

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΤΟΥΡΚΙΑΣ»

Σερταρίδου Ειρήνη ΑΕΜ 3310

Τατσιόπουλος Γιώργος ΑΕΜ 3353

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Θεόδωρος Τσάπανος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2004

"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"**ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Σελ.

2-3

Κεφάλαιο 1**Α.Π.Θ****ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ**

1.1 Σεισμικότητα.....	4-11
1.2 Σεισμική Επικινδυνότητα.....	12-14
1.3 Μέθοδοι και μέτρα εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας.....	15-17
1.4 Στατιστική Bayes.....	18-19
1.5 Η στατιστική Bayes στη σεισμολογία.....	20-21
1.6 Σεισμοτεκτονική Τουρκίας.....	22-26

Κεφάλαιο 2**ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ**

2.1 Εισαγωγικά-Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.....	27-59
---	-------

Κεφάλαιο 3**ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ**

3.1 «Παραμετρική-Ιστορική» μεθοδολογία.....	60-63
3.2 Υπολογισμός μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.....	64-65
3.3 Κατανομή του μέγιστου παρατηρημένου PGA και υπολογισμός των παραμέτρων του.....	66-67

Κεφάλαιο 4**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

4.1 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας.....	68-70
4.2 Σεισμικός κίνδυνος.....	71-77
4.3 Συμπεράσματα.....	78

Παράρτημα

Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΟΥ 1999	79-84
---------------------------------	-------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85-86
---------------------------	-------

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, δηλαδή ο υπολογισμός της πιθανότητας πρόκλησης σεισμών συγκεκριμένου μεγέθους σε μια καθορισμένη περιοχή και σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, έχει πολύ μεγάλη σημασία στην μείωση του σεισμικού κινδύνου στις αστικές περιοχές. Η Τουρκία, κατατάσσεται παγκοσμίως ανάμεσα στις χώρες που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμική δραστηριότητα με αποτέλεσμα την διεξαγωγή πλήθους μελετών από επιστήμονες και οι οποίες βασίζονται σε διάφορες μεθοδολογίες, με σκοπό τον προσδιορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής αυτής.

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται μια νέα μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Kijko and Graham (1999) και κάνει χρήση της στατιστικής Bayes. Ο σκοπός είναι ο προσδιορισμός του βαθμού σεισμικής επικινδυνότητας από την άποψη των πιθανοτήτων υπέρβασης μιας ορισμένης τιμής της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (Peak Ground Acceleration, P.G.A), κατά την διάρκεια ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος για όλη την περιοχή.

Στο πρώτο κεφάλαιο, που αποτελεί μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες και τους ορισμούς της σεισμολογίας, αναπτύσσονται οι όροι σεισμικότητα και τα μέτρα της και σεισμική επικινδυνότητα. Ακολουθεί τέλος μια αναφορά στη σεισμοτεκτονική της Τουρκίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη δηλαδή, ο κατάλογος των σεισμών με μέγεθος $M \geq 4.5$, ένας πίνακας με τους ιστορικούς σεισμούς της Τουρκίας και τέλος ένας ακόμη χρήσιμος κατάλογος με τους καταστροφικούς σεισμούς που έπληξαν την Τουρκία κατά τον 20^ο αιώνα ($M \geq 5.5$).

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και καλείται «παραμετρική-ιστορική» μεθοδολογία, οι σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) και τέλος η κατανομή του μέγιστου παρατηρούμενου PGA και ο υπολογισμός των παραμέτρων του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σεισμικής επικινδυνότητας και γίνεται μια εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου για την περιοχή.

Τέλος, σαν παράρτημα, γίνεται μια αναφορά στον μεγάλο σεισμό που έπληξε την Τουρκία το 1999 και δίνονται εικόνες από τις καταστροφές.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας προς τον Καθηγητή Θεόδωρο Τσάπανο, για την ανάθεση του θέματος, την βοήθεια και την συνεχή καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

1.1 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

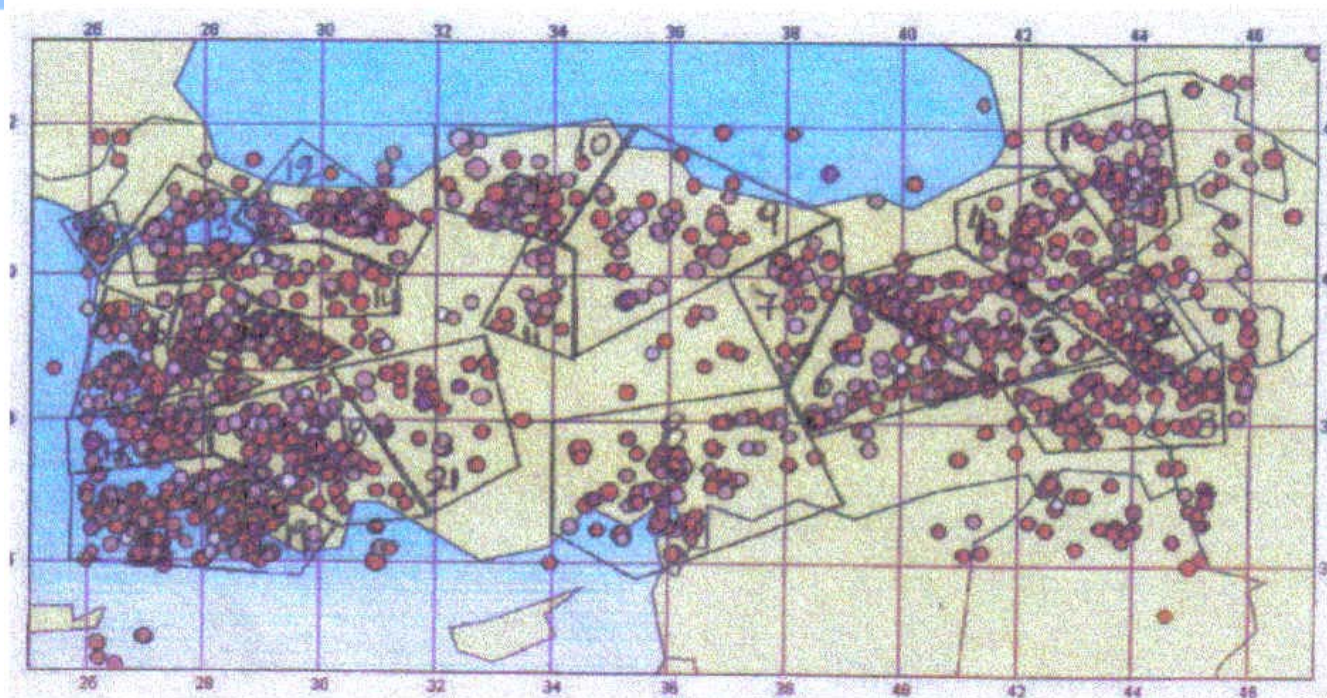
Με τον όρο **σεισμικότητα** μιας περιοχής εννοούμε μια ποσότητα η οποία θεωρείται συνάρτηση τόσο του μεγέθους, όσο και του πλήθους των σεισμών που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την εκτίμηση της είναι ο αριθμός και το μέγεθος των σεισμών, η μέση περίοδος επανάληψης σεισμών ορισμένου μεγέθους, η ανηγμένη σεισμική παραμόρφωση, ο ρυθμός έκλυσης σεισμικής ροπής, κτλ.

Πληροφορίες για την σεισμικότητα μιας περιοχής μπορεί να συλλέξει κάποιος τόσο από καταγεγραμμένες ιστορικές μαρτυρίες όσο και από ενόργανα δεδομένα τα οποία αποτελούν τους σεισμικούς καταλόγους και περιγράφουν με αρκετά μεγάλη λεπτομέρεια τη σεισμικότητα της περιοχής. Οι ιστορικές μαρτυρίες είναι αρχαία κείμενα ιστορικών και συγγραφέων, οι οποίοι μέσα στα έργα τους περιγράφουν τα μακροσεισμικά αποτελέσματα αρκετών ισχυρών σεισμών που συνέβησαν ή έγιναν αντιληπτοί στην περιοχή τους. Τα ενόργανα δεδομένα αφορούν μικρότερης διάρκειας και πιο πρόσφατη χρονική περίοδο από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα.

Η **ποιοτική** μελέτη της σεισμικότητας μιας περιοχής βασίζεται στην κατανομή των epicέντρων των σεισμών. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύμβολα τόσο για τα μεγέθη των σεισμών, όσο και για την κατακόρυφη κατανομή των σεισμικών εστιών κατασκευάζονται χάρτες οι οποίοι απεικονίζουν την γεωγραφική κατανομή της σεισμικότητας σε μια περιοχή (Σχ.1). Απαραίτητη προϋπόθεση για να παρουσιάζει ο εκάστοτε χάρτης μια αντικειμενική εικόνα της σεισμικότητας, είναι να υπάρχουν διαθέσιμα αφενός μεν αξιόπιστα και ακριβή στοιχεία, και αφετέρου δε πλήρεις σεισμολογικοί κατάλογοι τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιούνται.

Η **ποσοτική** μελέτη της σεισμικότητας συνίσταται στον καθορισμό της κατανομής των μεγεθών των σεισμών με χρήση εμπειρικών σχέσεων και στατιστικής. Το μέγεθος των σεισμών εκφράζει το ποσό της εκλυόμενης ενέργειας στην εστία κατά την γένεσή τους.

Μερικές φορές η σεισμικότητα εκφράζεται με τη μέση περίοδο επανάληψης σεισμών συγκεκριμένου μεγέθους ή με άλλες σχετικές ποσότητες (πιθανότητες, κτλ.)



Σχήμα 1. Χάρτης των epicέντρων των σεισμών της Τουρκίας μεγέθους $M \geq 4.5$ για την χρονική περίοδο 1903-2003

Ο ορισμός αυτής, όπως δόθηκε από τον Bath (1953), αναφέρει πως «σεισμικότητα ορίζεται το συνολικό ποσό της εκλυόμενης σεισμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου». Ανεξάρτητα πάντως, του τρόπου με τον οποίο εκφράζεται η σεισμικότητα, εφαρμόζεται κατά κανόνα η κατανομή των μεγεθών των Gutenberg-Richter (1944) και θεωρείται ότι ισχύει ο νόμος Poisson για τη χρονική κατανομή των σεισμών.

Σύμφωνα με τους Gutenberg-Richter (1944), η αθροιστική συχνότητα, N , των σεισμών που γίνονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου m ετών και έχουν μεγέθη ίσα ή μεγαλύτερα του M , δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Log}N = a_m - bM \quad (1)$$

όπου a_m και b είναι παράμετροι οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα για κάθε περιοχή. Η παράμετρος a_m εξαρτάται από τη σεισμικότητα της περιοχής, από το εμβαδόν, S , της επιφάνειας την οποία καλύπτουν τα επίκεντρα και από το χρονικό διάστημα στο οποίο έγιναν οι σεισμοί ενώ η παράμετρος b εξαρτάται από τις τάσεις και από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στον εστιακό χώρο. Η ετήσια αθροιστική συχνότητα των σεισμών που συμβαίνουν σε μια περιοχή με μέγεθος M ή μεγαλύτερο δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Log}N = a - bM \quad (2)$$

όπου η παράμετρος a_m για χρονικό διάστημα ενός έτους δίνεται από τη σχέση:

$$a = a_m - \log m \quad (3)$$

Διάφοροι επιστήμονες διατύπωσαν κατά καιρούς διαφορετικές αλλά και παρεμφερείς απόψεις για την έννοια της σεισμικότητας μιας περιοχής. Έτσι, κατά τον Aki (1968) ο όρος σεισμικότητα εκφράζει την εικόνα προεργασίας που παίρνουμε από τις σημερινές αναγραφές για μια περιοχή μέχρι τη στιγμή της γένεσής ενός σεισμού. Αντίθετα, ο Stacey (1969) θεωρεί ότι η σεισμικότητα συνδέεται περισσότερο με τον όρο «σεισμική δράση».

Σύμφωνα με τον Karnik (1971) η πρόγνωση ενός πιθανού σεισμού δηλαδή, ο καθορισμός της θέσης του, του μεγέθους του αλλά και του χρόνου γένεσής του, είναι ο στόχος μιας σεισμικής έρευνας.

Στις έρευνες αυτού του τύπου γίνεται συνδυασμός εμπειρικών σχέσεων με στατιστικά μοντέλα σχετικά με τη χωρική και χρονική κατανομή των εστιών. Οι Kaila et al. (1972) πιστεύουν πως θα πρέπει να υπάρξει διαχωρισμός της σεισμικότητας που αναφέρεται σε δεδομένα από συγκεκριμένη χρονική περίοδο και της ευρύτερης σεισμικότητας που σχετίζεται με μακράς διάρκειας δραστηριότητα στην οποία συμπεριλαμβάνονται και προβλέψεις για το μέλλον.

Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται ως μέτρα σεισμικότητας είναι συναρτήσεις των παραμέτρων a_m και b (Παπαζάχος, 1997) και είναι οι ακόλουθες:

- Ο **μέσος ετήσιος αριθμός των σεισμών**, $N(=N_m)$, οι οποίοι συμβαίνουν σε μια περιοχή και έχουν μέγεθος M ή μεγαλύτερο, δίνεται από τη σχέση:

$$N_m = \frac{10^a}{10^{bM}} \quad (4)$$

- Η **μέση περίοδος επανάληψης**, T_m , των σεισμών οι οποίοι γίνονται σε μια περιοχή και έχουν μέγεθος M ή μεγαλύτερο, δίνεται από τη σχέση:

$$T_m = \frac{10^{bM}}{10^a} \quad (5)$$

- Η **πιθανότητα**, P , ώστε η περίοδος επανάληψης των σεισμών μεγέθους M ή μεγαλύτερου να είναι μεγαλύτερη από ορισμένη τιμή, T_a , δίνεται από τη σχέση:

$$P = \exp\left(-\frac{T}{T_m}\right) \quad (6)$$

όπου T_m είναι η μέση περίοδος επανάληψης.

