Εθνικο & Καποδιστριακο Πανεπιστημιο Αθηνων
Σχολη Θετικων Επιστημων
Τμημα Γεωλογιας & Γεωπεριβαλλοντος

National & Kapodistrian University of Athens
School of Sciences
Department of Geology & Geoenvironment

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης
Master Thesis

Επιπτώσεις του Σεισμού του Κατμαντού στο Φυσικό και Δομημένο Περιβάλλον του Νεπάλ
Impact of the Kathmandu earthquake on the natural and built environment of Nepal

ΙΕΡΩΝΥΜΑΚΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ/ VASILEIOS IERONYMAKIS
A.M. / R.N. : 14028

Ειδικές Εκδόσεις / SpecialPublications:	No.

Αθήνα, Ιούνιος 2020
Athens, June 2020

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

NATIONAL & KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOLOGY & GEOENVIRONMENT

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ & ΚΡΙΣΕΩΝ

POST GRADUATE PROGRAM
ENVIRONMENTAL, DISASTER & CRISES MANAGEMENT STRATEGIES

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης
Master Thesis

Επιπτώσεις του Σεισμού του Κατμαντού στο Φυσικό και Δομημένο Περιβάλλον του Νεπάλ
Impact of the Kathmandu earthquake on the natural and built environment of Nepal

ΙΕΡΩΝΥΜΑΚΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ/ VASILEIOS IERONYMAKIS
A.M. / R.N. : 14028

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Ε. Λέκκας,
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Δρ. Βούλγαρης Νικόλαος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Δρ. Καβύρης Γεώργιος,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Εξειδικευμένη Επιστημονική Καθοδήγηση:

Δρ.Σκούρτσος Εμμανουήλ,
Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Σ. Μαυρούλης,
MSc Γεωλόγος,Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΚΠΑ

Αθήνα, Ιούνιος 2020
Athens, June 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Στρατηγικές Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων» του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος της σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου .

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση της.

Πρώτο από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Ευθύμιο Λέκκα για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Σκούρτσο Εμμανουήλ ο οποίος με την υπομονή και το ήθος του συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τις αμέριστες ευχαριστίες μου εκφράζω στον MSc γεωλόγο και υποψήφιο διδάκτορα Μαυρούλη Σπυρίδωνα για την υπέρμετρη βοήθεια του, τις συμβουλές του και την ειδικευμένη του γνώση του καθώς και την διδακτική υπομονή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στους Καθηγητές Βούλγαρη Νικόλαο και Καβύρη Γεώργιο για την αποδοχή τους ως τριμελής εξεταστική επιτροπή .

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Αγγλικών και εγκάρδιο φίλο μου Οικονομόπουλο Ιωάννη για την τεράστια και σημαντική βοήθεια του στην μετάφραση των ξενόγλωσσων κειμένων και πηγών της διπλωματικής εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αποτυπώνονται οι επιπτώσεις σε φυσικό και δομημένο περιβάλλον του σεισμικού γεγονότος στις 25 Απριλίου του 2015 της Gorkha μεγέθους 7.8W στην περιοχή του Κατμαντού στο Νεπάλ. Συγκεκριμένα η απεικόνιση αρχίζει με την αποτύπωση της γεωγραφικής και γεωλογικής δομής της οροσειράς και του υπόβαθρου των Ιμαλάϊων, των πετρωμάτων και των δομών της ακολουθίας της Τηθύος και της γενικής φυσιογραφίας του Νεπάλ. Συνεχίζοντας γίνεται ανάλυση των γεωλογικών δομών και της γεωγραφίας της ευρύτερης περιοχής του Κατμαντού, ιστορική αναδρομή στην σεισμικότητα της περιοχής καθώς και ευρύτερη ανάλυση της γενικής σεισμικότητας της. Έπειτα, γίνεται λεπτομερής περιγραφή του κυρίως σεισμικού γεγονότος, η οποία ακολουθείται από την ανάλυση των επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής του Κατμαντού, όπου γίνεται περιγραφή των επιπτώσεων του σεισμού στα εδαφικά πρανή, των εδαφικών αποκρίσεων, εδαφικών αστοχιών και φαινομένων κατολίσθησης, εδαφικών ροών και ρευστοποίησης. Τέλος περιγράφονται οι επιπτώσεις του σεισμού στο δομημένο περιβάλλον , η μακροσεισμική κλίμακα EMS-98, η τρωτότητα της περιοχής και οι βλάβες στις κτιριακές κατασκευές καθώς και στα μνημεία. Επιπροσθέτως, δίνονται παραδείγματα εφαρμογής της κλίμακας EMS-98 σε διάφορους τύπους κτιριακών κατασκευών που υπέστησαν βλάβες κατά το κυρίως σεισμικό γεγονός.

ABSTRACT

The present study reflects the effects on the natural and structured environment of the 7.8W Gorkha earthquake on April 25, 2015 in the Kathmandu area of Nepal. In particular, the depiction begins with the imprint of the geographical and geological structure of the mountain range and the background of the Himalayas, the rocks and structures of the Tethys sequence and the general physiology of Nepal. Continuing, an analysis is made of the geological structures and geography of the wider area of Kathmandu, a historical review of the seismicity of the area as well as a broader analysis of its general seismicity. Then, a detailed description of the main seismic event is given, which is followed by the analysis of the effects on the natural environment of the Kathmandu region, which describes the effects of the earthquake on terrestrial slopes, soil responses, soil failures, landslides, avalanches, rockfalls, debris and liquefaction. Finally, the effects of the earthquake on the structured environment, the macroseismic scale EMS-98, the vulnerability of the area and the damage to the building structures as well as the monuments are described. In addition, examples of the application of the EMS-98 scale are given in various types of building constructions that were damaged during the main seismic event.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ 8

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΔΟΜΗ ΤΩΝ ΙΜΑΛΑΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΤΟΥ ΝΕΠΑΛ 9

2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί των Ιμαλαΐων 9

2.1.1 Το Οροπέδιο του Θιβέτ 9

2.1.2 Οφιολιθική ζώνη ραφής Indus Changpo 12

2.1.3 Η Οροσειρά των Ιμαλαΐων 12

2.1.4 Η λεκάνη Ganga -Κοιλάδα εμπροσθοτόξου 13

2.1.5 Υπόγεια δομή της Λεκάνης Γκάνγκα 14

2.1.6 Ασταθείς κοίτες ποταμών 17

2.2 Η Φυσιογραφία του Νεπάλ 19

2.2.1 Τεράι 21

2.2.2 Άνω Τεράι ή Ζώνη Μπαμπάρ 21

2.2.3 Μέσον Τεράι ή Ελώδης γη 22

2.2.4 Κάτω Τεράι ή Αλλουβιακό πεδίο του Γάγγη 23

2.2.5 Οι κοιλάδες Siwaliks και Dunn 23

2.2.6 Οροσειρά Μαχαμπαράτ 25

2.2.7 Midlands (κεντρικό Νεπάλ) 26

2.2.8 Μετωπικά Ιμαλάια 28

2.2.9 Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων 28

2.2.10 Οι κοιλάδες των Έσω Ιμαλαΐων 29

2.2.11 Περιφερειακές οροσειρές του Θιβέτ 30

2.3 Τιθυς Ιμαλάια 30

2.3.1 Η ακολουθία της Τιθύος των Ιμαλαΐων 30

2.3.2 Κύρια χαρακτηριστικά της ακολουθίας της Τιθύος των Ιμαλαΐων 30

3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΜΑΝΤΟΥ 32

3.1 Γενική γεωλογία της λεκάνης του Κατμαντού. 32

3.2 Η λεκάνη απόθεσης του Κατμαντού 36

3.3 Το παλαιοκλίμα της κοιλάδας του Κατμαντού 43

4 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ 43

4.1 Γενικές Σεισμολογικές πληροφορίες και καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις 43

4.2 Ιστορικοί και πρόσφατοι σεισμοί 44

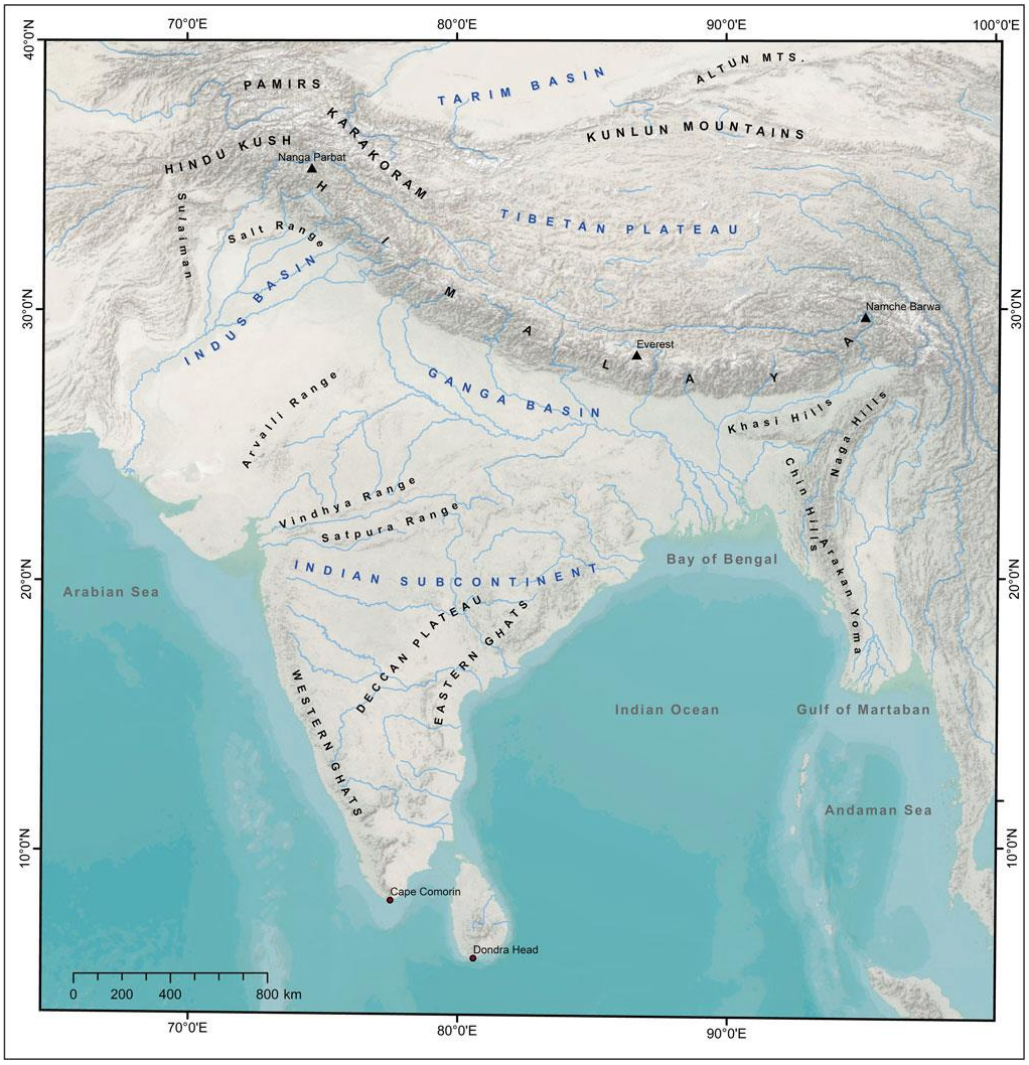
4.3 Ο σεισμός μεγέθους 7,8 του Νεπάλ στις 25 Απριλίου 2015. 46

4.4 Προσεισμοί 48
5 ΤΟ ΚΥΡΙΩΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΓΕΓΟΝΟΣ 50
5.1 Ο κύριος σεισμός μεγέθους 7,8 στις 25 Απριλίου 2015 50
5.2 Μετασεισμικές ακολουθίες 52
5.3 Δεδομένα ισχυρής εδαφικής κίνησης 53
5.4 Η ρηξιγενής ζώνη διάρρηξης 61
6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ 62
6.1 Περιγραφή της κλίμακας ESI 2007 62
6.2 Η Εδαφική απόκριση της περιοχής του Κατμαντου κατά την διαρκεια του σεισμικου γεγονοτος.. 65
6.2.1 Κινήσεις εδάφους και επιπτώσεις στα εδαφικά τοπία στην περιοχή του Νεπάλ: Ιστορικά στοιχεία. 65
6.2.2 Οι επιπτώσεις των εδαφικών κινήσεων 67
6.2.3 Οι επιπτώσεις στη λεκάνη απορροής 75
6.2.4 Επιπτώσεις στα περιθώρια της λεκάνης απορροής. 77
6.2.5 Τοπογραφικές επιπτώσεις 79
6.3 Επιπτώσεις του σεισμού στα πρανή της πληγείσας περιοχής 83
6.3.1 Σταθερότητα πρανών και κατολισθήσεις. 83
6.3.2 Ζημιές κατά μήκος της Εθνικής Οδού Prithvi. 85
6.3.3 Η Εθνική Οδός Araniko. 88
6.3.4 Ο αυτοκινητόδρομος Lamosangu – Mantali. 93
6.3.5 Η οδός πρόσβασης προς τα έργα υδροδότησης του Melamchi. 94
6.3.6 Περιοχή Ramkot, κοιλάδα του Κατμαντού. 96
6.3.7 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – LamaBagar. 97
6.3.8 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – Duipipal – Tupche – Dhunche – LangtangKhola – Syaprubesi – Rasuwagadi 106
6.3.9 Δεβριτική κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας της περιοχής Langtang. 120
6.3.10 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – Dhawa – Baluwa – Barpak. 126
6.3.11 Παρατήρηση από αέρος της περιοχής Κατμαντού – Kalyanpani – Arughat – Besisahar – Manang – Prok. 128
6.3.12 Κατολισθητικό φράγμα της περιοχής Pandise. 132
6.3.13 Κατολίσθηση της περιοχής του ποταμού Kali Gandaki. 133
6.3.14 Ρευστοποίηση και κυκλικές εδαφικές αστοχίες. 134
6.3.15 Η τεταρτογενής γεωμορφική τοποθέτηση της κοιλάδας του Κατμαντού. 135
6.3.16 Παρατηρήσεις εδαφικών αστοχιών. 136
6.3.17 Η Περιοχή Ράμκοτ. 137

6.3.18 Η γέφυρα Singa Durbar. 139
6.3.19 Η τοποθεσία Manamaiju. 139
6.3.20 Η περιοχή Guheshwori. 141
6.3.21 Η περιοχή Lokanthali. 142
6.3.22 Η περιοχή Syuchatar. 147
6.3.23 Περιοχή Bungamati. 147
6.3.24 Η περιοχή ChanguNarayan. 148
6.3.25 Η περιοχή Mulpani. 149
6.3.26 Περιοχή Gwarko / Imado. 150
6.3.27 Περιοχή Hattiban. 150
6.3.28 Περιοχές Kamal Vinayak και Bhaktapur 152
6.3.29 Περιοχές Nagarjun και Syunchatar. 154
6.3.30 Η Πλευρική εξάπλωση στο φράγμα της παγετώδους λίμνης του Tsho Lorpa , σε υψόμετρο 4,535μ. 157
7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ 161
7.1 Η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα EMS-98. 161
7.2 Προβλήματα υπολογισμού της έντασης από ιστορικές καταγραφές 163
7.3 Ιστορικά δεδομένα και δεδομένα από έγγραφα 163
7.4 Τύποι κατασκευών και τάξεις τρωτότητας σε ιστορικές αναφορές 164
7.5 Συνολικοί αριθμοί κτιρίων 164
7.6 Βλάβες σε μνημεία 165
7.7 Ένταση και σεισμική ακολουθία 165
7.8 Τρωτότητα και μετασεισμική ακολουθία 165
7.9 Βλάβες και ένταση 166
7.10 Εκτίμηση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων 166
7.11 Εφαρμογή της κλίμακας EMS-98 στις κατασκευές που υπέστησαν βλάβες εξαιτίας του σεισμικού γεγονότος του Κατμαντού 167
7.11.1 Τύποι δομών 168
7.11.2 Απόδοση τιμών έντασης 171
7.11.3 Απόδοση έντασης από απόσταση 172
7.11.4 Παράδειγμα διαδικασίας απόδοσης εντάσεως 172
7.11.5 Ανάλυση και αποτελέσματα 178
7.11.6 Περιορισμοί 181
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 183

1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Η εμφανής ηπειρωτική κλιμάκωση επί της γης, τα Ιμαλάια, βρίσκονται στο νότιο άκρο του υπερυψωμένου Οροπεδίου του Θιβέτ. Τα εκτεταμένα αλλουβιακά πεδία των ποταμών Ινδού, Γάγγη, και Βραχμαπούτρα οριοθετούν την συγκεκριμένη οροσειρά από τον νότο. Μαζί με τα όρη Καρακοράμ, τα οποία συνορεύουν με τα Ιμαλάια στα βορειοδυτικά, αυτή η ορογενετική ζώνη συναντά και συμφύεται με τα Παμιρς, απ' όπου αποκλίνουν ορισμένες άλλες Ασιατικές οροσειρές (Εικ. 1 και 2) Η οροσειρά Ιμαλάια απότομα συναντά μια εντυπωσιακή ομοιόμορφα στοιχισμένη καμπύλη γύρω από το όρος Νανγκα Παρμπάτ (8125μ) στο βορειοδυτικό του άκρο, απ' όπου οι οροσειρές Χιντου Κους, Σουλαϊμάν και Κιρθάρ συνεχίζουν προς τα νότια ή νοτιοδυτικά. Υπάρχει μια ακόμα παρόμοια οξεία ομοιόμορφα στοιχισμένη στροφή γύρω από το όρος Νάμτσε Βάργα (7756μ) στο νοτιοανατολικό άκρο των Ιμαλαΐων, από όπου τα όρη Αρακάν στρίβουν προς τα νότια ή νοτιοδυτικά.



Εικόνα 1: Απεικόνηση σε Χάρτη του Θιβετιανού Οροπεδιού, της Υπο-ηπείρου της Ινδίας , των Ημαλαίων και των γειτονικών Οροσειρών. (Megh Raj Dhital σελ 2).

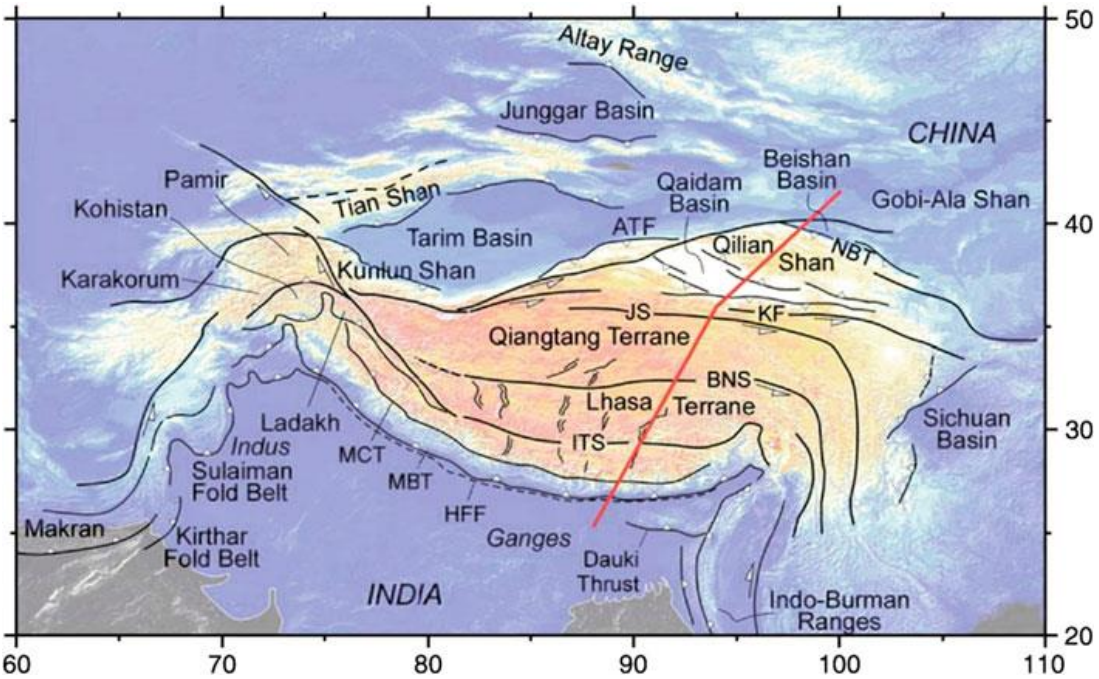
Οι 3 μεγάλοι προηγούμενοι ποταμοί, Ινδός, Γάγγης και Βραχμαπούτρας παρατηρούν την εξέλιξη των Ιμαλαΐων, την έγερση από την εποχή της εμβρυακής τους ανάπτυξης περίπου 50 Ma (Pariat and Achache 1984). Ο Βραχμαπούτρας και ο Γάγγης αγκαλιάζουν αυτήν την μεγαλοπρεπή οροσειρά από τον βορά και τον νότο, αντίστοιχα, και κάνουν μια στροφή χιλιάδων χιλιομέτρων πριν τελικά συμβάλλουν και εκβάλουν στον Κόλπο της Βεγγάλης. Αν και όπως ο Βραχμαπούτρας έτσι και ο Ινδός επίσης συλλέγει τα νερά του από τα περιβάλλοντα δύο λιμνών, Μανασαροβάρ και Ρακάς, αμφότερες στο Θιβέτ, ρέει κατ' αρχάς προς την αντίθετη κατεύθυνση (δηλ. προς δυσμάς) και κατόπιν πλησιάζει τους παραποτάμους του Γάγγη, σε πολύ μικρή απόσταση στα νεκρά επίπεδα των κοινών αλλουβιακών πεδιών, και απότομα αποβάλλει τα νερά και ιζήματά του στην Θάλασσα της Αραβίας κοντά στον Κόλπο του Ομάν.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΔΟΜΗ ΤΩΝ ΙΜΑΛΑΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΤΟΥ ΝΕΠΑΛ

2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί των Ιμαλαΐων

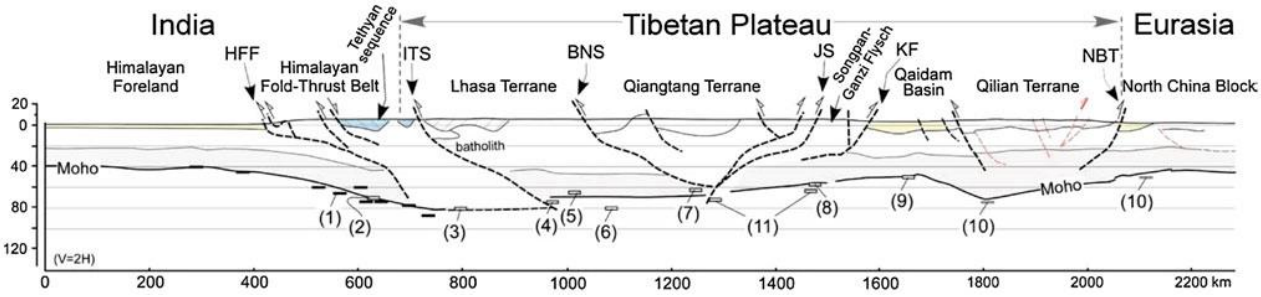
2.1.1 Το Οροπέδιο του Θιβέτ

Το Οροπέδιο του Θιβέτ με τα Ιμαλάια και τις γειτονικές οροσειρές συνιστά το ευρύτερο και υψηλότερο ορογενετικό σύστημα στην γη. Οι αλλαγές στον ορογένεση του και το κλίμα της γης είναι στενά συνδεδεμένα με το συγκρουσιακό του γεγονός (Rowley 1996). Οι νότιες κλιτύες των Ιμαλαΐων χαρακτηρίζονται από έντονη μορφής πράσινη βλάστηση, όμως, το οροπέδιο (εικ. 2) είναι βασικά μια αχανής κρύα έρημος (περίπου 2.5 εκατομ. Τετ.χιλιομ) και υψόμετρο ποικίλλον από 4000μ. στις 5000μ. Το οροπέδιο έφθασε το ύψος του ως αποτέλεσμα της κάτωθεν ώθησης της Ινδικής πλάκας κάτω από την Ασία (Argand 1924).



Εικονα 2: Τεκτονικός χάρτης του Θιβετιανού οροπεδίου και των γύρω περιοχών. Οι χρωματικές αποχρώσεις δείχνουν τεκτονική ανύψωση. Η κόκκινη γραμμή δείχνει τη θέση του προφίλ που περιγράφεται στην εικόνα 3 (Megh Raj Dhital σελ 14) .

Το Θιβέτ δεν είναι ένα απλά «υψηλό οροπέδιο» ούτε απλά μια «διάμεση μάζα», αλλά μία έντονα ορεινή χώρα με αρκετές ζώνες κατευθυνόμενες ανατολικά-δυτικά (Stoklin 1980). Το πάχος του φλοιού του υπερβαίνει τα 70 χιλιόμετρα (Εικ.3) διάσταση η οποία είναι διπλάσια από το φυσιολογικό πάχος του ηπειρωτικού φλοιού. Εκτιμάται ο κατώτερος Ινδικός φλοιός βρίσκεται κάτω από το Θιβέτ. Σε αυτή τη διαδικασία ο κατώτερος φλοιός υπέστη πολλαπλό τεμαχισμό και στοίβαξη τα οποία οδήγησαν στο ανώμαλο πάχος του φλοιού του Θιβέτ ενώ ο αποσυνδεδεμένος ανώτερος ινδικός φλοιός ωθήθηκε προς το νότο, σχηματίζοντας τα Ιμαλάια. Το οροπέδιο του Θιβέτ διαμορφώνεται από ένα αριθμό μικρό-ηπείρων, στρώματα με σχηματισμό φλύσχη (flysch) και νησιωτικά τόξα. Αυτές οι μικρότερες και νεώτερες λιθοσφαιρικές πλάκες θραύσθηκαν βαθμιαία κάτω από την αρχαία μεγάλη ινδική πλάκα και μετακινήθηκαν προς την Ασία. Σε αυτή τη διαδικασία, οι μικρό-ήπειροι διαδοχικά συγκρούστηκαν με την Ευρασιατική πλάκα και βυθίσθηκαν κάτω της, από την περίοδο του Παλαιοζωικού (Chang and Cheng 1973, σ. 264). Τα πλέον σημαντικά πεδία από αυτά είναι τα, Qilian Shan, ανατολική Kunlun-Qaidam, Songpan-Ganzi, Qiangtang, Λάσα, κατανεμημένα από βορρά προς νότο αντίστοιχα. (Εικ 3).



Εικόνα 3: Η Δομή του ηπειρωτικού φλοιου κατά μήκος του προφίλ που προκύπτει από γεωλογικά και γεωφυσικά δεδομένα. Οι οριζόντιες ράβδοι στο σχήμα απεικονίζουν το βάθος της Moho (Megh Raj Dhital σελ 14).

Το πλέον βόρειο πεδίο Qilian Shan αποτελείται από συνδυαστικά αποσχηματισμένα Παλαιοζωικά τόξα, τα οποία σχηματίστηκαν στο νότιο περιθώριο του μπλοκ της Βόρειας Κίνας και ακολούθως ωθήθηκαν από το μεγάλο ρήγμα του Altyn-Tagh στην Καινοζωική (Yin and Harrison 2000).

Το ανατολικό πεδίο Kunlun-Qaidam ενώνεται προς τον βορά με το νότιο άκρο του Qilian και στον νότο από την πλευρά του Anyiamaqen-Kiunlun-Muztagh.

Αποτελείται από τον βαθόλιθο του Kunlun των Μεσο – Νέο Προτεροζωικών γνευσιτών, σχιστολίδων και μαρμάρου οι οποίοι καλύπτονται από από Νεοπροτεροζωικά στρώματα και Cambrian to Ordovician ανθρακικά άλατα (Yin and Harrison 2000)

Το τριγωνικό πεδίο Spongpan-Ganzi βρίσκεται βόρεια της ρηξιγενής πλευράς και νότια του Anyimaqen-Kunlun-Mustagh.

Η επιφάνεια βρίσκεται μεταξύ της ανατολικής επιφάνειας του Kunlun-Gaideam προς τον βορά καιτ ης επιφάνειας Giangtang προς τον νότο. Κυρίως αποτελείται από μια παχιά, βαθιά θαλάσσια ακολουθία του Τριαδικού, γενικώς ονομαζομένη και φλύσχης Song Pang Ganzi η οποία κατανέμεται σε μια πολύ πλατύτερη περιοχή από αυτήν του πεδίου Song Pang Ganzi (Dewey et al 1988, Yin and Harrisson 2000).

Το πεδίο Qiantang οριοθετείται από βόρεια από την επαφή της οφιολιθικής ζώνης ραφής και νότια από την επαφή Banggong-Nujiang αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα – εκλογίτες και γαλοζοσχιστόλιθους του Νεώτερου Τριασικού.

Αυτά τα πετρώματα χωρίζονται από την υπερκείμενη αλληλουχία ιζηματογενών πετρωμάτων Παλαιοζωικού-Μεσοζωικού από μικρής κλίσης κανονικά ρήγματα. Τα πετρώματα του Παλαιοζωικού περιέχουν μια ακολουθία από Τιλλίτες όπως τα Ταλχιρς της λιθοσφαιρικής πλάκας της Ινδίας, καθώς και ασβεστόλιθου της Πέρμιας Περιόδου οι οποίοι εναλλάσσονται με ηφαιστειακά πετρώματα όπου τα πετρώματα του Τριασικού αποτελοπυνται από αλληλοδιαστρωμένους καρμπονατίτες με πυροκλαστικά και ηφαιστειακά πετρώματα.

Η ακολουθία του Ιουρασικού αποτίθεται ανομοιόμορφα στην τελευταία ακολουθία και αποτελείται από ηφαιστειακά πετρώματα και ασβεστόλιθους. (Dewey et al 1988, Yin and Harrisson 2000, Mascle et al 2012).

Το πεδίο της Λάσας είναι η νοτιότατη μικρό-ήπειρος της οποίας τα βόρεια σύνορα αντιστοιχούν με την τεκτονική επαφή Banggong-Nujiang και τα νότια σύνορα με την τεκτονική επαφή Hindus Tsangpo.

Το πεδίο της Λάσα αποτελείται κυρίως από ρηχές θαλάσσιες κλαστικές αποθέσεις του Ορδοβισιου και Λιθανθρακοφόρου με Τριασικού, με βασικό υπόβαθρο απόθεσης στο μεσοπρωτεροζωικό προς νεοκάμβριο. (Yin and Harrisson 2000 σελ. 2018).

Τα στρώματα της περμιας περιόδου περιέχουν στρώσεις από μερικές στρώσεις στυλίτη παρόμοια με αυτά των Ταλχιρς άρα το πεδίο της Λάσα απομακρύνθηκε με ολίσθηση από το νότιο μέρος της Godwana κατά το τριασικό και συγκρούεται με το νότιο περιθώριο του πεδίου του Qiangtang μεταξύ των εποχών κάτω Ιουρασικού και μέσου κρητιδικού (Dewey et al 1988).

Οι βαθόλιθοι του κρητιδικού προς τεταρτογενούς Gangdese, διεισδύουν στα πετρώματα του πεδίου της Λασα και αποτελούν το νότιο περιθώριο, το οποίο σχετίζεται με την βόρεια υποβύθιση της πλάκας της Ινδίας (Cjhang and Cheng 1973).

2.1.2 Οφιολιθική ζώνη ραφής Indus Changpo

Η ρηξιγενής ζώνη Indus Changpo ή Yarlung Zangbo είναι το βόρειο τεκτονικό όριο μεταξύ των Ιμαλαΐων (Ινδική πλάκα) και του Οροπεδίου του Θηβέτ (Lhasa terrane). Το όριο γενικά ορίζεται από μια τοπογραφική σύνθλιψη κατά μήκος της οποίας ρέουν οι ποταμοί Ινδός και Zamngbo προς αντίθετες κατευθύνσεις (Heim and Ganser 1939).

Η ζώνη Indus Changpo είναι μια στενή ζώνη, στενότερη των 15 χλμ, από ωκεάνια πετρώματα (οφιόλιθοι) αποτελούμενα από παρασυρμένα υπολείμματα του ωκεανού της Τιθύος (Ding et al 2005).

Η οφιολιθική ζώνη ραφής αποτελείται από σχεδόν κατακόρυφους τεκτονικούς σχηματισμούς οι οποίοι δέχονται έντονη αποσάθρωση και αποκόπτονται (Diener 1895, 1898, von Kraft 1902, Heim and Gansser 1939).

Σε λίγα σημεία αυτά τα πετρώματα επωθούνται πάνω από την νότια Τηθυακή ακολουθία.

Η οφιολιθική ζώνη ραφής είναι μάλλον μια ασυνεχής ζώνη αποτελούμενη από πρανή από απότομους σχηματισμούς φλύσχη ασβεστολίθων του περμιου, πελαγικών ασβεστόλιθων του νεότερου τριασικού, στρώσεις από σερπεντινίτη, πηλιτικοί ασβεστικοί σχίστες κατώτερου κρητιδικού και μαξιλαροειδείς συμπαγείς αλκαλικές βασαλτικές αποθέσεις λάβας.

Αυτή η ζώνη περιέχει οφιολιθους σαν λεπτά φύλλα και αποκομμένες μάζες ραδιολαρίτες με βασικής σύστασης λάβα και κάποιους κυανοσχιστόλιθους, καταγράφοντας πίεση περίπου 1 Gpa και η θερμοκρασία τους κυμαίνεται από 350-450 β. κελσίου. (Mascle et. Al. 2012) Μαζί με το κεντρικό τμήμα της οφιολιθικής ζώνης ιζήματα του μεσοζωικού των Ιμαλαΐων της τιθύος μεταμορφώθηκαν. Υπάρχουν μετα-,μεταμορφικές διεισδύσεις ευθυγραμμισμένες νότια της οφιολιθικής ζώνης (Ganser 1977). Στα νότια της κοιλάδας του Kailas ο μεταμορφωμένος φλύσχης εναποτίθεται στα μη μεταμορφωμένα και σχεδόν κροκαλοπαγή της Kailas μαζι με την Μεγάλη Απώθηση (Heim and Ganser 1939 σελ 188).

Η γεωμετρία του σχηματισμού της οφιολιθικής ζώνης Hindus – Tsasngpo προήλθε από την παρακάτω αλληλουχία γεγονότων:

1. Καλύμματα
2. Πτύχωση
3. Αναδιπλωμένη Πτύχωση (Burg 1992, σελ. 42).

2.1.3 Η Οροσειρά των Ιμαλαΐων

Η ζώνη των Ιμαλαΐων που έχει μήκος 2400 χιλιόμετρα και πλάτος από 250 έως 400 χιλιόμετρα καταλαμβάνει μια περιοχή περίπου 600000 τετρ. Χιλιόμετρα. Κείται μεταξύ των 75 και 90 μοιρών γεωγραφικού μήκους και μεταξύ 27 και 35 μοιρών γεωγραφικού πλάτους. Τα Ιμαλάια συχνά ξεπερνά το επίπεδο περιφέρειας 6000μ. και σε 14 κορυφές ξεπερνά τα 8000μ. 11 από αυτές βρίσκονται σε αυτή την οροσειρά και οι υπολειπόμενες 3 ανήκουν επίσης στα γειτονικά όρη Καρακοράμ.

Πολλές από αυτές τις κορυφές συγκεντρώνονται προς το κέντρο της οροσειράς από όπου το ύψος της κορυφογραμμής βαθμιαία ελαττώνεται προς τα ανατολικά και τα δυτικά (Mingtao 1982 σελ. 10) Αλλά αυτή η ελάττωση σταματά απότομα από δύο ογκώδεις περιθωριακές κορυφές. Νάνγκα Παρβάτ η οποία οριοθετεί το άκρο των δυτικών Ιμαλαΐων όπου ο Ινδός ποταμός στραγγίζει τα νερά του και την κορυφή Νάμτσε Μπάρβα η στέκεται στο άκρο όπου ρέει ο ποταμός Βραχμαπούτρας στους πρόποδες της και δημιουργεί πολλά φαράγγια

και μαιάνδρους. Προς τα νοτιοανατολικά, η χιονισμένη κορυφογραμμή των Ιμαλαΐων βρίσκεται σε απόσταση περίπου 100 χιλιομέτρων από τις αλλουβιακές αποθέσεις και αυτή η απόσταση αυξάνει βαθμιαία προς τα ΒΔ και φθάνει περίπου τα 150 χλμ. Η τοπογραφία των Ιμαλαΐων παρουσιάζει χαρακτηριστικά η οποία δεν ειναι συγκρίσιμη.

Μια ανάλυση της τραχύτητας ατού του τοπίου δείχνει σημάδια πολυτεμαχισμού ως αποτέλεσμα των πολλών εσωτερικών διαδικασιών οι οποίες διαμορφώνουν το τοπίο (Rodriguez, Iturbeand Rinaldo 2001, σελ 233).

Η οροσειρά των Ιμαλαΐων παρουσιάζει ένα τέλειο, κατευθυνόμενο προς νότο κυρτό τοξοειδές εξόγκωμα (Heim and Ganser 1939, σ. 1) με ακτίνα περίπου 1500 χιλιομέτρων και το κέντρο περίπου στις 90 μοίρες ανατολικού μήκους και 42 μοίρες βορείου πλάτους. Οι τωρινές τους γιρλαντοειδείς καμπύλες, είναι ακριβώς το αντίθετο από αυτές των Άλπεων με τις οποίες συνδέεται μέσω των μεταβατικών οροσειρών του Ιράν και του Χινδου Κους. Συγκρινόμενη με όλες τις άλλες ορεινές ζώνες οι οποίες προέρχονται από υποβύθιση ή σύγκρουση, τα Ιμαλάια με τις σχετικές τους οροσειρές είναι μοναδικά στο γεγονός ότι βρίσκονται στο υποβυθιζόμενο τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας (Argand1924) Το τόξο των Ιμαλαΐων συγκρίνεται με ένα νησιωτικό τόξο, αλλά βρίσκεται στην ξηρά και είναι συνδεδεμένο με τα άλλα τόξα μεταξύ της Ινδονησίας στα νοτιοανατολικά και της Μεσογείου στα Βορειδυτικά.

Είναι παράδοξο ο λόγος για τον οποίο το τόξο των Ιμαλαΐων πρέπει να προέρχεται απλά από υπο-ώθηση , το μέγεθος και η ακτίνα τους συγκρίνονται με αυτές των νησιωτικών τόξων και είναι μέρος της αλυσίδας των νησιωτικών τόξων (Olier and Pain 2000 σ.131).

Τα Ιμαλάια. Αυτός ο νεαρός και ανήσυχος γίγαντας, (Valdiya 1998) στέκεται ρωμαλέα μεταξύ του πεδίου της Λάσα προς τον βορά και του υποβάθρου της Ινδίας προς τον νότο.

Το βόρειο τμήμα της ινδικής ασπίδας με μερικές ηπειρωτικές αποθέσεις της Godwana σχηματίζουν το νότιο όριο του Ωκεανού της Τηθύος.

Η ορογένεση των Ιμαλαΐων περιέλαβε και τα τρία στοιχεία , δηλαδή, τα ιζήματα της Τιθύος, της ασπίδας της Ινδίας και της Gondwana.

Μετά την σύγκρουση, μαζί με την οφιολιθική ζώνη του Ινδού – Γάγγη, η τεκτονική δραστηριότητα μερικώς μεταφέρθηκε προς τα νότια. Το ακόλουθο μεγάλο γεγονός ήταν ο σχηματισμός της Κύριας Κεντρικής Ώθησης, μια βαθειά ρηξιγενής ζώνη μεταξύ των λιθοσφαιρικών πλακών στα Ιμαλάια.

Το επόμενο μεγάλο γεγονός συνέβη ακόμα νοτιότερα όπου τα μετωπικά ρήγματα αναπτύχθηκαν αντιστοίχως στα κατώτερα Ιμαλάια και αντιπροσωπεύουν ένα χαρακτηριστικό αβαθές ρηξιγενές επίπεδο.

Όπως συμβαίνει και με πολλές άλλες ορεινές ζώνες τα Ιμαλάια παρουσιάζουν μια ορογενετική ακολουθία από την βαθύτερη έσω ζώνη προς την ρηχότερη έξω ζώνη (Ganser 1977).

Συνεπώς η ορογένεση των Ιμαλαΐων έχει εξελιχθεί από έναν έντονο ηπειρωτικό αποσχηματισμό (κατακερματισμό) ο οποίος οδήγησε σε μια ελάττωση του μήκους του φλοιού και σε μία αύξηση του πάχους του φλοιού, μεγάλης κλίμακας ώθηση και πτύχωση, μεταμόρφωση κατά τη διάρκεια πολλών φάσεων, ανάταξη, γρανιτική διείσδυση, αφανή επεισόδια εκταφής, ανύψωσης και διάβρωσης μικρής διάρκειας.

2.1.4 Η λεκάνη Ganga -Κοιλάδα εμπροσθοτόξου

Τα τεράστια αλλουβιακά πεδία της Ganga εκτείνονται μεταξύ των μεγάλων Ιμαλαΐων στα βόρεια και των αρχαίων πλατό της Ινδίας προς τον νότο.

Ο Oldham (1983. Selñidew 432, 434) περιέγραψε μια δειγματοληπτική γεώτρηση στο Lucnow, στη Λεκάνη του Γκάνγκα, σε βάθος 407μ. ή περίπου 300μ. χαμηλότερα από το επίπεδο της θάλασσας, διαπέρασε τα αλλουβιακά πεδία με εναλλαγές άμμου και αμμώδους ιλύος με περιστασιακά στρώματα ασβεστιτικών πετρωμάτων χωρίς να φθάσει στο υπόβαθρο. Μια παρόμοια γεώτρηση στην Καλκούτα μεταξύ των ετών 1835 και 1840 σε βάθος 140μ. χαμηλότερα από το επίπεδο της θάλασσας, επίσης πέρασε μέσω των αλλουβιακών αποθέσεων χωρίς να φθάσει το υπόβαθρο.

Βάσει ακρομαγνητικών και βαρυτικών μελετών ο Σεν Γκούπτα (1964) ανακάλυψε ότι οι Bouger και ισοστατικές ανωμαλίες ήταν πολύ αρνητικές επί των πεδίων της Γκάνγκα, αλλά εξελίχθηκαν πολύ θετικές στις υψηλές (5000μ.) κορυφές των Ιμαλαΐων. Ανακάλυψε ότι το βάθος των υπογείων στρωμάτων των αλλουβιακών πεδίων ποικίλει από περίπου 1500μ. κοντά στο βόρειο άκρο της ασπίδας της πλάκας της Ινδίας έως περίπου 9000μ. κοντά στους πρόποδες των Ιμαλαΐων. Σεισμικές έρευνες αποκάλυψαν μια ανομοιομορφία η οποία χαρακτηρίζει τη βάση των Τριτογενών και υποκειμένων ασβεστολίθων σε βάθος 1800μ. κοντά στο Bareli.

Θετικές ανωμαλίες επίσης καταγράφηκαν στα νότια των πεδίων της Γκάνγκα, στο βόρειο μέρος της πλάκας της Ινδίας.

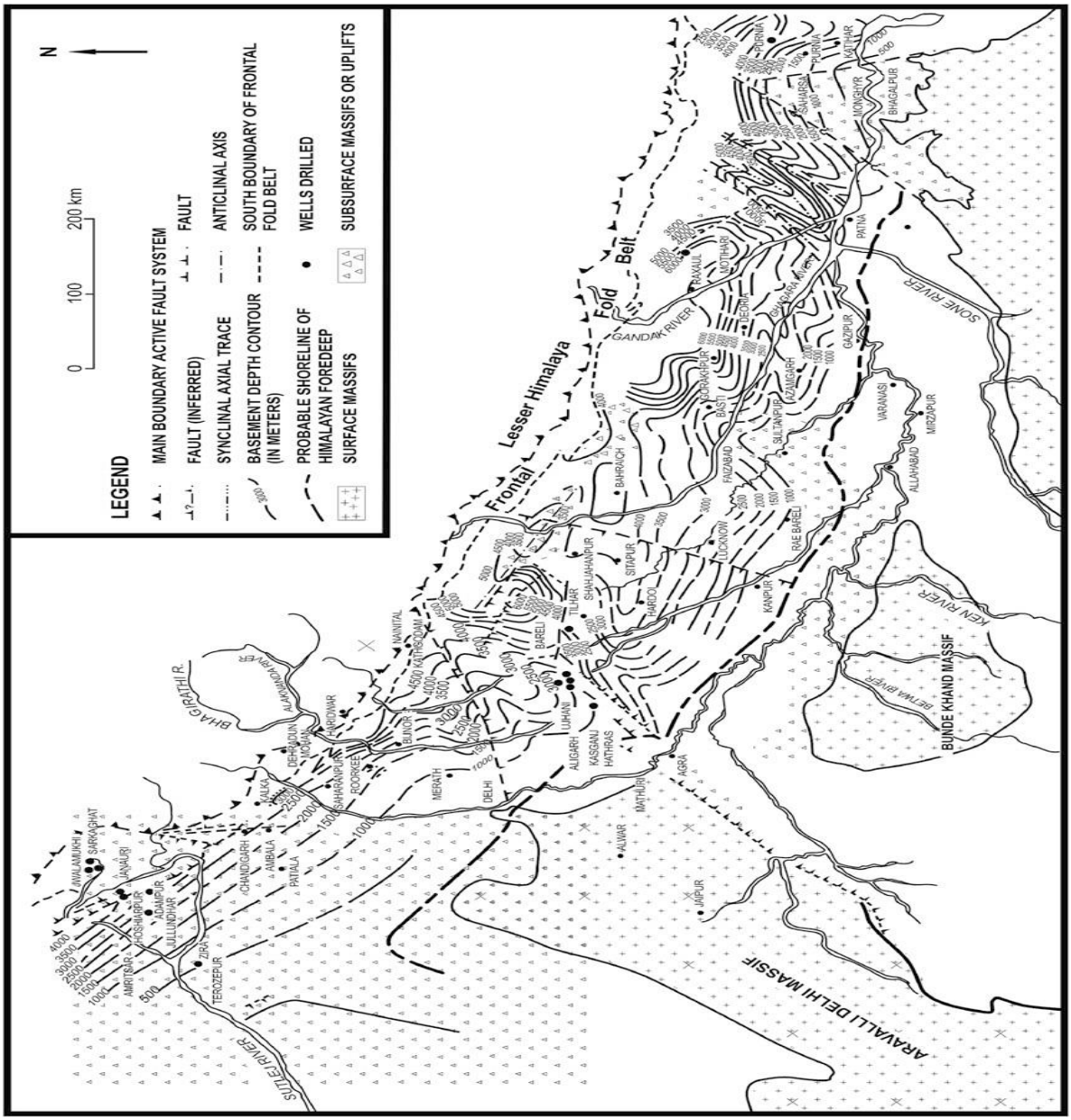
Με άλλα λόγια η λεκάνη της Γκάνγκα περικλείεται εκατέρωθεν, από βορά και νότο, από θετικές ανωμαλίες και έχει παρόμοιο βαρυτικό προφίλ κατά πλάτος των τόξων της πλάκας του Ειρηνικού και των βαθέων ωκεάνειων ρηγμάτων.

Σε αυτήν την περίπτωση τα ελάχιστα βαρυτικά πεδία της Λεκάνης Γκάνγτκα αντιστοιχούν με αυτά των βαθέων ρηγμάτων και της θετικής ανωμαλίας των Ιμαλαΐων και στην θετική βαρύτητα επί των νησιωτικών τόξων. (Sen Gupta 1964. Σελ.. 324) Οι Gutenberg και Richter 1954 Σελ. 66) συνέκριναν τα Ιμαλάια με το τόξο του Ειρηνικού βάσει της έρευνάς τους στο βάθος των σεισμικών εστιών. Παρατήρησαν ότι το εμπροσθοτόξο χαρακτηρίζεται από πολύ βαθειά αλλουβιακή καταβύθιση της Γκάνγκα.

2.1.5 Υπόγεια δομή της Λεκάνης Γκάνγκα

Η Λεκάνη της Γκάνγκα βυθίζεται ομοιόμορφα προς τα ΒΑ, όπου τα υπερκείμενα ιζήματα φθάνουν πάχος 9 έως 10 χιλιόμετρα (Misra and Pukhan 2005). Ο χάρτης ανωμαλιών Μπουζέ δείχνει επίσης μια σχετικά ομοιόμορφη περιφερειακή κλίση ολίσθηση προς τον βορά με τις τιμές της να ξεκινούν από τα 60 mGal στο νότο έως 210 mGal μέγιστο κοντά στα σύνορα του Νεπάλ. Η λεκάνη γίνεται περισσότερο αβαθής ανατολικά και δυτικά (Ahmad and Alam 1978; Singh 1999).

Η σύνθεση του υποβάθρου αποκαλύπτει σταδιακή αύξηση του πάχους από νότο προς βορά, καταγράφοντας μέγιστο πάχος περίπου 8000μ. στο απώτατο βόρειο όριο της λεκάνης (Εικ.4) .



Εικόνα 4: Χάρτης που απεικονίζεται το βάθος του Υποβάθρου της λεκάνης απορροής της περιοχής Γκάνγκα (Megh Raj Dhital σελ 17).

Τα ακόλουθα κύρια τεκτονικά επίπεδα βρίσκονται στη Λεκάνη Γκάνγκα από ανατολή προς δύση, αντιστοίχως (Ahmad and Alam 1978, σελ 586-589)

Η οροσειρά Monghyr-Saharsa (Εικ. 5) σχηματίζει μια υψηλή δομική τάση με προσανατολισμό ΒΒΑ – ΝΝΔ και θα μπορούσε να είναι η επέκταση προς βορά της οροσειράς Satpura. Το ιζηματογενές κάλυμμα της οροσειράς κυρίως στην περιοχή των Siwaliks έχει πάχος μικρότερο των 3000μ.

Η ανατολική Μάζα του Uttar Pradesh (Shelf) βρίσκεται μεταξύ της οροσειράς Monghyr-Saharsa στα ανατολικά και της οροσειράς Faizabad στα δυτικά. Στα νότιά του κόβονται οι πετρογενείς σχηματισμοί Vindhyan and Satpura, και προς τα βόρεια η μάζα φαίνεται να ενώνεται με την καταβύθιση Gandak. Συμπεραίνεται ότι τα πετρώματα ενώνονται με τα τόξα Satpura Crystallines, Vndhhyans και Siwaliks.

Η καταβύθιση Gandak βρίσκεται μεταξύ της ανατολικής μάζας (shelf) του Uttar Pradesh και τις εμπρόσθιες οροσειρές των Ιμαλαΐων. Σε αυτό το υποβυθιζόμενο τόξο βρίσκονται περισσότερα από 6000μ.

αποθέσεων μεσοζωικού, παλαιόκενου και νεογενους της περιοχής Vindhyan στο υπόβαθρο του Saqtpura Crustalline. Η γεώτρηση Raxhaul στη βόρεια ζώνη της καταβύθισης συνάντησε κάποιους σχηματισμούς γνεύσιων του υποβάθρου (Satpura and Bundelkhand). Είναι επικαλυμμένοι από μια ακολουθία μεταμορφωμένων μωβ σχιστολίθων, σχιστών και χαλαζιτών (Vindhyan). Αυτή η μονάδα ακολουθήθηκε ανομοιόμορφα από πετρογενείς σχηματισμούς των χαμηλών, μεσαίων και ανωτέρων Siwaliks τα οποία τελικά ακολουθήθηκαν από αλλουβιακές αποθέσεις του ποταμού Γάγγη.

Η οροσειρά Faizabad η οποία εκτείνεται από ΒΑ προς ΝΔ είναι η πλέον εμφανής (δεσπόζουσα) δομή της Λεκάνης του Γάγγη. (Εικ. 5) . Αποτελείται από γρανιτοείδείς σχηματισμούς Bundelkhand και συμπεραίνεται ότι έχουν ένα λεπτό κάλυμμα νεογενούς. Έξι γεωτρήσεις στην Δυτική Μάζα του Ουτάρ Πραντές αποκάλυψαν ένα μια περίπλοκη δομή με πτυχώσεις και ρήγματα (Ρήγμα Moradabad). Στα δυτικά του Ρήγματος Moradabad, η μάζα αποτελείται από το Delhi Group (υπόβαθρο) ανομοιόμορφα καλυμμένο από μια ακολουθία των Χαμηλότερων Ιμαλαΐων.

Και πάλι ακολουθείται από ανομοιόμορφα από τα Μεσαία και Ανώτερα Siwaliks βαίνοντας βαθμιαία μέσα στο αλλουβιακό πεδίο της Γκάνγκα. Στα ανατολικά του ρήγματος βρίσκονται τα πετρώματα του υποβάθρου του Aravalli Group, τα οποία ακολουθούνται ανομοιόμορφα από τα Χαμηλότερα Ιμαλάια και πάλι με μια ανομοιομορφία από τα Μεσαία και Ανώτερα Siwaliks αντιστοίχως.

Τα Άνω Siwaliks βαθμιαία περνούν μέσα στις υπερκείμενες αλλουβιακές αποθέσεις. Σε αυτή τη μάζα, η προ-Siwalik ανομοιομορφία συνιστά μια ομόκλινη μάζα η οποία βυθίζεται προς τον βορά σε βάθος να ποικίλει από 620 (νότια) σε 4200μ.(κοντά στα σύνορα Ινδίας – Νεπάλ).

Η Καταβύθιση Sarda είναι η βόρεια προέκταση της δυτικής μάζας του Uttar Pradesh.Uttar Pradesh. Περιέχει περισσότερα από 6000μ. από ιζήματα της Vindhyan Μεσοζωικού, Παλαιογενούς και Νεογενούς.

Η οροσειρά Delhi Hariwar είναι η προς βορά επέκταση της πτυχωμένης ζώνης Delhi και σηματοδοτεί το δυτικό όριο της Λεκάνης Γκάνγκα.

Το υπόβαθρο αποτελείται από μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα τα οποία κατευθύνονται προς τον νότο τη συμπαγή μάζα της Bundlkhand (Misra and Phukan 2005). Αυτά τα πετρώματα ακολουθούνται από μια ανομοιομορφία από τα Vindhyans. Η απόθεση πάνω από το κρυσταλλικό υπόβαθρο συνέβη στο Μεσοπρωτεροζωική. Κατόπιν υπήρξε ένα κενό μέχρι το 600 Μα. Έως τότε πρίπου, τα ιζήματα μετασχηματίστηκαν σε χαμηλού βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα. Κατά την διάρκεια του Μεσοπροτεροζωικού και του νεώτερου Παλαιοζωικού, συσσωρεύτηκαν ακολουθίες ρηχών θαλασσίων ανάμεικτων κλαστικοπυριτικών και ανθρακικών πετρωμάτων του παθητικού περιθωρίου.

Καθ' όλη τη διάρκεια του νεώτερου Παλαιοζωικού, μεταξύ των οροσειρών στις καταβυθίσεις των οροσειρών Sarda και Gandak, εναποτέθηκαν επίσης παχιά ρηχά θαλάσσια γλαυκονιτικά ιζήματα. Αυτά τα ιζήματα εναποτέθηκαν σε μια περιπαλιροϊκή πλατφόρμα με χωρική διακύμανση της λιθοστρωματογραφίας από υπερπαλιροϊκό σε υποπαλιροϊκό καθώς και από ρηχές παράκτιες και ποτάμιες αποθέσεις. Στο Ορδοβίσιο υπήρξε μια περιφερειακή ανύψωση ακολουθούμενη από μια μεγάλη φάση υποβύθισης κατά την Πέρμια – Λιθανθρακοφόρα περίοδο.

Στη συνέχεια παχύρευστα ιζήματα προερχόμενα από την μέγα-ήπειρο της Godwana αποτέθηκαν στην καταβύθιση μεταξύ της Purnia και της ανατολικής οροσειράς Minghir-Saharsa (Sinha 2005)

Κατόπιν η περιοχή πέρασε μια μεγάλη ανενεργή χρονική περίοδο μέχρις ότου συνέβη ένα σημαντικό παλιρροϊκό γεγονός στο Κρητιδικό.

Το κενό προκάλεσε μεγάλης έκτασης διάβρωση και κάποιες βασικές διεισδύσεις συνέβησαν στη βάση της ιζηματογενούς ακολουθίας κοντά στο Raxaul, προς το βόρειο περιθώριο της καταβύθισης Gandak.

