1	0,028	0,036	0,042	0,045	0,048	0,049	0,050
	COVfc=0.2	0,042	0,043	0,045	0,048	0,049	0,051	0,051
0.6	COVfc=0.1	0,040	0,039	0,042	0,045	0,046	0,048	0,049
	COVfc=0.2	0,072	0,056	0,052	0,052	0,051	0,052	0,053
0.8	COVfc=0.1	0,073	0,061	0,055	0,052	0,051	0,050	0,050
	COVfc=0.2	0,137	0,105	0,085	0,073	0,067	0,063	0,061
1.0	COVfc=0.1	0,128	0,108	0,094	0,085	0,077	0,071	0,066
	COVfc=0.2	0,216	0,169	0,142	0,125	0,108	0,096	0,087

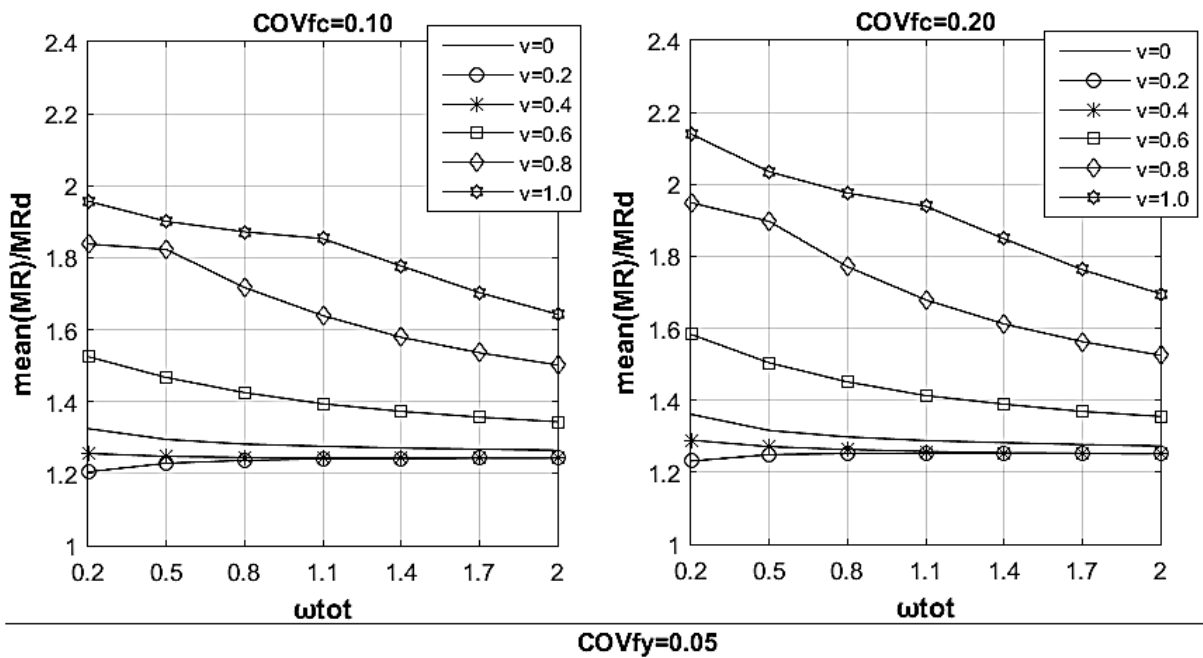
Πίνακας 35: mean(MR)/MRd για d1/d=0.15, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	1,439	1,412	1,402	1,396	1,392	1,389	1,386
	COVfc=0.2	1,477	1,436	1,419	1,409	1,402	1,398	1,396
0.2	COVfc=0.1	1,264	1,314	1,332	1,343	1,348	1,352	1,354
	COVfc=0.2	1,291	1,335	1,348	1,356	1,359	1,362	1,362
0.4	COVfc=0.1	1,299	1,318	1,328	1,335	1,339	1,342	1,344
	COVfc=0.2	1,333	1,342	1,346	1,349	1,351	1,352	1,353
0.6	COVfc=0.1	1,568	1,539	1,510	1,486	1,469	1,455	1,444
	COVfc=0.2	1,626	1,575	1,536	1,506	1,486	1,470	1,458
0.8	COVfc=0.1	1,884	1,904	1,812	1,739	1,681	1,639	1,602
	COVfc=0.2	1,995	1,980	1,865	1,781	1,715	1,670	1,631
1.0	COVfc=0.1	2,002	1,980	1,967	1,958	1,885	1,808	1,747
	COVfc=0.2	2,186	2,116	2,075	2,050	1,962	1,877	1,809

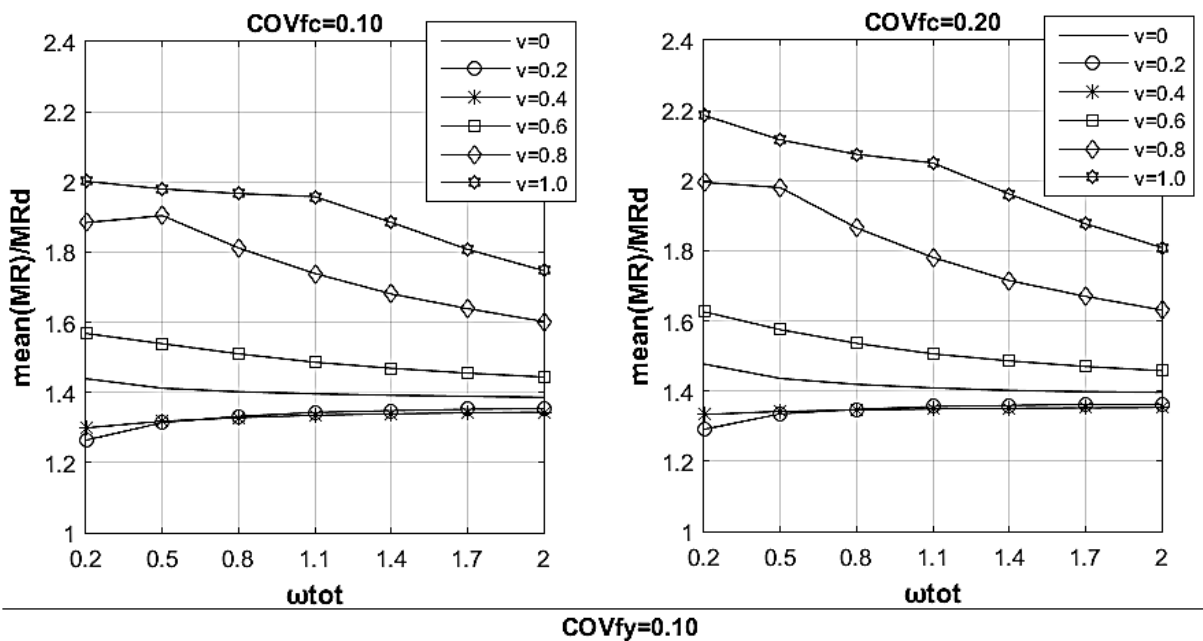
Πίνακας 36: std(MR)/MRd για d1/d=0.15, COVfy=0.10

v \ ωtot		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
		0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
0.0	COVfc=0.1	0,128	0,132	0,134	0,135	0,135	0,135	0,135
	COVfc=0.2	0,134	0,135	0,135	0,135	0,136	0,137	0,136
0.2	COVfc=0.1	0,067	0,095	0,106	0,112	0,116	0,119	0,120
	COVfc=0.2	0,072	0,097	0,108	0,114	0,117	0,120	0,121
0.4	COVfc=0.1	0,050	0,077	0,090	0,098	0,103	0,107	0,110
	COVfc=0.2	0,061	0,082	0,093	0,101	0,105	0,109	0,111
0.6	COVfc=0.1	0,055	0,075	0,088	0,095	0,100	0,103	0,105
	COVfc=0.2	0,082	0,088	0,096	0,102	0,106	0,109	0,110
0.8	COVfc=0.1	0,082	0,089	0,095	0,099	0,101	0,103	0,105
	COVfc=0.2	0,140	0,126	0,120	0,117	0,117	0,117	0,117
1.0	COVfc=0.1	0,134	0,124	0,123	0,123	0,119	0,118	0,116
	COVfc=0.2	0,220	0,183	0,168	0,157	0,147	0,140	0,134

Στη συνέχεια ακολουθούν γραφήματα και σχόλια για τους πίνακες της περίπτωσης Γ) d1/d=0.15.



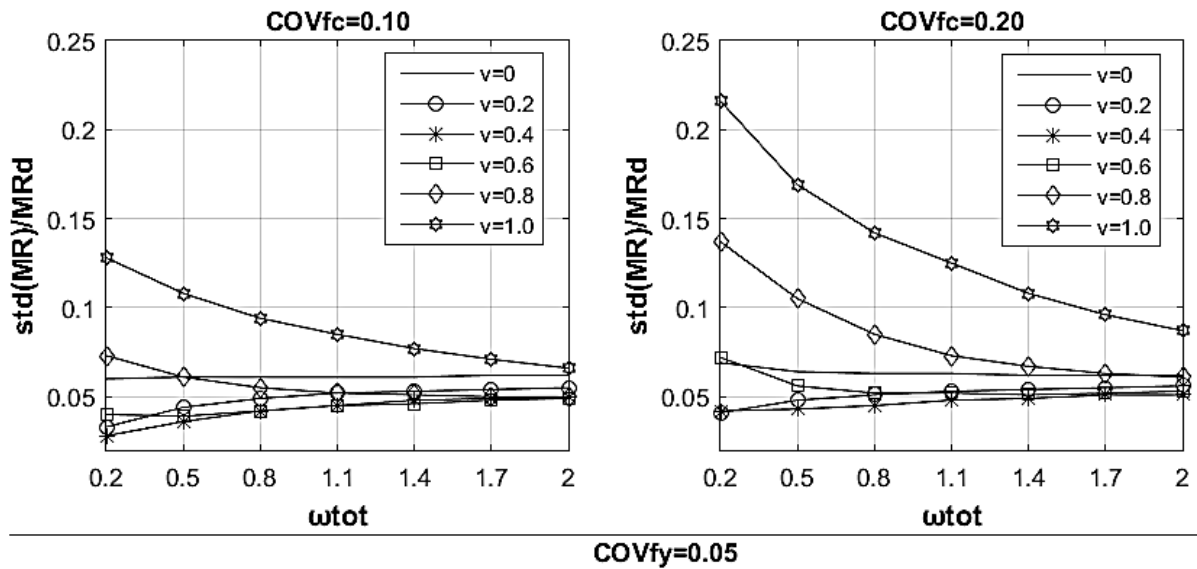
Εικόνα 33: Γράφημα του Πίνακα 33



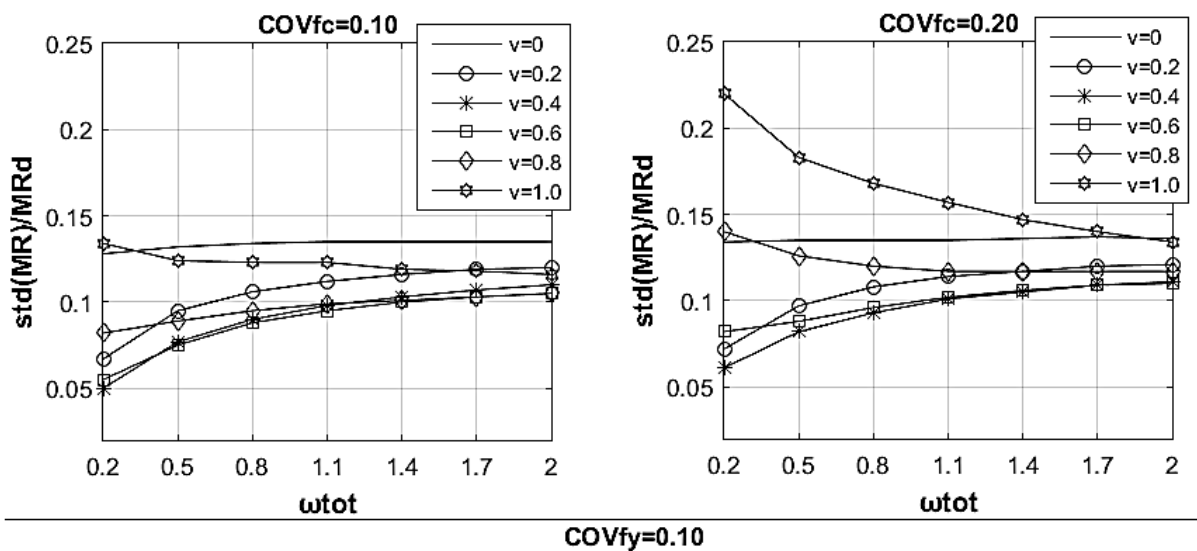
Εικόνα 34: Γράφημα του Πίνακα 35

Σχόλια για την Εικόνα 33 και την Εικόνα 34:

Για την περίπτωση Γ) $d1/d=0.15$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $1.2 \leq \text{mean}(MR)/MRd \leq 2.2$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλου ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή



Εικόνα 35: Γράφημα του Πίνακα 34



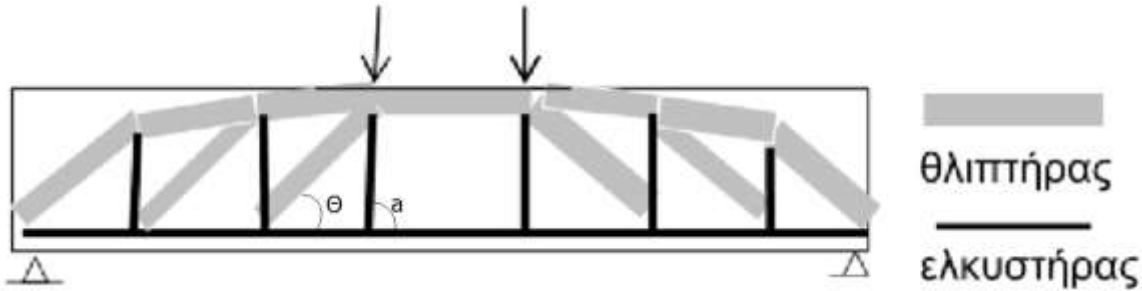
Εικόνα 36: Γράφημα του Πίνακα 36

Σχόλια για την Εικόνα 35 και την Εικόνα 36:

Για την περίπτωση Γ) $d1/d=0.15$ διαπιστώνουμε μέσω των παραπάνω πως η παράμετρος της μέσης ροπής αντοχής προς τη ροπή σχεδιασμού είναι $0.03 \leq \text{std}(\text{MR})/\text{MRd} \leq 0.23$ και πως η μεταβλητότητα του σκυροδέματος COV_{fc} έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις μεγάλης αξονικής και/η λίγου ποσοστού οπλισμού, ενώ η μεταβλητότητα του χάλυβα COV_{fy} έχει αυξημένη επιρροή στις περιπτώσεις μικρής αξονικής και/η μεγάλου ποσοστού οπλισμού. Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστούμε πως η μεταβλητότητα του κάθε υλικού έχει αυξημένη επιρροή στη ροπή αντοχής στις περιπτώσεις όπου το υλικό αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό δύναμης στη διατομή

2.3 Στοιχεία υπό διατμητική ένταση

Όπως αναφέρθηκε, η διατμητική αστοχία σε μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος συντελείται είτε από την αστοχία των οπλισμών διάτμησης (με πιθανότητα p_{fy}) είτε από την αστοχία των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος (με πιθανότητα p_{fc}). Για τον έλεγχο των πιθανοτήτων αστοχίας p_{fy} , p_{fc} άρα και της συνδυασμένης $p_f = 1 - (1 - p_{fy})(1 - p_{fc})$ απαιτείται η γνώση της διατμητικής αντίστασης της διατομής, δηλαδή ο προσδιορισμός των πιθανοτικών χαρακτηριστικών της αντοχής των οπλισμών διάτμησης και των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος.



Εικόνα 37: Προσομοίωμα θλιπτήρα – ελκυστήρα σε αμφιέριστη δοκό

1) Αντοχή οπλισμού διάτμησης

Θα εξεταστούν δύο είδη οπλισμών διάτμησης, οι συνδετήρες (που εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο) και ο δισδιαγώνιος οπλισμός, που απαιτείται υπο προϋποθέσεις:

Συνδετήρες:

$$VR_{d,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha$$

Θεωρώντας τυχαία μεταβλητή το όριο διαρροής του οπλισμού f_{yw} , η τυχαία μεταβλητή της αντοχής του οπλισμού διάτμησης είναι:

$$VR_{s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{yw} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \text{ δηλαδή από τις δύο σχέσεις έχουμε :}$$

$$VR_{s} = VR_{d,s} * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}$$

Υιοθετώντας τις υποθέσεις του κεφαλαίου 1 για την κατανομή του χάλυβα f_{yw} , έχουμε: $f_{ywk} = 500 \text{MPa}$,

$$f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.8 \text{MPa}, \text{ ενώ } f_{ywm} = \begin{cases} 544.8 \text{MPa}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 598.4 \text{MPa}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

$$\text{Και } \sigma_{fy} = \begin{cases} 27 \text{MPa}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 59.8 \text{MPa}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

Οπότε:

$$\frac{f_{ywm}}{f_{ywd}} = \begin{cases} 1.25, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 1.38, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases} \quad \frac{\sigma_{fy}}{f_{ywd}} = \begin{cases} 0.06, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 0.14, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

Άρα η αντοχή του οπλισμού διάτμησης VR_{s} είναι:

$$\text{mean}(VR_{s}) = \begin{cases} 1.25 * VR_{d,s}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 1.38 * VR_{d,s}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}, \quad \text{std}(VR_{s}) = \begin{cases} 0.06 * VR_{d,s}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 0.14 * VR_{d,s}, \text{ για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

Δισδιαγώνιος οπλισμός:

$$VR_{d,s} = 2 A_s f_{ywd} \sin \alpha$$

Θεωρώντας και εδώ τυχαία μεταβλητή το όριο διαρροής του δισδιαγώνιου οπλισμού f_{yw} , η τυχαία μεταβλητή της αντοχής του είναι:

$$VR_{s} = 2 A_s f_{yw} \sin \alpha$$

δηλαδή προκύπτει όπως και στους συνδετήρες: $VR_{s} = VR_{d,s} * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}$

Άρα η αντοχή του δισδιαγώνιου οπλισμού διάτμησης VR_{s} είναι:

$$\text{mean}(VR_{s}) = \begin{cases} 1.25 * VR_{d,s}, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 1.38 * VR_{d,s}, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}, \quad \text{std}(VR_{s}) = \begin{cases} 0.06 * VR_{d,s}, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 0.14 * VR_{d,s}, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

2) Αντοχή λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος

Όπως γνώριζουμε, η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας που αναλαμβάνει το στοιχείο (αστοχία λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος) είναι:

$$VR_{d,max} = a_{cw} b_{wz} v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta)$$

Θεωρώντας τυχαία μεταβλητή την αντοχή του σκυροδέματος f_c , η τυχαία μεταβλητή της αντοχής που αναλαμβάνει ο το στοιχείο είναι:

$$VR_{max} = a_{cw} b_{wz} v_1 f_c (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta)$$

$$\text{Οπότε } VR_{max} = VR_{d,max} * \frac{f_c}{f_{cd}}$$

Για $f_{ck} = 30 \text{MPa}$ είναι: $f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c \Rightarrow f_{cd} = 0.85 * 30 / 1.5 \Rightarrow f_{cd} = 17 \text{MPa}$

$$\text{Όπου } f_{cm} = \begin{cases} 35.9 \text{MPa}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \\ 44.7 \text{MPa}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.20 \end{cases} \quad \text{και } \sigma_{f_c} = \begin{cases} 3.6 \text{MPa}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \\ 8.9 \text{MPa}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.20 \end{cases}$$

Οπότε:

$$\frac{f_{cm}}{f_{cd}} = \begin{cases} 2.11, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \\ 2.63, & \text{για } COV_{f_c} = 0.20 \end{cases} \quad \frac{\sigma_{f_c}}{f_{cd}} = \begin{cases} 0.21, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \\ 0.52, & \text{για } COV_{f_c} = 0.20 \end{cases}$$

Άρα η αντοχή των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος VR_{max} είναι:

$$\text{mean}(VR_{max}) = \begin{cases} 2.11 * VR_{d,max}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.05 \\ 2.63 * VR_{d,max}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \end{cases}$$

$$\text{std}(VR_{max}) = \begin{cases} 0.21 * VR_{d,max}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.05 \\ 0.52 * VR_{d,max}, & \text{για } COV_{f_c} = 0.10 \end{cases}$$

Σχόλιο για αντοχή οπλισμού διάτμησης/αντοχή λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος:

Έγινε η υπόθεση πως η παράμετρος θ παραμένει στην τυχαία μεταβλητή της διατμητικής αντοχής (οπλισμών VR_{s} ή θλιπτήρων VR_{max}) ίση, όπως υπολογίζεται στον σχεδιασμό, αφού ως τυχαία μεταβλητή θεωρήθηκε μόνο το όριο διαρροής/θραύσης των υλικών f_{yw} και f_c . Ωστόσο, καθώς το

εύρος της συγκεκριμένης παραμέτρου είναι $21.8^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$, ανάλογα με τον σχεδιασμό που πραγματοποιείται, υπάρχει ενδεχομένως μεγάλο περιθώριο αύξησης της διατμητικής αντοχής. Για το λόγο αυτό, αν κρίνεται από τον μελετητή πως έχει γίνει συντηρητική επιλογή της παραμέτρου (π.χ. $\theta=45^{\circ}$), προτείνεται να προσαρμόσει την μέση τιμή του συντελεστή του προσομοιώματος (για την VR,s) στη συγκεκριμένη περίπτωση έως και $mean(\theta_R)=2$.

