

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ: ΕΠΙΣΤΗΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

ΗΡΑΚΛΗΣ ΚΑΤΣΑΛΟΥΛΗΣ*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ. Η πρόβλεψη σεισμών αποτελεί έναν ερευνητικό κλάδο σχετικά νέο, στον οποίο πολλά σημαντικά ερωτήματα παραμένουν ανοικτά, καθώς η σχετική επιστημονική γνώση χαρακτηρίζεται από μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας και απέχει πολύ από το να θεωρηθεί ως παγιωμένη. Παρ' όλα αυτά αποτελεί μια περιοχή της επιστήμης που συνδέεται άμεσα με τη λήψη πολιτικών αποφάσεων για την προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας, καθώς οι σύγχρονες κοινωνίες, με τη δημιουργία μεγάλων πόλεων και δυνητικά επικίνδυνων υποδομών, όπως οι πυρηνικοί αντιδραστήρες για παράδειγμα, είναι ευάλωτες στις συνέπειες ενός έντονου σεισμού. Στο παρόν άρθρο θα παρουσιαστεί εν συντομία η συζήτηση που υπάρχει διεθνώς για την πρόβλεψη των σεισμών χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία των Σπουδών Επιστήμης και Τεχνολογίας (ΣΕΤ), ώστε να αναδειχθούν τόσο θέματα επιστημολογικής φύσης, όσο και θέματα δημόσιας πολιτικής, καθώς και οι τρόποι που επηρεάζουν τα μεν τα δε.

ABSTRACT. Earthquake prediction is a relatively new field, in which many important questions remain open, as the relevant scientific knowledge is characterized by a high degree of uncertainty and is far from being considered well established. Nevertheless, it is an area of science that is directly linked to political decision-making for the protection of human life and property, as modern societies, with the creation of large cities and potentially dangerous infrastructures, such as nuclear reactors for example, are vulnerable to the consequences of a strong earthquake. This article will briefly present the debate on earthquake prediction using the methodology of Science and Technology Studies (STS), in order to highlight both epistemological issues and public policy issues, as well as the ways in which they affect each other.

* Ο Η. ΚΑΤΣΑΛΟΥΛΗΣ είναι Μεταδιδακτορικός Ερευνητής στο Τμήμα Ιστορίας και Φιλοσοφίας της Επιστήμης του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει θερμά τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του προγράμματος ΡΥΘΙΑ, Τέλη Τύμπα, Στάθη Αραποστάθη, Στέλιο Καμπουρίδη, Γρηγόρη Πανουτσόπουλο, Βασιλική Χριστοπούλου και φυσικά τον Επιστημονικό Υπεύθυνο Θόδωρο Αραμπατζή. Η συνεργασία μαζί τους τον βοήθησε σε μεγάλο βαθμό να διαμορφώσει τις θέσεις και τις απόψεις του όπως εμφανίζονται σε αυτό το άρθρο, αλλά και σε άλλα κείμενα που προέκυψαν από τη συμμετοχή μας σε αυτή την κοινή προσπάθεια. Η ερευνητική αυτή εργασία υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των Μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: 875).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόβλεψη των σεισμών θεωρείται ένα από τα δυσκολότερα επιστημονικά προβλήματα. Αυτό είναι κάτι που παραδέχονται όλοι οι επιστήμονες που εργάζονται ή παρακολουθούν τις εξελίξεις σε αυτόν τον επιστημονικό κλάδο, και θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι αυτό είναι το μοναδικό σημείο καθολικής συμφωνίας μεταξύ των επιστημόνων, καθώς όπως θα δούμε στη συνέχεια υπάρχουν σημαντικές διαφωνίες που αφορούν επιστημολογικά, οντολογικά, και μεθοδολογικά θέματα. Η πρόβλεψη των σεισμών όμως δεν αποτελεί απλώς ένα επιστημονικό αίνιγμα. Είναι ένα θέμα που συνδέεται άμεσα με την προστασία της ανθρώπινης ζωής από μία φυσική καταστροφή, και κατά συνέπεια είναι ένα θέμα δημόσιας πολιτικής. Η μελέτη αυτής της περίπτωσης μπορεί να διαφωτίσει το ρόλο της επιστήμης ως συμβούλου της πολιτείας για την επίλυση και αντιμετώπιση πρακτικών προβλημάτων.

Το παρόν άρθρο αναπτύσσεται και προς τις δύο κατευθύνσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η πρώτη σχετίζεται με θέματα που ανακύπτουν από τη μελέτη της επιστημονικής διαδικασίας ως φαινομένου με ιστορικές και κοινωνιολογικές διαστάσεις. Σε αυτή θα μας απασχολήσουν ερωτήματα που σχετίζονται με την επιστημονική διαδικασία καθ' εαυτή. Η δεύτερη προσεγγίζει την πρόβλεψη σεισμών ως ένα πρόβλημα δημόσιας πολιτικής και διακυβέρνησης όπου θα εστιάσουμε στο ρόλο των επιστημόνων ως συμβούλων της πολιτείας για τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που θα χρησιμοποιηθεί παρέχεται από τις Σπουδές Επιστήμης και Τεχνολογίας, έναν διεπιστημονικό κλάδο που χρησιμοποιεί τα εργαλεία που προσφέρουν η Ιστορία των Επιστημών, η Κοινωνιολογία των Επιστημών, και η Φιλοσοφία των Επιστημών, μεταξύ άλλων.

Τι εννοούμε όμως όταν χρησιμοποιούμε τον όρο «πρόβλεψη σεισμών»; Σύμφωνα με τον καθιερωμένο ορισμό για την πρόβλεψη σεισμών υπάρχουν τριών ειδών προβλέψεις: οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις που καλύπτουν το χρονικό διάστημα από μία ημέρα έως μερικές εκατοντάδες ημέρες πριν από έναν δυνατό σεισμό, οι μεσοπρόθεσμες προβλέψεις που καλύπτουν το μεσοδιάστημα από έναν χρόνο έως μία δεκαετία, και οι μακροπρόθεσμες που καλύπτουν διάστημα μεγαλύτερο από μία δεκαετία πριν από έναν μεγάλο σεισμό (Knapoff, 1996). Τα τελευταία χρόνια, και ειδικά μετά το σεισμό της Φουκουσίμα το 2011, η συζήτηση γύρω από το τι μπορεί να ενταχθεί στην πρόβλεψη σεισμών έγινε ευρύτερη περιλαμβάνοντας εκτός από την πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού και την πιθανοκρατική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (probabilistic seismic hazard assessment: PSHA). Συνεπώς, μια ολοκληρωμένη μελέτη της πρόβλεψης σεισμών επιβάλλει να προσεγγίσουμε αυτή την έννοια με μια διευρυμένη οπτική, ώστε να συμπεριλάβουμε σε αυτή εκτός από την πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού και την PSHA, παρότι η πιθανοκρατική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας δεν μπορεί να θεωρηθεί

μια ντετερμινιστική πρόβλεψη, δηλ. η πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού.

2. Η ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΕΙΣΜΩΝ

Η σύγχρονη επιστήμη της σεισμολογίας είναι μια σχετικά νέα επιστήμη καθώς οι απαρχές της μπορούν να τοποθετηθούν στην τελευταία δεκαετία του 19ου αιώνα όταν στην Ιαπωνία δημιουργήθηκε από τρεις Βρετανούς επιστήμονες ο πρώτος σύγχρονος σειсмоγράφος. Με αυτή την εφεύρεση η σεισμολογία πέρασε σε μια νέα φάση όπου έπαψε πια να είναι μια επιστήμη που βασιζόταν στην παρατήρηση με «γυμνό μάτι» χωρίς τη χρήση οργάνων (οι μελετητές των σεισμών ήταν κυρίως μηχανικοί που παρατηρούσαν τις συνέπειες ενός σεισμού αφού αυτός είχε συμβεί, με σκοπό να εξαγάγουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του) και έγινε μια επιστήμη βασισμένη σε όργανα, όπως οι φυσικές επιστήμες (Clancey 2006). Αν και οι πρωτεργάτες της σύγχρονης σεισμολογίας είχαν θέσει από νωρίς ως στόχο της νέας επιστήμης την πρόβλεψη σεισμών, μπορούμε να πούμε ότι ο συγκεκριμένος ερευνητικός κλάδος έχει μια ζωή περίπου 60 χρόνων, από τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Η περίοδος από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970 ήταν, σε γενικές γραμμές, τα «χρυσά χρόνια» της πρόβλεψης σεισμών. Στα μετέπειτα χρόνια εμφανίστηκαν έντονες διαφωνίες ανάμεσα στους επιστήμονες τόσο για το αν η πρόβλεψη σεισμών είναι δυνατή όσο και για το ποια θα έπρεπε να είναι η στρατηγική επιδίωξης αυτού του στόχου.¹