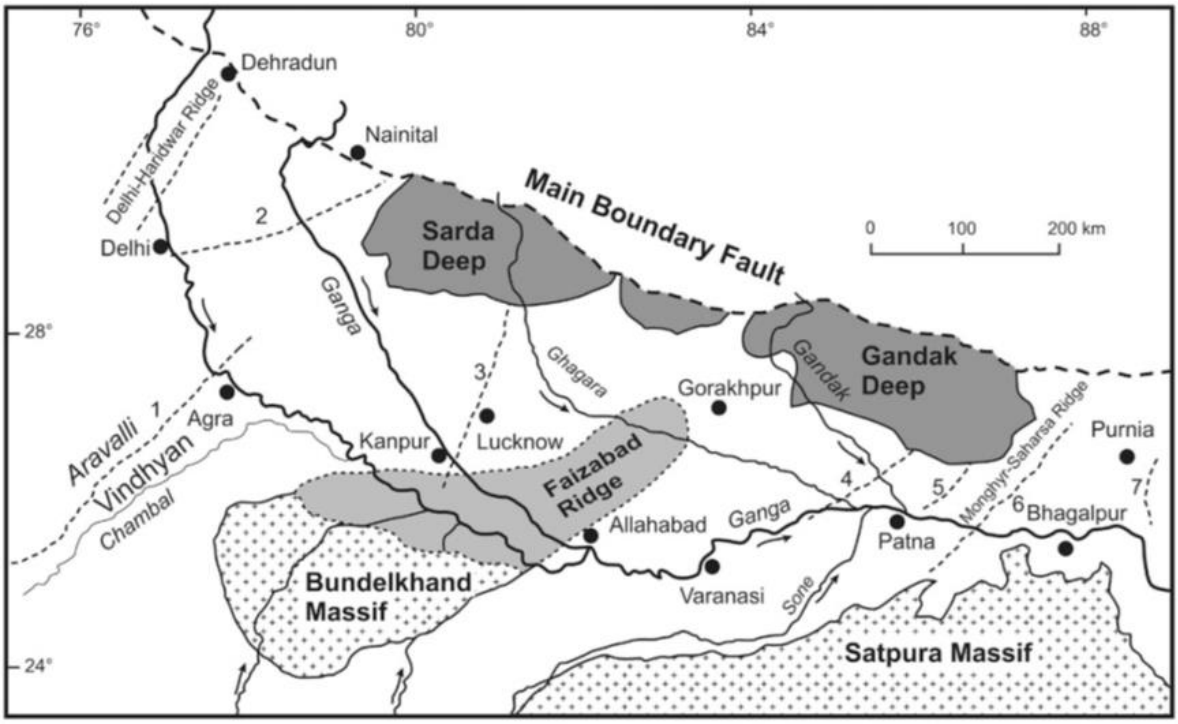
Μπορούν να συσχετισθούν με τα ηφαιστειακά Rajmahal.(Fuloria 1969) Το παλιρροϊκό γεγονός με τη σιερά του ακολουθήθηκε από μια άλλη κενή χρονική περίοδο η οποία διήρκεσε έως τις αρχές του Τριτογενούς.

Εξ αιτίας της συνεχιζόμενης ευπλασίας της λιθοσφαιρικής πλάκας της Ινδίας, το νότιο περιθώριο της εμπρόσθιας καταβύθισης μετακινήθηκε νότια. Σε αυτή τη διαδικασία το βόρειο περιθώριο της εμπρόσθας καταβύθισης αποσχηματίστηκε και οι εμπρόσθιες διεισδύσεις συσσωρρεύθηκαν στα νότια. Η γενική τάση της εμπρόσθιας καταβύθισης είναι παράλληλη της μπροστινής πλευράς των Ιμαλαΐων.

Τα ιζήματα τα οποία συσσωρεύτηκαν στην εμπρόσθια καταβύθιση αποτελούνται από τριτογενή κλαστικοπυριτικά. Εκτός από το θαλάσσιο Subathu του Παλαιογενούς, τα υπόλοιπα ιζήματα του Τριτογενούς είναι ποτάμια και αποτελούνται από πολλές λεπτόκοκκες ακολουθίες (Sinha 2005)

Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης των πλακών της Ινδίας και της Ευρασίας, υπήρξε μια μείζων αναστροφή και τα προϋπάρχοντα ρήγματα του υποβάθρου επανενεργοποιήθηκαν. Η εκτόπιση κατά μήκος αυτών των ρηγμάτων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία γραμμικών υψηλών και χαμηλών. Στη περιοχή της εμπρόσθιας καταβύθισης του Νεογενούς και κατά το Μεσοζωικό και Νεώτερο Παλεογενές η περιοχή υπέστη απογύμνωση και διάβρωση (peneplanation). Ως αποτέλεσμα τα ιζήματα μετακινήθηκαν από τα υψηλά και παρέμειναν μόνο στις περιοχές των γραμμικών χαμηλών κατά μήκος της κοιλάδας απορροής.

Το σφηνοειδές μπλοκ του Τριτογενούς απαλά βυθίζεται προς τον βορά και διατηρεί πάχος περίπου 6000μ. κοντά στους πρόποδες (Sinha 2005).



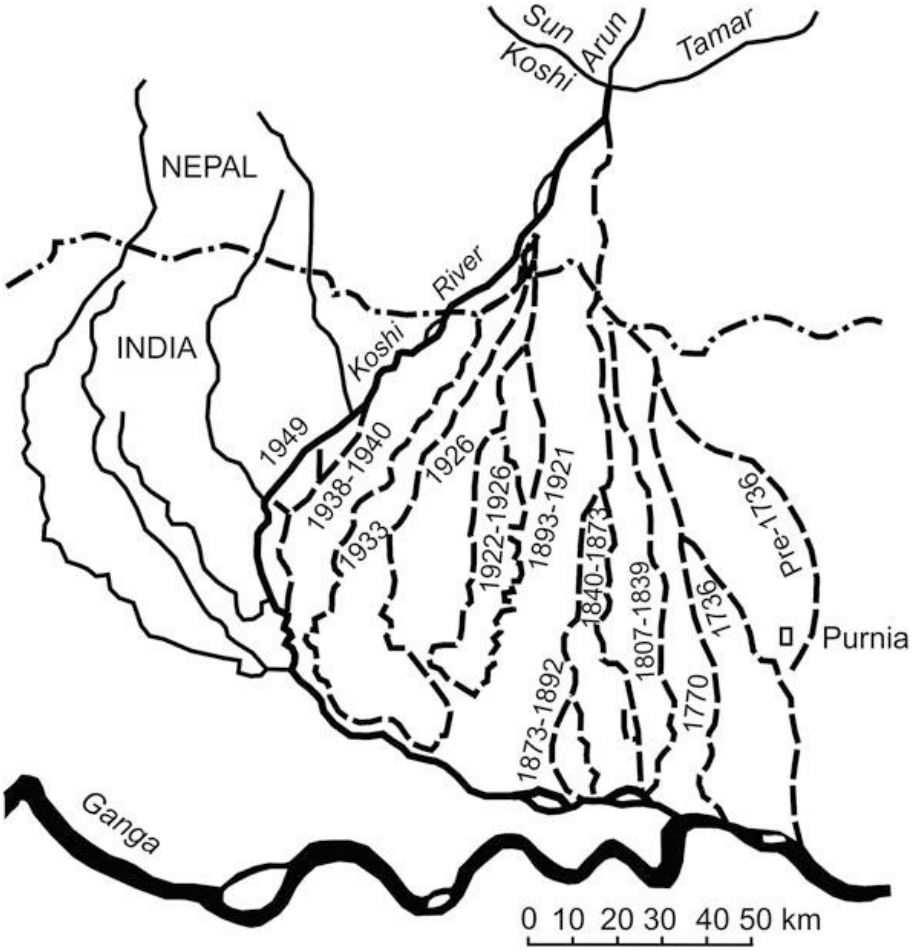
Εικόνα 5: Γεωλογικό Υπόβαθρο και Τεκτονικό πλαίσιο της λεκανης του Γάγγη. Οι αριθμοί υποδυκνύουν τα κύρια υπο-επιφανειακά ρήγματα που έχουν εντοπιστεί από γεωφυσικές έρευνες.1. Το μεγάλο συνοριακό ρήγμα. 2. Το ρήγμα Δελχί-Μορανταμπαντ. 3. Το ρήγμα Lucknow. 4. Το ρήγμα της Δυτικής Πάτνα. 5.Το ρήγμα της ανατολικής Πάτνα .6. Το ρήγμα της κορυφογραμμής Monghyr–Saharsa. 7. Το ρήγμα Malda–Kishanganj. (Megh Raj Dhital, σελ 18).

2.1.6 Ασταθείς κοίτες ποταμών

Πολλές και μεγάλες έχουν υπάρξει στις γραμμές αποστράγγισης των ποταμών Ινδός, Γάγγης και Βραχμαπούτρα και των παραποτάμων τους. Για παράδειγμα, κατά την εποχή Vedic το τμήμα του ποταμού το

οποίο έρεε στο Παντζαμπ ήταν γνωστό ως Saraswati και το κομμάτι το οποίο συνδέετο με το Γάγγη ονομαζόταν Yamuna (Oldham 1886: Radhakrishna and Merh 1999). Στις αρχές του 19ου αιώνα ο ποταμός Βραχμαπούτρα ξεχώρισε από την παλιά του κοίτη και έρευσε στα δυτικά της ζούγκλας Madhopur για να συνενωθεί με τον Γάγγη και ο νέος ποταμός ονομάσθηκε Jamuna (Oldham, 1886, σελ. 341). Τον Αύγουστο του 1787, ο ποταμός Τιστα αλλάζοντας ροή απομακρύνθηκε από τον Γάγγη και ενώθηκε με τον Βραχμαπούτρα (Shillingford 1893)

Ο ποταμός Κόσι είναι ο πιο καταστροφικός. Ο ποταμός αυτός έχει μετατοπίσει την κοίτη του, το κανάλι απορροής και σχημάτισε ένα μέγα ριπίδιο / μεγάλο κώνο δεβριτικής απορροής (Εικ.6).



Εικόνα 6: Μετατόπιση της κοίτης του καναλιού από το ποταμό Κόσι. (Megh Raj Dhital, σελ 19).

Στα τελευταία 250 χρόνια έχει μεταναστεύσει δυτικά κατά περίπου 150 χλμ μέσω περισσοτέρων από 12 καναλιών. Στο παρελθόν, πριν την κατασκευή του φράγματος Κόσι, το 1963, είχαν γίνει κάποιες προσπάθειες να δαμασθεί ο ποταμός. Το κύριο αίτιο της μετατόπισης του ποταμού είναι η εναπόθεση τεράστιων ποσοτήτων ιζηματογενούς υλικού στη λεκάνη απορροής του Γάγγη από την απογύμνωση των πρανών των Ιμαλαΐων. Η κυρίως κοίτη του ποταμού Κόσι ελίσσεται μεταξύ του Βραχμαπούτρα στα ανατολικά και του Γκαντακ στα δυτικά και το σημείο της καμπύλης βρίσκεται στην περιοχή Τσάτρα του Νεπάλ (Ferguson 1863) Οι περίοδοι των ελιγμών είναι μεγάλοι και αργοί προς τα δυτικά ενώ είναι ξαφνική και καταστροφική όταν μετακινούνται προς τα ανατολικά. Στα τέλη της δεκαετίας 1880 και στις αρχές της δεκαετίας του 1890 ο ποταμός Κόσι ξαφνικά μετακίνησε το κυρίως κανάλι του στα σύνορα του Νεπάλ και υπήρξαν μεγάλα πλημμυρικά φαινόμενα στα ανατολικά προς τις περιοχές Purnia και Dinajpur. Κατά τη διάρκεια της περιόδου

των βροχοπτώσεων του 1893 έγιναν σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα της κοίτης του ποταμού Κόσι (Shillingford 1893, σελ 1-2) Τα νερά των Γάγγη και Βραχμαπούτρα αλληλοεπιδρούν με περίπλοκο τρόπο κατά τη διάρκεια των υπερχειλίσεων της κοίτης τους.

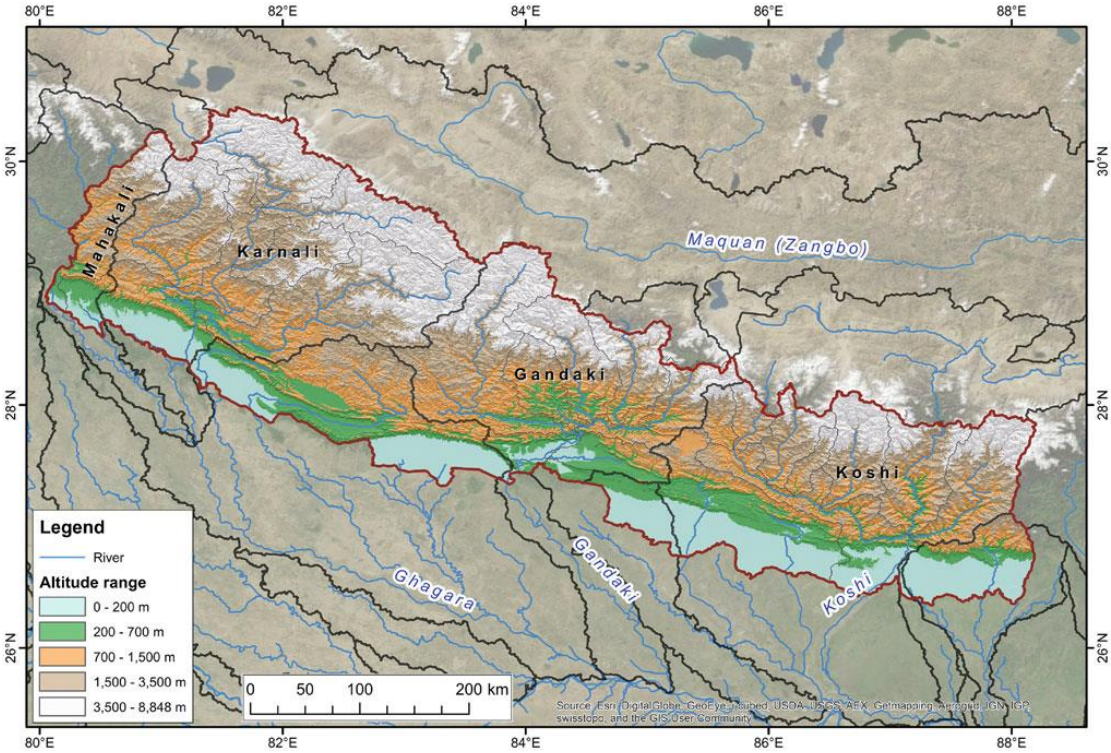
Κατά τον πρώτο μήνα της πλημμύρας όταν υπάρχει πολύ νερό στον ποταμό Βραχμαπούτρα, ο Γάγγης πάνω από την περιοχή Jaffirgunj ρέει ανάποδα, και ο ποταμός Encamati στο Pubna εισρέει στον Γάγγη αντί να απορεύσει. Κατά την περίοδο αυτή υπάρχει σημαντικό ποσό εναποθέσεων στην κοίτη του. Αλλά κατά τη διάρκεια του τελευταίο μήνα της περιόδου των βροχοπτώσεων, όταν το νερό στον ποταμό Βραχμαπούτρα έχει σχεδόν έχει απομακρυνθεί, ένα τεράστιο σώμα νερού το οποίο προηγουμένως ήταν διεσπαρμένο στην πλημμυρική πεδιάδα του ποταμού εισρέει ορμητικά στη άδεια κοίτη του Βραχμαπούτρα, η οποία δρα ως παγίδα κατακράτησης νερού και σαρώνει τα ιζήματα τα οποία έχουν εναποτεθεί κατά τους προηγούμενους μήνες (Fergusson 1863 σελ. 337).

Μετά την κατασκευή του φράγματος του Κόσι, ο ποταμός δαμάσθηκε ως ένα σημείο. Όμως, το 2008, έσπασε τα αναχώματά του και ακολούθησε μια παλιότερη ροή του προς τα ανατολικά, επιφέροντας πολλές καταστροφές σε Νεπάλ και Ινδία.

2.2 Η Φυσιογραφία του Νεπάλ

Η επικράτεια του Νεπάλ (Εικ.7) βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του τόξου των Ιμαλαΐων και εκτείνεται μεταξύ του γεωγραφικού μήκους 80΄04΄΄ και 88΄12΄΄ ανατολικά και 26΄ 22΄΄ και 30΄ 27΄΄ βόρειο πλάτος.

Η χώρα προσμοιζει με παραλληλόγραμμα και καταλαμβάνει μια περιοχή από 147181 τετ. χλμ. Το μέγιστο μήκος της είναι περίπου 825 χλμ και το πλάτος της ποικίλει μεταξύ 250 και 170 χιλιομέτρων από την δύση προς την ανατολή αντιστοίχων. Περίπου το 80% του εδάφους του Νεπάλ καταλαμβάνεται από όρη.

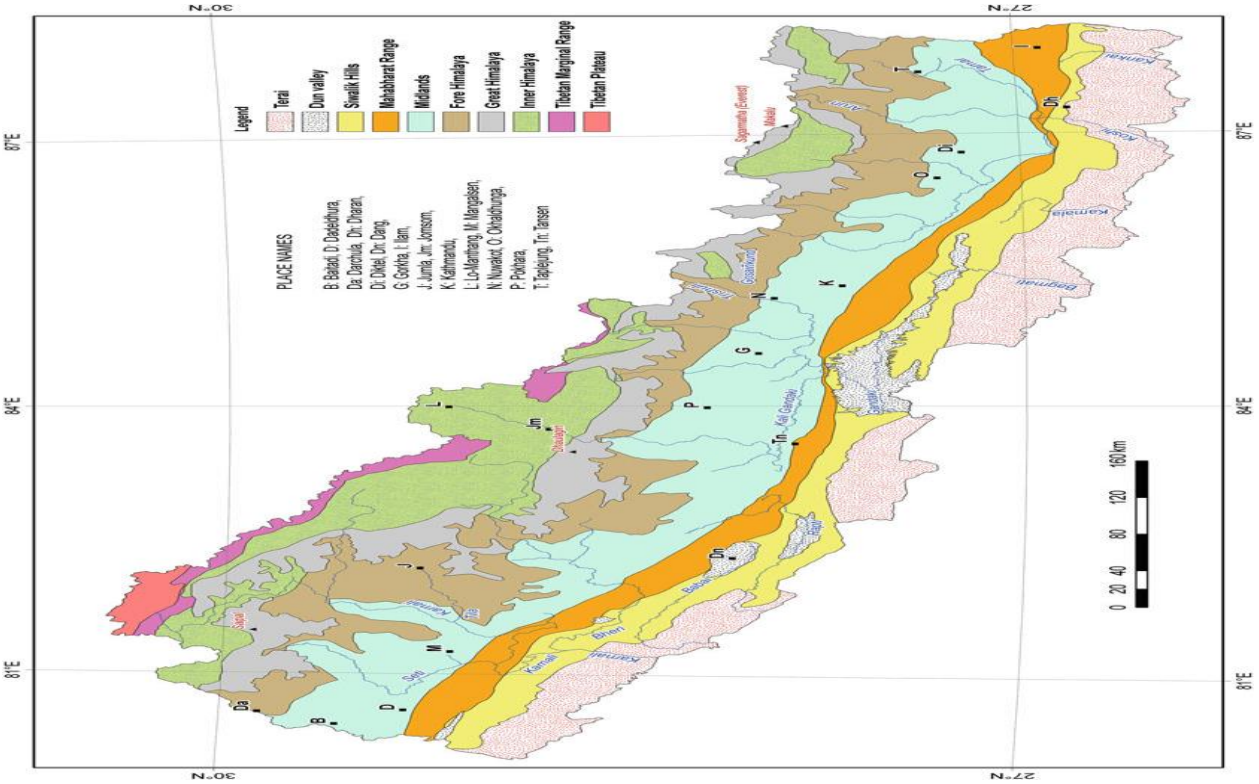


Εικόνα 7: Η χώρα του Νεπάλ και οι κύριες λεκάνες απορροής των ποτάμών του. (Megh Raj Dhital, σελ 24).

Το Νεπάλ, ορισμένες φορές αναγραφόμενο ως «ο παράδεισος στη Γη» είναι ένα από το πλέον εντυπωσιακά μέρη του κόσμου.

Είναι επίσης μια χώρα με μεγάλες αντιθέσεις (Hagen 1969, σελ. 16) Το υψόμετρό του κυμαίνεται από 64μ. στα πεδία Κετσάνα ΝΑ Νεπάλ, έως 8848 μ. στο όρος Έβερστ το οποίο είναι η υψηλότερη κορυφή στον κόσμο, αμφότερα σε μια απόσταση περίπου 150 χλμ, όπου το κλίμα γρήγορα εναλλάσσεται από υποτροπικό σε αρκτικό. Έχει επίσης το φαράγγι Kali Gandaki, το βαθύτερο του κόσμου. Εκτός από τον τρίτο πόλο (δηλ. Το όρος Έβερεστ) τα Ιμαλάια του Νεπάλ έχουν επίσης χαρακτηρισθεί από το μεγαλύτερο αριθμό χιονοκαλυμμένων κορυφών οι οποίες ξεπερνούν τα 8000μ. καθώς και μια ευρεία ποικιλία μορφολογίας της γης.

Η επικράτεια του Νεπάλ είναι χωρισμένη στις ακόλουθες, κατά προσέγγιση, παράλληλες φυσιογραφικές περιοχές (Εικ.8) από νότο προς βορά αντιστοίχως (Hagen 1969 σελ. 18)

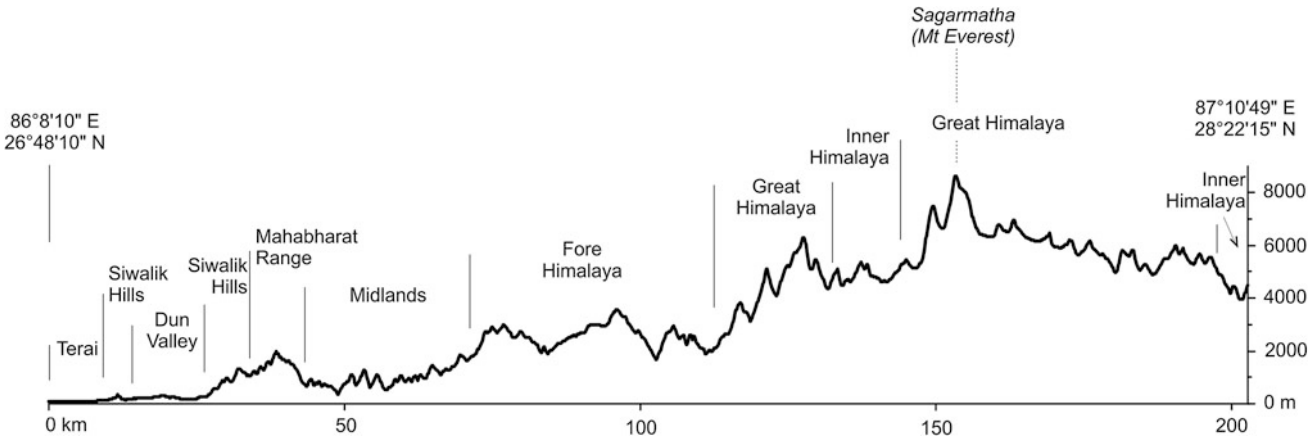


Εικόνα 8: Τα φυσιογραφικά τμήματα του Νεπάλ. (Megh Raj Dhital, σελ 25).

Μια απεικόνιση κατά μήκος των Ιμαλαΐων απεικονίζει τις φυσιογραφικές υποδιαιρέσεις (Εικ. 9) :

- Terai
- Siwalik Range (οροσειρά)

- Mahabharat
- Midlands (Μεσόγαια)
- Fore Himalaya (Μπροστινά Ιμαλία)
- Great Himalaya (Μεγάλα Ιμαλάια)
- Inner Himalayan valleys (Έσω κοιλάδες των Ιμαλαΐων)
- Tibetan marginal ranges (περιθωριακές οροσειρές του Θιβέτ).



Εικόνα 9: Το Προφίλ των Ιμαλαΐων μέσω του ανατολικού Νεπάλ και η θέση των φυσιογραφικών του περιοχών. (Megh Raj Dhital, σελ 26).

2.2.1 Τεράι

Το πεδίο του Terai αποτελείται από ιζήματα των Πλειστόκενου προς Ολόκενου και είναι τμήμα της μπροστινής λεκάνης απορροής του Γάγγη. Στο Νεπάλ υπάρχουν τρεις ξεχωριστές περιοχές όπου τα αλλουβιακά πεδία παρατηρούνται νότια των λόφων Siwalik (Εικ 8) . Το εύρος του ποικίλει από περίπου 30χλμ στα δυτικά του Νεπάλ έως περίπου 40χλμ στο κεντρικό Νεπάλ, και από 25 έως 50χλμ στο ανατολικό Νεπάλ. Το υψόμετρό του διακυμαίνεται από περίπου 100-200μ. από την ανατολή προς την δύση αντιστοίχως.

Γενικά, το Τεράι ολισθαίνει προς τα νότια και η υψομετρική διαφορά μεταξύ των πρόποδων του Siwalik και των συνόρων με την Ινδία κυμαίνεται από 100 έως 200μ. Το Τεράι χωρίζεται σε τρεις ζώνες, αντίστοιχα, από τον βορά προς τον νότο.

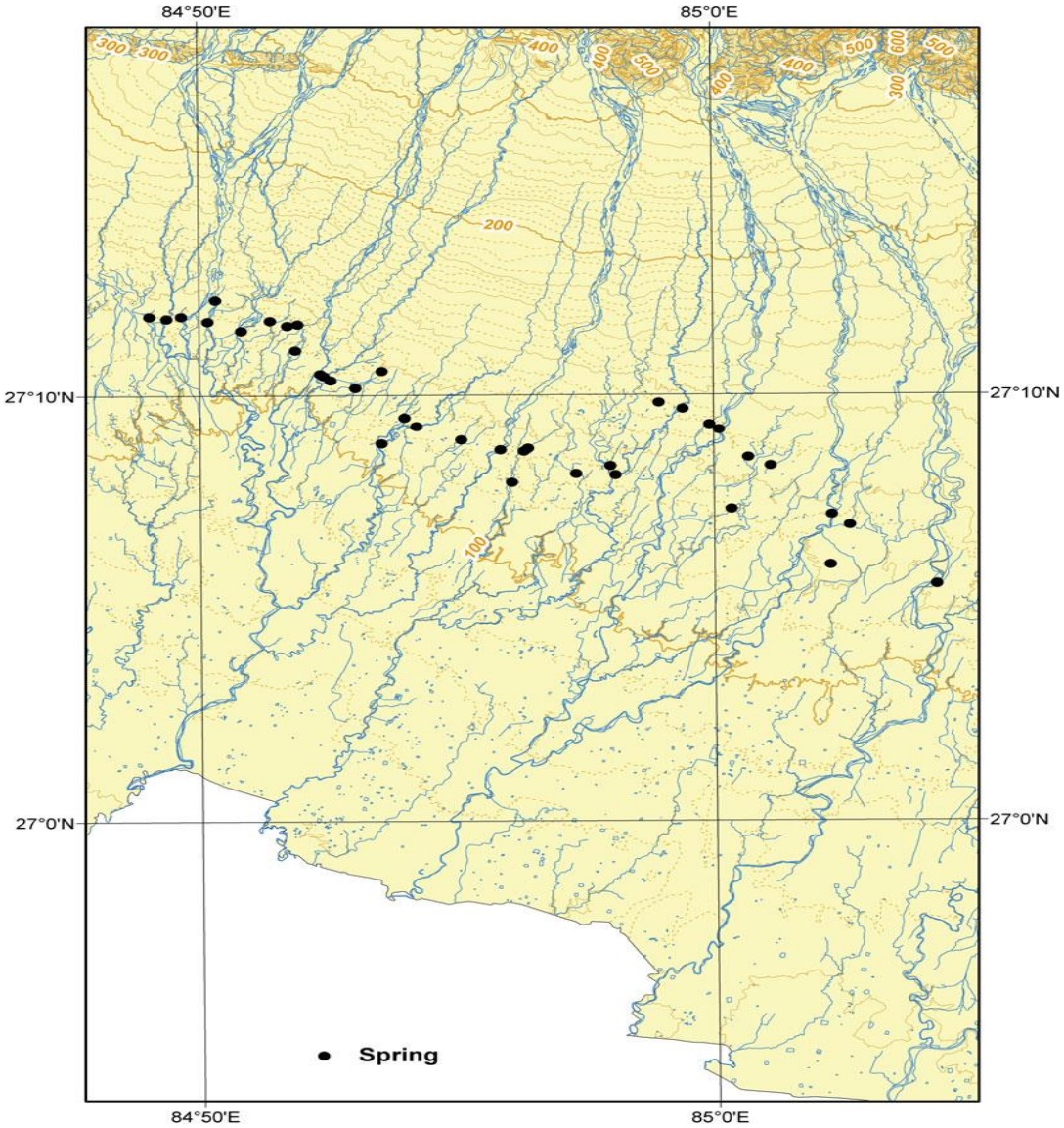
2.2.2 Άνω Τεράι ή Ζώνη Μπαμπάρ

Η ζώνη Μπαμπάρ παρατηρείται στους πρόποδες των Siwaliks συνένωση αλλουβιακών ριπιδίων τα οποία τέμνονται από μείζονες ποταμούς και ρυάκια. Έχει πλάτος 10-15 χλμ. Η ζώνη Μπαμπάρ ολισθαίνει ελαφρά, λίγες μοίρες, προς τα νότια και αποτελείται από κακώς ταξιθετημένους ογκόλιθους διαφόρων μεγεθών, ψηφίτες και ψαμμίτες.προερχομένους από το Siwalik ή παλαιότερους πετρολογικούς σχηματισμούς. Είναι η ζώνη στην οποία επανασυσσωρεύονται α υπόγεια ύδατα του Τεράι. Αλλά κατά την περίοδο των μουσώνων

δεβριτικές ροές, προσχωσιγενείς διαβρώσεις και απότομες μετακινήσεις της κοίτης του ποταμού επηρεάζουν αυτήν την περιοχή.

2.2.3 Μέσον Τεράι ή Ελώδης γη

Το μέσο Τεράι βρίσκεται στο απώτατο άκρο των συνενούμενων αλλουβιακών ριπιδίων της ζώνης Μπάμπαρ. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής αποτελείται από λεπτή ιλύ και άργιλο αλλά υπάρχουν και εναλλασσόμενα στρώματα από ψαμμίτες και λεπτό χαλίκι. Τα στρώματα είναι ελαφρώς κεκλιμένα προς τον νότο (λιγότερο από 1 μοίρα). Συχνά μια ελικοειδής γραμμή διαχωρίζει το μέσο Τεράι από τη ζώνη Μπαμπάρ. (Εικ. 10).



Εικόνα 10: Ελικοειδής Γραμμή που σηματοδοτεί το όριο μεταξύ της ζώνης Bhabar και του μέσου Terai στο κεντρικό Νεπάλ (Megh Raj Dhital, σελ 27).

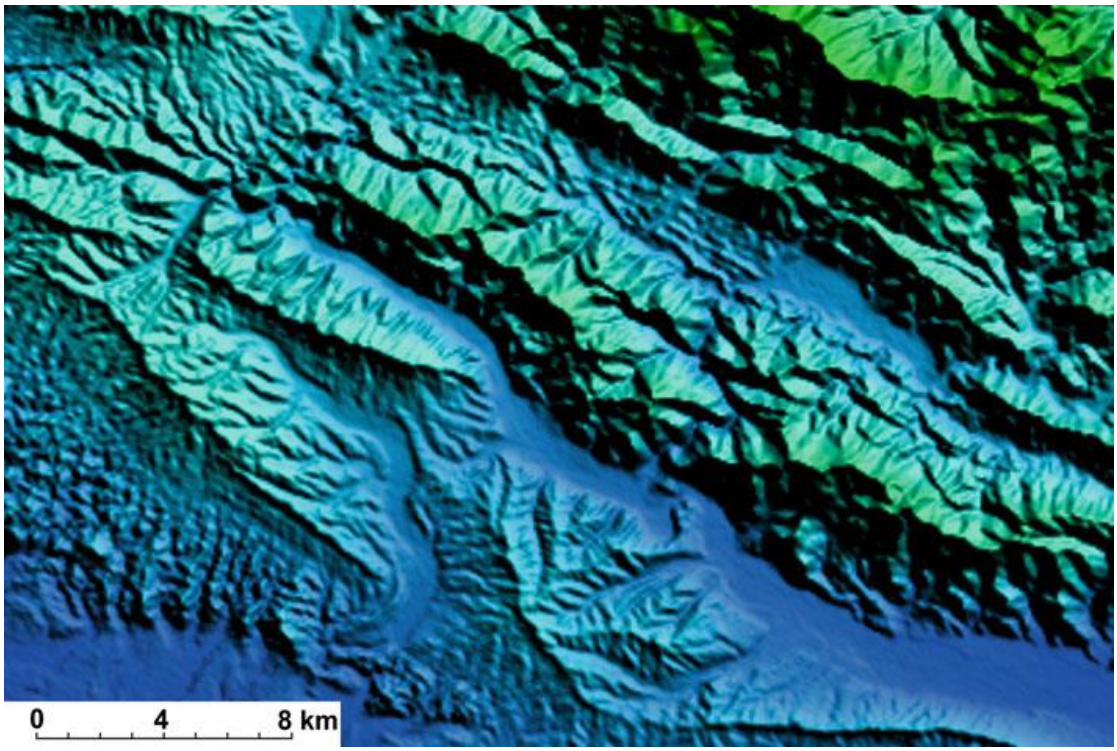
2.2.4 Κάτω Τεράι ή Αλλουβιακό πεδίο του Γάγγη

Το μεγαλύτερο τμήμα του κάτω Τεράι βρίσκεται στην ζώνη αλληλεπίδρασης μεταξύ του αλλουβιακού πεδίου του Γάγγη και των αποθέσεων και των μαιανδρικών παραποτάμων του. Είναι σχεδόν επίπεδο και η διαβαθμισμένη του στρώση είναι λιγότερη από 0,01%. Τα ιζήματα περιέχουν ψαμμίτες, ιλύ και άργιλο και μικρούς ψηφίτες.

2.2.5 Οι κοιλάδες Siwaliks και Dunn

Η πρώτη τοπογραφική ανύψωση του Τεράι ονομάζεται Λόφοι Siwaliks ή Chure του Νεπάλ. Οι λόφοι Siwaliks κυμαίνονται σε υψόμετρο από περίπου 300μ. έως 2000μ.. και έχουν γενικά ύψος μεγαλύτερο των 1000μ. Περισσότερες από τις οροσειρές των Siwaliks έχουν κατεύθυνση ανατολικά-δυτικά, παράλληλη προς αυτή των Ιμαλαΐων. Έχουν υπάρξει αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με το αν υπήρξε ένας ενιαίος ποταμός ή αν υπήρξαν διάφορες συνεννώσεις παραποτάμων κατά τη διάρκεια της περιόδου του Siwalik.

Η οροσειρά Siwalik επίσης γνωστή ως υπο-Ιμαλάια συνεχίζει δια μέσω των Ιμαλαΐων με μερικά μικρά κενά στο Μπουτάν (Κεφ. 5). Οι Medlicott και Blanford (1879, σελ. 521) παρατήρησαν ότι οι λόφοι των υπο-Ιμαλαΐων είναι ευδιάκριτοι παντού από τα πολύ υψηλότερα όρη προ του βορά εξ αιτίας της απότομης διαφοράς στο ύψος και στο περίγραμμα. Πολύ συχνά έχουν απόκριμνη πρόσοψη προς τα νότια και μια μικρή εσωτερική κλίση/ολίσθηση (Εικ. 11) και ως γενικό κανόνα, αποτελούνται από δύο σειρές οι οποίες χωρίζονται από μια ευρεία επίπεδη κοιλάδα η οποία ονομάζεται Dún στην Ινδία ή Μάρι στο Νεπάλ (Strachey 1851, σελ. 296).



Εικόνα 11 : Βαθιές και απότομες καταβυθίσεις που παρατηρούνται στα Siwaliks του νοτίου Νεπάλ (Megh Raj Dhital, σελ 28).

Γενικά η ζώνη Siwalik έχει πλάτος 10-15 χλμ. Όμως, καταλαμβάνει ζώνη πλατύτερη από 50χλμ στα δυτικά Ιμαλάια του Πακιστάν (Potwar Plateau) και της Ινδίας Jamu and Himachal Pradesh. Στο δυτικό σύνορο

Mahakali River του Νεπάλ έχει πλάτος περίπου 20 χλμ. Και στο ανατολικό άκρο, - ποταμός Μέκι έχει πλάτος 1 χλμ.. Αφετέρου σε περιοχές με κοιλάδες οι οποίες εναλλλάσονται με οροσειρές έχει πλάτος 30-50 χλμ.

Οι λόφοι Siwalik δυτικάτου Καρνάλι αποτελούνται από δύο οροσειρές γύρω από το Rangun Khola, στο δυτικό σύνορο του Νεπάλ με την Ινδία. Υπάρχει μια μοναδική ορογενής ζώνη μεταξύ του Μπουντάρ και του ποταμού Καρνάλι, γύρω από το Μπουτγουάλ, και μεταξύ του Νταράν και Λαμ. Στις άλλες τοποθεσίες υπάρχουν δύο ή περισσότερες συνενώσεις ορογενών ζωνών, όπου η βοριότερη των οποίων αναμειγνύεται με την οροσειρά του Μαχαμπαράτ.

Όταν υπάρχουν πολλαπλές οροσειρές Siwalik, δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους αλλά συγκλίνουν και αποκλίνουν τοπικά. Αυτές οι οροσειρές είναι κοίλες ή κυρτές προς (την μετωπική πλευρά των οροσειρών) τα εμπρός foreland.

Ως αποτέλεσμα, απομένει κάποιος κενός χώρος μεταξύ τους και αυτός ο χώρος καταλαμβάνεται από τεκτονικές κοιλάδες (Dun) (Hagen 1969 σ. 20). Αυτού του είδους η σύγκλιση ή απόκλιση σχετίζεται κυρίως με τον προσανατολισμό των διακλαδουμένων – συνδεόμενων ρηγμάτων.

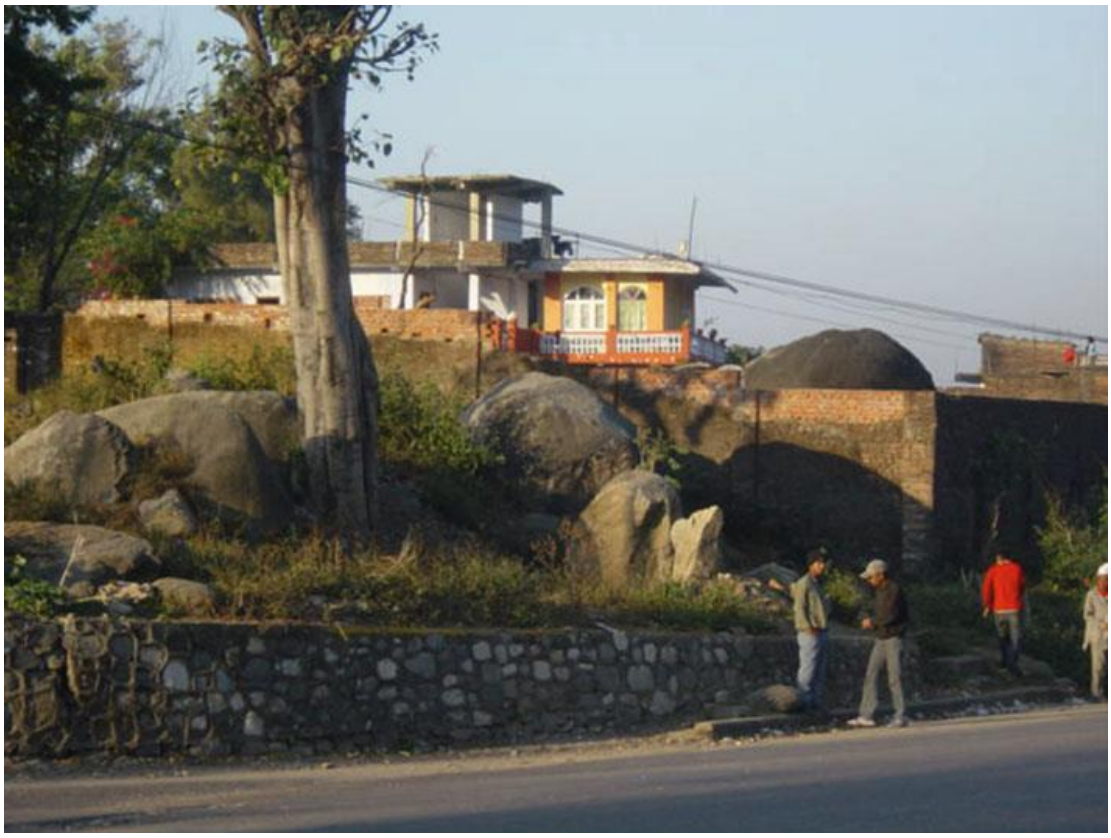
Οι εναλλασσόμενες ορεινές ζώνες (dun) περικλείονται μεταξύ του ποταμού Καρνάλι στα δυτικά και του ποταμού Κόσι στα ανατολικά. Υπάρχει επίσης μια πολύ μικρή κοιλάδα στη λεκάνη του ποταμού Κανκάι. Οι πιο σημαντικές εναλλασσόμενες κοιλάδες είναι οι Surkhet, Dang, Deukhuri, Chitwan, Hetaunda, Marin, Udaipur, και Katari Gaighat-Beltar. Το υψόμετρο αυτών των κοιλάδων κυμαίνεται από περίπου 700μ. Dang έως περίπου 100μ. κοντά στο Beltar. Μερικές φορές οι δύο κοιλάδες (όπως η Dang και Deukhori) είναι δευθετημένες σε κατά προσέγγιση παράλληλο σχηματισμό.

Ένα από τα αξιόλογα χαρακτηριστικά των εμπροσθίων λόφων Siwalik είναι η απότομη εξαφάνισή τους στο πεδίο του Τεράι. Αυτό παρατηρείται ανατολικά του Καρνάλι, γύρω από την καμπύλη του ποταμού Rapti (ανατολικά του Nepalgunj) δυτικά της Αμιλιυα, βόρεια της Mirchaiya και νότια του Μπελτάρ. Αυτές είναι οι απολήξεις των στρωμάτων Siwaliks που σχηματίζουν βυθιζόμενα στρώματα αντίκλινων ή σύγκλινων.

Η μορφή του εδάφους των Siwaliks διαμορφώνεται ως επί το πλείστον από τεκτονικές διεργασίες και δευτερευόντως από καιρικά φαινόμενα και απώλεια μάζας. Παράλληλα και ορθογώνια πρότυπα αποστράγγισης (ελεγχόμενα από τα στρώματα και από τις ρηξιγενείς επιφάνειες) παρατηρούνται συχνά στα Siwealiks. Κεντρομόλα και ορθογώνια πρότυπα αποστράγγισης συναντώνται συχνά στον πυρήνα των συγκλίνων και ένα ακτινοειδές πρότυπο είναι χαρακτηριστικό ενός αντίκλινου πυρήνα. (hogback-cuesta) Οι λόφοι αυτοί χαρακτηρίζονται από δομές τύπου απότομων πλαγιών και εναλλασσόμενων ρηχών και βαθιών βυθίσεων και ολισθήσεων με απόκρημνα πρανή τα οποία έχουν προσανατολισμό προς τον νότο. Η δομή απότομων πλαγιών (hogback) χαρκτηρίζεται κυρίως από εναλλαγές πολύ παχιών ψαμιτών. Η δομή εναλλασσόμενων ρηχών και βαθιών βυθίσεων και ολισθήσεων χαρακτηρίζεται από στρώματα κροκαλοπαγούς διαστρωμματομένα στρώματα ψαμμιτών και ιλύος ψαμμίτες και ιλυος έχουν συντελέσει στην ανύψωση εναλλασσόμενων οροσειρών και αυλάκων. Οι περισσότερες από τις ροές μικρού μεγέθους απότομων πλαγιών ρέουν βασικά προ του νότο κόντρα στον σχηματισμό των στρωμάτων ενώ αυτές οι οποίες πηγάζει από βαθιά πρανή ρέουν από νότο προς βορρά.

Τα νερά της βροχής επηρεάζουν σημαντικά τα ελαφρά και χαλαρά στρώματα των Siwaliks έχοντας ως αποτέλσμα ξαφνικά πλημμυρικά φαινόμενα και δεβριτικές ροές.

Ο Medlicott (1875, σ.100) καθ' οδόν προς το Κατμαντού μέσω Hetaunda παρατήρησε τους τεράστιους ογκόλιθους γύρων από την Hetaunda (Εικ. 12) και απέδωσε τον σχηματισμό τους σε περίοδο παγετώνων. Είναι πολύ πιθανό, τέτοιοι ογκόλιθοι να έχουν εναποτεθεί από προηγούμενες δεβριτικές ροές, παρόμοις με αυτές που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της υδρολογικής καταστροφής το 1993 στο Νοτιο-κεντρικό νεπάλ. Οι Heim και Gansser (1939, σ,9) περιγράφουν κάποιους ογκόλιθους τεράστιου μεγέθους (κοντά στα 100 κ.μ.) από τον ποταμό Murti, ανατολικά της Τιστα, και τους απέδωσε στη δύναμη της ποτάμιας διάβρωσης οφειλομένης στο μεγάλο ύψος βροχοπτώσεων (10-12 μ. ετησίως).



Εικόνα 12: Μεγάλοι γρανιτικοί ογκόλιθοι στο δυτικό άκρο του Hetauda, στην ανώτερη αναβαθμίδα του Budhi του Ποταμού Rapti(Megh Raj Dhital, σελ 29).

Απότομες επίπεδες ροές στους αμμώδεις και κροκαλοπαγείς σχηματισμούς των Siwaliks δημιουργούν αλλουβιακά ριπίδια, αλλά δημιουργούνται βαθιές χαραδρώσεις όταν τέτοιες ροές διαβρώνουν τα χαλαρά στρώματα άμμου και μαλακά στρώματα ιλύος. Ως συνέπεια υπάρχουν οδοντωτοί λόφοι, βαθιές χαράδρες, απόκρημνες πλαγιές και ενεργείς χαράδρες οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαβρωσιγενή εδαφικά επίπεδα, ενώ οι ποτάμιες αναβαθμίδες, τα αλλουβιακά ριπίδια, οι κώνοι κορημάτων και οι παγετώδεις αποθέσεις είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα εδαφικών αποθέσεων. Αφετέρου, εξ αιτίας της απόθεσης υπερβολικών ποσοτήτων στρωματογενούς υλικού και της προηγούμενης φύσης των στρωμάτων, οι λόφοι και οι πεδιάδες των Siwalik έχουν ξηρό κλίμα τον περισσότερο καιρό.

2.2.6 Οροσειρά Μαχαμπαράτ

Η οροσειρά Μαχαμπαράτ είναι η επόμενη οροσειρά η οποία βρίσκεται βόρεια του Τεράι και στέκονται ψηλότερα από τα Midlands (κεντρικό Νεπάλ. Η ενεργή ζώνη ρηγμάτων Main Boundary συχνά διαχωρίζει την οροσειρά Μαχαμπαράτ από τα Siwaliks. Η οροσειρά Μαχαμπαράτ ανυψώνεται ψηλότερα από τους λόφους Siwalkis και φτάνει υψόμεντρο 3000μ. αλλά στην περισσότερη έκτασή της είναι κάτω από 2000μ. Σε διαφορά από τα Siwalkis, αυτή η οροσειρά είναι ασυνεχής και περιλαμβάνει μια ποικιλία από χαμηλότερους και υψηλότερους σχηματισμούς πετρωμάτων των Ιμαλαΐων. Η γεωμορφική ταξινόμηση των βουνών στα Sigoyaliks και στην οροσειρά Μαχαραμπάτ δεν συμπίπτε πάντοτε με τις γεωλογικές υποκατηγορίες.

Η οροσειρά Μαχαραμπάτ διαιρείται σε τρια κυρίως τμήματα, τα οποία χωρίζονται από δύο μεγάλους προϋπάρχοντες ποταμούς. Η έκταση, δυτικά του ποταμού Καρνάλι, (στην συμβολή με τον Σέτι) καθώς και ένα τμήμα ανατολικά του ποταμού Narayani (Gandaki) αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα ενώ το κεντρικό τμήμα το οποίο εκτείνεται μεταξύ των ποταμών Karnali και Narayani αποτελείται από ιζηματογενή ή ελαφρώς μεταμορφωμένες ακολουθίες πετρωμάτων. Τα ανατολικά και δυτικά τμήματα δεν είναι μόνο πανομοιότυπα στην πετρολογική τους σύνθεση αλλά έχουν μια παρόμοια πτυχωμένη κορυφογραμμή η οποία διακόπτεται από κάποιους προϋπάρχοντες ποταμούς. Αν και ο ποταμός Μπαγμάτι φαίνεται να αποτελεί εξαίρεση, καθώς διαπερνά τους λόφους Chandraghiri, και αυτός δεν διασχίζει την κορυφογραμμή Shivapouri η οποία βρίσκεται βόρεια του Κατμαντού. Όμως, το κεντρικό τμήμα συναντά μια ποικιλία από πτυχώσεις και ρήγματα. Η οροσειρά Μαχαμπαράτ είναι είτε ασυνεχής, τεμνόμενη επίσης από ποτάμια τα οποία πηγάζουν από την νότια πλευρά των Ιμαλαΐων και ταπεινώνονται τοπογραφικά. Η έντονη διάβρωση στον κεντρικό τμήμα της εν λόγω οροσειράς αποκάλυψε τις υποκείμενες ακολουθίες πετρωμάτων όταν η περιοχή απογυμνώθηκε από το μεταμορφικό κάλυμμα.

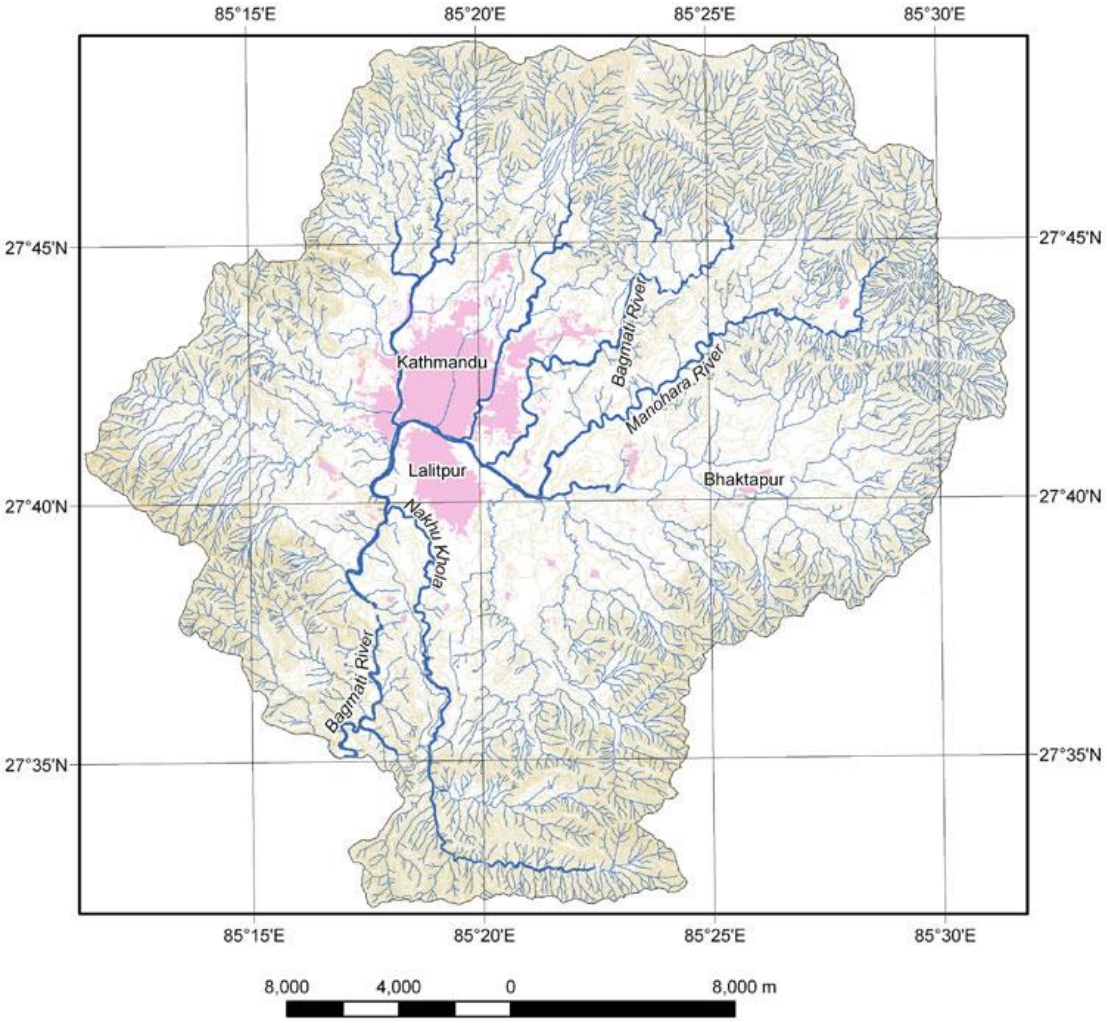
Η οροσειρά Μαχαραμπάτ συμπεριφέρεται ως φράγμα στους ποταμούς οι οποίοι πηγάζουν από το κεντρικό Νεπάλ (Midlands) ή περαιτέρω βόρεια και ρέουν μέσα στον Γάγγη. Είναι προφανές από την απότομη αλλαγή προσνατολισμού τους όταν πλησιάζουν την οροσειρά, αυτοί που ρέουν βασικά κάθετα προς αυτή, ξαφνικά αποκτούν παράλληλη πορεία. Ακόμα και οι προϋπάρχοντες ποταμοί αποκλίνουν προς τα ανατολικά ή τα δυτικά της οροσειράς και δημιουργούν στενά και βαθιά φαράγγια καθώς την διασχίζουν. Όλες αυτές οι παρατηρήσεις καταδεικνύουν μια πρόσφατη ανύψωση της οροσειράς του Μαχαμπαράτ.

2.2.7 Midlands (κεντρικό Νεπάλ)

Το κεντρικό Νεπάλ συνιστά τις χαμηλές περιοχές μεταξύ της οροσειράς Μαχαμπαράτ στα νότια και των υψηλών βουνών στα βόρεια (Hagen 19698. Σ. 21). Το υψόμετρό του ποικίλει μεταξύ 600 και 2000μ. και γενικά καλύπτεται από αλλουβιακά, κολλουβιακά ιζήματα και ιζήματα κατακρημνήσεων. Οι περισσότερες από τις πυκνοκατοικημένες κοιλάδες βρίσκονται στο κεντρικό Νεπάλ. Chaurjahari, Kusma, Pkhara, Kathmandu, Panchkhal και Tumling Tar είναι μερικές από τις κοιλάδες του κεντρικού Νεπάλ.

Το Κεντρικό Νεπάλ επιδεικνύει ποικίλα πρότυπα αποστράγγισης συμπεριλαμβανομένων δικτυωτών, ορθογώνιων, παράλληλων και δενδριτικών. Η κοιλάδα του Κατμαντού (Εικ. 13) αποτελεί κλασσικό παράδειγμα μελέτης ενός κεντρομόλου συστήματος αποστράγγισης.

Οι κυρίως κατά μήκος ή εγκάρσιοι ευθυγραμμισμένοι ποταμοί όπως Trisshuli, Sun Koshi, Tama Koshi, Dudh Koshi, Arun και Tamar στο κεντρικό και ανατολικό Νεπάλ ακολουθούν τους πυρήνες συγκλίνων (Hagen 1969, σ. 22). Όμως, μια τέτοια ευθυγράμμιση δεν είναι εμφανής στο δυτικό Νεπάλ. Σε πολλές περιοχές οι τάσεις των ποταμών συμφωνούν κατά πολύ με τα σπασίματα των ρηξιγενών ζωνών στην περιοχή (Scheidegger 1999)



Εικόνα 13: Η κοιλάδα του Κατμαντού: Ένα παράδειγμα πρότυπου συστήματος κεντρομόλου αποστράγγισης (Megh Raj Dhital, σελ 30).

Στο Κεντρικό Νεπάλ έχει εναποτεθεί μια ποικιλία από αλλουβιακές αναβαθμίδες κατάλληλες για τη γεωργία. Έγιναν από την συνεχή αμφίπλευρη ανύψωση των καναλιών και τις κατακόρυφες τομές των μαιανδρικών ποταμών. Το Κεντρικό Νεπάλ συνίσταται από εύρος ιζηματογενών, χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης και κρυσταλλικών πετρωμάτων τα οποία ανήκουν κυρίως στις ακολουθίες των Ανώτερων και Κατώτερων Ιμαλαΐων.

Όταν ένα πέτρωμα εκτίθεται σε εκτεταμένη ηλιοφάνεια για δεκάδες χιλιάδων έως εκατοντάδες χιλιάδων ετών σε μια υγρή υποτροπική περιοχή του Κεντρικού Νεπάλ, αναπτύσσεται ένα κοκκινόχρωμο ιζηματογενές χώμα. Το κόκκινο χρώμα οφείλεται στην οξείδωση των μεταλλευμάτων του πετρογενετικού σχηματισμού του υποβάθρου τα οποία περιέχουν σίδηρο (Fe) (Βλ. πυρίτης, χλωρίτης, βιωτίτης κεροστίλβη)

Αυτό το χώμα είναι σχεδόν σαν ένας σχηματισμός λατεριτών οι οποίοι βρίσκονται στην Νότια Ινδία και σε τροπικές περιοχές. Το βάθος του κόκκινου χώματος κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως δεκάδες μέτρα και είναι κατανεμημένο στους πρόποδες, τις κορυφογραμμές, τις διαβρωσιγενείς επιφάνειες και στις κυρτές πλαγιές του κεντρικού Νεπάλ. Παρόμοια χώματα παρατηρούνται σπανίως στους πρόποδες και στις κοιλάδες dun των Siwalik και στην οροσειρά Μαχαμπαράτ.