3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EN 1990 (ΕΞ. 6.10, 6.10Α, 6.10Β)

3.1 Σχεδιασμός με τις εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β

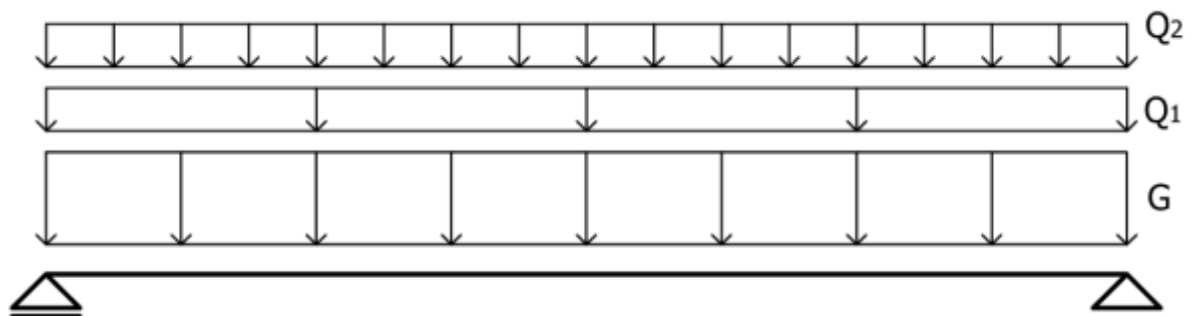
Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN1990 οι διάφορες δράσεις που ασκούνται σε οποιοδήποτε στοιχείο, συνδυάζονται προκειμένου να υπολογιστεί η δράση σχεδιασμού, είτε μέσω της εξίσωσης 6.10 είτε μέσω της υπέρθεσης των εξισώσεων 6.10α και 6.10β (δηλαδή το δυσμενέστερο από τα δύο αποτελέσματα). Στις εξισώσεις αυτές, εκτός από το ίδιο βάρος λαμβάνονται υπόψη και όλες οι δράσεις που ασκούνται στο υπό μελέτη στοιχείο (μια ως κύρια και οι υπόλοιπες ως δευτερεύουσες ώστε να προκύπτει το δυσμενέστερο αποτέλεσμα). Στον παρόν κεφάλαιο θεωρείται πως σε μια δοκό ασκούνται εκτός από τα ίδια βάρη G και δύο ωφέλιμα φορτία Q_1 και Q_2 Εικόνα 38: Φορτία G , Q_1 και Q_2 με τις εξισώσεις σχεδιασμού να διαμορφώνονται ως εξής:

$$E_d = \gamma_g G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \quad (6.10)$$

ή

$$\left\{ \begin{array}{l} E_d = \gamma_g G_k + \gamma_{Q1} \psi_{01} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \\ E_d = \xi \gamma_g G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \end{array} \right. \quad (6.10\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_d = \gamma_g G_k + \gamma_{Q1} \psi_{01} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \\ E_d = \xi \gamma_g G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \end{array} \right. \quad (6.10\beta)$$



Εικόνα 38: Φορτία G , Q_1 και Q_2 σε αμφιέρειστη δοκό

Παρατηρούμε πως το αποτέλεσμα E_d που προκύπτει από τις εξισώσεις σχεδιασμού εκφράζει δράση, όπως και οι τιμές G_k , Q_{k1} , Q_{k2} , και επειδή στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε σε έλεγχο αξιοπιστίας

δοκού, οι δράσεις αυτές θα εκφράζονται δύναμη ανά τρέχον μέτρο δοκού (έστω kN/m), δηλαδή $E_d \equiv P_{Ed}$ (kN/m)

Θέτουμε $\chi = \frac{Q_{k1} + Q_{k2}}{G_k + Q_{k1} + Q_{k2}}$ και $\kappa = \frac{Q_{k2}}{Q_{k1}} \Rightarrow Q_{k2} = \kappa Q_{k1}$, οπότε:

$$\chi = \frac{Q_{k1} + \kappa Q_{k1}}{G_k + Q_{k1} + \kappa Q_{k1}} \Rightarrow G_k \chi + Q_{k1} \chi + \kappa Q_{k1} \chi = Q_{k1} + \kappa Q_{k1} \Rightarrow Q_{k1} = \frac{G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)}, Q_{k2} = \frac{\kappa G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)}$$

Επίλυση της 6.10:

$$6.10 \rightarrow Y_g G_k + Y_{Q1} Q_{k1} + Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa Q_{k2} = P_{Ed} \Rightarrow Y_g G_k + \frac{Y_{Q1} G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} = P_{Ed}$$

A) Για τον σχεδιασμό της ροπής αντοχής η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] = P_{Ed} a^*, \text{ όπου } a^* = \begin{cases} \frac{l^2}{8}, & \text{για ροπή άνοιγματος αμφιέριστης} \\ \frac{l^2}{12}, & \text{για ροπή στήριξης αμφίπακτης} \\ f(l), & \text{γενικά για κάθε περίπτωση} \end{cases}$$

$$a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] = M_{Ed}, \text{ και αν ορίσουμε } \lambda_M = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \geq 1 \text{ έχουμε:}$$

$$M_{Rd} = \lambda_M a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] \quad 6.10$$

B) Για τον σχεδιασμό της αντίστασης έναντι τέμνουσας έχουμε:

$$a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] = P_{Ed} a^*, \text{ όπου } a^* = \begin{cases} \frac{l}{2}, & \text{για τέμνουσα αμφιέριστης,} \\ f(l), & \text{γενικά για κάθε περίπτωση} \end{cases} \text{ οπότε:}$$

$$a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] = V_{Ed}, \text{ και αν ορίσουμε } \lambda_V = \frac{V_{Rd}}{V_{Ed}} \geq 1 \text{ έχουμε:}$$

$$V_{Rd} = \lambda_V a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] \quad 6.10$$

Δηλαδή γενικά:

$$R_d = \lambda a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] \quad 6.10$$

Και ομοίως για τις άλλες δύο εξισώσεις έχουμε:

$$R_d = \lambda a^* G_k \left[Y_g + \frac{Y_{Q1} \Psi_{01} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] \quad 6.10\alpha$$

$$R_d = \lambda a^* G_k \left[\xi Y_g + \frac{Y_{Q1} \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{Y_{Q2} \Psi_{02} \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right] \quad 6.10\beta$$

Στο εξής οι σχέσεις αυτές θα γράφονται:

$$R_d = \lambda a^* G_k [6.10/6.10\alpha/6.10\beta]$$

Όπου $\mathbf{R}_d = \begin{cases} \mathbf{V}_{Rd}, & \text{για σχεδιασμό έναντι τέμνουσας} \\ \mathbf{M}_{Rd}, & \text{για σχεδιασμό έναντι ροπής} \end{cases}$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_V = \frac{V_{Rd}}{V_{Ed}} \geq 1, & \text{για σχεδιασμό έναντι τέμνουσας} \\ \lambda_M = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \geq 1, & \text{για σχεδιασμό έναντι ροπής} \end{cases}$$

Προσδιορισμός συνθηκών ώστε Q_{k1} το κύριο φορτίο και Q_{k2} το δευτερεύων:

Κατά τον σχεδιασμό, το κύριο και το δευτερεύων φορτίο αντιμετωπίζονται διαφορετικά στις εξισώσεις 6.10 και 6.10β, καθώς υπεισέρχεται ο μειωτικός συντελεστής ψ στο δευτερεύων φορτίο. Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη κατάσταση όπως ορίζει ο κανονισμός, οφείλει ο μελετητής να εξετάσει όλες τις περιπτώσεις ώστε να καταλήξει για το ποιο φορτίο πρέπει να θεωρηθεί κύριο και ποιο δευτερεύων. Στο κεφάλαιο αυτό θα θεωρήσουμε κύριο φορτίο το Q_{k1} , που για να ισχύει ο ισχυρισμός πρέπει:

(6.10) με Q_{k1} κύριο φορτίο > (6.10) με Q_{k2} κύριο φορτίο

$$Y_g G_k + Y_{Q1} Q_{k1} + Y_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} > Y_g G_k + Y_{Q2} Q_{k2} + Y_{Q1} \psi_{01} Q_{k1}$$

$$Y_{Q1} Q_{k1} + Y_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} > Y_{Q2} Q_{k2} + Y_{Q1} \psi_{01} Q_{k1}$$

$$Y_{Q1} (1 - \psi_{01}) > Y_{Q2} \kappa (1 - \psi_{02})$$

$$\kappa < \frac{Y_{Q1} (1 - \psi_{01})}{Y_{Q2} (1 - \psi_{02})}, \text{ και επειδή από τον κανονισμό προτείνεται } Y_{Q1} = Y_{Q2} = 1.5 \text{ έχουμε:}$$

$$\kappa < \frac{(1 - \psi_{01})}{(1 - \psi_{02})}$$

Αν επιλέξουμε $\psi_{01} = \psi_{02} = 0.7$ που είναι η συνηθέστερη τιμή για φορτία κτηρίων προκύπτει $\kappa < 1$.

Θα μπορούσαμε να εξετάσουμε και την συνθήκη: (6.10β) με Q_{k1} κύριο φορτίο > (6.10β) με Q_{k2} κύριο φορτίο, από όπου θα προέκυπτε ίδιο αποτέλεσμα.

Συμπέρασμα: Για $\kappa < 1$ ο δυσμενέστερος σχεδιασμός προκύπτει όταν το Q_{k1} είναι το κύριο φορτίο και Q_{k2} το δευτερεύων.

Στον Πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές των πιο πάνω συντελεστών που εκλέχτηκαν σύμφωνα με τον EN1990:

Πίνακας 37: Συντελεστές που λήφθησαν υπόψη στις εξισώσεις σχεδιασμού

Συντελεστές	Y_g	Y_{Q1}	Y_{Q2}	ψ_{01}	ψ_{02}	ξ	κ	χ
Τιμές	1.35	1.5	1.5	0.7	0.7	0.85	0, 0.5	(0,1)

3.2 Πιθανοτικά Χαρακτηριστικά δρώντων μεγεθών

Σημειώνεται πως τα δρώντα μεγέθη G , Q_1 και Q_2 αναφέρονται στις σχετικές επιδράσεις των ιδίων βαρών, του κύριου και του δευτερεύοντος ωφέλιμου φορτίου στο υπό εξέταση δομικό στοιχείο και εξαρτώνται από τη φόρτιση, το στατικό σύστημα, τη γεωμετρία του στοιχείου κλπ.

Λαμβάνοντας υπόψη τα κεφάλαια 1.3.1 Ιδιο βάρος και 1.3.2 Ωφέλιμα φορτία, οι κατανομές των G , Q_1 και Q_2 που θεωρούνται στο κεφάλαιο αυτό θα έχουν τα χαρακτηριστικά που δηλώνονται στον Πίνακα 38

Πίνακας 38: Πιθανοτικά χαρακτηριστικά των δράσεων G , Q_1 και Q_2

Μεταβλητή	Κατανομή	Μεταβλητότητα (Covariance $COV=\mu/\sigma$)	$Z \rightarrow$ Πιθανότητα $F(X_k)$
Ίδια βάρη G (kN/m)	Normal	0.10	$0 \rightarrow 0.5$
Κινητό φορτίο Q_1 (kN/m)	Gumbell	0.35	$1.8658 \rightarrow 0.95$
Κινητό φορτίο Q_2 (kN/m)	Gumbell	0.40	$2.5923 \rightarrow 0.98$

Όπου στην τελευταία στήλη αναγράφεται η τιμή Z που εκφράζει την απόσταση της μέσης από την χαρακτηριστική τιμή με μονάδα μέτρησης την τυπική απόκλιση, αλλά και η πιθανότητα $F(X_k)$ να εμφανιστούν τιμές μικρότερες από την χαρακτηριστική (δηλαδή $F(Z)$ αν αναφερόμαστε σε τυποποιημένες κατανομές).

Εκφράζοντας αφενός τις σχέσεις μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης με την χαρακτηριστική τιμή:

$$\text{mean}(X) = \frac{X_k}{1 + Z_X \cdot COV_X}$$

$$\text{std}(X) = COV_X \cdot \text{mean}(X) \Rightarrow \text{std}(X) = \frac{COV_X \cdot X_k}{1 + Z_X \cdot COV_X}$$

και αφετέρου τις σχέσεις μεταξύ των G , Q_1 και Q_2 εισάγοντας τις παραμέτρους χ , κ (ώστε να εκφράζονται όλες οι δράσεις συναρτήσει του ίδιου βάρους G):

$$Q_{k1} = \frac{G_k \chi}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

$$Q_{k2} = \frac{\kappa G_k \chi}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

Τα πιθανοτικά χαρακτηριστικά των δρώντων μεγεθών είναι:

Ίδια βάρη G :

$$\text{mean}(G) = \frac{G_k}{1 + Z_G \cdot COV_G} = G_k$$

$$\text{std}(G) = COV_G \cdot G_k = 0.10 G_k$$

Ωφέλιμο φορτίο Q_1 :

$$\text{mean}(Q_1) = \frac{Q_{k1}}{1 + Z_{Q1} \cdot COV_{Q1}} = \frac{\chi G_k}{(1 + Z_{Q1} \cdot COV_{Q1})(1 + \kappa)(1 - \chi)} = \frac{0.6 \chi G_k}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

$$\text{std}(Q_1) = COV_{Q1} \cdot \text{mean}(Q_1) = \frac{0.21 \chi G_k}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

Ωφέλιμο φορτίο Q_2 :

$$\text{mean}(Q_2) = \frac{Q_{k2}}{1 + Z_{Q2} \cdot COV_{Q2}} = \frac{\kappa \chi G_k}{(1 + Z_{Q2} \cdot COV_{Q2})(1 + \kappa)(1 - \chi)} = \frac{0.5 \kappa \chi G_k}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

$$\text{std}(Q_2) = COV_{Q2} \cdot \text{mean}(Q_2) = \frac{0.2 \kappa \chi G_k}{(1 + \kappa)(1 - \chi)}$$

3.3 Μόρφωση εξίσωσης αποχίας $g(X)=0$

Θεωρώντας πως στη δοκό της Εικόνα 38: Φορτία G , Q_1 και Q_2 σε αμφιέριστη δοκό

- 1) ασκούνται οι δράσεις G , Q_1 και Q_2 που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 3.2,
- 2) Η αντοχή της είναι R (είτε καμπτική M_R , είτε διατμητική V_R) και αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2
- 3) θ_R , θ_E είναι οι συντελεστές των προσομοιωμάτων αντίστασης και δράσης αντίστοιχα, που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 1.3.4 προκύπτει:

$$g = \theta_R * R - \theta_E * E \Rightarrow g = \theta_R * R - \theta_E * (G + Q_1 + Q_2) a^* \Rightarrow \frac{g}{(G_k a^*)} = \theta_R \frac{R}{(G_k a^*)} - \theta_E \left(\frac{G}{G_k} + \frac{Q_1}{G_k} + \frac{Q_2}{G_k} \right)$$

$$g' = \theta_R * R' - \theta_E * (G' + Q_1' + Q_2')$$

Όπου:

$$R' = \frac{R}{(G_k a^*)} \text{ οπότε:}$$

$$\text{mean}(R') = \frac{\text{mean}(R)}{(G_k a^*)} = \frac{\text{mean}(R)}{R_d} \frac{R_d}{(G_k a^*)} = \frac{\text{mean}(R)}{R_d} \frac{\lambda a^* G_k [6.10/6.10\alpha/6.10\beta]}{(G_k a^*)}$$

$$\text{mean}(R') = \lambda \frac{\text{mean}(R)}{R_d} [6.10/6.10\alpha/6.10\beta]$$

$$\text{std}(R') = \lambda \frac{\text{std}(R)}{R_d} [6.10/6.10\alpha/6.10\beta]$$

$$G' = \frac{G}{G_k} \text{ οπότε:}$$

$$\text{mean}(G') = \frac{\text{mean}(G)}{G_k} = 1$$

$$\text{std}(G') = \frac{\text{std}(G)}{G_k} = 0.10$$

$$Q_1' = \frac{Q_1}{G_k} \text{ οπότε:}$$

$$\text{mean}(Q_1') = \frac{\text{mean}(Q_1)}{G_k} = \frac{0.6x}{(1+\kappa)(1-\chi)}$$

$$\text{std}(Q_1') = \frac{\text{std}(Q_1)}{G_k} = \frac{0.21x}{(1+\kappa)(1-\chi)}$$

$$Q_2' = \frac{Q_2}{G_k} \text{ οπότε:}$$

$$\text{mean}(Q_2') = \frac{\text{mean}(Q_2)}{G_k} = \frac{0.5 \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)}$$

$$\text{std}(Q_2') = \frac{\text{std}(Q_2)}{G_k} = \frac{0.2 \kappa \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)}$$

θ_R :

$$\text{mean}(\theta_R) = 1$$

$$\text{std}(\theta_R) = 0.07$$

θ_E :

$$\text{mean}(\theta_E) = 1$$

$$\text{std}(\theta_E) = 0.10$$

Σχόλια - Παρατηρήσεις:

- 1) Δεν υπεισέρχεται σε κανένα όρο της εξίσωσης g' η παράμετρος a^* που δηλώνει το είδος του στατικού συστήματος της δοκού (αμφιέριστη/ αμφίπακτη/ συνεχής δοκός πολλών ανοιγμάτων κλπ.) και το είδος του ελέγχου για καμπτική ή διατμητική καταπόνηση, δηλαδή η αξιοπιστία της δοκού είναι ανεξάρτητη της στατικής της λειτουργίας.
- 2) Τα μεγέθη που απαρτίζουν την εξίσωση g' είναι όλα σε ανηγμένη μορφή, δηλαδή δεν επηρεάζεται η αξιοπιστία της δοκού από την κλίμακα των μεγεθών των δράσεων και των αντιστάσεων αλλά από τις σχέσεις που αυτά έχουν μεταξύ τους (και που περιγράφονται με τους όρους χ , κ , λ , R/R_d).
- 3) Η εξίσωση g' δεν είναι γραμμική συνάρτηση των 6 τυχαίων μεταβλητών (θ_R , θ_E , G' , Q_1' , Q_2' , R'), οι οποίες δεν είναι όλες κανονικές μεταβλητές, συνεπώς όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 1.2.3, προκειμένου να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας β , γραμμικοποιούμε την επιφάνεια αστοχίας στο σημείο σχεδιασμού (μέθοδος FORM).
- 4) Η διαφοροποίηση μεταξύ κάμψης και διάτμησης στα αποτελέσματα της αξιοπιστίας που αναμένονται έγκειται στην διαφοροποίηση του όρου R/R_d μεταξύ κάμψης και διάτμησης (όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του R/R_d εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 2).

ΠΡΟΣΟΧΗ: Η εξίσωση $g'(X)$ είναι διαφορετική από την $g(X)$, αλλά επειδή ενδιαφερόμαστε για την πιθανότητα $P(g < 0)$ που ταυτίζεται με την $P(g' < 0)$, η διερεύνηση της g' αντί της g δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.

3.4 Αξιοπιστία δοκού οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη

Για την γραμμικοποίηση της επιφάνειας αστοχίας και τον υπολογισμό του συντελεστή β , πρέπει να γνωρίζουμε τις τιμές της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης κάθε μεταβλητής. Όσον αφορά τις μεταβλητές θ_R , θ_E , G' γνωρίζουμε τις ακριβείς τιμές τους, για τις Q_1' , Q_2' γνωρίζουμε την τιμή τους αλλά συναρτήσει των παραμέτρων χ , κ , και τέλος οι παράμετροι της αντοχής R' εξαρτώνται από διάφορες μεταβλητές που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

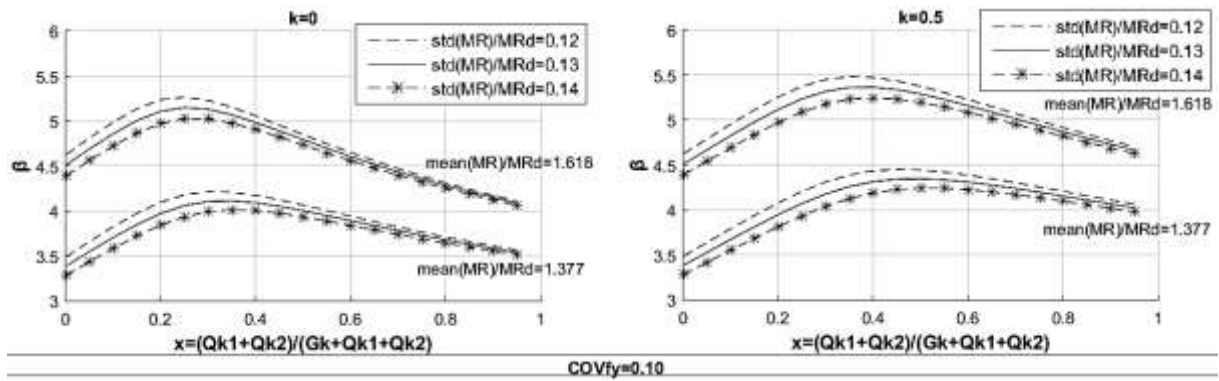
Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.2.1 Δοκοί (αξονική $v=0$), οι λόγοι $\text{mean}(MR)/MR_d$ και $\text{std}(MR)/MR_d$ που εμφανίζονται ως παράμετροι στην μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της αντοχής R' στην εξίσωση αστοχίας, παίρνουν συγκεκριμένες τιμές. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 21 και Πίνακα 22 (σελ 30), έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(MR)}{MR_d} = [0.12 - 0.14] \approx 0.13 \text{ και } 1.377 \leq \frac{\text{mean}(MR)}{MR_d} \leq 1.618, \text{ για } COV_{fy}=0.10 \\ \frac{\text{std}(MR)}{MR_d} = [0.06 - 0.08] \approx 0.07 \text{ και } 1.255 \leq \frac{\text{mean}(MR)}{MR_d} \leq 1.500, \text{ για } COV_{fy}=0.05 \end{array} \right.$$

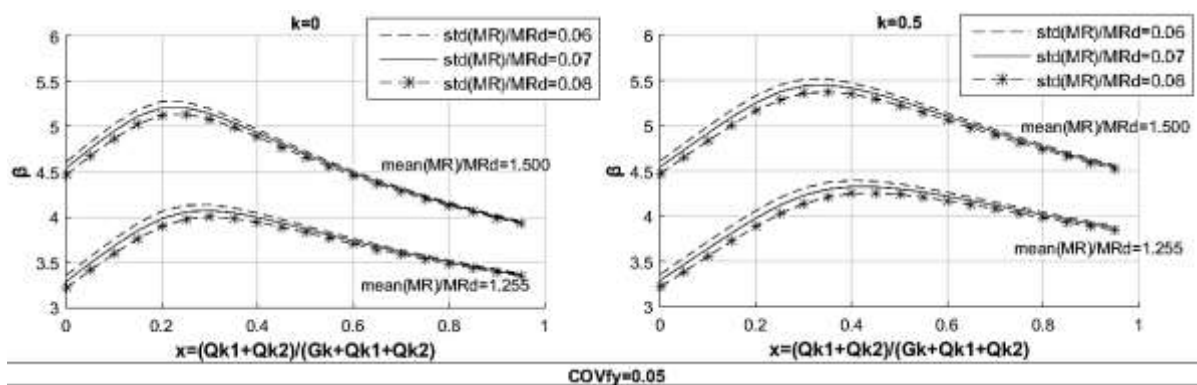
A) Εξίσωση 6.10

Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω περιπτώσεις που καλύπτουν το συνολικό εύρος των τιμών $\text{mean}(MR)/MR_d$ και $\text{std}(MR)/MR_d$. Όπως γίνεται φανερό, το εύρος τιμών της παραμέτρου $\text{std}(MR)/MR_d$ δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα αξιοπιστίας και κρίνεται λογική η προσέγγισή της με μία τιμή ($\text{std}(MR)/MR_d=0.13$ ή $\text{std}(MR)/MR_d=0.07$)

Για το λόγο αυτό, δεν θα εξετάζονται κάθε φορά οι τρεις τιμές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 39 και Εικόνα 40, αλλά η ενδιάμεσή τους.