Οι χώρες υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας έχουν αναπτύξει εργαλεία για τη μετρίαση των συνεπειών των σεισμών, όπως οι κανονισμοί δόμησης, οι αντισεισμικές κατασκευές, η χαρτογράφηση των επικίνδυνων ρηγματών, κ.α. Η πρόβλεψη, για λόγους που θα δούμε στη συνέχεια, δεν έχει έναν εδραιωμένο χώρο στη στρατηγική αντιμετώπισης του σεισμικού φαινομένου, αντίθετα με την πιθανοκρατική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου που είναι από τα βασικότερα εργαλεία αντιμετώπισης των συνεπειών του σεισμικού φαινομένου καθώς σε αυτή βασίζεται η κατασκευή του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για μια χώρα. Οι μεγάλες φυσικές καταστροφές δρουν ως καταλύτες για συζητήσεις που σχετίζονται με την αντιμετώπιση των συνεπειών τους. Όπως μετά το σεισμό του Κόμπε της Ιαπωνίας το 1999 αναζωπυρώθηκε η συζήτηση σχετικά με τη δυνατότητα πρόβλεψης σεισμών, βραχυπρόθεσμης και μεσοπρόθεσμης διάρκειας, έτσι μετά το σεισμό της Φουκουσίμα, το 2011, ξεκίνησε μια καινούρια συζήτηση σχετικά με το αν η πιθανοκρατική εκτίμηση σεισμικού κινδύνου είναι αποτελεσματική. Αυτό συνέβη γιατί με βάση

¹ Η πρόβλεψη των σεισμών έχει προκαλέσει αρκετές συζητήσεις (τις περισσότερες φορές έντονες) στο εσωτερικό της επιστημονικής κοινότητας. Μία τέτοια συζήτηση, στην οποία αναπτύχθηκαν όλα τα θέματα που είναι αντικείμενο διαφωνίας ή και διαμάχης ακόμα, μεταξύ των επιστημόνων, οργανώθηκε υπό τη μορφή διαδικτυακού debate από το περιοδικό *Nature*, το 1999.

το χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ιαπωνίας ήταν μάλλον απίθανο να συμβεί στην περιοχή της Φουκουσίμα σεισμός τόσο μεγάλου μεγέθους όσο αυτός που συνέβη εκεί, στις 11 Μαρτίου του 2011 (η δόνηση είχε μέγεθος 9 βαθμών). Έτσι, υπάρχουν επιστήμονες (Geller 2011, Geller et al 2016, Stein et al 2011, 2012) που υποστηρίζουν ότι οι παραδοχές στις οποίες στηρίζεται η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου είναι τελείως λανθασμένες, και μέχρι να αντικατασταθούν από άλλες πιο έγκυρες θα έπρεπε να σταματήσει να χρησιμοποιείται αυτός ο τρόπος εκτίμησης της επικινδυνότητας στη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Από την άλλη μεριά υπάρχουν επιστήμονες (Hanks et al 2012, Frankel 2013) που πιστεύουν ότι παρά τις όποιες αστοχίες η πιθανοκρατική εκτίμηση δουλεύει αρκετά καλά, ενώ υπάρχουν και επιστήμονες (Wyss 2015) που θεωρούν ότι η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη αλλά θα έπρεπε η χρήση της να είναι πιο περιορισμένη.

Η σχέση της πρόβλεψης σεισμών (βραχυπρόθεσμης και μεσοπρόθεσμης) με την πιθανοκρατική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας δεν είναι απλή. Από τη μια πλευρά, παρ' ότι δεν αποκλείουν η μία την άλλη από ερευνητικής άποψης, δηλαδή μπορούν να διεξαχθούν παράλληλα, θεωρούνται ανταγωνιστικές καθώς οι πόροι που διατίθενται στην έρευνα δεν είναι απεριόριστοι και ο ανταγωνισμός για αυτούς είναι μεγάλος. Από μια άλλη οπτική γωνία μπορούμε να πούμε ότι βρίσκονται στην ίδια πλευρά: όταν συνέβη ο σεισμός της Φουκουσίμα δημιουργήθηκε ένα αρνητικότατο κλίμα για τη σεισμολογία στην κοινή γνώμη καθώς δεν είχε καταφέρει να προβλέψει τη μεγάλη καταστροφή. Η αναφορά στην πρόβλεψη δεν έκανε διάκριση ανάμεσα σε βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη ή πιθανοκρατική εκτίμηση του κινδύνου. Η έλλειψη αυτής της διάκρισης, ακόμα και από επιστήμονες, αλλά και η ανταγωνιστική τους σχέση μας επιβάλλει να μελετήσουμε όλες τις τεχνικές πρόβλεψης-πρόγνωσης συνολικά ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τα επιχειρήματα που κατατίθενται στη συζήτηση σχετικά με τη χρησιμότητά τους κατά τη διαδικασία λήψης πολιτικών αποφάσεων.

3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο ιστορικός της επιστήμης και της τεχνολογίας Gregory Clancey (2012), με σημαντική συμβολή στη μελέτη της ιστορίας της σεισμολογίας και των αντισεισμικών κατασκευών στην Ιαπωνία, σε άρθρο του, μετά το σεισμό της Φουκουσίμα έθετε το εξής ερώτημα: οι σεισμολόγοι εργάζονται για την ασφάλεια των ανθρώπων ή για κάποιον άλλο περισσότερο θεωρητικό σκοπό; Οδηγήθηκε στο να θέσει αυτό το ερώτημα από την αδυναμία των επιστημόνων να προστατεύσουν, μέσω της έρευνας και των γνώσεων τους, την ανθρώπινη ζωή και περιουσία κατά τον μεγάλο σεισμό της Φουκουσίμα. Στη δέσμη των τρόπων με τον οποίο θα μπορούσε η σεισμολογία να υπηρετήσει το ευρύτερο κοινό ήταν και η πρόβλεψη του σεισμικού φαινομένου. Η αλήθεια είναι ότι η πρόβλεψη των σεισμών

αποτελεί ένα από τα πιο δυσεπίλυτα, αν όχι άλυτο όπως υποστηρίζουν ορισμένοι επιστήμονες, προβλήματα των φυσικών επιστημών. Γιατί όμως ισχύει αυτό; Η πρόβλεψη των σεισμών είναι ένα ερευνητικό πεδίο όπου τα περισσότερα βασικά ερωτήματα—πραγματολογικά, οντολογικά, θεωρητικά, είναι ανοικτά, ενώ η απουσία συναίνεσης των επιστημόνων σε βασικά θέματα χαρακτηρίζει τον κλάδο. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε κάποια από τα σημαντικότερα, ξεκινώντας από το πιο θεμελιώδες.

3.1. Είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι σεισμοί; Είναι οι σεισμοί επί της αρχής προβλέψιμοι ή μήπως υπάρχουν περιορισμοί που τίθενται από τη φύση; Δεδομένου ότι ο φλοιός της Γης (στον οποίο συμβαίνουν οι περισσότεροι σεισμοί) είναι ένα εξαιρετικά ανομοιογενές μέσο, και η φυσική που τον περιγράφει είναι μη γραμμική, ο σεισμός θεωρείται από ορισμένους επιστήμονες ως ένα χαοτικό φαινόμενο. Αυτό σημαίνει ότι οι διαδικασίες που συντελούνται στην εστία του σεισμού είναι εξαιρετικά ευαίσθητες ακόμα και σε μικρές διακυμάνσεις των αρχικών συνθηκών. Για κάποιους επιστήμονες (π.χ. Geller 1999α) αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει βάσιμος λόγος να αναμένεται ότι οι σεισμοί είναι προβλέψιμοι επί της αρχής, καθώς μικρές διακυμάνσεις μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες ως προς το πώς θα εξελιχθεί η σεισμική διέγερση, και ποιο θα είναι τελικά το μέγεθός της. Ο φλοιός της Γης στην περιοχή γύρω από ένα ρήγμα βρίσκεται σε μια κρίσιμη κατάσταση, και οι πιθανότητες να υπάρξει εξέλιξη αυτής της δραστηριότητας αντισταθμίζονται από τις πιθανότητες να μην διαδοθεί αυτή η δραστηριότητα. Το τι θα γίνει τελικά εξαρτάται από μικρές λεπτομέρειες στον φλοιό της Γης, ακόμα και μακριά από την πηγή του σεισμού. Η διαπίστωση αυτή έχει σημαντικά αποτελέσματα για αυτό που ονομάζεται ντετερμινιστική πρόβλεψη, δηλαδή πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού. Αν η περιγραφή αυτή είναι σωστή τότε για να προβλέψει κάποιος το μέγεθος ενός σεισμού θα πρέπει να έχει εξαιρετικά λεπτομερή γνώση κάθε μικρού χαρακτηριστικού της Γης, ακόμα και μακριά από την περιοχή που προήλθε ο σεισμός. Όπως γίνεται αντιληπτό, σε μια τέτοια περίπτωση είναι μάλλον απίθανο να γίνουν κάποτε επιτυχημένες προβλέψεις. Η άποψη αυτή δεν είναι αποδεκτή από όλους τους επιστήμονες και σίγουρα όχι από αυτούς που θεωρούν ότι η λύση για την πρόβλεψη των σεισμών είναι η αναγνώριση και ανίχνευση αξιόπιστων πρόδρομων φαινομένων, στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