- Η **πιθανότητα**, P_t , να γίνει σεισμός με μέγεθος M ή μεγαλύτερο στην περιοχή αυτή κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου, t , υποθέτοντας κατανομή Poisson, δίνεται από τη σχέση:

$$P_t = 1 - \exp(-10^{a-bM} t) \quad (7)$$

- Το συχνότερα παρατηρούμενο **μέγιστο μέγεθος**, M_t , σε χρόνο t ετών, δίνεται από τη σχέση:

$$M_t = \frac{a}{b} + \frac{\log t}{b} \quad (8)$$

➤ Το συχνότερα παρατηρούμενο **μέγιστο μέγεθος**, M_1 , σε διάστημα ενός έτους προκύπτει από τη σχέση (8) και είναι:

$$M_1 = \frac{a}{b} \quad (9)$$

Για την λεπτομερέστερη μελέτη της σεισμικότητας της περιοχής, η Τουρκία χωρίστηκε σε 21 σεισμογόνες ζώνες που αναγράφονται στην συνέχεια:







1.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ραγδαία επέκταση των πόλεων τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση οδήγησε τους επιστήμονες στην εκτενέστερη μελέτη σε θέματα σεισμικής επικινδυνότητας. Η συσχέτιση των δυο θεμάτων έγινε γιατί η επέκταση των πόλεων, οριζόντια και κατακόρυφα, σε συνδυασμό με ασταθή εδάφη θεμελίωσης, δηλαδή εδάφη με χαλαρούς και χωρίς συνοχή επιφανειακούς σχηματισμούς μεγάλου πάχους ή με υψηλής στάθμης υδροφόρους ορίζοντες τα οποία μπορούν να εμφανίσουν φαινόμενα συντονισμού με τις σεισμικές κινήσεις, είναι δυνατόν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για τις κατασκευές και κατ' επέκταση και τους ανθρώπους.

Η σεισμική επικινδυνότητα σε μια περιοχή όπου υπάρχουν ήδη ή πρόκειται να γίνουν τεχνικές κατασκευές, καθορίζεται από τις αναμενόμενες σεισμικές κινήσεις. Με τον όρο **σεισμική επικινδυνότητα, H**, ενός τόπου εννοούμε την αναμενόμενη στον τόπο αυτό τιμή της σεισμικής έντασης, Y , σε καθορισμένο χρονικό διάστημα και με ορισμένη τιμή υπέρβασης της τιμής αυτής. Η σεισμική ένταση μπορεί να μετρηθεί με μια από τις παραμέτρους της σεισμικής κίνησης, δηλαδή την μακροσεισμική ένταση, I_{MM} , την εδαφική επιτάχυνση, PGA , ταχύτητα, PGV , μετάθεση, PGD , τις φασματικές τιμές τους PSV κτλ, ενώ το χρονικό διάστημα το οποίο συνήθως δεχόμαστε είναι το ένα έτος ή τα 60 χρόνια που είναι ο μέσος χρόνος ζωής μιας κατασκευής.

Το αναμενόμενο αποτέλεσμα της σεισμικής κίνησης σε μια θέση, δηλαδή οι βλάβες στις τεχνικές κατασκευές, οι θάνατοι κτλ., ονομάζεται **σεισμικός κίνδυνος, R**. Αυτός, εξαρτάται από τις αναμενόμενες σεισμικές κινήσεις στα θεμέλια της κατασκευής (σεισμική επικινδυνότητα) και από τον τρόπο απόκρισης της κατασκευής στις αναμενόμενες σεισμικές κινήσεις ή όπως ονομάζεται συνήθως **τρωτότητα, V**, της τεχνικής κατασκευής. Η τρωτότητα της κατασκευής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες μερικοί εκ των οποίων είναι η ποιότητα των υλικών της κατασκευής, η ιδιοπερίοδος της, ο παράγοντας απόσβεσης και η πλαστικότητα.

Οι Wiechert and Milne (1979) με τον όρο «σεισμικός κίνδυνος» δηλώνουν τον κίνδυνο απωλειών, οι οποίες μπορεί να έχουν και οικονομικές επιπτώσεις, ενώ με την «σεισμική επικινδυνότητα» την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης ορισμένης τιμής της εδαφικής κίνησης.

Κατά τον Lomnitz (1974) ο όρος σεισμικός κίνδυνος αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης ενός κρίσιμου σεισμού σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο κρίσιμος αυτός σεισμός λέγεται «σεισμός σχεδιασμού» ενώ το μέγεθος του M_D , λέγεται «μέγεθος σχεδιασμού». Αν θεωρήσουμε πως D είναι μια συγκεκριμένη χρονική περίοδος για μια περιοχή ή μια θέση, τότε ο σεισμικός κίνδυνος αυτής θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_D = 1 - \exp(-aDe^{B M_D}) \quad (10)$$

όπου a είναι ο μέσος ετήσιος αριθμός σεισμών με $M \geq 0$ και β είναι η παράμετρος κατανομής της συχνότητας των σεισμών.

Ο Cornell (1968) θεώρησε μέτρο του σεισμικού κινδύνου μια από τις παραμέτρους της εδαφικής κίνησης, δηλαδή τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA, ή τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα, PGV, ή τη μέγιστη εδαφική μετάθεση, PGD, ως συνάρτηση μιας μέσης περιόδου επανάληψης.

Επιπλέον, διαφορές παρατηρούνται και στα αποτελέσματα της ανάλυσης των δυο αυτών όρων. Μελετώντας την σεισμική επικινδυνότητα παίρνουμε καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης σε συνάρτηση με το πλάτος της εδαφικής κίνησης ενώ, αντίστοιχα από μελέτες του σεισμικού κινδύνου παίρνουμε τις πιθανότητες στη μονάδα του χρόνου των διαφόρων βαθμών αστοχίας ή καταστροφών σε μια κατασκευή εξαιτίας σεισμού (McGuire, 1993).

Η εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στο σεισμικό κίνδυνο, R , τη σεισμική επικινδυνότητα, H , και την τρωτότητα, V , παρουσιάζεται με τη σχέση:

$$R = H * V \quad (11)$$

Οι επιστήμονες έχοντας ως στόχο τη μείωση των βλαβών (καταστροφές κτιρίων, θάνατοι κλπ.) από τις σεισμικές κινήσεις προσπαθούν να μειώσουν την τιμή του σεισμικού κινδύνου, R . Για να μπορέσει όμως να επιτευχθεί κάτι τέτοιο θα πρέπει να μειωθεί η τιμή των H και V . Αυτό, στην πράξη, σημαίνει ελάττωση μόνο της τρωτότητας των κτιρίων αφού η σεισμική επικινδυνότητα καθορίζεται από φυσικούς παράγοντες (ιδιότητες των σεισμικών εστιών, του μέσου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και της δομής του εδάφους θεμελίωσης.), στους οποίους δεν υπάρχει ακόμα η δυνατότητα επέμβασης από τον άνθρωπο. Παρόλα αυτά η

μελέτη και η γνώση αυτών των παραμέτρων βοηθούν τους επιστήμονες στον ακριβέστερο καθορισμό της σεισμικής επικινδυνότητας πράγμα εξαιρετικά σημαντικό για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Δυο είναι οι στόχοι όλων όσων εργάζονται στον αντισεισμικό σχεδιασμό:

1. Η τεχνική κατασκευή να μην υποστεί βλάβες ή να πάθει μικρές βλάβες οι οποίες είναι εύκολα επισκευάσιμες, από την πιθανότερη αναμενόμενη σεισμική κίνηση στον χρόνο ζωής.
2. Η τεχνική κατασκευή να μην καταρρεύσει από την αναμενόμενη μέγιστη δυνατή σεισμική κίνηση στη θέση της κατασκευής.

1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας μπορεί να γίνει βασικά με δυο τρόπους, αιτιοκρατικά και πιθανολογικά. Στην αιτιοκρατική προσέγγιση χρησιμοποιείται το χειρότερο σενάριο σεισμικής επικινδυνότητας, ενώ στην πιθανολογική προσέγγιση γίνονται δεκτές και αβεβαιότητες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του σεισμού δηλαδή, το μέγεθος, το χώρο αλλά και το χρόνο γένεσής του.

> Αιτιοκρατική Ανάλυση

Στην αιτιοκρατική ανάλυση γίνεται επιλογή μεμονωμένων και συγκεκριμένων σεισμών ώστε να καταλήξουν σε ένα σενάριο σεισμικής επικινδυνότητας με βάση το οποίο γίνεται ο υπολογισμός της εδαφικής κίνησης. Τα στάδια τα οποία μπορεί να διακρίνει κανείς στη διαδικασία της αιτιοκρατικής ανάλυσης έχουν περιγραφεί από τον Reiter (1990) και είναι τα ακόλουθα:

1. Καθορισμός και περιγραφή όλων των σεισμικών πηγών που μπορούν να προκαλέσουν σημαντική σεισμική κίνηση στην υπό μελέτη περιοχή. Η περιγραφή των σεισμικών πηγών περιλαμβάνει τη γεωμετρία τους αλλά και το σεισμικό δυναμικό τους.
2. Καθορισμός της απόστασης ανάμεσα στη σεισμική πηγή και στη θέση ενδιαφέροντος. Επειδή οι πηγές έχουν γεωμετρικά σχήματα και οι κορυφές τους βρίσκονται σε διαφορετική απόσταση από τη θέση ενδιαφέροντος η απόσταση που επιλέγεται είναι συνήθως η μικρότερη.
3. Επιλογή του σεισμικού σχεδιασμού, δηλαδή του σεισμού ο οποίος θεωρείται ότι θα έχει τις σημαντικότερες συνέπειες στην περιοχή έρευνας σχετικά πάντα με κάποια από τις παραμέτρους εδαφικής κίνησης.

4. Καθορισμός της σεισμικής επικινδυνότητας στη περιοχή ενδιαφέροντος με βάση τα αποτελέσματα του σεισμού σχεδιασμού στην εδαφική κίνηση η οποία μπορεί να είναι κάποια από τις παραμέτρους ισχυρής κίνησης (I_{MM} , PGA, PGV, PGD) όπως αυτές υπολογίζονται από τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης.

Προκύπτει λοιπόν, πως η αιτιοκρατική ανάλυση μας δίνει το χειρότερο σενάριο επικινδυνότητας σε μια περιοχή κάτι το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύστοχα σε περιπτώσεις κατασκευών των οποίων η κατάρρευση θα έχει τραγικές συνέπειες, όπως για παράδειγμα πυρηνικών εργοστασίων, φραγμάτων κτλ. Δεν θα πρέπει όμως να ξεχνάμε, πως ενώ τα αποτελέσματα της αιτιοκρατικής ανάλυσης είναι αρκετά συντηρητικά, η επιλογή του μέγιστου μεγέθους όπως και των άλλων παραμέτρων των αρχικών σταδίων είναι θέμα πολύπλοκο και πολυπαραμετρικό και ενέχει υποκειμενικότητα που στηρίζεται στην επιλογή των γεωεπιστημόνων.

➤ Πιθανολογική Ανάλυση

Η προσέγγιση της πιθανολογικής ανάλυσης έκανε δυνατό το συνδυασμό των αβεβαιοτήτων ως προς το μέγεθος, το χώρο γένεσης αλλά και το ρυθμό εμφάνισης των σεισμών στη διαδικασία υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην πιθανολογική ανάλυση ορίστηκε αρχικά από τον Cornell (1968). Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται είναι ανάλογα με αυτά της αιτιοκρατικής προσέγγισης με κάποιες όμως διαφορές.

1. Καθορισμός και περιγραφή των σεισμικών πηγών. Γενικά, το πρώτο στάδιο είναι παρόμοιο και στις δυο αναλύσεις με τη διαφορά ότι στην πιθανολογική ανάλυση η πιθανότητα να συμβεί ένας σεισμός είναι η ίδια σε όλα τα σημεία της πηγής ενώ στην αιτιοκρατική η πιθανότητα γένεσής ενός σεισμού είναι 1 στα σημεία κοντά στην περιοχή μελέτης και 0 οπουδήποτε αλλού.
2. Καθορισμός του ρυθμού σεισμικότητας για κάθε πηγή. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια σχέση που προσδιορίζει το μέσο ρυθμό εμφάνισης σεισμών

μεγέθους M ή μεγαλύτερου που πρόκειται να συμβούν σε κάθε πηγή. Στην προσέγγιση αυτή δεν υπάρχει περιορισμός στο ανώτερο όριο μεγέθους όπως στην αιτιοκρατική και αυτό κάνει και τα δυο αυτά στάδια κατά βάση διαφορετικά.

3. Προσδιορισμός της εδαφικής κίνησης που προκαλείται σε μια θέση από έναν σεισμό οποιουδήποτε πιθανού μεγέθους και από οποιαδήποτε πιθανή απόσταση σε μια ζώνη όπως αυτά υπολογίζονται από σχέσεις απόσβεσης. Αξίζει να τονιστεί πως η αβεβαιότητα που υπάρχει στην εμπειρική σχέση πρόβλεψης λαμβάνεται υπόψη.

4. Υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης κάποιας συγκεκριμένης τιμής μιας παραμέτρου της εδαφικής κίνησης κατά τη διάρκεια ορισμένης χρονικής περιόδου. Για τον υπολογισμό αυτό λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες σχετικά με τη θέση γένεσης του σεισμού, το μέγεθος αλλά και τον καθορισμό της εδαφικής κίνησης.

1.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ BAYES

Η εξίσωση του Bayes ή το θεώρημα Bayes οφείλει το όνομα του στον Άγγλο υπουργό και μαθηματικό Rev.Thomas Bayes (1702-1761). Το φημισμένο άρθρο με τίτλο "An essay towards solving a problem in the doctrine of chances" που δημοσιεύτηκε μάλιστα το 1764, μετά το θάνατό του, περιλαμβάνει το παραπάνω θεώρημα. Ο λόγος αυτού είναι πως ο Bayes είχε κάποιες αμφιβολίες ως προς την ορθότητα ορισμένων τμημάτων του άρθρου του (Ζαχαροπούλου, 2001).

Το θεώρημα Bayes αποτελεί τη βάση ενός ολοκληρωμένου κλάδου της στατιστικής επιστήμης που ονομάζεται Bayesian Στατιστική και έχει πολλές και πολύ ενδιαφέρουσες εφαρμογές σε ποικιλία επιστημών όπως ιατρική, οικονομικές και κοινωνικές επιστήμες, γεωφυσική, σεισμολογία αλλά και άλλες επιστήμες.