Εικόνα 39: Αξιοπιστία δοκού σε κάμψη, με συντελεστή μεταβλητότητας χάλυβα $COV_{fy}=0.10$ και για κινητά φορτία με $k=0$ και $k=0.5$



Εικόνα 40: Αξιοπιστία δοκού σε κάμψη υπό την εξίσωση 6.10, με συντελεστή μεταβλητότητας χάλυβα $COV_{fy}=0.05$ και για κινητά φορτία με $k=0$ και $k=0.5$

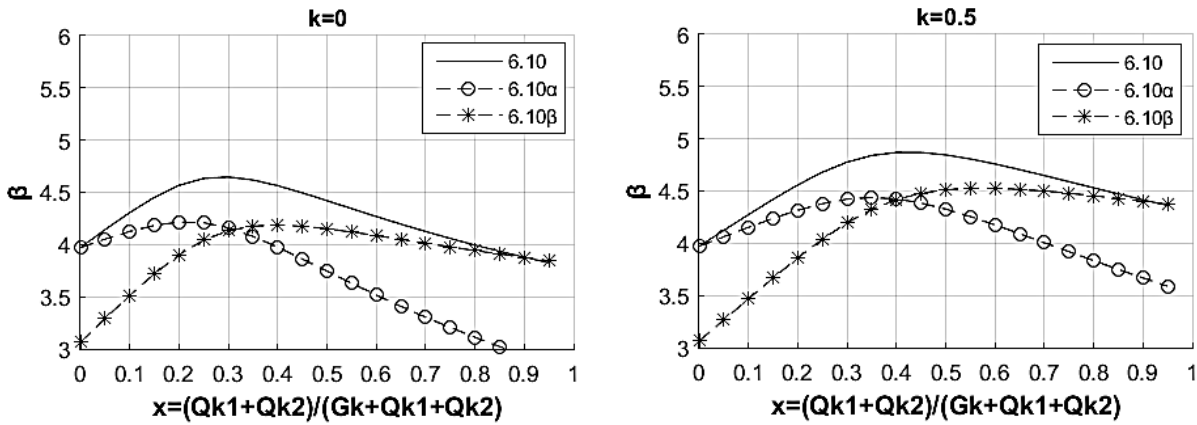
Σχόλια – Συμπεράσματα:

- 1) Μια δοκός οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζει κυμαινόμενο βαθμό αξιοπιστίας με τις ακραίες τιμές του συντελεστή αξιοπιστίας να είναι: $\beta_{\min} \approx 3.2$ και $\beta_{\max} \approx 5.5$. Σε αυτήν την απόκλιση συμβάλλουν κυρίως τα χαρακτηριστικά της δοκού (ποσοστά οπλισμού ω_1, ω_2 κλπ), που καθορίζουν την παράμετρο $\text{mean}(MR)/MR_d$ (κεφάλαιο 2.2.1 Δοκοί (αξονική $v=0$)) και ο λόγος των κινητών προς τα συνολικά φορτία.
- 2) Ο συντελεστής μεταβλητότητας του χάλυβα, ενώ επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις τιμές $\text{mean}(MR)/MR_d$ και $\text{std}(MR)/MR_d$, λόγω της 'ομοιόμορφης' μεταβολής τους δεν μεταβάλλει τελικά την αξιοπιστία της δοκού (αφού δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ της Εικόνα 39 και Εικόνα 40).

Β) Εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β

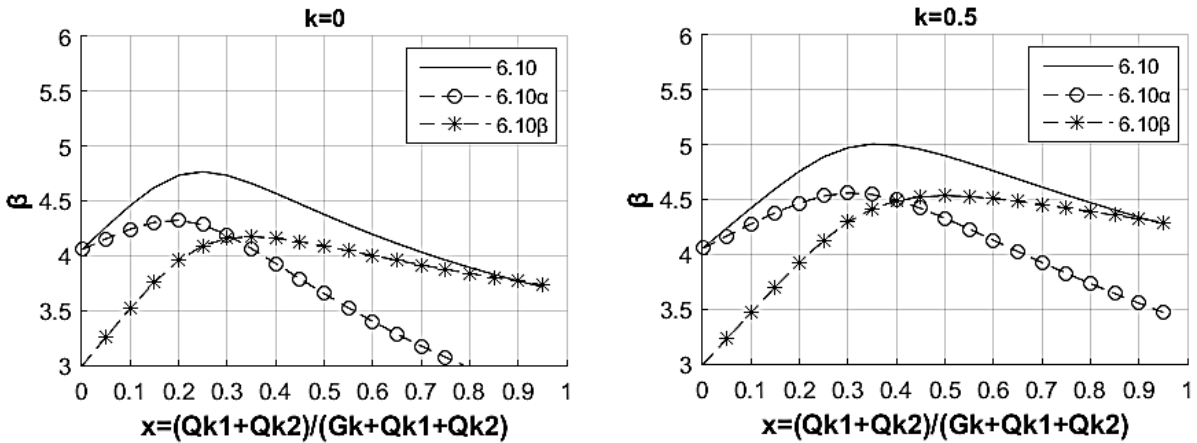
Στη συνέχεια παρουσιάζονται και οι τρεις εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β με κάποιες 'ενδιάμεσες' τιμές των παραμέτρων ώστε να παρουσιαστεί η διαφοροποίηση της εξίσωσης 6.10 με το ζεύγος των εξισώσεων 6.10α και 6.10β. Όπως στο παράδειγμα αυτό, ομοίως προκύπτουν τα διαγράμματα των 6.10α και 6.10β για όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν για την εξίσωση 6.10.

A) $\text{mean}(\text{MR})/\text{MR}_d=1.5$ και $\text{std}(\text{MR})/\text{MR}_d=0.13$ (ενδιάμεσες τιμές για $\text{COV}_{fy}=0.10$)



Εικόνα 41: Περίπτωση Α) για αξιοπιστία δοκού σε κάμψη υπό τις εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β

B) $\text{mean}(\text{MR})/\text{MR}_d=1.4$ και $\text{std}(\text{MR})/\text{MR}_d=0.07$ (ενδιάμεσες τιμές για $\text{COV}_{fy}=0.05$)



Εικόνα 42: Περίπτωση Β) για αξιοπιστία δοκού σε κάμψη υπό τις εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β

Για την τετμημένη του σημείου τομής των 6.10α και 6.10β, δηλαδή την τιμή $\chi=\chi_{lim}$ έχουμε:

$$\chi < \chi_{lim} \rightarrow (6.10\alpha) > (6.10\beta)$$

$$\chi > \chi_{lim} \rightarrow (6.10\alpha) < (6.10\beta)$$

Και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής (για Q_{k1} ως κύριο φορτίο):

$$(6.10\alpha) \geq (6.10\beta) \Rightarrow$$

$$Y_g G_k + Y_{Q1} \psi_{01} Q_{k1} + Y_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \geq \xi Y_g G_k + Y_{Q1} Q_{k1} + Y_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} \Rightarrow$$

$$Y_g G_k (1-\xi) \geq \frac{Y_{Q1} G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} - \frac{Y_{Q1} \psi_{01} G_k \chi}{(1+\kappa)(1-\chi)} \Rightarrow$$

$$Y_g (1-\xi) \geq Y_{Q1} \frac{\chi}{(1-\chi)} \frac{(1-\psi_{01})}{(1+\kappa)} \Rightarrow$$

$$\frac{\chi}{(1-\chi)} \geq \frac{Y_{Q1} (1-\psi_{01})}{Y_g (1-\xi)(1+\kappa)} \Rightarrow$$

$$X \leq \frac{\gamma_g(1-\xi)(1+\kappa)}{\gamma_g(1-\xi)(1+\kappa) + \gamma_{Q1}(1-\psi_{01})}, \text{ δηλαδή } \chi_{\text{lim}} = \frac{\gamma_g(1-\xi)(1+\kappa)}{\gamma_g(1-\xi)(1+\kappa) + \gamma_{Q1}(1-\psi_{01})}$$

όπου για $\kappa=0$, $\gamma_g=1.35$, $\gamma_{Q1}=1.5$, $\xi=0.85$ και $\psi_{01}=0.7$ είναι $\chi_{\text{lim}}=0.31$

ενώ για $\kappa=0.5$, $\gamma_g=1.35$, $\gamma_{Q1}=1.5$, $\xi=0.85$ και $\psi_{01}=0.7$ είναι $\chi_{\text{lim}}=0.40$

Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν τα γραφήματα της Εικόνα 41 και της Εικόνα 42.

Σχόλια – Συμπεράσματα:

- 1) Ο συνδυασμός των εξισώσεων 6.10α και 6.10β αντί της 6.10 οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή β (άρα μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας) αλλά με μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς τη μεταβλητή x (λόγος των κινητών προς τα συνολικά φορτία).
- 2) Επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα πως ο συντελεστής μεταβλητότητας του χάλυβα COV_{fy} ενώ επηρεάζει τις παραμέτρους $mean(MR)/MR_d$ και $std(MR)/MR_d$, δεν έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της αξιοπιστίας της δοκού.

Παράδειγμα 1: Διαφοροποίηση της εξίσωσης 6.10 με τις 6.10α και 6.10β

Έστω ότι σχεδιάζεται δοκός έναντι κάμψης με τα φορτία G_k , Q_{k1} , Q_{k2} με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\text{λόγο κινητών φορτίων προς συνολικά: } \chi = \frac{Q_{k1} + Q_{k2}}{G_k + Q_{k1} + Q_{k2}} = 0.4, \text{ και λόγο κινητών: } \kappa = \frac{Q_{k2}}{Q_{k1}} = 0.5$$

Έστω ότι διαστασιολογείται με ποσοστά οπλισμού $\omega_1=0.6$, $\omega_2=0.1$, $d1/d=0.10$ (και ότι η μεταβλητότητα του χάλυβα είναι $COV_{fy}=0.05$), για τα οποία από τον Πίνακα 13 Πίνακα 14 έχουμε $mean(MR)/MR_d=1.4$ και $std(MR)/MR_d=0.07$. Οποιαδήποτε άλλη διαστασιολόγηση που να καταλήγει σε αυτές τις τιμές $mean(MR)/MR_d$ και $std(MR)/MR_d$ θα οδηγεί σε ίδια αποτελέσματα με αυτή.

Διαφοροποίηση στην αξιοπιστία:

Στην Εικόνα 42 που αντιστοιχεί στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η διαστασιολόγηση με την εξίσωση 6.10 δίνει συντελεστή $\beta=5.0$ (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας $p_f=5 \cdot 10^{-7}$), ενώ με τον συνδυασμό των 6.10α και 6.10β (όπου για $\chi=0.4$ συμπίπτουν) προκύπτει $\beta=4.5$ (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας $p_f=5 \cdot 10^{-6}$) (βλ Πίνακα 1: Συσχέτιση συντελεστή αξιοπιστίας β με πιθανότητα αστοχίας p_f).

Διαφοροποίηση στον σχεδιασμό:

Η διαφορά αυτή στην 'ασφάλεια' μεταξύ των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων προκύπτει από τη διαφορά στη τιμή σχεδιασμού η οποία είναι:

$$\frac{M_{Rd}(6.10)}{M_{Rd}(6.10\alpha/\beta)} = \frac{\lambda_M a^* G_k \left[\gamma_g + \frac{\gamma_{Q1} X}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{\gamma_{Q2} \psi_{02} \kappa X}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right]}{\lambda_M a^* G_k \left[\xi \gamma_g + \frac{\gamma_{Q1} X}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{\gamma_{Q2} \psi_{02} \kappa X}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right]} = \frac{\left[\gamma_g + \frac{\gamma_{Q1} X}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{\gamma_{Q2} \psi_{02} \kappa X}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right]}{\left[\xi \gamma_g + \frac{\gamma_{Q1} X}{(1+\kappa)(1-\chi)} + \frac{\gamma_{Q2} \psi_{02} \kappa X}{(1+\kappa)(1-\chi)} \right]}, \text{ οπότε:}$$

$$\frac{M_{Rd}(6.10)}{M_{Rd}(6.10\alpha/\beta)} = \frac{\left[1.35 + \frac{(1.5)(0.4)}{(1+0.5)(1-0.4)} + \frac{(1.5)(0.7)(0.5)(0.4)}{(1+0.5)(1-0.4)} \right]}{\left[(0.85)(1.35) + \frac{(1.5)(0.4)}{(1+0.5)(1-0.4)} + \frac{(1.5)(0.7)(0.5)(0.4)}{(1+0.5)(1-0.4)} \right]} = \frac{2.25}{2.0475} \approx 1.1$$

$$M_{Rd}(6.10)=1.1 M_{Rd}(6.10\alpha/\beta)\Rightarrow[\mu_{Rd}*(b d^2 f_{cd})]_{6.10} = 1.1 [\mu_{Rd}*(b d^2 f_{cd})]_{6.10\alpha/\beta}$$

Εναλλακτικοί τρόποι υλοποίησης του σχεδιασμού:

- 1) Αν θεωρήσουμε ότι μεταβάλλεται μόνο το στατικό ύψος της δοκού d (δηλαδή σταθερά τα μεγέθη ω_1 , ω_2 , d_1/d και b άρα και $\mu_{Rd}(6.10)=\mu_{Rd}(6.10\alpha/\beta)$) θα έχουμε: $d_{6.10}^2=1.1 d_{6.10\alpha/\beta}^2$
 $\Rightarrow d_{6.10}=1.049 d_{6.10\alpha/\beta}$ και κατά συνέπεια προκύπτει $As_{6.10}=1.049 As_{6.10\alpha/\beta}$
- 2) Αλλιώς αν μεταβάλλεται μόνο το πλάτος b (που είναι λιγότερο αποτελεσματικό) έχουμε: $b_{6.10}=1.1 b_{6.10\alpha/\beta}$ και κατά συνέπεια $As_{6.10}=1.1 As_{6.10\alpha/\beta}$

Συμπέρασμα παραδείγματος 1:

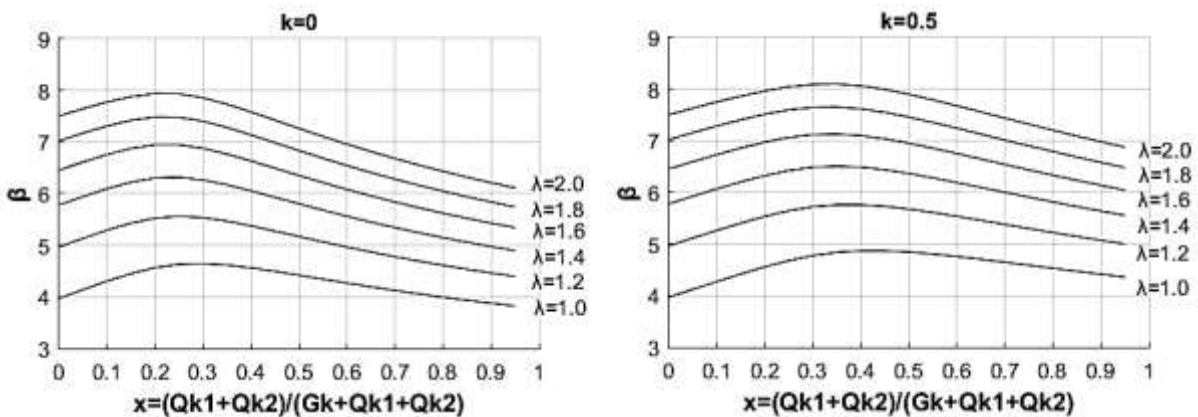
Τελικά ο σχεδιασμός της δοκού με την εξίσωση 6.10 απαιτεί

- A) 5% μεγαλύτερο στατικό ύψος d και 5% περισσότερο οπλισμό As (θλιβόμενο και εφελκόμενο) ή
 - B) 10% μεγαλύτερο πλάτος b και 10% περισσότερο οπλισμό As (θλιβόμενο και εφελκόμενο),
- απ'ότι με τον συνδυασμό των εξισώσεων 6.10α και 6.10β, ενώ εξασφαλίζει $\beta=5.0$ (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας $p_f=5*10^{-7}$) έναντι $\beta=4.5$ (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας $p_f=5*10^{-6}$).

Παράδειγμα 2: Διαμόρφωση συντελεστή αξιοπιστίας β λόγω 'υπερδιαστασιολόγησης'

Θεωρούμε ως παράδειγμα την περίπτωση A) $\underline{mean(MR)/MR_d=1.5}$ και $\underline{std(MR)/MR_d=0.13}$ (που εξετάστηκε παραπάνω, θεωρώντας πως προέκυψε από κάποιο συνδυασμό ω_1 , ω_2 κλπ).

Αν η διαστασιολόγηση που πραγματοποιείται δεν προκύπτει από την ελάχιστη δυνατή τιμή της ροπής σχεδιασμού (δηλαδή $MR_d=ME_d$), αλλά υπάρχει και ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας (όπως γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις), δηλαδή $MR_d=\lambda*ME_d$, τότε η αξιοπιστία της δοκού διαμορφώνεται διαφορετικά, ανάλογα με το ποσοστό υπερδιαστασιολόγησης λ , όπως φαίνεται από τις παραμέτρους της αντοχής R' στην εξίσωση αστοχίας. Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση αυτή για την εξίσωση 6.10 και για $\lambda=[1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0]$



Εικόνα 43: Συντελεστής αξιοπιστίας β για $\underline{mean(MR)/MR_d=1.5}$ και $\underline{std(MR)/MR_d=0.13}$ με λόγο υπερδιαστασιολόγησης λ

Ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους των τυχαίων μεταβλητών Q_1 και Q_2

Στους υπολογισμούς της αξιοπιστίας της δοκού σε κάμψη που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν οι 'αναμενόμενες' τιμές των πιθανοτικών χαρακτηριστικών των τυχαίων μεταβλητών Q_1 και Q_2 . Κρίνεται απαραίτητο να διεξαχθεί ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές των πιθανοτικών χαρακτηριστικών των μεταβλητών και συγκεκριμένα του συντελεστή μεταβλητότητας COV_Q , ώστε να διευκρινιστεί το εύρος διακύμανσης της αξιοπιστίας.