3.2. Τι συνιστά πρόβλεψη ενός σεισμού; Αν παρά τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα οι σεισμοί μπορούν πράγματι να προβλεφθούν, τότε τι ακριβώς συνιστά πρόβλεψη σεισμού; Από τα πρώτα χρόνια της σύγχρονης σεισμολογίας, ο σειсмоγράφος θεωρήθηκε μια συσκευή που θα μπορούσε να βοηθήσει στην πρόβλεψη των σεισμών. Αυτό που εννοούταν με τον όρο «πρόβλεψη» ήταν η πρόβλεψη ενός συγκεκριμένου σεισμού με συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους του, αυτό για το οποίο σήμερα χρησιμοποιείται ο όρος «ντετερμινιστική» πρόβλεψη. Το

ποιο πρέπει να είναι το χρονικό παράθυρο για μια πρόβλεψη δεν ήταν κάτι που είχε απασχολήσει τους επιστήμονες από τα πρώτα χρόνια, αλλά σταδιακά γινόταν όλο και περισσότερο φανερό ότι ο καθορισμός της παραμέτρου του χρόνου θα ήταν μια εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση. Αν και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970 οι σεισμολόγοι θεωρούσαν ότι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη είναι εφικτή, προς το τέλος της δεκαετίας αυτής και τις αρχές της επόμενης στράφηκαν σχεδόν ολοκληρωτικά στη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη σεισμών, ή εγκατέλειψαν εντελώς την ιδέα της δυνατότητας πρόβλεψης ενός σεισμού. Σε αυτό το σημείο εισήλθαν στο χώρο της πρόβλεψης σεισμών επιστήμονες από άλλους κλάδους, φυσικοί, χημικοί, κ.α., οι οποίοι εργάζονταν πάνω στη μελέτη και ανίχνευση πρόδρομων φαινομένων, φαινομένων δηλαδή που είναι δυνατόν να ανιχνευθούν πριν συμβεί ένας σεισμός και μπορούν να συνδεθούν αιτιακά με αυτόν τον σεισμό. Από εκείνη την περίοδο και μετά υπάρχει μια έντονη συζήτηση για το τι συνιστά πρόβλεψη των σεισμών, και πώς αυτή ορίζεται. Στη συζήτηση αυτή χρησιμοποιούνται επιχειρήματα επιστημονικά και μεθοδολογικά, αλλά και άλλα σχετικά με την πρακτική χρησιμότητα της πρόβλεψης.

Ο σεισμολόγος Ian Main (1999), συντονιστής της διαδικτυακής συζήτησης που φιλοξένησε το περιοδικό *Nature* στην ιστοσελίδα του, παρέθετε έναν ορισμό της ντετερμινιστικής πρόβλεψης: αυτού του τύπου η πρόβλεψη μας επιτρέπει να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τα χαρακτηριστικά ενός σεισμού με τέτοια ακρίβεια ώστε να είναι εφικτή η σχεδιασμένη εκκένωση κατοικημένης περιοχής. Η απάντηση του επίσης σεισμολόγου Max Wyss (1999α), στο πλαίσιο της ίδιας συζήτησης, ήταν άμεση καθώς υποστήριξε ότι αν οριστεί ως χρήσιμη μια πρόβλεψη η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εκκένωση είναι σαν να απορρίπτεται η ιδέα ότι η πρόβλεψη σεισμών θα έπρεπε εξ αρχής να μελετάται· είναι αλήθεια πως ελάχιστοι επιστήμονες θα υποστήριζαν ότι η ντετερμινιστική πρόβλεψη, όπως ορίστηκε παραπάνω, είναι πράγματι ένας εφικτός στόχος. Αυτό που υποστηρίζει ο Wyss είναι ότι το στοιχείο της τυχαιότητας στην έναρξη μιας μεγάλης διάρρηξης πράγματι ακυρώνει τη δυνατότητα της πρόβλεψης εντός μικρού χρονικού παράθυρου, δηλαδή κάνει εξαιρετικά δύσκολη τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη, κάτι όμως που δεν ισχύει για τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη.

Αν θεωρήσουμε ότι οι απόψεις γύρω από την πρόβλεψη σεισμών καλύπτουν ένα φάσμα και τοποθετήσουμε στο μέσο του τους ισχυρισμούς του Wyss, τότε θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε στις άκρες τις απόψεις των Robert Geller και Seiya Uyeda. Αν και αυτή η χωροθέτηση δεν μπορεί παρά να έχει κάποια στοιχεία αυθαιρεσίας, πιστεύουμε ότι μπορεί να μας φανεί χρήσιμη. Στο ένα άκρο λοιπόν ο Geller υποστηρίζει ότι οι σεισμοί ως φαινόμενο είναι επί της αρχής μη προβλέψιμοι, επομένως κάθε αντίστοιχη προσπάθεια είναι καταδικασμένη σε αποτυχία. Ενώ στο άλλο άκρο, ο Uyeda, αν και σεισμολόγος, υποστηρίζει ότι η σεισμολογία ως επιστήμη δεν μπορεί να έχει κάποιον λόγο στην πρόβλεψη σεισμών.

Ο Uyeda στηρίζει αυτή του την άποψη στο γεγονός ότι το βασικό όργανο της σεισμολογίας είναι ο σειсмоγράφος, με τον οποίο καταγράφονται τα σεισμικά κύματα. Αυτά τα κύματα όμως δημιουργούνται **αφού** έχει συμβεί ένας σεισμός, και έτσι η καταγραφή και μελέτη τους δεν μας βοηθά στην πρόβλεψή του. Για την πρόβλεψη χρειαζόμαστε αξιόπιστα πρόδρομα φαινόμενα που η ανίχνευσή τους να μπορεί να συνδεθεί με αιτιακό τρόπο με τον επερχόμενο σεισμό. Η αναζήτηση τέτοιων πρόδρομων φαινομένων είναι δουλειά για άλλους επιστημονικούς κλάδους, ενδεχομένως και για έναν καινούργιο κλάδο, στον οποίο θα είχαν θέση φυσικοί, χημικοί, μηχανικοί, κ.α.. Ο Uyeda (2013) προτείνει για αυτόν τον κλάδο τον όνομα «Πρόβλεψολογία» (Predictology).

Αυτό που αξίζει να αναφερθεί τώρα είναι ότι οι Geller και Uyeda, εκκινώντας από εντελώς διαφορετικές αφετηρίες, καταλήγουν στην ίδια άποψη σχετικά με τι συνιστά πρόβλεψη. Και για τους δύο επιστήμονες ως πρόβλεψη δεν μπορεί να θεωρείται άλλη από την βραχυπρόθεσμη. Όπως αναφέρει ο Geller (1999α), το κοινό, τα MME, οι κυβερνήσεις θεωρούν ως «πρόβλεψη σεισμών» τον συναγερμό για έναν επικείμενο μεγάλο σεισμό, ορισμένο με αρκετή ακρίβεια και αξιοπιστία ώστε να μπορούν να ληφθούν μέτρα, όπως η εκκένωση πόλεων. Συνεπώς ο όρος «πρόβλεψη» θα πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά υπό αυτή την έννοια, με άλλα λόγια, προγνώσεις πιο μακροπρόθεσμες ή στατιστικές προγνώσεις για πιθανότητες μετασεισμών δεν πρέπει να καταχωρούνται ως προβλέψεις. Ενώ, στην ίδια γραμμή σκέψης ο Uyeda (2013) τονίζει ότι η πρόβλεψη σεισμών πρέπει να προσδιορίζει τον χρόνο, το επίκεντρο και το μέγεθος του επικείμενου σεισμού, με χρήσιμη ακρίβεια. Μεταξύ της μακροπρόθεσμης, της μεσοπρόθεσμης και της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης μόνο η βραχυπρόθεσμη είναι χρήσιμη για την άμεση προστασία ανθρώπινων ζωών και κοινωνικών υποδομών. Οι άλλες δύο είναι απλώς στατιστικές προγνώσεις βασισμένες στην προηγούμενη εμπειρία και δεν πρέπει καν να λέγονται πρόβλεψη.

3.3. Ποια (πρέπει να) είναι η στρατηγική για την πρόβλεψη σεισμών;
Ένα ακόμα σημαντικό ερώτημα σχετικά με την πρόβλεψη σεισμών, που σχετίζεται και με το προηγούμενο, είναι το ποιος είναι ο ενδεδειγμένος τρόπος για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός. Έχουν προταθεί σχετικά δύο στρατηγικές: η ανίχνευση πρόδρομων φαινομένων, και η καλύτερη δυνατή θεωρητική κατανόηση του φαινομένου όπως και η δημιουργία μοντέλων που θα μπορούν να περιγράψουν με επιτυχία τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην περιοχή γένεσης ενός σεισμού και οδηγούν σε αυτόν. Η επιλογή της στρατηγικής δεν είναι η ίδια από όλα τα μέλη της επιστημονικής κοινότητας και οι διαφωνίες αφορούν και τα δύο βασικά επίπεδα της επιστήμης, το οντολογικό και το μεθοδολογικό.