Συγκεκριμένα για τον κλάδο της σεισμολογίας, η στατιστική Bayes έχει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν κατάλληλη για τον υπολογισμό σεισμολογικών παραμέτρων. Το πρώτο από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι πως με το θεώρημα Bayes υπάρχει δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγούμενων πληροφοριών, σεισμολογικών, γεωλογικών, στατιστικών, στα σεισμολογικά δεδομένα παρατήρησης. Οι προηγούμενες πληροφορίες που μπορεί να δεχτεί το θεώρημα Bayes μπορούν να είναι όχι μόνο ποσοτικές αλλά και ποιοτικές κάτι που χωρίς το συγκεκριμένο θεώρημα δεν μπορούσε να γίνει παρά μόνο εμπειρικά. Όλα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα πως με χρήση του θεωρήματος Bayes τα αποτελέσματα περιέχουν επιπρόσθετες πληροφορίες που ο βαθμός συμμετοχής τους στα τελικά αποτελέσματα ρυθμίζεται ανάλογα με το βαθμό της αξιοπιστίας των προηγούμενων πληροφοριών. Πολλά μοντέλα, πιθανολογικά και μη, έχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγούμενων πληροφοριών. Η διαφορά τους, όμως, με τη στατιστική Bayes είναι πως σε αυτή δεν γίνονται απλά κάποιες αρχικές υποθέσεις αλλά ορίζεται με τρόπο συστηματικό ένα σύνολο παραμέτρων που μπορεί να αναθεωρηθούν στην πορεία της έρευνας

Στον τομέα της σεισμολογίας, για παράδειγμα, και συγκεκριμένα όταν μελετάται η σεισμικότητα μιας περιοχής θα μπορούσε κανείς να πάρει αποτελέσματα ανακριβή κάτω από ορισμένες συνθήκες. Έτσι, αν η υπό μελέτη περιοχή έχει φτωχά ή ελλιπή δεδομένα είτε επειδή είναι χαμηλής σεισμικότητας, είτε εξαιτίας του μικρού χρονικού διαστήματος των ενόργανων παρατηρήσεων τα αποτελέσματα είναι πολύ πιθανόν να μην είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα ώστε να οδηγηθεί κάποιος στο συμπέρασμα ότι και οι μελλοντικοί σεισμοί θα παρουσιάζουν παρόμοια χωροχρονική και κατά μέγεθος κατανομή με τους προηγούμενους. Αν όμως, προστεθούν πληροφορίες που αφορούν ιστορικούς σεισμούς της περιοχής, σεισμοτεκτονικές πληροφορίες κ.τ.λ. τότε υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της σεισμολογίας της περιοχής και τα αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα αφού εμπεριέχουν πληροφορίες όχι μόνο από το πρόσφατο παρελθόν.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό της στατιστικής Bayes που ικανοποιεί τη σεισμολογία είναι πως έχει τη δυνατότητα αναπροσαρμογής των εκτιμήσεων. Η στατιστική Bayes έχει δυο θεμελιώδεις έννοιες, την πρότερη (prior) και την ύστερη (posterior) πληροφορία. Η βάση της στατιστικής Bayes είναι ο υποκειμενικός προσδιορισμός της πιθανότητας ενός ενδεχομένου B που ονομάζεται αρχική ή πρότερη πιθανότητα (initial or prior probability). Μετά την πραγματοποίηση ενός ενδεχομένου A , η πιθανότητα του B αναθεωρείται και ονομάζεται πλέον αναθεωρημένη ή ύστερη πιθανότητα (revised or posterior probability). Συνεπώς, η εξίσωση Bayes μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μηχανισμός αναπροσαρμογής της αρχικής πιθανότητας σε αναθεωρημένη πιθανότητα μετά την απόκτηση της πληροφορίας για την πραγματοποίηση του A . Η ίδια διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί εάν παρατηρηθούν νέα δεδομένα μόνο που τότε η ύστερη πληροφορία θα θεωρείται πρότερη ως προς τα νέα δεδομένα. (Ζαχαροπούλου, 2001)

Το τρίτο και τελευταίο χαρακτηριστικό της στατιστικής Bayes που εξυπηρετεί τη σεισμολογία, είναι η ενσωμάτωση στην αβεβαιότητα λόγω της πιθανολογικής προσέγγισης του φαινομένου της αβεβαιότητας που υπάρχει στην εκτίμηση των παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο, ενώ οι άλλες στατιστικές μέθοδοι υπολογίζουν την πιθανότητα ενός γεγονότος θεωρώντας ότι οι παράμετροι αυτού έχουν σταθερές τιμές, η στατιστική Bayes συνυπολογίζει και την αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων.

1.5 Η ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ BAYES ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ

Ο πρώτος επιστήμονας που χρησιμοποίησε τη στατιστική Bayes για να μπορέσει να λύσει προβλήματα σεισμολογίας ήταν ο Benjamin (1968) ο οποίος θεωρώντας κατανομή Poisson ανέπτυξε για πρώτη φορά την κατανομή Bayes για τα σεισμικά γεγονότα. Παρόμοια εφαρμογή όμως, σε διαφορετικές κατανομές προτάθηκε αργότερα από τον Chu και τους συνεργάτες του (1971), οι οποίοι υπολόγισαν τελικά τις πιθανότητες γένεσης σεισμών που συνδέονται με την ισχυρή κίνηση. Ο Esteva (1969) και αργότερα ο Lomnitz (1969) χρησιμοποίησαν μια παρόμοια προσέγγιση για να μελετήσουν τη σεισμικότητα του Μεξικού και της Χιλής αντίστοιχα.

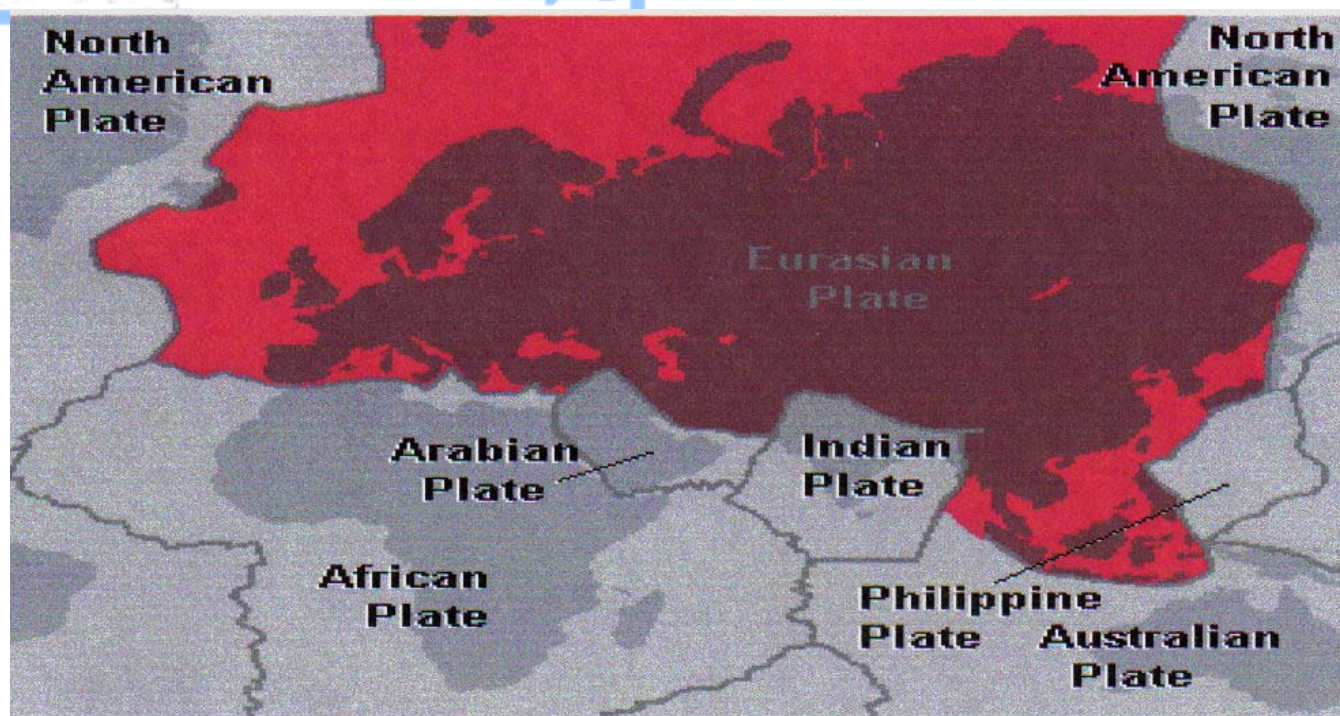
Οι Mortgat and Shah (1979) επινόησαν ένα μοντέλο με το οποίο χρησιμοποιώντας τη στατιστική Bayes μπόρεσαν να ενσωματώσουν στο μοντέλο ένα πλήθος από αντικειμενικές και υποκειμενικές πληροφορίες, να εισάγουν το μήκος του ρήγματος και να μοντελοποιήσουν τα όρια των διαφόρων ρηγμάτων. Τέλος, κατασκεύασαν χάρτη μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης της Κόστα Ρίκα για διάστημα 500 ετών καθώς επίσης και της Γουατεμάλα, Αλγερίας και των ακτών της Αλάσκας.

Ο Campbell (1982, 1983) πρότεινε μια κατανομή ακραίων τιμών για τη γένεση σεισμών κατά μήκος του ρήγματος του San Jacinto. Την ίδια μεθοδολογία ακολούθησαν και οι Σταυρακάκης και Τσελέντης (1986) με στόχο να προβλέψουν το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού κατά μήκος του Ελληνικού Τόξου. Ο Ferraes (1985) χρησιμοποίησε τη στατιστική Bayes για να προβλέψει τους χρόνους επανάληψης ισχυρών σεισμών κατά μήκος του δυτικού και ανατολικού Ελληνικού Τόξου, καθώς και για ισχυρούς σεισμούς της πόλης του Μεξικού.

Ο Tsapanos (2001a) χρησιμοποίησε τη στατιστική Bayes εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της μέγιστης πιθανοφάνειας για τον υπολογισμό παραμέτρων σεισμικής επικινδυνότητας της Κρήτης και της γύρω περιοχής. Η στατιστική Bayes χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό παραμέτρων σεισμικότητας (M_{max}) για διάφορες περιοχές του κόσμου (Tsapanos, 2001b).

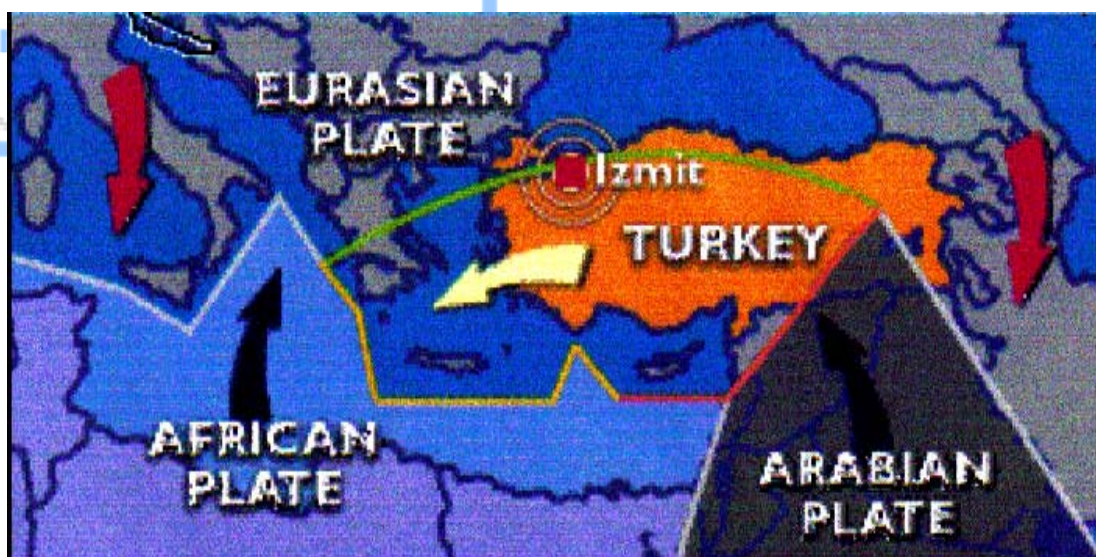
Οι Hamdache and Retief (2001) υπολόγισαν τη σεισμική επικινδυνότητα σε συγκεκριμένες περιοχές των κύριων σεισμογενών ζωνών της Βόρειας Αλγερίας χρησιμοποιώντας μεταξύ των άλλων τη μεθοδολογία των Kijko and Graham (1998,1999) η οποία στηρίζεται στην στατιστική Bayes. Επίσης, η Mantyniemi και συνεργάτες (2001) χρησιμοποίησαν την ίδια μεθοδολογία για να υπολογίσουν τις παραμέτρους σεισμικότητας (τιμή b των Gutenberg-Richter, ρυθμό σεισμικότητας λ , και μέγιστο μέγεθος m_{max}) για τους σεισμούς της σεισμογενούς ζώνης της Vrancea στην Ρουμανία. Παρουσίασαν και χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας για τρία διαφορετικά βάθη στην περιοχή της Vrancea.

Πιο πρόσφατα, οι Tsapanos et al. (2002) χρησιμοποίησαν τη στατιστική Bayes για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων υπέρβασης μακροσεισμικών εντάσεων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για δώδεκα πόλεις της Ιαπωνίας. Η μέθοδος δεν κάνει χρήση κάποιας εμπειρικής σχέσης πρόβλεψης και η εξάρτηση της τοπικής έντασης με την επικεντρική ένταση υπολογίζεται κατευθείαν από τα δεδομένα χρησιμοποιώντας το μοντέλο Bayes.