1) Κινητά φορτία Q_1, Q_2 :

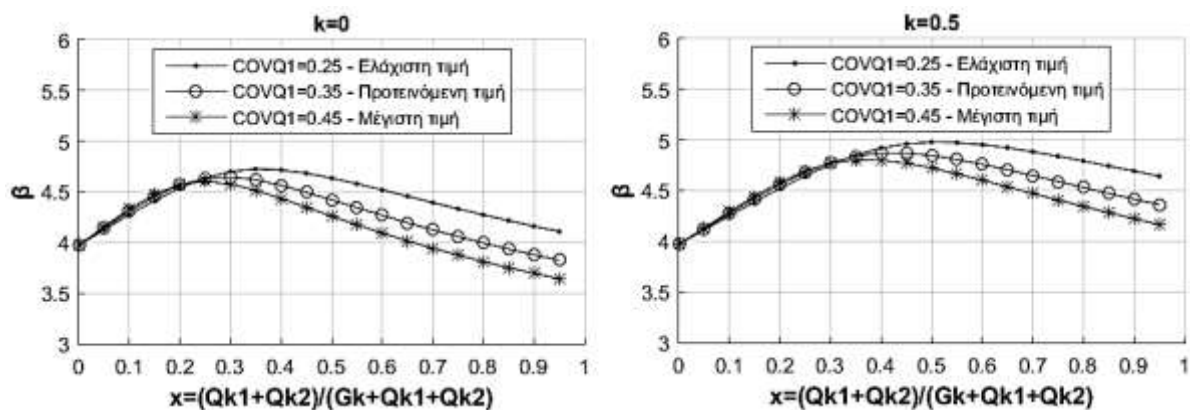
Μεταβάλλοντας τις τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας των κινητών φορτίων, (αλλά θεωρώντας σταθερό το ποσοστμόριο που εκφράζουν οι χαρακτηριστικές τιμές τους) εξετάζονται οι εξής περιπτώσεις:

Πίνακας 39: Τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας COV_Q κινητών φορτίων για ανάλυση ευαισθησίας

Φορτίο	Συντελεστής μεταβλητότητας (Covariance)	Προτεινόμενη τιμή συντελεστή μεταβλητότητας (που παρουσιάστηκε)	Ελάχιστη τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας	Μέγιστη τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας
Q_1	COV_{Q1}	0.35	0.25	0.45
Q_2	COV_{Q2}	0.40	0.25	0.45

1) Ανάλυση ευαισθησίας κινητού φορτίου Q_1

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξιοπιστίας για $k=0$ και $k=0.5$ υπό την εξίσωση 6.10, για την περίπτωση Α) $\text{mean}(MR)/MR_d=1.5$ και $\text{std}(MR)/MR_d=0.13$ (που εξετάστηκε παραπάνω), με τις τρεις τιμές του συντελεστή COV_{Q1} (προτεινόμενη, ελάχιστη και μέγιστη από Πίνακας 39) ενώ οι υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων των τυχαίων μεταβλητών παραμένουν όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3.



Εικόνα 44: Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή μεταβλητότητας κινητού φορτίου Q_1

Σχόλια – Συμπεράσματα:

Η διαφοροποίηση του συντελεστή αξιοπιστίας με τη μεταβολή του συντελεστή μεταβλητότητας COV_{Q1} είναι μηδενική για τις περιπτώσεις που κυριαρχούν τα μόνιμα φορτία ($x < 0.3$), αλλά δεν κρίνεται μεγάλη ούτε για τις περιπτώσεις όπου κυριαρχούν τα κινητά.

2) Ανάλυση ευαισθησίας κινητού φορτίου Q_2

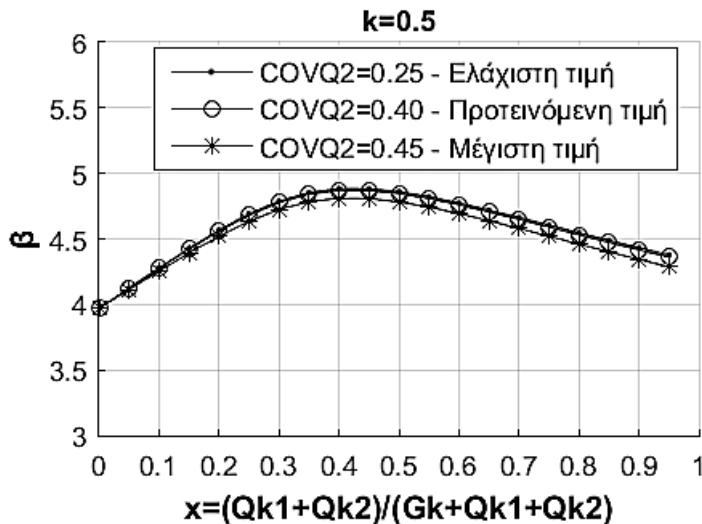
Παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξιοπιστίας υπό την εξίσωση 6.10, για την περίπτωση Α) $\text{mean}(MR)/MR_d=1.5$ και $\text{std}(MR)/MR_d=0.13$ (που εξετάστηκε παραπάνω), με τις τρεις τιμές του

συντελεστή COV_{Q_2} (προτεινόμενη, ελάχιστη και μέγιστη από Πίνακας 39) ενώ οι υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων των τυχαίων μεταβλητών παραμένουν όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.3

Προσοχή: Στην περίπτωση αυτή δεν έχει νόημα η διερεύνηση της περίπτωσης $\kappa=0$ όπου δεν υπάρχει το κινητό φορτίο Q_2 και γι' αυτό θα παρουσιαστεί μόνο η περίπτωση $\kappa=0.5$

Σχόλια – Συμπεράσματα:

Όπως παρατηρούμε η μεταβολή του συντελεστή μεταβλητότητας COV_{Q_2} του δευτερεύοντος κινητού φορτίου Q_2 δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την αξιοπιστία της δοκού είτε κυριαρχούν τα μόνιμα είτε τα κινητά φορτία.



Εικόνα 45: Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή μεταβλητότητας κινητού φορτίου Q_2

3.5 Αξιοπιστία δοκού οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση

Η διαφορά μεταξύ κάμψης και διάτμησης στον υπολογισμό της αξιοπιστίας μιας δοκού έγκειται στην διαφοροποίηση της παραμέτρου R/R_d (δηλαδή στη μέση τιμή $mean(R)/R_d$ και στην τυπική απόκλιση $std(R)/R_d$) μεταξύ κάμψης και διάτμησης. Οι υπόλοιπες 5 παράμετροι ($\theta_R, \theta_E, G', Q_1', Q_2'$) παραμένουν ως έχουν. Υπενθυμίζεται ότι η αστοχία σε διάτμηση προκαλείται είτε από την αστοχία των οπλισμών διάτμησης, είτε από την αστοχία των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος (παράγραφος 2.3)

1) Αστοχία οπλισμών διάτμησης

Αρχικά, εξετάζεται η 'αστοχία' των οπλισμών διάτμησης (συνδετήρων), όπου από το κεφάλαιο 2.3: Στοιχεία υπό διατμητική ένταση, έχουμε:

$$VR,s = VRd,s * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} \Rightarrow \frac{VR,s}{VRd,s} = \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}$$

με:

$$\frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = \begin{cases} 1.25, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 1.38, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases} \quad \frac{\sigma_{fy}}{f_{ywd}} = \begin{cases} 0.06, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.05 \\ 0.14, & \text{για } COV_{f_{yw}} = 0.10 \end{cases}$$

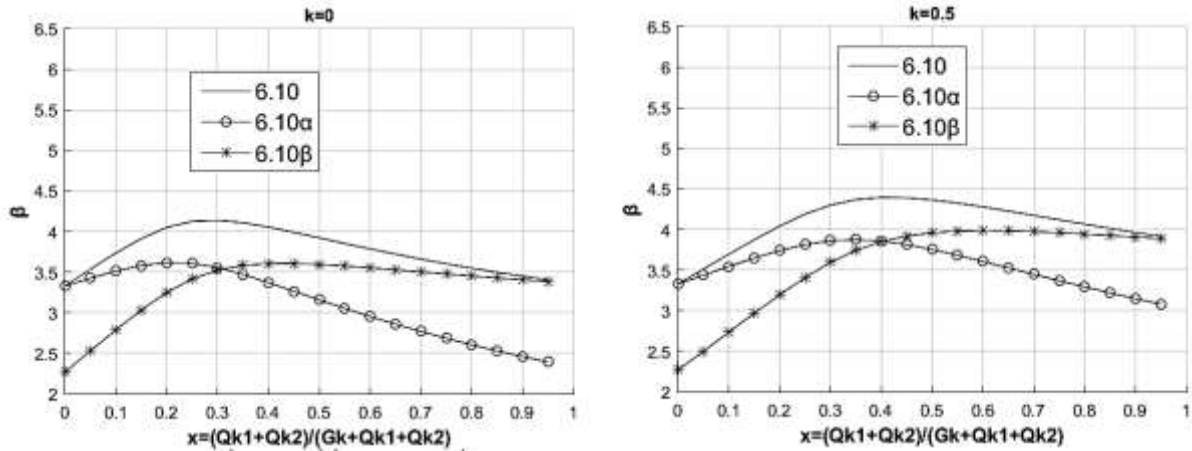
Συνεπώς, εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις:

A) $mean(VR,s)/VRd,s = 1.25$ και $std(VR,s)/VRd,s = 0.06$ (για $COV_{f_{yw}} = 0.05$)

B) $mean(VR,s)/VRd,s = 1.38$ και $std(VR,s)/VRd,s = 0.14$ (για $COV_{f_{yw}} = 0.10$)

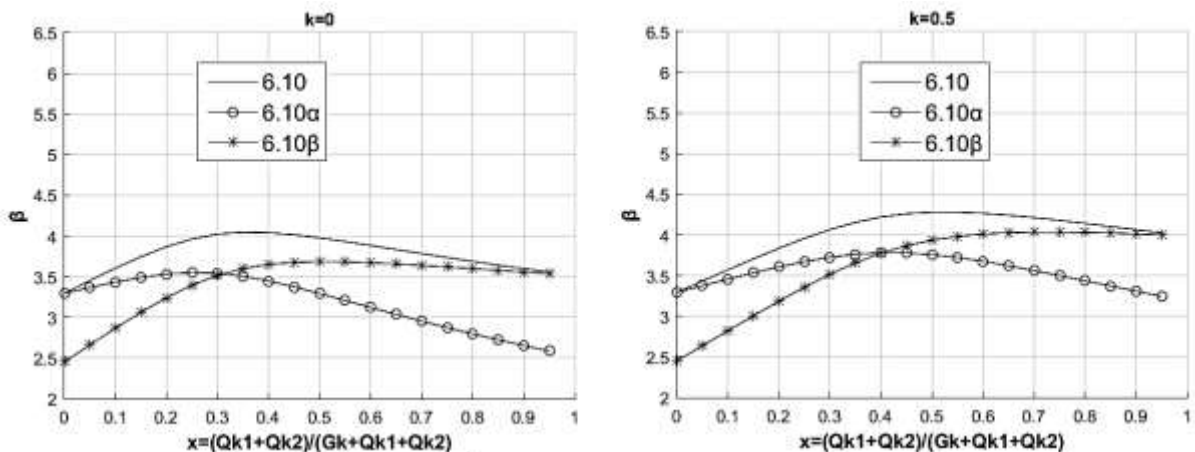
Εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β για αστοχία οπλισμού διάτμησης:

A) $\text{mean}(VR,s)/VRd,s=1.25$ και $\text{std}(VR,s)/VRd,s=0.06$ (για $\text{COV}_{f_{yw}}=0.05$)



Εικόνα 46: Συντελεστής αξιοπιστίας β για οπλισμό διάτμησης, για $\text{COV}_{f_{yw}}=0.05$

B) $\text{mean}(VR,s)/VRd,s=1.38$ και $\text{std}(VR,s)/VRd,s=0.14$ (για $\text{COV}_{f_{yw}}=0.10$)



Εικόνα 47: Συντελεστής αξιοπιστίας β για οπλισμό διάτμησης, για $\text{COV}_{f_{yw}}=0.10$

2) Αστοχία λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος

Ομοίως και για την 'αστοχία' των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.3:Στοιχεία υπό διατμητική ένταση, έχουμε:

$$VR,max=VRd,max \cdot \frac{f_c}{f_{cd}} \Rightarrow \frac{VR,max}{VRd,max} = \frac{f_c}{f_{cd}}$$

$$\frac{f_{cm}}{f_{cd}} = \begin{cases} 2.11, \text{ για } \text{COV}_{f_c}=0.10 \\ 2.63, \text{ για } \text{COV}_{f_c}=0.20 \end{cases}$$

$$\frac{\sigma_{f_c}}{f_{cd}} = \begin{cases} 0.21, \text{ για } \text{COV}_{f_c}=0.10 \\ 0.52, \text{ για } \text{COV}_{f_c}=0.20 \end{cases}$$

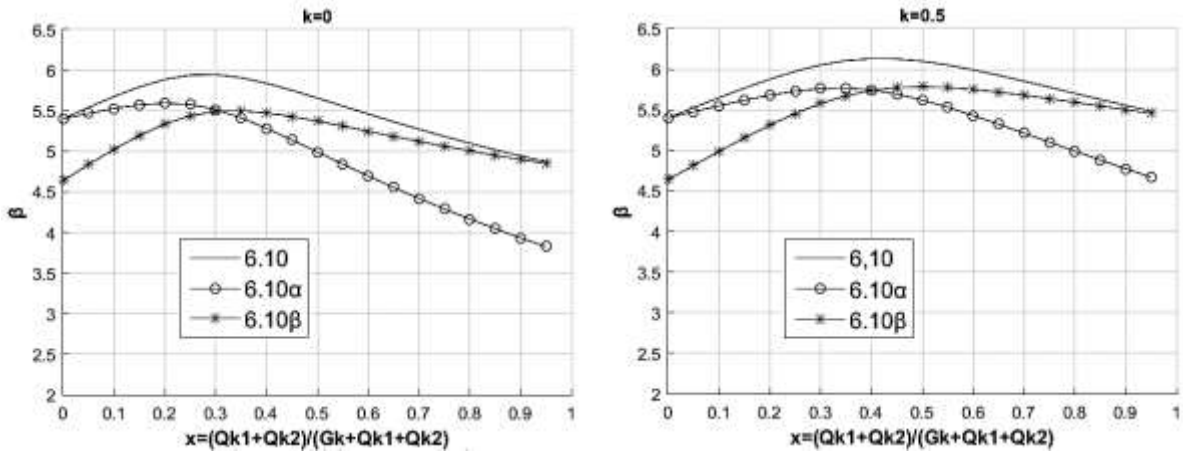
Συνεπώς, εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις:

A) $\text{mean}(VR,max)/VRd,max=2.11$ και $\text{std}(VR,max)/VRd,max=0.21$ (για $\text{COV}_{f_c}=0.10$)

B) $\text{mean}(VR,max)/VRd,max=2.63$ και $\text{std}(VR,max)/VRd,max=0.52$ (για $\text{COV}_{f_c}=0.20$)

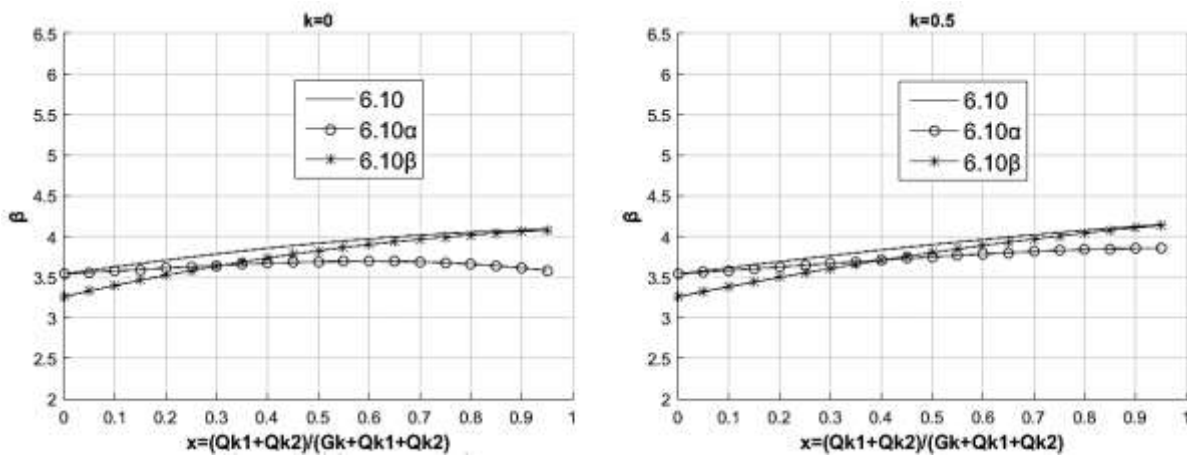
Εξισώσεις 6.10, 6.10α, 6.10β για αστοχία λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος:

A) $\text{mean}(VR, \max)/VR_{d, \max}=2.11$ και $\text{std}(VR, \max)/VR_{d, \max}=0.21$ (για $\text{COV}f_c=0.10$)



Εικόνα 48: Συντελεστής αξιοπιστίας β για λοξούς θλιπτήρες σκυροδέματος για $\text{COV}f_c=0.10$

B) $\text{mean}(VR, \max)/VR_{d, \max}=2.63$ και $\text{std}(VR, \max)/VR_{d, \max}=0.52$ (για $\text{COV}f_c=0.20$)



Εικόνα 49: Συντελεστής αξιοπιστίας β για λοξούς θλιπτήρες σκυροδέματος για $\text{COV}f_c=0.20$

Σχόλια – Συμπεράσματα:

Όσον αφορά τον οπλισμό διάτμησης, ο συντελεστής αξιοπιστίας προέκυψε $\beta=[3.3 - 4.3]$ (σχεδόν ίδιος για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν).

Παρατηρούμε πως ο συντελεστής β προκύπτει αρκετά μεγαλύτερος για την αστοχία των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος στην πρώτη περίπτωση ($\text{COV}f_c=0.10$) όπου $\beta=[5 - 6]$, ενώ είναι αρκετά μικρότερος στην δεύτερη ($\text{COV}f_c=0.20$) με $\beta=[3.5 - 4]$

Παράδειγμα διάτμησης: Συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας

- 1) Έστω $\text{COV}f_c=0.10$, $\text{COV}f_{yw}=0.05$, $\kappa=0$, $\chi=0.3$ και σχεδιάζοντας με την εξίσωση 6.10: Από την Εικόνα 46 έχουμε για τον οπλισμό διάτμησης $\beta=4.2$ (δηλαδή $p_{fy}=10^{-5}$) και από την Εικόνα 48 για τους λοξούς θλιπτήρες σκυροδέματος προκύπτει $\beta=6$ (δηλαδή $p_{fc}=10^{-8}$). Η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας θα είναι: $p_f=1-(1-p_{fy})(1-p_{fc})=1-(1-10^{-5})(1-10^{-8})=1.001 \cdot 10^{-5}$, δηλαδή η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας δεν αυξήθηκε ιδιαίτερα σε σχέση με την πιθανότητα αστοχίας του οπλισμού διάτμησης.

- 2) Έστω $COVf_c=0.20$, $COVf_{yw}=0.05$, $\kappa=0$, $\chi=0.3$ και σχεδιάζοντας με την εξίσωση 6.10: Από την Εικόνα 46 έχουμε για τον οπλισμό διάτμησης $\beta=4.2$ (δηλαδή $p_{fy}=10^{-5}$) και από την Εικόνα 49 για τους λοξούς θλιπτήρες σκυροδέματος προκύπτει $\beta=3.5$ (δηλαδή $p_{fc}=5*10^{-4}$). Η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας θα είναι: $p_f=1-(1-p_{fy})(1-p_{fc})=1-(1-10^{-5})(1-5*10^{-4})=5.1*10^{-4}$, δηλαδή η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας δεν αυξήθηκε ιδιαίτερα σε σχέση με την πιθανότητα αστοχίας των λοξών θλιπτήρων σκυροδέματος.

Προσοχή: Στα αποτελέσματα των παραδειγμάτων για τη συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας κατά την διάτμηση θεωρείται πως η διαστασιολόγηση έχει προκύψει όπως ορίζει ο σχεδιασμός. Στην πράξη αυτό είναι σπάνιο, ιδίως στην περίπτωση της αστοχίας των λοξών θλιπτήρων, αφού η διατομή συνήθως επιλέγεται από άλλα κριτήρια με αποτέλεσμα να διαστασιολογείται με μεγάλο περιθώριο από την οριακή τιμή σχεδιασμού ($VR_{d,max} \gg V_{Ed}$).

Στη συνέχεια, όταν θα μελετάται η πιθανότητα αστοχίας της δοκού σε διάτμηση, θα εννοείται μόνο η αστοχία των οπλισμών διάτμησης είτε λόγω της επαρκούς αντοχής των λοξών θλιπτήρων (μέσω σχεδιασμού), είτε λόγω της μικρής πιθανότητας αστοχίας τους (στην περίπτωση του παραδείγματος 1 λόγω $COVf_c=0.10$).

Ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές της παραμέτρου θ_R

Όπως σχολιάστηκε στην παράγραφο 2.3, ενδέχεται (ανάλογα με τον σχεδιασμό που πραγματοποιείται) να λαμβάνονται διάφορες τιμές στη μέση τιμή του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R στην περίπτωση της διάτμησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται για την αστοχία των οπλισμών διάτμησης, ανάλυση ευαισθησίας για την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R .

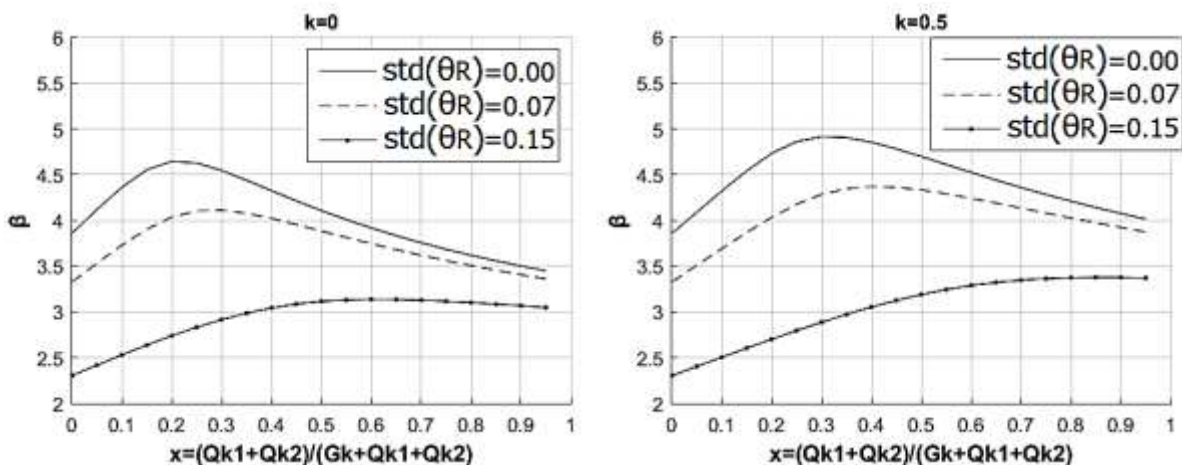
Αστοχία οπλισμών διάτμησης

A) $mean(VR,s)/VR_{d,s}=1.25$ και $std(VR,s)/VR_{d,s}=0.06$ (για $COVf_{yw}=0.05$)

- 1) Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R .