Όσον αφορά το οντολογικό κομμάτι, στην έρευνα των πρόδρομων φαινομένων οι ερωτήσεις σχετίζονται με το αν πράγματι υπάρχουν τέτοια

φαινόμενα και αν μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστη λύση στο πρόβλημα της πρόβλεψης. Οι ενστάσεις σχετικά με τα πρόδρομα φαινόμενα θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής: η στρατηγική των πρόδρομων δεν μπορεί να είναι επιτυχημένη καθώς οι σεισμοί είναι αρκετά περίπλοκοι και καθόλου συχνοί, σε σχέση με την ανθρώπινη κλίμακα του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν τα πρόδρομα φαινόμενα υπάρχουν, οι λίγες παρατηρήσεις τους δεν μπορούν να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη σύνδεση αυτών των φαινομένων και των σεισμών. Μία ακόμα δυσκολία αναφορικά με τα πρόδρομα φαινόμενα, και ίσως σημαντικότερη, σχετίζεται με το ότι οι περισσότερες συσχετίσεις πρόδρομων φαινομένων με σεισμούς βασίζονται σε εκ των υστέρων μελέτες, αφού δηλαδή ένας σεισμός έχει συμβεί. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να ρυθμιστούν οι παράμετροι της πρόβλεψης μετά το σεισμό έτσι ώστε να παραχθούν φαινομενικά σημαντικές συσχετίσεις, οι οποίες όμως στην πραγματικότητα είναι αναληθείς (Geller 1999α).

Η συζήτηση όσον αφορά το μεθοδολογικό κομμάτι σχετίζεται με το ότι ένα σημαντικό μέρος της έρευνας στην πρόβλεψη σεισμών είναι εμπειρικό και βασίζεται σε μελέτες κατά περίπτωση (case studies). Έπειτα από κάποιον σεισμό, δεδομένα όλων των ειδών εξετάζονται, με την ελπίδα να βρεθεί κάποιο πρόδρομο σήμα. Τι σημαίνει αυτό για την ποιότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από μια τέτοια προσέγγιση; Σύμφωνα με μια άποψη, ο εμπειρισμός δεν θα έπρεπε να απορρίπτεται ασυζητητί, καθώς έχει οδηγήσει σε σπουδαίες ανακαλύψεις. Παρ' όλα αυτά, χωρίς σωστό έλεγχο, η εμπειρική προσέγγιση ενδέχεται να οδηγήσει σε παράλογα συμπεράσματα, όπως ότι το χτύπημα των ταμ ταμ μπορεί να επαναφέρει τον Ήλιο ύστερα από μία έκλειψη (Geller 1999α). Η προσέγγιση των case studies μπορεί να ήταν χρήσιμη αρχικά, αλλά από ένα σημείο και μετά, όταν υπήρχαν κυριολεκτικά χιλιάδες δημοσιευμένοι ισχυρισμοί για πρόδρομα φαινόμενα, η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν βοήθησε στην επίλυση του προβλήματος της πρόβλεψης (Geller 1999β). Ποιο είναι λοιπόν το επιχείρημα που διαμορφώνεται κατά της έρευνας που διεξάγεται στην πρόβλεψη σεισμών; Η επιστημονική δουλειά υψηλού επιπέδου δεν μπορεί να είναι απλώς εμπειρική αναζήτηση – αυτό επιτρέπεται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης μιας επιστήμης και δεν αποτελεί ένδειξη «ωριμότητας». Επομένως, η «ηλικία» του εκάστοτε ερευνητικού κλάδου έχει ιδιαίτερη σημασία. Αν η έρευνα σχετικά με την πρόβλεψη σεισμών εξακολουθεί να στηρίζεται στη φαινομενολογία, αυτό αποτελεί απόδειξη ότι το αντικείμενό της είναι προβληματικό. Στο θέμα της ηλικίας του κλάδου της πρόβλεψης σεισμών θα επανέλθουμε.

Αρκεί όμως η μελέτη των πρόδρομων φαινομένων για την επιτυχή έρευνα στην πρόβλεψη των σεισμών; Ερωτήματα όπως τι είναι ο σεισμός, τι καθορίζει το μέγεθός του και γιατί είναι πιθανό να συμβεί όπου και όταν αυτός γίνεται, είναι ερωτήματα φυσικής και δεν μπορούν να

απαντηθούν με στατιστικά μέσα (Knopoff 1999). Το πρόβλημα της πρόβλεψης σεισμών δεν είναι στατιστικό. Ο μικρός αριθμός αρκετά μεγάλων γεγονότων σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες –ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι διαθέσιμα ακριβή και αξιόπιστα όργανα– δεν διευκολύνει τον καθορισμό των πιθανοτήτων για ενδεχόμενα μεγαλύτερα γεγονότα με ικανοποιητική ακρίβεια. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζεται μία θεωρία που θα εξηγήει τη γένεση των πρόδρομων φαινομένων και τη συσχέτισή τους με τους σεισμούς που θα βασίζεται στις αρχές της φυσικής, έτσι ώστε να μεγεθύνεται ο μικρός όγκος των δεδομένων που έχουν οι επιστήμονες στη διάθεσή τους.

3.4. Ποιος είναι ο χαρακτήρας της σεισμολογίας ως επιστήμης; Η συζήτηση σχετικά με τη στρατηγική πρόβλεψης των σεισμών έχει μια ακόμα σημαντική διάσταση η οποία σχετίζεται με ένα ερώτημα υπαρκτικής φύσης για την επιστήμη της σεισμολογίας: πρόκειται για βασική ή για εφαρμοσμένη επιστήμη; Έχουμε ήδη παρουσιάσει αυτό το ερώτημα, με τα λόγια του Gregory Clancey, ο οποίος μετά το σεισμό της Φουκουσίμα αναρωτιόταν αν οι σεισμολόγοι εργάζονταν για την προστασία του κοινού ή για κάποιον ανώτερο θεωρητικό σκοπό. Η πιο διαδεδομένη άποψη για τον διαχωρισμό βασικής και εφαρμοσμένης επιστήμης υποστηρίζει ότι αυτές οι δύο πλευρές της επιστημονικής διαδικασίας έχουν διακριτούς και ξεκάθαρους ρόλους: η βασική επιστήμη έχει ως σκοπό την κατανόηση της Φύσης, ενώ η γνώση που παράγεται από αυτή την κατανόηση εφαρμόζεται στον πραγματικό κόσμο, είτε για τη δημιουργία τεχνολογικών καινοτομιών είτε για την αντιμετώπιση προβλημάτων που απασχολούν τις ανθρώπινες κοινωνίες. Η επιστήμη όμως, και ειδικά η σύγχρονη, δεν δουλεύει με αυτόν τον τρόπο, ή αποκλειστικά με αυτόν τον τρόπο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η επιστημονική έρευνα έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί την πολυπλοκότητα που υπάρχει σε φυσικά συστήματα, χωρίς όμως ποτέ να καταφέρει την πλήρη κατανόησή τους. Σε αυτή τη λογική, ο κύριος σκοπός της σύγχρονης επιστήμης είναι να μετασχηματίσει τον κόσμο παρά να τον κατανοήσει (Carrier and Nordmann 2011). Σε μια τέτοια περίπτωση όμως είναι διαφορετικός και ο τρόπος λειτουργίας της επιστήμης. Έτσι η εφαρμοσμένη επιστήμη, σε αντίθεση με τη βασική, χαρακτηρίζεται από: α) μοντέλα με τοπική ισχύ σε συγκεκριμένες επιστημονικές περιοχές, παρά από μεγάλες θεωρίες που ενοποιούν κάτω από το ίδιο εξηγητικό σχήμα πολλά φυσικά φαινόμενα, β) από αιτιακές σχέσεις που έχουν ισχύ σε ένα τοπικό πλαίσιο παρά από ευρύτερους αιτιακούς μηχανισμούς που καλύπτουν μια σειρά φυσικών φαινομένων, και γ) από πειράματα στον πραγματικό κόσμο παρά από εργαστηριακά πειράματα που διεξάγονται σε ελεγχόμενες συνθήκες (Carrier 2004). Οι σεισμολόγοι και όσοι ασχολούνται με την πρόβλεψη σεισμών προτείνουν διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με τη μελέτη και την αντιμετώπιση των συνεπειών του σεισμικού φαινομένου. Ορισμένοι (π.χ. Jordan 1997, Geller 1999β, Knopoff 1996) υποστηρίζουν

ότι για να λυθεί το πρόβλημα της πρόβλεψης χρειάζεται περισσότερη βασική έρευνα για την κατανόηση των μηχανισμών γένεσης των σεισμών και διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, ενώ άλλοι (π.χ. Uyeda 2013, Scholz 1997) υποστηρίζουν ότι αυτό που χρειάζεται είναι περισσότερη έρευνα για την εύρεση αξιόπιστων πρόδρομων φαινομένων, μια έρευνα η οποία μπορεί να έχει περισσότερο εμπειρικό χαρακτήρα και να είναι προσανατολισμένη στην εφαρμογή της επιστημονικής γνώσης για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

3.5. Πρέπει να επιδιώκεται η πρόβλεψη των σεισμών; Όπως ήδη αναφέραμε η πρόβλεψη σεισμών αποτελεί ένα πεδίο διαμάχης στο οποίο πολλά ζητήματα –θεωρητικά, μεθοδολογικά, πραγματολογικά– είναι ανοικτά. Κατά συνέπεια, η συζήτηση καλύπτει μεγάλο εύρος θεμάτων, από πολύ τεχνικά έως περισσότερο «επιστημολογικά». Με τον τελευταίο όρο εννοούνται θέματα όπως το τι συνιστά πρόβλεψη, πώς ορίζεται η επιτυχία και η αποτυχία, αλλά και πότε θεωρείται ότι ένα ερευνητικό πρόγραμμα έχει ολοκληρωθεί ή είναι ώριμο να παράγει αποτελέσματα. Τέτοια ερωτήματα δεν μπορούν να απαντηθούν μόνο σε τεχνικό επίπεδο, καθώς παίζουν ρόλο οι αξίες (επιστημικές και ηθικές) αλλά και οι προσδοκίες που έχουν όσοι εμπλέκονται σε αυτή τη συζήτηση.