2.2.8 Μετωπικά Ιμαλάια

Η περιοχή του Κεντρικού Νεπάλ η οποία υπερβαίνει το μέσο υψόμετρο των 3000μ. ορίζεται ως Μετωπικά Ιμαλάια (Hagen 1969, σ. 22). Αυτή η περιοχή βρίσκεται στην εσωτερική ζώνη του Κεντρικού Νεπάλ, δηλαδή, στους πρόποδες της οροσειράς των Μεγάλων Ιμαλαΐων. Αυτό το τμήμα των Ιμαλαΐων εντοπίζεται εντός των κρυσταλικών ωστικών πλακώ ή στις περιβάλλουσες αυτά κοιλάδες. Χαρακτηρίζεται επίσης από μια αυξημένη μικροσεισμική δραστηριότητα. Οι κοιλάδες Jumla στο δυτικό Νεπάλ και Solu στο ανατολικά Νεπάλ είναι δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα. Αυτό το υψίπεδο όπου το υψόμετρο μπορεί να υπερβαίνει τα 4000μ. καλύπτεται από παχύ στρώμα χιονιού το χειμώνα και δέχεται λίγες βροχές το καλοκαίρι.

2.2.9 Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων

Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων είναι το χιονισμένο τμήμα του Νεπάλ όπου υπάρχουν οκτώ κορυφές οι οποίες υπερβαίνουν τα 3000μ. Η περιοχή αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα και κρυσταλλικά πετρώματα καλυμμένα από ιζήματα με μερικές γρανιτικές διεισδύσεις. Γενικά, η νότια πλευρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων είναι πιο απόκρημνη και χαμηλότερη από την βόρεια πλευρά. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της οροσειράς των μεγάλων Ιμαλαΐων είναι ότι παρότι υπάρχει ως φράγμα στον υγρό αέρα προερχόμενο από τον Ινδικό Ωκεανό και εμποδίζει την υγρασία να εισέλθει στο υψίπεδο του Θιβέτ, επιτρέπει την διέλευση μέσω αυτής μερικών βαθιών ποταμών. (Trans-Himalayan) Αυτοί μεγάλοι ποταμοί πηγάζουν από τις περιθωριακές οροσειρές του Θηβέτ με υψόμετρο μικρότερο από 6000μ. αλλά διασχίζουν μία οροσειρά της οποίας το υψόμετρο υπερβαίνει τα 8000μ. (Wager 1934 σ. 328, Hagen 1969, σ. 19). Οι εγκάρσιες χαράδρες των Ιμαλαΐων δεν είναι λιγότερο εντυπωσιακές από τις κορυφές τους. Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων δεν είναι μια μονή συνεχής ορογενετική αλυσίδα αλλά διακόπτεται από χαράδρες χιλιάδων μέτρων βάθους, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στις κορυφές και στέκονται στα όρια των κρημνών (Wager 1937 s. 239). Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων περιέχει έναν αριθμό μεγάλων συμπαγών βραχωδών όγκων όπως Kanjiroba, Dhaulagiri, Anapurna, Langtang, Khumbu και Kanchenjunga.

Το περισσότερο μέρος του τοπίου είναι σκαλισμένο από ποταμούς, παγετώνες, χιόνι, πάγο και άνεμο. Οι παγετώνες είναι αποθήκες παγωμένου νερού το οποίο τροφοδοτεί έναν αριθμό μεγάλων ποταμών του Νεπάλ. Κυκλικές, πλάγιες και τερματικές μωραίνες, κρεμαστές κοιλάδες/ απόκρημνες κοιλάδες και αναβαθμίδες με προέλευση παγετωνική-ποτάμια ή λιμναία είναι η πλειοψηφία της μορφολογίας του εδάφους. Υπάρχουν επίσης πολλές παγετωνικές λίμνες οι οποίες αποτελούν απειλή εκκρηκτικής πλημμύρας προς τους πληθισμούς οι οποίοι κατοικούν στο Κεντρικό Νεπάλ. Χιονοστιβάδες και κατολισθήσεις βράχων καθώς και άλλες παγετωνικές καταστροφές έχουν πλήξει την περιοχή. Το περιστατικό του Μαΐου 2012 στην περιοχή Αναπούρνα του δυτικού Νεπάλ προξένησε μεγάλες καταστροφές στην κοιλάδα του ποταμού Σέτ. Η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων περιέχει μερικές γιγάντιες καταπτώσεις βράχων όπως η περίπτωση του Tsegro Ri (Scott and Drever 1953, Masch and Preuss 1977) και την περίπτωση Lete.

Η φύση των προϋπαρχόντων δι-Ιμαλαϊακών ποταμών διαπιστώθηκε για πρώτη φορά με την μελέτη της μορφολογίας του ποταμού Αρούν. Ο Heron πίστευε ότι ο ποταμός Αρούν είχε αλλάξει τη ροή του περνώντας μέσα από την οροσειρά των Ιμαλαΐων και είχε πέσει στην κοίτη ενός ποταμού στο Θιβέτ ο οποίος έρρεε προς την ανατολή. Ο ποταμός Αρούν βασικά ρέει από τη δύση προς την ανατολή και οι μαίανδροί του διέρχονται μέσω της επίπεδης πεδιάδας του Θιβέτ έως ότου στρίψει απότομα προς τα νοτιοδυτικά και τα νότια μέσω της κύριας οροσειράς των Ιμαλαΐων. Ενώ διέρχεται από την ζώνη των Ανώτερων Ιμαλαΐων, συναντά το άνω φαράγγι (gorge). Πριν μπει στη χαράδρα, ο ποταμός διέρχεται από μια αρκετά ανοιχτή κοιλάδα με μεγάλες αναβαθμίδες από βράχους και χαλίκι. Κατόπιν στρίβει απότομα σε ορθή γωνία (Εικ. 14) μέσα στον πυρήνα μιας υψηλής βραχώδους μάζας από σκληρούς γνεύσιους οι οποίοι σχηματίζουν ένα φαράγγι ονομαζόμενο Yo Ri και το οποίο έχει σχεδόν κατακόρυφα τοιχώματα. Συνεχίζει τη ροή προς τον νότο μέσω αυτού του φαραγγιού για απόσταση περίπου 5 χλμ, στη συνέχεια στρίβει πάλι και ρέει δυτικά για περίπου 6 χλμ και τελικά ξεπροβάλλει από το φαράγγι ακολουθώντας την ίδια τάση όπως αυτήν που είχε πριν εισέλθει σε αυτό.

(Heron 1922 σ. 219) Αυτό το ανώμαλο φαινόμενο εξηγήθηκε αργότερα από τον Wager (1937 σ. 248) ως τυπική συμπεριφορά ενός προϋπάρχοντος ποταμού.

Εικόνα 14: Η άνω στενή βραγχώδης και απόκρυμνη περιοχή της κοίτης του ποταμού Αρούν και η δεξιόστροφη κλίση της κοιτης του (Megh Raj Dhital, σελ 32).

2.2.10 Οι κοιλάδες των Έσω Ιμαλαΐων

Επειδή η οροσειρά των Μεγάλων Ιμαλαΐων δεν είναι ενιαία και συνεχής, οι ενδιάμεσες περιοχές κατλαμβάνονται από τις κοιλάδες των Έσω Ιμαλαΐων (Hagen 1969, σ.23). Τέτοιου είδους κοιλάδες περικλείονται από τις περιθωριακές οροσειρές των Μεγάλων Ιμαλαΐων και του Θιβέτ.

Οι ποταμοί οι οποίοι ρέουν μέσω των κοιλάδων δημιουργούν βαθιές χαραδρώσεις καθώς διατέμνουν το υπερυψωμένο φράγμα των Ιμαλαΐων. Τέτοιου είδους χαραδρώσεις διευκολύνουν την εισροή υγρών θερμών ανέμων από το νότο και οι κοιλάδες δέχονται κάποιες βροχοπτώσεις. Οι κοιλάδες Thakkhola, Manang, και Khumbu είναι μερικά παραδείγματα. Στην περιοχή Khumbu, αναβαθμίδες και ριπίδια πλειστόκενου και ολόκενου περιόδου αποτελούνται από μητρικά και κλαστικά μείγματα τα οποία προέρχονται από υπερσυμπυκνωμένες ροές και δεβριτικές ροές χοντρών κόκκων. (Barnard et. Al. 2005)

2.2.11 Περιφερειακές οροσειρές του Θιβέτ

Οι περιφερειακές οροσειρές του Θιβέτ συνιστούν το βόρειο όριο των Έσω Ιμαλαΐων (Hagen 1960 σ.35). Οι μείζονες ποταμοί των Ιμαλαΐων οι οποίοι πηγάζουν από αυτές τις οροσειρές ρέουν προς την Ινδική υποήπειρο. (Εικ. 7). Μερικά από τα κύρια όρη του Θιβέτ είναι η οροσειρά Lhagoi Kangri και οι οροσειρές Kailash (Gangdise) –Nyainqentanglha (Mingtao 1982 σ.11). Το υψίπεδο το οποίο βρίσκεται βόρια των περιφερειακών οροσειρών του Θιβέτ ανήκει στο εκτεταμένο οροπέδιο του Θιβέτ. Είναι βασικά μια επίπεδη γη με πολλές λίμνες και ποτάμιες κοιλάδες.

2.3 Τιθυς Ιμαλάια

2.3.1 Η ακολουθία της Τιθύος των Ιμαλαΐων

Καταλαμβάνει την νότια περιφέρεια του Θιβετιανού Πλατώ το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονα φαινόμενα ανέμων. Παρά το μεγάλο του ύψος, πάνω από 300μ.,το κρύο κλίμα και την ανυπέρβλητη προσβασιμότητα, η Τιθύς αποτελεί το πιο καλά διερευνημένο ιζηματογενές συγκρότημα στο Νεπάλ. Σε μια πασίγνωστη μελέτη του 1983, ο Eduard Suess έδωσε το όνομα Τιθύς στον «μεγάλο ωκεανό» ο οποίος κάποτε εκτείνετο σε ένα τμήμα της Ευρασίας. Ο Argand (1924) προχώρησε περαιτέρω την έννοια του Suess στην διάσημή του εργασία επί του τεκτονικού πλαισίου της Ασίας, και διαμόρφωσε τα τεκτονικά δεδομένα της Τιθύος με την σημερινή τους έννοια (Sorkhabi 1997). Στη συνέχεια, ο Auden (1935 σ. 161) υποστήριξε ότι θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο τμήμα των Ιμαλαΐων το οποίο βρίσκεται εντός των αποθέσεων της Τιθύος και της Χερσονήσου των Ιμαλαΐων. Αλλά η τελευταία του άποψη δεν προχώρησε εξ αιτίας της διαφωνίας σχετικά με τη συγγένεια της χερσονήσου των Πρωτεροζωικών πετρωμάτων των Ιμαλαΐων.

Κατά τη διάρκεια του σπασίματος (διαίρεσης) της υπερηπείρου της Πανγαίας ο Ωκεανός της Τιθύος εμφανίστηκε ως μία τάφρος (Wilson 1963) μεταξύ της γης της Godwana στα νότια και της γης της Angara (η οποία αργότερα ονομάστηκε Λαυρασία) στα βόρεια. Ενώ διερευνούσαν την προέλευση των Ιμαλαΐων οι Dewey and Bird (1970) επεσήμαναν ότι το Αλπικο-Ιμαλαϊακό σύστημα εξελίσσεται από την περίοδο του Νεότερου Μασοζωικού εξ αιτίας πολλαπλών συγκρούσεων, σχετιζόμενες με τη σάρωση των μικροηπείρων και των νησιωτικών τόξων κατά πλάτος του Τιθυοινδικού Ωκεανού. Ο Crawford το 1874 και Gansser το 1981 επεσήμαναν ότι ο Ωκεανός της Τιθύος στην πραγματικότητα ήταν μια στενή ζώνη περίπλοκων νησιωτικών τόξων, έσω λεκανών και ανώμαλων αποκομμένων σφηνοειδών τεμαχίων από ηπειρωτικά πετρώματα. Ο Celar Sengor (1979, 1985) προχώρησε περισσότερο την ιδέα της Παλαιοτιθυος (Παλαιοζωικής περιόδου) και της Νεοτιιθύος (Μεσοζωικό προς Ιώκαινο) στη βιβλιογραφία της γεωλογίας. Όμως μερικοί ερευνητές διαφωνούν με την υποδιαίρεση της Τιθύος (π.χ. οι Tozer 1989, Bhat 2001, Torsvic et.al 2009) . Οι Tollmann και Kristan-Tollmann (1985) παρουσιάζουν μια καλλύ ιστορική αναδρομή των διάφορων όρων οι οποίοι έχουν σχέση με τον Ωκεανό της Τιθύος.

2.3.2 Κύρια χαρακτηριστικά της ακολουθίας της Τιθύος των Ιμαλαΐων

- Τα πετρώματα της Τιθύος δημιουργήθηκαν από μια ποικιλία ωκεάνιων αποθέσεων και ανθρακικών ιζημάτων όπως ψαμμίτες, ιλυόλιθοι, δολομίτες, ασβεστόλιθοι και σχιστόλιθοι. Κυμαίνονται σε ηλικία από το Κάμβριο έως το Ιόκαινο.

- Εναποτέθηκαν σε μια ποικιλία θαλάσσιων (από πελαγικά ιζήματα σε κοραλλιογενείς υφάλους) και ποτάμια περιβάλλοντα

- Έχουν μεγάλες πτυχώσεις και ρήγματα αλλά ομοιόμορφα υπέρκεινται της Πρωτεροζικής αλληλουχίας των Ανώτερων Ιμαλαΐων.

- Ο βαθμός της μεταμόρφωσής τους γενικά αυξάνεται από τη δύση προς την ανατολή.

- Το όρος Έβερεστ αποτελείται από ιζηματογενή πετρώματα (τα οποία ανήκουν στο υποβυθιζόμενο τμήμα της λιθοσφαιρικής πλάκας) της περιόδου του Καμβριο-Ορδοβίσιου. Αυτά τα πετρώματα ωθήθηκαν από τον ωκεανό σε υψόμετρο έως 8848μ.

- Τα ιζήματα της Τιθύος έχουν αλλαγές εύρους και έντονες πρόσθιες διαφορές. Το πάχος ενός λιθοστρατιγραφικοού τμήματς μπορεί να αλλάζει σημαντικά στην πλευρική προέκτασή του.

- Τα πετρώματα έχουν περίπλοκες πτυχώσεις και συχνά κατευθύνονται προς τον βορά, δηλαδή, αντίθετα από την αλληλουχία των Υψηλότερων και Κατώτερων Ιμαλαΐων

- Εκτός του Νότιου Θιβετιανού συστήματος αποκόλλησης, το οποίο συμβαίνει στο βασαλτικό τμήμα του, υπάρχει επίσης η ακολουθία κανονικών ρηγμάτων με τάση βοράς – νότος τα οποία δημιουργούν την ημιβύθιση / ημιτάφρος της Takkhola – Mustang

- Υπάρχουν μερικά εναπομείναντα στρώματα του Παλαιοζωικού στην κορυφή των πετρωμάτων των Άνω Ιμαλαΐων στο Νεπάλ και στο Μπουτάν.

Η ζώνη του Ωκεανού της Τιθύος εκτείνεται από τις Άλπεις, μέσω της Μεσογείου, του Ιράν, του Αφγανιστάν, της Αλατώδους οροσειράς του Πακιστάν και των Ιμαλαΐων. και συνεχίζει προς το Θιβέτ και τη Βιρμανία. Τα ιζήματα του Φανεροζωικού που έχουν συσσωρρευθεί σε αυτόν τον εξαφανισμένο ωκεανό περικλείουν το βόρειο περιθώριο των Ιμαλαΐων. Με μια λεπτή παρεμβαλλόμενη λωρίδα της κρυσταλλικής ζώνης των Ανώτερων Ιμαλαΐων, προφανώς δύο Τιθυακές ζώνες συνθέτουν την οροσειρά των Παντζάμπ Ιμαλαΐων του Κασμίρ (Wadia 1926, σ. 345, Gansser 1964, σ. 39). Υπάρχει επίσης μια στενή ζώνη από πετρώματα του ωκεανού της Τιθύος τα ποία έχουν αποτεθεί κυρίως κατά την περίοδο του Ιώκαινου στις ζώνες των Χαμηλότερων και Υπο-Ιμαλαΐων της Ινδίας. Μέσα στο έδαφος του Νεπάλ αυτός ο σχηματισμός πετρωμάτων εκτείνεται μεταξύ των ποταμών Μαχακάλι και Τινκάρ Λίπου στα δυτικά έως το Langtang Himal στα ανατολικά. Η ίδια ιζηματογενής ακολουθία συγκροτεί την κορυφή του όρους Έβερστ και τα περιβάλλοντα πετρώματα. Μερικά ίχνη αυτών των σχηματισμών των πετρωμάτων είναι επίσης κατανεμημένα στα Κατώτερα Ιμαλάια όπου κάποια ακραία ομοιόμορφα πτυχωμένα ίχνη επικαλύπτουν την ακολουθία των Ανώτερων Ιμαλαΐων στις γειτονικές περιοχές του Κατμαντού, Τζαλτζάλα και Τζούμλα.

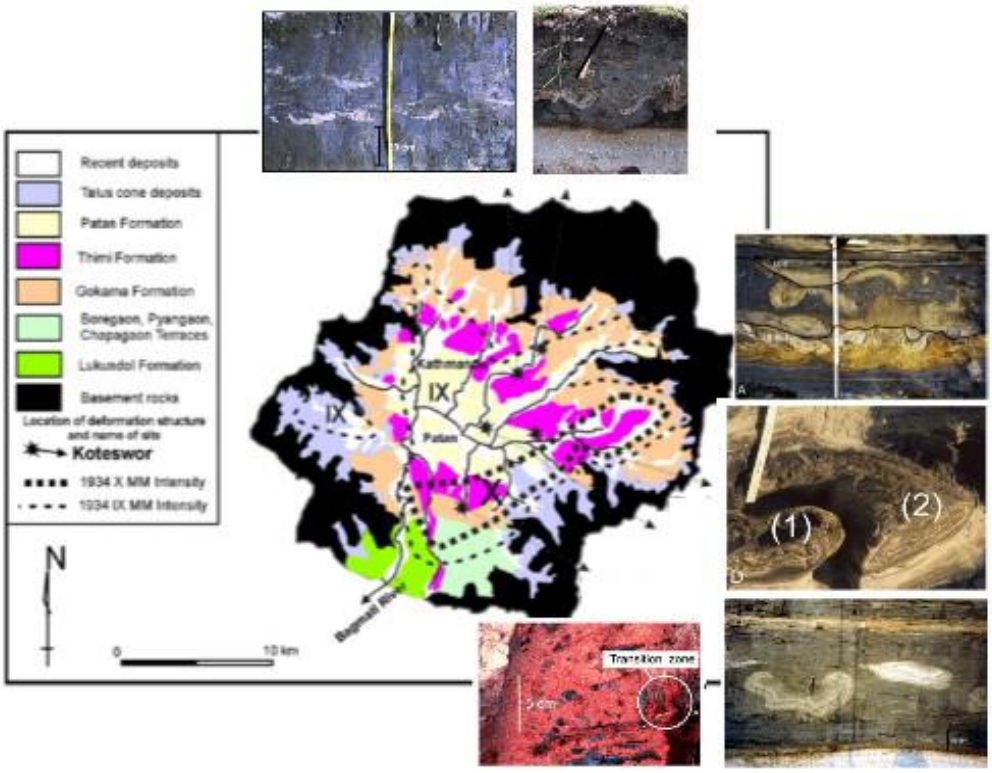
Παρόμοια ακραία ομοιόμορφα πτυχωμένα ίχνη βρίσκονται στην ακολουθία των Ανώτερων Ιμαλαΐων του Μπουτάν.

3 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΜΑΝΤΟΥ

3.1 Γενική γεωλογία της λεκάνης του Κατμαντού.

Η λεκάνη του Κατμαντού βρίσκεται στο Κατμαντού Nappe (Hagen 1969, Upreti, 1999) κατά μήκος των νοτίων πλαγιών των Ιμαλαΐων. Μια λίμνη καταλάμβανε ένα μεγάλο τμήμα της λεκάνης την χρονική περίοδο από το Πλειόκαινο έως το Πλειστόκαινο (Yoshida and Garashi 1984). Η λεκάνη αυτή σήμερα αποτελείται από μια πολύ παχιά (500-600μ) ακολουθία από ποταμολιμναία ιζήματα (Moribayashi and Maruo 1980) και συνορεύει ΝΔ με μία τεκτονική ράχη / κορυφογραμμή η οποία έχει δημιουργηθεί πάνω από το κυρίως όριο ώθησης. (Main Boundary Thrust). Τα ημι-συμπαγοποιημένα ιζήματα αποτελούνται από ιλύ, άμμους, πηλό, παχιές στρώσεις άμμου, λεπτόκοκκες έως μεσόκοκκες στρώσεις άμμου και κροκαλοπαγή με χαλίκια και χάλικες (Katel et al., 1996). Οι ιζηματογενείς φάσεις (Sakai et al., 2001, 2006) σχετίζονται με περιβάλλοντα δελταϊκά, προδελταϊκα και δελταϊκού μετώπου. Πολυάριθμες αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης έχουν καταγραφεί μεταξύ άλλων από τον Gajurel 2006 και η κλασική ονοματολογία κυρίως σχετίζεται με αναβαθμίδες στην κορυφή των δελταϊκών περιβαλλόντων οι οποίες αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια διαφορετικών σταδίων επέκτασης της λίμνης (Sakai et al.,2006), (Εικ.15). Ειδικότερα, οι σχηματισμοί Lukhundol και Boregaon-Pyangaon-Cgaoagaon εναποτέθηκαν μεταξύ 2,8 και 1Ma κατά τη διάρκεια παλαιότερων σταδίων ανάπτυξης της λίμνης. Ο σχηματισμός Gokharna σχετίζεται με αρκετά στάδια της λιμναίας ανάπτυξης μεταξύ 1Ma και 29 Kyr (Gautam et al., 2001). Ο σχηματισμός Thimi εναποτέθηκε μεταξύ περίπου 29 και 19 kyr BP (Yoshida and Igarashi 1984). Ο σχηματισμός Patan συνδέεται με το τελευταίο στάδιο της λιμναίας ανάπτυξης (10-11 kyr). Η υπερχείλιση / το σημείο εξόδου (outlet) της παλαιολίμνης η οποία συνέβη 10 χρόνια πριν (kyr ago) και ακολουθήθηκε από ποτάμια διείσδυση είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών προσφάτων ποτάμιων αναβαθμίδων (Yoshida and Gautam 1988)

Οι διεργασίες ιζηματογένεσης στην κοιλάδα του Κατμαντού ελέγχονται από την τοπική ρηγματογενή δραστηριότητα και το σύστημα αποστράγγισης των περιβαλλόντων ορεινών σχηματισμών. Σύμφωνα με τους Sakai et al., 2001 τα ενεργά ρήγματα τα οποία σχετίζονται με τον ιζηματογενή σχηματισμό της λεκάνης απορροής βρίσκονται στο νότιο τμήμα της κοιλάδας, τα ρήγματα Chandraghiri και Chobhar, τα οποία διασχίζουν τις κολλουβιακές πλαγιές και αναβαθμίδες του κατώτερου Πλειστόκαινου και στα ΒΔ της κοιλάδας το ρήγμα Kalphu Khola το οποίο διασχίζει τα μεγάλου μεγέθους γνευσιακά κροκαλοειδή στρώματα του κατώτερου Πλειστόκαινου. (Nakata et al., 1984).



Εικόνα 15: Γεωλογικός χάρτης (προσαρμοσμένος από τους Yoshida και Gautam, 1988) της υδρολογικής λεκάνης του Κατμαντού με τη θέση των παλαιο-σεισμιτών. Κατανομή ισορροπίας του σεισμού του 1934 από τους Dixitetal. (1998). Εισαγωγές τυπικών ιζηματογενών σχηματισμών που αποκαλύπτουν τις ισχυρές τεκτονικές δυνάμεις που υποβάλλονται στα ιζήματα που εξάγονται από τους Mugnieretal (2011).(NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 50).

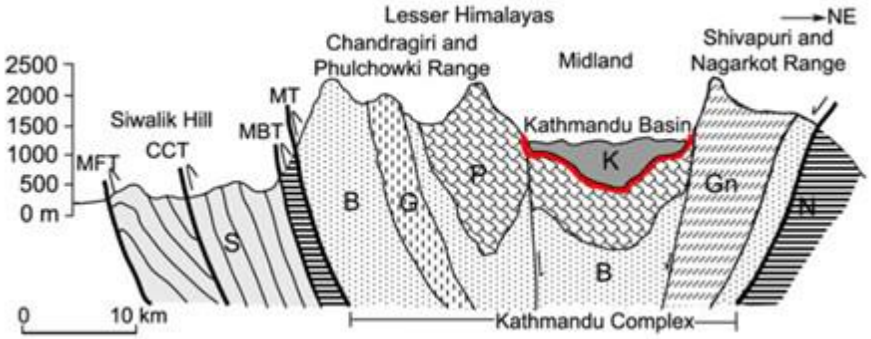
Το πολυσύνθετο τεκτονικό περιβάλλον γύρων από την λεκάνη του Κατμαντού που παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Έχει ως επίπτωση η γεωλογία της κοιλάδας να είναι ισχυρά ετερογενής. Τα νότια ιζήματα αποτελούνται κυρίως από διαβρωμένα μετα-ιζηματογενή πετρώματα των νοτίων λόφων όπως των Chandragiri και Phulchowki, και τα βόρεια ιζήματα αποτελούμενα από διαβρωμένα γνευσιακά και γρανιτικά πετρώματα προερχόμενα από τους βόρειους λόφους Shivapuri.

Τα πλέον πρόσφατα, μη συμπαγοποιημένα ιζήματα της κοιλάδας του Κατμαντού είναι υψηλά ετερογενείς ποταμολιμναίες ακολουθίες. Στο βόρειο τμήμα της κοιλάδας, τα ιζήματα είναι ανεπαρκώς ταξινομημένες, λεπτόκοκκες προς μεσόκοκκες στρώσεις άμμου, χαλίκια και ιλύεπικαλυμμένα με στρώσεις αργίλου σε κάποια σημεία. Στο νότιο τμήμα, αποτελούνται από μια παχιά ακολουθία σκουρ-γκρίζας προς μαύρης υψηλά πλαστικής αργίλου και ιλύος, συνήθως υπερκαλυμμένες και υποστρωμένες από μεσόκοκκα ιζήματα. Η μαύρη πλαστική άργιλος (η οποία στην τοπική διάλεκτο ονομάζεται Kalimati που σημαίνει μαύρο βαμβακερό χώμα) είναι πλούσια σε οργανικό υλικό, ένα γεγονός το οποίο επίσης επιβεβαιώνει την παρουσία φυσικού αερίου εντός της κοιλάδας. Η ηλικία αυτής της αργίλου τοποθετείται στην χρονική περίοδο του Πλειόκαινου προς Πλειστόκαινου σύμφωνα με τους Yoshida and Igarashi 1984.

Το πάχος του στρώματος φτάνει το μεγαλύτερο ύψος του κατά μήκος του κεντρικού τμήματος της κοιλάδας του Κατμαντού ξεκινώντας από το Satungal με κατεύθυνση προς το Lalitpur και το Bakhtapur με μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος (βάθος) 300μ.

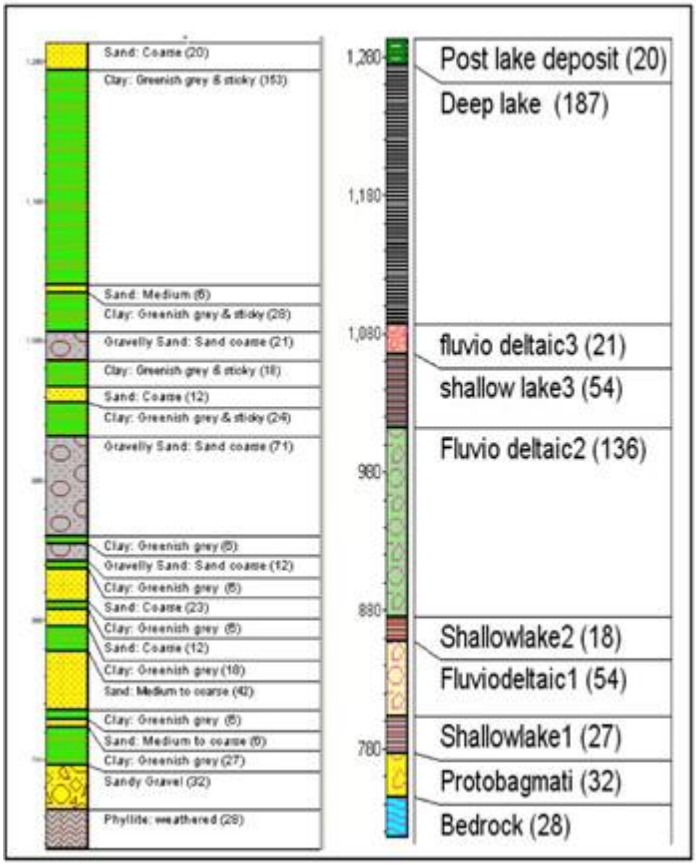
Γεωτρήσεις δείχνουν ότι η λεκάνη έχει άνω των 500μ. βάθος, πρωτογενώς γεμάτη με ελαφρύ ίζημα. Το πάχος της αργίλου επίχης αυξάνεται δραματικά προς τις περιοχές Bumgmati και Harisidhi προς τα νότια. Ειπλέον οι αλλουβιακές επιπτώσεις στα ποτάμια κανάλια, στα πλημμυρικά πεδία καιο στα ριπίδια είναι εξαπλωμένες σε όλη την κοιλάδα, και χρονολογούνται στην περίοδο του Ολόκαινου (Yoshida and Igarashi

1984). Πολυάριθμα καλώς ανεπτυγμένα αλουβιακά ριπίδια βρίσκονται επίσης κατά μήκος των άκρων της κοιλάδας, χαρακτηριζόμενα από απόκρημνες πλαγιές οι οποίες γίνονται επίπεδες και πλαταίνουν προοδευτικά προς την κοιλάδα (γεωλογικός χάρτης Εικ. 15).



Εικόνα 16 : Μια σχηματική γεωλογική διατομή μέσω του κεντρικού Νεπάλ (μετά από τους Sakaietal., 2002, και Stöcklin και Bhattarai, 1981). Τα κεφαλαία γράμματα αντιστοιχούν στην ονοματολογία που αναπτύχθηκε από τους Sakaietal για την περιγραφή της γεωλογικής λεκάνης του Κατμαντού: S : Ζώνη πετρωμάτων Siwalik , B: Ζώνη πετρωμάτων Bhimphedi, P: Ζώνη πετρωμάτων Phulchowki, N: Σχηματισμοί πετρωμάτων Nawakot, G: Γρανιτική ζώνη πετρωμάτων, Gn: Σχηματισμός Γνέυσιων , K: Σχηματισμός πετρωμάτων της λεκάνης του Kathmandu , MFT: Κύριο Μέτωπο της Επώθησης, CCT: Επώθηση Central Churia, MBT: Κύρια οριακή Επώθηση , MT: Επώθηση Mahabharat (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 50).

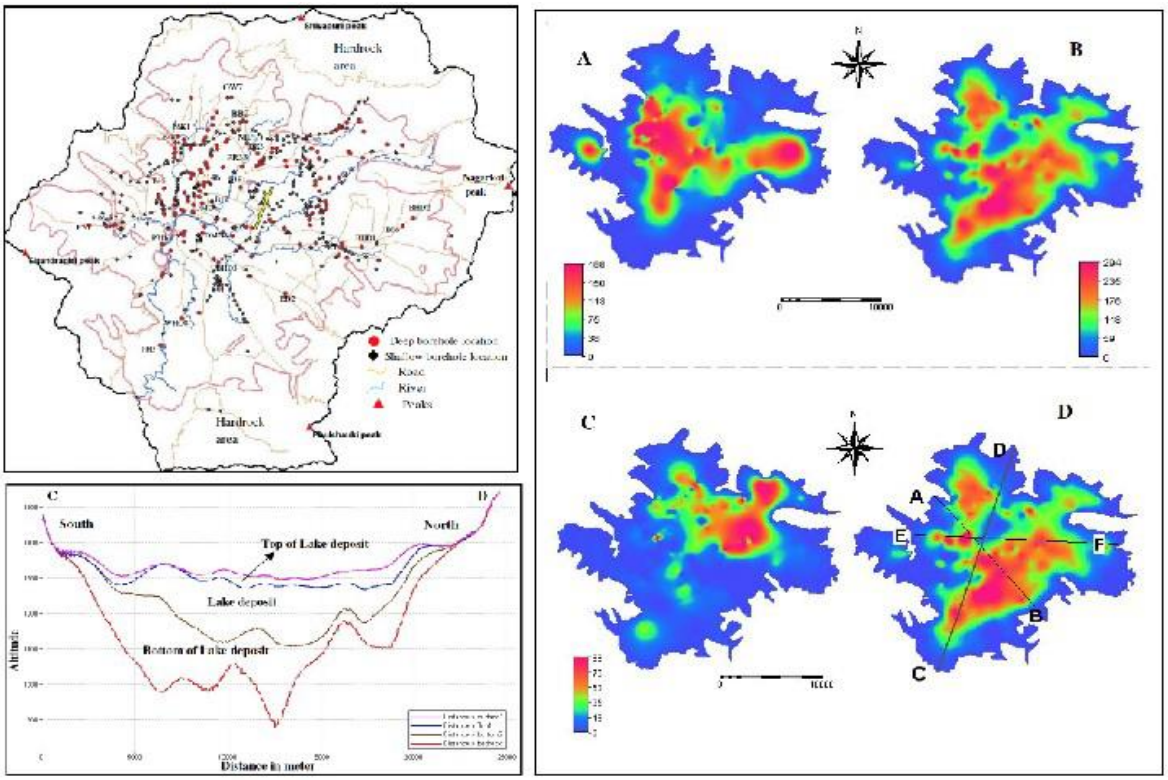
Όλες οι παραπάνω πληροφορίες υποδηλώνουν ισχυρώς την ετερογενή φύση της γεωμετρίας και της στρωματογραφίας του υποβάθρου της κοιλάδας του Κατμαντού. Ο Piya (2004) συνέθεσε ένα πολύ λεπτομερές τρισδιάστατο γεωλογικό μοντέλο της κοιλάδας, χρησιμοποιώντας 168 μετρήσεις γεωτρήσεων από μια ποικιλία διαφορετικές πηγές. Οι πηγές περιλαμβάνουν, εκτός των άλλων, την αναφορά του Ιαπωνικού Οργανισμού Διεθνούς Συνεργασίας (Jika 1990) για ένα σχέδιο διαχείρισης του υπογείου νερού στην κοιλάδα του Κατμαντού, το οποίο αποκτήθηκε από την Βιβλιοθήκη του Οργανισμού Υδάτων και Αποχέτευσης του Νεπάλ (NWSC), μια έκθεση από τη Γεωλογική Υπηρεσία της Ινδίας (GSI) για τα υπόγεια αποθέματα νερού της κοιλάδας του Κατμαντού (1966), και αναφορές Περιβαλλοντικού Γεωλογικού Σχεδίου (EGP) του Τμήματος Γεωλογίας και Ορυχείων (DMG) για τις υδρογεωλογικές συνθήκες και εν δυνάμει ιζηματογενή (αργιλικά) εμπόδια στην κοιλάδα του Κατμαντού (1998).



Εικόνα 17: Το πιο βαθύ γεωλογικό αρχείο στην κοιλάδα του Κατμαντού (Piya, 2004): (αριστερά) Ημερολόγιο γεωτρήσεων με λιθολογικές πληροφορίες. και (δεξιά) ημερολόγιο γεώτρησεων με στρωματογραφική ακολουθία. Ο αριθμός στον βραχίονα υποδεικνύει το πάχος κάθε σχηματισμού ή αποθέσεων (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 50).

Η βαθύτερη γεώτρηση την οποία αναφέρει ο Piya (2004) στην κοιλάδα του Κατμαντού απεικονίζεται στην εικόνα 17. Οι μετρήσεις της γεώτρησης αποκαλύπτου την ιστορική προέλευση των ιζημάτων της λεκάνεις, ξεκινώντας με 32μ. μεσόκοκκων ιζημάτων (στρώματα μεσόκοκκης άμμου και χαλικιών) τα οποία μεταφέρθηκαν από το πρωτογενές ποτάμιο σύστημα του Μπαγμάτι (Hagen 1968) από τους βόλους λόφους Shivapuri πριν τον σχηματισμό της λίμνης. Κατόπιν 27μ. γκρίζας αργίλου στον πυθμένα της λίμνης. Στη συνέχεια 54μ. από μέση έως χονδρόκοκκη άμμο η οποία αποτέθηκε ως μια ακολουθία ποτάμιας δραστηριότητας, η οποία διακόπτει την απόθεση της αργίλου για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Επί πλέον 18μ. παχιάς ιζηματογενούς αργίλου ακολουθούμενης από 136μ.διαστρωματομμένης άμμου σε χαλικοειδή άμμο με λεπτές αποθέσεις αργίλου, η οποία, σύμφωνα με τον Piya αντιστοιχεί με την πλέον ρευστή περίοδο της ποτάμιας δραστηριότητας.

Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται η τοποθεσία όλων των γεωτρήσεων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, σχέδια / απεικονίσεις των ετερογενών ιζηματογενών σχηματισμών σε ποικίλα βάθη και τομές οι οποίες αποκαλύπτουν την ισχυρά ετερογενή φύση της κοιλάδας.



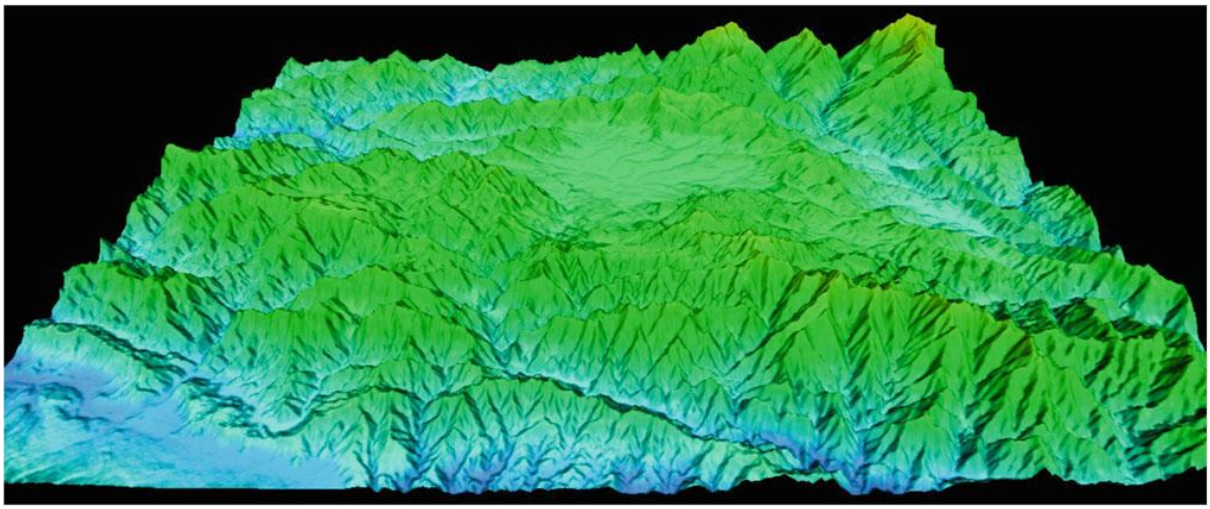
Εικόνα 18 : Πάνω αριστερά : Θέση γεωτρήσεων στη λεκάνη του Κατμαντού. Δεξιά : 3D γεωλογικό μοντέλο, που δείχνει το πάχος των αποθέσεων της λίμνης (A), προ-λιμναίων αποθέσεων (B) και τις μετα-λιμναίες αποθέσεις(C) , καθώς και η θέση της επαφής των αποθέσεων (C)-(D) που φαίνεται στο κάτω αριστερό μέρος (Piya, 2004). (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 52).

3.2 Η λεκάνη απόθεσης του Κατμαντού

Η ορεινή κοιλάδα του Κατμαντού (Εικ. 19) περικλείεται από τις οροσειρές Phulchauki και Chandragiri, περιέχει ιζηματογενή πετρώματα της ομάδας του ορεινού σχηματισμού Phulchauki από ανατολή προς δύση, και συνορεύει με την οροσειρά Shivapuri περιέχοντας μεταμορφωμένα πετρώματα του ορεινού σχηματισμού Bhimphedi μαζί με γνεύσιους και μιγματίτες προς βόρεια και ανατολικά. Η τεκτονική της θέση είναι παρόμοια με αυτή της κοιλάδας του Κασμίρ στα ΒΔ Ιμαλάια. Η λεκάνη του Κατμαντού η οποία έχε σχήμα αμφιθεατρικό βρίσκεται γύρω από τις πηγές του ποταμού Μπαγμάτι με το επίπεδό της να τοποθετείται σε μεγάλο υψόμετρο. Ο ποταμός Μπαγμάτι πηγάζει από το Μέσω Νεπάλ ενώ άλλοι μεγάλοι ποταμοί πηγάζουν από τα Μεγάλα Ιμαλάια ή το οροπέδιο του Θιβέτ και δημιουργούν βαθιές χαραδρώσεις στο κεντρικό Νεπάλ (Yonechi 1973). Η κοιλάδα έχει γεμίσει από λιμναία, ποτάμια και δελταϊκά ιζήματα της Πλειο-Πλειστόκαινης περιόδου. Η μονοτονία αυτών των οριζοντίως αποτεθειμένων ιζημάτων περιστασιακά διακόπτεται από ανυψώσεις μικρών ορεινών όγκων από πετρώματα του υποβάθρου.

Η ελλειπτικού σχήματος λεκάνη του Κατμαντού έχει μήκος περίπου 30 χιλ. με κατεύθυνση ανατολή –δύση και περίπου 25 χιλ. πλάτος με κατεύθυνση βόρεια – νότια. Η κοιλάδα καταλαμβάνει περιοχή περίπου 650 τετ.χιλ. και το υψόμετρό της ποικιλει από 1220μ. στην έξοδο του ποταμού Μπαγμάτι, νότια του Daksinkali έως 1380μ. προς τον βορά. Ο Μπαγμάτι είναι ο κυρίως ποταμός καθώς και καθώς και η μοναδική αποστραγγιστική έξοδος της κοιλάδας. Η κεντρομόλος αποστραγγιστική μέθοδος της κοιλάδας διευκολύνεται από τη ροή πολλών παραποτάμων οι οποίοι ρέουν από κάθε κατεύθυνση. Π.χ. οι Bishnumati και Dhobi Khola εισρέουν από τον βορά, ο Hanumante από την ανατολή, ο Godavari από τα νοτιοανατολικά και ο Nakhu Khola

από τα νότια. Όμως μια λεπτομερής εξέταση των ροών επίσης αποκαλύπτει ένα ορθογώνιο πρότυπο αποστράγγισης (Yonechi 1973). Μορφομετρική ανάλυση του ποταμού Μπαγμάτει καταδεικνύει ότι κάποιοι από τους παραποτάμους του έχουν αναπτύξει σχετικά σταθερά κανάλι ροής. Όμως ο έκτος στη σειρά ποταμός Μπαγμάτι δείχνει ορισμένες ενδείξεις ανωριμότητας. (Bajracharya και Verma 1989).



Εικόνα 19: Ψηφιακό μοντέλο ανύψωσης της κοιλάδας του Κατμαντού και των γύρω περιοχών στο κεντρικό Νεπάλ (Megh Raj Dhital, σελ 449).

Ο Hagen (1969) παρατήρησε ότι ο ποταμός Μπαγμάτι δεν μπορούσε να συμβαδίσει με την άνοδο της οροσειράς του Mahsnstsy και είχε φραχθεί ώστε να δημιουργήσει μια λίμνη στο νεώτερο Πλειστόκαινο. Οι Koirala et al. (1993) ανακάλυψαν διαστρωματωμένες λιμναίες και ποτάμιες αποθέσεις στο νότιο περιθώριο της λεκάνης και συμπέραναν ότι είχαν υπάρξει πολλά επεισόδια δημιουργίας φραγμάτων. Ο Yonechi (1973) αναγνώρισε τις ακόλουθες επιφάνειες στη λεκάνη του Κατμαντού με σειρά από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα:

1. Επιφάνεια Kirtipur
2. Επιφάνεια Patan I
3. Επιφάνεια Patan II
4. Επιφάνεια Κατμαντού I
5. Επιφάνεια Κατμαντού II

Οι Moribayashi και Maruo (1980) διεξήγαγαν βαρομετρική έρευνα προκειμένου να χαρτογραφήσουν την υπόγεια τοπογραφία της κοιλάδας και κατέληξαν σε μέγιστο βάθος περίπου 650μ.στα πέριξ του Baneshwar. Ανακάλυψαν ότι τα λιμναία ιζήματα έχουν χαμηλή πυκνότητα και είναι παχύτερα στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης. Επίσης ανακάλυψαν μια τάφρο η οποία βασικά κτείνεται από βροά προς νότο και η οποία θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει την πρώιμη μορφή του ποταμού Μπαγμάτι του Hagen (1969).

Ο Kizaki (1994) διαχώρισε την παλαιολίμνη του Κατμαντού σε γηραιότερη και νεώτερη μορφή όπου η παλαιολίμνη βαθμιαία μετακινήθηκε από τον νότο προς τον βορά εξ αιτίας της ανύψωσης της οροσειράς του Mahabharat.

Οι λιμναίες και θαλάσσιες αποθέσεις της κοιλάδας περιέχουν τύρφη, άργιλο, ανθρακοφόρο άργιλο, άμμο, χαλίκι και κροκάλες.

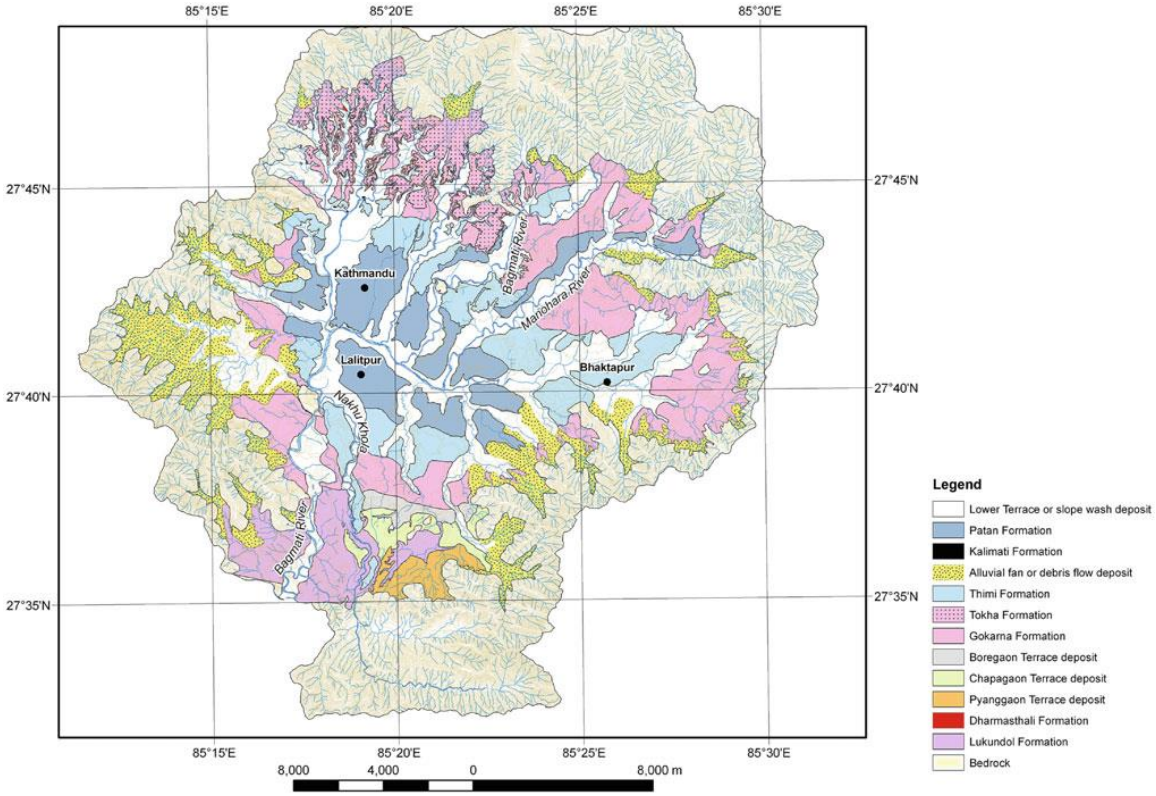
Βρίσκονται αποτεθειμένα ανομοιόμορφα στα πετρώματα των ορεινών σχηματισμών του Pulchauki και Bhmphedi. Ο Dhundial (1966) έκανε πρώιμες έρευνες στην κοιλάδα του Κατμαντού και κατέταξε τα ιζήματα σε Βασαλτικά Στρώματα από Κροκάλες (μια παχιά διαδοχή από χάλικες και κροκάλες) περιορισμένα στο νότιο περιθώριο της κοιλάδας, τον σχηματισμό Lokundol (λιγνίτες, ελαφρώς ανθρακοφόρα, άργιλος, ιλύς και άμμος), τον σχηματισμό Kalimati (ανθρακοφόρος άργιλος, ιλύς και άμμος) και τον σχηματισμό Sankhu (χαλικοειδής άμμος, ιλύς και άργιλος) αναπτύχθηκαν προς το βόρειο τμήμα της κοιλάδας και τον Σχηματισμό Chapagaon (χάλικες, γρανουλίτες, άμμος, και ιλύς) ο οποίος έχει κατανεμηθεί στα νότια της κοιλάδας.

Οι Yoshida και Igarashi (1984) διενήργησαν μια λεπτομερή χαρτογράφηση καθώς και παλαιομαγνητικές και παλυνολογικές έρευνες των ιζημάτων. Διαχώρισαν αυτές τις αποθέσεις στις εξής οκτώ στρωματογραφικές μονάδες

1. Σχηματοσμός Lukundol
2. Αποθέσεις αναβαθμίδων Pyanggaon
3. Αποθέσεις αναβαθμίδων Chapangaon
4. Αποθέσεις αναβαθμίδων Borengaon
5. Σχηματισμός Gokarna
6. Σχηματισμός Thimi
7. Σχηματισμός Patan
8. Αποθέσεις αναβαθμίδων του κατώτερου επιπέδου

Μεταγενέστερες έρευνες έχουν στοιχειοθετήσει μια περίπλοκη κατανομή των ιζημάτων στην κοιλάδα. Π.χ. ο Sakai (2001) συμπεριέλαβε τις παραπάνω τρεις αποθέσεις αναβαθμίδων μέσα στον σχηματισμό Itaiti τον οποίο αυτός κατέγραψε. Επίσης διαχώρισε τα ιζήματα της κοιλάδας του Κατμαντού στους σχηματισμούς Tarebhir, Lukundol και Itaiti προς τα νότια και στους σχηματισμούς Bagmati και Kalimati οι οποίοι περιέχουν βασαλτικά και λιγνητικά μέρη καθώς και στον σχηματισμό Patan στο κεντρικό μέρος της κοιλάδας. Στο βόρειο μέρος της λεκάνης οι Shresta et al. 1998 και οι Dill et al. 2003 έχουν διαχωρίσει τον σχηματισμό Tokha παρουσιάζοντας κατ' αρχάς ανακατεμένες αποθέσεις καναλιών και τον σχηματισμό Gkokarna ο οποίος κυριαρχείται από αναστομωμένα κανάλια. Τα κύρια λιθοστρωματογραφικά τμήματα κατανέμονται στην λεκάνη του Κατμαντού ως εξής:

- Ο Σχηματισμός Lukondol (Εικ. 20) περιλαμβάνει ασθενώς εναποθετημένα στρώματα αργίλου, ιλύος και άμμου με διακλάσεις λιγνίτη. Οι άργιλοι και οι ιλύες είναι συνήθως ανθρακοφόροι και περιλαμβάνουν φυτικά υπολείμματα (Yoshida and Garashi 1984). Αυτός ο σχηματισμός αναπτύσσεται μόνο στο νότιο περιθώριο της λεκάνης και αποτίθεται ανομοιόμορφα στα πετρώματα του ορογενετισκού σχηματισμού Pulkhauki.



Εικόνα 20: Ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις της κοιλάδας του Κατμαντού (Megh Raj Dhital, σελ 450).

Ο σχηματισμός Lukundol έχει πάχος περισσότερο από 600μ. και υποδιαιρείται στα ακόλουθα τμήματα (Dongol 1985) :

a) Το κροκαλοπαγές βασικό βασαλτικό (basal) τμήμα είναι ευδιάκριτο στις περιοχές Khahare Khola και Tare Bhir. Αυτό το τμήμα ορίζεται επίσης ως ο σχηματισμός Tare Bhir (Sakai 2001) Η εκτεθειμένη παχύτητά του έχει ύψος περίπου 60μ. στην περιοχή Tarebir και περίπου 350μ.στα πέριξ της περιοχής Dukuchap. Περιέχει χαλικοειδή κροκαλοπαγή με φακοειδή και λεπτα στρώματα άμμου και ιλύος. Τα στρογγυλεμένα και υποστρογγυλεμένα κλαστικά πετρώματα συντίθενται από πρασινο-γκρίζους μεταψαμμίτες, σκουροπράσινους φυλλίτες, ροζ χαλαζίτες, ασβεστόλιθους και γρανίτες. Η παρουσία κροκάλων από τουρμαλινιτικό γρανίτη έχοντας διάμετρο έως 2μ. δείχνει ότι το υλικό τροφοδοτήθηκε από γρανίτες του Narayathang ή Palung. Η κατεύθυνση της παλαιάς κοίτης είναι προς τα δυτικά και τα βορειοδυτικά. Αυτά τα κροκαλοπαγή διαβαθμίζονται σε χαλικοειδείς ψαμμίτες, διαστρωμματωμένους ψαμμίτες και ιλυόλιθους δίχνοντας μια νότια ροή του ρεύματος της παλαιάς αποστράγγισης (Dongol 1985, σ. 46).

b) Το Βασικό Τμήμα ακολουθείται ανεβαίνοντας στρωματογραφικά προς τα επάνω από μια διαβρωσιγενή επαφή από καλώς στρωματομένη διαδοχή από ψαμμίτες, ιλυόλιθους και αργιλο-πηλολίθους, οι οποίοι ανήκουν στο Λιγνιτικό Τμήμα υπάρχουν λίγες λιγνιτικές – επαφές (seams) κυμαινόμενες από 1,5 έως 2μ. σε πάχος. Ο Tuladhar (1982) αναγνώρισε επτά λιγνιτικούς ορίζοντες σε αυτό το τμήμα. Επίσης υπάρχουν ογκώδη χαλικοειδή στρώματα ιλύος τα οποία έχουν αποτεθεί από δεβριτικές ροές. Αυτό το τμήμα έχει επίσης αναπροσδιορισθεί ως ο Σχηματισμός Lukundol (Sakai 2001). Έχει πάχος 115μ. και έχει αποτεθεί προωτογενώς σε ένα λιμναίο περιβάλλον με κάποιες εισροές ιζημάτων από δεβριτικές και δελταϊκές ροές (Dongol 1985). Ο Dongol (1985) ανέφερε έναν αριθμό από απολιθώματα ασπόνδυλων από το Λιγνιτικό Τμήμα. Αυτά περιλαμβάνουν δόντια ελέφαντα (cf. E. hysudricus και E. plaifrons), δόντια αρτιοδάκτυλα, ένα

δόντι γουρουνιού, τρία κέρατα και έναν αριθμό μετακαρπίων βοειδών. Οι καταγραφές των απολιθωμάτων οι αναφερόμενες σε κάποιες πρωιμότερες και μεταγενέστερες εκδόσεις.είναι πλαστές (Talent et al. 1991). Κατά συνέπεια τα καταγραφόμενα σε εργασίες απολιθώματα του V.J. Gupta ως συγγραφέα ή συνεργάτη καθώς και αυτές οι οποίες αναφέρονται στην μελέτη του στα απολιθώματα παραλείπονται.

c) Το Τμήμα της λεπτοστρωματωμένης ιλύος (Laminated Silt Member) διαδέχεται το Λιγνιτικό Τμήμα χωρίς κανένα στρωματογραφικό κενό. Συντίθεται από άργιλο και ιλύ και περιέχει πολλά φυλλοειδή αποτυπώματα. Αυτό το τμήμα έχει πάχος περίπου 40μ. και αποτίθεται πρωτογενώς σε λιμναία περιοχή (Dongol 1985).