Πίνακας 40: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

	θ_R .	θ_E	Αστοχία των οπλισμών διάτμησης
mean	1.0	1.0	Παρουσιάζεται η αξιοπιστία δοκού έναντι διάτμησης υπό την εξίσωση 6.10 για την περίπτωση A) $mean(VR,s)/VR_{d,s}=1.25$ και $std(VR,s)/VR_{d,s}=0.06$ (για $COVf_{yw}=0.05$)
std	0.00/ 0.07/ 0.15	0.10	

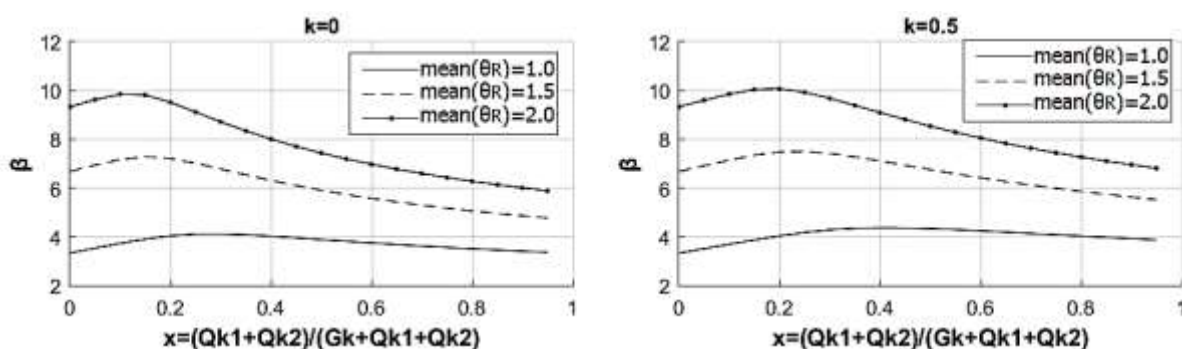


Εικόνα 50: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

2) Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R

Πίνακας 41: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

	θ_R	θ_E	Αστοχία των οπλισμών διάτμησης
mean	1.0/ 1.5/ 2.0	1.0	Παρουσιάζεται η αξιοπιστία δοκού έναντι διάτμησης υπό την εξίσωση 6.10 για την περίπτωση A) $mean(VR,s)/VRd,s=1.25$ και $std(VR,s)/VRd,s=0.06$ (για $COV_{f_{yw}}=0.05$)
std	0.07	0.10	



Εικόνα 51: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

Σχόλια για τον συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R :

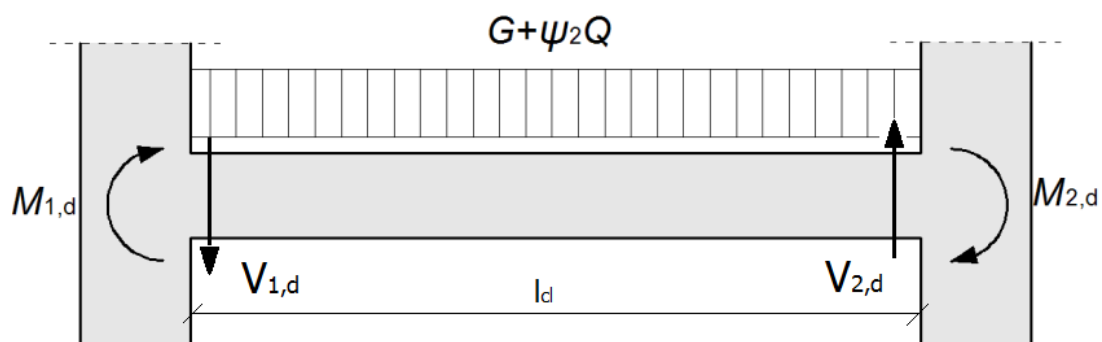
Από τις αναλύσεις ευαισθησίας του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R γίνεται αντιληπτό πως για αυξημένες τιμές της μέσης τιμής ο δείκτης αξιοπιστίας αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό, ενώ η αύξηση της τυπικής απόκλισης επιφέρει μικρότερες αλλά σημαντικές αλλαγές στη μείωση του δείκτη αξιοπιστίας

4 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998)

4.1 Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον ικανοτικό σχεδιασμό τέμνουσας δοκού, απαιτείται η αστοχία της δοκού κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να προέλθει λόγω κάμψης και όχι λόγω διάτμησης. Για το λόγο αυτό, ελέγχεται η δυσμενέστερη περίπτωση όπου έχουν σχηματιστεί πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα της δοκού, οι οποίες προκαλούν διατμητική καταπόνηση και στην οποία προστίθεται η τέμνουσα που θα κληθεί να παραλάβει η δοκός κατά την διάρκεια του σεισμού, από τον σεισμικό συνδυασμό $P_{d,σεισμικό} = G_k + \psi_2 Q_k$

Εικόνα 52



Εικόνα 52: Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας δοκού

Στο κεφάλαιο αυτό θα θεωρούμε πως η δοκός είναι όμοια οπλισμένη στα δύο άκρα της (χωρίς άρση της γενικότητας για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της), οπότε δεν θα γίνεται διάκριση μεταξύ άκρου 1, 2 (όπως γίνεται κανονικά) και δεν θα ελεγχθούν δύο περιπτώσεις (ωρολογιακής και αντιωρολογιακής φοράς ροπών στα άκρα της δοκού).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τέμνουσα σχεδιασμού που προκύπτει από τον ικανοτικό σχεδιασμό είναι:

$$V_{Ed} = \gamma_{Rd} \frac{MRd^+ + MRd^-}{l_{cl}} + P_{d,σεισμικό} \frac{l_{cl}}{2} = \gamma_{Rd} \frac{\sum MRd}{l_{cl}} + P_{d,σεισμικό} \frac{l_{cl}}{2}$$

4.2 Εξίσωση αστοχίας

Οι τυχαίες μεταβλητές που περιγράφουν το φαινόμενο είναι

- 1) Η δρώσα τέμνουσα, V_E , όπου:

$$V_E = \frac{MR^+ + MR^-}{I_{cl}} + P_{\text{σεισμικό}} \frac{I_{cl}}{2} = \frac{\Sigma MR}{I_{cl}} + P_{\text{σεισμικό}} \frac{I_{cl}}{2}$$

$P_{\text{σεισμικό}}$ η τυχαία μεταβλητή του φορτίου που ασκείται στη δοκό κατά τη διάρκεια του σεισμού, με $P_{\text{σεισμικό}} = G + Q_{\text{σεισμικό}}$ όπου G τα μόνιμα και $Q_{\text{σεισμικό}}$ τα κινητά φορτία κατά τον σεισμό.

- 2) Η διατμητική αντοχή VR,s , την οποία ταυτίζουμε με την αντοχή του οπλισμού διάτμησης (παράγραφος 3.5), όπου:

$$VR,s = VRd,s \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = V_{Ed} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = \left(\gamma_{Rd} \frac{\Sigma MRd}{I_{cl}} + P_{d,\text{σεισμικό}} \frac{I_{cl}}{2} \right) \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}$$

- 3) Οι συντελεστές αβεβαιότητας των προσομοιωμάτων αντοχών θ_R και δράσεων θ_E :

$$\begin{array}{ll} \theta_R: & \theta_E: \\ \text{mean}(\theta_R)=1 & \text{mean}(\theta_E)=1 \\ \text{std}(\theta_R)=0.07 & \text{std}(\theta_E)=0.10 \end{array}$$

Σημείωση: Οι παραπάνω τιμές είναι οι προτεινόμενες αλλά στο τέλος θα γίνει και ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους τους.

Η εξίσωση αστοχίας του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού, δηλαδή η συνθήκη που εκφράζει την αστοχία του ελέγχου είναι:

$$g = \theta_R VR,s - \theta_E V_E = \theta_R \left(\gamma_{Rd} \frac{\Sigma MRd}{I_{cl}} + P_{d,\text{σεισμικό}} \frac{I_{cl}}{2} \right) \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \left(\frac{\Sigma MR}{I_{cl}} + P_{\text{σεισμικό}} \frac{I_{cl}}{2} \right)$$

$$g * \left(\frac{I_{cl}}{\Sigma MRd} \right) = \left(\theta_R \gamma_{Rd} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd} \theta_E \right) + \left(\theta_R \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \frac{P_{\text{σεισμικό}}}{P_{d,\text{σεισμικό}}} \right) \frac{I_{cl}^2 P_{d,\text{σεισμικό}}}{2 \Sigma MRd}$$

δηλαδή η εξίσωση αστοχίας γίνεται:

$$g' = \left(\theta_R \gamma_{Rd} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd} \theta_E \right) + \left(\theta_R \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \frac{P_{\text{σεισμικό}}}{P_{d,\text{σεισμικό}}} \right) \frac{I_{cl}^2 P_{d,\text{σεισμικό}}}{2 \Sigma MRd}$$

Σχόλια για την εξίσωση αστοχίας:

- 1) Η συνάρτηση g' είναι διαφορετική από την g , αλλά επειδή ενδιαφερόμαστε για την πιθανότητα $P(g < 0)$ που ταυτίζεται με την $P(g' < 0)$, η διερεύνηση της g' αντί της g δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.
- 2) Η συνάρτηση g' δεν είναι γραμμική συνάρτηση των τυχαίων μεταβλητών που την ορίζουν και οι οποίες δεν είναι όλες κανονικές κατανομές. Πρέπει λοιπόν να γίνει γραμμικοποίηση της επιφάνειας αστοχίας στο σημείο σχεδιασμού (παράγραφος 1.2.3 μέθοδος FORM), αλλά επειδή οι πιθανότητες αστοχίας στην περίπτωση αυτή είναι σχετικά μεγάλες (σαφώς μεγαλύτερες από αυτές του κεφαλαίου 3 όπως θα δούμε στη συνέχεια), χρησιμοποιείται η μέθοδος των προσομοιώσεων και μετράται η πιθανότητα αστοχίας χωρίς ο αριθμός των προσομοιώσεων να καθίσταται ανέφικτος (πραγματοποιούνται 100000 προσομοιώσεις) (βλ κεφάλαιο 1.2.2: Προσομοιώσεις – Μέθοδος Monte Carlo).
- 3) Ο συντελεστής γ_{Rd} από τον κανονισμό ορίζεται: $\begin{cases} 1.0, \text{ για κατηγορία πλαστιμότητας μέση} \\ 1.2, \text{ για κατηγορία πλαστιμότητας υψηλή} \end{cases}$

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές παράμετροι της εξίσωσης αστοχίας:

$$\frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd}$$

Επειδή οι ικανοτικοί έλεγχοι αναφέρονται σε κατάσταση σεισμού και προϋποθέτουν την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων, θα θεωρείται ότι οι διατομές είναι διπλά οπλισμένες με επαρκή θλιβόμενο και εφελκόμενο οπλισμό. Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε (σελ 32) τα εύρη των τιμών της παραμέτρου είναι:

$$\begin{cases} \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = 0.1, \text{ και } \frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = [1.38 - 1.46] \approx 1.40 \text{ για } COVfy=0.10 \\ \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = 0.05, \text{ και } \frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = [1.26 - 1.34] \approx 1.30 \text{ για } COVfy=0.05 \end{cases}$$

$$\lambda^* = \frac{I_{cl}^2 P_{d,σεισμικό}}{2 \Sigma MRd}$$

Πρόκειται για μια αδιάστατη παράμετρο που επηρεάζει την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου. Όσον αφορά την ελάχιστη δυνατή τιμή της, δεν υπάρχει περιορισμός αφού η αντοχή σχεδιασμού (ΣMRd) ενδέχεται να είναι οσοδήποτε μεγαλύτερη από το σεισμικό φορτίο σχεδιασμού, το μήκος κλπ. Για το λόγο αυτό, θα θεωρηθεί $\lambda^*_{min}=0$

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής της μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

$$\{ P_{d,σεισμικό} = G_k + \psi_2 Q_k, P_{d,OKA} = Y_G G_k + Y_Q Q_k \} \text{ οπότε } P_{d,σεισμικό} = \left[1.35 - \frac{1.5}{0.3} \right] P_{d,OKA}$$

$$P_{d,σεισμικό} = \frac{P_{d,OKA}}{[1.35 - 5]}, I_{cl} \leq I \text{ οπότε, } \lambda^* = \frac{I_{cl}^2 P_{d,σεισμικό}}{2 \Sigma MRd} \leq \frac{I^2 P_{d,OKA}}{2 [1.35 - 5] \Sigma MRd} = \frac{I^2 P_{d,OKA}}{[2.7 - 10] \Sigma MRd}$$

Από την τελευταία σχέση με διάφορες δοκιμές (θεωρώντας αμφιέριστη, αμφίπακτη, συνεχή δοκό κλπ), συμπαιρένουμε ότι ο συντελεστής λ^* κυμαίνεται κυρίως στο διάστημα [0.6 - 3] και $\lambda^* \leq 5$ οπότε θα θεωρούμε $0 \leq \lambda^* \leq 5$

Σχόλιο: Οι μικρές τιμές της παραμέτρου λ^* (δηλαδή $\lambda^* = 0 - 0.5$) εκφράζουν τις περιπτώσεις σχεδιασμού με μεγάλο περιθώριο ασφαλείας $M_{Rd} \gg M_{Ed}$, ενώ οι μεγάλες τιμές εκφράζουν οριακό σχεδιασμό. Οι αναμενόμενες τιμές για περιπτώσεις σχεδιασμού δοκών (με επαρκές περιθώριο ασφαλείας) είναι $\lambda^* \approx 0.7$

$$\frac{P_{σεισμικό}}{P_{d,σεισμικό}}$$

Η παράμετρος αυτή αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

4.3 Κατακόρυφα φορτία κατά τον σεισμό – οιονεί μόνιμα φορτία

Στο κεφάλαιο 4 θεωρούμε πως στη δοκό ασκούνται τα ίδια βάρη G και το κινητό φορτίο Q . Το φορτίο που ασκείται στη δοκό την ώρα του σεισμού είναι το οιονεί μόνιμο τμήμα των φορτίων και συμβολίζεται με $P_{σεισμικό} = G + Q_{σεισμικό}$ ενώ το φορτίο σχεδιασμού του σεισμικού συνδυασμού είναι $P_{d,σεισμικό} = G_k + \psi_2 Q_k$, με $\psi_2 = 0.3$. Κατά τα γνωστά, $x = Q_k / (G_k + Q_k)$ ο λόγος κινητών προς συνολικά φορτία, δηλαδή $Q_k = G_k * x / (1-x)$

$$\frac{P_{σεισμικό}}{P_{d,σεισμικό}} = \frac{G + Q_{σεισμικό}}{G_k + \psi_2 Q_k} = \frac{\frac{G}{G_k} + \frac{Q_{σεισμικό}}{G_k}}{1 + \psi_2 \frac{Q_k}{G_k}} = \frac{\frac{G}{G_k} + \frac{Q_{σεισμικό}}{G_k}}{1 + \psi_2 \frac{Q_k}{G_k}} = \frac{\frac{G}{G_k} + \frac{Q_{σεισμικό}}{G_k}}{1 + \psi_2 \frac{x}{1-x}}$$

Όπου:

$$\frac{G}{G_k}:$$

Είναι τυχαία μεταβλητή, αδιάστατη που ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(1, 0.1)$ όπως αναλύεται στην παράγραφο 1.3.1

$$\frac{Q_{\text{σεισμικό}}}{G_k} = \frac{Q_{\text{σεισμικό}}}{Q_k} \left(\frac{x}{1-x} \right):$$

Είναι η τυχαία μεταβλητή (αδιάστατη) που εξαρτάται από το λόγο του κινητού φορτίου κατά τον σεισμό $Q_{\text{σεισμικό}}$, δηλαδή την τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει το μόνιμο τμήμα των ωφέλιμων φορτίων, προς την χαρακτηριστική τιμή του κινητού φορτίου Q_k . Ο λόγος αυτός εξαρτάται από τη χρήση του χώρου (κατοικίες, γραφεία κλπ) και στον Πίνακα 42 φαίνονται τα πιθανοτικά χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων κατανομών για διάφορες χρήσεις χώρων. Για τα γραφεία αξιοποιήθηκε η στατιστική των Mitchell – Woodgate, ενώ για τις κατοικίες η στατιστική Sentler. Στην Τρίτη και τέταρτη στήλη του Πίνακα 42 αναγράφονται μετά τον χαρακτηρισμό της κατανομής (Gumbell, LogNormal) η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Πίνακας 42

Χρήση χώρου	Χαρακτηριστικό φορτίο κατά EN 1991-1-1	Κατανομή φορτίου κατά τον σεισμό	Κατανομή $Q_{\text{σεισμικό}}/Q_k$
A) Κατοικίες	$Q_k=2\text{kPa}$	GU(0.30, 0.10) (kPa)	GU(0.15, 0.05) (kPa)
B) Γραφεία (10m ²)	$Q_k=3\text{kPa}$	LN(0.50, 0.68) (kPa)	LN(0.17, 0.23) (kPa)
Γ) Γραφεία (100m ²)	$Q_k=3\text{kPa}$	LN(0.50, 0.31) (kPa)	LN(0.17, 0.10) (kPa)

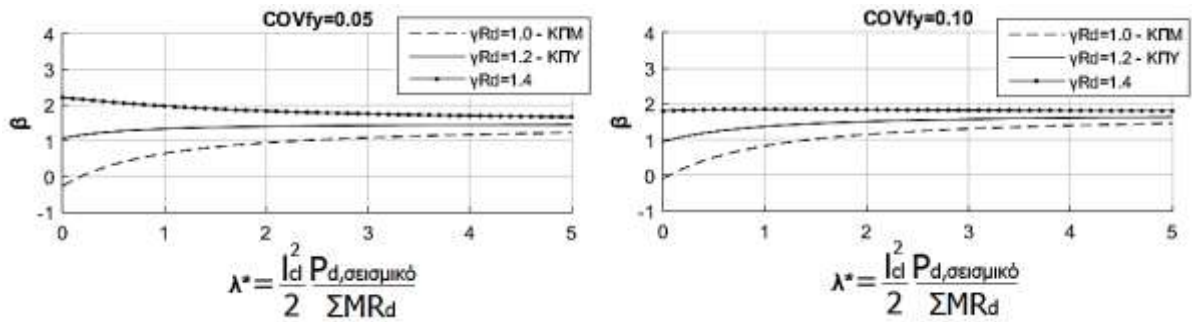
Συμπέρασμα: Η κατανομή της μεταβλητής $P_{\text{σεισμικό}}/P_{d,\text{σεισμικό}}$, εξαρτάται από τη χρήση κάθε χώρου καθώς και από το λόγο x των κινητών προς τα συνολικά φορτία. Εκτιμάται πως για μικρές τιμές του λόγου x , η χρήση του χώρου δεν θα επηρεάζει το αποτέλεσμα της αξιοπιστίας αφού θα κυριαρχούν τα μόνιμα φορτία.

4.4 Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού

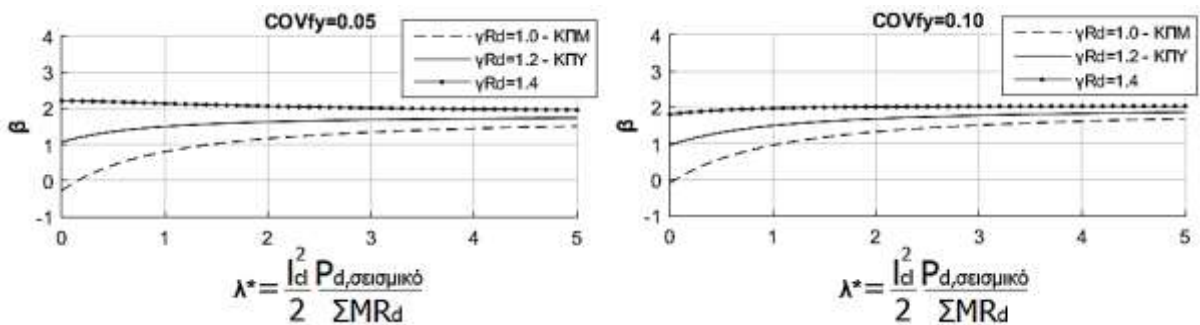
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα της αξιοπιστίας του ικανοτικού ελέγχου για κάθε περίπτωση χρήσης χώρου, για διάφορες τιμές της παραμέτρου x : $x=0.05$ (σχεδόν μόνο μόνιμα φορτία), $x=0.3$ (κυριαρχούν τα μόνιμα φορτία), $x=0.6$ (κυριαρχούν τα κινητά φορτία) και $x=0.9$ (σχεδόν μόνο κινητά φορτία).

Για κάθε τιμή του λόγου x παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις τιμών της παραμέτρου $\Sigma MR/\Sigma MR_d$, δηλαδή για $COV_f\gamma=0.05$ και $COV_f\gamma=0.10$ που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4.2.