Το αν η πρόβλεψη σεισμών, και κυρίως η βραχυπρόθεσμη, είναι ένα εφικτό και «νόμιμο» επιστημονικό στόχος, είναι ένα θέμα στο οποίο δεν υπάρχει συμφωνία μεταξύ των επιστημόνων. Μπορούν οι πόροι που διατίθενται να έχουν αντίκρισμα με τη μορφή αποτελεσμάτων χρήσιμων, τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και την κοινωνία στο σύνολό της; Η υπάρχουσα θεωρητική γνώση δεν μπορεί να δώσει στο προηγούμενο ερώτημα μια απάντηση που θα είναι δεσμευτική για όλη την κοινότητα, συνεπώς οι απαντήσεις που δίνονται ποικίλλουν ανάλογα με την προδιάθεση που έχει ο κάθε επιστήμονας ως προς τον συγκεκριμένο στόχο. Υπάρχουν επιστήμονες που θεωρούν ότι οι σεισμοί απλώς δεν προβλέπονται, ενώ για άλλους αυτή η άρνηση δεν είναι αποδεκτή, αν και παραδέχονται ότι οι δυσκολίες είναι σημαντικές, ενώ υπάρχει και η άποψη, όπως διατυπώνεται για παράδειγμα από τον σεισμολόγο David Jackson, ότι το σημαντικό ερώτημα δεν είναι κατά πόσο η πρόβλεψη σεισμών είναι δυνατή αλλά αν είναι εύκολη (Jackson, 1999). Είναι πολύ χαρακτηριστικοί οι τίτλοι δύο παρεμβάσεων στη διαδικτυακή συζήτηση του *Nature*, στην οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως, και οι οποίοι θέτουν το περίγραμμα αυτών που θα ακολουθήσουν. Ο Wyss (1999β) διατύπωνε, μέσω του τίτλου της παρέμβασής του, την άποψη: «Χωρίς χρηματοδότηση, δεν υπάρχει πρόοδος». Η απάντηση που λάμβανε ήταν: «Χωρίς πρόοδο, δεν υπάρχει χρηματοδότηση» (Geller 1999γ).

Ποια από τις δύο προσεγγίσεις θεωρείται η επικρατέστερη; Καθεμία είναι συμβατή με μία διαφορετική αντίληψη σχετικά με την ιστορία της πρόβλεψης σεισμών. Σε ένα άρθρο στο οποίο έκανε αποτίμηση της ερευνητικής προσπάθειας της πρόβλεψης ο Geller είχε επιλέξει για το πρώτο

υποκεφάλαιο τον τίτλο: «120 χρόνια έρευνας στην πρόβλεψη». Εκεί ξεκινούσε παραθέτοντας τον Milne, έναν από τους εφευρέτες του πρώτου σειсмоγράφου και θεμελιωτές της σύγχρονης σεισμολογίας, να υποστηρίζει το 1880 ότι «από τότε που η σεισμολογία μελετάται, ένας από τους κύριους σκοπούς των μελετητών της είναι να ανακαλύψουν κάποια μέσα, τα οποία θα τους επέτρεπαν να προλέγουν τον ερχομό ενός σεισμού» (Geller 1997, σ. 425). Συνέχιζε την παράθεση αποσπασμάτων από γραπτά ή από δημόσιες παρεμβάσεις σημαντικών σεισμολόγων, από τα οποία προέκυπτε ότι η πρόβλεψη σεισμών ήταν ανέκαθεν ένας σημαντικός στόχος της σύγχρονης σεισμολογίας. Η ρητορική του Geller έχει έναν σαφή στόχο: να καταδείξει ότι η έρευνα για την πρόβλεψη σεισμών έχει μια σχετικά μακρά διάρκεια, χωρίς να έχει επιδείξει χειροπιαστά αποτελέσματα. Αυτό που πρέπει να έχουμε υπόψη μας είναι ότι δεν υπάρχει ένα λογικά αναπόδραστο σημείο στο οποίο σταματά η επιστημονική έρευνα. Για να συμβεί αυτό πρέπει να συγκλίνουν το τεχνικό, το γνωσιακό και το κοινωνικό κομμάτι (Galison 1987). Στην περίπτωση της πρόβλεψης οι αντιπαρατιθέμενες πλευρές εκτός από τεχνικά επιχειρήματα χρησιμοποιούν και ρητορικά, όπως το προηγούμενο, με σκοπό να εξυπηρετήσουν τη δική τους ερευνητική ατζέντα. Ο ισχυρισμός του Geller δεν έμεινε φυσικά αναπάντητος. Ο Wyss, κάνοντας μία διαφορετική και μάλλον πιο συμβατική ανάγνωση της ιστορίας της πρόβλεψης, θέτει την αρχή της προσπάθειας στη δεκαετία του 1970 και τονίζει ότι το βασικότερο εργαλείο των σεισμολόγων είναι το δίκτυο σειсмоγράφων, που εγκαταστάθηκε σε παγκόσμια κλίμακα μόλις στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Αν κάποιος επιθυμεί να μελετήσει σεισμικούς καταλόγους μεγάλης ανάλυσης, οι οποίοι έχουν παραχθεί από πυκνά δίκτυα, δεν μπορεί να ξεκινήσει τη χρήση δεδομένων πριν από το 1980, καθώς μέχρι τότε τα δεδομένα ήταν πολύ φτωχά. Επιπροσθέτως, ο λόγος για τη διάρρηξη των ρηγμάτων, τη γένεση των σεισμών δηλαδή, που δεν είναι άλλος από την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών, δεν ανακαλύφθηκε πριν από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Wyss 1999γ). Επομένως, σύμφωνα με τον Wyss, η επιστήμη της πρόβλεψης σεισμών είναι μια σχετικά νέα επιστήμη, η οποία γίνεται ακόμα πιο νέα αν λάβουμε υπόψη τους χρόνους στους οποίους εξελίσσεται το φαινόμενο που μελετά, οι οποίοι είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους χρόνους στην ανθρώπινη κλίμακα.

Στην ιστορία των σύγχρονων κοινωνιών υπάρχουν σεισμοί οι οποίοι έχουν προκαλέσει σημαντικούς τριγμούς όχι μόνο σε κτίρια και υποδομές, αλλά και στα θεμέλια της γνώσης που έχουμε γύρω από τους σεισμούς (Coen 2013). Ο σεισμός της Λισαβώνας το 1755, του Σαν Φρανσίσκο το 1906, του Κόμπε το 1995, ήταν σεισμοί που ανέδειξαν τις ανεπάρκειες της γνώσης που υπήρχε γύρω από τους σεισμούς και έδωσαν ώθηση στη μελέτη των σεισμών με νέα κάθε φορά εργαλεία. Ο σεισμός της Φουκουσίμα κατέχει σίγουρα μια ξεχωριστή θέση στη σειρά αυτών των γεγονότων καθώς έθεσε εν αμφιβόλω τα θεμέλια της σεισμολογίας. Εμφανίστηκαν φωνές (Geller 2011, 2016, Stein et al 2012, Sagiya et al

2011) που υποστήριξαν ότι η κρίση στη σεισμολογία ήταν τόσο σημαντική ώστε αυτό που χρειαζόταν πια ήταν η αλλαγή ενός παραδείγματος, κατά Kuhn (2012). Σε αυτό το καινούριο παράδειγμα η πρόβλεψη δεν μπορούσε να έχει θέση σε καμία μορφή της (βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη) αλλά ούτε καν και στη μορφή της πιθανοκρατικής εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου (PSHA).

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ

Αυτό που κάνει εξαιρετικά ενδιαφέρουσα περίπτωση για μελέτη την προσπάθεια των επιστημόνων να προβλέψουν τους σεισμούς είναι ότι πρόκειται για μια επιστημονική περιοχή που από τη μια βρίσκεται σε κρίση ως προς τον χαρακτήρα της αλλά και ως προς το τι μπορεί να προσφέρει στην κοινωνία, από την άλλη όμως συνδέεται άμεσα με τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Αν για πολλούς σεισμολόγους η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε αυτή την περιοχή που ο Weinberg (1972) ονόμασε *trans-science*, δηλαδή μια περιοχή ερωτημάτων που μπορούν να τεθούν από την επιστήμη αλλά δεν μπορούν να απαντηθούν από αυτήν, τα πράγματα για τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη και την πιθανοκρατική εκτίμηση είναι πολύ διαφορετικά, καθώς αποτελούν σημαντικά εργαλεία των επιστημόνων, ειδικά η τελευταία. Πώς μπορεί να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση στο επίπεδο της λήψης αποφάσεων; Πώς μπορούν, αν μπορούν, να ληφθούν πολιτικές αποφάσεις σε αυτό το πλαίσιο; Για τη σεισμολογική έρευνα εμφανίζεται, ή μάλλον επανέρχεται με ακόμη πιο έντονο τρόπο από ότι στο παρελθόν, το ερώτημα με το οποίο ασχοληθήκαμε στην προηγούμενη ενότητα, αν δηλαδή η σεισμολογία είναι βασική ή εφαρμοσμένη επιστήμη. Το ερώτημα αυτό δεν είναι σημαντικό μόνο για τους επιστήμονες αλλά και για αυτούς που λαμβάνουν τις πολιτικές αποφάσεις, όπως και για την ευρύτερη κοινωνία που στηρίζει το εγχείρημα της σύγχρονης επιστήμης και περιμένει από αυτήν κάποιας μορφής ανταπόδοση. Πριν συνεχίσουμε όμως τη συζήτηση σχετικά με την πρόβλεψη σεισμών θα παραθέσουμε εν συντομία ένα μέρος της γενικότερης συζήτησης που υπάρχει στις Σπουδές Επιστήμης και Τεχνολογίας σχετικά με την ερευνητική πολιτική.