1.6 ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΤΟΥΡΚΙΑΣ

Σχήμα 2. Η Ευρασιατική πλάκα πάνω στην οποία τοποθετείται η Τουρκία

Η Τουρκία τοποθετείται πάνω στην πλάκα της Ευρασίας (Σχήμα 2), η οποία έχει προκαλέσει μεγάλο αριθμό ισχυρών σεισμών. Ο ιστορικά παλιότερος σεισμός που έχει καταγραφεί αναφέρεται πίσω στο 411 π.Χ. Έχουν γίνει περίπου 100 σεισμοί με μεγέθη 7.0 και μεγαλύτερα στην Τουρκία. Επίσης 14 σεισμοί έχουν λάβει χώρα από το 342 μ.Χ με αριθμό θυμάτων πάνω από 10.000. Σαν αποτέλεσμα η Τουρκία κατατάσσεται ανάμεσα στις χώρες που έχουν υποφέρει από μεγάλους καταστροφικούς σεισμούς που συνεπάγεται απώλειες ζώων και καταστροφές περιουσιών. Η πλειοψηφία των σεισμών αυτών έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια κίνησης της Ευρασιατικής πλάκας, της Αφρικανικής και της Αραβικής, η οποία είναι ακόμη σε εξέλιξη. Οι πλάκες αυτές κινούνται προς την μεταξύ τους κατεύθυνση νότια και βόρεια με αποτέλεσμα η Τουρκία να συμπιέζεται προς τα δυτικά (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Η κίνηση μεταξύ των πλακών της Ευρασίας και της Αραβικής/Αφρικανικής πλάκας

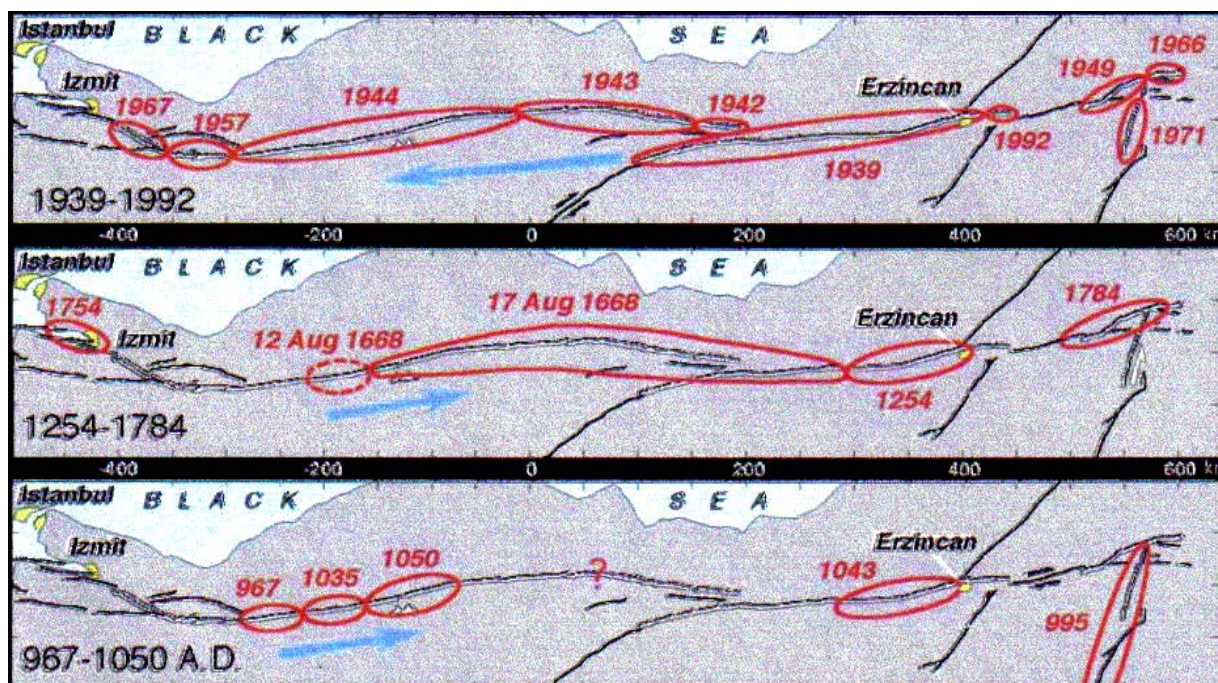
Υπάρχουν ορισμένες κύριες πηγές σεισμικής δραστηριότητας στην περιοχή της Τουρκίας και είναι:

➤ Βόρειο ρήγμα Ανατόλιας

Κατά το Μειόκαινο (15 εκατομμύρια χρόνια πριν) η B-N σύγκρουση που έλαβε χώρα μεταξύ της Αραβικής και Ευρασιατικής πλάκας, προκάλεσε πάχυνση του φλοιού το οποίο σήμερα συνιστά τις ορεινές αλυσίδες της δυτικής Τουρκίας και Καυκάσου. Η προς τα δυτικά επέκταση της νεαρής δημιουργησθήςας μικροπλάκας της Ανατόλιας έλαβε χώρα από αυτό το σύστημα παραμόρφωσης (Sengor and Canitez 1982). Η κίνηση του διαδόθηκε μεταξύ του Βόρειου και Ανατολικού ρήγματος της Ανατόλιας, διαμορφώθηκε συγχρόνως με την μικροπλάκα. Το Βόρειο ρήγμα της Ανατόλιας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σε παγκόσμια κλίμακα ενεργά δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, όχι μόνο εξαιτίας της έντονης σεισμικής δραστηριότητας μεταξύ 1939-1967 αλλά και εξαιτίας της σημασίας του στην τεκτονική της Ανατολικής Μεσογείου. Το Βόρειο ρήγμα της Ανατόλιας αποτελεί

το βόρειο σύνορο της προς τα δυτικά κίνησης της μικροπλάκας της Ανατολίας και συνδέεται με το καθεστώς των συμπίεσεων στην περιοχή της θάλασσας του Αιγαίου.

Η ζώνη του ρήγματος έχει περίπου 1500 km μήκος, εκτείνεται από την Ανατολική Τουρκία (Karhova) ως την Ηπειρωτική Ελλάδα.



Σχήμα 4. Χάρτες που δείχνουν ότι το Βόρειο ρήγμα της Ανατολίας διαρρηγνύεται προκαλώντας διαδοχικούς σεισμούς.

Μεταξύ 1939 και 1967 η ζώνη του ρήγματος έχει παρουσιάσει μια σημαντική σεισμική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της οποίας 6 σεισμοί με κατεύθυνση προς τα δυτικά δημιούργησαν μια συνεχή επιφάνεια διάρρηξης 900 km κατά μήκος της ζώνης του ρήγματος από το Erzincan στο δυτικό άκρο της κοιλάδας Mudurnu, όπως για παράδειγμα το 1939 στο Erzincan ($M=7.9$), 1942 Erboza-Niksar ($M=7.3$), 1943 Tosya-Ilgaz ($M=7.3$), 1944 Bolu-Gerede ($M=7.3$), 1957 Abant ($M=7.1$), 1967 Mudurnu Valley ($M=7.1$). Ο τελευταίος καταστροφικός σεισμός στο Βόρειο ρήγμα της Ανατολίας έγινε τον Αύγουστο του 1999 στον Μαρμαρά, δυτικά της Τουρκίας σε συντεταγμένες $40^{\circ}70' \text{ B}-29^{\circ}98' \text{ A}$ και βάθος 17 km. Πάνω από 15.000 άνθρωποι βρήκαν τραγικό θάνατο και πολλά κτίρια καταστράφηκαν.

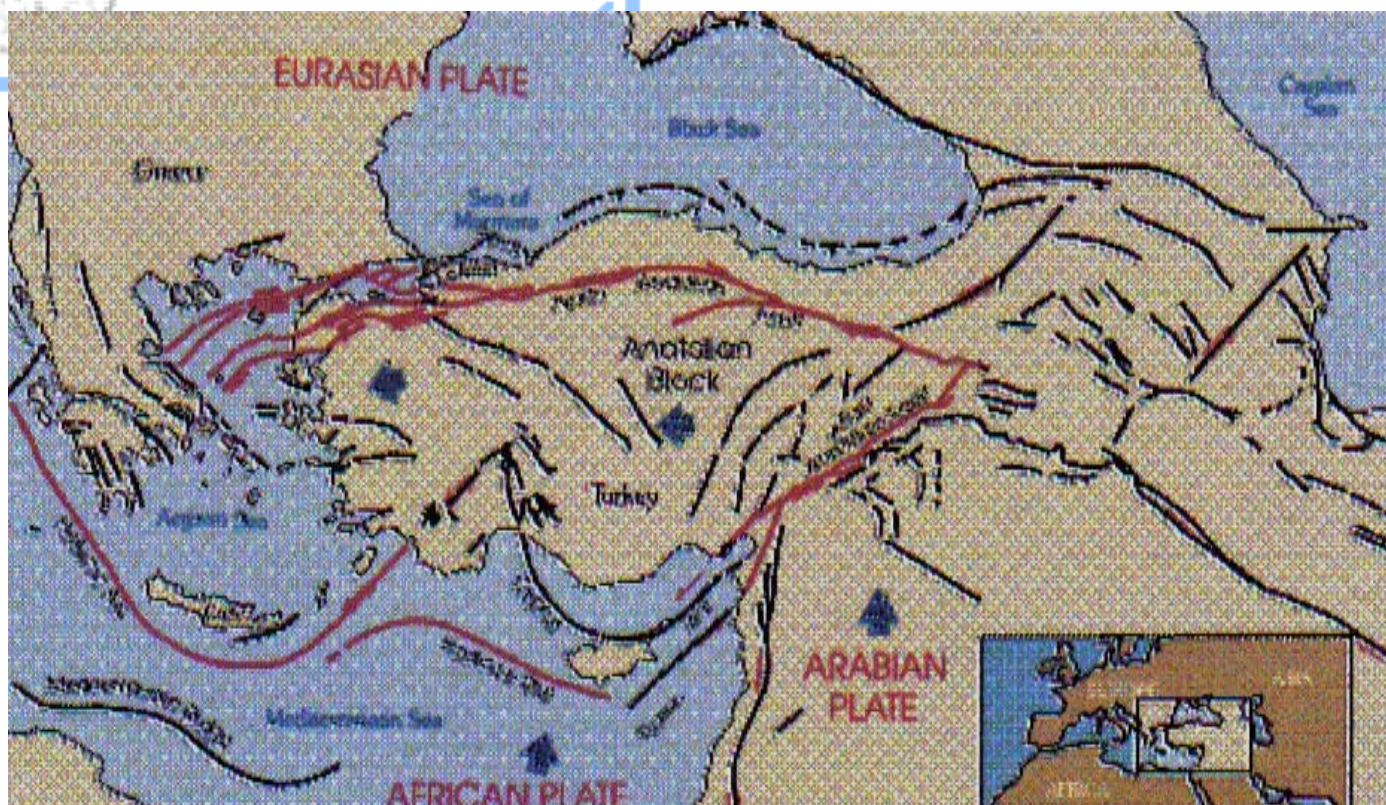
➤ Ανατολικό ρήγμα της Ανατόλιας

Το άλλο πολύ καλά γνωστό ρήγμα είναι το ανατολικό ρήγμα της Ανατόλιας, το οποίο είναι ένα ενεργό αριστερόστροφο ρήγμα ολίσθησης και διαμορφώνει τα όρια μεταξύ του μπλοκ της Ανατόλιας στα ΒΔ και της Αραβικής/Αφρικανικής πλάκας στα ΝΑ. Το ρήγμα αυτό κινείται με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και έχει περίπου 650 km μήκος και 1-30 km πλάτος. Εκτείνεται από την Antakya ως την Korlioia, το ακραίο ανατολικά τμήμα του βόρειου ρήγματος της Ανατόλιας. Ενώνει το βόρειο ρήγμα με τα ρήγματα της Νεκρής θάλασσας και της Ερυθράς και επεκτείνει το ΝΔ άκρο του στα ανατολικά της Κύπρου. Τα ρήγματα Kozan, Savrun, Goksu και Surgu θεωρούνται η προς τα ΝΔ προέκταση του ανατολικού ρήγματος της Ανατόλιας. Μεγάλοι σεισμοί στο ρήγμα αυτό καταγράφηκαν το 1905 στην Malatya ($M=6.8$) και το 1971 στο Bingol ($M=5.9$)

Το Τόξο της Κύπρου περιβάλλει μια πλατιά και σύνθετη ζώνη ωκεάνιας βύθισης κατά μήκος της οποίας η Αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την Τουρκική (Ανατόλια) πλάκα. Μεγάλος αριθμός σεισμών στην περιοχή αυτή έχουν εστιακό βάθος πάνω από 100 km.

Το ανατολικό ρήγμα της Ανατόλιας, το Ελληνικό Τόξο και το Κυπριακό Τόξο αντιπροσωπεύουν το όριο μεταξύ της Αφρικανικής πλάκας στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου (Mc Kenzie et al. 1972)

Στο παρακάτω σχήμα(5) δίνεται ο τεκτονικός χάρτης της Τουρκίας όπου και διακρίνονται το βόρειο ρήγμα της Ανατόλιας, το ανατολικό ρήγμα της Ανατόλιας, το Ελληνικό Τόξο και η τάφρος της Florencia.



Σχήμα 5. Τεκτονικός χάρτης της Τουρκίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας της Τουρκίας στηριζόμενη σε μια μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Kijko and Graham (1998,1999) και καλείται «παραμετρική-ιστορική».

Η μεθοδολογία αυτή δεν απαιτεί τον καθορισμό σεισμικών ζωνών και επιτρέπει τη χρήση τόσο ιστορικών όσο και ενόργανων δεδομένων που είναι διαθέσιμα για την εκάστοτε περιοχή μελέτης.

Τρία χρόνια αργότερα οι Jiménez et al. (2001) παρουσίασαν ένα ενιαίο μοντέλο σεισμικού κινδύνου για ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου. Έτσι όλη η Μεσόγειος διαιρέθηκε σε σεισμογενείς ζώνες, οι οποίες καθορίστηκαν με βάση τεκτονικά, γεωφυσικά, γεωλογικά και σεισμολογικά στοιχεία. Μια ενιαία σεισμική συμπεριφορά υιοθετήθηκε για κάθε μια από τις ζώνες αυτές και καθορίστηκαν οι παράμετροι μεγέθους-συχνότητας και το μέγιστο πιθανό μέγεθος με βάση τους σεισμικούς καταλόγους και τέλος υπολογίστηκε η τιμή της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης με την χρήση της κατάλληλης σχέσης απόσβεσης.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, με $M \geq 4.5$, για τον σκοπό της παρούσης εργασίας, πάρθηκαν από το Kandili Observatory και καλύπτουν την χρονική περίοδο από το 1900 έως το 2000.