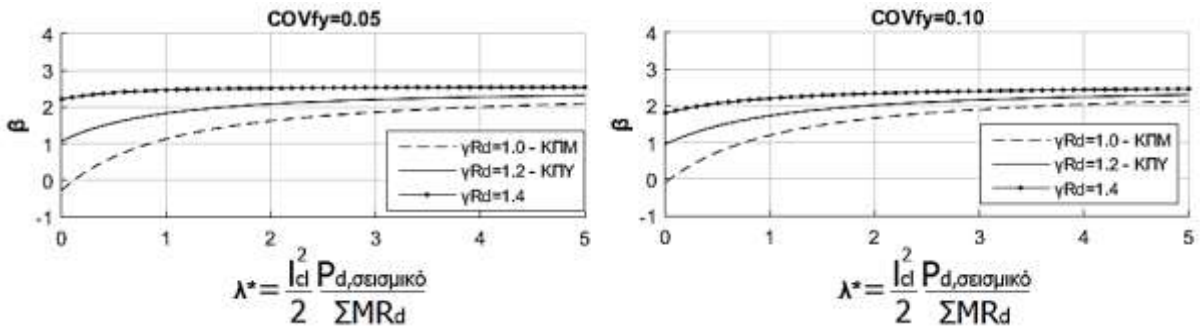
A) Κατοικίες



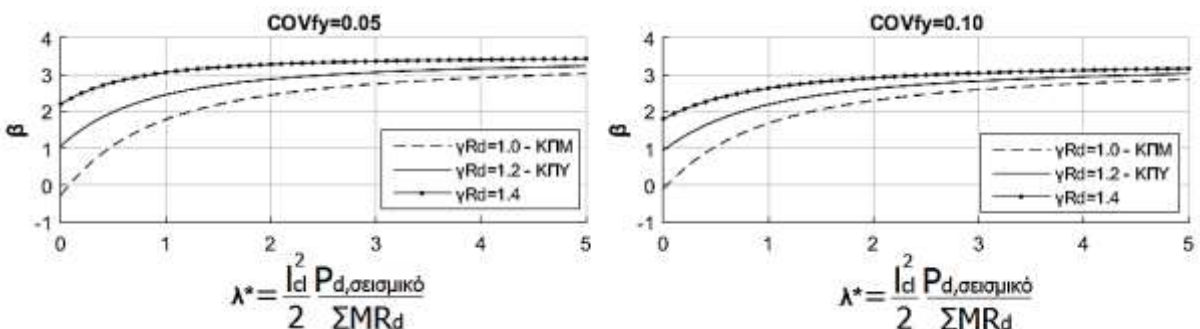
Εικόνα 53: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Κατοικίες με $\chi=0.05$



Εικόνα 54: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Κατοικίες με $\chi=0.3$

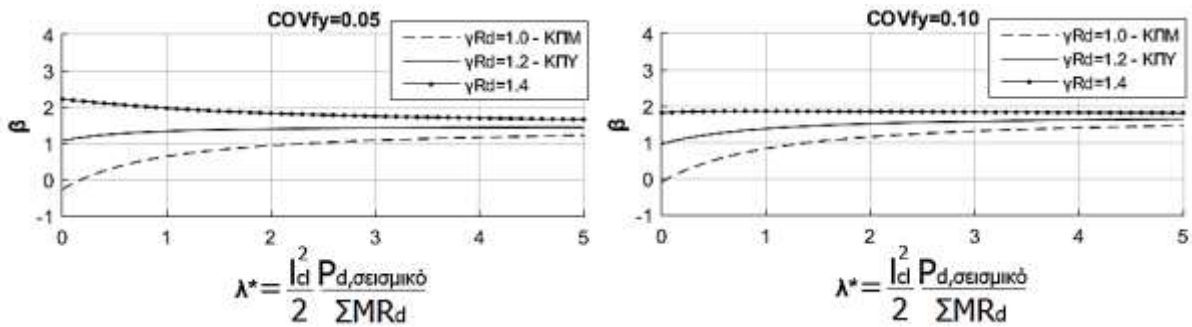


Εικόνα 55: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Κατοικίες με $\chi=0.6$

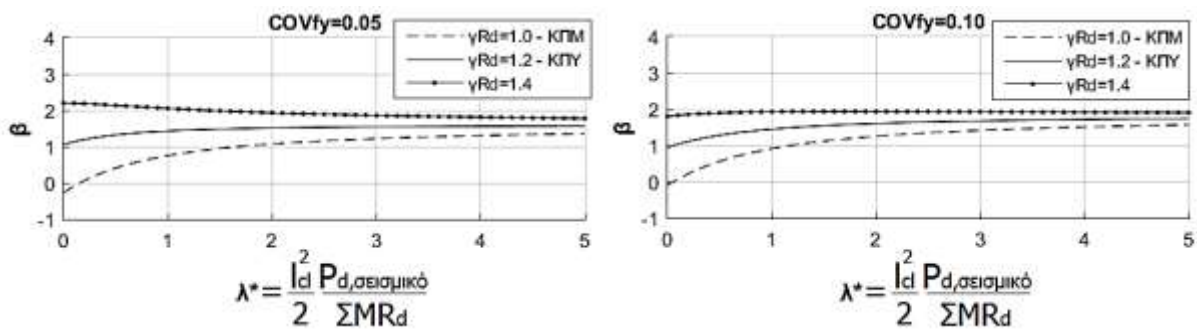


Εικόνα 56: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Κατοικίες με $\chi=0.9$

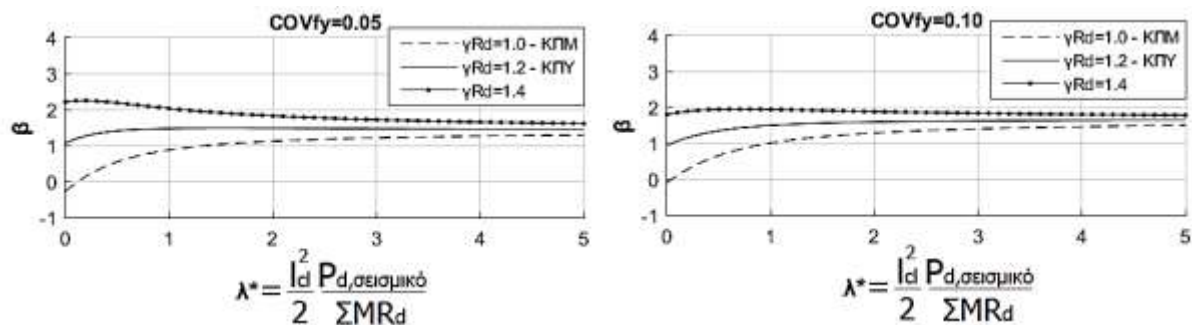
Β) Γραφεία (10m²)



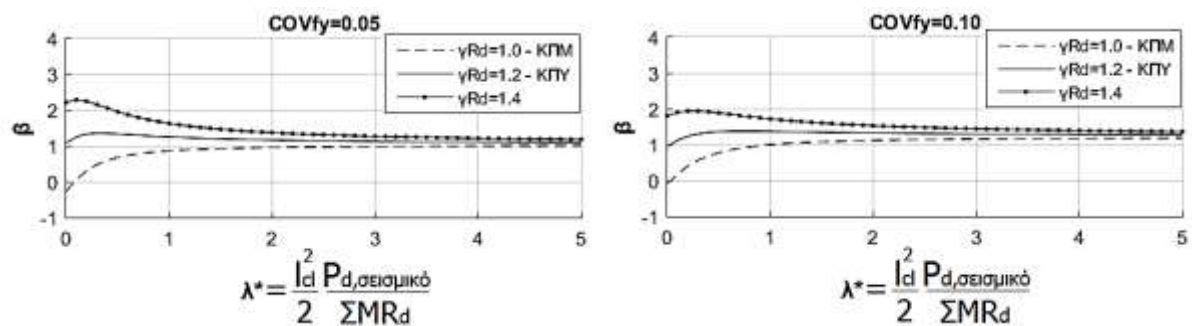
Εικόνα 57: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Γραφεία (10m²) με $\chi=0.05$



Εικόνα 58: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Γραφεία (10m²) με $\chi=0.3$

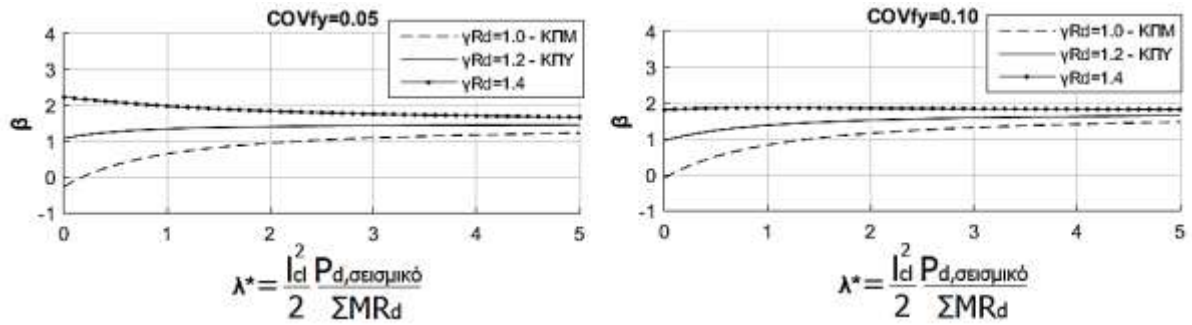


Εικόνα 59: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Γραφεία (10m²) με $\chi=0.6$

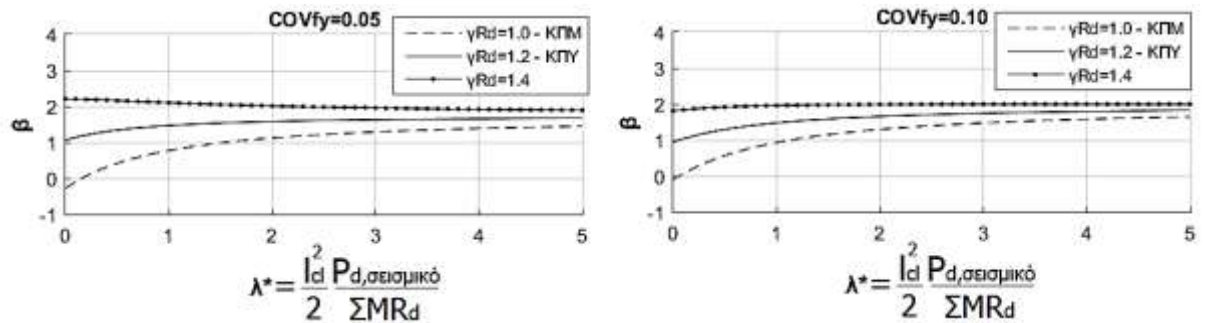


Εικόνα 60: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέννουσας δοκού για Γραφεία (10m²) με $\chi=0.9$

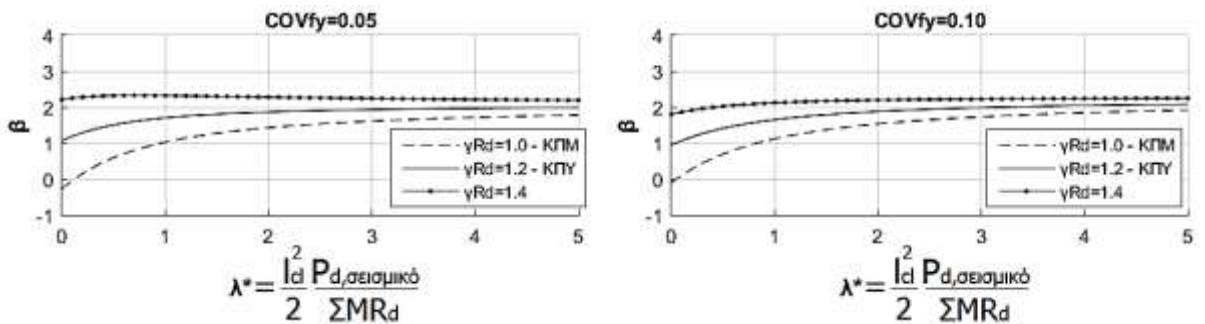
Γ) Γραφεία (100m²)



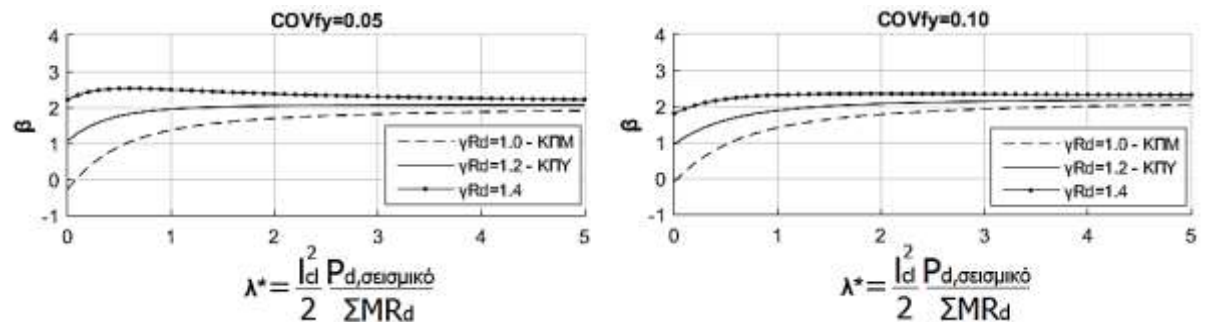
Εικόνα 61: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού για Γραφεία (100m²) με $\chi=0.05$



Εικόνα 62: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού για Γραφεία (100m²) με $\chi=0.3$



Εικόνα 63: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού για Γραφεία (100m²) με $\chi=0.6$



Εικόνα 64: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού για Γραφεία (100m²) με $\chi=0.9$

Σχόλια – Συμπεράσματα για την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού για τις τρεις χρήσεις χώρων:

- 1) Για τιμές της παραμέτρου $\lambda^* < 0.5$, παρατηρούμε μεγάλη διακύμανση του δείκτη αξιοπιστίας (ομοίως και για τις τρεις χρήσεις χώρων) που κυμαίνεται ανάλογα με τη επιλογή του συντελεστή γ_{Rd} , από $\beta=0$, (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας 50%) έως $\beta=2.2$, (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας 1%). Οι περιπτώσεις αυτές ($\lambda^* < 0.5$) προκύπτουν αν η δοκός έχει υπερδιαστασιοποιηθεί σε σχέση με τις απαιτήσεις του κανονισμού (π.χ. έχει διαστασιοποιηθεί λόγω απαίτησης ελάχιστων οπλισμών ή κατασκευαστικών διατάξεων) με αποτέλεσμα $M_{Rd} \gg M_{Ed}$.
- 2) Αμελητέα είναι η επιρροή του συντελεστή μεταβλητότητας του χάλυβα, αφού για $COVfy=0.05$ και $COVfy=0.10$ δεν μεταβάλλεται η αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου (για όλους τους λόγους φορτίων x και χρήσεις χώρων που εξετάστηκαν).
- 3) Οι διαφορετικές χρήσεις χώρων επηρεάζουν την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου αλλά μόνο στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντικό ποσοστό κινητών φορτίων και για μεγάλες σχετικά τιμές της παραμέτρου λ^* , (δηλαδή για $x \geq 0.6$ και $\lambda^* \geq 1$). Για $\lambda^* \gg 1$ παρατηρούμε επίσης πως δεν επηρεάζεται η αξιοπιστία του ελέγχου από τον συντελεστή γ_{Rd} .

Ανάλυση ευαισθησίας

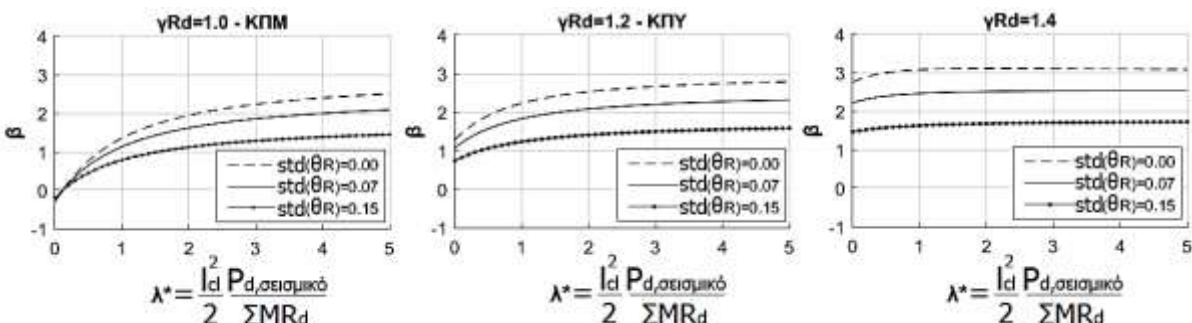
Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας για τους συντελεστές προσομοιωμάτων θ_R, θ_E .

θ_R :

- 1) Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R .

Πίνακας 43: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

	θ_R	θ_E	Κατοικίες
mean	1.0	1.0	Παρουσιάζεται η περίπτωση κατοικιών με $x=0.6$, $COVfy=0.05$ (βλ Εικόνα 55).
std	0/ 0.07/ 0.15	0.10	



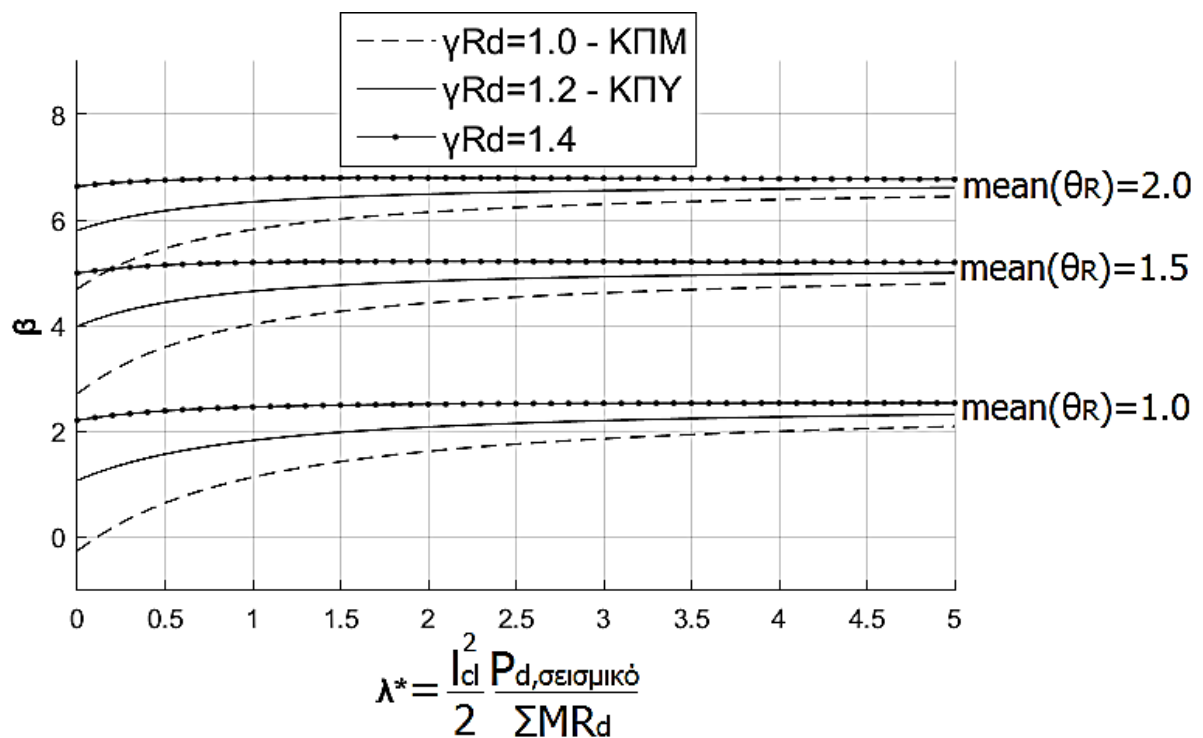
Εικόνα 65: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

2) Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3, στην περίπτωση της διάτμησης ενδέχεται η μέση τιμή του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R να πάρει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.

Πίνακας 44: Ανάλυση ευαισθησίας για την μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

	θ_R .	θ_E	Κατοικίες
mean	1.0/ 1.5/ 2.0	1.0	Παρουσιάζεται η περίπτωση κατοικιών με $\chi=0.6$, $COV_f=0.05$ (βλ Εικόνα 55). Σημειώνεται πως για τις τρεις τιμές της μέσης τιμής που εξετάζονται, ο λόγος μέσης τιμής προς τυπική απόκλιση (COV) κρατείται σταθερός όπως προτείνεται.
COV	0.07	0.10	



Εικόνα 66: Ανάλυση ευαισθησίας για την μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος των αντοχών θ_R

Σχόλια για τον συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R :

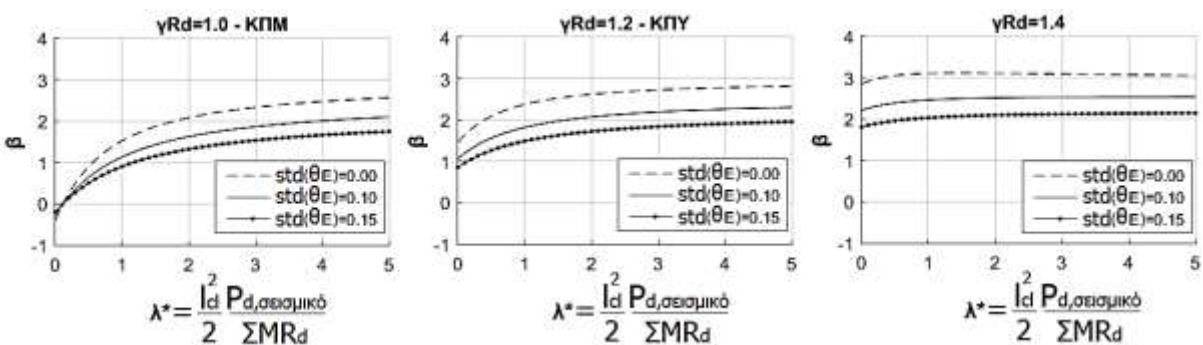
Από τις αναλύσεις ευαισθησίας του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R γίνεται αντιληπτό πως για αυξημένες τιμές της μέσης τιμής ο δείκτης αξιοπιστίας αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό, ενώ η αύξηση της τυπικής απόκλισης επιφέρει μικρότερες αλλαγές (στη μείωση του δείκτη αξιοπιστίας). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου $\gamma R_d=1$ (ΚΠΜ) και $\lambda^* \leq 0.5$, η μεταβολή της τυπικής απόκλισης δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα της αξιοπιστίας του ελέγχου (Εικόνα 65).