Εκτός από τη σαφή διάκριση ανάμεσα στη βασική και την εφαρμοσμένη επιστήμη, στο πλαίσιο της καθιερωμένης άποψης για την επιστήμη υπάρχει και η σαφής διάκριση ανάμεσα στην παραγωγή της επιστημονικής γνώσης και τη λήψη πολιτικών αποφάσεων που βασίζονται στην επιστημονική γνώση (Bijker et al 2009). Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της άποψης είναι ότι η επιστήμη προσφέρει την απαιτούμενη γνώση και με βάση αυτή οι πολιτικοί παίρνουν τις αποφάσεις. Η διάκριση που αναφέραμε προηγουμένως προϋποθέτει ότι τα γεγονότα, με τα οποία ασχολείται η επιστήμη, και οι αξίες, στις οποίες στηρίζονται οι πολιτικοί για να λάβουν αποφάσεις, είναι καλά διαχωρισμένες μεταξύ τους κατηγορίες. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, ο καθορισμός της εγκυρότητας της

επιστημονικής γνώσης είναι μια τετριμμένη διαδικασία. Η επιστημονική κοινότητα αποφασίζει στο εσωτερικό της, με διαδικασίες που καθορίζει η ίδια, ποια είναι η αποδεκτή γνώση και με βάση αυτή τη γνώση στη συνέχεια λαμβάνονται οι πολιτικές αποφάσεις. Συνέπεια αυτής της προσέγγισης είναι η άποψη ότι η επίλυση των προβλημάτων επιστημονικής και τεχνολογικής φύσης που απασχολούν τις σύγχρονες κοινωνίες έχουν δύο καλά καθορισμένα στάδια. Το πρώτο σχετίζεται με την εκτίμηση του κινδύνου (risk assessment) και είναι αποκλειστική αρμοδιότητα των επιστημόνων, ενώ το δεύτερο σχετίζεται με τη διαχείριση του κινδύνου (risk management) και είναι αρμοδιότητα αυτών που λαμβάνουν τις πολιτικές αποφάσεις σε επίπεδο κοινωνίας. Στην πραγματικότητα, όμως, αυτή η διαδικασία δεν είναι τόσο απλή και αυτό το έχουν καταδείξει πολλές μελέτες των Σπουδών Επιστήμης και Τεχνολογίας.

Κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους ισχύει αυτό είναι οι εξής: όπως αναφέρουν οι Bijker et al (2009), η αποτίμηση της ορθότητας της επιστημονικής γνώσης όσον αφορά την τρέχουσα επιστημονική έρευνα (state of the art) δεν είναι καθόλου τετριμμένη διαδικασία. Η ιστορία της επιστήμης είναι γεμάτη από διαμάχες γύρω από νέους επιστημονικούς ισχυρισμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, για να αποφασιστεί από την επιστημονική κοινότητα ποια είναι η ορθή γνώση χρειάζεται να περάσει πολύς χρόνος. Χρόνος που συνήθως δεν είναι διαθέσιμος όταν η συγκεκριμένη γνώση πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Έτσι, έρχεται στην επιφάνεια το θέμα της αβεβαιότητας της επιστημονικής γνώσης, η οποία υπάρχει ούτως ή άλλως, αλλά αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία όταν η γνώση αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Η αβεβαιότητα της επιστημονικής γνώσης επιτείνεται κάποιες φορές από το γεγονός ότι δεν είναι πάντα σαφές το ποιοι είναι οι ειδικοί επιστήμονες σχετικά με ένα θέμα δημόσιας πολιτικής. Όπως υποστηρίζει η Jasanoff (2003), σε τεχνικές διαμάχες που σχετίζονται με τη δημόσια πολιτική, πολλές φορές, το σημαντικό θέμα είναι να καθορισθεί ποια γνώση είναι σχετική με την επίλυση του προβλήματος. Ο καθορισμός της σχετικής γνώσης και επομένως του ποιος είναι ο ειδικός σε ένα θέμα πολύ συχνά είναι το τελικό αποτέλεσμα μιας «διαπραγμάτευσης». Η διαπραγμάτευση για τον καθορισμό του ειδήμονα δεν γίνεται μόνο στο εσωτερικό της επιστημονικής κοινότητας αλλά συχνά αυτό συμβαίνει και στη δημόσια σφαίρα.

Πολλοί μελετητές των Σπουδών Επιστήμης και Τεχνολογίας (π.χ. Wynne 1992, Irwin 1995, Jasanoff 1990) επισημαίνουν ότι η σύζευξη της επιστήμης με την πολιτική δημιουργεί μια επιστήμη νέου τύπου, η οποία αποτελεί ένα υβρίδιο. Η ιδέα αυτή της υβριδικής επιστήμης έρχεται να απαντήσει στην ιδέα του σαφούς διαχωρισμού ανάμεσα στα δύο στάδια λήψης πολιτικών αποφάσεων που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο. Σε αυτή τη λογική, η γνώση που παράγεται από τους ερευνητές και περιέχεται στις επιστημονικές δημοσιεύσεις είναι μάλλον απίθανο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει στη λήψη πολιτικών αποφάσεων (Stehr

and Grundman 2011). Για παράδειγμα, στην περίπτωση της κλιματικής αλλαγής τα ερωτήματα που τίθενται από την «ακαδημαϊκή» επιστήμη όπως αυτή διεξάγεται στα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά ιδρύματα είναι διαφορετικά από αυτά που απασχολούν την «ρυθμιστική» επιστήμη (regulatory science) που χρησιμοποιείται για τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Έτσι, για την πρώτη ένα σημαντικό ερώτημα είναι ποια είναι η σχέση του διοξειδίου του άνθρακα με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, ενώ για τη δεύτερη ένα βασικό ερώτημα είναι πόσο σημαντική είναι η σχέση μεταξύ διοξειδίου του άνθρακα και αλλαγής της παγκόσμιας θερμοκρασίας για τη χάραξη πολιτικής. Τέτοιου τύπου ερωτήματα, όπως το δεύτερο, θεωρούνται υβριδικά και δεν μπορούν να απαντηθούν εντελώς ούτε μόνο από την επιστήμη αλλά και ούτε μόνο από την πολιτική, αλλά από το υβρίδιο επιστήμη/πολιτική (Raman 2015).

Ποια είναι όμως η σχέση ανάμεσα σε αυτά τα δύο είδη που συνθέτουν το υβρίδιο, δηλαδή την επιστήμη και την πολιτική; Έχουν και τα δύο το ίδιο βάρος στη λήψη αποφάσεων; Υπάρχουν δύο γενικές απαντήσεις σε αυτό το ερώτημα. Σύμφωνα με την πρώτη, η επιστημονική γνώση είναι η σημαντικότερη παράμετρος για την επίλυση προβλημάτων που άπτονται της δημόσιας πολιτικής καθώς τα γεγονότα βαραίνουν περισσότερο στην επιλογή από τις αξίες. Στη δεύτερη θεώρηση, το βάρος αντιστρέφεται: αυτοί που λαμβάνουν τις πολιτικές αποφάσεις έχουν τον κύριο λόγο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων καθώς η επιστημονική αβεβαιότητα δείχνει ότι δεν μπορούμε να βρούμε στην επιστήμη στέρεα θεμέλια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Έτσι, σύμφωνα με το Sarewitz (2004), ένα πρόβλημα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι ότι αποδίδεται στην επιστημονική γνώση περισσότερη αντικειμενικότητα από όση πραγματικά έχει. Σε αντίθεση με την προηγούμενη άποψη, οι Collins et al (2007, 2010) υποστηρίζουν ότι είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη της επιστημονικής ειδημοσύνης στη λήψη πολιτικών αποφάσεων, τονίζοντας όμως ότι οι επιστήμονες και οι πολιτικοί έχουν διακριτούς ρόλους. Ο Wynne (2010) δεν υποστηρίζει ότι πρέπει να μειωθεί ο ρόλος της επιστήμης στη λήψη των αποφάσεων, όπως ο Sarewitz, αλλά μόνο ο ρόλος του επιστημονισμού που βάζει στο κέντρο της διαδικασίας δημιουργίας πολιτικής την επιστήμη εις βάρος όλων των άλλων φορέων μιας κοινωνίας. Αυτό που απαιτείται για μια αποτελεσματική διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι η ευρύτερη συμμετοχή σε αυτή όλων των ενδιαφερόμενων κοινωνικών ομάδων εκτός από τους επιστήμονες.