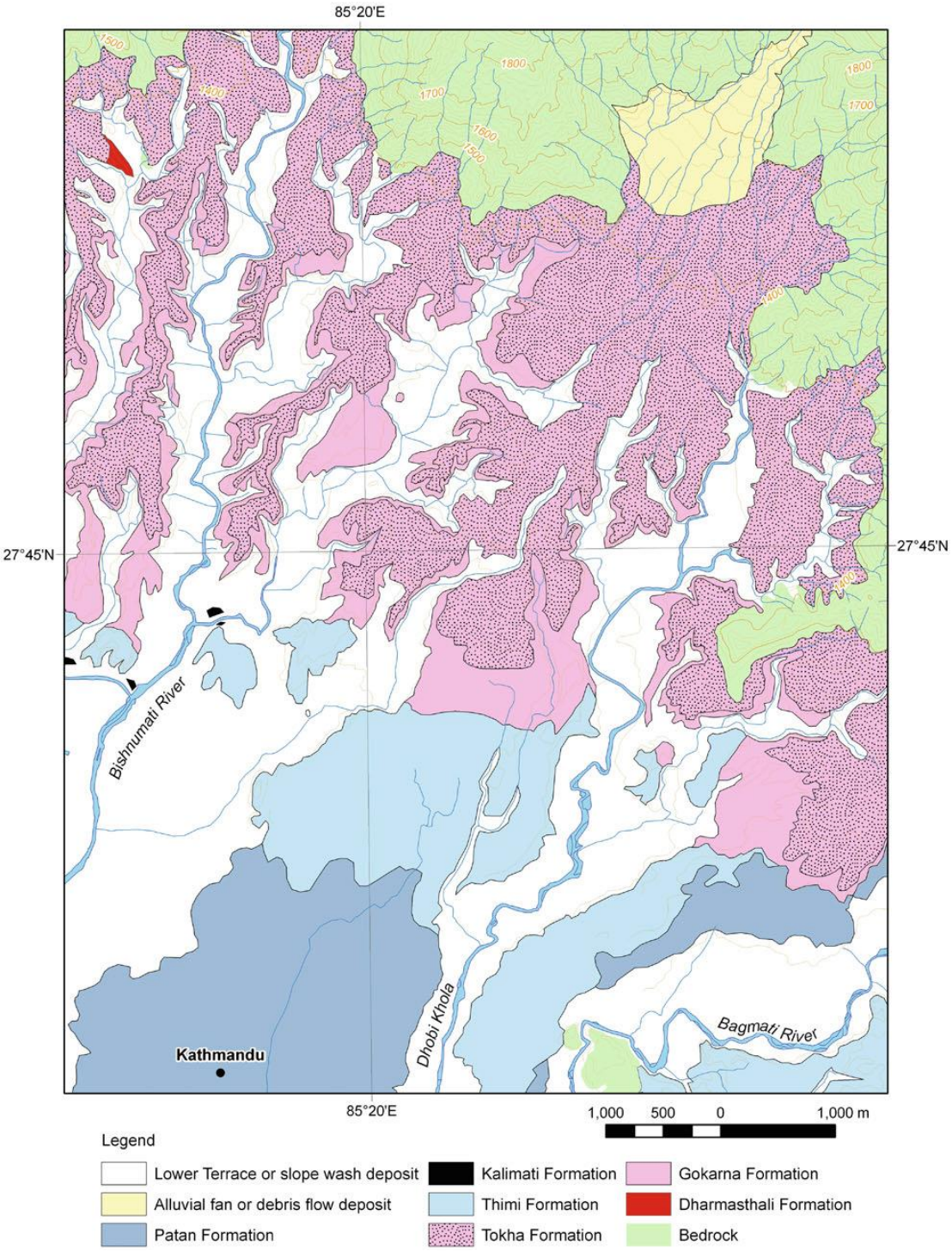
d) Το Ανώτερο Χαλικοειδές Τμήμα έχει περίπου 50μ. πάχος και επικαλύπτει το Τμήμα της λεπτοστρωματωμένης Ιλύος κατά μήκος της οροσειράς Chhampi – Itari. Περιέχει χαλικοειδή και κροκαλοειδή κροκαλοπαγή, τα οποία φέρουν κλαστικά θραύσματα από μεταψαμμίτες, χαλαζίτες, ασβεστόλιθους, φυλλίτες και σχιστόλιθους. Το τμήμα αυτό αντιπροσωπεύει αλλουβιακά ριπίδια και ποτάμιες αποθέσεις προερχόμενες από τον σχηματισμό των πετρωμάτων της οροσειράς του Pulkhauki – Chandragiri (Dongol 1985)

- Οι Αποθέσεις αναβαθμίδων Pyanggaon (Εικ. 20) βρίσκοντι μόνο στο νότιο τμήμα της κοιλάδας όπου ανοιμοιόμορφα επικαλύπτουν τα πετρώματα το υποβάθρου ή τον σχηματισμό του Lukundol. Αποτελείται από στρογγυλεμένους έως υποστρογγυλεμένους χάλικες ποτάμιας προέλευσης προερχόμενοι από ασβεστόλιθους, μεταψαμμίτες και φυλλίτες. Έχει πάχος περισσότερο από 5μ. κοντά στο Pyanggaon και η ανύψωσή του από τον ποταμό Μπαγμάτι κυμαίνεται από 180 έως 200μ. (Yoshida – Igarashi 1984)

- Οι Αποθέσεις αναβαθμίδων Chapagaon επίσης περιορίζονται στα νότια της κοιλάδας του Κατμαντού και ανομοιόμορφα υπέρκεινται του σχηματισμού του Lukundol. Αυτές οι αναβαθμίδες έχουν περίπου 10μ. πάχος στο Chapangaon και περιέχουν υποστρογγυλεμένους χάλικες από ασβεστόλιθο, μεταψαμμίτη και φυλλίτη. Οι αναβαθμίδες παρουσιάζουν ωχρά κόκκινα χρώματα και η ανύψωσή τους από τον ποταμό Μπαγμάτι ποικίλλει από 160 έως 180μ (Yoshida – Igarashi 1984).

- Οι αποθέσεις αναβαθμίδων Borengao, επίσης κατανέμονται μόνο στο νότιο τμήμα της κοιλάδας και ανομοιόμορφα υπέρκεινται του σχηματισμού Lukundol. Περιέχουν στρογγυλεμένους χάλικες και κροκάλες προερχομένους από τους νότιους ορεινούς σχηματισμούς. Υπάρχουν επίσης κάποιες διακλάσεις από στρώματα άμμου και ιλύος μαζί με τους χάλικες. Αυτές οι αναβαθμίδες έχουν περισσότερο από 5μ. πάχος και η ανύψωσή τους από τον ποταμό Μπαγμάτι ποικίλει από 120 έω2 160μ. (Yoshida – Igarashi 1984).

- Ο Σχηματισμός Dharmasthali βρίσκεται μόνο στο βόρειο τμήμα του Κατμαντού (Εικ. 21) και αποτελείται από στρώματα ιλύος με κάποιες διακλάσεις από χαλίκι και άμμο (Sakai et al. 2008). Αυτός ο σχηματισμός έχει πάχος περίπου 30μ. και ανομοιόμορφα υπέρκειται του υποβάθρου. Περιστασιακά, τα στρώματα αυτά βυθίζονται ελαφρά προς τα νότια και μπορεί να αντιπροσωπεύουν τις τοπογραφικές κλίσεις κατά τη διάρκεια της απόθεσής τους. Μερικά στρώματα παχιά έως πολύ παχιά ογκώδη, κακώς ταξινομημένα από ιλύ και άμμο περιέχουν δεβριτικές ροές από φυτικά υπολείμματα. Αυτά τα ιζήματα έχουν αποτεθεί σε υποθαλάσσια πλάγια κεκλιμένα επίπεδα και αντιπροσωπεύουν δεβριτικές ροές, χαμηλής κλίμακας ροές κόκκων και αποθέσεις μαιανδρικών ποταμών (Sakai et al. 2008). Βασισμένα σε παλαιομαγνητικές χρονολογήσεις από τους Gautam et al. (2001), αυτά τα πετρώματα έχουν ηλικία μεγαλύτερη από 780 ka και μπορεί να συσχετισθούν με τους σχηματισμούς των Tarbhir, Lukundol και Itaiti οι οποίοι είναι κατανεμημένοι στο νότιο περιθώριο της κοιλάδας (Sakai et al. 2008).



Εικόνα 21 : Απεικόνιση Ποτάμιων και λιμναίων ιζημάτων που αποτελούν το βόρειο μερος της κοιλάδας του Κατμαντού (Megh Raj Dhital, σελ 452).

- Ο Σχηματισμός Kalimati κατά κύριο λόγο αποτελείται από στρώματα μαύρης αργίλου ή ιλύος με κάποια λεπτά στρώματα από λεπτή έως πολύ λεπτή άμμο και διατομίτες (γη διατόμων) (Sakai et al. 2008). Αυτός ο σχηματισμός έχει πάχος μεγαλύτερο από 200μ. (Dill et al 2001). Τα ιζήματα αυτά έχουν συσσωρευτεί στο κέντρο της λίμνης, κυρίως από κατακάθιση αιωρούμενων σωματιδίων και αντιπροσωπεύουν αποθέσεις προδελταϊκών περιοχών οι οποίες διακόπτονται από ασυνεχείς τουρβιδιτικές ροές από ένα όμορο δέλτα. Η ηλικία τους κυμαίνεται περίπου από 12800 έτη έως 29300 έτη από σήμερα. Αυτός ο σχηματισμός είναι ένα

ισοζύγιο σύστημα το οποίο μοιάζει με τη λεκάνη απορροής των σχηματισμών Patan, Tokha και Thimi, και αυτή η παχιά ακολουθία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τα παλαιότερα ισοζύγια του σχηματισμού της Gokarna τα οποία βρίσκονται σε βαθύτερα επίπεδα (Sakai et al. 2008)

- Ο Σχηματισμός Gokarna είναι μια ποτάμια-λιμναία απόθεση η οποία καταλαμβάνει το βόρειο μέρος της κοιλάδας. Περιέχει σκουρο-καφέ χρώματος λεπτοστρωμένη αρκοσική άμμο, ιλυούχο άργιλο και τύρφη. Επίσης υπάρχουν κάποια στρώματα μαύρης ιλύος και αργίλου τα οποία φέρουν διατομίτες. Αυτός ο σχηματισμός συχνά περιέχει απολιθώματα ξύλου. Ο σχηματισμός Gokarna έχει περισσότερο από 21μ πάχος στην περιοχή Gokarna, έχει περίπου 70μ. πάχος στην περιοχή Mulpani και περισσότερο από 50μ. πάχος στο νότιο περιθώριο του σχηματισμού. Η ανύψωσή του από τον ποταμό Μπαγμάτι ποικίλει από 80 έως 120μ. και η ηλικία του κυμναίνεται από 50 έως 34 ka (Yoshida and Igarashi 1984; Sakai et al. 2008) Ο σχηματισμός Gokarna αποτέθηκε σε μια ποικιλία από ποτάμια, δελταϊκά και λιμναία περιβάλλοντα. Νότια της Gokarna παριέχει

a) Παχιά διαστρωματωμένη άμμο με διακλάσεις στρωμάτων από ιλύ και χαλίκια πάχους περίπου 20μ. τα οποία αντιπροσωπεύουν δελταϊκές αποθέσεις ακολουθούμενες βόρεια από διαστρώσεις μαύρης αμμώδους ιλύος έως 5μ. πάχος και άμμου με κυματοειδείς ανοδικές διαστρωματώσεις οι οποίες ανήκουν στη δελταϊκή διαδοχή.

b) Παράλληλα στρώματα από προδελταϊκές αποθέσεις

c) Στρώματα τραπεζοειδή διαστρωματωμένης άμμου έως 10μ. πάχος αποθέσεων δελταϊκού σχηματσμού

d) Παράλληλα ή σκαφοειδή διαστρωματωμένα στρώματα χαλικώδους άμμου ή αμμωδών χαλίκων με ιλύ περίπου 2μ. πάχους τα οποία συσσωρεύονται και στα μαιανδρικού τύπου και στα διαπλεκόμενα κανάλια (Sakai et al. 2008).

- Ο ποταμο-λιμναίος σχηματισμός Thimi κατανέμεται επίσης κατά κύριο λόγο στο βόρειο τμήμα της κοιλάδας. Ανομοιόμορφα υπέρκειται του σχηματισμού Gokarna και βαθμιαία κινείται σε σχηματισμό λεκάνης προς τον σχηματισμό Kalimati (Sakai et al. 2008) Αυτός ο σχηματισμός περιέχει γκρίζου έως ανοιχτού καφέ χρώματος ιζήματα τα οποία αποτελούνται από αρκοσική άμμο, ιλύ, άργιλο, τύρφη και χαλίκια. Τα χαλίκια δημιουργούνται αποκλειστικά από κλαστικά θραύσματα γνεύσεων και γρανιτών τα οποία προέρχονται από τον ορεινο σχηματισμό Shivapouri. Αυτός ο σχηματισμός έχει πάχος περίπου 13μ. στην περιοχή Pashupati Nath και ανυψώνεται από τον ποταμό Μπαγμάτι από 50 έως 80μ. (Yoshida and Igarashi 1984). (Yoshida and Igarashi 1984). Μερικά αμμούχα στρώματα παρουσιάζουν μεγάλης κλίμακας διαστρωμάτωση έως 20μ. πάχος στο νότιο περιθώριο των αναβαθμίδων της περιοχής Thimi. Το περιβάλλον απόθεσης είναι παρόμοιο με αυτό του σχηματισμού της Gokarna και η ηλικία της απόθεσης κυμαίνεται από 34 έως 24 ka (Sakai et al. 2008).

- Οι Shrestha et al. (1998) κατέγραψαν τον σχηματισμό Tokhaστο βόρειο τμήμα της κοιλάδας του Κατμαντού, ενώ οι Yoshida και Igarashi (1984) είχαν συμπεριλάβει αυτόν τον σχηματισμό στον κατ' αυτούς σχηματισμό Gokarna. Οι Sakai et al. (2008) κατέγραψαν ένα διαβρωσιγενές χάσμα μεταξύ των σχηματισμών Gokarna και Tokha. Ο σχηματισμός Tokha έχει επίπεδη βάση και ο σχηματισμός του αρχίζει με ωχρή – πράσινη ιλύ ή ιλυούχα άμμο και κάποιους φακοειδείς σχηματισμούς από χαλίκια ακολουθούμενα από μαύρη ιλύ με έναν λεπτό ορίζοντα γης διατόμων. Υπάρχουν επίσης περιοχές όπου ο σχηματισμός Tokha ξεκινά με μεγάλο πάχος, (έως 3μ.), μαύρης ιλύος με διατομίτες διαδεχόμενοι από πολύ παχιά, (έως 5μ.) στρώματα άμμου με μεγάλης κλίμακος εγκάρσια διαστρωμάτωση και κάποια στρώματα χαλικώδους άμμου και μάυρης ιλύος. Αυτός ο σχηματισμός αποτέθηκε σε ρυάκια και έλη. Η διατομιτοφόρα μαύρη ιλύς και η υπερκείμενη άμμος αποτίθενται σε προδελταϊκά και δελταϊκά περιβάλλοντα αντίστοιχα. Αυτός ο σχηματισμός κυμαίνεται ηλικιακά από 20 έως 14 ka Sakai et al. (2008)

- Ο Σχηματισμός Patan κατανέμεται κατά κύριο λόγο στις αστικές περιοχές των Patan και Κατμαντού και υπέρκειται ομοιόμορφα του σχηματισμού Kalimati στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, αλλά δείχνει ένα διαβρωσιακό χάσμα στους σχηματισμούς Thimi και Gokarna. Μερικά απομονωμένα εκθέματα γίνονται επίσης

ορατά στις απόκρημνες όχθες των ποταμών Μπαγμάτι και Manohara. Περιέχει γκρίζες έως ελαφρο-καφέ ποταμολημναίες αποθέσεις αποελούμενες από λεπτοστρωματωμένα αρκοσική άμμο, ιλύ, άργιλο και τύρφη. Η ανύψωση από τον ποταμό Μπαγμάτι ποικίλει από 20 εως 50μ. (Yoshida and Igarashi 1984). Το κατώτερο μέρος αυτού του σχηματισμού περιέχει παχέως εγκάρσια διαστρωματωμένη άμμο η οποία ανήκει στον δελταϊκό σχηματισμό και κινείται βόρεια προς διαστρωματωμένα στρώματα ιλύος και άμμου τα οποία ανήκουν σε ποτάμια κανάλια και πλημμυρικά επίεδα. Ο σχηματισμός Patan κυμαίνεται ηλικακά από 14 έως 10 ka. (Sakai et. Al 2008).

- Οι αποθέσεις τη κατώτερης αναβαθμίδας εκτείνεται κατά μήκος του ποταμού Μπαγμάτι και των παραποτάμων του. Τα ιζήματα περιέχουν λεπτή άμμο, χάλικες και κόκκους χαλίκων. Η επιφάνεια της αναβαθμίδας είναι περίπου 5 έως 15μ. πάνω από τη σημερινή κοίτη του ποταμού Μπαγμάτι (Yoshida and Garashi 1984).

3.3 Το παλαιοκλίμα της κοιλάδας του Κατμαντού

Μια σύγκριση προσφάτων και γυροειδών απολιθωμάτων των ειδών Quercus και Pinus δείχνει μια αύξηση στην θερμοκρασία στην κοιλάδα του Κατμαντού κατά 4-13 β.Κελσίου. από την περίοδο του Πλειόκαινου (Nakagawa et al. 1996). Παρομοίως, ιζηματολογικές και παλυνολογικές έρευνες στην κοιλάδα του Κατμαντού ανέδειξαν σημαντικές αλλαγές στο περιβάλλον απόθεσης των παλαιολιμναίων συστημάτων από 1 Ma, και τέτοιες αλλαγές προσέδωσαν χαρακτηριστικά στην ανύψωση του ορεινού σχηματισμού του Mahabharat (Fuji και Sakai 2001μ, 2002). Παλυννολλογικές έρευνες των ειδών Quercus και Pinus taxa από τον σχηματισμό Lukundol δείχνουν πτώση περίπου 1000μ. της βλάστησης στην κοιλάδα του Κατμαντού κατά τη διάρκεια του κατώτερου Πλειστόκαινου (Paudayal and Ferguson 2004; Paudayal 2006). Οι Bhandari και Paudayal (2007) διαχώρισαν τρεις ζώνες γύρης στον σχηματισμό Lukundol, όπου η Ζώνη I διήλθε κατ' αρχάς ένα υποτροπικό κλήμα, η Ζώνη II δέχθηκε θερμό κλίμα και η Ζώνη III αντιμετώπισε κλίμα από υποτροπικό σε θερμό.

4 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

4.1 Γενικές Σεισμολογικές πληροφορίες και καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις

Το τεκτονικό καθεστώς συμπίεσης του ρηξιγενούς επιπέδου στην περιοχή των Ιμαλάϊων γεννά υψηλού βαθμού σεισμικότητα η οποία απειλεί εκατομμύρια ανθρώπους στις ορεινές περιοχές του Νεπάλ και της Ινδίας. Η συνεχιζόμενη λέπτυνση του φλοιού στα Ιμαλάια έχει συνοδευθεί από μερικά κύρια ρήγματα τα οποία επίσης διαχωρίζουν σαφείς γεωλογικές μεγάλες περιοχές και γεωμορφολογικές μικρότερες περιοχές. Αν και έχουν καταγραφεί άφθονες ιστορικές ενδείξεις από σεισμικές καταστροφές, οι παράμετροι των σεισμικών δονήσεων όπως η τοποθεσία, το μήκος, η ολίσθηση και το μέγεθος για διακριτά γεγονότα παραμένουν ακόμα αβέβαιες.

Στη συνέχεια συνοψίζονται σεισμολογικές απόψεις σχετικά με τον σεισμό της 25^{η}ς Απριλίου 2015 μεγέθους 7.8 στην περιοχή Gorkha.

4.2 Ιστορικοί και πρόσφατοι σεισμοί

Το Νεπάλ έχει μακρά ιστορία καταστροφικών σεισμών. Τουλάχιστον 10 κύριοι σεισμοί (Chitrakara&Pandey 1986) έχουν καταγραφεί σε ιστορικά αρχεία από τον 13^{ο} αιώνα μ.Χ. Παρακάτω συνοψίζονται καταγραφές αυτών των σεισμών παράλληλα με την περιγραφή των επιπτώσεων στις περιοχές:

1255 (7 Ιουνίου): Αυτό είναι το πιο παλαιό γνωστό καταγεγραμμένο σεισμικό γεγονός το οποίο προκάλεσε τεράστιες καταστροφές στην περιοχή του Κατμαντού. Η ένταση του κυρίως σεισμού εκτιμήθηκε ως X (Ranaetal. 2007). Το μέγεθος του σεισμού εκτιμάται ότι ήταν περίπου 7,8. Ιστορικές καταγραφές δείχνουν ότι πολλά σπίτια και ναοί στο Νεπάλ κατέρρευσαν μετά από τον σεισμό του 1255 και ένα τρίτο του πληθυσμού συμπεριλαμβανομένου του βασιλιά AbhayaMalla σκοτώθηκαν.

126: Πέντε χρόνια μετά τον Μεγασεισμό του 1255 μ.Χ., προκλήθηκε κατάρρευση πολλών κτιρίων και ναών και σοβαρές ζημιές σε όλη την περιοχή. Αν και υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με αυτό το σεισμικό γεγονός, είναι γνωστό ότι προκάλεσε πολλές ανθρώπινες απώλειες μαζί με την εξάπλωση επιδημιών και λιμών.

1408: Αυτός ο σεισμός έπληξε την κοιλάδα του Κατμαντού. Κατέστρεψε ολοσχερώς τον ναό Rato Matchendranath και προκάλεσε σοβαρές ζημιές και καταρρεύσεις κτιρίων και ναών.

1681:Ο σεισμός αυτός συνέβη στο Νεπάλ και στην κοιλάδα του Κατμαντού και υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες. Σημειώθηκαν πολλές ανθρώπινες απώλειες καθώς και καταστροφές και καταρρεύσεις πολλών κτιρίων συμπεριλαμβανομένων και ναών.

1767: Ο σεισμός συνοδεύτηκε από 21 μετασεισμούς σε 24 ώρες. Δεν υπάρχουν περαιτέρω πληροφορίες για απώλειες ανθρώπινων ζωών και καταστροφές σε κτίρια και ναούς.

1810: 21 μετασεισμοί καταγράφτηκαν σε περίοδο ενός μηνός (Μάιος ή Ιούνιος). Ο αριθμός των θυμάτων που προκλήθηκαν από τους σεισμούς του 1810 ήταν περιορισμένος. Μερικά κτίρια και ναοί καταστράφηκαν ενώ άλλα υπέστησαν σοβαρές ζημιές.

1823: 17 σεισμοί μεσαίου μεγέθους καταγράφηκαν στην περιοχή του Κατμαντού. Δεν υπήρξαν ενδείξεις για απώλειες ανθρώπινων ζωών.

1833: Η κοιλάδα του Κατμαντού επλήγη κυρίως από δύο σεισμικά γεγονότα περί τα τέλη του καλοκαιριού. Το ένα στις 6 μ.μ. και το άλλο στις 11 μ.μ. Η πλειοψηφία των κτιρίων συμπεριλαμβανομένων κατοικιών, δημοσίων κτιρίων και ναών κατέρρευσαν. Ο Πύργος του Dharahara υπέστη σοβαρές ζημιές. Οι πύργοι Thimi και Bakhtapur καταστράφηκαν ολοσχερώς. Καταγραφές δείχνουν ότι 18000 σπίτια κατέρρευσαν σε όλη τη χώρα, 4214 από τα οποία βρίσκονταν στην κοιλάδα του Κατμαντού.

1834: 4 κύρια σεισμικά γεγονότα σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του Ιουνίου και του Ιουλίου. Αν και αυτοί οι σεισμοί δεν ήταν τόσο δυνατοί όσο οι σεισμοί του 1833, η υπερχείλιση του ποταμού Μπαγμάτι εξ αιτίας υπερβολικών βροχοπτώσεων κατά τη σεισμική αυτή ακολουθία προκάλεσε βλάβες στις γέφυρες.

1934 (15 Ιανουαρίου): Ο σεισμός, επίσης γνωστός ως ο Μεγάλος σεισμός του Νεπάλ, ονόματι Bihar, είναι ο μεγαλύτερος σεισμός του 20ου αιώνα. Προκάλεσε τον μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπινων απωλειών που καταγράφηκε ποτέ στο Νεπάλ. Ο σεισμός είχε μέγεθος Mw 8.1 και το επίκεντρό του προσδιορίστηκε στη περιοχή νότια του Έβερεστ. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε μια μεγάλη περιοχή όπου η ένταση του σεισμού κυμάνθηκε από VII σε X στην τροποποιημένη κλίμακα Mercalli (Εικ 22). Η ένταση X παρατηρήθηκε στην κοιλάδα του Κατμαντού, η οποία υπέστη εξαιρετικές βλάβες, και τα περισσότερα κτίρια καταστράφηκαν και στις 3 μεγάλεις πόλεις της κοιλάδας, Κατμαντού, Μπακταπούρ και Πατάν. Εξ αιτίας του σεισμού του 1934 περισσότεροι από 8500 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους, περισσότερα από 126000 σπίτια υπέστησαν σοβαρές ζημιές και περισσότερα από 80000 κτίρια κατέρρευσαν ολοσχερώς. Η κατανομή των καταστροφών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το γεγονός του 1934 υποδηλώνει ότι η ενίσχυση των εδαφικών κινήσεων πρέπει να έπαιξε σημαντικό ρόλο στην κατανομή των επιπτώσεων, ιδιαιτέρως στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Κατμαντού (Dixitetal. 1998). Ένα αξιοπρόσεκτο φαινόμενο αυτού τους σεισμού ήταν ότι οι η εκτίναξη άμμου και νερού εμφανίστηκε σε όλους τους κεντρικούς αγωγούς διαφυγής (vents) της περιοχής του σεισμού. Το έδαφος γύρω από αυτές τις εδαφικές ρωγμές κατέρρευσε προκαλώντας περισσότερες ζημιές. Η εκτενής ρευστοποίηση του εδάφους έλαβε χώρα σε μήκος 300 χιλιομέτρων όπου πολλές κατασκευές καταστράφηκαν.

1980: Σημειώθηκε σεισμικό γεγονός μεγέθους Mw 6,5 που επηρέασε κυρίως το δυτικότερο τμήμα του Νεπάλ. 125 άτομα έχασαν τη ζωή τους και 248 τραυματίστηκαν σοβαρά. 13414 κτίρια έπαθαν σοβαρές ζημιές και 11604 κτίρια καταστράφηκαν ολοσχερώς.

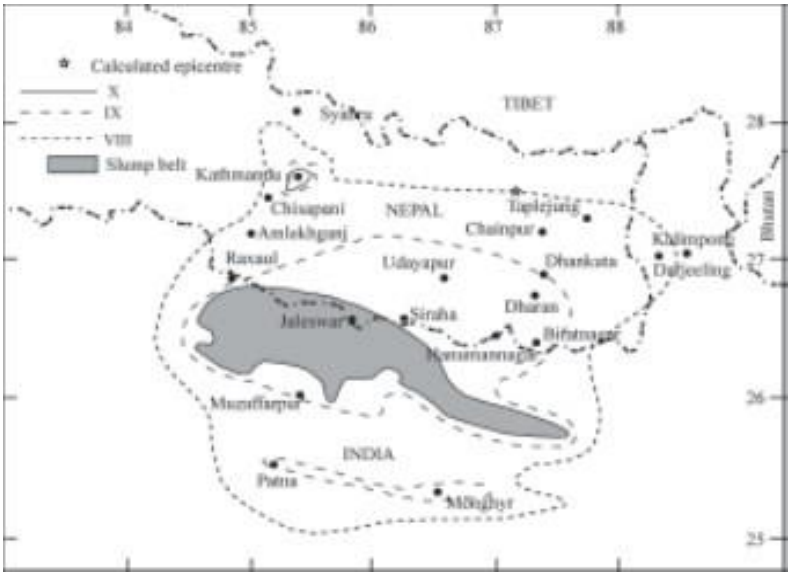
1988 (21 Αυγούστου): Κατεγράφη σεισμικό γεγονός επίσης γνωστό ως ο σεισμός του Udaipur μεγέθους M 6.9 και επηρέασε κυρίως το ανατολικότερο τμήμα της χώρας. Ο σεισμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα 721νεκρούς, 6553 σοβαρά τραυματίες και σοβαρές ζημιές σε περισσότερα από 65000 κτίρια. Το συνολικό κόστος της ζημιάς εξ αιτίας του σεισμού αναφέρθηκε ότι έφτασε τις 5 δις ρουπίες.

1993: Κατεγράφη σεισμός ο οποίος έπληξε τις κεντρικές και τις κεντροδυτικές περιοχές της χώρας και είχε ως αποτέλεσμα 1 θάνατο, 11 τραυματίες, ζημιές σε 451 κτίρια και καταρρεύσεις 72 οικιών. Το συνολικό κόστος της ζημιάς εξ αιτίας του σεισμού έφτασε τις 48 εκατ. ρουπίες.

1994: Ο σεισμός αυτός επηρέασε τις δυτικές περιοχές της χώρας και είχε ως αποτέλεσμα 12 τραυματίες, ζημιές σε περισσότερα από 84000 κτίρια και καταρρεύσεις σε 623 οικίες. Το συνολικό κόστος της ζημιάς εξ αιτίας του σεισμού έφτασε τις 16,35 εκατ. ρουπίες.

1997: Ο σεισμός αυτός επηρέασε τις κεντρικές και τις ακροδυτικές περιοχές του Νεπάλ. Ο σεισμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα 1 τραυματία, ζημιές σε περισσότερα από 60 κτίρια και κατάρρευση 196 οικιών. Το συνολικό κόστος της ζημιάς εξ αιτίας του σεισμού έφτασε τις 51,29 εκατ. ρουπίες.

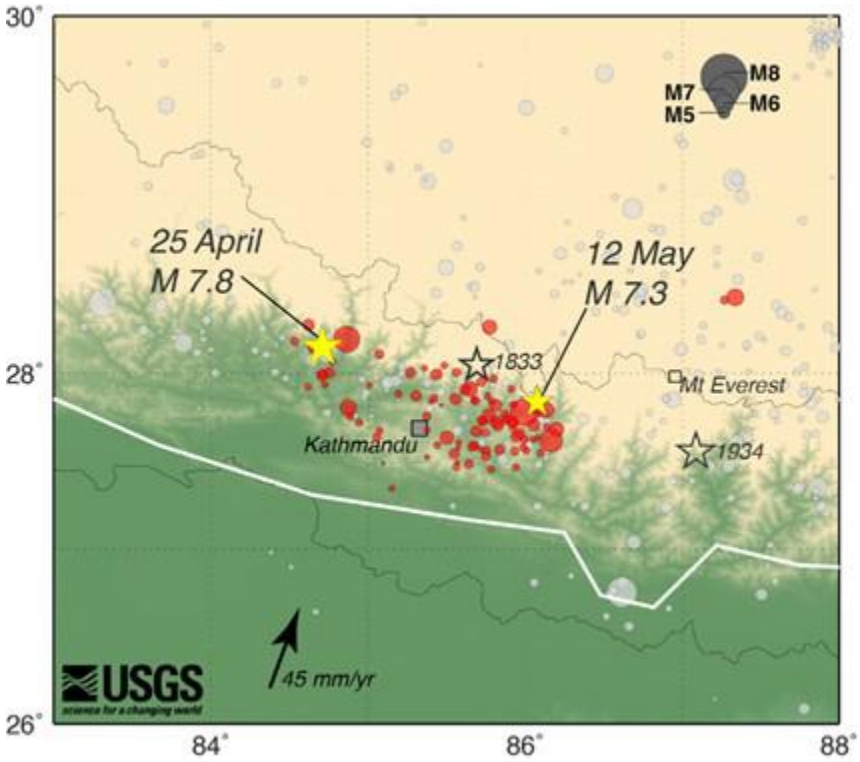
2011 (18 Σεπτεμβρίου): Ο σεισμός αυτός είχε μέγεθος M 6,9 με επίκεντρο 272 χιλιόμετρα νότια του Κατμαντού και εστιακό βάθος 19,7 χιλιόμετρα, προκαλώντας ευρείας έκτασης ζημιές στη χώρα. Ο σεισμός αυτός καταγράφηκε ότι προκλήθηκε από τη σύγκρουση εντός της υπερκείμενηςΕυρασιατικής πλάκας ή εντός της υποκείμενης Ινδικής πλάκας. Ο σεισμός αυτός έγινε περισσότερο αισθητός στο ανατολικό και το κεντρικό Νεπάλ συμπεριλαμβανομένου του Κατμαντού. Ενώ ο σεισμός προκάλεσε εκτεταμένες σοβαρές ζημιές στα κτίρια, καταγράφηκαν μόνο 3 θάνατοι εξ αιτίας του σεισμικού γεγονότος. Ο σεισμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα 164 τραυματίες, 30 εκ των οποίων σε σοβαρή κατάσταση, την κατάρρευση περισσοτέρων από 6000 οικιών καθώς και ζημιές σε περισσότερες από 14000 κατοικίες (CUEEreport 2011-1).



Εικόνα 22: Χάρτης έντασης για τον Μεγάλο σεισμό του 1934 Μπιχάρ στην περιοχή του Νεπάλ (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 33).

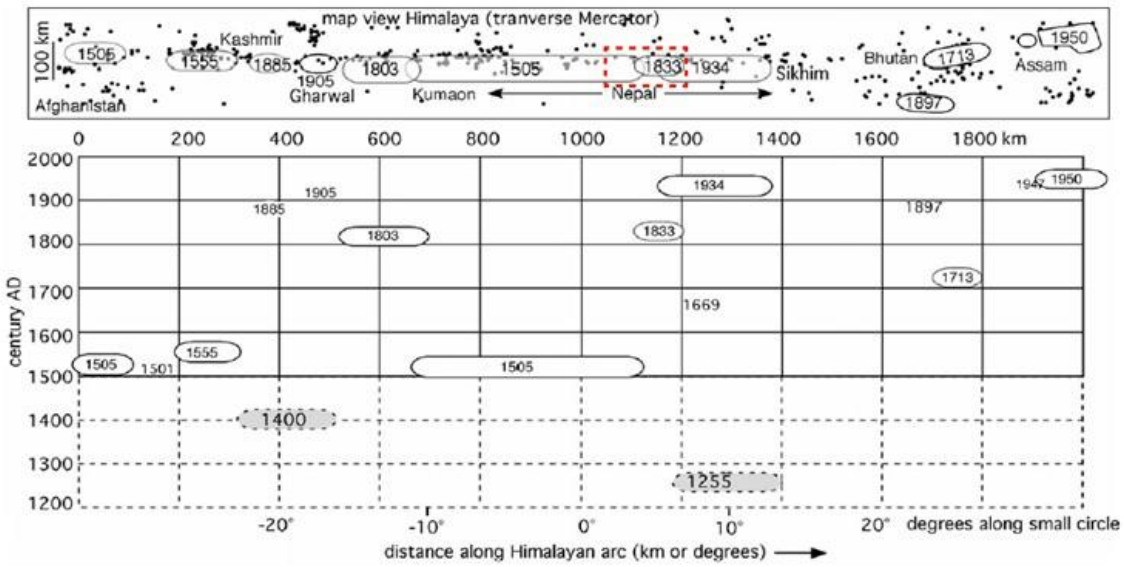
4.3 Ο σεισμός μεγέθους 7,8 του Νεπάλ στις 25 Απριλίου 2015.

Στις 25 Απριλίου 2015 σημειώθηκε στην περιοχή Gorkha ή κοντά στο μέτωπο των Ιμαλάϊων ένας σεισμός μεγέθους Mw 7,8 (Εικ 23). Αυτό το σύστημα ρηγμάτων είναι υψηλά ενεργό με πολυάριθμους σεισμούς μεγάλου ή πολύ μεγάλου μεγέθους καταγεγραμμένους τόσο κατά την ιστορική περίοδο όσο και κατά την πρόσφατη των ενόργανων καταγραφών. Η έκταση της διάρρηξης η οποία συμπεραίνεται από τους μετασεισμούς (Εικ. 23) και αναλύσεις πεπερασμένων πηγών (Εικ. 25 και 26) καταδεικνύει ότι η διάρρηξη είχε έκταση από το νότιο άκρο του μεγάλου σεισμού Mw 8,2 των κεντρικών Ιμαλάϊων που συνέβη το 1505, προς το βόρειο άκρο του μεγάλου σεισμού Mw 8,1 του Κατμαντού που συνέβη το 1934. Το 1833 ένας σεισμός μεγέθους Ms 7,7 ή και μεγαλύτερο συνέβη στο βόρειο άκρο του σεισμικού γεγονότος του 1934 (Bilham, 1995).



Εικόνα 23: Χάρτης απεικόνισης του κυρίως σεισμού Mw7.8 και μετασεισμών για το γεγονος της 25ης Απριλίου (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 34).

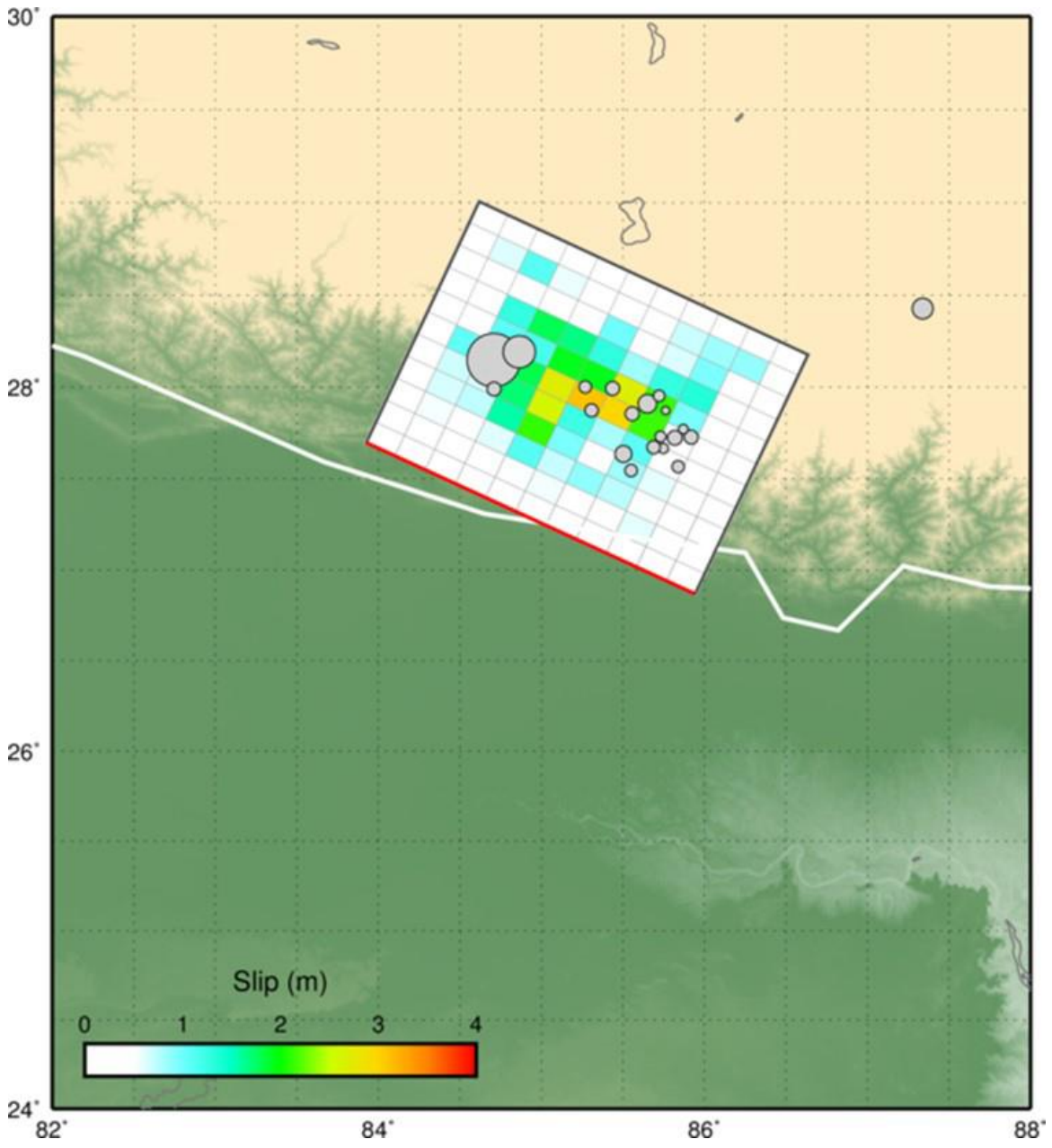
Η γεωμετρική σχέση των 3 αυτών σεισμικών γεγονότων καθώς επίσης και των πιθανών σεισμικών γεγονότων του 1669 και 1255 (Bilham 1995) υποδηλώνει τμηματοποίηση του μετωπικού ρήγματος της περιοχής αυτής. Η διάσταση της διάρρηξης του σεισμού της Gorkha η οποία εκτιμήθηκε με βάση την κατανομή των μετασεισμών και από προσομοιώματα πεπερασμένης σεισμικής πηγής καταδεικνύει ότι η διάρρηξη εκτάθηκε έως το όριο μεταξύ των σεισμών του 1505 και του 1934 (Εικ. 24).



Εικόνα 24: Τροποποιημένο από το Bilham (1995). Σχέδιο χρονικής θέσης μεγάλων και εξαιρετικά μεγάλων σεισμών κατά μήκος της μετωπικής επώθησης των Ιμαλαΐων. Οι αποστάσεις είναι κατά μήκος του μικρού κύκλου του τόξου της μετωπικής επώθησης των Ιμαλαΐων. Το κόκκινο ορθογώνιο έχει μήκος 160 km και περιλαμβάνει τη μετασεισμική δραστηριότητα (Εικόνα 23). Θεωρείται ότι καλύπτει τις ζώνες ρήξης των σεισμών 1505, 1833 και 1934 μ.Χ (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 35).

4.4 Προσεισμοί

Ο πλησιέστερος σεισμός του 1833 είχε δύο προσεισμούς (Bilham 1995). Μια έρευνα του καταλόγου του Προηγμένου Εθνικού Σεισμικού Συστήματος (ANSS) για σεισμικά γεγονότα μεγέθους M ≥ 2 εντός ακτίνας 400 χιλιομέτρων από το επίκεντρο του κυρίως σεισμού, ανακάλυψε μόνο 3 σεισμικά γεγονότα τα οποία μπορούν πιθανώς να ήταν προσεισμοί πολύ κοντά χρονικά στην εκδήλωση του κύριου σεισμού. Αυτά τα γεγονότα μεγέθους Mb 4,6 (2 Απριλίου), Mb 5 (21 Απριλίου), Mb 4,4 (22 Απριλίου) συνέβησαν 170, 240 και 228 χιλιόμετρα αντίστοιχα από το επίκεντρο του κυρίως σεισμού και παρά την χρονική εγγύτητα προς τον κύριο σεισμό, εξ αιτίας της απόστασής τους από το επίκεντρο του κυρίως σεισμού, είναι μάλλον απίθανο να ήταν προσεισμοί.



Εικόνα 25: USGS (2015) Μοντέλο πεπερασμένης πηγής από την αναστροφή των P- S και Love – Rayleigh κυμάτων (NepalGEERReportV_1.1 2015, σελ 37).

5 ΤΟ ΚΥΡΙΩΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΓΕΓΟΝΟΣ

5.1 Ο κύριος σεισμός μεγέθους 7,8 στις 25 Απριλίου 2015

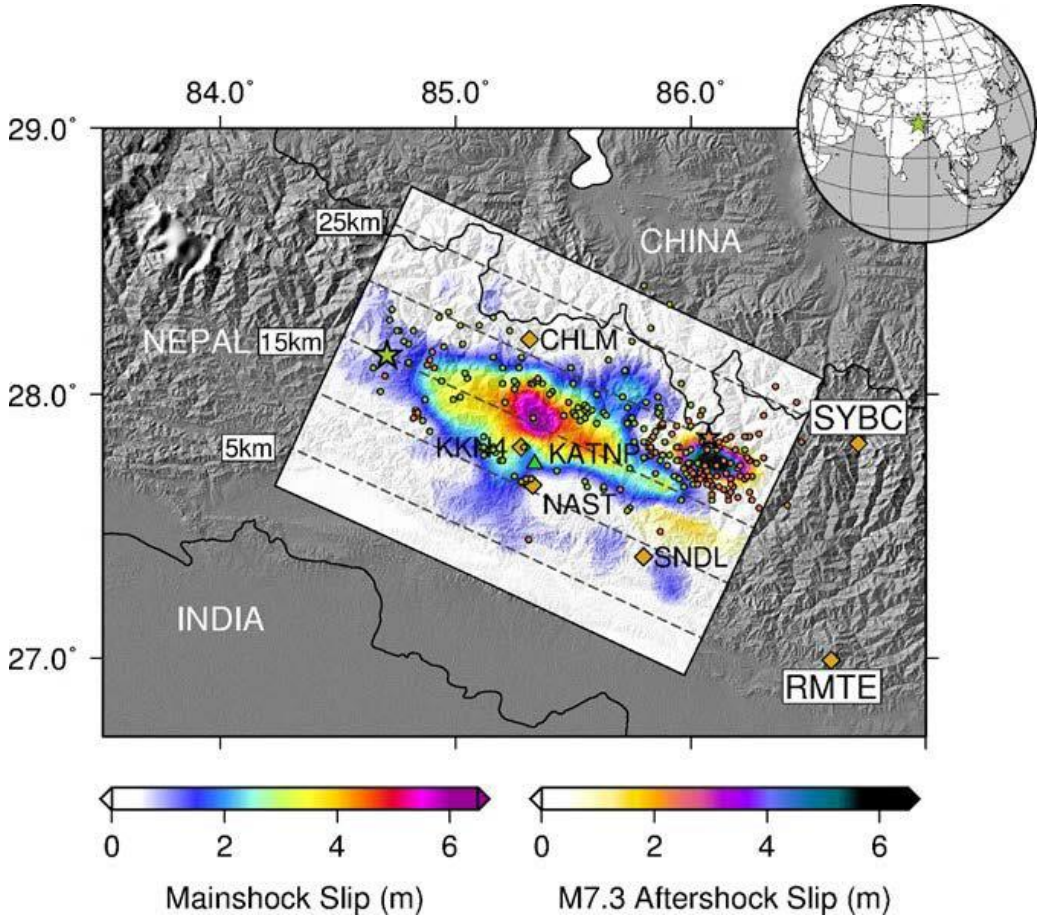
Ο σεισμός της περιοχής Gorkha μεγέθους Mw 7,8 συνέβη στις 25 Απριλίου του 2015, ώρα 06:11:26 UTC επί ή πλησίον της κύριας ρηξιγενούς ζώνης των Ιμαλάϊων, με συντεταγμένες 28.1473 N και 84.7079 E , με εστιακό βάθος 15 χιλιομέτρων. Έως τις 14 Ιουνίου 2015 σημειώθηκαν 222 μετασεισμοί μεγέθους έως Mb 3.4 (ANSS). Υπήρξαν 5 μετασεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο από Mw 6, ένας από αυτούς Mw 7.3 και συνέβη στις 12 Μαΐου 2015 περίπου 140 χιλιόμετρα ανατολικά του επικέντρου του κυρίως σεισμού.

Τρεις μηχανισμοί γένεσης παρουσιάστηκαν για τον κύριο σεισμό από το USGS (2015) με βάση τηλεσεισμικά κύματα χώρου και επιφανείας. Η μονόμετρη σεισμική ροπή κυμαίνεται από 5,44 έως 7,76 ή 20 Nm, αντιστοιχούμενη σε μεγέθη ύψους 7,8 έως 7,9 Mw. Το βάθος εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 10 έως 24 χιλιόμετρα και όλοι οι μηχανισμοί καταδεικνύουν ένα μικρής γωνίας κλίσης ρήγμα που κλίνει προς ΒΒΑ με διεύθυνση 290-295, κλίση 7ο-11ο και γωνία απόκλισης 101ο-108ο.

Τα προσομοιώματα πεπερασμένης σεισμικής πηγής για το κύριο σεισμικό γεγονός δείχνουν μια μονόπλευρη διάρρηξη από το επίκεντρο του σεισμού περίπου 150 χιλιόμετρα προς ΑΝΑ. Η εικόνα25 δείχνει ότι το μοντέλο του USGS (2015) είναι βασισμένο στα τηλεσεισμικά κύματα χώρου και επιφανείας. Το μοντέλο του ρήγματος ορίζεται από παράταξη 295° και κλίση 11° . Οι συνολικές διαστάσεις της διάρρηξης είναι περίπου 150 χιλιόμετρα κατά μήκος της παράταξης και 120 χιλιόμετρα προς τα κάτω κλίση. Οι μέσες και οι ανώτερες τιμές των ολισθήσεων είναι από 0,65 έως 3.10 μ. αντιστοίχως και η μέγιστη συμβαίνει περίπου 80 χιλιόμετρα ΑΝΑ από το επίκεντρο του σεισμού κοντά στη λεκάνη του Κατμαντού. Η μονόμετρη σεισμική ροπή είναι 8.1 X 1020 Nm που αντιστοιχεί σε σεισμική κλίμακα μεγέθους 7,9 Mw. Το μεγαλύτερο μέρος της ολίσθησης συνέβη μέσα σε 65 έως 70 δευτερόλεπτα από το ξεκίνημα του σεισμού. Το κινηματικό μοντέλο καταδεικνύει ότι η διάρρηξη ξεκίνησε με γρήγορη ταχύτητα διάρρηξης, η οποία ελαττώθηκε καθώς προχωρούσε το τμήμα της υψηλής ολίσθησης το οποίο εκτείνεται περίπου από 30 έως 100 χιλιόμετρα από το επίκεντρο αν και η χωρική ανάλυση του μοντέλου είναι πολύ τραχεία.

Ένα δεύτερο προσομοίωμα πεπερασμένης σεισμικής πηγής εφαρμόσθηκε από τους Galetzka et al. (2015) το οποίο προέκυψε από αναστροφή της εδαφικής παραμόρφωσης από δορυφορικές εικόνες ALOS-2 InSAR. Επίσης συλλέχθηκαν κυματομορφές τριών συνιστωσών από 7 σταθμούς GPS υψηλής συχνότητας 5 Hz (CHLM, KKN4, LAST, NAST, RMTE, SNDL) και από καταγραφές ισχυρών διεγέρσεων που προέρχονται από σταθμό κοντά στο Κατμαντού.

Το συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 26 έχει μήκος, κατά μήκος της παράταξης περίπου 150 χιλιόμετρα παρόμοιο με αυτό του μοντέλου USGS, αλλά ένα κατά πολύ στενότερο πλάτος κλίσης (down dip) περίπου 50 χιλιομέτρων. Τα δύο μοντέλα αυτά είναι παρόμοια στο μήκος και στο πλάτος της κλίσης (down dip) στο μεγαλύτερο τμήμα ολίσθησης. Η κατανομή της ολίσθησης στο μοντέλο Galetzka εξαρτιόταν από τα σημεία των μετασεισμών (Εικ. 26). Οι μεσαίες και οι ανώτερες τιμές των ολισθήσεων είναι από 0,69 έως 6.67 μ. και η στιγμή που κλιμακώνεται το γεγονός είναι 6,68e20 Nm η οποία αντιστοιχεί σε μέγεθος 7,8 Mw. Η διάρρηξη σε αυτό το μοντέλο είχε διάρκεια 65 δευτερόλεπτα, παρόμοια με αυτή που βρέθηκε από την τηλεσεισμική κυματοειδή μορφή των δεδομένων.



Εικόνα 26: Μοντέλο των Galetzka et al. (2015). Το μοντέλο ολίσθησης αυτό αποκτήθηκε από την αναστροφή των δεδομένων του σταθμού Alos-2 InSAR καιτο ιστορικό των εδαφικών κινήσεων από 5 σημεία GPS (CHLM, KKN4, LAST, NAST, RMTE, SNDL) καθώς και απο ενα σταθμό με όργανα μέτρησης ισχυρών κινησεων στο Κατμαντού (KATNP).Το πράσινο αστέρι δείχνει το επίκεντρο του κυριώς σεισμού και το πορτοκαλί αστέρι καθώς και η προσκείμενη ολίσθηση τον μετασεισμό. Η διανομή της μετασεισμικής ολίσθησης ανακτήθηκε αναστρέφοντας μόνο τα στατιστικά δεδομένα του σταθμού InSAR.

Ο Leonard (2010) παρουσίασε εξισώσεις για το μήκος του ρήγματος, το πλάτος και τη μέση ολίσθηση, την κλίση ολίσθησης και για σεισμικά γεγονότα σε σταθερές ηπειρωτικές περιοχές. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το εύρος των κλιμακούμενων τιμών της σεισμικής διάρρηξης κατά την διάρκεια του σεισμικού γεγονότος, η ανωτέρω σχέση του Leonard (2010) εκτιμά (υπολογίζει) το μήκος του ρήγματος στα 128-148 χιλιόμετρα, το πλάτος στα 44-49 χιλιόμετρα και τη μέση ολίσθηση 0,26-0,28 μέτρα. Αμφότερα η κατανομή της μετασεισμικής δόνησης και ο υπολογισμός της έκτασης της διάρρηξης μέσω της κινηματικής ανάλυσης πεπερασμένων πηγών καταδεικνύουν ότι οι διαστάσεις της διάρρηξης συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα των εξισώσεων του Leonard (2010). Η μέση ολίσθηση από τα μοντέλα πεπερασμένων πηγών είναι μεγαλύτερη από την μέση ολίσθηση η οποία καταγράφηκε από τον Leonard (2010) για τα γεγονότα της κλίσης της ολίσθησης μεταξύ των δύο πλακών (interplate) μπορεί να καταδεικνύουν ότι ο σεισμός της περιοχής Gorkha έχει υψηλότερη μέση πτώση της τάσης (average stress drop). Η μέση πτώση τάσης προσδιορίσθηκε από το μοντέλο πεπερασμένων πηγών των Galetzka et al. (2015) στα 2,6 MPa.

Το γεγονός ότι η ρηξιγενής ολίσθηση κλίνει πλήρως προς τα ανατολικά του επικέντρου του σεισμού, υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχει μια ισχυρή κατευθυντικότητα. Η εξέταση των τηλεσεισμικών κυματομορφών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα USGS, καταδεικνύουν ότι οι σταθμοί οι οποίοι βρίσκονται στα ΑΝΑ έχουν συντομότερη διάρκεια από τους σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται στα ΒΒΔ, συμπίπτουν με την προς ανατολάς κατεύθυνση της διάρρηξης. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα γεγονότα κατά-κλίσεως στα

οποία η κλίση είναι κάθετη προς την διεύθυνση της κλίσης-παράταξης του ρήγματος οι λοβοί ακτινοβολίας P-SV (κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας) είναι κάθετοι προς την ρηξιγενή παράταξη (fault strike), και οι λοβοί ακτινοβολίας SH βρίσκονται σε γωνία 45 μοιρών προς τη ρηξιγενή παράταξη (παράταξη του ρήγματος / διεύθυνση κλίσης της ρηξιγενούς επιφάνειας).

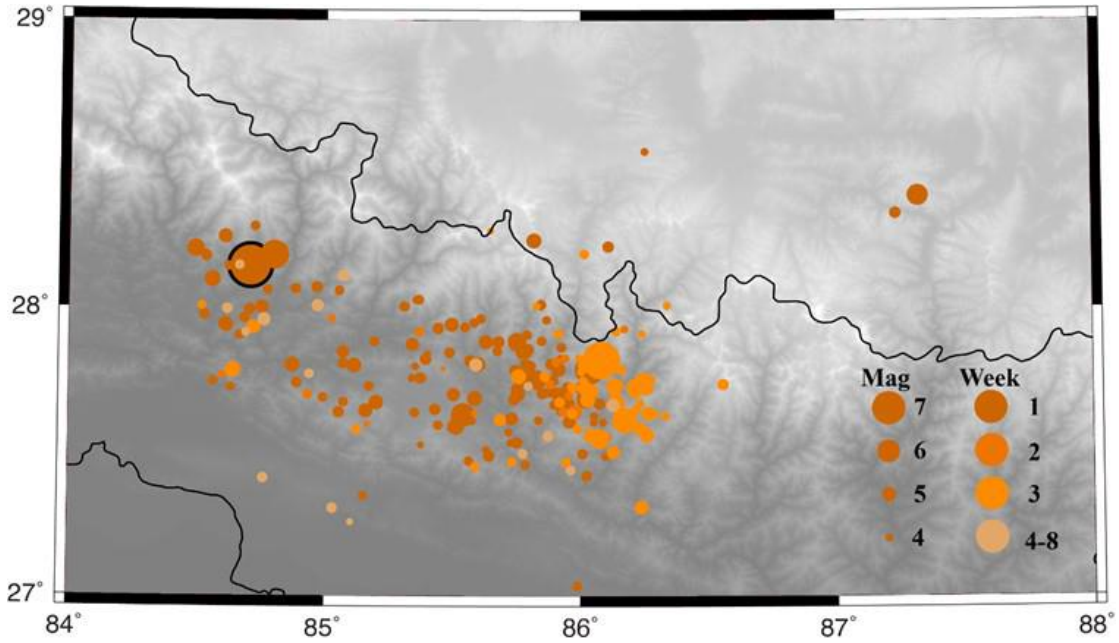
Αυτό το πρότυπο ακτινοβολίας οδηγεί σε ένα σεισμικό γεγονός μειωμένης κατευθυντικότητας σε τοπικές και περιφερειακές αποστάσεις όπως παρατηρήθηκε στο σεισμό Chi Chi της Ταιβάν του 1999 μεγέθους 7,6 Mw (Aaagaard et al. 2004) και στον σεισμό του San Simeon του 2004 μεγέθους 6,5 Mw (Rolandone et al. 2006). Έτσι η διαμόρφωση της κατεύθυνσης των σεισμικών κυματοειδών πεδίων δεν ήταν τόσο δυνατή στο σεισμό της Gorkha, αν και δεν είναι δυνατό να διερευνηθεί λεπτομερώς με τα ως τώρα διαθέσιμα εγχώρια δεδομένα.