θ_E :

Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E .

Πίνακας 45: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος των δράσεων θ_E

	θ_R	θ_E	Κατοικίες
mean	1.0	1.0	Παρουσιάζεται η περίπτωση κατοικιών με $\chi=0.6$, $COV_{fy}=0.05$ (βλ Εικόνα 55).
std	0.07	0.0/ 0.10/ 0.15	



Εικόνα 67: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή δράσεων θ_E

Σχόλια για τον συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση του συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E γίνεται αντιληπτό πως η μεταβολή της επιφέρει μικρές σχετικά αλλαγές στον βαθμό αξιοπιστίας του ελέγχου, και συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου $\gamma R_d=1$ (ΚΠΜ) και $\lambda^* \leq 0.5$, η μεταβολή της τυπικής απόκλισης δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα της αξιοπιστίας του ελέγχου (Εικόνα 67)

Σχόλιο για δισδιαγώνιο οπλισμό:

Υπενθυμίζεται ότι υπο συγκεκριμένες προϋποθέσεις (για ΚΠΥ, $\zeta = V_{E,min}/V_{E,max} < -0.5$ και $V_{E,max} > (2+\zeta)f_{ctd} bd$) που δεν εξετάστηκαν παραπάνω, πρέπει η δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού $V_{E,max}$ να παραληφθεί κατά το 50% από τους συνδετήρες και 50% από δισδιαγώνιο οπλισμό, δηλαδή $VR_{d,s}(tot) = 2 * VR_{d,s}(συνδετήρων) = 2 * VR_{d,s}(δισδιαγώνιου οπλισμού) = V_{E,max}$.

Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3, έχουμε:

$$VR_{d,s} = VR_{d,s} * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} \text{ για συνδετήρες}$$

$$VR_{d,s} = VR_{d,s} * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} \text{ για δισδιαγώνιο οπλισμό}$$

Και θεωρώντας πως οι οπλισμοί συνδετήρων και δισδιαγώνιου οπλισμού είναι όμοιοι προκύπτει

$$VR,s(tot) = VR,s(\text{συνδετήρων}) + VR,s(\text{δισδιαγώνιου})$$

$$\Rightarrow VR,s(tot) = VRd,s(\text{συνδετήρων}) f_{yw} / f_{ywd} + VRd,s(\text{δισδιαγώνιου}) f_{yw} / f_{ywd}$$

$$\mathbf{VR,s(tot) = 2 * VRd,s * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = VRd,s(tot) * \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}}$$

Δηλαδή δεν διαφοροποιείται ο υπολογισμός της αξιοπιστίας του ελέγχου αν τη δρώσα τέμνουσα την παραλαμβάνουν από κοινού οι συνδετήρες και ο δισδιαγώνιος οπλισμός.

Προσοχή: Τα παραπάνω ισχύουν σύμφωνα με τις υποθέσεις που θεωρήθηκαν, όμως δεν λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τρόπων παραλαβής της τέμνουσας (συνδετήρων και δισδιαγώνιου οπλισμού). Προκειμένου να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο, θα πρέπει να γίνει μελέτη για τις τιμές που πρέπει να λάβει ο συντελεστής του προσομοιώματος ώστε να συνεκτιμά την συνύπαρξη των δύο διαφορετικών τρόπων παραλαβής της τέμνουσας.

5 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998)

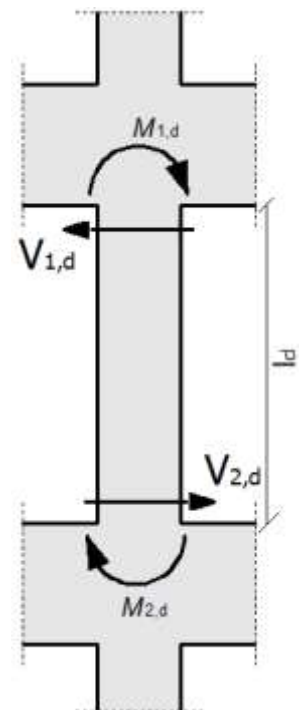
5.1 Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας υποστυλώματος οπλισμένου σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον ικανοτικό σχεδιασμό τέμνουσας υποστυλώματος, απαιτείται η αστοχία του υποστυλώματος κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να προέλθει λόγω κάμψης και όχι λόγω διάτμησης. Για το λόγο αυτό, ελέγχεται η δυσμενέστερη περίπτωση όπου έχουν σχηματιστεί πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα του υποστυλώματος, οι οποίες προκαλούν διατμητική καταπόνηση. Δεν προστίθεται επιπλέον ένταση όπως στην περίπτωση της δοκού καθώς θεωρείται πως δεν ασκούνται οριζόντια φορτία σε ένα υποσύλωμα ώστε να αυξηθεί η τέμνουσά του.

Στο κεφάλαιο αυτό θα θεωρούμε πως το υποσύλωμα είναι όμοια οπλισμένο στις δύο πλευρές του (με $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$), αλλά και στα δύο άκρα του (χωρίς άρση της γενικότητας για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του), οπότε δεν θα γίνεται διάκριση μεταξύ άκρου 1, 2 (όπως γίνεται κανονικά) αφού $MR_{1d}^{\pm} = MR_{2d}^{\pm}$ και κατά συνέπεια δεν θα ελεγχθούν δύο περιπτώσεις (ωρολογιακής και αντιωρολογιακής φοράς ροπών στα άκρα του υποστυλώματος).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού που προκύπτει από τον ικανοτικό σχεδιασμό είναι:

$$V_{Ed} = Y_{Rd} \frac{MRd^+ + MRd^-}{l_{cl}} = Y_{Rd} \frac{\Sigma MRd}{l_{cl}}$$



Εικόνα 68: Ικανοτικός σχεδιασμός τέμνουσας υποστυλώματος

5.2 Εξίσωση αστοχίας

Οι τυχαίες μεταβλητές που περιγράφουν το φαινόμενο είναι

- 1) Η δρώσα τέμνουσα V_E , όπου:

$$V_E = \frac{MR^+ + MR^-}{l_{cl}} = \frac{\Sigma MR}{l_{cl}}$$

- 2) Η διατμητική αντοχή VR,s την οποία ταυτίζουμε με την αντοχή του οπλισμού διάτμησης (παράγραφος 3.5), όπου:

$$VR,s = VRd,s \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = V_{Ed} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} = \left(Y_{Rd} \frac{\Sigma MRd}{l_{cl}} \right) \frac{f_{yw}}{f_{ywd}}$$

- 3) Οι συντελεστές αβεβαιότητας των προσομοιωμάτων αντοχών θ_R και δράσεων θ_E

$$\begin{array}{ll} \theta_R: & \theta_E: \\ \text{mean}(\theta_R)=1 & \text{mean}(\theta_E)=1 \\ \text{std}(\theta_R)=0.07 & \text{std}(\theta_E)=0.10 \end{array}$$

Σημείωση: Οι παραπάνω τιμές είναι οι προτεινόμενες αλλά στο τέλος θα γίνει και ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση αστοχίας του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού, δηλαδή η συνθήκη που εκφράζει την αστοχία του ελέγχου είναι:

$$g = \theta_R VR,s - \theta_E V_E = \theta_R \left(Y_{Rd} \frac{\Sigma MRd}{l_{cl}} \right) \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \left(\frac{\Sigma MR}{l_{cl}} \right), \text{ οπότε:}$$

$$g \left(\frac{l_{cl}}{\Sigma MRd} \right) = \theta_R Y_{Rd} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \left(\frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd} \right), \text{ ή}$$

$$g' = \theta_R Y_{Rd} \frac{f_{yw}}{f_{ywd}} - \theta_E \left(\frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd} \right)$$

Σχόλια - Παρατηρήσεις:

- 1) Η συνάρτηση g' είναι διαφορετική από την g , αλλά επειδή ενδιαφερόμαστε για την πιθανότητα $P(g < 0)$ που ταυτίζεται με την $P(g' < 0)$, η διερεύνηση της g' αντί της g δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.
- 2) Η συνάρτηση g' δεν είναι γραμμική συνάρτηση των τυχαίων μεταβλητών που την ορίζουν. Πρέπει λοιπόν να γίνει γραμμικοποίηση της επιφάνειας αστοχίας στο σημείο σχεδιασμού όπως στο κεφάλαιο 3.3 (μέθοδος FORM), αλλά επειδή οι πιθανότητες αστοχίας στην περίπτωση αυτή είναι σαφώς μικρότερες από αυτές του κεφαλαίου 3 (όπως θα δούμε στη συνέχεια), χρησιμοποιείται η μέθοδος των προσομοιώσεων και μετράται η πιθανότητα αστοχίας χωρίς ο αριθμός των προσομοιώσεων να καθίσταται ανέφικτος (πραγματοποιούνται 100000 προσομοιώσεις) (βλ κεφάλαιο 1.2.2: Προσομοιώσεις – Μέθοδος Monte Carlo).
- 3) Ο συντελεστής Y_{Rd} από τον κανονισμό ορίζεται: $\begin{cases} 1.1, \text{ για κατηγορία πλαστιμότητας μέση} \\ 1.3, \text{ για κατηγορία πλαστιμότητας υψηλή} \end{cases}$

Στη συνέχεια ανλύεται η βασική παράμετρος της εξίσωσης αστοχίας:

$$\frac{\Sigma MR}{\Sigma MRd}$$

Επειδή οι ικανοτικοί έλεγχοι αναφέρονται σε κατάσταση σεισμού, οι καμπτικές αντοχές των υποστυλωμάτων (είτε σχεδιασμού ΣMRd , είτε η τυχαία μεταβλητή ΣMR) αντιστοιχούν σε αξονική δύναμη στην σεισμική κατάσταση σχεδιασμού. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη ότι το υποστυλώμα έχει σχεδιαστεί για μεγαλύτερες τιμές αξονικής δύναμης (κατά τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση αστοχίας), στην διερεύνηση του όρου $\Sigma MR/\Sigma MRd$ (για τον ικανοτικό έλεγχο), από τους πίνακες του κεφαλαίου 2 δεν θα ληφθούν υπόψη οι τιμές της ανηγμένης αξονικής $\nu=0.8$ και $\nu=1.0$

Σύμφωνα με τα παραπάνω από το κεφάλαιο 2.2.2 έχουμε:

$$1.1 \leq \text{mean}(MR)/MRd \leq 1.8 \text{ (Για όλα τα } d1/d, COVfy, COVfc)$$

$$\begin{cases} 0.05 \leq \frac{\text{std}(MR)}{MRd} \leq 0.12, \text{ για } COVfy=0.10 \\ 0.03 \leq \frac{\text{std}(MR)}{MRd} \leq 0.08, \text{ για } COVfy=0.05 \end{cases}$$

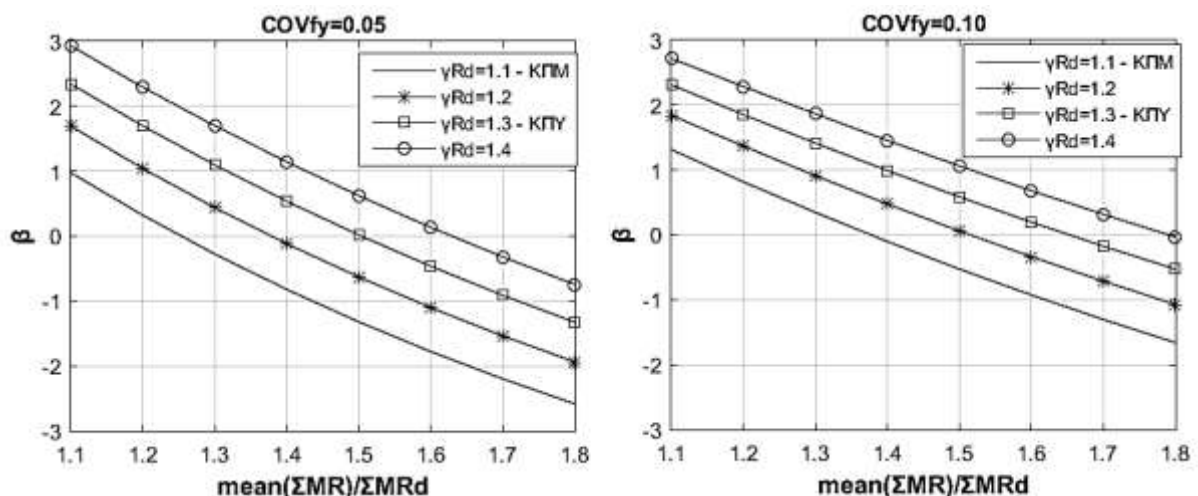
Και αν λάβουμε υπόψη μας τις σχέσεις μεταξύ $(MR)/MRd$ και $\Sigma MR/\Sigma MRd$ (σελ 33) προκύπτει:

$$1.1 \leq \text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd \leq 1.8$$

$$\begin{cases} 0.04 \leq \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \leq 0.08, \text{ δηλαδή } \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.06 \text{ για } COVfy=0.10 \\ 0.02 \leq \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \leq 0.06, \text{ δηλαδή } \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.03 \text{ για } COVfy=0.05 \end{cases}$$

Συνεπώς παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις για την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος 1) για $COVfy=0.05$ και 2) για $COVfy=0.10$

5.3 Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος



Εικόνα 69: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος συναρτήσεως της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ για $COVfy=0.05$ και $COVfy=0.10$

Σχόλια για την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος:

- 1) Οι τιμές του συντελεστή αξιοπιστίας β προκύπτουν αρκετά χαμηλές ($\beta < 0$) για μεγάλο εύρος περιπτώσεων, και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η παράμετρος $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ τόσο μειώνεται η αξιοπιστία του ελέγχου.
- 2) Η αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας του χάλυβα από $\text{COVfy}=0.05$ σε $\text{COVfy}=0.10$ προκαλεί σχετική αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας κυρίως για τις μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$.

Παρατήρηση για την επίδραση του ικανοτικού συντελεστή στο σχεδιασμό της δοκού:

Η διαφοροποίηση στο σχεδιασμό μεταξύ Κ.Π.Μ και Κ.Π.Υ. λόγω της μεταβολής του συντελεστή γ_{Rd} από 1.1 σε 1.3 είναι:

$$V_{Ed}(\text{Κ.Π.Μ}) = 1.1 \frac{\Sigma MRd}{l_{cl}}, \text{ ενώ } V_{Ed}(\text{Κ.Π.Υ}) = 1.3 \frac{\Sigma MRd}{l_{cl}}$$

$$\frac{V_{Ed}(\text{Κ.Π.Υ})}{V_{Ed}(\text{Κ.Π.Μ})} = 1.18 \Rightarrow \frac{\frac{A_{sw}}{S_w}(\text{Κ.Π.Υ})}{\frac{A_{sw}}{S_w}(\text{Κ.Π.Μ})} = 1.18 \Rightarrow \frac{s_w(\text{Κ.Π.Μ})}{s_w(\text{Κ.Π.Υ})} = \mathbf{1.18} \text{ (για τους ίδιους οπλισμούς)}$$

Παράδειγμα: Αν για τη μέση κατηγορία πλαστιμότητας απαιτούνται $A_{sw}/10\text{cm}$, για την υψηλή θα απαιτηθούν $A_{sw}/8.5\text{cm}$

Ανάλυση ευαισθησίας

Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας για τους συντελεστές προσομοιωμάτων θ_R , θ_E :

θ_R :

- 1) Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R (για την περίπτωση $\text{COVfy}=0.05$).

θ_R :

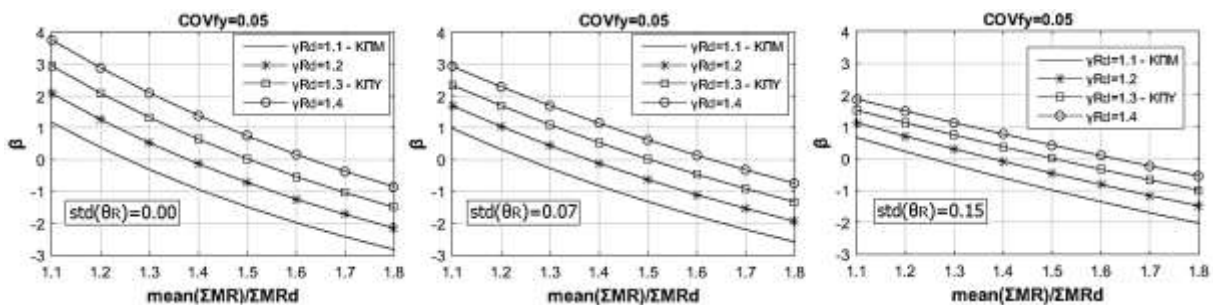
$$\text{mean}(\theta_R) = 1$$

$$\text{std}(\theta_R) = 0.00 / 0.07 / 0.15$$

θ_E :

$$\text{mean}(\theta_E) = 1$$

$$\text{std}(\theta_E) = 0.10$$



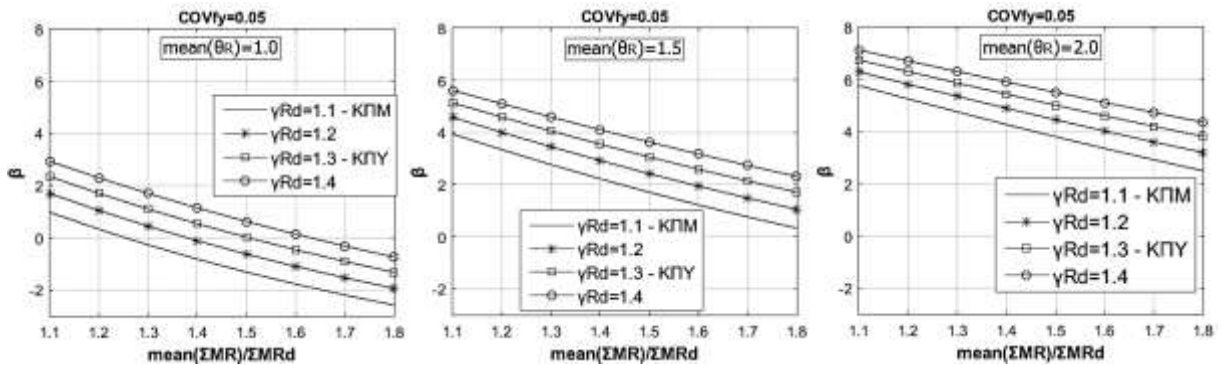
Εικόνα 70: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R

- 2) Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R (για την περίπτωση $\text{COVfy}=0.05$). Σημειώνεται πως για τις τρεις τιμές της μέσης τιμής που

εξετάζονται, ο λόγος μέσης τιμής προς τυπική απόκλιση (COV) κρατείται σταθερός όπως προτείνεται ($COV(\theta_R)=0.07$).

θ_R :
 $mean(\theta_R)=1/ 1.5/ 2.0$
 $COV(\theta_R)=0.07$

θ_E :
 $mean(\theta_E)=1$
 $std(\theta_E)=0.10$



Εικόνα 71: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέση τιμή (mean) του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R

Σχόλια για τον συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R :

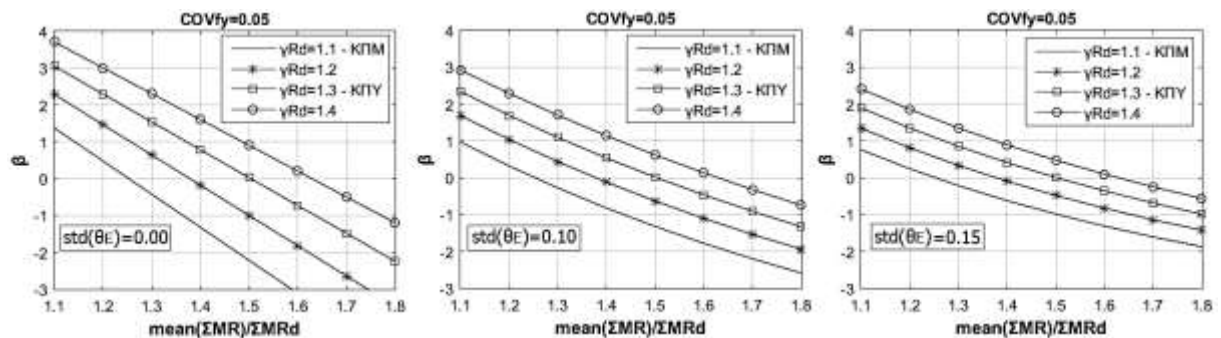
Από τις αναλύσεις ευαισθησίας του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R γίνεται αντιληπτό πως για αυξημένες τιμές της μέσης τιμής ο δείκτης αξιοπιστίας αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό, ενώ η αύξηση της τυπικής απόκλισης επιφέρει μικρότερες αλλαγές (στη μείωση του δείκτη αξιοπιστίας).

θ_E :

Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή δράσεων θ_E (για την περίπτωση $COVf_y=0.05$).