Ας δούμε όμως πώς η παραπάνω συζήτηση σχετικά με την επιστημονική πολιτική εφαρμόζεται στην περίπτωση της πρόβλεψης σεισμών. Η σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard) ορίζεται, με απλά λόγια, ως η πιθανότητα κάποια σεισμική δόνηση που θα συμβεί μέσα σε ένα χρονικό διάστημα να υπερβεί μια τιμή που έχει καθοριστεί ως μέγιστη. Ο σεισμικός κίνδυνος (seismic risk) μετριέται με τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, σε υποδομές και στο οικονομικό πεδίο. Η σεισμολογία, η

γεωφυσική και οι συναφείς επιστήμες έχουν ως πρωταρχικό, και μάλλον αποκλειστικό στόχο, την εκτίμηση της επικινδυνότητας. Υπό αυτή την έννοια, θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι η σεισμολογία είναι περισσότερο «ακαδημαϊκή» επιστήμη παρά υβριδική. Ένα ερώτημα που τίθεται από τους ίδιους τους επιστήμονες είναι το εξής: για να ξεπεράσει την κρίση στην οποία βρίσκεται θα έπρεπε η σεισμολογία να γίνει ακόμη περισσότερο «ακαδημαϊκή» ή να μετακινηθεί προς μια πιο υβριδική κατεύθυνση; Η αυθόρμητη απάντηση των επιστημόνων σε αυτή την ερώτηση είναι ότι περισσότερη επιστημονική έρευνα και βαθύτερη κατανόηση του σεισμικού φαινομένου θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της γνώσης και, κατά συνέπεια, την καλύτερη αντιμετώπιση του σεισμικού κινδύνου.

Στην αντίθετη κατεύθυνση η ιστορικός της επιστήμης Naomi Oreskes (2015) έχει υποστηρίξει ότι οι επιστήμες Γης, συμπεριλαμβάνοντας σε αυτές ρητά και την πρόβλεψη των σεισμών, δεν είναι μόνο φυσικές επιστήμες αλλά ένα υβρίδιο που πατάει τόσο στις φυσικές όσο και στις κοινωνικές επιστήμες. Αυτό ισχύει διότι η πρόβλεψη σεισμών δεν έχει να κάνει μόνο με τη μελέτη φυσικών συστημάτων αλλά και με την αλληλεπίδραση φυσικών συστημάτων με κοινωνικά συστήματα. Ένας σεισμός συγκεκριμένου μεγέθους δεν έχει τα ίδια αποτελέσματα αν συμβεί σε μια απομακρυσμένη περιοχή και αν συμβεί κοντά σε μια πυκνοκατοικημένη μεγαλούπολη. Κομβικό ρόλο εδώ έχει η επικοινωνία των επιστημονικών αποτελεσμάτων στην κοινωνία, αλλά και η συμμετοχή της δεύτερης στον καθορισμό της διακινδύνευσης. Οι επιλογές που γίνονται για τον ορισμό της διακινδύνευσης δεν μπορούν να γίνουν μόνο με βάση τεχνικά εργαλεία και αντίστοιχους συλλογισμούς.

Για παράδειγμα, στην PSHA υπολογίζεται ο μεγαλύτερος πιθανός σεισμός: αυτό σημαίνει ότι σε μια κατανομή πιθανοτήτων αφήνονται εκτός υπολογισμού τα γεγονότα που βρίσκονται στις άκρες αυτής της κατανομής, και είναι τα λιγότερα πιθανά. Ένας τέτοιος υπολογισμός, δηλαδή, αφήνει εκτός τα μεγαλύτερα γεγονότα που όμως έχουν μικρή πιθανότητα να συμβούν. Μια τέτοια προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα οι κοινωνίες να προετοιμάζονται και οι υποδομές να κατασκευάζονται για να αντέξουν στα πιο πιθανά συμβάντα και όχι στα συμβάντα τα οποία μπορεί να είναι τα πιο καταστροφικά αλλά έχουν μικρές πιθανότητες να συμβούν. Αυτή η επιλογή έχει ως στόχο την εξοικονόμηση πόρων κατά την κατασκευή και λειτουργία των υποδομών. Υπάρχουν όμως φορές που η επιλογή αυτή καταλήγει σε μεγάλες καταστροφές που μπορεί να καθορίσουν το μέλλον μιας περιοχής. Αυτό συνέβη στο σεισμό της Φουκουσίμα που ήταν ένα γεγονός πολύ μεγάλο και με μικρές πιθανότητες να συμβεί σε αυτή την περιοχή της Ιαπωνίας. Το συμπέρασμα αυτό προέκυπτε από τους υπολογισμούς της PSHA για τη συγκεκριμένη περιοχή. Οι υπολογισμοί αυτοί καθοδήγησαν τους μηχανικούς στο να κατασκευάσουν υποδομές που θα άντεχαν σεισμό μεγέθους 8,5 βαθμών και τσουνάμι ύψους 5,2 μέτρων. Ωστόσο, ο σεισμός της 11ης Μαρτίου 2011 είχε μέγεθος 9 βαθμών

και προκάλεσε τσουνάμι ύψους περίπου 40 μέτρων. Η πιθανοκρατική εκτίμηση του κινδύνου σε αυτή την περίπτωση είχε ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση του κινδύνου. Αυτό που θέλουμε να αναδείξουμε σε αυτό το σημείο είναι ότι το ποια γεγονότα τροφοδοτούν τα στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε τη σεισμική διακινδύνευση είναι μια επιλογή τόσο τεχνική όσο και πολιτική.

Για να αποσαφηνιστεί αυτό το σημείο θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια της αρχής της προφύλαξης (precautionary principle). Παρότι δεν υπάρχει κάποιος σαφής ορισμός της, μπορούμε να πούμε ότι η αρχή της προφύλαξης χρησιμοποιείται για τη χάραξη πολιτικής σε περιπτώσεις όπου η επιστημονική αβεβαιότητα είναι μεγάλη ενώ ο κίνδυνος που μπορεί να δημιουργηθεί από μια λανθασμένη απόφαση είναι πολύ σημαντικός. Βασικό σημείο της αρχής της προφύλαξης είναι ότι όταν η γνώση που έχουμε στη διάθεσή μας δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει τη λήψη πολιτικών αποφάσεων με μεγάλο βαθμό βεβαιότητας, τότε η χάραξη πολιτικής θα πρέπει να καθοδηγείται από το πνεύμα ελαχιστοποίησης των κινδύνων, μεροληπτώντας υπέρ της ασφάλειας των κοινωνιών, ακόμα και αν αυτό σημαίνει σε κάποιες περιπτώσεις αύξηση του οικονομικού κόστους ή καθυστερημένη είσοδο τεχνολογικών καινοτομιών στην κοινωνία και στην αγορά. Αυτός είναι και ο λόγος, ή ένας από τους λόγους, που η αρχή της προφύλαξης δέχεται σημαντική κριτική, καθώς υπάρχουν ισχυρές φωνές που υποστηρίζουν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις δημιουργεί περισσότερα προβλήματα από αυτά που λύνει.

Πώς θα μπορούσε όμως να χρησιμοποιηθεί η αρχή της προφύλαξης στην περίπτωση της πρόβλεψης σεισμών; Υπάρχουν επιστήμονες (βλ. Oreskes 2015) που υποστηρίζουν ότι για την αντισεισμική θωράκιση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται η PSHA αλλά η ντετερμινιστική εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας (Deterministic Seismic Hazard Assessment: DSHA). Στον πυρήνα αυτής της προσέγγισης βρίσκεται η θέση ότι οι κοινωνίες θα πρέπει να προετοιμάζονται όχι απλώς για τον πιο πιθανό μεγάλο σεισμό που μπορεί να συμβεί σε μια περιοχή αλλά για τον μεγαλύτερο δυνατό σεισμό που μπορεί να συμβεί με βάση τις γνώσεις που έχουμε στη διάθεσή μας, ακόμα και αν αυτό το ενδεχόμενο έχει μικρές πιθανότητες. Σε αυτή την περίπτωση, οι πόροι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των υποδομών αυξάνονται σημαντικά, καθώς αυτές θα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι ώστε να αντέχουν σε μεγαλύτερες έως και πολύ μεγαλύτερες δονήσεις από ότι προβλέπει η PSHA. Η επιλογή της DSHA μπορεί να είναι πιο ασφαλής αλλά σίγουρα έχει πολύ μεγάλο κόστος, κάτι που για πολλούς επιστήμονες και πολιτικούς την καθιστά μη ρεαλιστική.