Στον **πίνακα 1** που παρατίθεται παρακάτω, παρουσιάζεται ο κατάλογος των σεισμών της περιόδου 1900-2000 με μεγέθη $M \geq 4.5$, που έλαβαν χώρα στην Τουρκία.



















































Ένα σύνολο από ιστορικά δεδομένα εξασφαλίστηκε επίσης από το British Geological Survey (Musson 2003, προσωπική επικοινωνία). Για ολόκληρη την Τουρκία οι παράμετροι της σχέσης μεγέθους-συχνότητας είναι $a = 5.16 \pm 0.12$ και $b = 0.88 \pm 0.02$, καθώς το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος όσο αναφορά τα ενόργανα δεδομένα της περιόδου 1900-2000, είναι 7.9, ενώ για το μέρος των ιστορικών δεδομένων ο μεγαλύτερος σεισμός είχε μέγεθος 7.7 και έλαβε χώρα το 1509 στην θάλασσα του Μαρμαρά ($40.92^\circ\text{N} - 28.74^\circ\text{E}$).

Στον **πίνακα 2**, αναγράφονται οι ιστορικοί σεισμοί που έγιναν από το 222 Π.Χ έως το 1899 Μ.Χ στην ευρύτερη περιοχή που μελετάμε. Στον ίδιο πίνακα αναγράφονται η ημερομηνία και ο χρόνος γένεσης, οι συντεταγμένες του επικέντρου, η μέγιστη ένταση που προκάλεσε ο σεισμός καθώς και ο τύπος γένεσης του σεισμού. Επίσης αναφέρονται όπου υπάρχουν πληροφορίες για εκδήλωση tsunامي, αριθμό νεκρών κτλ.







Ένας πολύ χρήσιμος κατάλογος που περιλαμβάνει πολλές πληροφορίες για μεγάλους και καταστροφικούς σεισμούς, του 20^{ου} αιώνα στην Τουρκία, είναι επίσης διαθέσιμος και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, για τον σκοπό της ανάλυσης του σεισμικού κινδύνου της περιοχής.

Στον **πίνακα 3** που ακολουθεί, παρατίθεται ο κατάλογος αυτός. Στην πρώτη στήλη είναι το έτος γένεσης του σεισμού, η ένταση και το μέγεθος του σεισμού βρίσκονται στην δεύτερη και τρίτη στήλη, αντίστοιχα. Στην τέταρτη στήλη είναι ο αριθμός των νεκρών που προκλήθηκε από τους σεισμούς και στην τελευταία στήλη είναι ο αριθμός των κατεστραμμένων κτιρίων.





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

3.1 «ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ-ΙΣΤΟΡΙΚΗ» ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι δυσκολίες που μπορεί να συναντήσει κάποιος όσο αναφορά τη διαδικασία ανάλυσης πιθανολογικής επικινδυνότητας (Probabilistic Seismic Hazard Analysis P.S.H.A) είναι οι παρακάτω:

1. Η απαίτηση καθορισμού σεισμικών ζωνών και
2. Οι ελλείψεις που υπάρχουν στους σεισμολογικούς καταλόγους.

Το πρώτο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι η τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για P.S.H.A και αναπτύχθηκε από τον Cornell (1968) απαιτεί τον καθορισμό των σεισμικών ζωνών. Δυστυχώς, δεν έχουν εντοπιστεί και χαρτογραφηθεί όλα τα ενεργά ρήγματα και έτσι, οι αιτίες της σεισμικότητας δεν είναι πολύ κατανοητές. Συχνά, διαφορετικοί καθορισμοί σεισμογενών ζωνών οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικούς υπολογισμούς σεισμικής επικινδυνότητας. Επιπλέον η μεθοδολογία κατά Cornell, υπολογισμού σεισμικής επικινδυνότητας απαιτεί για κάθε ζώνη, γνώση των παραμέτρων του μοντέλου (παράμετρος b των Gutenberg-Richter, το όριο πληρότητας των σεισμικών δεδομένων m_{min} , ο μέσος ρυθμός σεισμικότητας λ και το πάνω όριο του μεγέθους των σεισμών m_{max}) που δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια για μικρές περιοχές ή περιοχές με ελλιπή σεισμική ιστορία. Το πρόβλημα των ανεπαρκών δεδομένων για μικρές περιοχές λύνεται με επιλογή μεγαλύτερων σεισμικών ζωνών αλλά μια τέτοια διαδικασία έρχεται σε σύγκρουση με την όλη ιδέα επιλογής ανεξάρτητων σεισμικών περιοχών. Επιπλέον, η αύξηση της επιφάνειας των πιθανών σεισμικών ζωνών οδηγεί στην υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας.

Όσο αναφορά τους καταλόγους, αυτοί συνήθως περιλαμβάνουν δυο τύπους πληροφοριών:

- [illegible]

Έτσι, μια διαδικασία που αποδέχεται τη διαφορετική ποιότητα των διαφόρων τμημάτων του καταλόγου και δεν απαιτεί καθορισμό των σεισμικών ζωνών θα αποτελεί ένα εναλλακτικό εργαλείο υπολογισμού της σεισμικής επικινδυνότητας.

- 61 -

Η εφαρμογή της συνίσταται σε δυο βήματα:

Το πρώτο βήμα εφαρμόζεται στην περιοχή της οποίας την σεισμική επικινδυνότητα ερευνούμε και περιλαμβάνει τον υπολογισμό των παραμέτρων της περιοχής. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο μέσος ρυθμός σεισμικότητας λ , η παράμετρος b των Gutenberg-Richter (από τη σχέση $\log N = \alpha - bM$) και το μέγιστο μέγεθος $m_{\max}$ της περιοχής. Θα πρέπει να γίνει σαφές πως οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από το μοντέλο απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων που επιλέγεται.

Το δεύτερο βήμα είναι εφαρμόσιμο σε έναν συγκεκριμένο χώρο της περιοχής και περιλαμβάνει τον υπολογισμό της κατανομής των τιμών για την επιλεγμένη παράμετρο εδαφικής κίνησης δηλαδή ή τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) ή την μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV) ή τη μέγιστη εδαφική μετάθεση (PGD).

Σε κάθε βήμα της μεθοδολογίας οι παράμετροι υπολογίζονται μέσω της διαδικασίας της μέγιστης πιθανοφάνειας, εφαρμόζοντας την Bayesian μεθοδολογία όπου είναι δυνατόν να ενσωματωθούν και επιπλέον γεωλογικές, γεωφυσικές ή άλλες πληροφορίες καθώς επίσης και διάφορες αβεβαιότητες. Συνεπώς, η νέα μεθοδολογία είναι ικανή να δίνει ρεαλιστικούς υπολογισμούς της σεισμικής επικινδυνότητας τόσο σε περιοχές με υψηλή, όσο και με χαμηλή σεισμικότητα συμπεριλαμβανομένων και των περιπτώσεων εκείνων όπου οι κατάλογοι δεν είναι πλήρεις.

Εάν η μεθοδολογία εφαρμοστεί σε όλα τα σημεία ενός πλέγματος πάνω στην υπό μελέτη περιοχή τότε μπορεί να δώσει και χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας για ολόκληρη την περιοχή.

Σύμφωνα με τον Reiter (1990) χρησιμοποιούνται τρεις ορισμοί για το μέγιστο μέγεθος στις σύγχρονες αναλύσεις σεισμικής επικινδυνότητας :

- “ ο μέγιστος πιθανός σεισμός ” (maximum possible earthquake), δηλαδή ο μέγιστος πιθανός σεισμός που θα μπορούσε να εμφανιστεί σε ορισμένο χρονικό διάστημα και τεκτονικό σύστημα και καθορίζει ένα ανώτερο όριο στο μέγεθος του σεισμού. Αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στις πιθανολογικές αναλύσεις.

➤ Στην αιτιοκρατική μέθοδο, ο μέγιστος σεισμός καθορίζεται ως **μέγιστος δυνατός σεισμός** (maximum credible earthquake), και βασίζεται στον προσδιορισμό εκείνων των διεργασιών, που λογικά αναμένεται να σχετίζονται με την σεισμική πηγή. Μερικές φορές, αντί του όρου μέγιστος δυνατός σεισμός, χρησιμοποιείται ο όρος **μέγιστος αναμενόμενος** (maximum expected).

Η χρήση του ορισμού μέγιστου πιθανού ή μέγιστου δυνατού σεισμού μπορεί προκαλέσει σύγχυση μια και οι δύο ορισμοί αναφέρονται στο σεισμό που αναμένεται να συμβεί κατά την διάρκεια ζωής μιας συγκεκριμένης κατασκευής. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι για το μέγιστο δυνατό σεισμό δεν καθορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης του κατά την διάρκεια ζωής μιας συγκεκριμένης κατασκευής.

➤ “ο **μέγιστος ιστορικός σεισμός**” (maximum historical earthquake), ο οποίος είναι ο μέγιστος σεισμός συνδεδεμένος με σεισμοτεκτονικά στοιχεία για τα οποία υπάρχουν ιστορικές ή ενόργανες ενδείξεις.

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός του μέγιστου πιθανού σεισμού.

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

Για να εκφραστεί η σεισμική επικινδυνότητα υπό μορφή εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) θα πρέπει να υπολογιστεί η υπό συνθήκες πιθανότητα ένας σεισμός με τυχαίο μέγεθος M και σε απόσταση R να προκαλέσει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση ή μεγαλύτερη από την επιτάχυνση κατασκευαστικού ενδιαφέροντος a_{min} , δηλαδή την επιτάχυνση που μπορεί να προκαλέσει καταστροφές στις κατασκευές. Για το σκοπό αυτό γίνεται η υπόθεση πως στην ακτίνα ενδιαφέροντος η καμπύλη απόσβεσης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης a , έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\ln(a) = c_1 + c_2 * M + \phi(R) + \varepsilon \quad (12)$$

όπου c_1 και c_2 είναι εμπειρικές σταθερές, M είναι το μέγεθος του σεισμού και $\phi(R)$ είναι μια συνάρτηση της απόστασης R του σεισμού. Ο όρος ε είναι ένα τυχαίο σφάλμα το οποίο παρατηρήθηκε πως ακολουθεί κανονική κατανομή. Συνήθως το $\phi(R)$ έχει τη μορφή:

$$\phi(R) = c_3 * R + \ln(R) \quad (13)$$

όπου c_3 και c_4 είναι εμπειρικές σταθερές. Η πιθανότητα ένας τυχαίος σεισμός μεγέθους M με $m_{min} \leq M \leq m_{max}$ θα προκαλέσει σε συγκεκριμένο χώρο μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) που υπερβαίνει την τιμή a , είναι:

$$\Pr[PGA \geq a] = \frac{\exp(-\beta m_{max}) - y * \exp[-\beta(\chi - c_1) / c_2]}{\exp(-\beta m_{max}) - \exp(-\beta m_{min})} \quad (14)$$

όπου $\chi = \ln(a)$, $y(*)$ είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$\int_{min}^{max} \exp[\beta * \phi(r) / c_2] * f_R(r) dr \quad (15)$$

και m_{min} είναι το μικρότερο μέγεθος σεισμού που μπορεί να προκαλέσει επιτάχυνση κατασκευαστικού ενδιαφέροντος. Η τιμή της συνάρτησης $y(*)$ είναι χαρακτηριστική για κάθε περιοχή και σταθερή για την εκάστοτε περιοχή. Η σχέση η οποία συνδέει την περίοδο επανάληψης, T , με τις αντίστοιχες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) είναι η ακόλουθη:

$$T = \frac{1}{1 - \Pr[PGA \geq a]} \quad (16)$$

Από τη σχέση (14) προκύπτει πως για μια συγκεκριμένη περιοχή η κατανομή του λογαρίθμου του PGA έχει μορφή παρόμοια με την κατανομή των σεισμικών μεγεθών δηλαδή έχει τη μορφή της κατανομής Gutenberg-Richter. Οι δύο κατανομές διαφέρουν μόνο στις τιμές των παραμέτρων τους. Έτσι, εάν η παράμετρος της κατανομής των μεγεθών έχει τιμή β , τότε η παράμετρος της κατανομής του $\ln(\text{PGA})$ θα έχει τιμή ίση με β/c_2 . Από τη σχέση (14) προκύπτει πως η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του λογαρίθμου του PGA δίνεται από τη σχέση:

$$F_X(x|x_{\min}, x_{\max}) = \frac{\exp(-\gamma x_{\min}) - \exp(-\gamma x)}{\exp(-\gamma x_{\min}) - \exp(-\gamma x_{\max})} \quad (17)$$

όπου $\gamma = \beta/c_2$, $x_{\min} = \ln(a_{\max})$ και $a_{\max}$ είναι το μέγιστο πιθανό PGA στη συγκεκριμένη περιοχή.

Από το γεγονός πως η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής των σεισμικών μεγεθών έχει την ίδια μορφή με την συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του λογαρίθμου του PGA σε συγκεκριμένη περιοχή προκύπτει πως και η μέγιστη πιθανή επιτάχυνση, PGA, μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στο μέγιστο πιθανό μέγεθος, $m_{\max}$, με τη διαφορά πως η παράμετρος β πρέπει να αντικατασταθεί με το γ , ο ρυθμός σεισμικότητας λ της ευρύτερης περιοχής πρέπει να αντικατασταθεί από τον αντίστοιχο ρυθμό σεισμικότητας λ της συγκεκριμένης περιοχής και το μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος $m_{\max}^{obs}$ πρέπει να αντικατασταθεί αντίστοιχα, από το μέγιστο παρατηρούμενο PGA $a_{\max}^{obs}$.

3.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΜΕΝΟΥ PGA ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις περισσότερες κατασκευές, παρουσιάζει η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (ΣΑΚ) της μέγιστης αναμενόμενης επιτάχυνσης PGA σε μια συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου. Βασιζόμενοι στην υπόθεση πως η εμφάνιση των σεισμών με PGA α , ($\alpha \geq \alpha_{\min}$) στη συγκεκριμένη περιοχή ακολουθεί κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό σεισμικότητας λ , τότε οι σεισμοί οι οποίοι προκαλούν στην συγκεκριμένη περιοχή PGA ίσο ή μεγαλύτερο από μια τιμή α , μπορούν να παρουσιαστούν με μοντέλο Poisson και με μέσο ρυθμό εμφάνισης $\lambda(x) = \lambda [1 - F_x(x|x_{\min}, x_{\max})]$, όπου $x = \ln(\alpha)$.