Εξ αιτίας του χαμηλού βάθους και της μικρής κλίσης του πεδίου της διάρρηξης όλες οι τοποθεσίες οι οποίες βρίσκονται βόρεια της επιφανειακής προέκτασης του ρηξιγενούς πεδίου βρίσκονται στο υπερκείμενο τέμαχος. Ενδείξεις μέσω παρατήρησης και προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι σημαντική ενίσχυση της σεισμικής ενέργειας μπορεί να προκύψει στις περιοχές στο υπερκείμενο τέμαχος συγκρινόμενη με τις τοποθεσίες της ίδιας απόστασης από την επιφανειακή προέκταση του ρήγματος στο υπερκείμενο τέμαχος (Donahue et al. 2014). Τέσσερις από τους σταθμούς των 5HZ GPS (KKN4, NAST, CHLM, SNDL) και ο σταθμός KATNP καταγραφής της ισχυρής εδαφικής κίνησης, βρίσκονται πάνω από το επίπεδο του ρήγματος και πιθανότατα επηρεάζονται από τις επιδράσεις του υπερκείμενου τεμάχους.

5.2 Μετασεισμικές ακολουθίες

Στους δύο πρώτους μήνες μετά το γεγονός του κυρίως σεισμού της περιοχής Gorkha έχουν αναφερθεί στον κατάλογο USGS ANSS 222 μετασεισμοί μεγέθους M>4.

Η εικόνα 27 δείχνει την κατανομή των μετασεισμών στο χώρο και το χρόνο. Υπήρξαν 130 μετασεισμοί μεγαλύτεροι των 4.0 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ (130 M>4) κατά την πρώτη εβδομάδα σε όλο το εύρος της περιοχής της διάρρηξης. Ορισμένα γεγονότα εντοπίζονται σε σημαντική απόσταση από το κύριο σεισμικό γεγονός στη ρηξιγενή περιοχή και πιθανώς να είναι σεισμοί οι οποίοι προκλήθηκαν από αυτά τα γεγονότα. Κατά τις εβδομάδες 2,3 και 4-8 καταγράφηκαν 17, 59 και 17 μετασεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου των 4.0 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ. Η αύξηση της μετασεισμικής δραστηριότητας κατά την εβδομάδα 3 οφείλεται στην μετασεισμική ακολουθία του σεισμικού γεγονότος με μέγεθος 7,3 M της 12 Μαΐου 2015. Αυτοί οι μετασεισμοί εντοπίζονται ευρέως στο ανατολικό άκρο της μετασεισμικής κατανομής που διαγράφεται στην εβδομάδα 1. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3-5 η ολίσθηση η οποία συμπεραίνεται από τον στατικό αποσχηματισμό InSAR για τον μετασχηματισμό μεγέθους 7,3M (Lindsey et al. 2015) συνορεύει με το ανατολικό άκρο της ολίσθησης του κυρίως σεισμού.

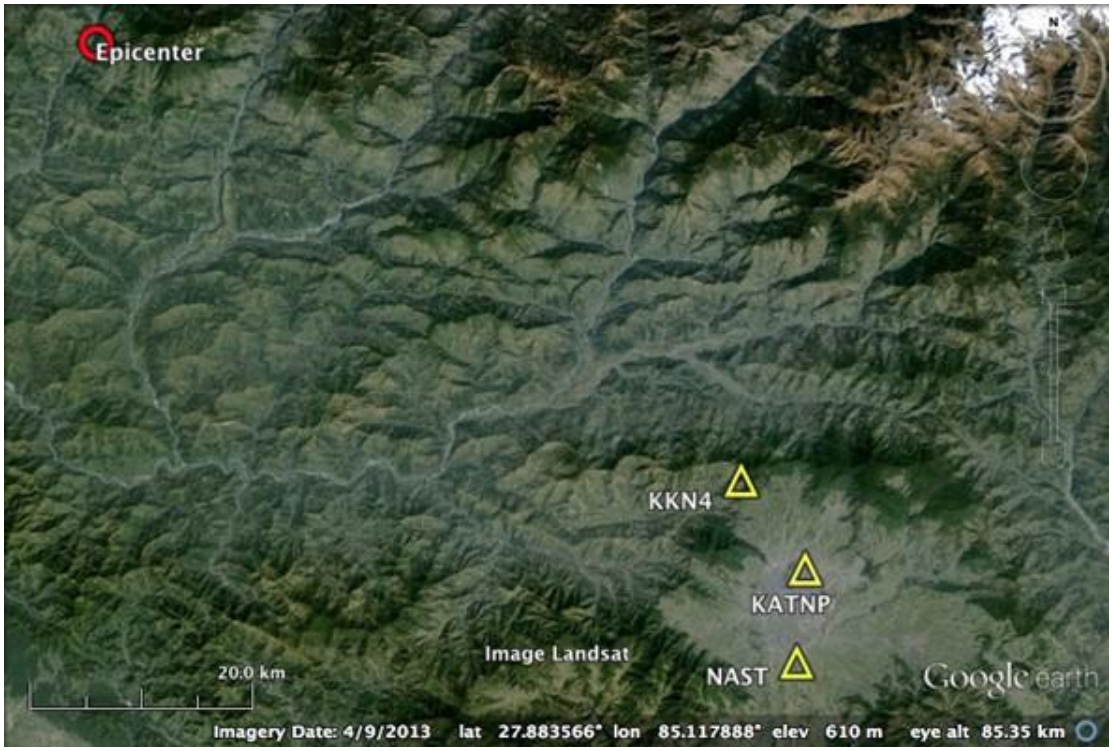


Εικόνα 27: Χωρική και χρονική κατανομή των μετασεισμών.

5.3 Δεδομένα ισχυρής εδαφικής κίνησης

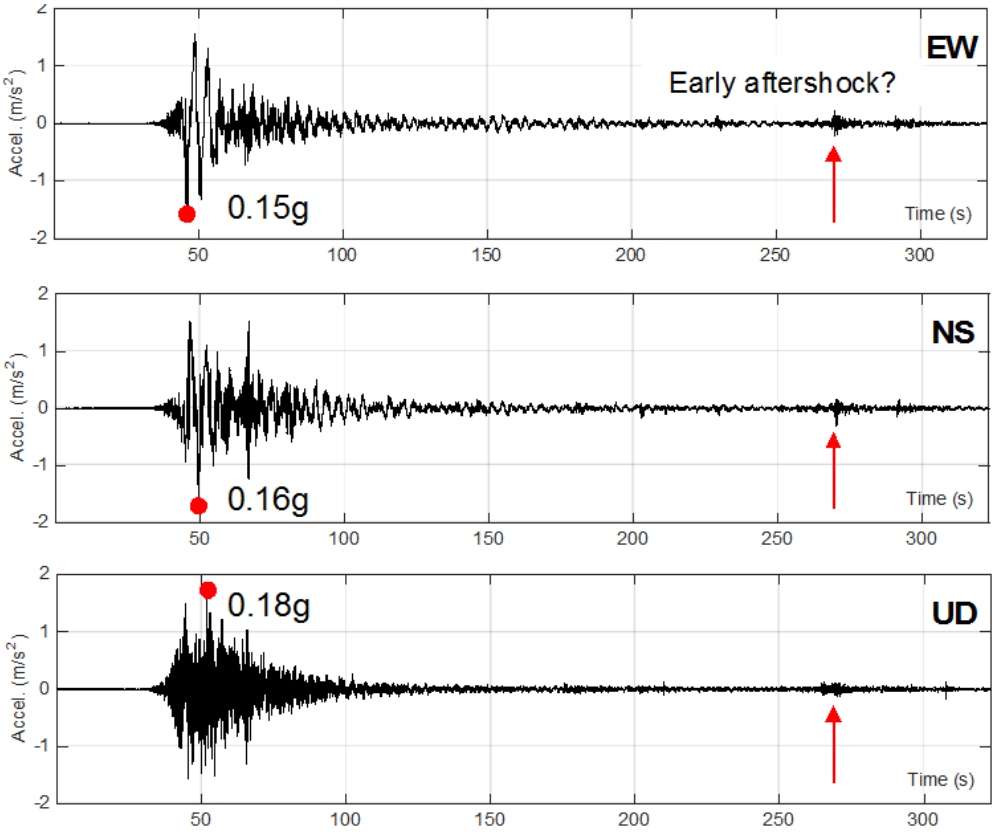
Παρά το μεγάλο μέγεθος M 7,8 του σεισμού της Gorkha,, και την πολύ μικρή επικεντρική απόσταση από το κέντρο του Κατμαντού, οι κινήσεις του εδάφους οι οποίες καταγράφηκαν στο μέσον της λεκάνης (Εικ. 28) είχαν μια χαμηλή κορύφωση της επιτάχυνσης του εδάφους PGA = 0,16g και μια πολύ μακρά περίοδο (5s) κύριας εκπομπής κυμάτων (Εικ. 3-8). Δυστυχώς η σεισμική ακολουθία καταγράφηκε ελλιπώς. Και μόνο ένα όργανο καταγραφής ισχυρών κινήσεων (KATNP) υπό την εποπτεία του USGS έχει ως τώρα διαθέσει χρονικές αξιόπιστες ακολουθίες εδαφικής κίνησης ευρείας ζώνης, μηχανικού ενδιαφέροντος. Ως συνέπεια, οι παράγοντες οι οποίοι διαμόρφωσαν την ένταση και την συχνότητα του κυρίως σεισμού δεν έχουν κατανοηθεί επαρκώς, ειδικότερα κατά την σύντομη περίοδο μηχανικού ενδιαφέροντος (>0,5Hz). Σε μεγαλύτερης διάρκειας περιόδους, συνεχείς σταθμοί GPS του Caltech Tectonic Observatory διέθεσαν μια εξαιρετική προσέγγιση της δόνησης του εξωτερικού περιβλήματος του πετρώματος, και έχουν φανερώσει την έκταση στην οποία οι επιδράσεις των γεγονότων source and path έχουν συμβάλλει στη διαμόρφωση της έντασης και των χαρακτηριστικών της συχνότητας της καταγεγραμμένης ισχυρής κίνησης στο KATNP. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν από τα JPL/ARIA και αρχειοθετήθηκαν στο UNAVCO.

Η εικόνα 28 δείχνει την τοποθεσία των σταθμών καταγραφής ισχυρών κινήσεων KATNP του USGS (27Ο 42’43.20¨ N. 85 Ο 18’57.60¨ A).



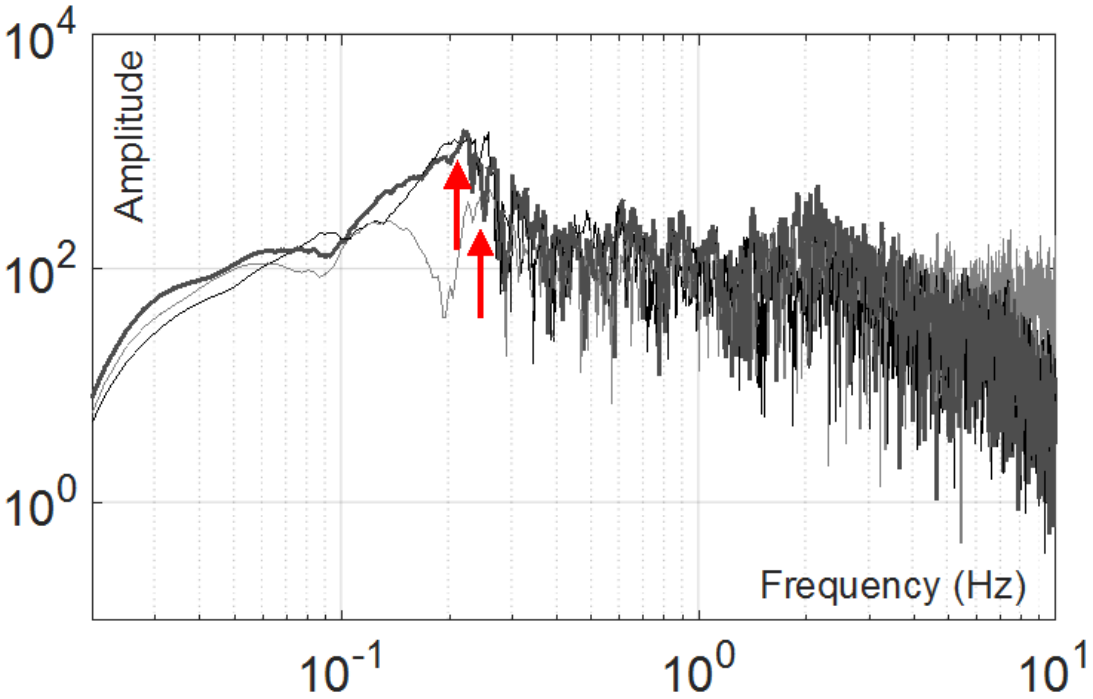
Εικόνα 28: Η θέση του σταθμού ισχυρών κινήσεων KATNP (27.730 N, 85.336 E), του μοναδικού οργάνου που μας έχει δώσει χρονοσειρές επιταχύνσεων καθώς και 2 κοντινές θέσεις GPS 5 Hz τα KKN4 (27.8007 N, 85.2788 E) και NAST (27.6567 N, 85.3277 E).

Στην εικόνα 29 παρουσιάζουμε την χρονική σειρά επιτάχυνσης 3 συνιστωσών του κυρίως σεισμού στον σταθμό KATNP, όπου ξεκάθαρα παρατηρείται η κύρια μακρά ακολουθία της εκπομπής κυμάτων των δύο οριζόντιων συνιστωσών, την συγκριτικά υψηλότερη συχνότητα της κάθετης συνιστώσας και αυτό το οποίο φαίνεται να είναι ένα πολύ πρώιμο μετασεισμικό γεγονός στα 270s (S. Hough, προσωπική ενημέρωση).

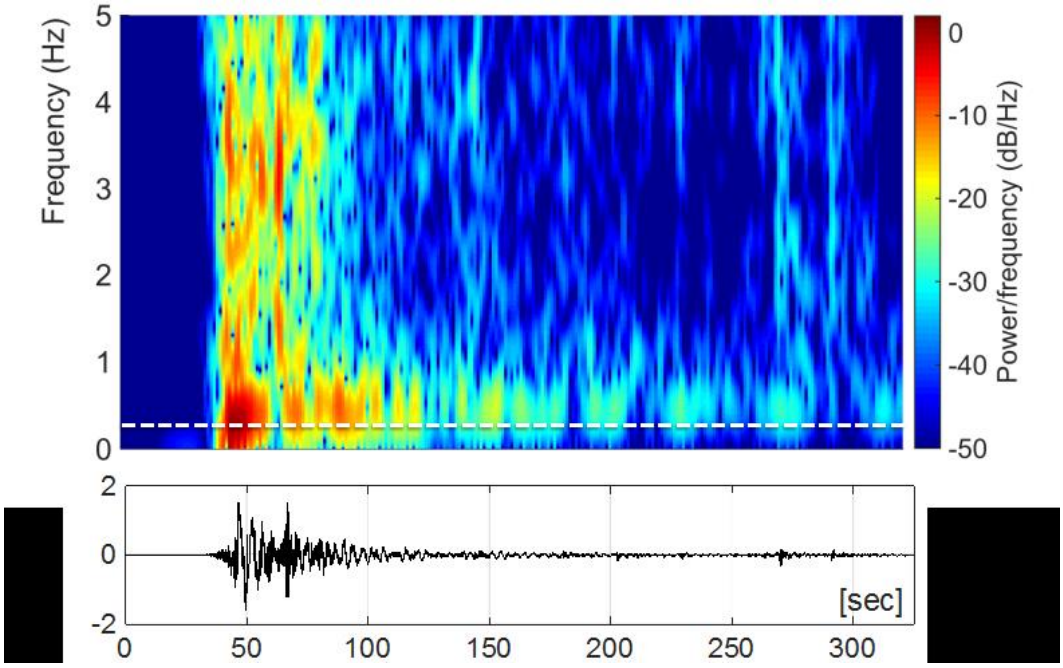


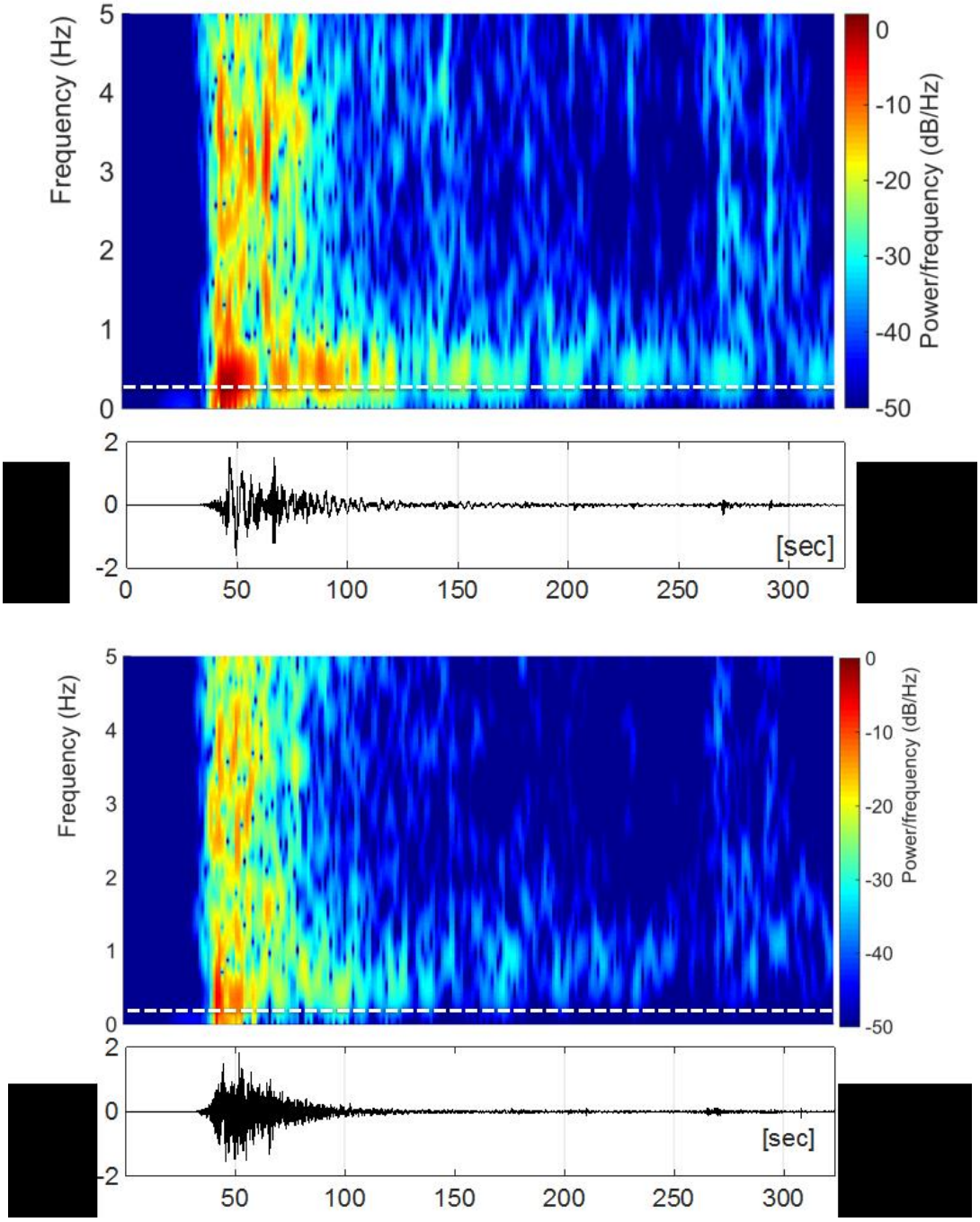
Εικόνα 29: Χρονικές σειρές ισχυρών κινήσεων του κυρίως σεισμού της Gorkha μεγέθους M7.8 που καταγράφηκαν στον σταθμό KATNP.

Στην εικόνα 30 ακολούθως παρουσιάζεται το φάσμα έντασης του Φουριέ της σεισμικής ακολουθίας το οποίο αποκαλύπτει ότι η κάθετη συνιστώσα έχει σημαντική ενέργεια στα 0,25Hz και μια χαμηλότερη αναλογία της μειούμενης υψηλής συχνότητας σε σύγκριση με τις οριζόντιες συνιστώσες. Για να αναλύσουμε περαιτέρω τη συχνότητα των ισχυρών κινήσεων ως χρονική λειτουργίας, αποτυπώνεται επίσης στην εικόνα 31 τα φασματογραφήματα των 3 κύριων συνιστωσών του σεισμικού γεγονότος, όπου μπορούμε εμφανώς να παρατηρήσουμε την μακρά περίοδο των 5s της εκπομπής των κυμάτων επαναλαμβανόμενοι για μερικούς κύκλους, και την δευτερεύουσα εκπομπή κυμάτων η οποία προσεγγίζει τα 270s.

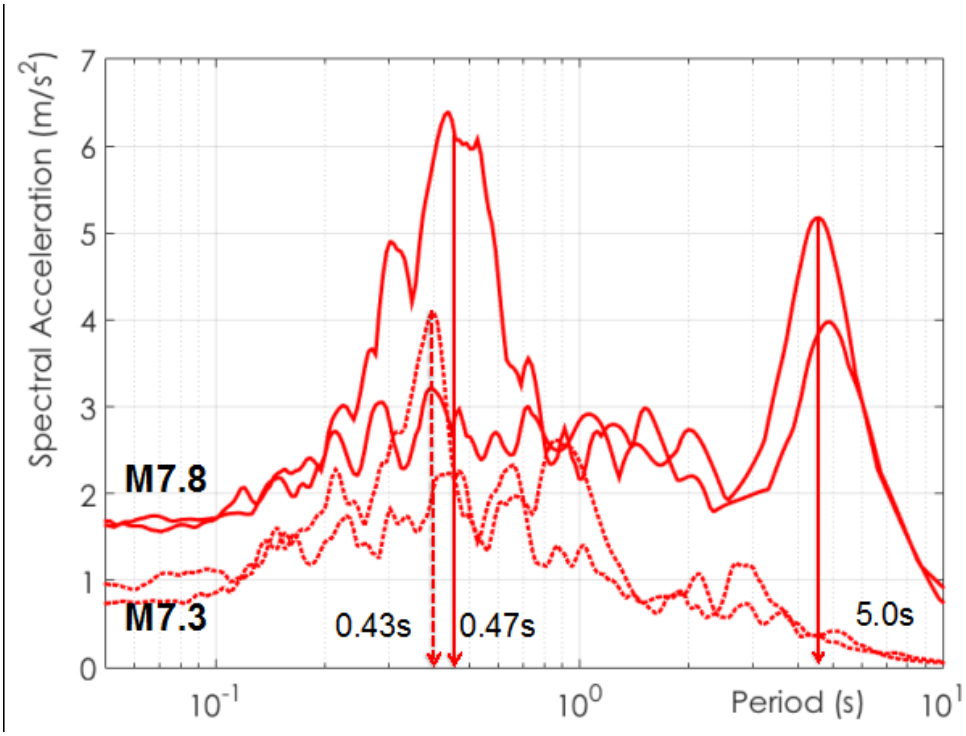


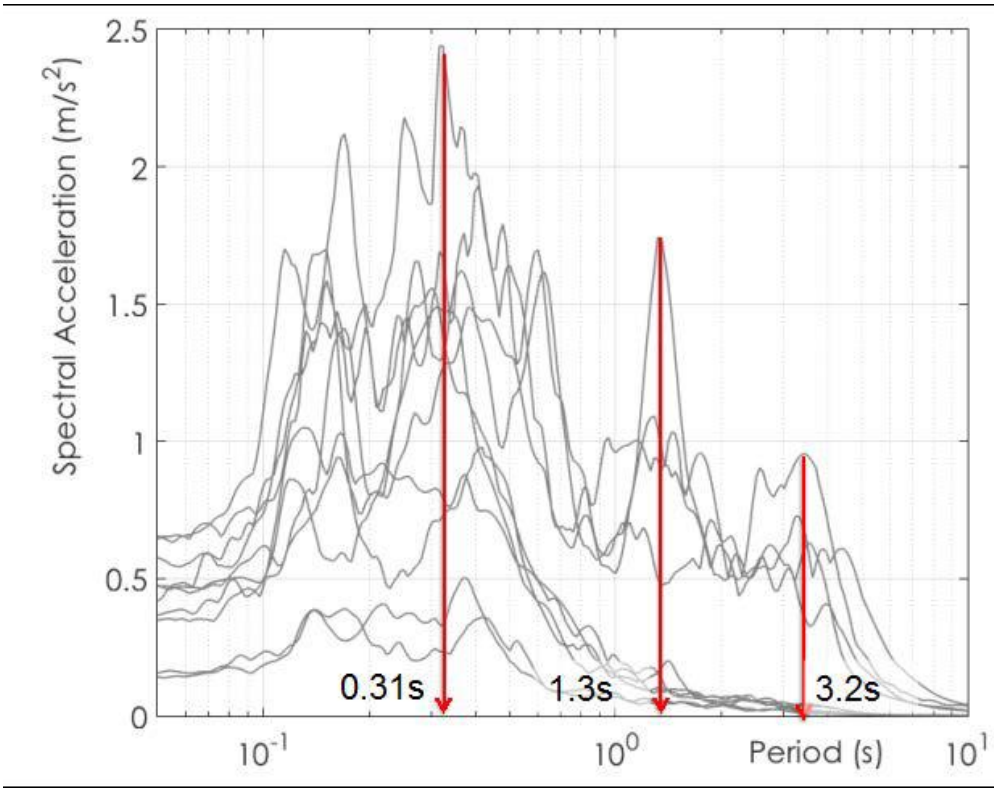
Εικόνα 30: Τα φάσματα επιταχύνσεως Fourier του κυριώς σεισμικού γεγονότος της Gorkha μεγέθους M7.8 καταγεγραμμένα από τον σταθμό KATNP.

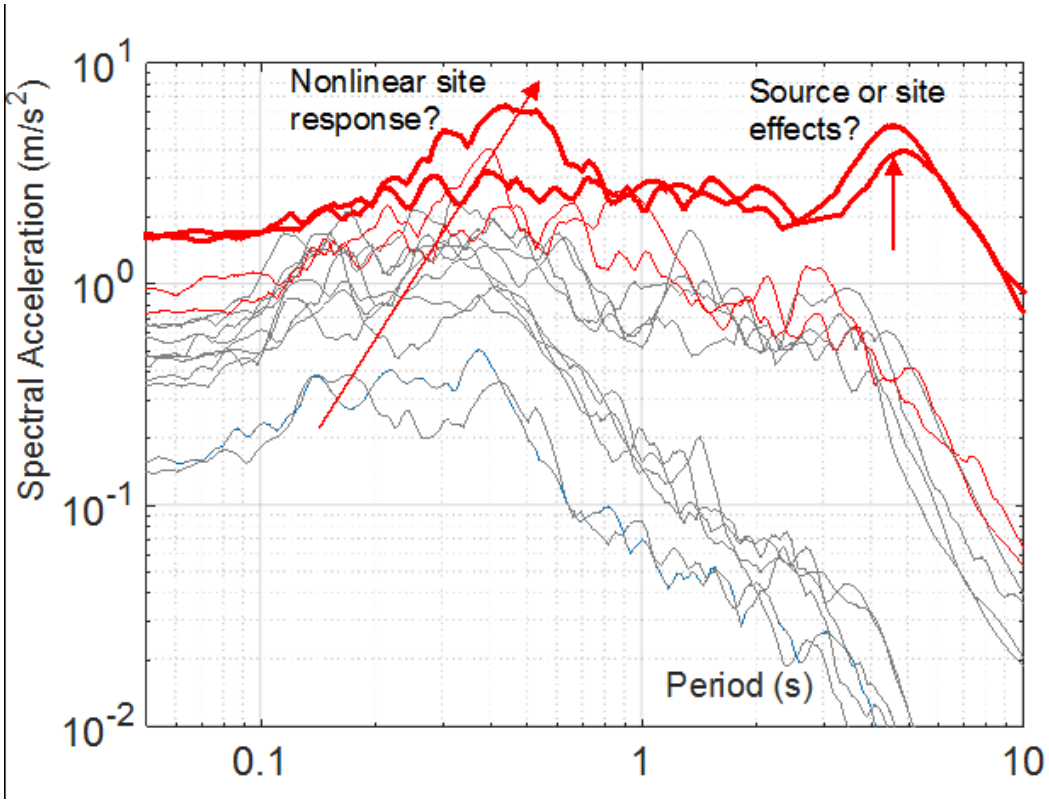




Εικόνα 31: Φασματογραφήματα των 3 κύριων συνιστωσών EW, NS και UD του κυρίως σεισμικού γεγονότοςτης Gorkha M7.8 που καταγράφηκαν από τον σταθμό KATNP.


Spectral Acceleration (m/s^2)
7
6
5
4
3
2
1
0
M7.8
M7.3
0.43s
0.47s
5.0s
10^{-1}
10^{0}
Period (s)
10^{1}


Spectral Acceleration (m/s^2)
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0.31s
1.3s
3.2s
10^{-1}
10^{0}
Period (s)
10^{1}



Εικόνα 32: Φάσματα αντίδρασης του κυρίως σεισμου, του μετασεσμού έντασης M7.3 της 12/05/2015 και των 6 επόμενων ισχυρότερων μετασεισμών.

Στην εικόνα 32 συγκρίνεται το φάσμα αντίδρασης της κύριας σεισμικής δόνησης, τον μετασεισμό έντασης M7,3 της 12/5/2015 και τους 6 επόμενους ισχυρότερους μετασεισμούς.

Εδώ παρατηρούνται δύο χαρακτηριστικά :

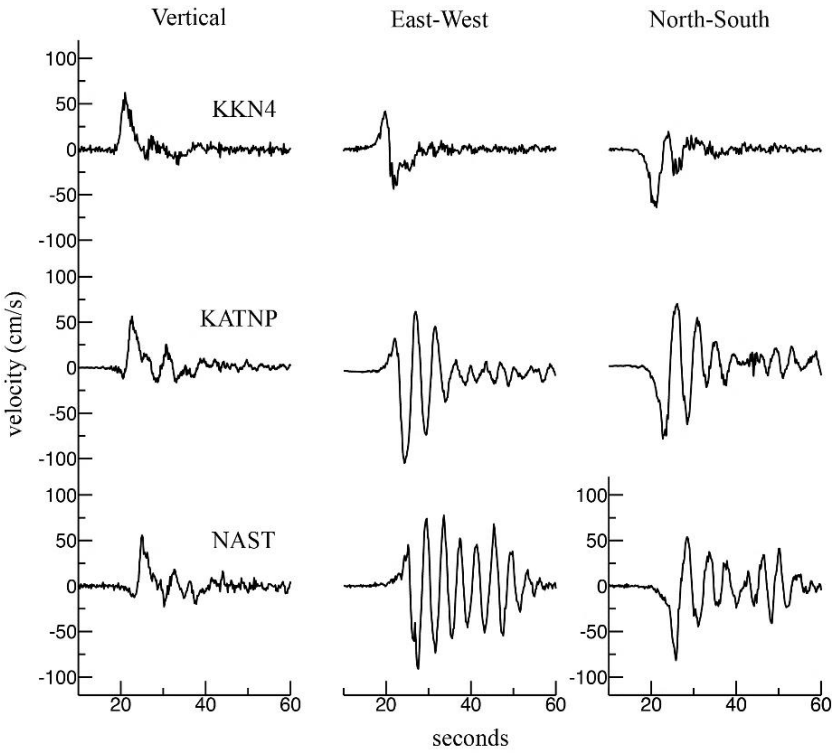
Στην χαμηλή περίοδο (υψηλή συχνότητα) του φάσματος αντίδρασης, οι κορυφώσεις της κύριας σεισμικής δόνησης στα 0,47s, ο μετασεισμός έντασης M7,3 στα 0,43s και οι πιο αδύναμοι μετασεισμοί οι οποίοι κυμαίνονται από 0,2 – 0,3s, η δε επιμήκυνση της περιόδου καταδεικνύει μια μη γραμμική αντίδραση της τοποθεσίας

Οι οριζόντιες συνιστώσες του κυρίως σεισμού φαίνεται να είναι οι μοναδικές με ενέργεια κατά την περίοδο των 5s, ενώ οι μακράς περιόδου κορυφώσεις του μετασεισμού συμβαίνουν με μεγαλύτερη συχνότητα, 1-3s. Και μόνο από την παρατήρηση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εκπομπή κυμάτων των 5s είναι καθαρό χαρακτηριστικό του κυρίως σεισμού. Οι επιδράσεις στην πηγή και κοντά στην επιφάνεια της λεκάνης πιθανότατα έχουν συντελέσει στο περιεχόμενο συχνότητας του κυρίως σεισμού, αν και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να επαληθευθεί αυτή η θεωρία.

Είναι ενδιαφέρον να συγκρίνουμε τις καταγραφές των σταθμών KKN4, KATNP και NAS, οι οποίοι βρίσκονται 68, 77 και 82 χιλιόμετρα από το επίκεντρο αντίστοιχα. Ο σταθμός KKN4 είναι εγκατεστημένος στους δυτικούς λόφους έξω από την λεκάνη του Κατμαντού (Εικ. 27) και οι σταθμοί KATNP και NAST είναι εγκατεστημένοι εντός της λεκάνης. Οι σταθμοί KKN4 και NAST είναι GPS 5Hz οι οποίοι αντλούν δεδομένα από το ALOS-2 (Galetzka et al.2015). Τα ανεπεξέργαστα δεδομένα των GPS διατίθενται από το Nepal Geodetic Array το οποίο εποπτεύεται από το California Institute of Technology και το Υπουργείο Ορυχείων και Γεωλογίας του Νεπάλ. Το Scripps Permanent Array και το Observation Center επεξεργάστηκε τα πρωτόλεια

(ανεπεξέργαστα) δεδομένα των GPS και τα μετέτρεψε σε ιστορικές αλληλουχίες μετακίνησης εδάφους, τα οποία επισυνάπτονται σε μορφή ascii στο τέλος αυτής της εργασίας. Ο σταθμός KATNP είναι ο σταθμός καταγραφής ισχυρών κινήσεων του USGS στο Κατμαντού το οποίο αναφέρθηκε προηγουμένως. Η εικόνα 32 συγκρίνει τα αρχεία ταχύτητας των 3 συνιστωσών από τις 3 διαφορετικές τοποθεσίες. Ο σταθμός KKN4 διαθέτει τις απλούστερες και χαμηλότερες κυματομορφές έντασης , αποτελούμενες από κύματα μορφής S με διάρκεια 5-6s. Οι άλλοι σταθμοί δείχνουν ενίσχυση και επέκταση της διάρκειας εξ αιτίας της χαμηλής ταχύτητας των ιζημάτων της λεκάνης του Κατμαντού. Ο σταθμός KATNP παρουσιάζει δευτερεύουσες εκπομπές κυμάτων οι οποίες προέρχονται από τα επιφανειακά κύματα της λεκάνης, τα οποία κρίνοντας από την έλλειψη παρόμοιων κινήσεων στις κάθετες συνιστώσες είναι Love waves, αν και οι κινήσεις των μορίων στο οριζόντιο πεδίο δεν έχουν γραμμική πολικότητα καταδεικνύοντας μια σύνθετη τρισδιάστατη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων προερχομένων από την λεκάνη του Κατμαντού. Στον σταθμό NAST, στο νότιο άκρο της λεκάνης η διάρκεια των επιφανειακών κυμάτων είναι περισσότερο από 40s με μια κυρίαρχη περίοδο περίπου 4s. Υπάρχουν 5 κύκλοι κινήσεως στα ή πάνω από 50cm/s. Υπάρχει ένα δεύτερο πακέτο επιφανειακής κυματικής ενέργειας το οποίο πιθανώς προέρχεται από διαδράσεις του κυματικού πεδίου με τα άκρα της λεκάνης.

Καθώς οι 3 τοποθεσίες του Κατμαντού βρίσκονται περίπου 10 χιλιόμετρα από το επίπεδο διάρρηξης, οι καταγραφές των κινήσεων του εδάφους μακράς περιόδου είναι περίπλοκες μέσω της παρεμβολής των τριών κατηγοριών κυμάτων πεδίου, δηλαδή πλησίον, ενδιαμέσων και απομακρυσμένων. Όπως φαίνεται στην εικόνα 33 οι μεταγενέστερες, μακράς περιόδου επαναλήψεις είναι πιθανώς επιφανειακά κύματα διαχεόμενα στην λεκάνη. Στην μετακίνηση των εδαφών, όλες οι τοποθεσίες παρουσιάζουν μεγάλης κλίμακας στατική παραμόρφωση, συμπεριλαμβανομένης της τοποθεσία του επιταχυνσιομετρικού σταθμού KATNP αν και η ανάκτηση της στατικότητας είναι δύσκολη εξ αιτίας της διπλής (double integration). Η εικόνα 3-13 συγκρίνει τα δεδομένα του σταθμού των 3 στοιχείων KKN4 των κινήσεων του εδάφους μακράς περιόδου. (χρονική σειρά) (displacement time series) το οποίο προκύπτει από την παρατήρηση χωρικών δεδομένων 5Hz GPS.



Εικόνα 33: Σύγκριση των αρχείων ταχύτητας 3 συνιστωσών για τις περιοχές εκτός και εντός της λεκάνης του Κατμαντού. Ισχυρά σήματα κύματων Love παράγονται από τις επιπτώσεις των άκρων της λεκάνης απορροής και την τρισδιάστατη διάδοση τους μέσα από τα ιζήματα της λεκάνης αυτής.

Οι οριζόντιες καταγραφές έχουν εφαρμοσθεί κυκλικά σε στοιχεία τα οποία βρίσκονται παράλληλα στην επιφάνεια του ρήγματος (FP, azi=295) (fault parallel) και κατά μήκος του ρήγματος (FN, azi=25) (fault normal). Και οι 3 αυτές συνιστώσες δείχνουν μεγάλο στατικό αποτύπωμα / κινητικότητα κατά την διάρκεια των κινήσεων εκτόπισης (displacement) του εδάφους. Η στατική εκτόπιση του εδάφους ελέγχεται από το χρονικό διάστημα του μέσου πεδίου το οποίο είναι αναλογικό προς το ιστορικό του μηχανισμού γένεσης, ή το χρονικό της ολίσθησης στο ρήγμα. Από τις κατακόρυφες και τις κανονικού ρήγματος (FN) συνιστώσες ο χρόνος κορύφωσης της ολίσθησης είναι δυνατό να προσδιορισθεί ευθέως από την αρχή της εξέλιξης του στατικού αποτυπώματος (static offset) έως τον χρόνο σταθεροποίησης. Οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τον περιγραφόμενο χρόνο ολίσθησης, ο οποίος επίσης συσχετίζεται με το ξεκίνημα και το τέλος της κάθετης συνιστώσας / στοιχείου της ταχύτητας της εκπομπής σεισμικών κυμάτων (velocity pulse) Από αυτές τις καταγραφές υπολογίζεται ότι ο χρόνος κορύφωσης της ολίσθησης να είναι παρίπου 7,4s. Μια ελάχιστη εκτίμηση μπορεί να προκύψει από τους χρόνους κατά τους οποίους η κάθετη ταχύτητα εκπομπής σεισμικών κυμάτων (velocity pulse) αυάνεται και καταλήγει στο μηδέν. Ο μετρούμενος χρόνος κορύφωσης είναι σύμφωνος με την εκτίμηση κατά την οποία η μακρά περίοδος εκπομπής ενέργειας παρατηρείται στο φάσμα αντίδρασης του κυρίως σεισμικού γεγονότος και οφείλεται πρωτίστως στην πηγή.

Η ταχύτητα εκπομπής σεισμικών κυμάτων της ολίσθησης της μακράς περιόδου από μόνη της δεν αποτελεί εξήγηση για τις εδαφικές κινήσεις του σταθμού KATNP (Εικ. 32) της μικρής περιόδου παρότι εξηγεί την υψηλή αντίδραση της μακράς περιόδου. Οι κινήσεις της μικρής περιόδου μπορεί να είναι μικρές για διάφορους λόγους συμπεριλαμβανομένων των εξής:

1. Η προαναφερθείσα υποβυθιζόμενη φύση της κατεύθυνσης των σεισμικών κυμάτων εστιαζόμενη σε σεισμούς βαθιάς ολίσθησης / κατά κλίσης (dip-slip)dip-slip).

2. Η πιθανότητα μιας σχετικά ήπιας διαδικασίας διάρρηξης η οποία οδηγεί σε αδύναμη ακτινοβολία σε μικρές περιόδους.

3. Οι ιδιότητες σεισμικής απορρόφησης της περιοχής.

5.4 Η ρηξιγενής ζώνη διάρρηξης

Ο σεισμός έντασης 7,8Mw και οι μετασεισμοί δεν προξένησαν κάποια ορατή ρηγματοιειδή διάρρηξη στην επιφάνεια. Διενεργήθηκαν εκτεταμένες έρευνες πεδίου από μέλη της ομάδας GEER καθώς και από άλλους ερευνητές και το κοινό συμπέρασμα είναι ότι η ολίσθηση σε βάθος δεν διαδόθηκε στην επιφάνεια του εδάφους.

Ο σεισμός Bihar-Nepal του 1934 πιστεύεται ότι έχει δημιουργήσει διάρρηξη σε βάθος στο κυρίως μέτωπο της ώθησης (MFT) στα ΝΑ του Κατμαντού.

Πρόσφατες εργασίες των Bollinger et al. (2014) και άλλων επιστημόνων έχουν τεκμηριωμένη ένδειξη ότι οι σεισμοί του 1934 και του 1255, αμφότεροι προκάλεσαν διάρρηξη στην επιφάνεια του εδάφους. Αν και οι σεισμολογικές ενδείξεις συνηγορούν ότι το υπόκεντρο του σεισμού της Gorkha το 2015 εντοπίσθηκε κατά μήκος ή κοντά στο ρηξιγενές πεδίο του κυρίως μετώπου της ώθησης, καμία παρόμοια ένδειξη επιφανειακής διάρρηξης του εδάφους ή εδαφικής παραμόρφωσης (πτύχωση, στρέβλωση) δεν παρατηρήθηκε μετά τον σεισμό του 2015 στην Gorkah ή σε μετασεισμούς. Αυτή η τάση είναι ανάλογη με τη διακύμανση του μεγέθους της επιφάνειας της διάρρηξης για τα γεγονότα αυτής της περιοχής, η επιφανειακή διάρρηξη προήλθε από σεισμικά γεγονότα >8 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ (1255, 1934) αλλά όχι από σεισμικά γεγονότα <8 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ (1803, 1833, 1905)

Αυτές οι παρατηρήσεις συμπίπτουν με το μοντέλο για επιφανειακές ρηγματοειδείς διαρρήξεις μηχανισμών αναστροφής των Moss et al. (2013). Χρησιμοποιώντας χαρτογραφημένες εκτιμήσεις του Vs30 ως ένδειξη σκληρότητας κοντά στην επιφάνεια όπου το πεδίο του κυρίως μετώπου ώθησης προβάλλεται στην επιφάνεια

του εδάφους, το μοντέλο αυτό δίνει 55% πιθανότητα για μια επιφανειακή διάρρηξη για σεισμικό γεγονός έντασης 7,8Mw, αλλά μεγαλύτερο ποσοστό 62% πιθανότητας για μια επιφανειακή διάρρηξη για σεισμικό γεγονός της τάξης 8,1M. Ακόμα και για σεισμικά γεγονότα μεγαλύτερου μεγέθους, η φύση της συμπίεσης των μηχανισμών αναστροφής συχνά καταλήγει σε εδαφικές μετακινήσεις σε βάθος οι οποίες είναι μερικώς η πλήρως μειωμένες (mitigated) πριν φθάσουν στην επιφάνεια του εδάφους.

6 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

6.1 Περιγραφή της κλίμακας ESI 2007

Η περιγραφή της σφοδρότητας ενός σεισμού μπορεί να γίνει μέσω μίας παραμέτρου, της μακροσεισμικής έντασης, η εκτίμηση της οποίας βασίζεται στην ταξινόμηση και βαθμονόμηση της επίδρασης των συνεπειών μιας σεισμικής δόνησης στον άνθρωπο, στο ανθρωπογενές περιβάλλον (κτίρια και υποδομές) και στο φυσικό περιβάλλον (περιβαλλοντικές ή γεωλογικές επιπτώσεις) (Michettietal., 2007). Η κλίμακα ESI 2007 (Michettietal., 2007) βασίζεται μόνο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σεισμών δηλαδή σε επιφανειακές εδαφικές παραμορφώσεις (διαρρήξεις, καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις κ.α.), ανωμαλίες υπόγειων και επιφανειακών υδάτων (αλλαγή χημισμού και θερμοκρασίας, παροχή, θολότητα κ.α.), καθώς και σε θαλάσσια σεισμικά κύματα βαρύτητας (tsunami) για την εκτίμηση της μακροσειμικής έντασης. Η χρήση της, μόνη ή σε συνδυασμό με κάποια άλλη κλίμακα, δίνει μια πιο σφαιρική εικόνα της σεισμικής δόνησης. Στην περίπτωση που συνδυαστεί με άλλη κλίμακα η τελική τιμή της έντασης θα ισούται με την υψηλότερη τιμή μεταξύ των δύο εκτιμήσεων. Η κλίμακα ESI 2007 είναι δομημένη σε δώδεκα βαθμούς. Κάθε βαθμός αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες πρωτογενείς και δευτερογενείς επιπτώσεις.

Στον τίτλο κάθε βαθμού έντασης εκφράζεται η δριμύτητα του σεισμού και το μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Κατά την περιγραφή, στην αρχή κάθε βαθμού αναφέρονται τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος των πρωτογενών επιπτώσεων, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι δευτερογενείς επιπτώσεις σε σχέση με τη συνολική περιοχή εμφάνισής τους για την εκτίμηση της επικεντρικής έντασης. Η επικεντρική ένταση (Io) δηλώνει την ένταση της δόνησης σε αντιστοιχία με το επίκεντρο (Michettietal., 2007; Papathanassiou& Pavlides, 2016). Οι πρωτογενείς επιπτώσεις είναι άμεση συνάρτηση της ενέργειας του σεισμού και προπάντων της επιφανειακής εκδήλωσης της σεισμογόνου πηγής. Το μέγεθος των πρωτογενών επιπτώσεων τυπικά εκφράζεται με δύο παραμέτρους: i) το συνολικό μήκος του επιφανειακού ίχνους του ρήγματος (SRL, TotalSurfaceRuptureLength) και ii) τη μέγιστη μετατόπιση (MD, Maximum Displacement). Η εμφάνισή τους συνήθως συνδέεται με μια ελάχιστη τιμή της έντασης (VIII), εκτός των περιπτώσεων επιφανειακών σεισμών σε ηφαιστειακές περιοχές. Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της τεκτονικής επιφανειακής παραμόρφωσης (ανύψωση, ταπείνωση-uplift, subsidence) λαμβάνονται επίσης υπόψη (Michettietal., 2007; Papathanassiou& Pavlides, 2016).

Ως δευτερογενείς επιπτώσεις χαρακτηρίζονται εκείνα τα φαινόμενα που προκαλούνται από την εδαφική κίνηση και ταξινομούνται σε οκτώ κύριες κατηγορίες (Michettietal., 2007; Papathanassiou&Pavlides, 2016):

α) Υδρογεωλογικές ανωμαλίες: στην κατηγορία αυτή περιγράφονται μεταβολές στην παροχή των πηγών και ποταμών καθώς επίσης και μεταβολές στις φυσικο-χημικές ιδιότητες των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (π.χ. θερμοκρασία, θολότητα). Αυτές οι επιπτώσεις παρατηρούνται σε εντάσεις από IV έως X.

β) Ανωμαλίες στον κυματισμό/ Tsunamis: στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται φαινόμενα όπως κυματισμός σε κλειστές λεκάνες, υπερχείλιση νερού σε πισίνες και λεκάνες καθώς επίσης και tsunamis. Στην τελευταία περίπτωση, τα tsunamis, ως διαγνωστικοί παράγοντες θεωρούνται κυρίως οι επιπτώσεις του κύματος στις ακτές (βάθος εισχώρησης στην ενδοχώρα, διάβρωση παραλίας, αλλαγές στην παράκτια μορφολογία), χωρίς βεβαίως να αγνοούνται η επίδραση στον άνθρωπο και στις κατασκευές.

γ) Εδαφικές διαρρήξεις: περιγράφονται με βάση το μήκος τους (από cm μέχρι εκατοντάδες μέτρα), πλάτος (από mm έως m) και πυκνότητα στο χώρο. Οι εδαφικές διαρρήξεις παρατηρούνται σε εντάσεις από IV και διατηρούνται σταθερές σε μέγεθος (κορεσμός) από ένταση βαθμού X.

δ) Αστοχίες πρανών: στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται όλοι οι τύποι των κατολισθήσεων συμπεριλαμβανομένων των καταπτώσεων, ολισθήσεων και εδαφικών ροών. Όταν το λιθολογικό και μορφολογικό πλαίσιο είναι παρόμοιο, τότε ο όγκος και το εμβαδό της περιοχής αποτελούν τις διαγνωστικές παραμέτρους. Αυτές οι επιπτώσεις παρατηρούνται σε ένταση από IV και διατηρούν το μέγεθος τους σταθερό από ένταση βαθμού X.

ε) Ταλάντωση δέντρων: αυτές οι επιπτώσεις παρατηρούνται σε εντάσεις από IV έως X. Η περιγραφή των βαθμών της έντασης ουσιαστικά ακολουθεί τους δημοσιευμένους βαθμούς έντασης των Dengler &McPherson (1993).

ζ) Φαινόμενα ρευστοποίησης: σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται φαινόμενα κώνων και ηφαιστείων άμμου, ανάδυση νερού και αμμώδους υλικού και ορισμένοι τύποι πλευρικής εξάπλωσης, συνίζησης και καθίζησης. Χαρακτηρίζουν εντάσεις βαθμού V έως X.

η) Σύννεφα σκόνης: παρατηρούνται σε περιοχές με ξηρό κλίμα σε βαθμό έντασης μεγαλύτερο από VIII.

θ) Αναπήδηση βράχων: το μέγιστο μέγεθος των βράχων αποτελεί διαγνωστικό παράγοντα για την εκτίμηση της έντασης και παρατηρούνται σε εντάσεις από IX μέχρι XII. Τέτοια φαινόμενα παρατηρούνται σε θέσεις όπου οι εδαφικές επιταχύνσεις είναι μεγαλύτερες της βαρύτητας.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρατηρούνται και χαρακτηρίζουν εντάσεις βαθμού μεγαλύτερου του IV. Μερικές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (υδρολογικές ανωμαλίες) είναι δυνατό να παρατηρηθούν ακόμα και σε χαμηλότερους βαθμούς έντασης αλλά δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως διαγνωστικά στοιχεία. Η ακρίβεια στην αξιολόγηση της έντασης αυξάνει στους μεγαλύτερους βαθμούς και συγκεκριμένα σε θέσεις παρατήρησης πρωτογενών επιπτώσεων (συνήθως σε εντάσεις μεγαλύτερες του VIII), έως και ένταση XII. Σε ένταση μεγαλύτερη του X, οι επιπτώσεις στο ανθρωπογενές δομημένο περιβάλλον και στους ανθρώπους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς οι κατασκευές έχουν συνήθως ολοκληρωτικά καταστραφεί (κορεσμός) και για αυτό το λόγο δεν είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ διαφορετικών βαθμών έντασης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κυριαρχούν και για αυτό αποτελούν το πιο αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση της έντασης (Michettietal., 2007; Papathanassiou&Pavlides, 2016).

Η χρησιμοποίηση της μακροσεισμικής κλίμακας ESI 2007 ως ένα ανεξάρτητο εργαλείο για την εκτίμηση της έντασης προτείνεται στις περιπτώσεις εκείνες όπου μονάχα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαγνωστικά καθώς οι επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο ανθρωπογενές δομημένο περιβάλλον είναι είτε ανεπαρκείς είτε κορεσμένες.

Στην περίπτωση που οι τελευταίες επιπτώσεις μπορούν να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν, τότε είναι δυνατή η εκτίμηση δύο ανεξάρτητων τιμών μακροσεισμικής έντασης. Η τελική τιμή έντασης θα ισούται με την υψηλότερη τιμή μεταξύ των δύο εκτιμήσεων. Προφανώς, σε αυτές τις περιπτώσεις, η γνώμη και η εμπειρία ενός ειδικού είναι απαραίτητη. Η επικεντρική ένταση (Io) δηλώνει την ένταση της δόνησης σε αντιστοιχία με το επίκεντρο. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής

εκδήλωσης του σεισμογόνου ρήγματος καθώς επίσης και η συνολική έκταση της κατανομής των δευτερογενών φαινομένων (κατολισθήσεις, ρευστοποιήσεις) είναι επίσης ανεξάρτητα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της Io με βάση τα περιβαλλοντικά φαινόμενα, με αφετηρία τον βαθμό έντασης VII. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις περιπτώσεις εκείνες όπου τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής εκδήλωσης του σεισμογόνου ρήγματος τοποθετούνται στο όριο μεταξύ δύο βαθμών έντασης. Σε αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να επιλεγεί εκείνη η τιμή της έντασης που βρίσκεται σε συμφωνία με τα χαρακτηριστικά και την έκταση εμφάνισης δευτερογενών επιπτώσεων.

Επίσης, κατά την αξιολόγηση της έντασης της συνολικής περιοχής, συνιστάται να μην συμπεριλαμβάνονται απομονωμένες παρατηρήσεις φαινομένων στο μακρινό πεδίο. Σε αυτήν τη διαδικασία αξιολόγησης επίσης θεωρείται ουσιώδης η γνώμη ενός ειδικού. Η τοπική ένταση αξιολογείται κυρίως δια μέσου τηςπεριγραφής των δευτερογενών επιπτώσεων που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές «θέσεις» που βρίσκονται μέσα σε μια «τοποθεσία». Αυτή η τιμή της έντασης πρέπει να συγκριθεί με την αντίστοιχη τοπική ένταση η οποία εκτιμήθηκε με βάση τις ζημιές. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον όρο «τοποθεσία» ο οποίος αναφέρεται τόσο σε κατοικημένες περιοχές (πόλη, χωριό) όσο και σε γεωγραφικές περιοχές χωρίς την ύπαρξη κατοικημένων εκτάσεων. Όταν σε μια θέση παρατηρούνται μονάχα πρωτογενείς επιπτώσεις τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μέγεθος της μέγιστης μετατόπισης της τοπικής επιφανειακής διάρρηξης (Michettietal.,2007; Papathanassiou&Pavlides, 2016).

I_0	ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ		ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
	ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ (SRL)	ΜΕΓ. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (MD)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΑΣΗ
IV	-	-	-
V	-	-	-
VI		-	-
VII	(*)	(*)	10 km^2
VIII	Αρκετές εκατοντάδες μέτρα	εκατοστόμετρα	100 km^2
IX	1- 10 km	5 - 40 cm	1000 km^2
X	10 - 60 km	40 - 300 cm	5000 km^2
XI	60 – 150 km	300 –700 cm	10000 km^2
XII	> 150 km	> 700 cm	> 50000 km^2

Πίνακας 2: Διακύμανση παραμέτρων επιφανειακής εκδήλωσης του σεισμογόνου ρήγματος (πρωτογενείς επιπτώσεις) και μέγεθος συνολικής έκτασης (δευτερογενών επιπτώσεων) για κάθε βαθμό έντασης (Michettietal., 1997; PapathanassiouandPavlides, 2016).