θ_R :
 $mean(\theta_R)=1$
 $std(\theta_R)=0.07$

θ_E :
 $mean(\theta_E)=1$
 $std(\theta_E)=0.00/ 0.10/ 0.15$



Εικόνα 72: Ανάλυση ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση (std) του συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E

Σχόλια για τον συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E

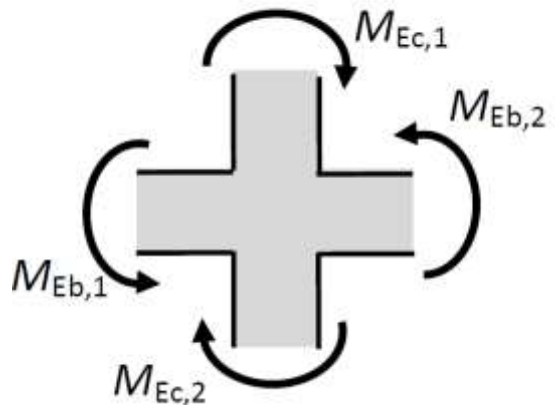
Από τις αναλύσεις ευαισθησίας για την τυπική απόκλιση του συντελεστή προσομοιώματος δράσεων θ_E γίνεται αντιληπτό πως η μεταβολή της επιφέρει μικρές σχετικά αλλαγές στον βαθμό αξιοπιστίας του ελέγχου (όπως και η τυπική απόκλιση του συντελεστή προσομοιώματος αντοχών θ_R).

6 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟ ΟΡΘΗ ΕΝΤΑΣΗ (ΚΟΜΒΟΥ) ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN 1998)

6.1 Ικανοτικός σχεδιασμός κόμβου οπλισμένου σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον ικανοτικό σχεδιασμό κόμβου, απαιτείται η καμπτική αστοχία σε έναν κόμβο κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να προέλθει λόγω κάμψης στις δοκούς και όχι στα υποστυλώματα. Για το λόγο αυτό, ελέγχεται η δυσμενέστερη περίπτωση όπου έχουν σχηματιστεί πλαστικές αρθρώσεις στις δύο δοκούς του κόμβου, και απαιτείται το άθροισμα των ροπών σχεδιασμού των δοκών (προσαυξημένο με τον ικανοτικό συντελεστή) να είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των υποστυλωμάτων, δηλαδή:

$$\Sigma M_{Rd,c} \geq 1.3 \Sigma M_{Rd,b}$$



Στο κεφάλαιο αυτό θεωρούμε πως το υποστυλωμα είναι όμοια οπλισμένο στις δύο πλευρές του (με $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{tot}/2$), αλλά και στα δύο άκρα του κόμβου (χωρίς άρση της γενικότητας για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του), οπότε δεν θα γίνεται διάκριση μεταξύ άκρου 1, 2 (όπως γίνεται κανονικά) αφού $M_{R1}^{\pm} = M_{R2}^{\pm}$ και δεν θα ελεγχθούν δύο περιπτώσεις (ωρολογιακής και αντιωρολογιακής φοράς ροπών στα άκρα της δοκού).

6.2 Εξίσωση αστοχίας

Οι τυχαίες μεταβλητές που περιγράφουν το φαινόμενο είναι

- 1) η ροπή των δοκών ΣM_{Rb} ,
- 2) η ροπή των υποστυλωμάτων ΣM_{Rc}
- 3) Οι συντελεστές αβεβαιότητας των προσομοιωμάτων θ_1 και θ_2 . Εδώ δεν θα γίνει διάκριση μεταξύ συντελεστή προσομοιώματος αντοχών και δράσεων αφού και οι δύο αναφέρονται στην μέθοδο υπολογισμού της καμπτικής ροπής αντοχής, και ως εκ τούτου θα θεωρηθούν οι τιμές που προτείνονται για τον συντελεστή προσομοιώματος αντοχών.

$$\begin{array}{ll} \theta_1: & \theta_2: \\ \text{mean}(\theta_1)=1 & \text{mean}(\theta_2)=1 \\ \text{std}(\theta_1)=0.07 & \text{std}(\theta_2)=0.07 \end{array}$$

Κατά τον σχεδιασμό έχουμε: $\Sigma M_{Rd,c} \geq 1.3 \Sigma M_{Rd,b}$, δηλαδή γενικά $\Sigma M_{Rd,c} = a_{CD} \Sigma M_{Rd,b}$, με $a_{CD} \geq 1.3$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση αστοχίας είναι:

$$g = \theta_1 \Sigma M_{Rc} - \theta_2 \Sigma M_{Rb} \Rightarrow g \left(\frac{1}{\Sigma M_{Rd,c}} \right) = \theta_1 \frac{\Sigma M_{Rc}}{\Sigma M_{Rd,c}} - \theta_2 \frac{\Sigma M_{Rb}}{\Sigma M_{Rd,c}} = \theta_1 \frac{\Sigma M_{Rc}}{\Sigma M_{Rd,c}} - \theta_2 \frac{1}{a_{CD}} \frac{\Sigma M_{Rb}}{\Sigma M_{Rd,b}}$$

ή

$$g' = \theta_1 \frac{\Sigma M_{Rc}}{\Sigma M_{Rd,c}} - \theta_2 \frac{1}{a_{CD}} \frac{\Sigma M_{Rb}}{\Sigma M_{Rd,b}}$$

Σχόλια - Παρατηρήσεις:

- 1) Η συνάρτηση g' είναι διαφορετική από την g , αλλά επειδή ενδιαφερόμαστε για την πιθανότητα $P(g < 0)$ που ταυτίζεται με την $P(g' < 0)$, η διερεύνηση της g' αντί της g δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα
- 2) Η συνάρτηση g' δεν είναι γραμμική συνάρτηση των τυχαίων μεταβλητών που την ορίζουν. Πρέπει λοιπόν να γίνει γραμμικοποίηση της επιφάνειας αστοχίας στο σημείο σχεδιασμού όπως και στο κεφάλαιο 3.3 (μέθοδος FORM), αλλά επειδή οι μεταβλητές $\Sigma M_R / \Sigma M_{Rd}$ των δοκών και των υποστυλωμάτων είναι κανονικές μεταβλητές ενώ οι συντελεστές προσομοιωμάτων θ είναι λογαριθμοκανονικές, όπως παρουσιάστηκε στο παράδειγμα 2 (σελ 6), η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής g' προκύπτει κανονική κατανομή.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές παράμετροι της εξίσωσης αστοχίας:

$$\frac{\Sigma M_{Rc}}{\Sigma M_{Rd,c}}$$

Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5, επειδή οι ικανοτικοί έλεγχοι αναφέρονται σε κατάσταση σεισμού, οι καμπτικές αντοχές των υποστυλωμάτων (είτε σχεδιασμού ΣM_{Rd} , είτε η τυχαία μεταβλητή ΣM_R) αντιστοιχούν σε αξονική δύναμη στην σεισμική κατάσταση σχεδιασμού. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη ότι το υποσύλωμα έχει σχεδιαστεί για μεγαλύτερες τιμές αξονικής δύναμης (κατά τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση αστοχίας), στην διερεύνηση του όρου $\Sigma M_R / \Sigma M_{Rd}$ (για τον ικανοτικό έλεγχο), από

τους πίνακες του κεφαλαίου 2 δεν θα ληφθούν υπόψη οι τιμές της ανηγμένης αξονικής $\nu=0.8$ και $\nu=1.0$.

Προσοχή: Οι δύο ροπές αντοχής MR_1 και MR_2 και οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού τους δεν αναφέρονται αναγκαστικά στην ίδια περίπτωση με αυτή που παρουσιάζεται στους Πίνακες του κεφαλαίου 2.2.2, διότι αφορούν τα δύο υποστυλώματα πάνω και κάτω από τον κόμβο και κατά συνέπεια ενδεχομένως να διαφέρει η τιμή της αξονικής που τους ασκείται. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.06 \text{ για } COVfy=0.10 \\ \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.03 \text{ για } COVfy=0.05 \end{array} \right.$$

Δηλαδή η παράμετρος $\text{std}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ δεν εξαρτάται (σε σημαντικό βαθμό) από την αξονική ν .

Συνεπώς διαφέρει μόνο η τιμή της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ που όμως κυμαίνεται στο ίδιο εύρος τιμών ($1.1 \leq \text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd \leq 1.8$) και υπολογίζεται ως εξής: Έστω a_1 και a_2 οι δύο τιμές της παραμέτρου $\text{mean}(MR)/MRd$ για το πάνω και κάτω υποστυλώμα αντίστοιχα, δηλαδή $\text{mean}(MR_1)=a_1*MRd_1$ και $\text{mean}(MR_2)=a_2*MRd_2$, όπου a_1 και a_2 υπολογίζονται από τους Πίνακες του κεφαλαίου 2.2.2. Για την τιμή $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ έχουμε

$$\frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = \frac{\text{mean}(MR_1)+\text{mean}(MR_2)}{MRd_1 + MRd_2} = \frac{a_1*MRd_1+a_2*MRd_2}{MRd_1 + MRd_2}$$

Δηλαδή ο μέσος όρος των δύο τιμών a_1 και a_2 με συντελεστές βαρύτητας τη ροπή αντοχής κάθε υποστυλώματος.

Κατά συνέπεια, όπως και στο κεφάλαιο 5 θα θεωρούμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.06 \text{ για } COVfy=0.10 \\ \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} \approx 0.03 \text{ για } COVfy=0.05 \end{array} \right.$$

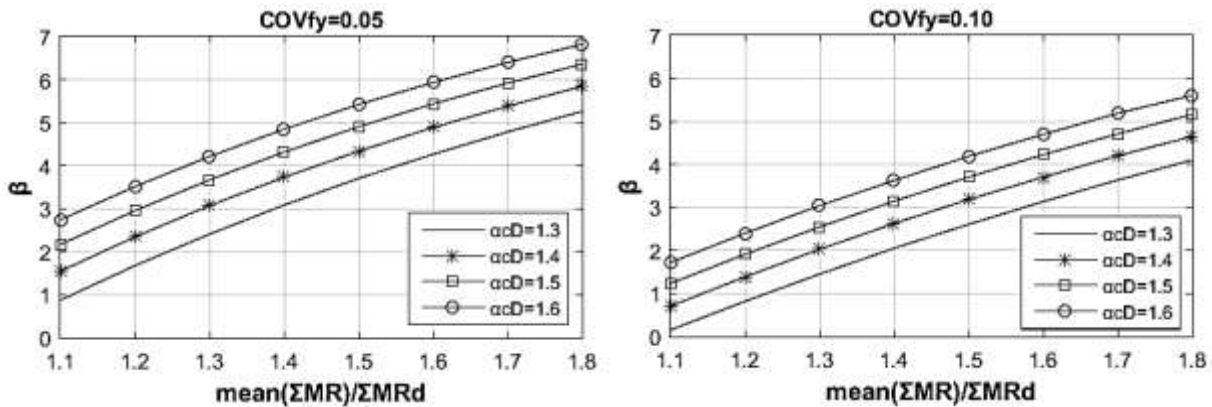
Και $1.1 \leq \text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd \leq 1.8$ (για όλες τις περιπτώσεις).

$$\frac{\Sigma MR_b}{\Sigma MR_{d,b}}$$

Όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4 (Αξιοπιστία ικανοτικού ελεγχου τεμνουσας δοκου οπλισμένου σκυροδέματος), επειδή οι ικανοτικοί έλεγχοι αναφέρονται σε κατάσταση σεισμού και προϋποθέτουν την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων, θα θεωρείται ότι οι διατομές είναι διπλά οπλισμένες με επαρκή θλιβόμενο και εφελκυσμένο οπλισμό. Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε (σελ 32) τα εύρη των τιμών της παραμέτρου είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = 0.1, \text{ και } \frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = [1.38 - 1.46] \approx 1.40 \text{ για } COVfy=0.10 \\ \frac{\text{std}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = 0.05, \text{ και } \frac{\text{mean}(\Sigma MR)}{\Sigma MRd} = [1.26 - 1.34] \approx 1.30 \text{ για } COVfy=0.05 \end{array} \right.$$

6.3 Συντελεστής αξιοπιστίας ικανοτικού ελέγχου κόμβου



Εικόνα 73: Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου κόμβου συναρτήσει της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ για τις δύο περιπτώσεις συντελεστή μεταβλητότητας χάλυβα.

Σχόλια:

- 1) Ο συντελεστής μεταβλητότητας του χάλυβα επηρεάζει τον βαθμό αξιοπιστίας του ελέγχου σχεδόν ομοιόμορφα για όλες τις τιμές $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$, όπου για αύξηση της τιμής του προκύπτει μείωση της αξιοπιστίας του ικανοτικού ελέγχου κόμβου.
- 2) Με την αύξηση του συντελεστή ικανοτικής μεγέθυνσης α_{cD} αυξάνεται γραμμικά ο βαθμός αξιοπιστίας του ικανοτικού ελέγχου κόμβου.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε διερρεύνηση της αξιοπιστίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, όταν αυτά σχεδιάζονται με γνώμονα κανονισμούς των Ευρωκωδίκων. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι αναλύσεις αξιοπιστίας των εξισώσεων σχεδιασμού 6.10, 6.10α, 6.10β (για τον σχεδιασμό δοκού), και οι ικανοτικοί έλεγχοι τέμνουσας δοκού, τέμνουσας υποστρώματος και κόμβου. Προϋπόθεση για να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις αυτές είναι η γνώση των πιθανοτικών χαρακτηριστικών της αντοχής των στοιχείων που εξετάζονται. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερρεύνηση και εκτιμήθηκαν τα πιθανοτικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) της αντοχής για δοκούς και υποστρώματα, σε καμπτική και διατμητική καταπόνηση (κεφάλαιο 2). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3) Αξιοπιστία δοκών σε κάμψη και διάτμηση υπό την εφαρμογή των εξισώσεων 6.10 ή 6.10α και 6.10β

Συμπεράσματα 3^{ου} κεφαλαίου:

- 1) Δεν επηρεάζεται ο βαθμός αξιοπιστίας από το είδος του στατικού συστήματος της δοκού (αμφιέριστη/ αμφίπακτη/ συνεχής δοκός πολλών ανοιγμάτων κλπ.) και το είδος του ελέγχου για καμπτική ή διατμητική καταπόνηση, δηλαδή η αξιοπιστία της δοκού είναι ανεξάρτητη της στατικής της λειτουργίας.
- 2) Ο συνδυασμός των εξισώσεων 6.10α και 6.10β οδηγεί σε μικρότερο βαθμό αξιοπιστίας καθώς η τιμή σχεδιασμού που προκύπτει από την υπέρθεσή τους είναι μικρότερη από αυτή της 6.10. Παρατηρείται ακόμα πως ο βαθμός αξιοπιστίας με τις 6.10α και 6.10β έχει μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς το λόγο χ (κινητών προς συνολικά φορτία).
- 3) Η ύπαρξη δύο κινητών φορτίων ($\kappa=0.5$) έναντι ενός κινητού ($\kappa=0$), οδηγεί σε μεγαλύτερο βαθμό αξιοπιστίας.
- 4) Οι διαφορές στη μεταβλητότητα του χάλυβα ενώ επηρεάζουν τα πιθανοτικά χαρακτηριστικά της αντίστασης ($mean(R)/R_d$ και $std(R)/R_d$), λόγω ομόρροπης αύξησης της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης, δεν μεταβάλλουν τελικά το αποτέλεσμα της αξιοπιστίας της δοκού.
- 5) Η διαφοροποίηση μεταξύ κάμψης και διάτμησης στα αποτελέσματα της αξιοπιστίας που αναμένονται έγκειται στην διαφοροποίηση του όρου R/R_d μεταξύ κάμψης και διάτμησης (όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του R/R_d εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 2).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαφορές στην αντίσταση κάμψης και διάτμησης:

A) Κάμψη:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} = [0.12 - 0.14] \approx 0.13 \text{ και } 1.377 \leq \frac{\text{mean}(\text{MR})}{\text{MRd}} \leq 1.618, \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ \frac{\text{std}(\text{MR})}{\text{MRd}} = [0.06 - 0.08] \approx 0.07 \text{ και } 1.255 \leq \frac{\text{mean}(\text{MR})}{\text{MRd}} \leq 1.500, \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{array} \right.$$

B) Διάτμηση:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{std}(\text{VR},s)}{\text{VRd},s} = 0.14 \text{ και } \frac{\text{mean}(\text{VR},s)}{\text{VRd},s} = 1.38, \text{ για } \text{COVfy}=0.10 \\ \frac{\text{std}(\text{VR},s)}{\text{VRd},s} = 0.06 \text{ και } \frac{\text{mean}(\text{VR},s)}{\text{VRd},s} = 1.25, \text{ για } \text{COVfy}=0.05 \end{array} \right.$$

Σχόλιο για διαφοροποίηση αξιοπιστίας κάμψης - διάτμησης:

Οι τιμές της παραμέτρου $\text{mean}(R)/R_d$ στις περιπτώσεις της διάτμησης ταυτίζονται με τις χαμηλότερες τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων της αντοχής σε κάμψη ενώ οι τιμές των $\text{std}(R)/R_d$ είναι σχεδόν ίσες, οπότε κατά κανόνα θα ισχύει $\beta_{\text{κάμψης}} \geq \beta_{\text{διάτμησης}}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4) Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας δοκού (κατά EN 1998)

Συμπεράσματα 4^{ου} κεφαλαίου:

- 1) Οι διαφορές στη μεταβλητότητα του χάλυβα ενώ επηρεάζουν τις μεταβλητές f_{yw}/f_{ywd} και $\Sigma MR/\Sigma MRd$, λόγω της ομόρροπης αύξησης των μεγεθών της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισής τους, δεν μεταβάλλουν τελικά το αποτέλεσμα της αξιοπιστίας της δοκού.
- 2) Οι διαφορετικές χρήσεις χώρων επηρεάζουν την αξιοπιστία του ικανοτικού ελέγχου μόνο στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντικό ποσοστό κινητών φορτίων και για μεγάλες σχετικά τιμές της παραμέτρου λ^* , (δηλαδή για $\lambda \geq 0.6$ και $\lambda^* \geq 0.5$). Για $\lambda^* \gg 1$ παρατηρούμε επίσης πως δεν επηρεάζεται η αξιοπιστία του ελέγχου από τον συντελεστή γ_{Rd} .
- 3) Για τιμές της παραμέτρου $\lambda^* < 0.5$, παρατηρούμε (ομοίως και για τις τρεις χρήσεις χώρων) πως ο συντελεστής αξιοπιστίας παίρνει την ελάχιστη τιμή του - $\beta=0$, (δηλαδή πιθανότητα αστοχίας 50%) για τη μέση κατηγορία πλαστιμότητας ($\gamma_{Rd}=1.0$). Οι περιπτώσεις αυτές ($\lambda^* < 0.5$) προκύπτουν αν η δοκός έχει υπερδιαστασιοποιηθεί σε σχέση με τις απαιτήσεις του κανονισμού (π.χ. έχει διαστασιοποιηθεί λόγω απαίτησης ελάχιστων οπλισμών ή κατασκευαστικών διατάξεων) με αποτέλεσμα $M_{Rd} \gg M_{Ed}$. Για αυτές τις περιπτώσεις κρίνεται πως πρέπει να λαμβάνεται διαφορετικά ο συντελεστής γ_{Rd} για τη μέση κατηγορία πλαστιμότητας ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες πιθανότητες αστοχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5) Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας υποστυλώματος (κατά EN 1998)

Συμπεράσματα 5^{ου} κεφαλαίου:

- 1) Οι τιμές του συντελεστή αξιοπιστίας β προκύπτουν αρκετά χαμηλές ($\beta < 0$) για μεγάλο εύρος περιπτώσεων, και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η παράμετρος $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$ τόσο μειώνεται η αξιοπιστία του ελέγχου.
- 2) Η αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας του χάλυβα από $\text{COVfy}=0.05$ σε $\text{COVfy}=0.10$ προκαλεί σχετική αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας κυρίως για τις μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου $\text{mean}(\Sigma MR)/\Sigma MRd$.
- 3) Κρίνεται απαραίτητη η επανεξέταση του ικανοτικού συντελεστή γ_{Rd} καθώς η πιθανότητα αστοχίας του ικανοτικού ελέγχου τέμνουσας του υποστυλώματος προκύπτει πολύ μεγάλη (μεγαλύτερη από 50% για αρκετές περιπτώσεις).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6) Αξιοπιστία ικανοτικού ελέγχου κόμβου (κατά EN 1998)

Συμπεράσματα 6^{ου} κεφαλαίου:

- 1) Η αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας του χάλυβα από $COV_f=0.05$ σε $COV_f=0.10$ προκαλεί μείωση του δείκτη αξιοπιστίας ομοιόμορφα για όλες τις τιμές της παραμέτρου $mean(\Sigma MR)/\Sigma MR_d$.
- 2) Παρατηρείται μεγάλο εύρος στο βαθμό αξιοπιστίας του ικανοτικού ελέγχου κόμβου, που για οριακό σχεδιασμό ($a_{CD}=1.3$) προκύπτει $\beta_{min}\approx 0$ και $\beta_{max}\approx 5$.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ.Γ.Τρέζος, Σημειώσεις για το μάθημα ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] EN 1990: Basis of structural design.
- [3] EN 1991: Actions on structures.
- [4] EN 1992: Design of concrete structures.
- [5] EN 1998: Design of structures for earthquake resistance.
- [6] JCSS PROBABILISTIC MODEL CODE PART 3: RESISTANCE MODELS – 3.9 MODEL UNCERTAINTIES.
- [7] Milan Holicky - Jana Markova, JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration: Calibration of Reliability Elements for a Column.
- [8] Χρήστος Γ. Καραγιάννης, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΟΥ, εκδόσεις σοφία.
- [9] Schlaich et al ("Toward a consistent design of structural concrete", PCI journal V.32, No. 2, pp. 72-150).