Συνεπώς, ΣΑΚ του λογαρίθμου του μέγιστου καταγεγραμμένου PGA στην συγκεκριμένη περιοχή και για χρονική διάρκεια t θα δίνεται από τη σχέση:

$$F_x^{\max}(x|x_{\min}, x_{\max}, t) = \frac{\exp\{-\lambda t[1 - F_x(x|x_{\min}, x_{\max})]\} - \exp(-\lambda t)}{1 - \exp(-\lambda t)} \quad (18)$$

Στη σχέση (18) η ΣΑΚ είναι διπλά οροθετημένη. Το κάτω όριο της, η $x_{\min} = \ln(a_{\min})$, καθορίζεται από τη μικρότερη τιμή της επιτάχυνσης με κατασκευαστικό ενδιαφέρον. Το δεύτερο όριο της, η $x_{\max} = \ln(a_{\max})$, είναι μια άγνωστη παράμετρος που αντιπροσωπεύει το λογάριθμο της μέγιστης πιθανής επιτάχυνσης PGA στη συγκεκριμένη περιοχή. Συνεπώς, για μια δεδομένη τιμή $a_{\min}$, η σεισμική επικινδυνότητα σε συγκεκριμένη περιοχή καθορίζεται με τον υπολογισμό τριών παραμέτρων: λ , γ και $a_{\max}$.

Με στόχο τον υπολογισμό αυτών των τριών παραμέτρων επιλέγονται οι μεγαλύτερες τιμές PGA ($a_1, \dots, a_n$) που παρατηρήθηκαν στη συγκεκριμένη περιοχή για n συνεχόμενες χρονικές περιόδους ($t_1, \dots, t_n$) = t , και χρησιμοποιείται η διαδικασία της μέγιστης πιθανοφάνειας. Για ένα συγκεκριμένο $a_{\max}$, η συνάρτηση πιθανοφάνειας του δείγματος $x = (x_1, \dots, x_n)$, όπου $x_i = \ln(a_i)$ με ($i = 1, \dots, n$), έχει αγνώστους τις παραμέτρους λ και γ και δίνεται από τη σχέση:

$$L(\lambda, \gamma | x, t) = \prod_{i=1}^n f_X^{\max}(x_i | x_{\min}, x_{\max}, t_i) \quad (19)$$

όπου $f_X^{\max}(x_i | x_{\min}, x_{\max}, t_i)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ) του λογαρίθμου του μέγιστου PGA που συνέβη στην περιοχή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f_X^{\max}(x_i | x_{\min}, x_{\max}, t_i) = \lambda t F_X^{\max}(x | x_{\min}, x_{\max}, t) f_X(x | x_{\min}, x_{\max}) \quad (20)$$

ενώ $f_X(x | x_{\min}, x_{\max})$ είναι η ΣΠΠ του x και είναι ίση με:

$$f_X(x | x_{\min}, x_{\max}) = \frac{\gamma \exp(-\gamma x)}{\exp(-\gamma x_{\min}) - \exp(-\gamma x_{\max})} \quad (21)$$

Οι παράμετροι μέγιστης πιθανοφάνειας λ και γ είναι οι τιμές λ και γ που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας (19).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 ΧΑΡΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η όλη διαδικασία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία από την υπολογιστική πλευρά της, περιλαμβάνει τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων όπως, το μέγιστο μέγεθος, $M_{\max}$, τον ρυθμό σεισμικότητας λ και την παράμετρο b της σχέσης των Gutenberg-Richter (ή αλλιώς $\beta = b \ln 10$), για μια εκτεταμένη περιοχή που περιβάλλει την τοποθεσία για την οποία είναι απαραίτητη η ανάλυση του σεισμικού κινδύνου. Οι τρεις αυτοί παράμετροι καθορίζονται ταυτόχρονα με την χρήση ενός επαναληπτικού συνδυασμού. Ο υπολογισμός των λ και β προϋποθέτει την ισχύ της κατανομής Poisson για ένα σεισμό που λαμβάνει χώρα με ρυθμό σεισμικότητας λ και της σχέσης συχνότητας-μεγέθους των Gutenberg-Richter με άνω και κάτω όριο.

Η συνάρτηση πιθανοφάνειας για το ιστορικό μέρος του καταλόγου στηρίζεται στις άγνωστες παραμέτρους της περιοχής (λ , β) και είναι:

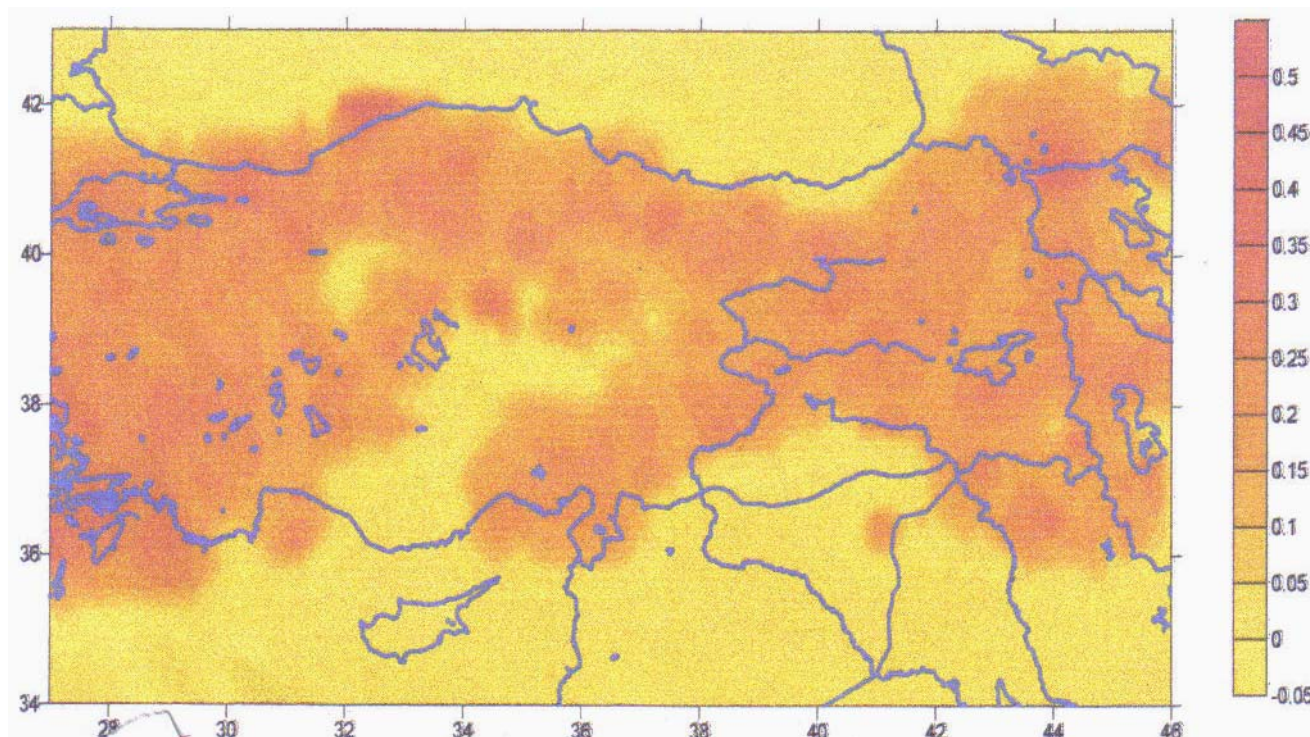
$$L_0(\lambda, \beta) = \text{const} \prod_{j=1}^{n_0} f_M^{\max}(m_{0j} | m_0, m_{\max}, t_{0j}, \sigma_{M0\xi}) \quad (22)$$

όπου m_{0j} είναι το φαινόμενο μέγεθος του ισχυρότερου σεισμού που συνέβη στο χρονικό διάστημα t_i , σ_{M0j} είναι η τιμή του σφάλματος, $j=1, \dots, n_0$ και n_0 είναι ο αριθμός των σεισμών στο ιστορικό μέρος του καταλόγου.

Το μέγιστο μέγεθος $M_{\max}$ μπορεί να υπολογιστεί ακολουθώντας μια διαφορετική παραμετρική διαδικασία, όταν τόσο η αναλυτική φόρμα όσο και οι παράμετροι των συναρτήσεων κατανομής για μεγέθη σεισμών, είναι καθορισμένα (Kijko and Graham, 1998).

Οι υπολογισμοί που αφορούν συγκεκριμένες τοποθεσίες, απαιτούν τη γνώση της ελάττωσης της παραμέτρου της εδαφικής κίνησης, a , σε συνάρτηση με την απόσταση. Στην παρούσα εργασία, η σχέση απόσβεσης που χρησιμοποιείται για την περιοχή της Τουρκίας, πάρθηκε από την εργασία των Kayabali and Akin (2003) αλλά είχε προταθεί από τους Sadigh et al.(1997).

Η ακτίνα συλλογής δεδομένων όλων των σεισμών που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστεί μέσω της σχέσης απόσβεσης η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA, είναι τα 50 Km και η κάναβος των σημείων είναι $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Με αυτόν τον τρόπο μελετήθηκε όλη η περιοχή της Τουρκίας και κατασκευάσαμε έναν χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας (σχήμα 7).



Σχήμα 7. Στον χάρτη του σχήματος παρουσιάζονται καμπύλες ίσης σεισμικής επικινδυνότητας με τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) και για ακτίνα 50 km, με 10% πιθανότητα υπέρβασης στα 50 χρόνια.

(Tsapanos et al. 2004)

Μια πρώτη ανάλυση του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας, δείχνει μια καλή συμφωνία μεταξύ των τιμών σεισμικού κινδύνου και των κυρίων τεκτονικών γνωρισμάτων της εκτεταμένης αυτής περιοχής (περισσότερες λεπτομέρειες Kayabali and Akin, 2003, βλ. Fig.5).

Λεπτομερέστερα, υψηλές τιμές παρατηρούνται κατά μήκος του ΒΑ ρήγματος της Ανατόλιας. Προς τα δυτικά της Τουρκίας, παρατηρούνται μια σειρά από ρήγματα που είναι σχεδόν κάθετα στις ακτές της Μ.Ασίας. Οι περισσότερες από τις μέγιστες τιμές, παρατηρούνται και σε αυτό το μέρος της Τουρκίας, αν και επικρατούν εκεί τιμές που

κυμαίνονται μεταξύ 0.25-0.35 g. Τα επικρατέστερα αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τον χάρτη που συντάχθηκε για όλη την Μεσόγειο και τις γύρω περιοχές από τους Jimenèr et al. (2001). Παρ' όλο που χρησιμοποίησαν ένα διαφορετικό ηλεκτρονικό πρόγραμμα (SEISRISK III), όπου ο καθορισμός των σεισμικών ζωνών είναι απαραίτητος, η γενική κατεύθυνση της σεισμικής επικινδυνότητας και των δύο χαρτών (Σχήμα 7 και αυτό από τους Jimenèr et al.) είναι αρκετά ταυτόσημη, εκτιμώντας τις τιμές PGA με 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια.

4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

Είναι παγκοσμίως γνωστό ότι η Τουρκία χαρακτηρίζεται από μια έντονη σεισμική δραστηριότητα η οποία και εκδηλώνεται κατά μήκος των βόρειων και ανατολικών ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης της Ανατόλιας. Από διάφορες περιγραφές αλλά και παρατηρήσεις έχουν γίνει γνωστές μεγάλου μεγέθους καταστροφές που προκλήθηκαν στην Ανατόλια και στην Νοτιοανατολική Τουρκία.

Συνεπώς η εκτίμηση του λεγομένου σεισμικού κινδύνου αποτελεί την περιγραφή των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων που είχαν άμεση ή έμμεση επίπτωση στην ανθρώπινη κοινωνία. Η σεισμική επικινδυνότητα εκτιμάται από τις ζημίες στις τεχνικές κατασκευές καθώς και από τις συνέπειες των σεισμών στην παγκόσμια πολιτιστική κληρονομιά, την οικονομία κ.τ.λ. Ένα μέτρο σεισμικής επικινδυνότητας μπορεί να θεωρηθεί και ο αριθμός θανάτων που προκλήθηκαν από τους σεισμούς. Για την περιοχή της Τουρκίας συγκεκριμένα έγινε γραφική παράσταση (Σχήμα8) των epicέντρων των γνωστών μέχρι στιγμής καταστροφικών σεισμών που έχουν εκδηλωθεί από το 1990. Τα δεδομένα πάρθηκαν από έναν κατάλογο με τους μεγαλύτερους και καταστροφικότερους σεισμούς μεγέθους από $M \geq 5.5$, από το Kandili Observatory και που αναγράφεται στον **πίνακα 4**.

Στον **πίνακα 4**, αναγράφονται ο χρόνος γένεσης του σεισμού, η ένταση, το μέγεθος, ο αριθμός των κατεστραμμένων κτιρίων και το ποσοστό ενέργειας που προσέφερε ο συγκεκριμένος σεισμός ως προς την συνολική ενέργεια που εκδηλώθηκε από όλους τους σεισμούς του 20^{ου} αιώνα.