6.2 Η Εδαφική απόκριση της περιοχής του Κατμαντου κατά την διαρκεια του σεισμικου γεγονοτος

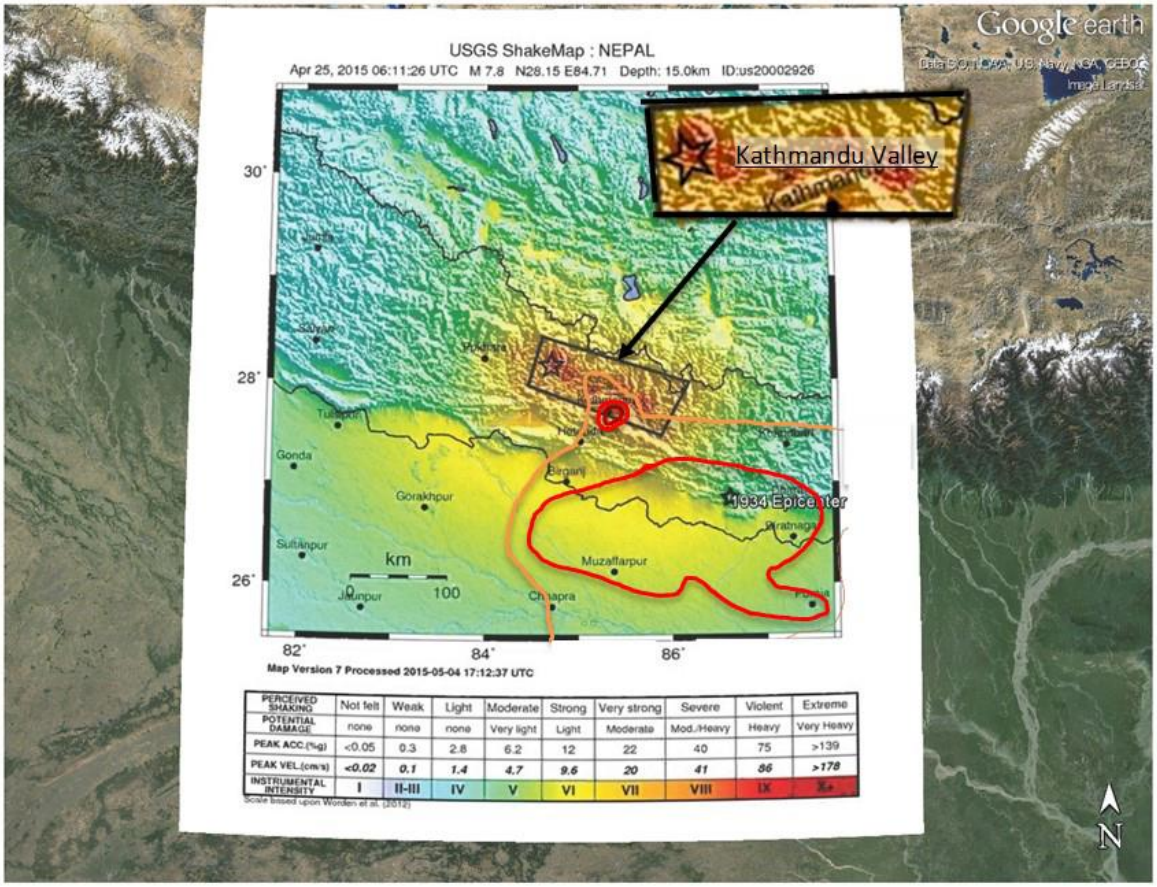
Δοθέντος του μεγέθους των 7,8 της κλίμακας Ρίχτερ του σεισμού της περιοχής Gorkha της 25ης Απριλίου 2015, και της απόστασης του επικέντρου της ζώνης διάρρηξης από το Κατμαντού, δηλαδή περίπου μηδενική, οι εδαφικές κινήσεις του κυρίως σεισμικού γεγονότος ήταν απροσδιόριστες. Χαρακτηρίστηκε από μια πολύ μακρά περίοδο (5s) των κυρίως σεισμικών δονήσεων οι οποίες αντανακλάστηκαν στην κοιλάδα για 4-5 κύκλους πριν βαθμιαία ατονήσουν, και ένα πολύ χαμηλό φάσμα υψηλής συχνότητας, τα οποία μαζί οδήγησαν σε μια απροσδόκητα χαμηλής κορύφωσης επιτάχυνσης του εδάφους (PGA) της τάξεως των 0,16g. Αν και η φύση των ισχυρών κινήσεων του κυρίως σεισμικού γεγονότος δεν έχει ακόμα κατανοηθεί επαρκώς.

Δυστυχώς, η ακολουθία του σεισμού δεν καταγράφηκε επαρκώς αφού μόνο ένα όργανο – σταθμός καταγραφής ισχυρών κινήσεων σε μαλακά ιζήματα έχει ως τώρα δώσει την χρονική επιτάχυνση του γεγονότος (Κεφ. 3). Ανέκδοτες ενδείξεις έχουν ακόμα λίγα όργανα καταγραφής κινήσεων του εδάφους ενδιαμέσου της λεκάνης και στην κορυφή περιμετρικά του σχηματισμού των πετρωμάτων. Αν και τα δεδομένα είναι ιδιωτικά και δεν υπάρχει καμία ένδειξη για την ποιότητα των καταγραφών ή για την χρονική περίοδο της έκδοσης των δεδομένων τους. Εν τέλει καταγραφές ακριβείας χωρικών δεδομένων 5Hz καταγράφηκαν από το δίκτυο, το οποίο είχε εγκαταστήσει ο Jean-Philippe Avouac [Caltech/ Cambridge UK] μέσα στη λεκάνη και στις περιβάλλουσες οροσειρές. Τώρα το δίκτυο συντηρείται από την UNAVCO. Η Suzan Owen στον οργανισμό JPL έχει επεξεργαστεί τα δεδομένα μέσω συνεργασίας με το Caltech/JPLARIA και οι δυο διαφορετικές καταγραφές της χρονικής επιτάχυνσης. Αυτές ταιριάζουν με την καταγραφή ισχυρών κινήσεων του σταθμού KTNP του USGS για συχνότητες κάτω από τα 0,5Hz συμπεριλαμβανομένης της παράδοξης επικρατούσας συχνότητας του κυρίως σεισμού στα 0,2Hz.

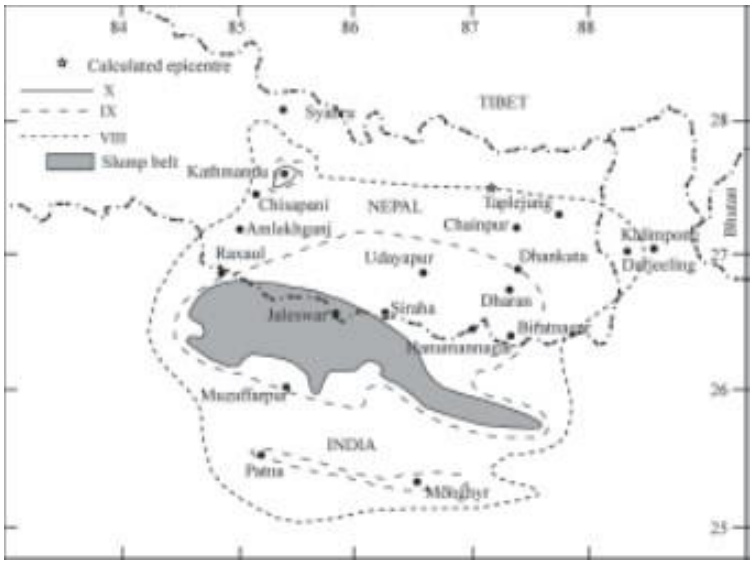
Ως συνέπεια, η κατανόηση που έχουμε για τις επιπτώσεις στην τοποθεσία, συμπεριλαμβανομήνης της αντίδρασης του εδάφους, της λεκάνης απορροής και των τοπογραφικών επιπτώσεων, βασίζεται κυρίως σε βιβλιογραφικές αναφορές, παρατηρήσεις προτύπων ζημιών και τεχνικές μονού σταθμού όπως Οριζόντιες προς κάθετες (H/V) φασματικές αναλογίες.

6.2.1 Κινήσεις εδάφους και επιπτώσεις στα εδαφικά τοπία στην περιοχή του Νεπάλ: Ιστορικά στοιχεία.

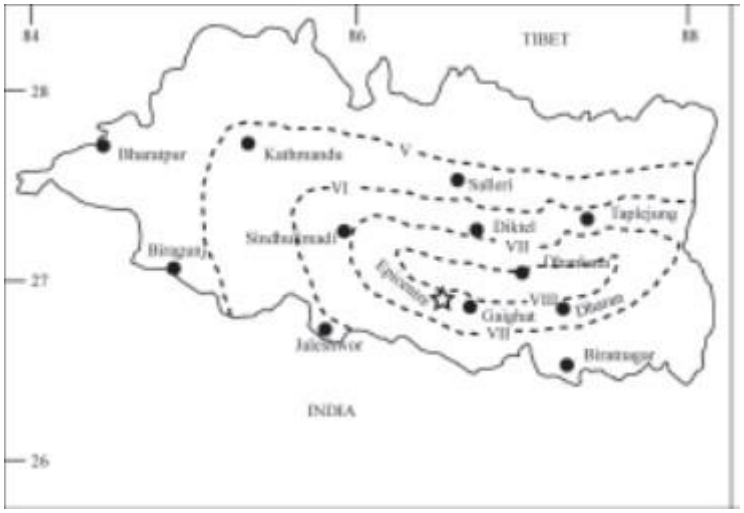
Το μοντέλο της καταστροφής το οποίο αναφέρεται επανειλημμένα μετά από ιστορικούς και πρόσφατους σεισμούς καταδεικνύει τις περισσότερο σοβαρές ζημιές στα μεγαλύτερα οικοδομικά συγκροτήματα της κοιλάδας του Κατμαντού όπως οι πόλεις Κατμαντού, Μπακταπούρ και Πατάν μετά από κάθε ισχυρό σεισμό. Κατά τη διάρκεια του σεισμού της 25^{ης} Απριλίου στην περιοχή Gorkha,για μια ακόμα φορά οι πόλεις αυτές υπέστησαν σοβαρές ζημιές. Αυτό το επαναλαμβανόμενο μοντέλο της καταστροφής σε αυτές τις πόλεις μετά από κάθε ισχυρό σεισμό υποδεικνύει περαιτέρω την ενίσχυση των εδαφικών κινήσεων εξ αιτίας των τοπογραφικών επιπτώσεων σε αυτές τις τοποθεσίες. Στην εικόνα 34 σχεδιάζονται τα περιγράμματα της έντασης του σεισμού στο Νεπάλ το 1934 έντασης 8,1M τα οποία προκύπτουν από την εικόνα 35 μαζί με τον χάρτη δονήσεων του USGS του σεισμού της Gorkha 7.8M. Χάρτες καταγραφής έντασης και από τα δύο γεγονότα καταδεικνύουν υψηλότερη ένταση δόνησης στην κοιλάδα του Κατμαντού.



Εικόνα 34: Σύγκριση των περιγραμμάτων έντασης του σεισμού του Νεπάλ του 1934 (M8.1) με την κατανομή έντασης βασισμένη στο USGS ShakeMap του σεισμού του 2015 Gorkha (M7.8).



α)



β)

Εικόνα 35: Χάρτες εντάσεων α) για τον Μεγάλο σεισμό του 1934 Nepal-Bihar και β) τον Σεισμό του Udiapurtou 1988 (NepalGEERreportversion1,2015).

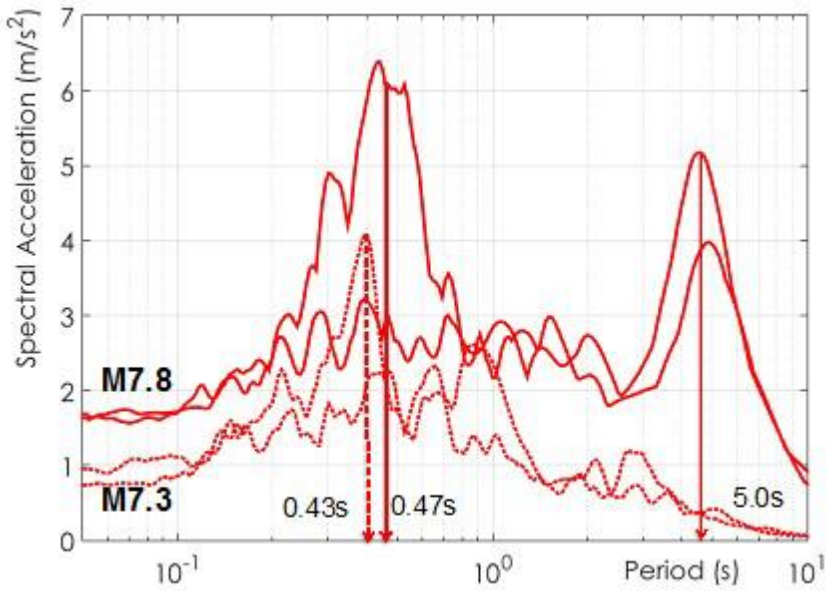
6.2.2 Οι επιπτώσεις των εδαφικών κινήσεων

Η συχνότητα της εδαφικής κίνησης και τα χαρακτηριστικά της έντασης του κυρίως σεισμικού γεγονότος δεν έχουν ακόμα επαρκώς κατανοηθεί. Ακόμα ερευνάται το τι ρόλο έχουν διαδραματίσει στα χαρακτηριστικά των εδαφικών κινήσεων οι τοπικές εδαφικές επιδράσεις. Εξ αιτίας της έλλειψης καταγραφών περιμετρικά των σχηματισμών των πετρωμάτων, η έρευνα βασίζεται σε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ του κυρίως γεγονότος του σεισμού και των 7 ισχυρότερων μετασεισμών οι οι οποίοι καταγράφηκαν από τους σταθμούς καθώς και μεθοδολογίες ενός σταθμού προκειμένου να εκτιμήσουμε την ανταπόκριση της τοποθεσίας.

Η εικόνα 36 παρουσιάζει το φάσμα αντίδρασης του κυρίως σεισμού έντασης 7,8Mw (25-4-2015) και του ισχυρότερου μετασεισμού έντασης 7,3Mw (12-5-2015), όπου προσδιορίζονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

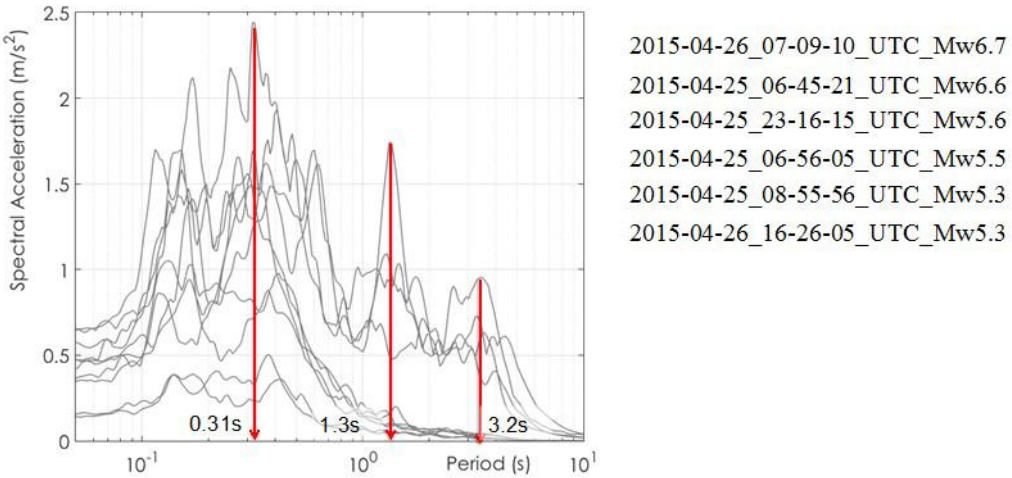
Το στοιχείο NS του κυρίως σεισμού το οποίο περιέχει δύο προεξέχουσες κορυφώσεις, μία στα 0,47s και μια στα 5s

Αμφότερα τα στοιχεία του κυρίως σεισμού έχουν κορυφώσεις στα 5s ενώ τα στοιχεία του μετασεισμού δεν έχουν, πιθανή ένδειξη ότι η σεισμική εκπομπή των 5s ήταν χαρακτηριστική της γένεσης του κυρίως σεισμού και δεν σχετίζεται με τις εδαφικές επιδράσεις και τα στοιχεία NS και EW του κυρίως σεισμού και του μετασεισμού στο εύρος T < 1s είναι πρακτικώς παρόμοια, δηλαδή το στοιχείο NS έχει μεγάλη ενίσχυση στα 0,4-0,5s, όπου το στοιχείο EW έχει μια πιο επίπεδη αντίδραση στην ίδια χρονική περιοχή. Οι ομοιότητες σε δύο ορθογώνια στοιχεία μπορούν να αποδοθούν σε παρόμοιους μηχανισμούς ακτινοβολίας της πηγής υψηλής συχνότητας ή ανισοτροπία των εδαφικών συνθηκών.



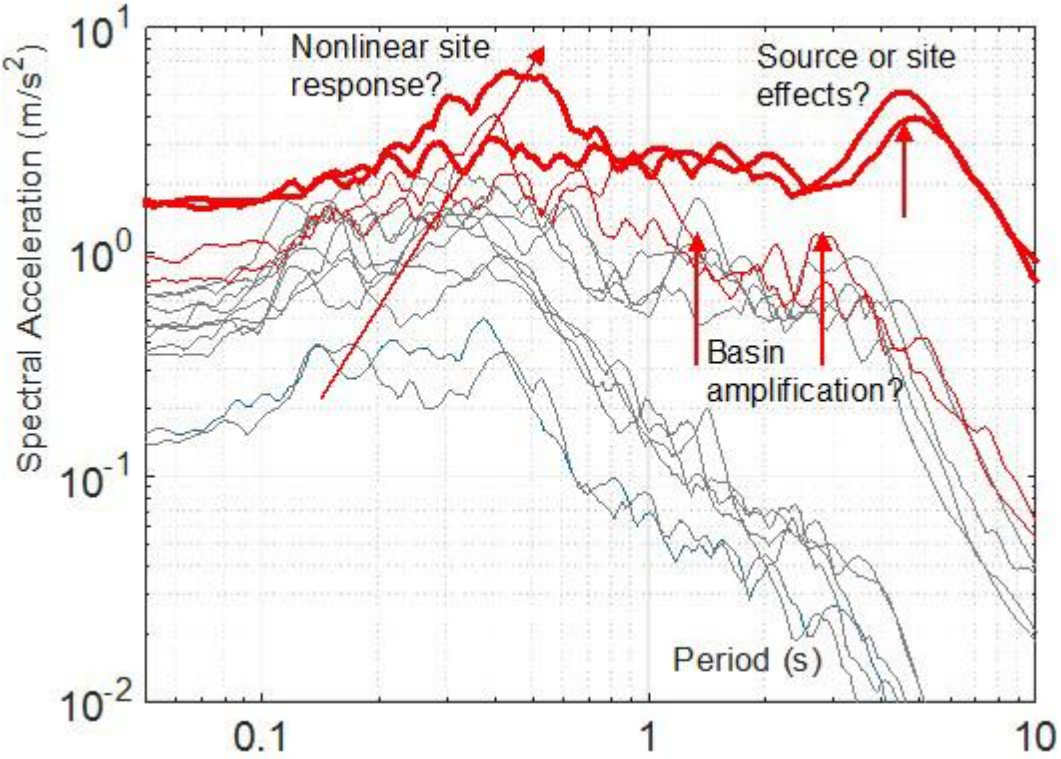
Εικόνα 36: Φάσματα απόκρισης των στοιχείων NS και EW του κυρίως σεισμού M7.8 (04/25/2015) και του ισχυρότερου μετασεισμού M7.3 (05/12/2015) της σεισμικής ακολουθίας της Gorkha.

Ερευνώντας περαιτέρω, η εικόνα 37 αποτυπώνει το φάσμα αντίδρασης των 6 επόμενων μεγάλων μετασεισμών αυτής της ακολουθίας (έως σήμερα) οι οποίοι καταγράφονται ακολούθως με φθίνουσα σειρά μεγέθους γένεσης. Στην εικόνα 37 φαίνεται ότι όλες οι φασματικές αντιδράσεις των μετασεισμών έχουν κορυφώσεις σε εύρος περιόδου 0,31s ή λιγότερο, γεγονός το οποίο μπορεί να συνδέεται με τα ίδια φαινόμενα τα οποία ανυψώνουν το εύρος της περιόδου σε μια ελαφρώς επιμηκυμένη ισχυρή περίοδο του σεισμού της έντασης 7,3M. στα T=0,43s και στην ακόμα πιο επιμηκυμένη ισχυρή περίοδο του κυρίως σεισμικού γεγονότος έντασης 7,8M στα T= 0,47s. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει μη γραμμικές εδαφικές επιπτώσεις κινήσεων.



Εικόνα 37: Φάσματα απόκρισης των στοιχείων NS και EW των 6 μεγαλύτερων μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας της Gorkha μετά τον μεγαλύτερο μετασεισμό εντασης M7.3 (05/12/2015) που απεικονίζεται και στην εικόνα 36.

Επίσης παρατηρείται μια εμφανής ενίσχυση των ισχυρότερων μετασεισμών στην περιοχή του 1.3s, η οποία δεν είναι εμφανής στον κύριο σεισμό. Το φάσμα έντασης 7,3Mw αφετέρου κορυφώνεται σε συντομότερη περίοδο (0.9s) η οποία είναι αβέβαιο ότι σχετίζεται με τα ίδια χαρακτηριστικά τοπίου. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η μετατόπιση δεν μπορεί να αποδοθεί σε μια μη γραμμική αντίδραση επειδή η περίοδος κορύφωσης της ισχυρότερης κίνησης είναι μικρότερη από την κίνηση με χαμηλότερη ένταση. Τέλος, οι ίδιοι μετασεισμοί δείχνουν επίσης μια λιγότερο εμφανή κορύφωση στην περιοχή των 3.2, παρόμοια με τον μετασεισμό εντάσεως 7.3Mw, αλλά δεν έχουν καθόλου ενέργεια στο χρονικό εύρος των 5s όπου ο κύριος σεισμός έχει μια εμφανή κορυφή. Η συνένωση της φασματικής αντίδρασης των δύο οριζοντίων στοιχείων από τα 8 σεισμικά γεγονότα απεικονίζεται στην εικόνα 38.

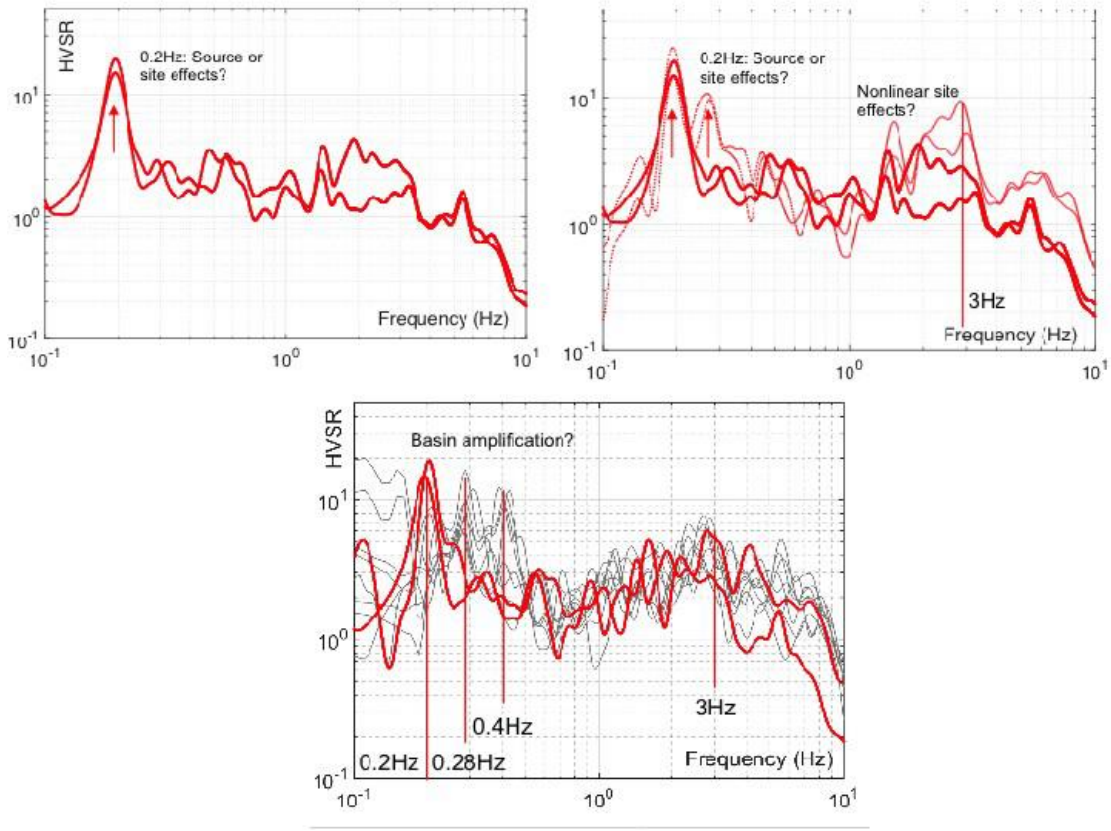


Εικόνα 38: Τα φάσματα απόκρισης των στοιχείων NS και EW του κυρίως σεισμού και των 7 μεγαλύτερων μετασεισμών που καταγράφηκαν έως σήμερα από τον σταθμό USGS KATNP.

Ελλείψει καταγραφών ισχυρών κινήσεων του εδάφους, εφαρμόσθηκαν ακολούθως τεχνικές μονού σταθμού για να αξιολογήσουμε την τοπική εδαφική απόκριση(Nepal GEER Report V1 2015). Αρκετές μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για να υπολογίζονται οι εδαφικές αποκρίσεις από καταγραφές μονού σταθμού. Η κυρίως χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η οριζόντια προς κάθετη αναλογία (H/V) η οποία προτείνεται από τον Nakamura (1979) και βασίζεται σε κοντινές ως προς τον σταθμό μικροδονήσεις και την λειτουργία του δέκτη της εν λόγω αναλογίας (H/V - HVSR) η οποία χρησιμοποιεί τους λόγους των φασμάτων απόκρισης της οριζόντιας και της κάθετης συνιστώσας μιας σεισμικής καταγραφής. Οι Field&Jacob (1995) παρουσίασαν ότι οι καταγραφές του σεισμού βάσει του HVSR εντός του εύρους των κυμάτων S καταγράφει την εξάρτηση της συχνότητας από την εδαφική απόκριση, αλλά όχι την απόλυτη τιμή του πλάτους. Οι Lechetetal., (1995) συνέκριναν τις δύο μεθόδους (H/V και HVSR), και έδειξαν ότι η συμφωνία μεταξύ της λειτουργίας του δέκτη, της αναλογίας Νακαμούρα και των φασματικών λόγων του παραδοσιακού σταθμού εδάφους αναφοράς ότι είναι ικανοποιητικοί στην ενισχυμένη ζώνη συχνοτήτων. Επίσης συμπέραναν ότι η μέθοδος HVSR παρέχει μόνο μερικές πληροφορίες για την τοπική εδαφική απόκριση όπως η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού και ότι οι αναλογίες H/V συστηματικά υποεκτιμούν το πλάτος των παραδοσιακών φασματικών αναλογιών εδάφους προς εδαφική αναφορά πετρωμάτων.

Τέλος, οι Assimakietal. (2007) έφθασαν σε παρόμοια συμπεράσματα συγκρίνοντας τις μεθόδους εκτίμησης εδαφικής αντίδρασης HVSR και H/V με αναλογικά φάσματα επιφάνειας προς γεώτρηση, χρησιμοποιώντας καταγραφές απότ ο Ιαπωνικό δίκτυο KIK-net καταγραφής ισχυρής κίνησης.

Η εικόνα 39 δείχνει τα αποτελέσματα της μεθόδου HVSR για τις δύο συνιστώσες του κυρίως σεισμού, ο κυρίως σεισμός συγκρίνεται με τον μετασεισμό εντάσεως 7.3M και με τους 6 επόμενους ισχυρούς μετασεισμούς. Η πλέον εμφανής παρατήρηση είναι ότι αν και κανένα από τα φάσματα αντίδρασης του μετασεισμού, συμπεριλαμβανομένου και του εντάσεως 7.3M, δεν παρουσίασαν κορύφωση στα 0.2Hz (5s) η οποία αρχικά οδήγησε στην ιδέα ότι η κυρίαρχη εκπομπή κυμάτων του κυρίως σεισμού είχε σχέση καθαρά με την πηγή και όλα τα αποτελέσματα της μεθόδου HVSR παρουσιάζουν ξεκάθαρη ενίσχυση 0.2-0.4 Hz. Αυτό το εμπειρικό αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι τα 0.2Hz του κυρίως σεισμικού γεγονότος συνδέονται επίσης με τις εδαφικές επιπτώσεις. Το εύλογο σενάριο εξετάζεται αυτήν την περίοδο είναι ότι η κυρίαρχη περίοδος του κυρίως σεισμού είναι ο συνδυασμός των απευθείας επιδράσεων (ενισχυόμενες από τα μεγάλα κύματα PGV>100cm/s) και των αντιδράσεων της λεκάνης. (τα οποία μπορούν να εξηγήσουν την αντήχηση των δονήσεων τις οποίες κατέγραψε ο σταθμός KATNP).



Εικόνα 39: Η μέθοδος HVSR του κυρίως σεισμού και 7 ισχυρότεροι μετασεισμοί της σεισμικής ακολουθίας της Gorkha Mw7.8 .

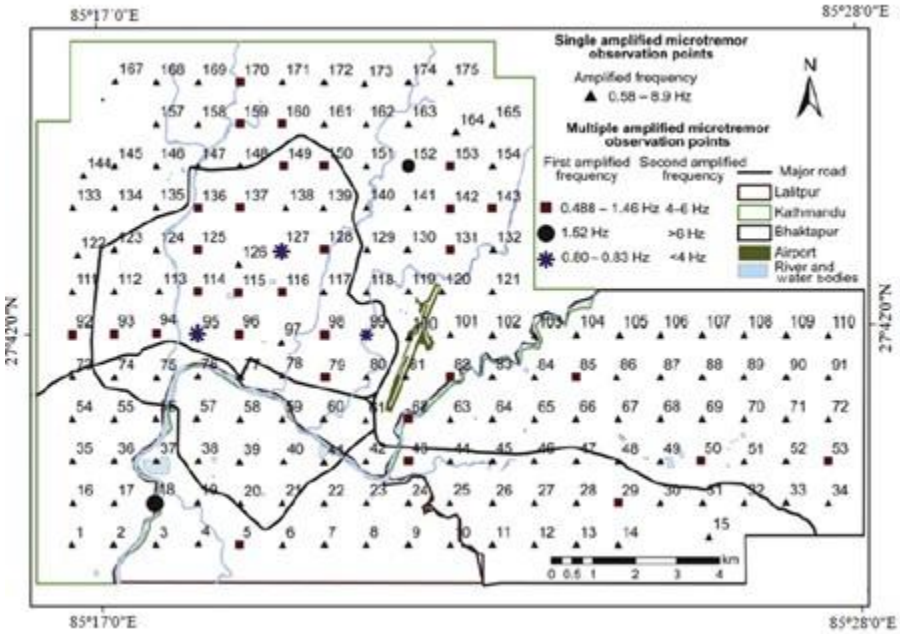
Οι μέθοδοι HVSR έχουν επίσης κορυφώσεις σε υψηλότερες συχνότητες, οι οποίες είναι τυπικά λιγότερο αξιόπιστες από τον θεμελιώδη τρόπο, αλλά παρόλα αυτά ακόμα υποδηλώνουν την ενίσχυση της τοποθεσίας στο εύρος των 3Hz. Συγκρίνοντας τον κυρίως σεισμό με τον μετασεισμό έντασης 7.3M μπορεί κανείς να υποστηρίξει ότι οι μέθοδοι HVSR επίσης αποκαλύπτουν μη γραμμικές εδαφικές επιπτώσεις σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, εφόσον η κορύφωση της λειτουργίας HVSR για τον κύριο σεισμό έντασης Mw7.8 είναι σε χαμηλότερη συχνότητα και έχει χαμηλότερη ένταση από την αντίστοιχη κορύφωση του μετασεισμού Mw7.3 (αν και η ένταση του HVSR δεν είναι αξιόπιστη εκτίμηση ενίσχυσης της τοποθεσίας). Όμως, όταν συγκρίνεται

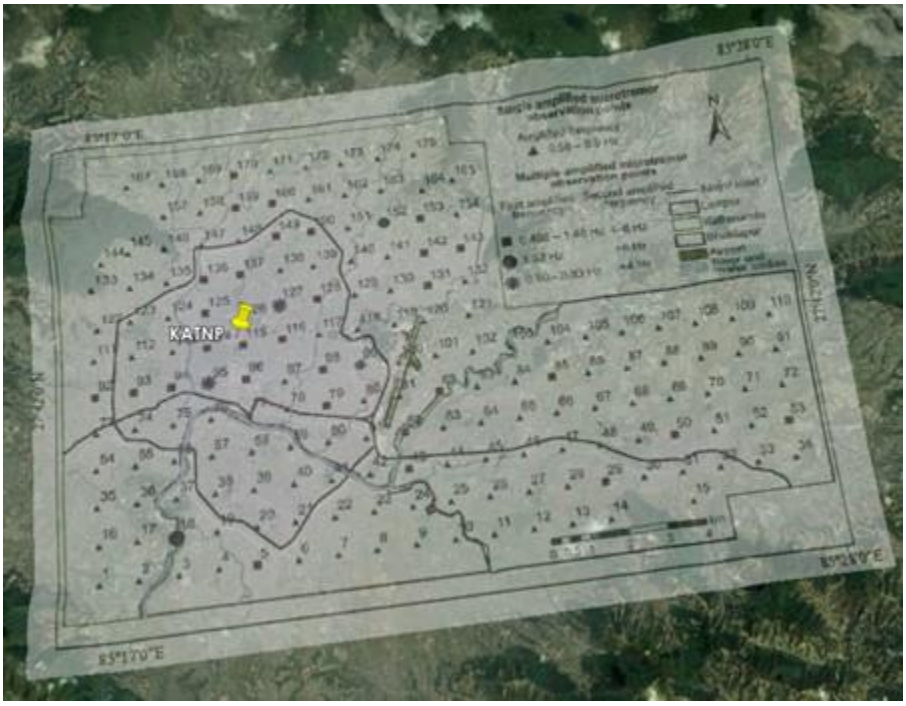
ο κυρίως σεισμός δια της μεθόδου HVSR με τους επόμενους 6 ισχυρότερους μετασεισμούς, εικόνα. 39, οι οποίοι κυμαίνονται σε PGA από 0.03 έως 0.078g, αποκαλύπτεται ότι η συχνότητα κορύφωσης, και η ένταση, της υψηλότερης (3Hz) λειτουργίας του μετασεισμού είναι πανομοιότυπη με τους μετασεισμούς.

Ακολούθως συγκρίθηκαν τα ευρήματα από τις καταγραφές του σταθμού KATNP σε μια εργασία η οποία χρησιμοποίησε τον περιβάλλοντα θόρυβο της αναλογίας H/V για να χαρτογραφήσει τη γεωμετρία των πετρωμάτων του υποβάθρου και να επιτευχθεί μια πρώτης τάξης εκτίμηση επιφανειακής στρωματογραφίας της λεκάνης του Κατμαντού.

Ειδικότερα, οι Paydyaletal (2012) κατέγραψαν και επεξεργάσθηκαν παρατηρήσεις μικροδονήσεων σε 172 σημεία σε πλέγμα 1 χιλιομέτρου καλύπτοντας μια περιοχή της τάξεως των 210 τετ. χιλιομέτρων στην κοιλάδα του Κατμαντού, εικόνα 40. Σύμφωνα με αυτήν την μελέτη, το 80% των αναλογιών H/V είχε μόνο μια καθαρή κορύφωση στο εύρος συχνοτήτων από 0.58Hz σε 8.9 H, ενώ οι αναλογίες H/V στις υπόλοιπες τοποθεσίες παρουσίασαν δύο ενισχυμένες συχνότητες, η πρώτη μεταξύ 0.48Hz έως 1.52Hz και η δεύτερη μεταξύ 3.1Hz έως 7.5Hz. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις αναλογίες H/V με δύο ενισχυμένες συχνότητες βρίσκονται στα βόρεια και κεντρικά τμήματα της λεκάνης, στην ευρύτερη γεωγραφική περιοχή του σταθμού KATNP, τα οποία κυριαρχούνται από τις περιθωριακές ποταμο-δελαταϊκές αποθέσεις υλικών (Sakai 2001).

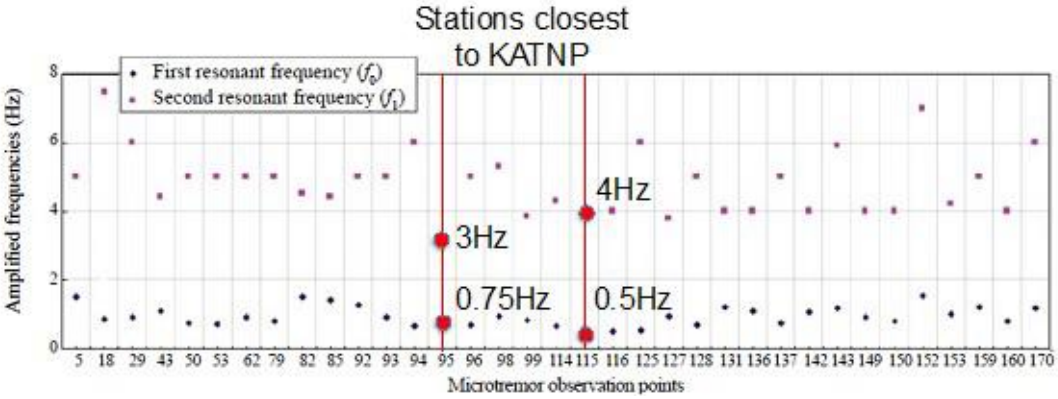
A)



B) 

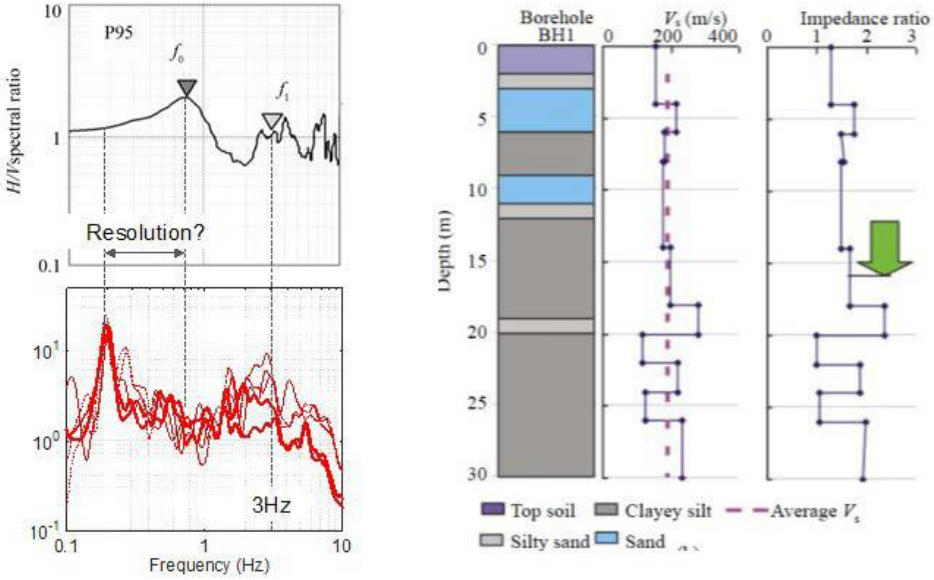
Εικόνα 40: Α) Η θέση των σταθμών μικροδονήσεων κατά τους Paydyaletal (2012), Β) Η επικάλυψη του χάρτη στο GoogleEarthTM και η κατά προσέγγιση θέση του σταθμού ισχυρών κινήσεων KATNP.

Στην εικόνα 41 παρουσιάζονται οι καταγεγραμμένες μικροδονήσεις των εκπεμπόμενων συχνοτήτων στους σταθμούς των Paudyaletal (2012) οι οποίοι βρίσκονται κοντά σον σταθμό KATNP. Όπως φαίνεται, Οι πρώτες μετρήσεις στην περιοχή κοντά στον σταθμό KATNP ήταν της τάξεως των 0.5 – 0.75Hz, οι οποίες μπορούν να συγκριθούν με τις παρατηρούμενες συχνότητες 0.2 – 0.4Hz των λειτουργιών του αποδέκτη, βλέπε εικόνα 39(1).



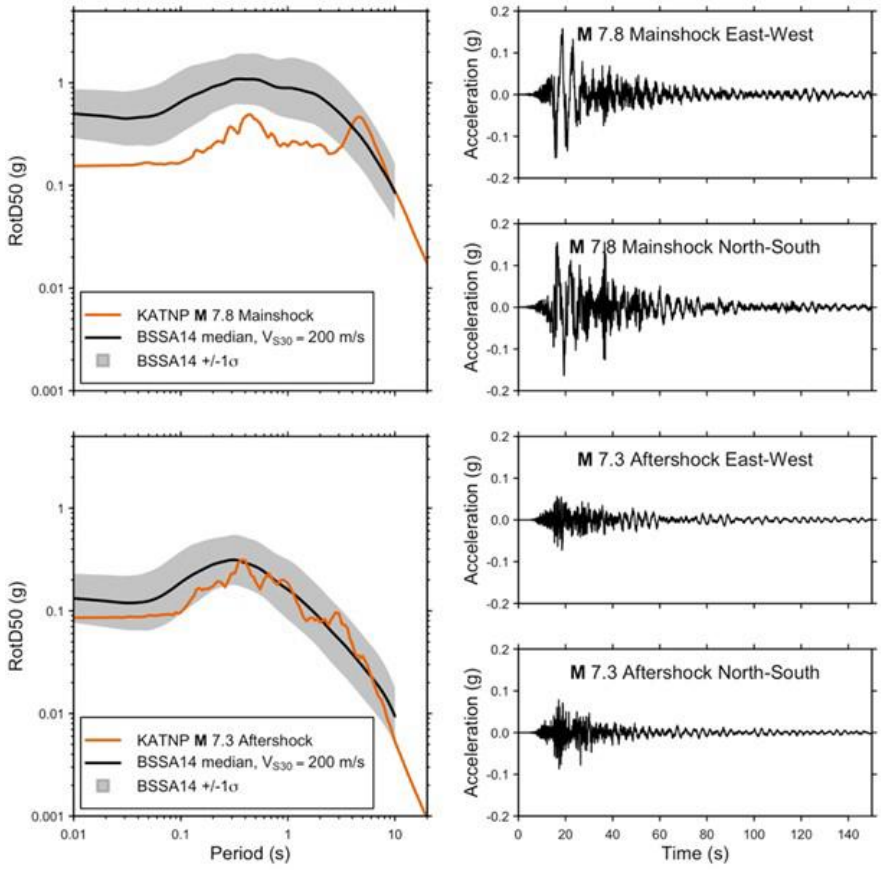
Εικόνα 41: Οι συντονισμένες συχνότητες οι οποίες καταγράφηκαν στους σταθμούς μικροδονήσεων 95 και 115, οι οποίοι είναι πλησιέστεροι προς το σταθμό KATNP σύμφωνα με τον επικαλυμμένο χάρτη που παρουσιάζεται στην εικόνα 40.

Ομοίως, οι δεύτερες καταγραφές στα 3 – 4 Hz επίσης μπορούν να συγκριθούν με την υψηλότερη κορύφωση συχνοτήτων η οποία παρουσιάζεται στην ίδια εικόνα. Η αναλογία H/V η οποία υπολογίστηκε από τους Paudyaletal στον σταθμό 95, παρουσιάζεται στην εικόνα 42.



Εικόνα 42: (αριστερά) Η σύγκριση των μεθόδων H/V που υπολογίστηκαν από τους Paudyal et al (2012) στο σταθμό μικροδονήσεων 95 με την μέθοδο HVSR που υπολογίσαμε στο σταθμό KATNP χρησιμοποιώντας τα στοιχεία EW και NS του κυρίως σεισμού και του μετασεισμού μεγέθους M7.3 . (δεξιά) εντός 300m από το σταθμό KATNP, παρουσιάζεται η εκτίμηση της Vs30 στην περιοχή (NepalGEERreportversion1,2015).

Τέλος, συγκρίνουμε την ανεξάρτητη περιστροφική αντίδραση της φασματικής επιτάχυνσης RotD50 (Boore, 2010) αμφότερα για τον κυρίως σεισμό έντασης Mw 7.8 και για τους μετασεισμούς έντασης Mw 7.3 με την εξίσωση πρόβλεψης των εδαφικών κινήσεων (GMPE εικόνα 43) των Booreetal (2014, BSSA). Αν και οι εξισώσεις BSSA αναπτύχθηκαν πρωτίστως με τις εδαφικές κινήσεις από τον WesternUnitedStates (WUS), είναι μια κατά προσέγγιση αναλογία με αυτή του Νεπάλ επειδή και οι δύο είναι περιοχές ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου.



Εικόνα 43: Οι δονήσεις του εδάφους του σεισμού της Gorkha μεγέθους Mw 7.8 (κορυφαία σειρά) και ο μετασεισμός μεγέθους Mw 7,3 καταγράφηκαν στον σταθμό ισχυρών δονήσεων KATNP. Αριστερά: Η προσανατολισμένη ανεξάρτητη απόκριση της φασματικής επιτάχυνσης (RodD50) σε σύγκριση με τις εξισώσεις BSSA14 GMPE. Δεξιά: Χρονικάιστορικά οριζόντιων στοιχείων.

Επί πλέον, η επιλογή της εξίσωσης πρόβλεψης των εδαφικών κινήσεων (GMPE) η οποία χρησιμοποιήθηκε από τον χάρτη δονήσεων, ShakeMap, (Garciaetal. 2012) χρησιμοποιεί μια WUS, εξίσωση πρόβλεψης των εδαφικών κινήσεων, GMPE γι' αυτήν την περιοχή. Οι εξισώσεις BSSA προβλέπουν μία κορύφωση επιτάχυνσης του εδάφους, PGA, της τάξεως των 0.49g για τον σεισμό εντάσεως 7.8Mw, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από την καταγεγραμμένη κορύφωση επιτάχυνσης του εδάφους, PGA της τάξεως των 0.16g. Εξ αιτίας της παύσης των δεδομένων, οι παράγοντες οι οποίοι διαμόρφωσαν το μέγεθος και το περιεχόμενο των συχνοτήτων του κυρίως σεισμού δεν έχουν ακόμα γίνει επαρκώς κατανοητοί.

Τα χαμηλά επίπεδα της μικρής περιόδου δονήσεων στον κυρίως μετασεισμό μπορεί να οφείλονται σε μια μεγαλύτερη αναλογία εξομάλυνσης του ηπειρωτικού ενεργού περιθωρίου σε αυτήν την περιοχή, σε υψηλή εξομάλυνση στα βαθιά λιμναία ιζήματα της λεκάνης του Κατμαντού, ή πιθανώς αυτός ο σεισμός δεν παρήγαγε τις υψηλές συχνότητες στην πηγή του. Όμως, η παρατήρηση κατά την οποία η χαμηλή ενεργειακή περίοδος του μετασεισμού είναι καλώς μοντελοποιημένη από το BSSA αποτελεί την απόδειξη ότι η έλλειψη μιας μικρής ενεργειακής περιόδου συσχετίζεται με τα ειδικά χαρακτηριστικά του κυρίως σεισμού απ' ότι οι ιδιότητες του ηπειρωτικού φλοιού (crust) ή της λεκάνης. Αν και η φασματική αντίδραση ου κυρίως σεισμού φαίνεται να είναι ενεργειακά πλούσια, σε μακρόχρονες περιόδους, η σύγκριση του BSSA δείχνει ότι δεν είναι υπερβολικά μεγάλη για έναν σεισμό αυτού του μεγέθους σε ένα τοπίο ελαφρού εδάφους.

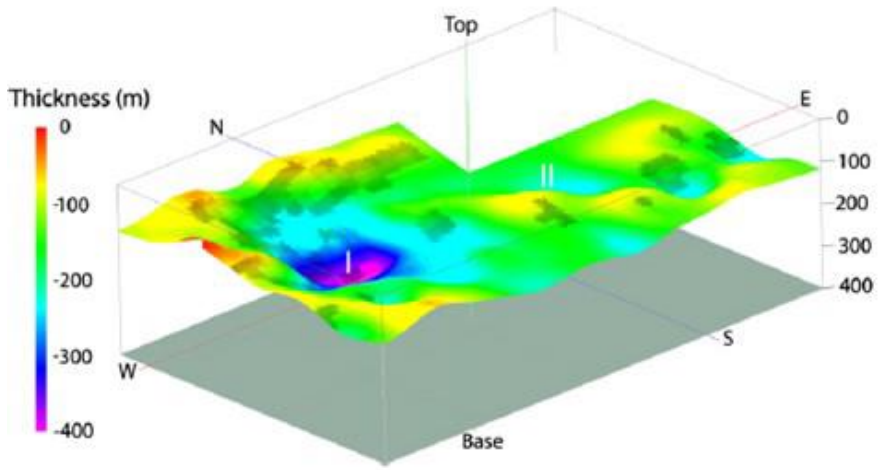
Σε αυτό το σημείο, η κατανόηση του ρόλου τον οποίο έχουν παίξει οι μη γραμμικές εδαφικές αντιδράσεις στη διαμόρφωση του περιεχομένου των συχνοτήτων και του μεγέθους της επιτάχυνσης του κυρίως μετασεισμού στον σταθμό KATNP, συγκεκριμένα, και σε όλη την κοιλάδα γενικότερα, είναι περιορισμένη.

6.2.3 Οι επιπτώσεις στη λεκάνη απορροής

Βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες μπορούν να ενισχύσουν και να επιμηκύνουν σημαντικά την περίοδο των εδαφικών κινήσεων του υποβάθρου, αυτού του είδους η επίπτωση βαθιών ιζηματογενών λεκανών σε επιφανειακές εδαφικές κινήσεις είναι γνωστή ως «επιπτώσεις στη λεκάνη απορροής».

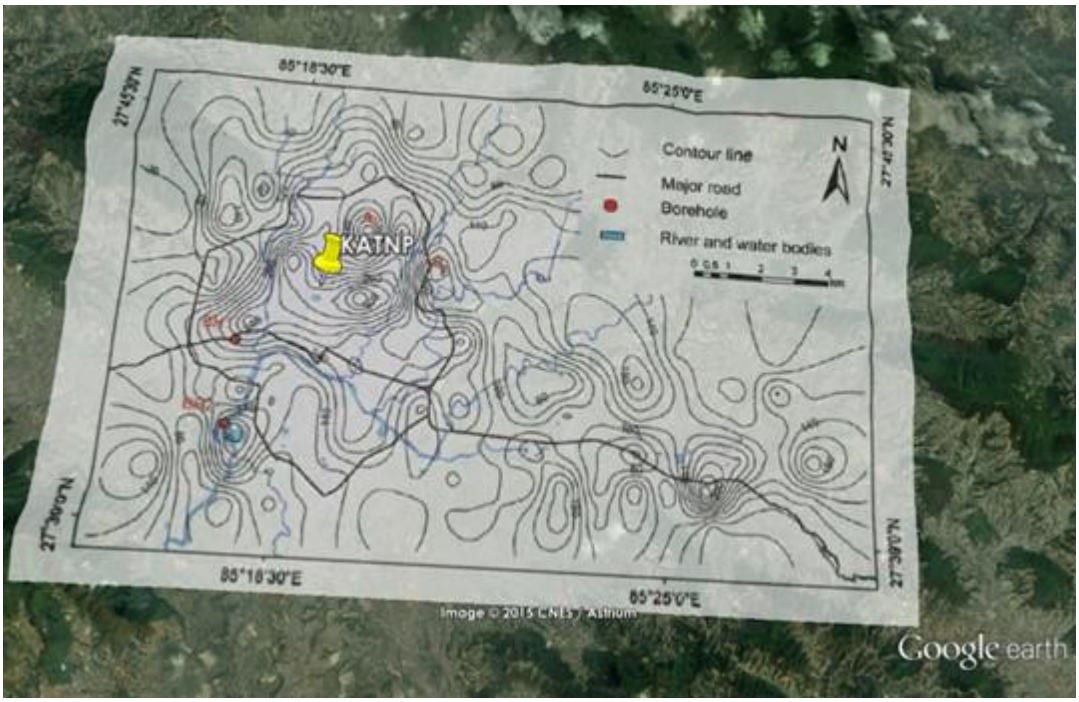
Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των λεκανών απορροής στις επιφανειακές εδαφικές αντιδράσεις, συνήθως απαιτεί γνώση των προφίλ της καθαρής ταχύτητας των κυμάτων των βαθέων ιζηματογενών λεκανών και του υποκειμένου υποβάθρου, η οποία μπορεί να αντληθεί από μια λεπτομερή γεωτεχνική πληροφορία η οποία είναι διαθέσιμη για τις βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες. Αυτού του είδους λεπτομερείς γεωτεχνικές πληροφορίες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να υπολογισθεί η καθαρή ταχύτητα των κυμάτων των βαθιών ιζημάτων της κοιλάδας του Κατμαντού και των πετρωμάτων του υποβάθρου δεν είναι διαθέσιμες. Η μόνη διαθέσιμη μελέτη είναι αυτή των Paudyaletal (2012), η οποία έχει προσδιορίσει την τρισδιάστατη γεωμετρία των δομών του υποβάθρου χρησιμοποιώντας μετρήσεις σεισμικών ταχυτήτων. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν 5 γεωτρήσεις όπου οι καθαρές ταχύτητες των κυμάτων μετρήθηκαν από την Japan International Cooperation Agency (JICA, 2012) χρησιμοποιώντας τις καταγραφές των κυμάτων PS για να 0υπολογισθεί μια μέση ταχύτητα VS30 = 246,87 m/s για την περιοχή του Κατμαντού (JICA 2002). Το προφίλ της πλησιέστερης γεώτρησης στο σταθμό KATNP παρουσιάζεται στην εικόνα 42. Διαδοχικά, χρησιμοποιώντας αυτήν την μέση ταχύτητα VS30 και την συχνότητα της δεύτερης κορύφωσης από τις μετρήσεις τους των μικροδονήσεων της αναλογίας H/V (εύρος από 4 – 6 Hz σε όλους τους σταθμούς), υπολόγισαν δευτερευόντως το πάχος του ανωτάτου στρώματος της κοιλάδας του Κατμαντού το οποίο βρέθηκε μεταξύ 10 και 15μ.

Σε μια ακόλουθη μελέτη οι Paudialetal (2012b) χρησιμοποίησαν την πρώτη κορύφωση των μετρήσεων των μικροδονήσεων προκειμένου να υπολογίσουν το βάθος του υποβάθρου της κοιλάδας (εικόνα 44) Σύμφωνα με αυτή τη μέτρηση, το υπολογισθέν βάθος των ιζημάτων αντιπροσωπεύει το βάθος των λιμναίων αποθέσεων έως ένα στρώμα σκληρότερων πετρωμάτων υποβάθρου όχι απαραίτητα σκληρού πετρογενετικού σχηματισμού. Αυτή η μελέτη κατέδειξε ότι το κεντρικό τμήμα της πόλης του Κατμαντού βρίσκεται επάνω στην κύρια αρχαϊκή λίμνη της ομώνυμης λεκάνης. Η μελέτη αυτή επίσης αποκάλυψε έναν αριθμό από ρηχότερα βυθίσματα σε όλη την κοιλάδα και πολυάριθμες επικαλυμμένες κορυφογραμμές οι οποίες διαχωρίζουν ή συνδέουν τα βυθίσματα. Η ισχυρή γεωμετρική ετερογένεια των πετρωμάτων του υποβάθρου του Κατμαντού η εκτιμηθείσα από τους Paudyaletal (2012b) συγκρίνεται ποιοτικά με την εργασία του Piya (2004)



Εικόνα 44: Παλιό-τοπογραφία μαλακού υποβάθρου της λεκάνης της κοιλάδας του Κατμαντού (η κατακόρυφη κλίμακα είναι 15 φορές διογκωμένη). I και II είναι οι καταβυθισμένες λεκάνες με τις πιο παχιές αποθέσεις στην περιοχή μελέτης (NepalGEERreportversion1,2015).

Η εικόνα 45 δείχνει τον τοπογραφικό χάρτη του υποβάθρου της λεκάνης του Κατμαντού από τους Paudyaletal (2012b) και καταδεικνύει την τοποθεσία του σταθμού KATNP. Όπως φαίνεται, ο σταθμός βρίσκεται στην κορυφή του βυθίσματος I (Εικόνα 44) όπου ο βάθος των ιζημάτων είναι περίπου 250μ.