Στο πλαίσιο του παρόντος άρθρου δεν έχουμε σκοπό να προτείνουμε ποια από τις δύο προσεγγίσεις είναι καλύτερη αλλά να δείξουμε ότι οι επιλογές σχετικά με την πρόβλεψη των σεισμών δεν είναι δυνατό να γίνουν αποκλειστικά στο τεχνικό επίπεδο. Υπάρχουν απαντήσεις που πρέπει να δοθούν και στο πολιτικό/κοινωνικό επίπεδο, ειδικά σε μια

σεισμογενή χώρα όπως η Ελλάδα. Το ποιοι είναι οι ειδικοί και ποιοι θα μπορούσαν να συμβάλουν στη διατύπωση των ερωτημάτων που θα απασχολούσαν μια πιο υβριδική επιστήμη, που θα είχε ως σκοπό την καλύτερη λήψη αποφάσεων, είναι ανοικτό ζήτημα. Σε αυτή την κατεύθυνση θα μπορούσαν να βοηθήσουν επιστήμονες από τις κοινωνικές και ανθρωπιστικές επιστήμες με γνώση του τρόπου λειτουργίας της επιστήμης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πρόβλεψη των σεισμών αποτελεί ένα πεδίο διαμάχης για τους επιστήμονες, καθώς δεν υπάρχει συναίνεση σε κανένα από τα βασικά ερωτήματα που υπάρχουν στον κλάδο. Οι επιστήμονες διαφωνούν ως προς το πώς ορίζεται η πρόβλεψη των σεισμών, ποια είναι τα κριτήρια, και η μεθοδολογία ελέγχου της επιτυχίας μιας πρόβλεψης, ποιες είναι οι ερευνητικές στρατηγικές για την πρόβλεψη ενός σεισμού, κ.α. Πέρα από όλα αυτά όμως, η πρόβλεψη των σεισμών και η έλλειψη κοινώς αποδεκτών απαντήσεων από την επιστημονική κοινότητα στα προβλήματα που ανακύπτουν, φαίνεται να θέτει θέματα υπαρξιακής φύσης στη σεισμολογία. Τι σημαίνει για μια φυσική επιστήμη να μην έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης του φυσικού φαινομένου το οποίο μελετά; Ίσως σε αυτό το ερώτημα οφείλεται η χαλάρωση του ορισμού της πρόβλεψης, περιλαμβάνοντας σε αυτήν από τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη έως την πιθανοκρατική εκτίμηση σεισμικού κινδύνου.

Η Oreskes (2004) έχει διατυπώσει την άποψη ότι ένας λόγος για να μελετάμε τις επιστημονικές διαμάχες είναι για να κατανοήσουμε με ποιο τρόπο μπορεί η επιστήμη να συνδράμει τη δημόσια πολιτική. Στην περίπτωση της πρόβλεψης σεισμών υπάρχει πολύ έντονα αυτή η διάσταση, καθώς η συγκεκριμένη επιστημονική περιοχή σχετίζεται άμεσα με τη λήψη αποφάσεων για την προστασία των σύγχρονων κοινωνιών. Τα εργαλεία των Σπουδών Επιστήμης και Τεχνολογίας μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση των θεμάτων επιστημολογικής φύσης που υπάρχουν στη σύγχρονη σεισμολογία, αλλά και να βοηθήσουν τους επιστήμονες και τους δημόσιους αξιωματούχους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που υπάρχουν στην επιστημονική γνώση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. E. BIJKER, R. BAL & R. HENDRIKS: *The Paradox of Scientific Authority. The Role of Scientific Advice in Democracies*. Cambridge/London: MIT Press, 2009.
- [2] M. CARRIER: «Knowledge and Control: On the Bearing of Epistemic Values in Applied Science». Στο: P. Machamer & G. Wolters (επιμ.), *Science, Values, and Objectivity*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2004, 274–293.
- [3] M. CARRIER & A. NORDMANN (επιμ.): *Science in the Context of Application*. Dordrecht/Heidelberg/London/New York: Springer, 2011.
- [4] D. COEN: *The Earthquake Observers: Disaster Science from Lisbon to Richter*. Chicago: University of Chicago Press, 2013.

- [5] G. CLANCEY: *Earthquake Nation: The Cultural Politics of Japanese Seismicity, 1868-1930*. Berkeley/Los Angeles/London: University of California Press, 2006.
- [6] CLANCEY: «Japanese Seismicity and the Limits of Prediction». *The Journal of Asian Studies* 71 (2012), 333–344.
- [7] H. COLLINS & R. EVANS: *Rethinking Expertise*. Chicago: The University of Chicago Press, 2007.
- [8] H. COLLINS, M. WEINEL & R. EVANS: «The politics and policy of the Third Wave: new technologies and society». *Critical Policy Studies* 4 (2010), 185–201.
- [9] A. FRANKEL: «Comment on “Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it” by S. Stein, R. Geller, and M. Liu», *Tectonophysics* 592 (2013), 200–206.
- [10] P. GALISON: *How experiments end*. Chicago: The University of Chicago Press, 1987.
- [11] R. GELLER: «Earthquake prediction: is this debate necessary?». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999α.
- [12] R. GELLER: «Earthquake Prediction: What should we be debating?». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999β.
- [13] R. GELLER: «Without progress no funding». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999γ.
- [14] R. GELLER: «Shake-up time for Japanese seismology». *Nature* 472 (2011), 407–409.
- [15] R. GELLER F. MULARGIA & P. STARK: «Why We Need a New Paradigm of Earthquake Occurrence». Στο: G. Morra, D. A. Yuen, S. D. King, S.-M. Lee & S. Stein (επιμ.), *Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [16] T. C. HANKS, G. C. BEROZA & S. TODA: «Have Recent Earthquakes Exposed Flaws in or Misunderstandings of Probabilistic Seismic Hazard Analysis?». *Seismological Research Letters* 83 (2012), 759–764.
- [17] S. HOUGH: *Predicting The Unpredictable: The Tumultuous Science of Earthquake Prediction*. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2010.
- [18] A. IRWIN: *Citizen Science: A Study of People, Expertise and Sustainable Development*. London: Routledge, 1995.
- [19] D. D. JACKSON: «The status of earthquake prediction». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999.
- [20] S. JASANOFF: *The Fifth Branch: Science Advisers as Policymakers*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.
- [21] S. JASANOFF: «Breaking the Waves in Science Studies: Comment on H. M. Collins and Robert Evans, ‘The Third Wave of Science Studies’». *Social Studies of Science* 33 (2003), 389–400.
- [22] T. H. JORDAN: «Is the study of earthquakes a basic science?». *Seismological Research Letters* 68 (2) (1997), 259–261.
- [23] Y. KAGAN: *Earthquakes: Models, Statistics, Testable Forecasts*. New York: Wiley, 2014.
- [24] L. KNOPOFF: «Earthquake Prediction: The Scientific Challenge». *Proceedings of the National Academy of Science* 93 (1996), 3719–3720.
- [25] T. S. KUHN: *The Structure of Scientific Revolutions*, 4th edition. Chicago: The University of Chicago Press, 2012.
- [26] R. LACASSIN & S. LAVELLE: «The crisis of a paradigm. A methodological interpretation of Tohoku and Fukushima catastrophe», *Earth-Science Reviews* 155 (2016), 49–59.
- [27] I. MAIN: «Is the reliable prediction of individual earthquakes a realistic scientific goal?». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999.
- [28] NATURE: <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999.
- [29] N. ORESKES: «Science and public policy: What’s proof got to do with it?», *Environmental Science & Policy* 7 (2004), 369–383.

- [30] N. ORESKES: «How Earth Science Has Become a Social Science», *Historical Social Research / Historische Sozialforschung* 40 (2) (2015), 246–270.
- [31] S. RAMAN: «Science, uncertainty and the normative question of epistemic governance in policymaking». Στο: E. Cloatre & M. Pickersgill (επιμ.), *Knowledge, technology, and law*, London: Routledge, 2015, 17–32.
- [32] T. SAGIYA, H. KANAMORI, Y. YAGI, M. YAMADA & J. MORI: «Rebuilding seismology». *Nature* 473 (2011), 146–148.
- [33] D. SAREWITZ: «How science makes environmental controversies worse». *Environmental Science & Policy* 7 (2004), 385–403.
- [34] C. SHOLZ: «Whatever happened to earthquake prediction?». *Geotimes* 42 (3) (1997), 16–19.
- [35] N. STEHR & R. GRUNDMANN: *Experts: The Knowledge and Power of Expertise*. London: Routledge, 2011.
- [36] S. STEIN, R. GELLER & M. LIU: «Bad Assumptions or Bad Luck: Why Earthquake Hazard Maps Need Objective Testing». *Seismological Research Letters* 82 (2011), 623–636.
- [37] S. STEIN, R. GELLER & M. LIU: «Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it». *Tectonophysics* 562-563 (2012), 1–25.
- [38] S. UYEDA: «On Earthquake Prediction in Japan». *Proceedings of the Japan Academy B* 89 (2013), 391–400.
- [39] A. WEINBERG: «Science and Trans-Science». *Minerva* 10 (1972), 209–222.
- [40] B. WYNNE: «Uncertainty and environmental learning: reconceiving science and policy in the preventive paradigm». *Global Environmental Change* 2 (1992), 111–127.
- [41] B. WYNNE: «When doubt becomes a weapon». *Nature* 466 (2010), 441–442.
- [42] M. WYSS: «Not yet, but eventually». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999α.
- [43] M. WYSS: «Without funding no progress». *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999β.
- [44] M. WYSS: «More agreement than division», *Nature*, <http://www.nature.com/nature/debates/earthquake> (διαδίκτυακό debate), 1999γ.
- [45] M. WYSS: «Do Probabilistic Seismic Hazard Maps Address the Need of the Population?». Στο: M. Wyss & S. Peppoloni (επιμ.), *Geoethics: Ethical Challenges and Case Studies in Earth Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2015, 239–249.