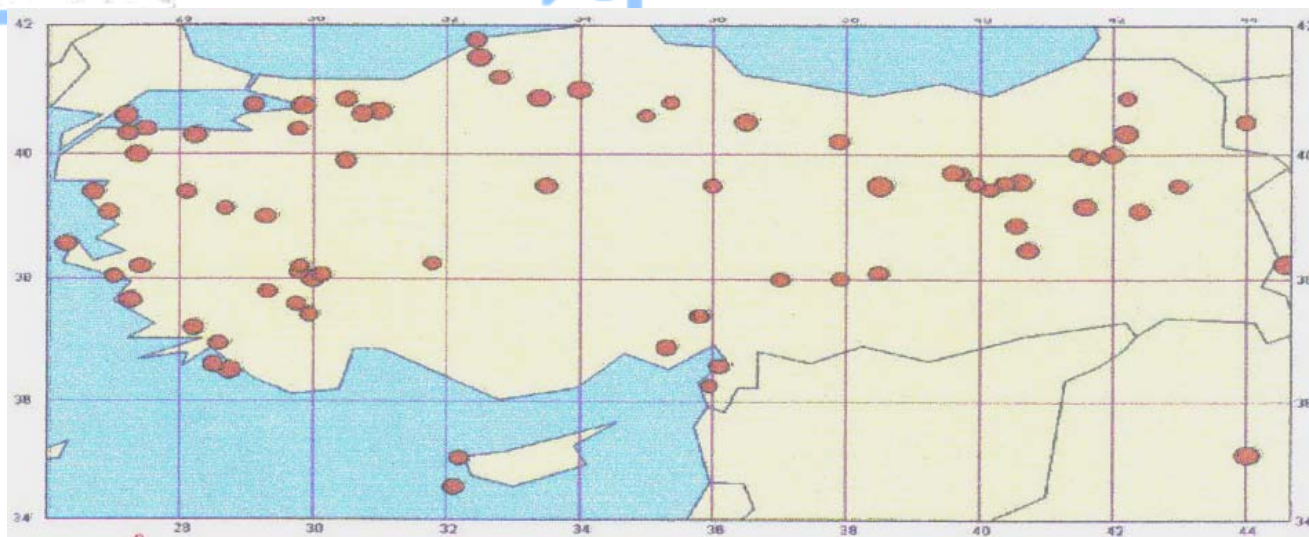






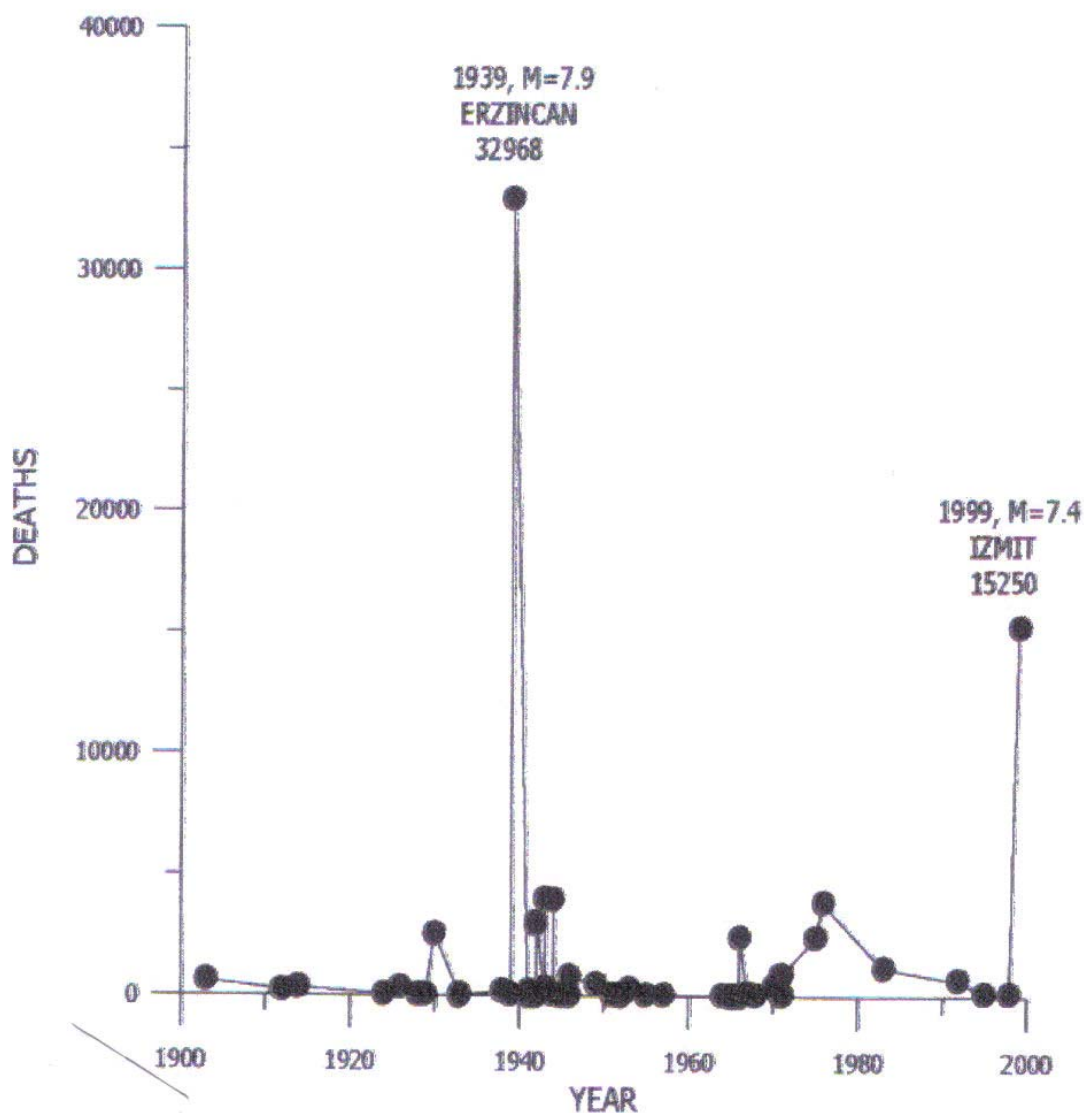


Παρατηρώντας το σχήμα 8, διαπιστώνουμε ότι οι περισσότεροι από αυτούς τους σεισμούς φαίνεται να εκδηλώθηκαν στο βορειοανατολικό και βόρειο ρήγμα της Ανατόλιας, ενώ λιγότεροι έλαβαν χώρα στο ανατολικό ρήγμα της Ανατόλιας.



Σχήμα 8. Οι περιοχές με τους καταστροφικούς σεισμούς στην Τουρκία και στις γύρω περιοχές κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα.

Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη τους σεισμούς εκείνους που προκάλεσαν απώλειες ζώων σε αριθμό από 10 και πάνω, έγινε και μια προσπάθεια παράστασης γραφικής του αριθμού των νεκρών στη Τουρκία κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 9. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την γραφική αυτή απεικόνιση, είναι καταρχήν ότι οι περισσότεροι θάνατοι έχουν προκληθεί από δύο κυρίως σεισμούς. Ο πρώτος σεισμός έλαβε χώρα το 1939 με μέγεθος $M=7.9$ και ένταση $I \geq X$ στην πόλη Erzincan και ο δεύτερος το 1999 με μέγεθος $M=7.4$ και ένταση $I = X$ στην πόλη Izmit, Marmara. Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από το γράφημα αυτό είναι ότι το 64.2% των ανθρώπινων απωλειών έλαβε χώρα στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα (στα πρώτα 50 χρόνια), ενώ το υπόλοιπο 35.8% παρατηρείται κατά την διάρκεια του δεύτερου μισού του 20^{ου} αιώνα. Μια πιθανή ερμηνεία είναι ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων έχουν γίνει πολλές σημαντικές βελτιώσεις στις τεχνικές κατασκευές.



Σχήμα 9. Οι πιο καταστροφικοί σεισμοί της Τουρκίας κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα. Στο γράφημα παριστάνονται μόνο οι σεισμοί εκείνοι που προκάλεσαν σε αριθμό θανάτους πάνω από 10.

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην διπλωματική αυτή εργασία έγινε εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής της Τουρκίας, καθώς και ο καθορισμός του σεισμικού κινδύνου.

Η Τουρκία κατατάσσεται ανάμεσα στις χώρες που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα και ιδίως το βόρειο τμήμα της, όπου υπάρχει το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας και έχουν γίνει κατ'επανάληψη μεγάλοι σεισμοί με μεγέθη $M \geq 7$.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε προτάθηκε από τους Kijko and Graham 1999 και κάνει χρήση μιας τροποποιημένης μορφής της στατιστικής Bayes. Με την χρήση αυτής της μεθόδου, έγινε η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής, δόθηκε δηλαδή η πιθανότητα υπέρβασης μίας ορισμένης τιμής της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) κατά την διάρκεια ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται κατά μήκος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας ενώ μεγάλες τιμές παρατηρούνται και στα ρήγματα που βρίσκονται σχεδόν κάθετα στις ακτές της Μικράς Ασίας. Οι τιμές που επικρατούν γενικά σε όλη την περιοχή κυμαίνονται από 0.25-0.35 g.

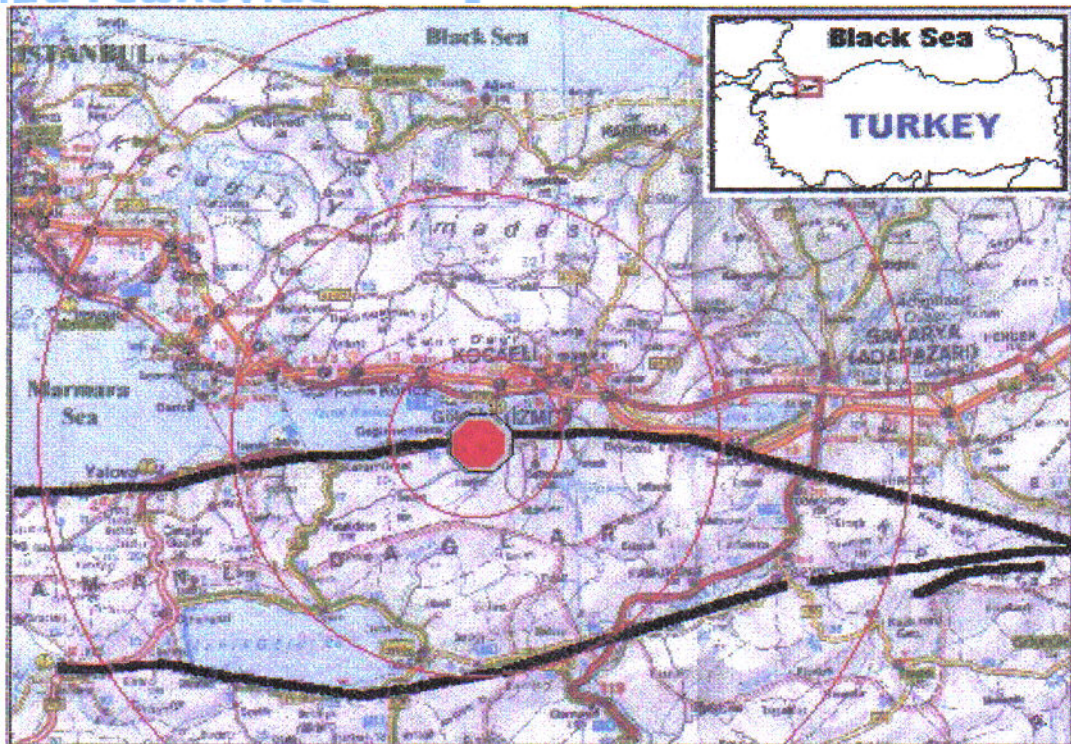
Σαν μέτρο για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου λήφθηκε υπόψη, ο αριθμός των νεκρών από τους σεισμούς της Τουρκίας από το 1900 έως το 2000. Παρατηρούμε ότι δύο είναι οι πιο πολύνεκροι σεισμοί, ο σεισμός του 1939 με 33.000 νεκρούς (ERZINCAN) και του 1999 (IZMIT) με περίπου 15.000 νεκρούς.

Χαρτογραφήθηκε ο αριθμός των νεκρών σε συνάρτηση με το έτος γένεσης του σεισμού και καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το 64.2% των νεκρών παρατηρήθηκε στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα, ενώ το υπόλοιπο 35.8% παρατηρήθηκε στην διάρκεια των τελευταίων 50 ετών. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μείωση στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα και η πιθανότερη ερμηνεία είναι ότι στην διάρκεια των τελευταίων 50 ετών έχουν γίνει σημαντικές βελτιώσεις στις αντισεισμικές τεχνικές των κατασκευών.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο ΜΕΓΑΛΟΣ ΣΕΙΜΟΣ ΤΟΥ 1999



Σχήμα 10. Χάρτης που δείχνει το επίκεντρο του σεισμού (Kandili Observatory and Earthquake Institute-Bogazici University)

Τα στοιχεία για τον σεισμό του 1999 στην Τουρκία πάρθηκαν από το Kandili Observatory and Earthquake Institute-Bogazici University.

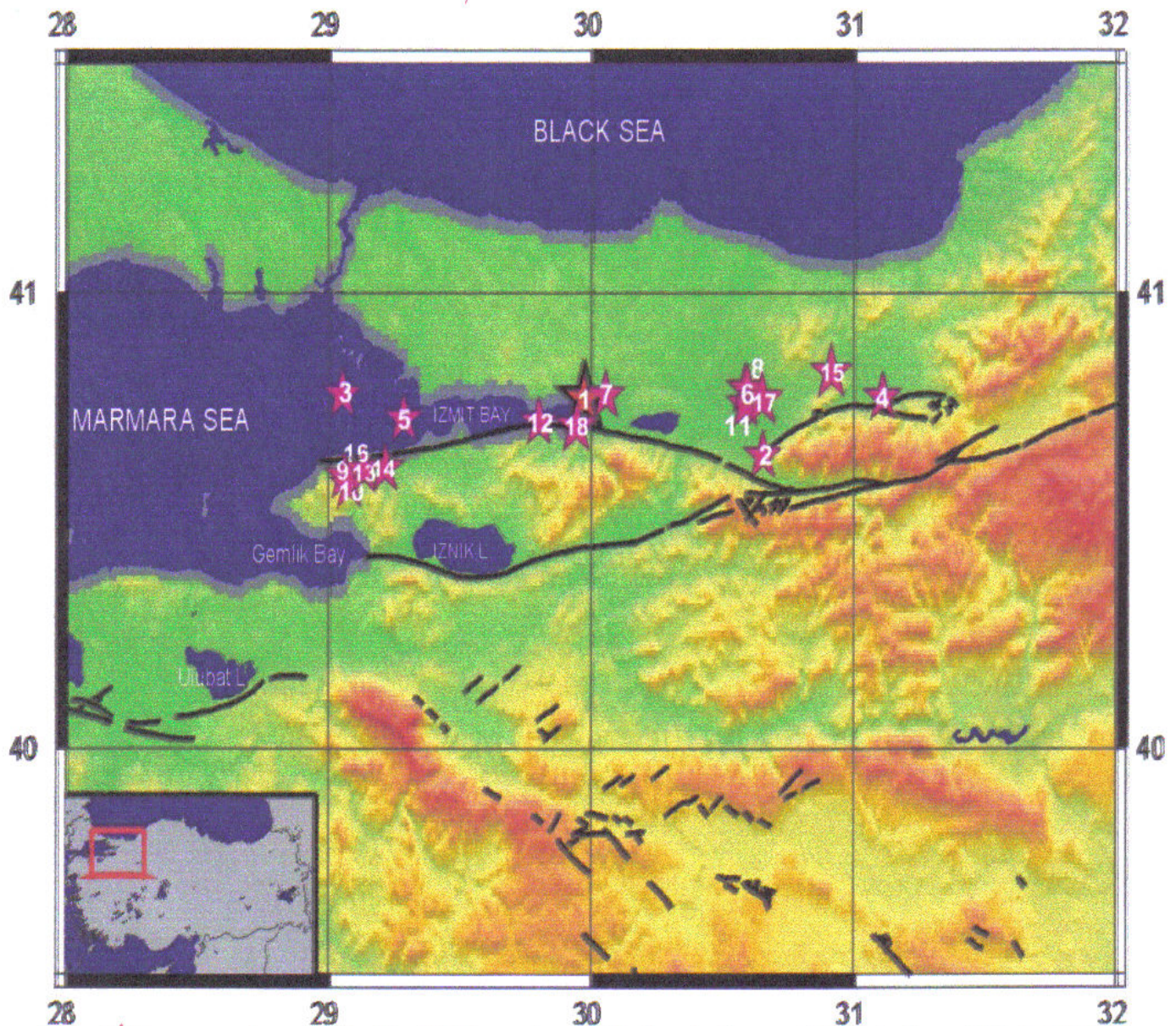
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 17-08-1999

ΩΡΑ : 03:01:37

ΜΕΓΕΘΟΣ : M= 7.4

Ο σεισμός έλαβε χώρα πάνω στο ρήγμα της Βόρειας Ανατόλιας και το επίκεντρό του, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα (10), εντοπίστηκε κοντά στην πόλη Golcuk στο δυτικό τμήμα της Τουρκίας, (40.77B και 29.97A) και εστιακό βάθος 17 km.