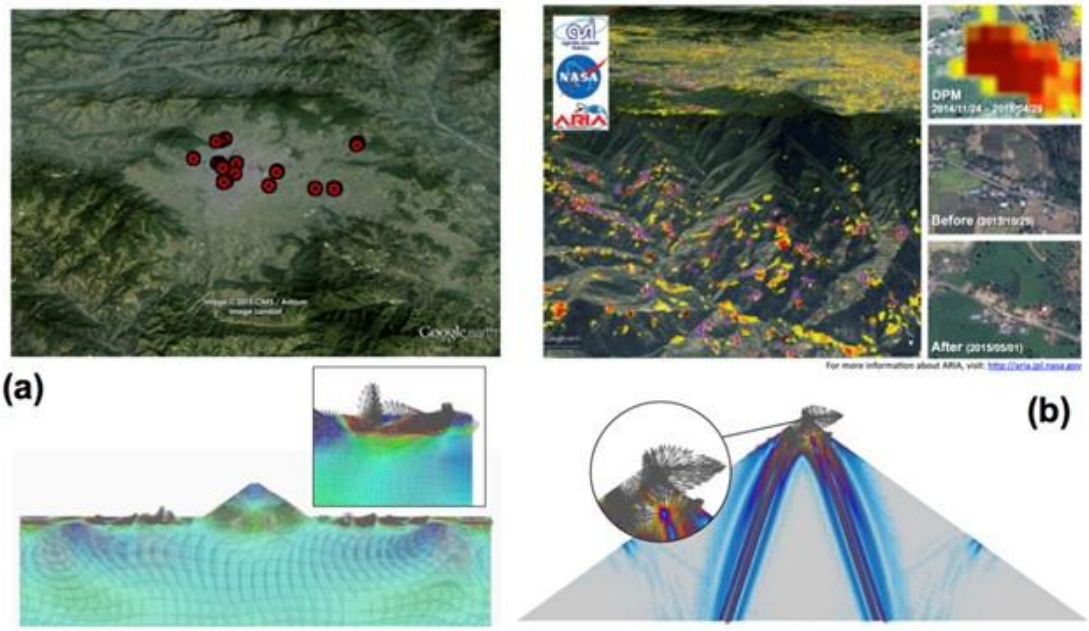


Εικόνα 45: Χάρτης περιγράμματος της υπόγειας τοπογραφίας της λεκάνης του Κατμαντού και η θέση του σταθμού KATNP (NepalGEERreportversion1,2015).

Το βάθος των ιζημάτων στον σταθμό όπως εκτιμήθηκε από τους Paudyaletal (2012b) δεν εξηγεί επαρκώς τα 0.2s του αντανακλώμενου παλμού του κυρίως σεισμού με μέση ταχύτητα Vs30=200m/s και μια τετραγωνική αύξηση της σκληρότητας με περιοριστική πίεση. Η θεμελιώδης κορύφωση της εδαφικής στήλης κάτω από τον σταθμό KATNP είναι περίπου 2s. Ούτε θα μπορούσε η επιμήκυνση του σεισμικού παλμού, στα 5s, να είναι αποτέλεσμα μιας ευρείας μη γραμμικής αντίδρασης, αφού αυτό θα απαιτούσε μια ολόκληρη εδαφική στήλη βάθους 250μ. να υποστεί μεγάλες καταπονήσεις / τάσεις / strain αρκετές για να προκαλέσουν υποχώρηση του εδάφους.

Μια εξεταζόμενη υπόθεση είναι ότι ο σεισμικός παλμός των 5s αντιστοιχεί με αμφίπλευρη αντανάκλαση της λεκάνης, και ότι τα κύματα μακράς περιόδου του κυρίως σεισμού είναι πρωτίστως επιφανειακά.

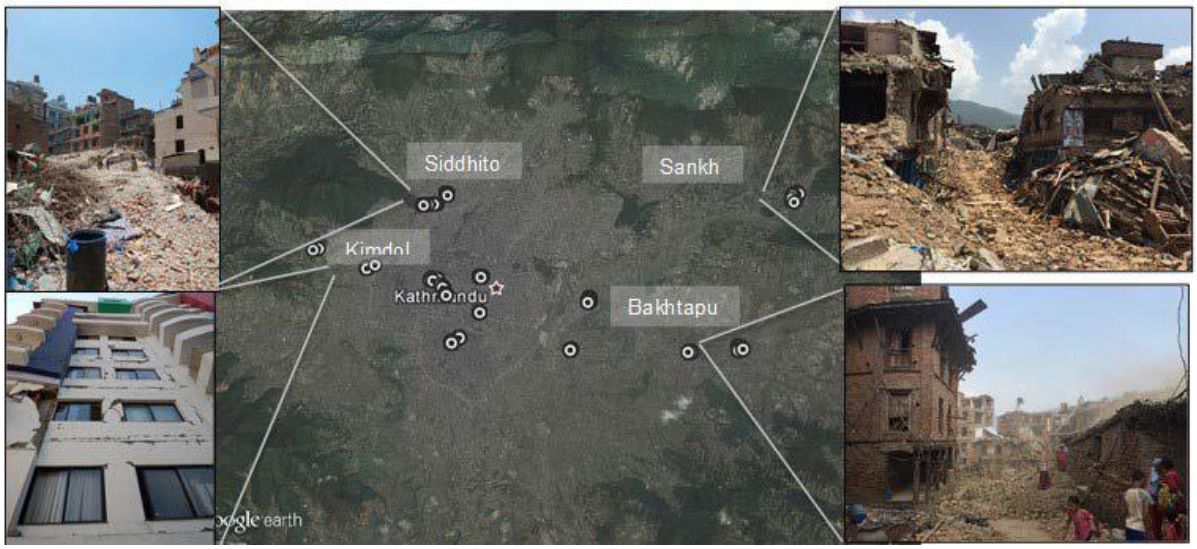
Επιπρόσθετες τρισδιάστατες εδαφικές επιπτώσεις παρατηρήθηκαν στα μοντέλα ζημιών των δομών και της εδαφικής αστοχίας συμπεριλαμβανομένων των άκρων της λεκάνης και των τοπογραφικών επιπτώσεων κατά μήκος της κορυφής των κορυφογραμμών. Οι μηχανισμοί αμφοτέρων των φαινομένων παρουσιάζονται ποιοτικά στην Εικ. 46. Με επιπρόσθετα δεδομένα ισχυρών κινήσεων, ιδιαιτέρως από βραχώδεις περιοχές πέριξ της λεκάνης του Κατμαντού, αυτά τα δεδομένα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν μελλοντικά.



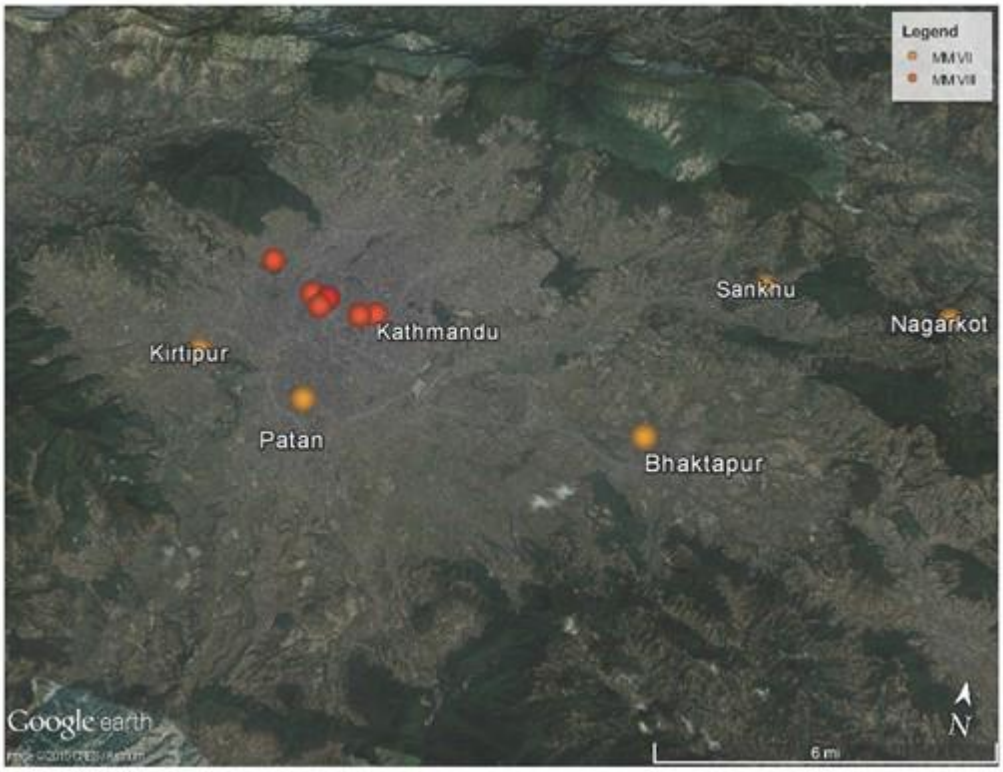
Εικόνα 46: Ενδείξεις Τρισδιάστατων εδαφικών επιπτώσεων: α) Σοβαρές ζημιές καταγεγραμμένες από την ομάδα GEER (κόκκινες κουκίδες) κοντά στις άκρες της λεκάνης και πιθανός αιτιολογικός μηχανισμός των επιφανειακών κυμάτων που παράγονται από την λεκάνη απορροής . (β) Ζημιές στην κορυφογραμμή που ερμηνεύονται από τη δορυφορική απεικόνιση δορυφορικών εικόνων πριν και μετά τον κυρίως σεισμό (ARIA, JPL και Caltech) και πιθανός αιτιολογικός μηχανισμός τοπογραφικής ενίσχυσης (NepalGEERreportversion1,2015).

6.2.4 Επιπτώσεις στα περιθώρια της λεκάνης απορροής.

Παρομοίως με τους σεισμούς στο Northridge (1994) και στο Kobe (1999), σοβαρές ζημιές παρατηρήθηκαν δίπλα στα περιθώρια – άκρα περιμετρικά της κοιλάδας του Κατμαντού μετά από τον σεισμό της 25ης Απριλίους εντάσεως M7.8 και των μεταγενέστερων σεισμών. Σε στενές και βαθιές λεκάνες, όπως αυτή του Κατμαντού, κατά τη διάρκεια σεισμών τα σεισμικά κύματα (bodywaves) μεταμορφώνονται σε επιφανειακά κύματα δημιουργώντας δισδιάστατη αντανάκλαση κυρίως στα περιθώρια – άκρα της λεκάνης,. (IyisanandHasal, 2011) τα οποία μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την σημαντική ενίσχυση των επιφανειακών εδαφικών κινήσεων. Οι παρατηρούμενες σοβαρές καταστροφές κατά μήκος των περιθωρίων – άκρων της λεκάνης της κοιλάδας του Κατμαντού στις περιοχές Bhaktapur, Patan και Sakhur καταδεικνύουν την εν δυνάμει ενίσχυση εξ αιτίας των περιθωρίων – άκρων της λεκάνης. Τα περισσότερα από τα κτίρια στις περιοχές Sakhur και Bhaktapur είτε κατέρρευσαν είτε υπέστησαν σοβαρές ζημιές μετά τον σεισμό της περιοχής Gorkha. Η εικόνα 47(α) δείχνει την παρατηρηθείσα κατανομή των καταστροφών εντός της κοιλάδας του Κατμαντού. Οι δύο κύριες τοποθεσίες όπου επικεντρώνονται οι ζημιές εξ αιτίας των δονήσεων του εδάφους βρίσκονται στο κέντρο της κοιλάδας του Κατμαντού, οι ζημιές στο κέντρο της κοιλάδας οφείλονται πιθανώς στην εδαφική ενίσχυση η οποία προκλήθηκε από την ιζηματογεενή λεκάνη. Σημαντικές καταστροφές έχουν επίσης παρατηρηθεί κατά μήκος των περιθωρίων – άκρων της λεκάνης, κυρίως περιμετρικά των περιοχών Bakhtapur και Sakhur όπου οι περισσότερες από τις παλιές κατασκευές κατέρρευσαν. Σε αυτές τις τοποθεσίες οι παρατηρηθείσες ζημιές και η υψηλότερη συχνότητα των εδαφικών δονήσεων (Εικ. 47(β)) αποτελεί πιθανόν μια ένδειξη της επίδρασης των περιθωρίων – άκρων της λεκάνης.

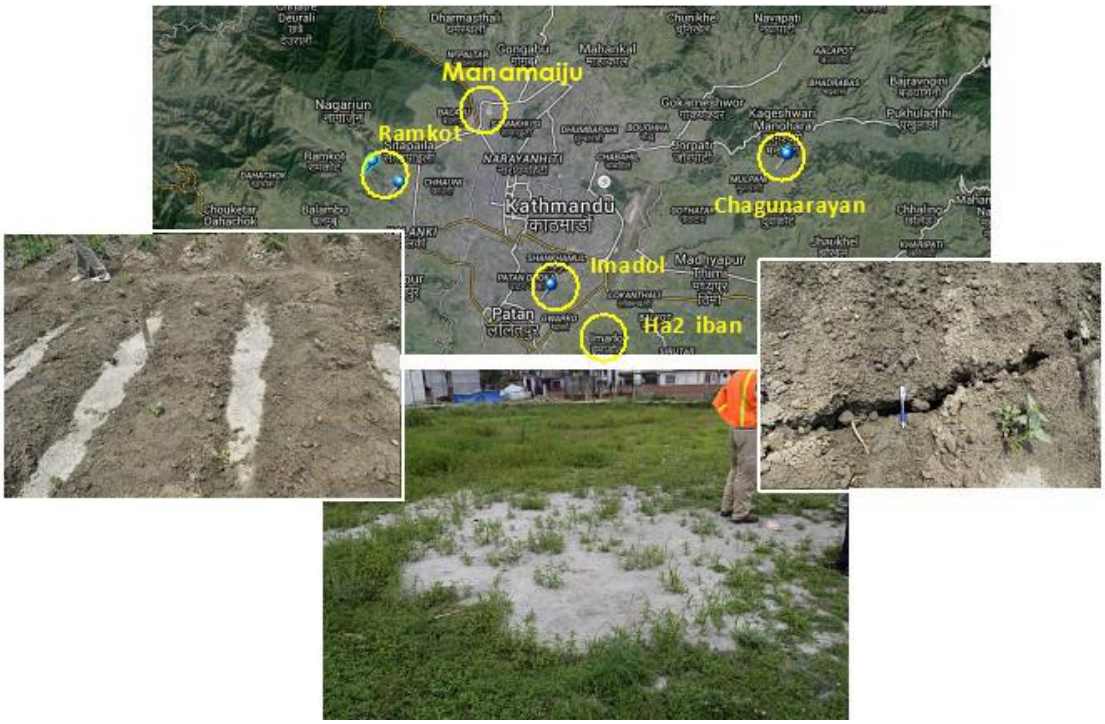


Εικόνα 47(α): Θέσεις παρατηρούμενων ζημιών στα κτίρια. **Siddhito**: 27°44'7.32"N 85°18'33.81"E, **Kimdol**: 27°42'35.55"N 85°16'49.09"E, **Sakhu**: 27 43' 49.5"N 85 27' 52"E, **Bakhtapur**:27 40' 13.2"N 85 25' 48.8"E (Nepal GEER report version1,2015).



Εικόνα 47(β): Τροποποιημένες εντάσεις Mercalli που κατανεμήθηκαν στις κύριες πόλεις της κοιλάδας του Κατμαντού. Πορτοκαλί : MMI=VII, Κόκκινο: MMI=VIII.

Η εικόνα 48 χαρτογραφεί τις τοπικές ζώνες ρευστοποίησης οι οποίες παρατηρήθηκαν στην κοιλάδα του Κατμαντού. Δοθέντος του γεγονότος ότι η φύση της ιζηματογενούς λεκάνης της κοιλάδας του Κατμαντού είναι επιρρεπής στο φαινόμενο της ρευστοποίησης (Piya, 2004), η τοπική ρευστοποίηση κατά μήκος των περιθωρίων – άκρων της κοιλάδας του Κατμαντού είναι μια ακόμα ισχυρή ένδειξη της ενίσχυσης των εδαφικών κινήσεων ως αποτέλεσμα των επιπτώσεων στα περιθώρια – άκρα της λεκάνης.



Εικόνα 48: Επιπτώσεις στις περιοχές στα άκρα της λεκάνης από το φαινόμενο της ρευστοποίησης.

6.2.5 Τοπογραφικές επιπτώσεις .

Οι τοπογραφικές επιπτώσεις αναφέρονται στην τροποποίηση (συχνή ενίσχυση) του γεγονότος των εδαφικών κινήσεων οι οφείλονται σε ενεργειακά προκαλούμενες επιπτώσεις σε κυρτά τοπογραφικά χαρακτηριστικά (λόφοι, κορυφογραμμές, φαράγγια, βραχώδεις γκρεμοί και πλαγιές), περίπλοκες τοπογραφικές υπο-επιφάνειες (ιζηματογενείς λεκάνες και αλλουβιακές κοιλάδες) και γεωλογικές πλευρικές ασυνέχειες (π.χ. παλαιά ρήγματα, δεβριτικές ζώνες)

Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν σημαντικά να μεταβάλλουν την ένταση, το περιεχόμενο συχνοτήτων και την διάρκεια των εδαφικών δονήσεων κατά την διάρκεια των σεισμικών γεγονότων συγκρινόμενα με τις δονήσεις που θα είχε υποστεί αυτή η ίδια τοποθεσία αν ευρίσκετο σε επίπεδο έδαφος. Παραδείγματα καταγραφών και παρατηρήσεων ζημιών αποδόθηκαν μερικώς στην τοπογραφική ενίσχυση και είναι τα εξής

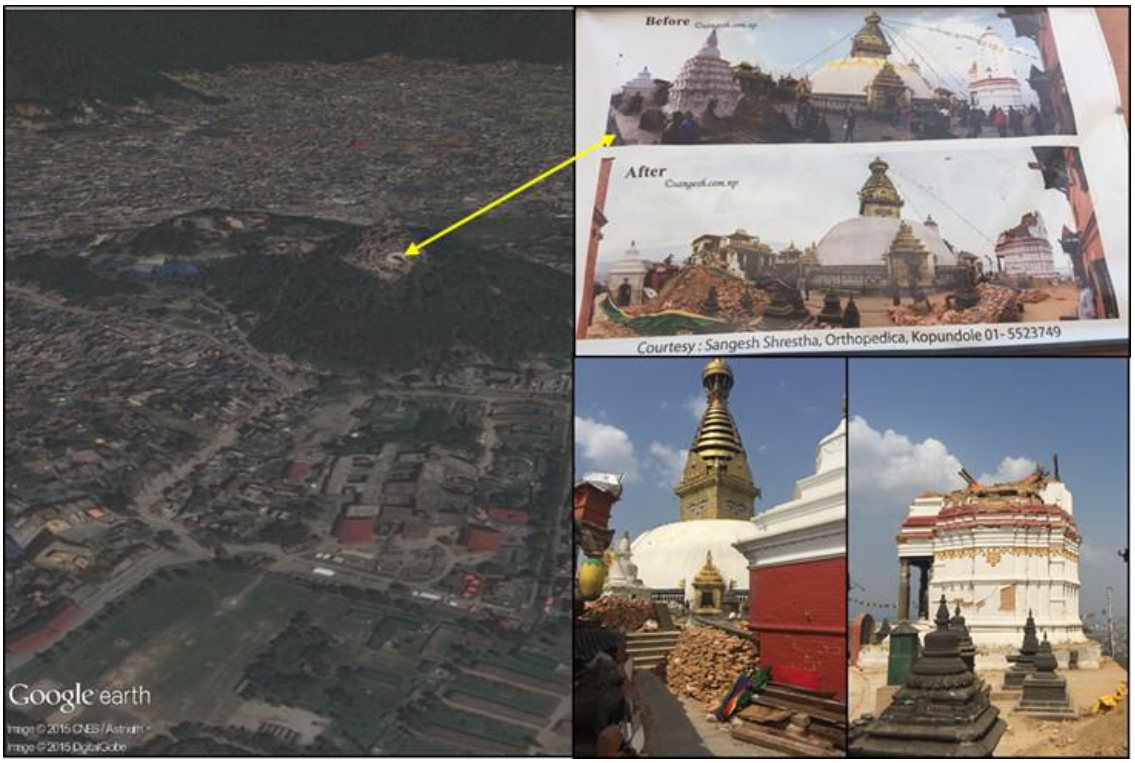
Η καταγραφή της κορύφωσης επιτάχυνσης του εδάφους, PGA=1.82g στο σταθμό επί της κορυφής του λόφου Ταρζάνα κατά τη διάρκεια του σεισμού του Northridge 1994

Η καταγραφή της κορύφωσης επιτάχυνσης του εδάφους, PGA=1.12g του φράγματος Pacoima κατά τη διάρκεια του σεισμού του SanFernando 1971

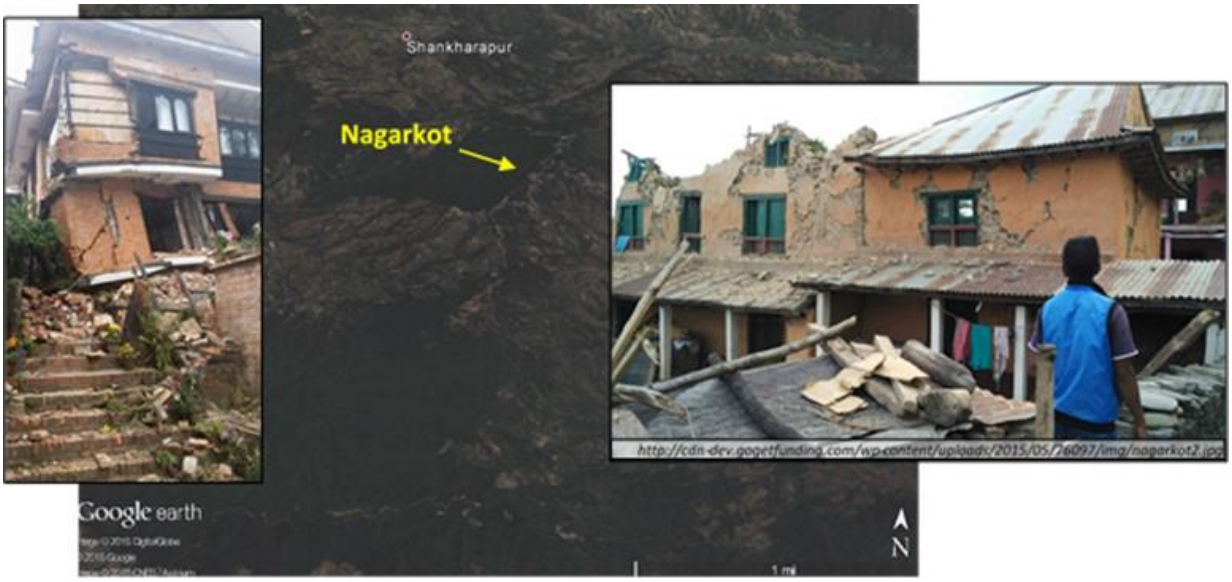
Η καταγραφή της κορύφωσης επιτάχυνσης του εδάφους της πρόσφατης πάρα πολύ ισχυρής εδαφικής κίνησης PGA=2.74g στον σταθμό KIK-NetMYG004 κατά τη διάρκεια του σεισμού του Tohoku 2011στην κορυφή μιας ύψους 5μ. απόκρημνης τεχνητής πλαγιάς

Τοπογραφικές επιπτώσεις οι οποίες κυριάρχησαν σε μεγάλη κλίμακα της επιπτώσεις των εδαφικών αντιδράσεων και των εδαφικών αστοχιών που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της σεισμικής ακολουθίας της περιοχής Gorkha εντάσεως 7.8 M, δηλαδή τα μοντέλα των δομικών ζημιών και των εδαφικών αστοχιών.

Δομικές ζημιές ειδικότερα επικεντρώθηκαν στην κορυφή απομονωμένων λόφων εντός της κοιλάδας όπως αυτός ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 51, σε κορυφές λόφων και περιμετρικά των περιθωρίων - άκρων της κοιλάδας του Κατμαντού (εικ. 49,50) και σε κορυφές λόφων και στα υψηλότερα σημεία των κορυφογραμμών της ορεινής υπαίθρου (εικ. 51, 52) Ένα αξιοσημείωτο γεγονός αποτελεί η ολική κατάρρευση του ιστορικού οχυρού Duguna Gadhi (εικ. 53) όπου παρατηρήθηκαν ρωγμές/ρηγματώσεις σε όλη την έκταση των ορεινών κορυφών και πλαγιών και συνεπώς χαρακτηρίστηκε ως θρυμματισμένη (shattered) κορυφογραμμή. Η αστοχία της σταθερότητας της πλαγιάς, αφετέρου, ήταν εκτεταμένη, παρά το γεγονός ότι βρισκόταν στο τέλος της ξηράς περιόδου όταν ο κίνδυνος σταθερότητας της πλαγιάς είναι ελαχιστοποιημένος.



Εικόνα 49: Ζημιές στην περιοχή του Ναού Swayambhu(πιθήκου) με συντεταγμένες (27.715270 N, 85.290231 E) (NepalGEERreportversion1,2015).



Εικόνα 50: Ζημιές στην περιοχή Nagarkot με συντεταγμένες (27.708109N, 85.510193E) (NepalGEERreportversion1,2015).

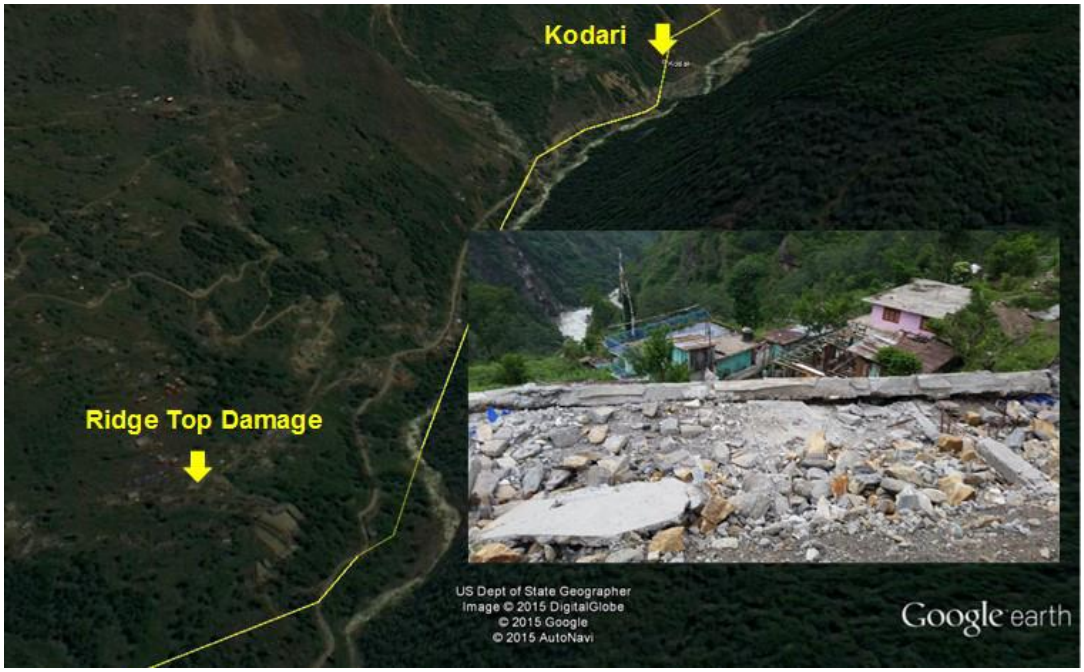
Τα μοντέλα καταστροφών στο Νεπάλ τα οποία σχετίζονται με τις τοπογραφικές επιπτώσεις χρησιμεύουν ως υπομνήσεις ότι αν και περιφερειακές και επικεντρωμένες στην αντίδραση της τοποθεσίας μελέτες, όλο και περισσότερο βασίζονται σε εξομοιωμένες εδαφικές κινήσεις οι οποίες υπολείπονται σε κατανόηση, εξομοίωση και παραμετροποίηση των τοπογραφικών επιπτώσεων.

Εικόνα 51: Ζημιές στην κορυφογραμμή του πρανούς με αποτέλεσμα κατεδαφίσεις σχολικών κτιρίων στην περιοχή Simi Gaun κοντά στα ανάντη του φράγματος του Tamakoshi με συντεταγμένες (27 52’ 22.5” N, 86 13’ 50.6” E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Αφενός η πλειονότητα των σεισμολογικών μοντέλων υστερεί σε ανάλυση και γεωτεχνικές πληροφορίες στο εύρος της συχνότητας των μηχανικών εφαρμογων.

Αφετέρου οι αναλύσεις τοπικών αντιδράσεων έχουν γίνει περίπου συνώνυμες με την μελέτη επίπεδων επιφανειακών εδαφών με οριζόντια στρωματογραφία.

Συνεπώς, οι προβλέψεις του σεισμικού κώδικα, οι μελέτες μικροζωνών και οι εξισώσεις πρόβλεψης εδαφικών κινήσεων δεν συμπεριλαμβάνονται για δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης επιπτώσεων τοποθεσίας, (3D site effects), παρά τις πολυάριθμες περιπτώσεις υποστηριζομένων ενδείξεων για τον ρόλο τους στην κλιμάκωση του σεισμικού κινδύνου, όπως τα μοντέλα καταστροφών τα οποια παρατηρήθηκαν στο Νεπάλ κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων αναγνώρισης.



Εικόνα 52: Ζημιές στην κορυφογραμμή και κατάρρευση των δομών του πρανούς ωότια της περιοχής Kodari δίπλα στα σύνορα με την Κίνα, με συντεταγμένες (27 57’ 31.9” N, 85 57’ 17.7” E)(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 53: Θρυμματισμένη κορυφογραμμή στην περιοχή του φρουρίου Duguna Gadhi με συντεταγμένες (27 54’ 59.4” N, 85 55’ 2.38” E) (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3 Επιπτώσεις του σεισμού στα πρανή της πληγείσας περιοχής

6.3.1 Σταθερότητα πρανών και κατολισθήσεις.

Με υψόμετρα στο Νεπάλ να κυμαίνονται από 100 έως 8848μ. από την επιφάνεια της θάλασσας (msl) από τον νότο έως τον βορά για απόσταση περίπου 120 χλμ, το τοπογραφικό ανάγλυφο αποτελεί εξαιρετικό φαινόμενο και οι χαρακτηριστικά απόκρημνες πρανή / πλαγιές είναι ευάλωτες σε κατολισθήσεις. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ανθρώπινων απωλειών εξ αιτίας κατολισθήσεων σε εύρος 40 ετών από σήμερα στο παρελθόν υπερβαίνει τους 110, και περίπου 110 χιλιάδες νοικοκυριά έχουν δυσμενή αντίκτυπο από κατολισθήσεις κάθε χρόνο (Υπουργείο Εσωτερικών του Νεπάλ 2014).

Η μέση ετήσια απώλεια περιουσίας εξ αιτίας των κατολισθήσεων καταγράφτηκε να ξεπερνά το κόστος των USD 100 εκατομμυρίων (Υπουργείο Εσωτερικών του Νεπάλ 2014).

Στο παρελθόν, μεμονωμένα γεγονότα κατολισθήσεων είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια περισσοτέρων από 100 ανθρώπων σε μια και μόνη κατολίσθηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κατολίσθηση Jure

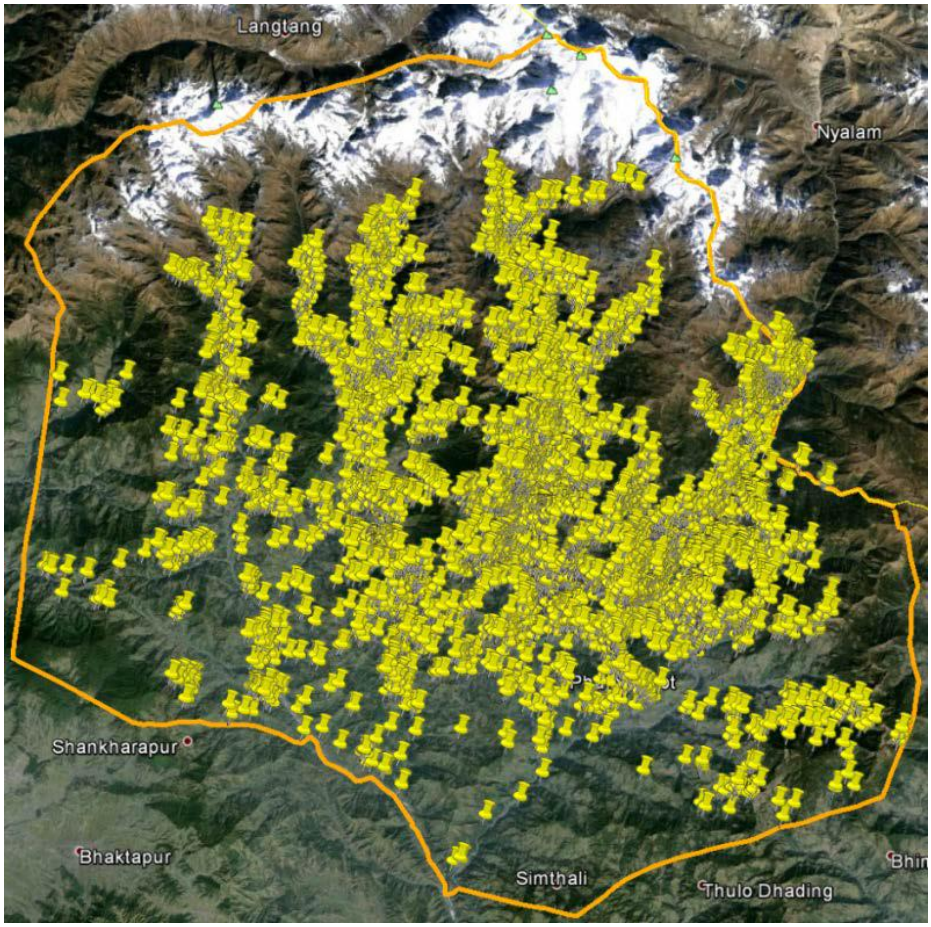
η οποία συνέβη στις 5 Αυγούστου 2014 ως αποτέλεσμα βαριάς βροχόπτωσης και έφραξε τον ποταμό SunKoshi γεγονός το οποίο προκάλεσε 168 ανθρώπινες απώλειες.

Αν και οι κατολισθήσεις στο Νεπάλ συνήθως συμβαίνουν κατά την διάρκεια της εποχής των Μουσώνων, σημαντικές κατολισθήσεις οι οποίες προκλήθηκαν από σεισμικά γεγονότα έχουν καταγραφεί στο παρελθόν συμπεριλαμβανομένων των κατολισθήσεων των περιοχών Okharpauwa, Tigaun και Ilam (TiwariandMarui 1998).

Ο σεισμός της 25^{ης} Απριλίου 2015 και οι συσχετιζόμενοι μετασεισμοί του προκάλεσαν σημαντικές κατολισθήσεις οι οποίες προκάλεσαν τον θάνατο εκατοντάδων ανθρώπων, έκλεισαν αρκετές οδικές αρτηρίες, έθαψαν χωριά και δημιούργησαν φράγματα σε φυσικούς ποταμούς. Όμως, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο σεισμός της περιοχής Gorkha 2015 συνέβη κατά τη διάρκεια ξηρής κλιματικής περιόδου (δύο μήνες πριν την περίοδο των μουσώνων) η έκταση των κατολισθήσεων είναι πολύ μικρότερη από την προσδοκώμενη για το χειρότερο σενάριο πρόκλησης κατολισθήσεων όταν το έδαφος είναι εμπλουτισμένο με νερό της βροχής ή να έχουν προηγηθεί συνθήκες υψηλής υγρασίας.

Η ερμηνεία των δορυφορικών φωτογραφιών οι οποίες ελήφθησαν πριν και μετά τον σεισμό από την ομάδα GEER καταδεικνύουν ότι ο κυρίως σεισμός προκάλεσε περισσότερες από 6000 νέες ή επανενεργοποιημένες κατολισθήσεις μόνο εντός της περιοχής Sindhupalchok (Ziselsberger, 2016). Ένα παράδειγμα φωτογραφιών προ και μετά την κατολίσθηση εξ αιτίας του σεισμού παρουσιάζεται στην εικόνα 54 και ο χάρτης της προκαταρκτικής καταγραφής των αποτελεσμάτων των κατολισθήσεων στην περιοχή Sindhupalchok παρουσιάζεται στην εικόνα 55.

Εικόνα 54: Δορυφορικές εικόνες από τον Δεκέμβριο του 2014 (αριστερά) μέχρι το Μάιο του 2015 (δεξιά), με συντεταγμένες 27 ° 52'3,57 "N, 85 ° 39'5,41" E. Οι ελαφριές διαρρήξεις στη δεξιά εικόνα υποδεικνύουν περιοχές που έχουν υποστεί κατολίσθηση μετά από σεισμό (NepalGEERreportversion1,2015).



Εικόνα 55: Νέες και επανενεργοποιημένες κατολισθήσεις στην περιοχή Sindhupalchok που προκύπτουν από τον κύριο σεισμό της Gorkha του 2015 και τη σχετική αλληλουχία μετασεισμών του. Η πορτοκαλί γραμμή υποδεικνύει τα όρια της περιφέρειας Sindhupalchok και τα κίτρινα σημάδια καρφίτσας υποδεικνύουν της θέσεις επιμέρους κατολισθήσεων (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.2 Ζημιές κατά μήκος της Εθνικής Οδού Prithvi.

Κατά μήκος της Εθνικής Οδού Prithvi παρατηρήθηκαν μόνο τοπικά περιστατικά κατολισθήσεων εξ αιτίας του σεισμού (Εικ. 56). Η εικόνα 57 παρουσιάζει την κατολίσθηση Krishnabhir η οποία προϋπήρχε του σεισμού αλλά δεν επανενεργοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού του 2015 της περιοχής Gorkha.

Φράγματα ελέγχου τα οποία κατασκευάστηκαν για να κατακρατήσουν τα φερτά υλικά της κατολίσθησης κοντά στον υδροηλεκτρικό σταθμό Marshyandgi λειτούργησαν γενικά καλά (Εικ. 58). Όμως παρατηρήθηκαν μικρής έκτασης κατολισθήσεις βράχων κατά μήκος μιας τομής της οδού (Εικ. 59) Επί πλέον αρδευτικά κανάλια επηρεάστηκαν τοπικά από τις κατολισθήσεις (Εικ. 60) Οι κατολισθήσεις περιείχαν κυρίως επιφανειακούς ρεγκόλιθους και διαβρωμένα πετρώματα του υποβάθρου και φαίνεται να έχουν ενεργοποιήσει φαινόμενα κατολισθήσεων όπως ροές κορημάτων, ολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων.

Εικόνα 56: Τυπικές Κατολισθήσεις κατά μήκος της Εθνικής Οδού Prithvi.

Εικόνα 57: Η προϋπάρχουσα κατολίσθηση KrishnaBhir, η οποία δεν ενεργοποιήθηκε και δεν προκάλεσε ζημιές κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού του 2015.

Εικόνα 58: Τα φράγματα κοντά στο εργοστάσιο παραγωγής υδροηλεκτρικών έργων του Marshyangdi, τα οποίαδεν αντιμετώπισαν προβλήματακαι συγκράτησαν μεγάλη ποσότητα φερτών υλικών κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού του 2015 (27 ° 52,5'0 "N 84 ° 32,4'0" E).

Εικόνα 59: Ολισθήσεις βράχων παρατηρήθηκαν στο εργοστάσιο φράγματος του υδροηλεκτρικού έργου Marshyangdi κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού του 2015.

Εικόνα 60 : Κανάλι άρδευσης του οποίου η ευθυγράμμιση επηρεάστηκε από ολισθήσεις βράχων.

6.3.3 Η Εθνική Οδός Araniko.

Η Εθνική Οδός Araniko η οποία εκτείνεται ανατολικά από το Κατμαντού και κατευθύνεται προς το σύνορο με την Κίνα στην περιοχή Kodari υπέστη σοβαρές ζημιές από κατολισθήσεις και συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των πολύ δυσμενώς επηρεασθέντων αυτοκινητοδρόμων. Κατά μήκος του τμήματος της οδού από το Panchkhal έως την περιοχή Sindhupalchok κατά μήκος του ποταμού Sunkoshi προς την περιοχή Kodari στο ανατολικό Νεπάλ, οι επιπτώσεις των κατολισθήσεων γίνονταν σταδιακά σοβαρότερες με την αύξηση του υψομέτρου με κατεύθυνση προς τον βορά.

Μεταθετικές ολισθήσεις πρανών και πτώσεις βράχων κατέστησαν τον αυτοκινητόδρομο αδιαπέρατο σε πολυάριθμες τοποθεσίες μεταξύ της αρχής του και της γέφυρας του ποταμού Indrawati. Ορισμένες αστοχίες στο κατώτερο μέρος του πρανούς στις όχθες του ποταμού απείλησαν τα θεμέλια του αυτοκινητοδρόμου. Η πλειονότητα των εργασιών μετριασμού των φαινομένων της κατολίσθησης τα οποία είχαν γίνει πριν την εκδήλωση των κατολισθήσεων όπως κοφίνωση και υπόγεια αποστραγγιστικά έργα φαίνεται να λειτούργησαν καλά αν και κάποιες δομές – κατασκευές επηρεάσθηκαν από καινούργιες κατολισθήσεις.

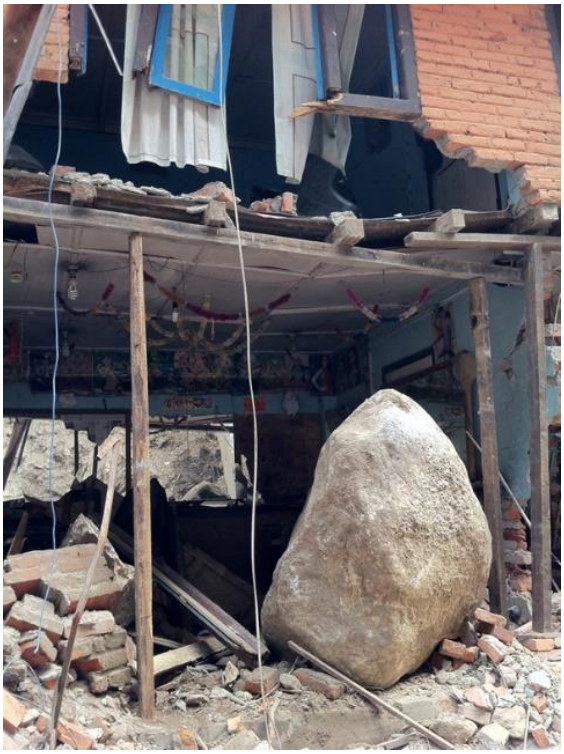
Καθώς η Εθνκή Οδός Araniko κατευθύνεται προς βορά κατά μήκος του ποταμού Sunkoshi, αυτή επλήγη σοβαρά από κατολισθήσεις βράχων προερχομένων από απόκρημνα και υψηλότερα πρανή (slopes) κατά μήκος της οδού.

Σοβαρές ζημιές ως αποτέλεσμα των κατολισθήσεων ήταν εμφανείς σε όλες σχεδόν τις πόλεις και τις κωμοπόλεις κατά μήκος του ποταμού Sunkoshi. Η πλειονότητα των παρατηρηθεισών καταολισθήσεων ήταν ολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων οι οποίες προξενήθηκαν από ολίσθηση πρανών και αποκοπή – θραύση κατά μήκος ενωμένων επιφανειών εδάφους). Μια πολύ σημαντική κατολίσθηση η οποία έφραξε τον ποταμό Sunkoshi στο σημείο Naglwitz τον Δεκέμβριο του 2014 δεν επενενργοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού της Gorkha 2015. Ο ποταμός Sunkoshi φράχτηκε για μια μικρή χρονική περίοδο από ένα φράγμα το οποίο

δημιουργήθηκε εξ αιτίας των κατολισθήσεων κοντά στο χωριό Listikot (Εικ. 61) Το φράγμα αυτό είχε διαστάσεις περίπου 20μ. ύψος και 30μ. πλάτος, αποτελείτο από ανομοιόμορφους βράχους και εδαφικά φερτά υλικά, και ήταν ως αποτέλεσμα μιας μεγάλης ολίσθησης βράχων η οποία απελευθερώθηκε από ενωμένες επιφάνειες εδάφους εντός ενός πρανούς (πλαγιάς, slope) σχεδόν κατακόρυφου, ύψους 200μ. πλησίον του ποταμού. Το εν λόγω φράγμα διαρρήχτηκε πριν τις παρατηρήσεις της ομάδας GEER και δεν είχε προξενηθεί καμία εμφανής ζημιά από αυτό.

Εικόνα 61: Φράγμα κατολισθήσεων πλησίον του χωριού Listikot επί του ποταμού Sunkoshi πλησίον του αυτοκινητόδρομου Araniko (27 º 52 '43,22 N N, 85 º 54' 12,17 E).(NepalGEERreportversion1,2015).

Ζημιές από κατολισθήσεις και πτώση βράχων κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου Araniko ήταν σχεδόν συνεχείς για αρκετά χιλιόμετρα μεταξύ της περιοχής Kodari και των συνόρων Νεπάλ – Κίνας. Οι γέφυρες του ποταμού Sunkoshi κοντά στην περιοχή Kodari, συμπεριλαμβανομένης και της γέφυρας Friendship (Φιλίας) στα σύνορα Νεπάλ-Κίνας δεν είχαν εμφανείς ζημιές. Η πόλη Kodari καταστράφηκε από καταπτώσεις μεγάλων βράχων από τα κοντινά κατακόρυφα πρανή – πλαγιές. Οι βράχοι είχαν διάμετρο έως και 4μ. και έπληξαν κτίρια (Εικ. 62) και αυτοκίνητα (Εικ. 63) κατά μήκους του στενού αυτοκινητοδρόμου.



Εικόνα 62: Κατεστραμμένο κτίριο από ολίσθηση ογκόλιθουκατά μήκος της εθνικής οδού Araniko στο Kodari (27 ° 58 '17,61 N N; 85 ° 57' 43,51 E).(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 63: Κατεστραμμένα οχήματα κατά μήκος της εθνικής οδού Araniko στο Kodari (27 ° 58 '21.55 N N; 85 ° 57' 46.18 E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου από το Panchal έως το Tatopani επλήγη σημαντικά από νέες και επανενεργοποιηθείσες κατολισθήσεις (Εικ. 64και 66). Η πλειονότητα των έργων περιορισμού των κατολισθήσεων όπως κοφινώσεις και υπόγειες αποστραγγιστικές βελτιώσεις φάνηκε ότι λειτούργησαν καλά (Εικ. 66) αν και τοπικά παρατηρήθηκαν ζημιές σε τέτοιες δομές, μαζί με κατά τόπους ρηχές βλάβες της επίστρωσης των περιθωρίων της οδού, (Εικ., 67). Υπήρξε σοβαρός προβληματισμός για το πώς θα συμπεριφερθεί αυτό το κομμάτι του δρόμου στην πιθανότητα μελλοντικών μεγάλων κατολισθήσεων και αστοχιών των πρανών (slopes) οι οποίες θα ενεργοποιηθούν ψηλότερα από τον δρόμο. Τέτοιες κατολισθήσεις μπορεί όχι μόνο να φράξουν και να καταστρέψουν την οδό, αλλά και να φράξουν τη φυσική ροή του ποταμού Sunkoshi. Επιπροσθέτως, σοβαρές πιθανές κατολισθήσεις φαίνεται να απειλούν τα υπάρχοντα χωριά κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου (Εικ. 68).

Εικόνα 64: Αριστερά: Τυπική κατολίσθηση που παρατηρείται στον τομέα Panchkhal-Dolalghat της εθνικής οδού Araniko. Δεξιά: Η έκταση των κατολισθήσεων που παρατηρήθηκαν λίγα χιλιόμετρα μπροστά από το Dolalghat στην Araniko Highway.(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 65: Αριστερά: Τυπική μάζα ολίσθησης βράχων που παρατηρείται κατά μήκος του τομέα Dolalghat-Lamo Sangu της οδού Araniko. Δεξιά: Επανενεργοποίηση υπάρχουσας κατολίσθησης κατά μήκος της εθνικής οδού Araniko, η οποία πυροδοτήθηκε λόγω διάβρωσης και υποτροπής της ροής (27 ° 44,7'0 "N 85 ° 47,5'0" E).(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 66: Αριστερά: Κατολίσθηση παρατηρείται κατά μήκος του τομέα Dolaldhat - Lamosangu της εθνικής οδού Araniko. Δεξιά: Μια υπόγεια αποστράγγιση που εγκαταστάθηκε σε μια περιοχή παλαιάς κατολίσθησης κατά μήκος της εθνικής οδού Araniko δεν ενεργοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού.(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 67: Αριστερά: Ο τύπου Gabion τοίχος συγκράτησης υλοποιήθηκε ως έργο πρόληψης κατολισθήσεων για την υπάρχουσα κατολίσθηση μετά από σεισμό του 2015.(NepalGEERreportversion1,2015). Δεξιά: Τυπική βλάβη γεμίσματος της επίστρωσις του περιθωρίου κατά μήκος της εθνικής οδού Araniko.(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 68: Αριστερά: Τυπικές διαρρήξεις παρατηρούνται στις κορυφογραμμές του ορεινού όγκου, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να ενεργοποιήσουν κατολισθήσεις οι οποίες μπορούν να μπλοκάρουν τον ποταμό Sunkoshi. Δεξιά: Κατοικημένη περιοχή κατά μήκος της εθνικής οδού Araniko, κοντά στην περιοχή Lamosangu, η οποία εκτίθεται σε πιθανές κατολισθήσεις (NepalGEERreportversion1,2015).

Το οδικό τμήμα από το Pankhal στο Tatopani .επηρεάσθηκε σημαντικά από ολισθήσεις βράχων σε πολλαπλές τοποθεσίες, κατολισθήσεις κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου και επανενεργοπηείσεις παλαιών κατολισθήσεων, (Εικ. 64 έως 66). Η πλειονότητα των έργων πρόληψης των κατολισθήσεων όπως συρματοκιβώτια και υπόγεια αποστραγγιστικά δίκτυα τα οποία χρησίμευσαν σε προηγούμενες κατολισθήσεις φαίνεται να λειτούργησαν καλά αν και μερικές από αυτές τις δομές επηρεάστηκαν από νέες κατολισθήσεις και σχισμές στα πλαϊνά του δρόμου οι οποίες δημιουργήθηκαν από εδαφικές δονήσεις (Εικ.66).

Το μεγαλύτερο ζήτημα το οποίο παρατηρήθηκε σε αυτό το τμήμα του αυτοκινητοδρόμου είναι η δυναμική για την πρόκληση μεγάλης έκτασης κατολισθήσεων και αστοχιών πρανών στην κορυφή της κορυφογραμμής οι οποίες ίσως όχι μόνο φράξουν και καταστρέψουν τον αυτοκινητόδρομο αλλά επίσης μπορεί εν δυνάμει να φράξουν τη φυσική ροή του ποταμού Sunkoshi. Επί πλέον ένας αριθμός τέτοιων εν δυνάμει κατολισθήσεων απειλούν τους παρόντες οικισμούς κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου (Εικ. 68).

6.3.4 Ο αυτοκινητόδρομος Lamosangu – Mantali.

Λόγω της μικρής εγγύτητας του αυτοκινητοδρόμου Lamosangu – Mantali στο επίκεντρο του μετασεισμού εντάσεως 7.3Mw, ο αυτοκινητόδρομος αυτός επηρεάστηκε σημαντικά από τις εδαφικές δονήσεις. Τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων ήταν παρόμοια με αυτά που παρατηρήθηκαν σε άλλες περιοχές - πτώσεις βράχων οι οποίες έφραξαν πολλά τμήματα του αυτοκινητοδρόμου, (Εικ. 69) ροή κορημάτων σπασίματα – ρωγμές εδάφους και ερπισμό τα οποία αποτέθηκαν στα πλαϊνά των δρόμων.

Εικόνα 69: Αριστερά: Τυπική πτώση βράχων κατά μήκος της οδού Lamosangu – Manthali. Δεξιά: Ογκόλιθος ο οποίος ολίσθησε κάτω από την κορυφή προς την οδό (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.5 Η οδός πρόσβασης προς τα έργα υδροδότησης του Melamchi.

Η οδός προς τα έργα υδροδότησης του Melamchi επίσης επηρεάστηκε από πολλές κατολισθήσεις. Τα χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων ήταν παρόμοια με αυτά που παρατηρήθηκαν σε άλλες περιοχές συμπεριλαμβανομένων ροών κορημάτων (Εικ. 70) και πτώσεις βράχων (Εικ. 71). Οι σεισμικές δονήσεις προκάλεσαν ερπυσμό των υλικών των πλαϊνών της οδού, τα οποία οδήγησαν σε διαρρήξεις πλευρικά και κατά μήκος της οδού (Εικ. 71). Σε πολλές τοποθεσίες παρατηρήθηκαν αποκολλημένοι / απογυμνωμένοι βράχοι στην κορυφή της κατολισθητικής μάζας (Εικ. 72). Αν και πολλά έργα αντιστήριξης λειτούργησαν στην κατακράτησης των υλικών της κατολίσθησης (Εικ. 72) ορισμένα από αυτά τα έργα έπαθαν ζημιές εξ αιτίας του ερπυσμού (sloughing) των υλικών του δρόμου (Εικ. 73). Σπασίματα / ρωγμές παρατηρήθηκαν κατά μήκος της όχθης του ποταμού κοντά σε ένα στήριγμα γέφυρας, οι οποίες μπορεί εν δυνάμει να προκαλέσουν ολίσθηση του πρανούς στο μέλλον (Εικ. 73). Παρατηρήθηκε μια μεγάλης κλίμακας ολίσθηση βράχων η οποία θα μπορούσε εν δυνάμει να φράξει την κοίτη του ποταμού στο μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κορυφή της κατολίσθησης εκτείνεται αρκετά μέτρα πάνω από την οδό. Αυτή η ολίσθηση βράχων ήταν ακόμα ενεργή κατά τη διάρκεια της έρευνας πεδίου στις 16 Μαΐου 2015 (Εικ. 74).

Εικόνα 70: Αριστερά: Τυπική πηγή ροής κορημάτων παρατηρήθηκε κατά μήκος της οδού πρόσβαση Melamchi προς τα έργα υδροδότησης. Δεξιά:Πυκνές κατολισθήσεις κατά μήκος και ευθύγραμμα της οδού πρόσβασης Melamchi προς τα έργα υδροδότησης με συντατεγμένες (27 ° 49,8'0 "N 85 ° 34,5'0" E)(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 71: Αριστερά: Ογκόλιθος ο οποίος ολίσθησε από ένα πρανές κατά την διάρκεια του κυρίως σεισμού. Δεξιά: Διαρρήξεις και ρωγμές κατά μήκος μια χωμάτινης οδού (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 72: Αριστερά: Χαλαροί ογκόλιθοι στην κορυφή ενός πρανούς. Δεξιά:Τα τείχη αντιστήριξης έχουν καλή απόδοση κατά την διάρκεια των εδαφικών δονήσεων (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 73: Αριστερά: Βλάβη στον τοίχο αντιστήριξης λόγω υπερβολικής καθίζησης του εδάφους και εδαφικών δονήσεων. Δεξιά: Διαρρήξεις και ρωγμές παρατηρούνται κατά μήκος των στηριγμάτων της γέφυρας (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 74: Αριστερά: Μια κατολίσθηση η οποία αποτελεί δυνητικό κίνδυνο για την υποκείμενη οδό. Δεξιά: Πτώση βράχων ,όπως αποδεικνύεται από τη αιωρούμενη σκόνη που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της αναγνώρισης πεδίου (27 ° 58,5'0 "N 85 ° 33,9'0" E)(NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.6 Περιοχή Ramkot, κοιλάδα του Κατμαντού.

Παρατηρήθηκε μια κατολισθητική ρωγμή στο πρανές του χωριού Ramkot, το οποίο βρίσκεται στο άκρο της κοιλάδας του Κατμαντού (Εικ. 75). Η εκτενής ρωγμή έχει πλάτος μεγαλύτερο από 15cm (Εικ. 76).

Εικόνα 75: Έχουν παρατηρηθεί ρωγμές στην κορυφή του πρανούς που πυροδότησε ο κυρίως σεισμός του 2015(NepalGEERreportversion1,2015).

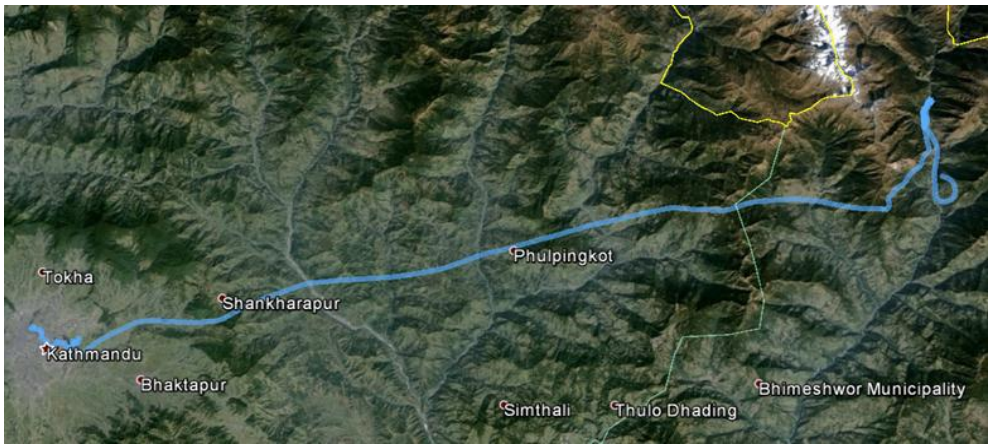
Εικόνα 76: Η ρωγμή της κεφαλής του πρανούς είναι μεγαλύτερη από 15 cm(NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.7 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – LamaBagar.