Η μετασεισμική δραστηριότητα περιορίστηκε στην περιοχή μεταξύ της πόλης Izmit και Adaragazi (όρια 40.5-40.8B και 29.8-30.0A) προς τα ανατολικά δηλαδή του επικέντρου. Στο παρακάτω σχήμα (11) δείχνονται οι μετασεισμοί που ακολούθησαν:

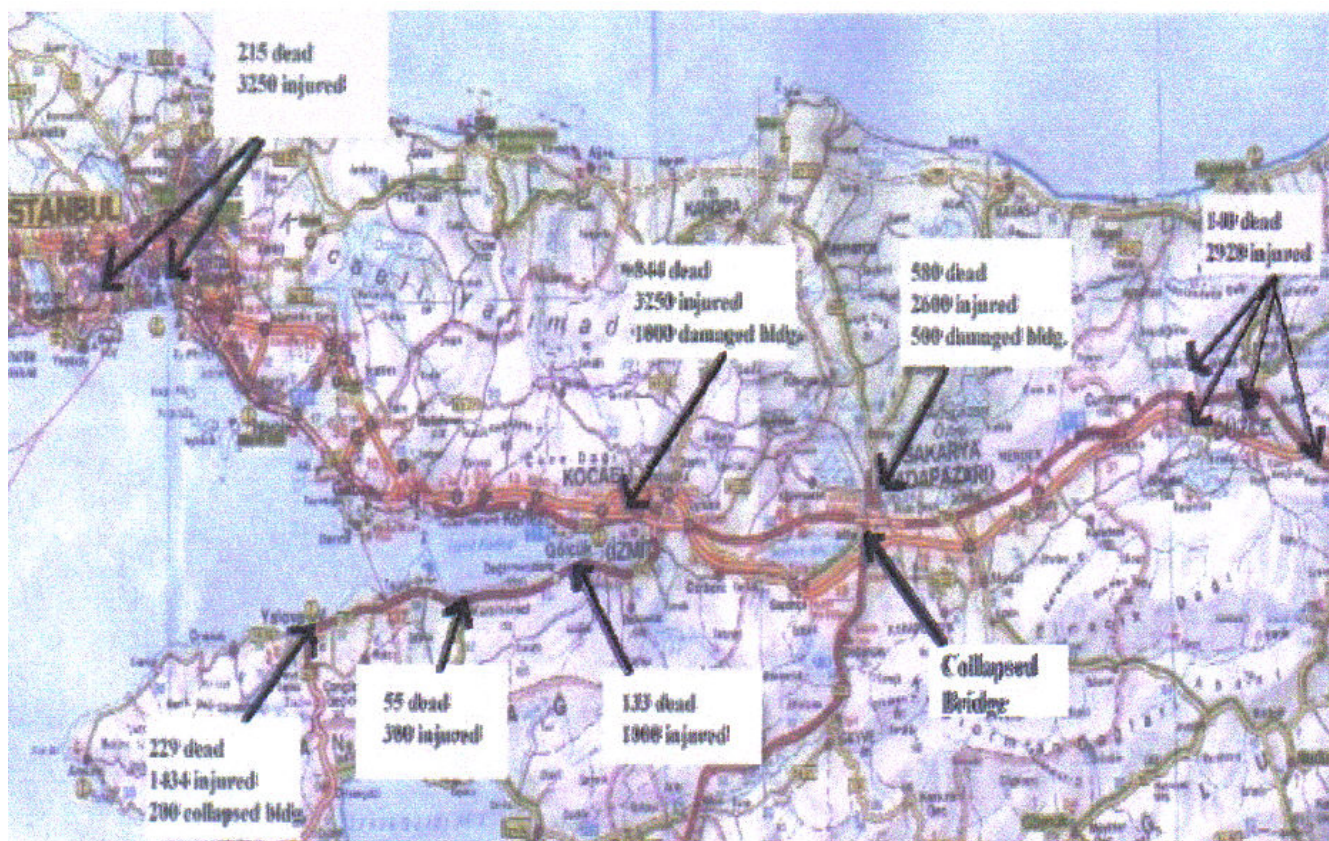


Σχήμα 11. Μετασεισμική ακολουθία. (Kandili Observatory and Earthquake Institute-Bogazici University)

ΟΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Στο παρακάτω σχήμα (12) αναγράφονται :

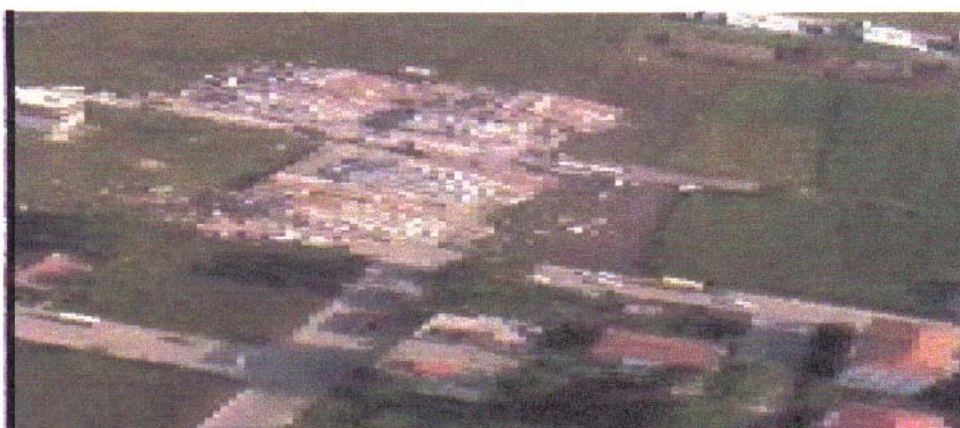
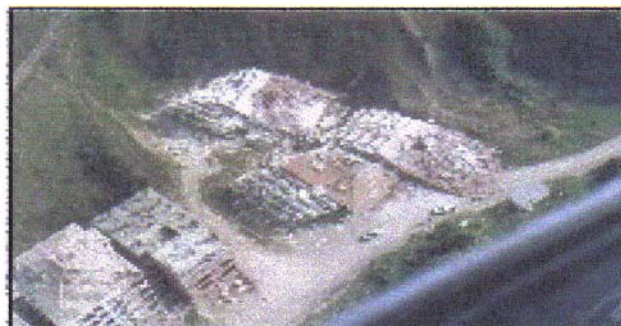
- Οι απώλειες ανθρώπινων ζώων που υπολογίστηκαν στις 15.000.
- Η πλειοψηφία των κτιρίων που υπέστησαν ζημιές, ακόμη και καταρρεύσεις.

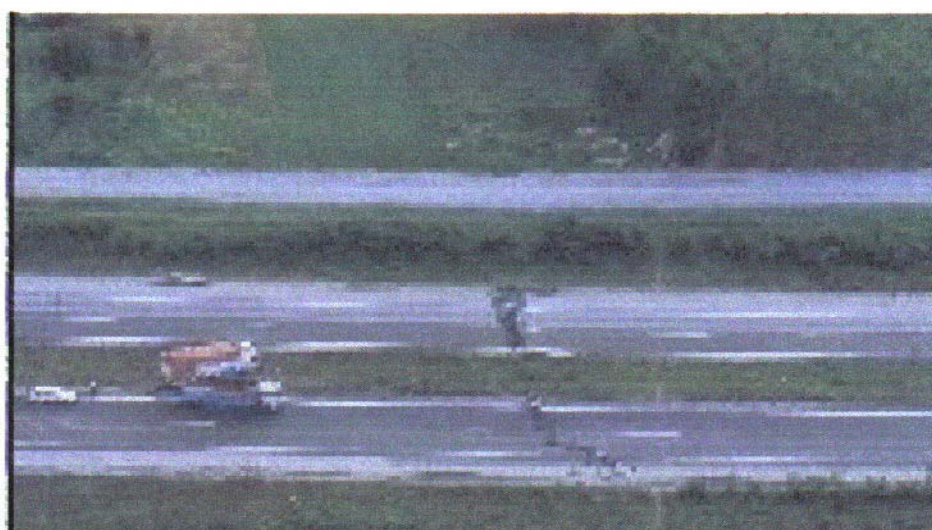
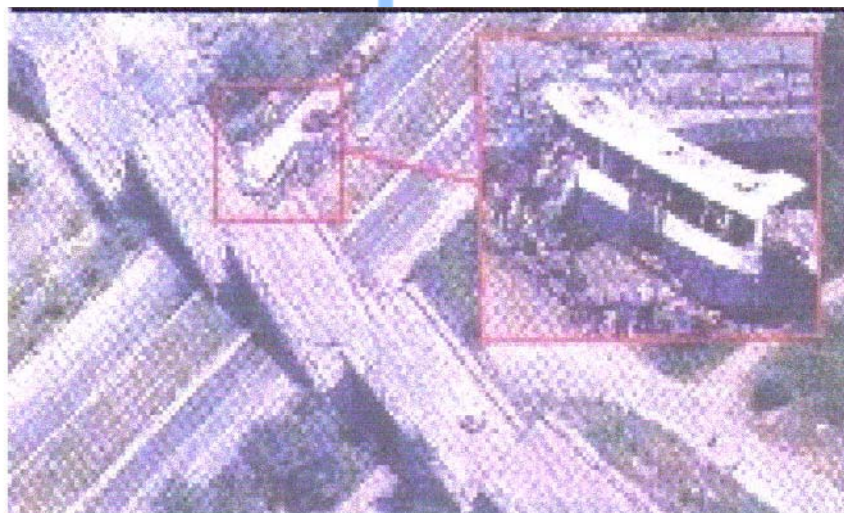


Σχήμα 12. Οι περιοχές του σεισμού του 1999 όπου έγιναν οι μεγαλύτερες καταστροφές και υπήρξε ο μεγαλύτερος αριθμός θυμάτων.

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ

Φωτογραφίες από τον σεισμό του 1999 των ζημιών που υπέστησαν κτίρια στην γειτονία του Golcuk:







ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alsan, E., (1972). Magnitude and time distributions of earthquakes in Turkey. *Bull. Int. Inst. Seismol. Earthquake. Eng.*, 7, 1-10.
- Bath, M., (1979). Seismic risk in Turkey, a preliminary approach. *Tectonophysics*, 54, T9-T16.
- Erdik, M. and oner, S., (1982). A rational approach for the probabilistic assessment of the seismic risk associated with the north Anatolian fault. in Q A. isikara and Vogel (editors), *Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction*, Viewweg, Brauschweig-wiesbaden, 115-127.
- Erdik, M., Doyuran, N, Akkas, P. and gulkan. P., (1985). A probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey. *Tectonophysics*, 117, 295-344.
- Gencoglu, S. and Tabban, A., (1973). Unpublished earthquake catalogue compilations for Turkey. Earthquake Res. Division of the Ministry of reconstruction and Resettlement, Ankara.
- Gulkan, P., Kocyigit, A., Yucemen, M.S., Doyuram, v. and Basoz, N., (1993). En son Verilere gore hazirlanan Turkiye deprem bolgeleri haritasi. Report N_o: METU/EERC 93-1, January 1993.
- Jiménez, M.J., Giardini, D., Grünthal, G., and SESAME Working Group (M. Erdik, M. Garcia-Fernandez, Lapajne, J., Markopoulos K., Musson, R., Papaioannou, Ch., Redez, A., Riad, S., Sellami, S., Shapira, A. Slejko, D., van Eck, T. and El Sayeed, A., (2001). Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. *Boll. Geofis. Teor. Appl.*, 42, 3-18.
- Kayabali, K. and Akim, M., (2003). Seismic hazard map of Turkey using the Deterministic approach. *Engin. Geology*, 69, 127-137.
- Kijko, A. and Graham, G., (1998). 'Parametric-historic' procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I. Estimation of maximum regional magnitude m_{max} . *Pageoph*, 152, 413-442.
- Kijko, A. and Graham, G., (1999). 'Parametric-historic' procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II. Assessment of seismic hazard at specified site. *Pageoph*, 154, 1-22.
- Mc Kenzie, D.P Active tectonics of the Mediterranean region. 'Geophys.J. Roy. Astr. Soc', 30, 109-185, 1972.
- Reiter, I., (1990). *Earthquake Hazard Analysis* : Columbia University Press, New York 245pp.
- Sadigh, K., Chang, C.V., Egan, J.A., Makdisi, E. and Youngs, R.R., (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California Strong motion data. *Seismol.Res.Lett.*, 1 (68), 180-189.
- Tsapanos T.M., Koravos G.Ch., Sertaridou I.Ch. & Tatsiopoulou G.A.(2004) Seismic hazard and seismic risk analysis in Turkey deduced from mixed files. *Proc. 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology Thessaloniki 2004*
- Yarar, R., Erguary, O., Erdick, M. and Gulkan, P., (1980). A preliminary probabilistic assessment of the seismic hazard in Turkey. *Proc. 7th World Conf.Earthquake Eng.*, Istanbul, 309-316.