Παρατηρήθηκαν αρκετές κατολισθήσεις κατά μήκος των οδών και της όχθης των ποταμών κατά τη διάρκεια της αέριας παρατήρησης της διαδρομής από Κατμαντού σε LamaBagar (Εικ. 77) και κατά μήκος των αναβαθμίδων στην όχθη του ποταμού οι οποίες πιθανόν να προϋπήρχαν του σεισμού (Εικ. 78). Αρκετοί αγροτικοί δρόμοι επηρεάστηκαν από κατολισθήσεις εξ αιτίας του σεισμικού γεγονότος (Εικ. 79και80). Κορυφογραμμές κατά μήκος του ποταμού Sunkoshi έχουν υποστεί τοπικές ρηγματώσεις (Εικ. 81 έως 83) και εν δυνάμει μπορεί να υποστούν επιπλέον σημαντική ενεργή δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της εποχής των

μουσώνων. Κάποιες από αυτές τις αποθέσεις των κατολισθήσεων περιέχουν μεγάλους βράχους (Εικ. 84 και 85) και μπορούν εν δυνάμει να αποσταθεροποιηθούν κατά τη διάρκεια της εποχής των μουσών ή μελλοντικών σεισμικών γεγονότων.

Η οδός πρόσβασης στο υδροηλεκτρικό έργο του άνω Tamakoshi και συγκεκριμένα το τμήμα Signati-Lama Bagar (Εικ.86 έως 89) συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον πληγέντων περιοχών. Η πλειονότητα της συνέχειας της οδού κατέστη αδιαπέρατη εξ αιτίας των κατολισθήσεων. Η οδός είναι στενή και έχει κατασκευαστεί σε πολύ απόκρημνη τοπογραφία, οξύνοντας τις επιπτώσεις του πρόσφατού΄σεισμικού γεγονότος. Τα συρματοκιβώτια, ως έργο αντιστήριξης, γενικά συμπεριφέρθηκαν καλά, με μεμονωμένα περιστατικά ζημιών. Αμφότερες οι περιοχές άνω και κάτω του φράγματος του υδροηλεκτρικού έργου επλήγησαν από πολλαπλά γεγονότα πτώσης βράχων (Εικ. 90 έως 92). Τα μεγέθη των βράχων οι οποίοι διέσχισαν απόσταση μεγαλύτερη των 100μ. καταδεικνύουν υψηλά επίπεδα εδαφικών δονήσεων (Εικ. 93). Όμως, δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα παρατηρηθεισών εδαφικών κινήσεων στην περιοχή.



Εικόνα 77: Η διαδρομή του Ελικοπτέρου Κατμαντού- Λαμά Μπαγκάρ (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 78: Κατολίσθηση κατά μήκος των αναβαθμίδων της όχθης του ποταμού κοντά στην λεκάνη του Κατμαντού(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 79: Ορεινές οδοί που έχουν πληγεί με κατολισθήσεις από τον σεισμό του 2015 (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 80: Αριστερά : Κατολισθήσεις που έχουν επηρεάσει αρκετούς ορεινούς δρόμους κατά μήκος της αέριας οδού. Δεξιά: Μικρή Κατολίσθηση η οποία προκλήθηκε από το κυρίως σεισμικό γεγονός και επηρέασε ένα αγροτικό δρόμο και ένα χωριό κατά μήκος της αέριας διαδρομής προς το Λάμα Μπαγκάρ (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 81: Αριστερά: Ρωγμές δημιουργήθηκαν στην κορυφογραμμή του βουνού εξαιτίας του κυρίως σεισμικού γεγονότος. Δεξιά: Κατολίσθηση η οποία προκλήθηκε από το κυρίως σεισμικό γεγονός σε μια κορυφογραμμή (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 82:Αριστερά: Το κατακλινές μέτωπο του πρανούς είναι ευάλωτο στις μετασεισμικές βροχοπτώσεις που προκάλεσαν κατολισθήσεις που θα μπορούσαν ενδεχομένως να εμποδίσουν την φυσική ροή. Δεξιά: Οικισμός κατά μήκος μια ποτάμιας λεκάνης κοντά σε ένα μέτωπο πιθανής κατολίσθησης (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 83:Ρωγμές που προκλήθηκαν από κατολισθήσεις στο πρανές του λόφου από το κυρίως σεισμικό γεγονός (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 84: Πιθανές ροές κοριμμάτων την περίοδο των βροχών(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 85: Πηγή μια κατολίσθησης(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 86: Τοποθεσίες με δυναμικό κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας κατά μήκος της οδού Charikot-Lamabagar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 87: Αριστερά: Ο οδικός τομέας Charikot- Lamabagar που επηρεάζεται από κατολισθήσεις που προκλήθηκαν λόγω του σεισμού. Δεξιά:Τείχη αντιστήριξης τύπου Gabion που δεν είχαν καλή απόδοση κατά μήκος της οδού Charikot-Lamabagar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 88:Αριστερά: Κατολισθήσεις παρατηρούνται κατά μήκος της οδού ευθυγράμμισης που κατασκευάζεται κατά μήκος απότομου εδάφους. Δεξιά : Κατολισθήσεις μεγάλης κλίμακας που επηρέασαν τον τομέα του οδικού δικτύου Charikot- Lamabagar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 89: Κατολίσθηση κοντά στην τοποθεσία του φράγματος του υδροηλεκτρικού έργου που κατέστρεψε το δρόμο (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 90: Κατολισθήσεις που παρατηρήθηκαν κατά μήκος του φράγματος στα ανάντη του έργου υδροηλεκτρικής ενέργειας του Tamakoshi (NepalGEERreportversion1,2015).

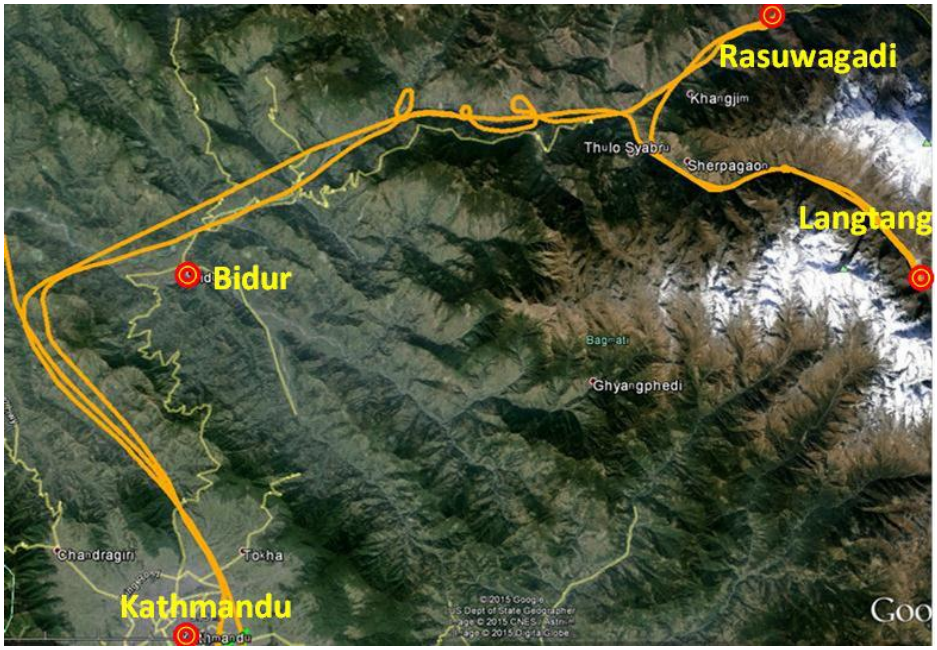
Εικόνα 91: Πτώσεις βράχων στα ανάντη από το έργο υδροηλεκτρικής ενέργειας(NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 92: Πτώση Μεγάλου ογκόλιθου από την κορυφή του πρανούς κοντά στο φράγμα (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 93: Τοπικό κατάστημα που καταστράφηκε από την πτώση ογκόλιθου (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.8 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – Duipipal – Tupche – Dhunche – LangtangKhola – Syaprubesi – Rasuwagadi .

Αυτή η περιοχή του Νεπάλ (Εικ.94) επίσης επηρεάστηκε σημαντικά από κατολισθήσεις οι οποίες προκλήθηκαν από το σεισμικό γεγονός. Ιδιαιτέρως η περιοχή μεταξύ Nuwakot και Rasuwagadi παρουσίασε πολλές ξηρές, τύπου ροών κορημάτων κατολισθήσεις (Εικ. 95 και 96). Πολλές από αυτές τις κατολισθήσεις έφραξαν τον ποταμό Trishuli και τους παραποτάμους του (Εικ. 97 έως 102) και επίσης επηρέασαν χωριά. Ορισμένα υδροηλεκτικά έργα, συμπεριλαμβανομένων των Chilime, Rasuwagadi και Trishuli επηρεάστηκαν εκτενώς από τις κατολισθήσεις (Εικ. 103 έως 105) Οι οδοί πρόσβασης σε αυτά τα υδροηλεκτρικά έργα και η πλειονότητα των τοίχων αντιστήριξης τύπου συρματοκιβωτίων που είχαν κατασκευαστεί κατά μήκος τους έχουν υποστεί ζημιά από τις κατολισθήσεις. Οικισμοί ευρισκόμενοι υψηλότερα και χαμηλότερα από τις κατολισθήσεις μπορεί να διατρέχουν κίνδυνο εξ αιτίας της εν δυνάμει επανενεργοποίησης των κατολισθήσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου των μουσώνων ή μελλοντικών εδαφικών δονήσεων. (Εικ.106 έως 109). Μεγάλοι αιωρούμενοι και επικίνδυνοι βράχοι επίσης παρατηρήθηκαν πάνω από τους οικισμούς. Σε πολλές τοποθεσίες κατά μήκος του ποταμού Trishuli έως τα σύνορα Νεπάλ – Κίνας, ογκώδεις κατολισθήσεις έφραξαν εντελώς ή μερικώς την κοίτη του ποταμού (Εικόνα 110).



Εικόνα 94: Η αεροπορική διαδρομή Kathmandu - Langtang – Rasuwagadhi – Kathmandu (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 95: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από τον κυρίως σεισμό κατά μήκος της απότομης πλαγιάς του πρανούς κατά μήκος της οδού Trishuli-Dhunche (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 96: Αριστερά :Τοπικός δρόμος τροφοδοσίας προς την οδό Trishuli-Rasuwagadhi που επηρεάζεται από τις κατολισθήσεις. Δεξία : Το τείχος αντιστήριξης τύπου Gabion συγκρατεί τους τοίχους των πρανών στον δρόμο προς τον δρόμο τροφοδοσίας Trishuli-Rasuwagadhi που υπέστη ζημιά από τον κυρίως σεισμό (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 97: Αριστερα: Παραπόταμος του ποταμού Trishuli, μερικώς παρεμποδισμένος από τα δεβριτικά υλικά κατολισθήσεων που προκάλεστηκαν το κυριως σεισμικό γεγονος. Δεξιά : Δρόμος πρόσβασης σε ένα υδροηλεκτρικό έργο που επηρεάζεται από τις κατολισθήσεις του κυρίως σεισμικού γεγονότος (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 98: Αριστερά: Τα κεκλιμένα πρανή κατά μήκος των δύο πλευρών των λεκανών απορροής του ποταμού Trishuli επηρεάζονται από τις σεισμικά προκαλούμενες κατολισθήσεις. Δεξία : Μεγάλη κατολίσθηση κατά μήκος του ποταμού Trishuli (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 99: Αριστερά: Κατολισθήσεις δεβριτικών υλικών μπλοκάρουν μερικώς το ποταμό Trishuli κοντά σε ένα έργο υδροηλεκτρικής ενέργειας. Δεξιά : Δεβριτικές Κατολισθήσεις προσκείμενες στον ποταμό Trishuli Trishuli (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 100: Αριστερά: Παραπόταμος του ποταμού Trishuli, μερικώς μπλοκαρισμένος από τις κατολισθήσεις που προκλήθηκαν και στις δύο πλευρές του ποταμού. Δεξιά : Μια μεγάλης κλίμακας σεισμικά προκαλούμενη κατολίσθηση που εν μέρει μπλοκάρισε τον ποταμό Trishuli (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 101: Αριστερά: Κατακρήμνιση υδάτων κατά μήκος του ποταμού Trishuli λόγω κατολισθήσεων οδηγούν σε σχηματισμό φυσικού φράγματος. Δεξιά: Μιας μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση όχι μόνο μπλόκαρε τον ποταμό Trishuli αλλά όπως παρατηρείται στην εικόνα και το χωριό στην κορυφή της κεκλιμένης επιφάνειας διάρρηξης στην κεφαλή της κατολίσθησης (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 102: Κοντινή όψη του κατολισθητικού φράγματος στον ποταμό Trishuli με συντεταγμένες 28 ° 14,9'0 "N 85 ° 27,6'0"E (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 103: Έργο υδροηλεκτρικής ενέργειας με πολλαπλές κατολισθήσεις στην ανάντη πλευρά του (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 104: Ανάντη πλευρά ενός έργου υδροηλεκτρικής ενέργειας που επηρεάζεται από κατολισθήσεις μεγάλης κλίμακας (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 105: Κατολισθήσεις που καταστρέφουν την περιοχή της λεκάνης απορροής του υδροηλεκτρικού έργου (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 106: Αριστερά: Κανονικός οδικός τομέας της οδού Trishuli-Rasuwagadi που επηρεάζεται από κατολισθήσεις. Δεξιά: Ογκόλιθοι πάνω από τα χωριά (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα107: Αριστερά: Χωριά κάτω από μεγάλες προϋπάρχουσες κατολισθήσεις. Δεξία: Ένα χωριό κοντά σε μια μεγάλη περιοχή κατολίσθησης που θα μπορούσε ενδεχομένως να μπλοκάρει τον ποταμό Trishuli (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 108: Αριστερά: Τομέας δρόμου πρόσβασης ενός έργου υδροηλεκτρικής ενέργειας που επηρεάζεται από το κυρίως σεισμό ο οποίος προκαλεί κατολίσθηση. Δεξια: Ένα χωριό κοντά στο Dhunche που υπέστη σοβαρές ζημιές από τις δεβριτικές κατιλισθήσεις του κεκλιμένου πρανούς από πάνω από το χωριό (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 109: Ένα χωριό πάνω από μια μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση που έχει τη δυνατότητα να μπλοκάρει τον ποταμό Trishuli (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 110: Ο ποταμός Trishuli κοντά στα κινεζικά σύνορα στο Rasuwagadi που μπλοκαρίστηκε μερικώς από μεγάλες κατολισθήσεις (NepalGEERreportversion1,2015).

Κατολισθήσεις επίσης παρατηρήθηκαν κατά μήκος αμφοτέρων των πλευρών του ποταμού Langtang (Εικ. 111 έως 113). Σημαντική ποσότητα χαλαρών ιζημάτων προερχομένων από αστοχίες πρανών παρατηρήθηκαν κατά μήκος των πηγών του ποταμού Langtang και των ορεινών όγκων κοντά στο KyamgjonKharka και YalaPeak (Εικ. 114 έως 116). Παρατηρήθηκαν επίσης αρκετές ρωγμές εδάφους, πιθανόν σχετιζόμενες με την πλευρική εξάπλωση, συνορεύουσες με μία λιμναία απόθεση μοραίνων (παγετώνας) άνω της περιοχής KyamgjonKharka (Εικ. 117 και 118) Ακόμα παρατηρήθηκαν χαλαρές δεβριτικές ιζηματογενείς αποθέσεις κατά μήκος των παραποτάμων του ποταμού Langtang, ειδικότερα στις βουνοκορφές ή κοντά σε αυτές σε όλη την έκταση των περιοχών Langtang και KyamgjonKharka (Εικ. 119 και 120).

Εικόνα 111: Αριστερά: Μια μεγάλη σεισμικά προκαλούμενη μάζα κατολίσθησης που περιορίζει το πλάτος του ποταμού Langtang.Δεξιά : Άλλη μια τοποθεσία όπου ο ποταμός Langtang εμποδίζεται από τα κορήματα δεβριτικών κατολισθήσεων (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 112: Αριστερά: Πολλές μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις κατά μήκος της όχθης του ποταμού Langtang. Δεξιά: Χαρακτηριστικές χαλαρές δεβριτικές δομές και κορήματα παρατηρούνται κατά μήκος ενός κεκλιμένου πρανούς στην κοιλάδα Langtang (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 113: Στα ανάντη του ποταμού Langtang μαζί με ιζήματα από μάζα χαλαρών δεβριτικών δομών που ολισθαίνουν μετά το κυριώς σεισμικό γεγονός (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 114: Ο ποταμός Langtang μπλοκαρίστηκε από δεβριτικές κατολισθήσεις σε πολλές τοποθεσίες (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 115: Δεβριτικό ριπίδιο που παρατηρήθηκε στα ανάντη του ποταμού Langtang κοντά στο Kyamgjon Kharka με συντεταγμένες (28 ° 12,2'0 "N 85 ° 35,2'0" E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 116: Ο ποταμός Langtang που έχει μπλοκάριστει σε πολλές θέσεις (28 ° 12,5'0 "N 85 ° 35,1'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 117: Ρωγμές εδάφους που παρατηρούνται στην άκρη μιας παγετώδους λίμνης πάνω από το KyamgjonKharka (NepalGEERreportversion1,2015).

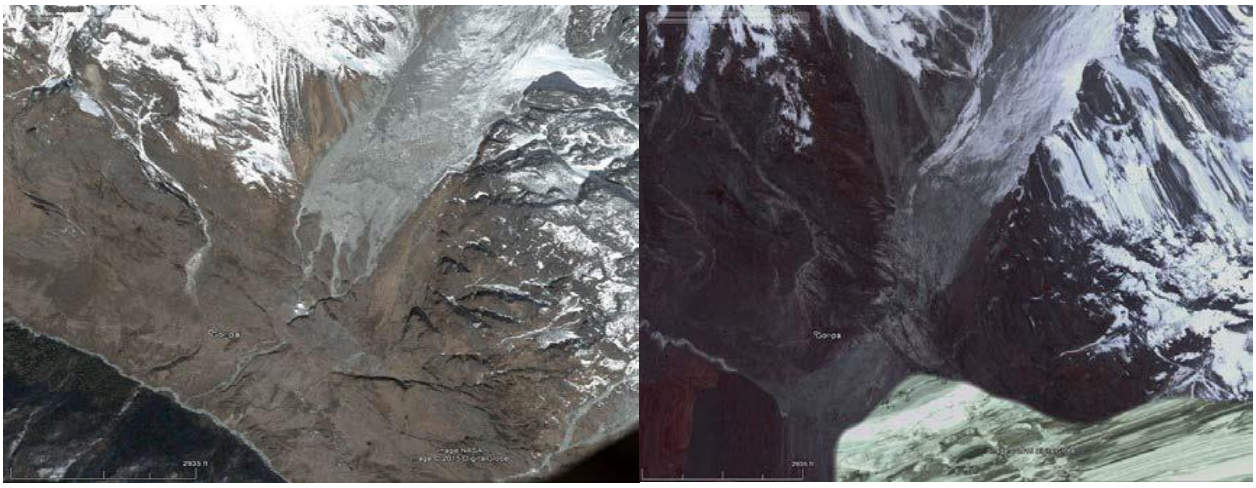
Εικόνα 118: Το χωριό KyamgjonKharka στα κατάντη της παγετώδους λίμνης με συντεταγμένες (28 ° 12,7'0 "N 85 ° 34,1'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 119: Χαλαρά ιζήματα παρατηρούνται κατά μήκος των κεκλιμένων πρανών (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 120: Χαλαρά ιζήματα που παρατηρήθηκαν κοντά στη λίμνη των παγετώνων (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.9 Δεβριτική κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας της περιοχής Langtang.

Σε χρονικό διάστημα ημερών από τον σεισμό εντάσεως 7.8Mw της περιοχής Gorkha, μια μεγάλη δεβριτική κατολίσθηση έθαψε περισσότερους από 200 ανθρώπους στο χωριό Langtang το οποίο βρίσκεται σε γεωγ. πλάτος 28^0 12΄ 55,43΄΄Β – μήκος 85^0 30΄ 8,95΄΄Α, υψόμετρο 3277 μέτρα πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Παρουσιάζονται αεροφωτογραφίες πριν και μετά τη κατολίσθηση στην εικόνα 121. Αν και το χωριό Langtang δεν φαίνεται ευκρινώς στη φωτογραφία, φωτογραφίες υψηλότερης ανάλυσης παρουσιάζονται στις εικόνες 122 έως 124 και μια λεπτομερής απεικόνιση του χωριού παρουσιάζεται στην εικόνα 123. Το εκτιμώμενο μήκος και πλάτος της δεβριτικής ροής είναι 400μ Χ 900μ αντιστοίχως. Βάσει του μέσου εκτιμωμένου βάθους των περίπου 5μ. ο συνολικός όγκος της δεβριτικής κατολίσθησης εκτιμάται περίπου στα 2 εκ. $μ^3$. Η προέλευση της δεβριτικής μάζας εκτιμάται ότι βρίσκεται 2 χιλιόμετρα από το τελικό στάδιο της δεβριτκής απόθεσης, εκπροσωπώντας ανάγλυφο της τάξης των 1600μ. (Εικ. 122 και 123). Τμήμα του χωριού Langtang θάφτηκε κάτω από τη δεβριτική κατολίσθηση με το υπόλοιπο τμήμα να καταστρέφεται από προερχόμενες εξοστρακιζόμενα μεγάλα αέρια σωματίδια εξ αιτίας της δεβριτικής κατολίσθησης. Τα μεγάλα αυτά σωματίδια ισοπέδωσαν δασικές περιοχές κατά μήκος της αριστερής όχθης του ποταμού (Εικόνα 125). Δομές και κατασκευές πέρα από τα άκρα της κατολίσθησης επίσης υπέκυψαν στη βιαιότητα του αέριου αυτού φαινομένου. (Εικ. 126 και 127). Στα σημεία όπου η δεβριτική μάζα έφραξε τελείως το κανάλι του ποταμού Langtang ο ποταμός πέρασε κάτω από την δεβριιική μάζα και έτσι αποφεύχθηκε η δημιουργία λιμναζόντων επιφανειακών υδάτων. (Εικόνα 128). Τα υλικά της δεβριτικής ροής ήταν πολύ χαλαρά και υγρά κατά την στιγμή της επί τόπου αναγνώρισης (Εικόνα 129). Περισσότερο από 95% των δεβριτικών υλικών ήταν λεπτότερα από 0,5μ. (Εικόνα 130).



Εικόνα 121: Αριστερά: Το χωριό Langtang πριν από την δεβριτική κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας. Δεξιά: Το χωριό Langtang μετά την δεβριτική κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας του 2015 (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 122: Αεροφωτογραφία της δεβριτικής κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας με συντατεγμένες (28 ° 12.7'0 "N 85 ° 34.1'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 123: Αεροφωτογραφία της πηγής ενεργοποίησης της δεβριτικής κατολίσθησης μεγάλης κλίμακας με συντεταγμένες (28 ° 12.5'0 "N 85 ° 32.1'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 124: Συνολική όψη της περιοχής της δεβριτικής ροής από το χωριό Langtang με συντεταγμένες (28 ° 12,5'0 "N 85 ° 31,8'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 125: Ισοπεδωμένα δένδρα στην αριστερή όχθη του ποταμού με συντεταγμένες (28 ° 13'0 "N 85 ° 30,2'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 126: Αεροφωτογραφία του χωριού Langtang, το οποίο καταστράφηκε από την έκρηξη αέρος της μεγάλης κλίμακας δεβριτικής κατολίσθησης και πτώσης ογκολίθων (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 127: Κοντινή όψη της κοιλάδας του Langtang. Τα κτίρια είχαν ισοπεδωθεί προς την κατεύθυνση της αέριας έκρηξης που προκάλεσε η δεβριτική κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας (NepalGEERreportversion1,2015).

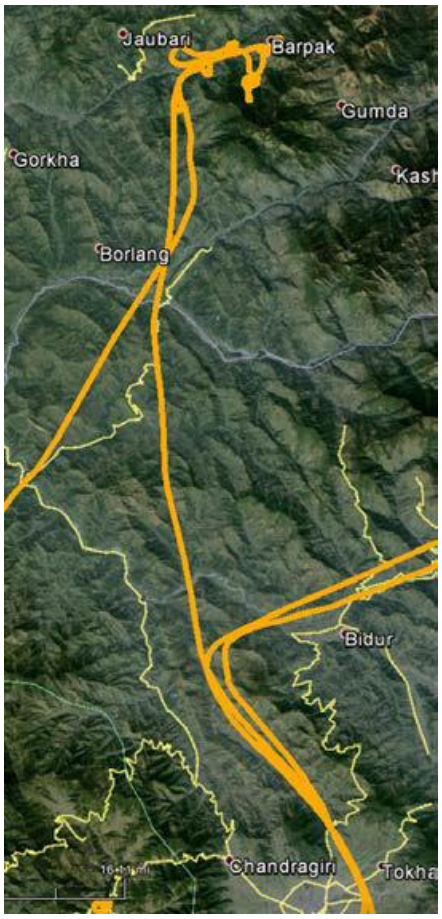
Εικόνα 128: Ο ποταμός Langtang που μπλοκαρίστηκε από την δεβριτική κατολίσθηση μεγάλης κλίμακας (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 129: Τυπικά μεγέθη των μαζών της δεβριτικής κατολίσθησης με συντεταγμένες (28 ° 13'0 "N 85 ° 30,2'0"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 130: Απεικόνιση ενός μεγάλου μεγέθους ογκόλιθου της δεβριτικής κατολίσθησης στην περιοχή του γεγονότος (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.10 Παρατήρηση από αέρος της οδού Κατμαντού – Dhawa – Baluwa – Barpak.

Η γεωγραφική η οποία παρατηρήθηκε σε αυτό το τμήμα της αέριας αναγνώρισης απεικονίζεται στην Εικόνα 131. Πολλές μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις παρατηρήθηκαν κατά μήκος των παραποτάμων του ποταμού Marshyangdi, συμπεριλαμβανομένου του ποταμού Daraudi, οι οποίες έχουν τη δυναμική όχι μόνο να δημιουργήσουν φράγματα αλλά επίσης να επηρεάσουν υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις (Εικόνα 132). Πολλές από αυτές τις κατολισθήσεις έφραξαν τον ποταμό κοντά στην περιοχή Barpak (Εικόνα 133), ευρισκόμενη κοντά στο επίκεντρο του σεισμού εντάσεως 7,8Mw της 25ης Απριλίου 2015. Κορυφές κατολισθήσεων παρατηρήθηκαν στο ΒΑ άκρο του οικισμού Barpak (Εικόνα 134) και κατά μήκος του ΝΔ άκρου του οικισμού.



Εικόνα 131: Αεροφωτογραφία της αέριας διαδρομής Κατμαντού – Μπαρπάκ (NepalGEERreportversion1,2015).

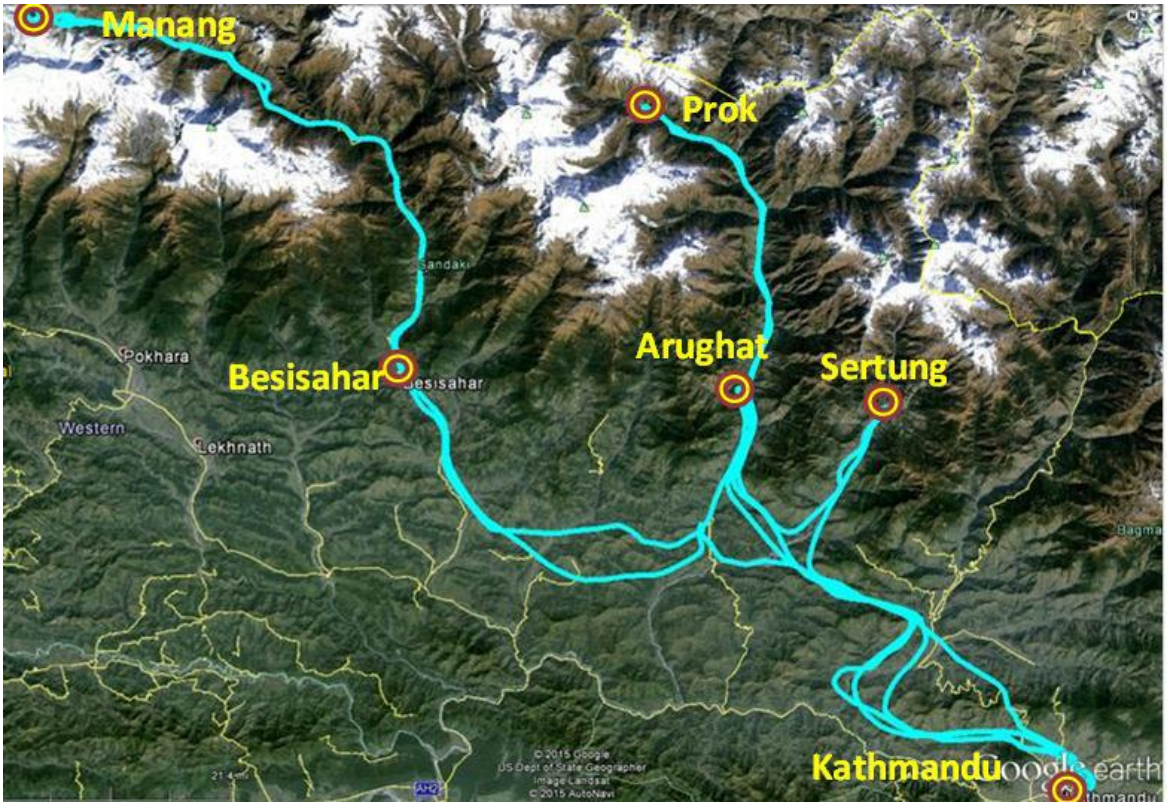
Εικόνα 132: Η τοποθεσία του φράγματος ενός υδροηλεκτρικού σταθμού κοντά στο Barpak είναι ευάλωτη σε πιθανή κατολίσθηση στην επόμενη περίοδο βροχών ή στο επόμενο σεισμικό γεγονός (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 133: Οι σεισμικά προκαλούμενες κατολισθήσεις κοντά στο Barpak εμπόδισαν τη φυσική ροή ενός ποτάμιου ρεύματος (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 134: Αριστερά: Κυρίως μέτωπο μιας σεισμικώς προκαλούμενης κατολίσθησης που παρατηρείται στο βορειοανατολικό άκρο του χωριού Barpak, επίκεντρο του κυρίως σεισμού της Gorkha 7.8W του Απριλίου του 2015.Δεξια: Αεροφωτογραφία του μετώπου της κατολίσθησης (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.11 Παρατήρηση από αέρος της περιοχής Κατμαντού – Kalyanpani – Arughat – Besisahar – Manang – Prok.

Η από αέρος διαδρομή η οποία καλύφθηκε σε αυτό το τμήμα της εργασίας απεικονίζεται στην εικόνα 135. Η περιοχή Manang, ειδικότερα σε σημεία ψηλότερα από την περιοχή Chame αποτελείται από πολύ χαλαρό ίζημα και διαβρωμένα υλικά (Εικόνα 136). Ο σεισμός του 2015 στην περιοχή Gorkha αποσταθεροποίησε τα ιζήματα τοπικά και έφραξε τον ποταμό Marshyangdi λίγα χιλιόμετρα από το αεροδρόμιο Higde (Εικόνα 137) Πολύ χαλαρές δεβριτικές μάζες οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ολισθήσουν προς τα κάτω και να φράξουν τον ποταμό Marshyangdi παρατηρήθηκαν σε να εκτείνονται έως τη λίμνη Tilicho (Εικόνα138) Πολλές κατολισθήσεις επίσης παρατηρήθηκαν κατά μήκος των οχθών του ποταμού BudiGandaki στην κατεύθυνση την περιοχή Prok (Εικόνα 139). Αυτές οι κατολισθήσεις έφραξαν μερικώς τον ποταμό και προξένησαν ζημιές στην οδό η οποία συνδέει την περιοχή Arughat με την Arukhet σε πολλά σημεία (Εικόνα140). Υπήρξαν πολλές μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις μεταξύ των περιοχών Arukhet και Prok οι οποίες έφραξαν μερικώς τον ποταμό BudiGandaki (Εικόνα 141). Ένας παραπόταμος του ποταμού BudiGandaki κοντά στην περιοχή Prok επίσης έφραξε σε πολλά σημεία εξ αιτίας της κατολίσθησης η οποία προκλήθηκε από τον σεισμό.



Εικόνα 135: Αέρια διαδρομή της περιοχής Kathmandu - Manang – Prok (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 136: Η όψη της περιοχής Manang (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 137: Μια κατολίσθηση που μπλόκαρε τον ποταμό Marshangdi προσωρινά αμέσως μετά το κυρίως σεισμικό γεγονός του 2015 της Gorkha (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 138: Χαλαρή μάζα ιζημάτων κατά μήκος της διαδρομής πεζοπορίας από το Manang έως τη λίμνη Tilicho με συντεταγμένες (28 ° 4.97'0 "N 85 ° 13.8'0" E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 139: Κατολισθήσεις που κατέστρεψαν το δρόμο κατά μήκος του οδικού τομέα του Arughat-Arukhet (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 140: Μια κατολίσθηση κατά μήκος της όχθης του ποταμού Budi Gandaki (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 141: Πολλαπλές κατολισθήσεις που παρατηρούνται κατά μήκος ενός παραπόταμου του ποταμού Budı Gandaki κοντά στο Prok αμέσως μετά τον κυρίως σεισμό της Gorkha 7.8W το 2015 (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.12 Κατολισθητικό φράγμα της περιοχής Pandise.

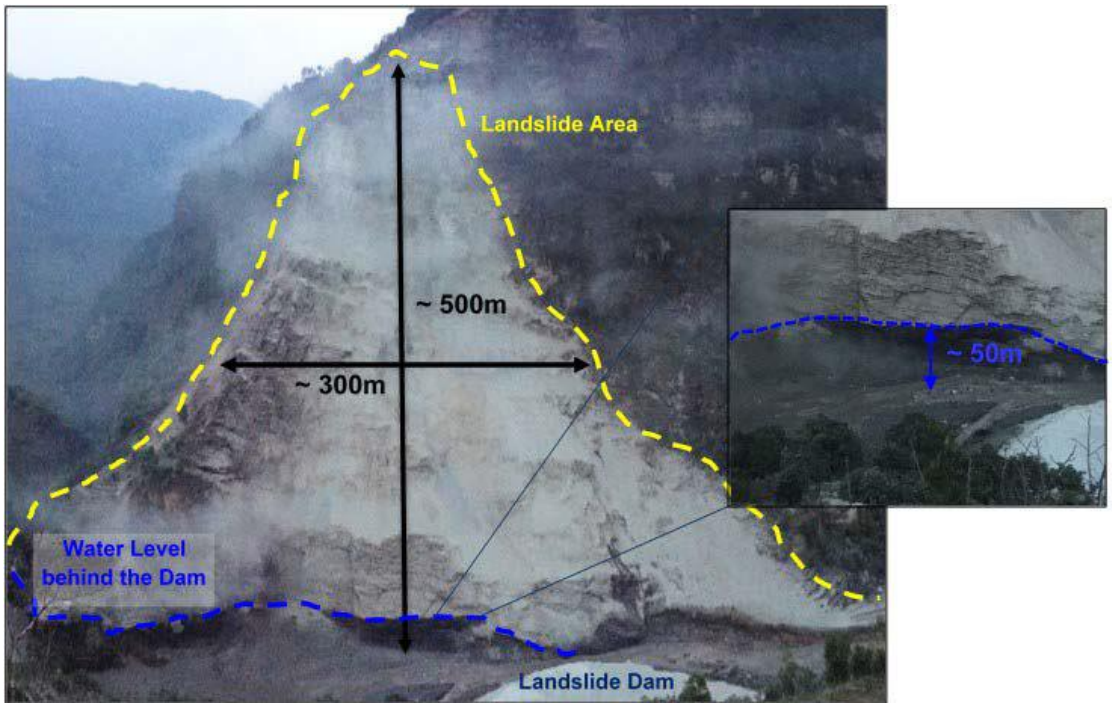
Ένα κατολισθητικό φράγμα παρατηρήθηκε στην περιοχή Pandise η οποία βρίσκεται στο κοινοτικό συμβούλιο του χωριού Sertung της περιφέρειας Dhading (Εικ. 142). Η κατολίσθηση αυτή συνέβη στον ποταμό AnkhuKhola, έναν παραπόταμο του ποταμού BudiGandaki. Η βαθμιαία κλίση του πρανούς του παραποτάμου ήταν περίπου 30-35° και μεγάλοι βράχοι κατρακύλησαν στον παραπόταμο AnkhuKhola φράζοντας το κανάλι του ποταμού για περίπου μια εβδομάδα (Εικ.142). Το κατολισθητικό φράγμα διαρρήχτηκε φυσικώς.

Εικόνα 142: Αριστερα: Ένα φράγμα που προήλθε από κατολισθήσεις στον παραπόταμο του AnkhuKhola αμέσως μετά το κυρίως σεισμικό γεγονός της Gorkha το 2015 με συντεταγμένες (28 ° 40.6'0 "N 83 ° 59.8'0"E). Δεξιά :Δεβριτική μάζα από την αριστερή όχθη του ποταμού που προκάλεσε την κατολίσθηση και την δημιουργία του κατολισθητικού φραγματος (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.13 Κατολίσθηση της περιοχής του ποταμού Kali Gandaki.

Μια σημαντική κατολίσθηση συνέβη στις 24 Μαΐου 2015 στον ποταμό KaliGandaki στην περιφέρεια Myagdi, η οποία βρίσκεται ΒΔ του Κατμανατού. Αυτή η κατολίσθηση είναι μια ξηρή, τύπου ροής κορημάτων η οποία προφανώς προήλθε από το κυρίως σεισμικό γεγονός της 25^{ης} Απριλίου και τους μετασεισμούς. Η κατολίσθηση έθαψε έναν οικισμό με 25 οικίες αλλά δεν προκάλεσε καμια ανθρώπινη απώλεια καθώς η περιοχή είχε ήδη εκκενωθεί πριν την κατολίσθηση. Το κατρακύλημα των βράχων την προηγούμενη της κατολίσθησης και οι παρατηρήσεις των επιφανειακών σπασιμάτων στην κορυφή του πρανούς μετά το σεισμικό γεγονός της 25^{ης} Απριλίου 2015 εντάσεως 7.8Mw και τους μετασεισμούς έδωσαν επαρκείς προειδοποιήσεις για την εκκένωση του χωριού κάτω από την επιφάνεια της κατολίσθησης. Η ογκώδης κατολίσηση έφραξε την κοίτη του ποταμού KaliGandaki σχηματίζοντας ένα τεχνητό φυσικά εδαφικό φράγμα. Η στάθμη του νερού ενέβηκε ταχύτατα πίσω από το φράγμα κατολίσθησης και σχημάτισε ένα λιμναίο περιβάλλον στην περιοχή άνω του φράγματος. Σύμφωνα με τοπικές αναφορές η λίμνη εκτεινόταν για περίπου 1 έως 3 χιλιόμετρα άνωτου φράγματος εντός 12 ωρών από τον σχματισμό του κατολισθητικού φράγματος.

Εικόνα 143: Η κατολίσθηση της KaliGandaki μπλοκάρει τον ποταμό σε μήκος περίπου 2 χλμ και τεχνητή λίμνη βάθους 150 μ. με συντεταγμενες 28 24 '8.48 "N 83 35' 47.5"E (NepalGEERreportversion1,2015).



Εικόνα144: Η κατολίσθηση της Kali Gandaki με συντεταγμένες 28 24 '8.48 "N 83 35' 47.5" E (NepalGEERreportversion1,2015).

Έγιναν προειδοποιητικές ανακοινώσεις από το τοπικό ραδιόφωνο και κυβερνητικούς αξιωματούχους στους κατοίκους άνω και κάτω του τεχνητού φράγματος να είναι σε ετοιμότητα και να κινηθούν σε υψηλότερα εδάφη. Η Αρχή Ηλεκτρισμού του Νεπάλ διέκοψε τις εργασίες της στον υδροηλεκτρικό σταθμό του KaliGandaki ισχύος 144MW ο οποίος βρίσκεται 45 χιλιμόετρα κάτω από την περιοχή της κατολίσθησης εξ αιτίας του πιθανού κινδύνου πλημμύρας από υπερχείλιση της κοίτης του ποταμού. Νερά άρχισαν να υπερχειλίζουν το φράγμα 16 ώρες μετά την κατολίσθηση και μετά την υπερχείλιση του φράγματος τα νερά διατήρησαν μια σταθερή ροή χωρίς να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές ή ανθρώπινες απώλειες στις πόλεις κάτω του φράγματος.

6.3.14 Ρευστοποίηση και κυκλικές εδαφικές αστοχίες.

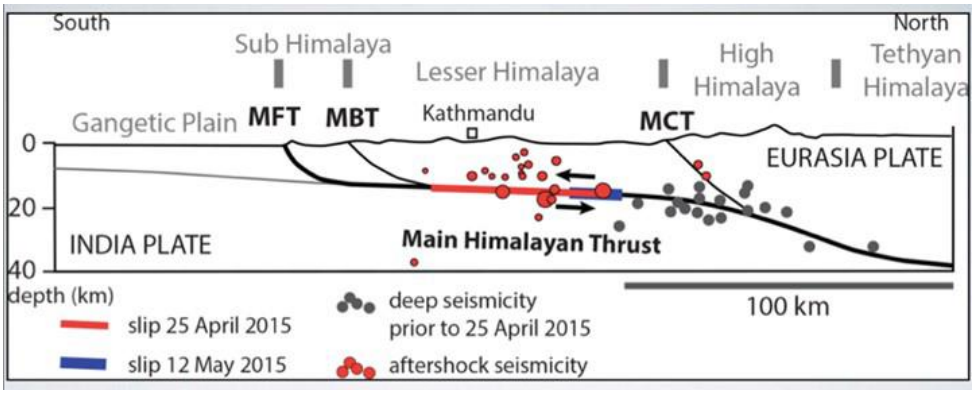
Οι εδαφικές αστοχίες εξ αιτίας των σεισμών του Νεπάλ κυριαρχήθηκαν από κατολισθήσεις, προερχόμενες από πολλές διαφορετικές μορφές κινήσεως μαζών εξ αιτίας των σεισμών. Εξ αιτίας της συνεχιζόμενης τεκτονικής ανύψωσης και της απόκρημνης φύσης των εδαφών οι κατολισθήσεις είναι αναμενόμενες. Υπάρχουν όμως μερικές κοιλάδες στο Νεπάλ οι οποίες γεωμορφολογικά τείνουν προς άλλες μορφές εδαφικής αστοχίας οι οποίες εμφανίζονται συχνά σε μαλακά ή χαλαρά εδαφικά στρώματα.. Η κοιλάδα του Κατμαντού περιέχει ποτάμια και λιμναία ιζήματα τα οποία όταν υποστούν δονήσεις μπορεί να αποσχηματισθούν εξ αιτίας είτε των κυκλικών αστοχιών είτε της ρευστοποίησης.

Τα σαθρά εδάφη τα οποία προκάλεσαν εδαφικές ζημιές κυμαίνονταν από λεπτόκοκκες άμμους, ιλυώδεις άμμους έως ιλυώδεις αργίλους. Σε κάποιες περιοχές διαπιστώθηκε ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης λειτούργησε ως κινητήριος μηχανισμός της αστοχίας. Όμως σε κάποιες άλλες περιοχές ο κινητήριος

μηχανισμός της αστοχίας δεν ήταν εμφανής ακόμα και μετά από εκσκαφή και δειγματοληψία, εξ αιτίας της σύνθετης διαστρωμάτωσης, του ποικίλου βάθους του υπογείου νερού (variablewatertabledepth), της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων (driving shear stresses) και των σύνθετων μοντέλων αποσταθεροποίησης του εδάφους.

6.3.15 Η τεταρτογενής γεωμορφική τοποθέτηση της κοιλάδας του Κατμαντού.

Η ευρύτερη περιφέρεια του Κατμαντού δομικά προσδιορίζεται από ρήγματα ώθησης στον βορά και στον νότο (Εικ. 145). Η Κύρια Ρηξιγενής Ζώνη Ώθησης (Main Central Thrust MCT) οριοθετεί το βόρειο τμήμα και η Κύρια Ρηξιγενής Ζώνη Ώθησης Περιθωρίου (MainBoundaryThrustMBT) οριοθετεί το νότιο τμήμα, και δημιουργούν μια τεκτονική (δομική) λεκάνη η οποία προσδιορίζει την κοιλάδα του Κατμαντού. Αυτή η κοιλάδα περιέχει ιζήματα μεγάλου βάθους, της τάξης των 500μ. σε βάθος και έχει υποστεί μια μεγάλη γεωλογική περίοδος όπου τα λιμναία περιβάλλοντα κυριαρχούσαν στα περιβάλλοντα απόθεσης. Οι λιμναίες αποθέσεις ποικίλουν στην παχύτητα και στην πλευρική εξάπλωση και αποτελούνται κυρίως από διασττρωματωμένους αργίλους και ιλύες με κάποια στρώματα από άμμους και χαλίκια (Piya 2004).



Εικόνα 145: Τεκτονικές δομές της κεντρικής περιοχής του Νεπάλ. Η κοιλάδα του Κατμαντού βρίσκεται ανάμεσα στο MCT και το MBT (NepalGEERreportversion1,2015).

Το λιμναίο περιβάλλον άλλαξε γύρω στα 10 έως 11 χιλ. χρόνια πριν (Sakai, 2001a) υποχωρώντας σε ένα ποτάμιο περιβάλλον το οποίο απόθεσε πρωτογενώς στρώματα άμμου και χαλικιών σε πολλά ποτάμια κανάλια και πλημμυρικές πεδιάδες οι οποίες αποστραγγίζουν την λεκάνη. Στην εικόνα 146 απεικονίζονται τα ποτάμια συστήματα της περιόδου του Ολόκαινου. Η αλλαγή από λιμναίο σε ποτάμιο περιβάλλον στο τέλος της περιόδου των παγετώνων ίσως οφείλεται σε ρηξιγενείς διεργασίες – ενεργότητα των ρηγμάτων (Sakai 2001b). Η αλλαγή από λιμναία σε ποτάμια περιβάλλοντα παρατηρείται και σε άλλες περιοχές του πλανήτη. Πιο γνωστή είναι η αποστράγγιση του παγετώνα της λίμνης Missula στο τέλος της περιόδου των παγετώνων εξ αιτίας μια διάρρηξης ή πολλών καταγεγραμμένων διαρρήξεων ενός φράγματος πάγου οι οποίες απελευθέρωσαν τα νερά της λίμνης με έναν ταχύτατο και καταστροφικό τρόπο στο υψίπεδο της Κολούμπια. Ομοίως στα ΒΔ των ΗΠΑ παρατηρούνται παρόμοια τεκτονικά και αποθετικά χαρακτηριστικά όπως του Νεπαλ.

Εικόνα 146: Η κοιλάδα του Κατμαντού και ο περιφερειακός χάρτης που δείχνει τα ποτάμια συστήματα κατά το Ολόκαινο (NepalGEERreportversion1,2015).

Η στάθμη του υπογείου νερού (watertable) στην κοιλάδα του Κατμαντού είναι γενικά αβαθής, κυμαινόμενη από 0,5 έως 9μ.στις περισσότερες τοποθεσίες. Ο DMG (1998) ανακάλυψε, βασιζόμενος σε 82 αντιπροσωπευτικά πηγάδια ότι το ΒΑ τμήμα της κοιλάδας είχε στάθμη του υπογείου νερού μεταξύ 5 και 9 μ. και στο νότιο τμήμα της κοιλάδας το βάθος του υπογείου νερού βρέθηκε να είναι περίπου 1μ.

6.3.16 Παρατηρήσεις εδαφικών αστοχιών.

Οι κίνδυνοι από τα φαινόμενα της ρευστοποίησης, σύμφωνα με την μελέτη του Piya (2004) προβλέπουν ρευστοποιήσεις σε πολλές περιοχές της κοιλάδας του Κατμαντού. Τα γενικά χαρακτηριστικά των εδαφών τα

οποία είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση είναι εμφανή: μικρής ηλικίας αμμώδη ιζήματα σε μικρά βάθη τα οποία συμπίπτουν με αβαθή επίπεδα υπογείων υδάτων. Όμως υπάρχει ένας αριθμός παραγόντων οι οποίοι μπορούν να οδήγησαν σε περιορισμό της έκτασης της καταστροφής εξ αιτίας της ρεηστοποίησης σε αυτό το γεγονός.

Εξ αιτίας των μουσώνων υπάρχει πιθανώς μια ισχυρή εποχική εξάρτιση από το βάθος των υπογείων νερών, το οποίο μπορεί ουσιαστικά να επηρεάσει την επιδεκτικότητα των εδαφών, μειώνοντάς την κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Επί πλέον, οι εδαφικές δονήσεις φαίνεται να έχουν μικρότερη ενέργεια υψηλής συχνότητας από την αναμενόμενη για ένα σεισμικό γεγονός του ιδίου μεγέθους αποδίδοντας μα σχετικά χαμηλή κορύφωση εδαφικής επιτάχυνσης της τάξεως περίπου των 16g στον σταθμό καταγραφής υψηλών κινήσεων KATNP στο κεντρικό Κατμαντού. Οι λόγοι για το ασυνήθιστο περιεχόμενο συχνοτήτων εδαφικών κινήσεων είναι δύσκολο να διακριθούν εξ αιτίας του περιορισμένου αριθμού των καταγραφών – που είναι διαθέσιμες – κοντά στη ρηξιγενή επιφάνεια (και εντός και εκτός της κοιλάδας)

Ασχέτως της αιτίας, η μονή καταγραφή η οποία είναι προς το παρόν διαθέσιμη εντός της κοιλάδας του Κατμαντού (σταθμός KATNP) καταδεικνύει ότι οι εδαφικές κινήσεις οι οποίες προκλήθηκαν από το κυρίως σεισμικό γεγονός της 25^{ης} :Απριλίου δεν ήταν αρκετά δυντές ώστε να εξασθενήσουν πλήρως τα υλικά τα οποία είναι ευαίσθητα προς το φαινόμενο της ρευστοποίησης και στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρήθηκε περιμετρική ρευστοποίηση. Αυτό το φαινόμενο κάνει τις παρατηρήσεις να έχουν αξία εν δυνάμει για το γεγονός ότι η φόρτωση έχει ποσοτικοποιηθεί ανεπαρκώς. Κυκλική αστοχία των ιλυούχων στρωμάτων αργίλου στην κοιλάδα δεν αποτελούν κίνδυνο ο οποίος έχει αναλυθεί στο παρελθόν και φαίνεται να είναι μια ενδιαφέρουσα επίπτωση εδαφικών ισχυρών δονήσεων

6.3.17 Η Περιοχή Ράμκοτ.

Η πόλη Ράμκοτ βρίσκεται στο δυτικό άκρο της κοιλάδας του Κατμαντού. Ρευστοποίηση πολύ λεπτόκοκκου υλικού παρατηρήθηκε σε απόκρημνες αναβαθμίδες. (Εικ. 147 και 148). Δεν παρατηρήθηκε πλευρικός αποσχηματισμός των αναβαθμίδων. Ρευστοποιημένο υλικό (ejecta) το οποίο παρατηρήθηκε στις αναβαθμίδες και στα κατώτερα πεδία περιορίστηκε σε μια στενή αύλακα στην πλαγιά των αναβαθμίδων του λόφου (Εικ. 147). Παρόμοια χαρακτηριστικά εντοπίστηκαν χαμηλά δίπλα στο ρυάκι (Εικ. 148) αλλά οι μεγαλύτερες αμμώδεις ρευστοποιήσεις παρατηρήθηκαν σε απότομα πρανή (20°). Οι ντόπιοι ανέφεραν ότι τα φαινόμενα ρευστοποίησης συνεχίστηκαν για δύο και πλέον ώρες μετά τον σεισμό εντάσεως M7.8. Ζημιές στις θεμελιώσεις δύο μικρών κακώς κατασκευασμένων οικιών συσχετίσθηκαν με αυτή τη στενή αύλακα της ρευστοποίησης. Άλλες υψηλότερες πιο σύγχρονες κατασκευές δεν αντιμετώπισαν κάποιο πρόβλημα. Η αυξημένη κατευθυντήρια τάση εξ αιτίας των υψηλότερων κτιρίων μπορεί να παρεμπόδισε τη ρευστοποίηση συγκρατώντας το έδαφος. Παρατηρήθηκαν αστοχίες πρανών στους περιβάλλοντες λόφους αλλά δεν συσχετίστηκαν με την ρευστοποίηση. Οι επιπτώσεις στις κατασκευές στην πόλη Ράμκοτ ήταν εκτεταμένες αλλά δεν συσχετίστηκαν με την ρευστοποίηση.

Εικόνα 147: Εκτόξευση υγροποίησης σε απότομες κεκλιμένες πλαγιές με συντεταγμένες (27.711025ο N 085.262290ο E). Δεν παρατηρήθηκε καμία πλευρική κίνηση. Δεν υπάρχει ζημιά στο κτίριο στο παρασκήνιο. (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 148: Εκτόξευση υγροποίησης στο γεωργικό τομέα. Το υλικό ήταν πολύ λεπτό, κυρίως ιλύς με κάποια μέρη ψαμμίτη. Δεν υπάρχει ζημιά στο κτίριο στο παρασκήνιο (27.711025ΟΝ, 085.262290ΟΕ).(NepalGEERreportversion1,2015).

Ρευστοποιήσεις άμμου παρατηρήθηκαν σε μια κενή επιφάνεια γης (χωρίς κατασκευές) (Εικ. 148). Αυτή η επιφάνεια βρίσκεται περίπου 90μ. ΒΑ ενός μαιανδρικού ποταμού και εντοπίζεται υψηλότερα από το πλημμυρικό πεδίο – υδροκρίτη του ποταμού (floodplain). Σύμφωνα με τους ντόπιους το έδαφος πλημμύρισε κατά τη διάρκεια του σεισμού και παρέμεινε πλημμυρισμένο για δύο ημέρες. Οι ντόπιοι επίσης υποστήριξαν και άλλα σημεία στην ευρύτερη περιοχή ρευστοποιήθηκαν αλλά δεν κατέστη δυνατό να εντοπισθούν επιφανειακές ρευστοποιήσεις σε άλλα σημεία.

Έπειτα από μακροσκοπικές παρατηρήσεις διαπιστώθηκε ότι το εδαφικό προφίλ γενικά περιέχει διαστρωματωμένα στρώματα από χαλαρή λεπτόκοκκη άμμο και ιλύ έως 2.5μ.βάθους. Το υπόγειο νερό εντοπίστηκε στα 3μ.κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

6.3.18 Η γέφυρα Singa Durbar.

Η γέφυρα, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, SingaDurbar στο κέντρο του Κατμαντού δεν υπέστη ζημιές μετά τον σεισμό εντάσεως M7.8 και του πρώτου μετασεισμού αλλά υπέστη ζημιές στο σεισμικό γεγονός εντάσεως M7.3. Στο σημείο αυτό φαίνεται ότι υπήρξε μια ελαφρά εδαφική αστοχία η οποία ευθυγραμμίζεται με το πλάτος των αποθέσεων στο μικρό κανάλι κάτω από την γέφυρα. Παρατηρήθηκαν πλευρικά σπασίματα σε τμήματα του υπερυψωμένου τσιμεντένιου πεζοδρομίου το οποίο εκτείνεται σε αμφότερες τις πλευρές της γέφυρας παράλληλα προς το μικρό κανάλι. Τα τμήματα αυτά διαχωρίστηκαν εξ αιτίας των πλευρικών σπασιμάτων κατά μήκος των περίπου 100μ. της γέφυρας. Σύμφωνα με μαρτυρίες ντόπιων κατασκευαστών οι οποίοι κατασκευάζουν κτίρια με βαθιές θεμελιώσεις στην πληγείσα περιοχή διαπιστώθηκε ότι οι υπόγειες συνθήκες είναι συνθήκες απόθεσης μαύρου λεπτόκοκκου ιλυώδους αργίλου. Ίδιου τύπου λιμναίες αποθέσεις παρατηρούνται σε όλη την κοιλάδα του Κατμαντού. Προσδοκάται ότι υπάρχουν υποκείμενα αμμώδη εδάφη. Το μοντέλο των εδαφικών αστοχιών της ρευστοποίησης ή των κυκλικών αστοχιών σε αυτήν την τοποθεσία δεν έχει ακόμα προσδιορισθεί (Εικόνα 149).

Εικόνα 149: Αριστερά: Ρωγματώσεις στο τμήμα σκυροδέματος της γέφυρας με συντεταγμένες (27.698793 ° 85.320060 °). Οι ρωγμές στις δύο πλευρές της γέφυρας ευθυγραμμίζονται με τον κολπίσκο κάτω. Χωρίς ρωγμές στην περιοχή άσφαλτου πάνω από το τμήμα πλήρωσης, συμπεριφέρθηκε με όλκιμο τρόπο. Δεξιά: Ο ποταμός κάτω από τη γέφυρα με συντεταγμένες (27.698793 ° 85.320060 °). Η πλημμυρική πεδιάδα αυτού του ποταμού ορίζει την έκταση της ρωγμής, με τις ρωγμές παράλληλες προς την ευθυγράμμιση του ποταμού.(NepalGEERreportversion1,2015).

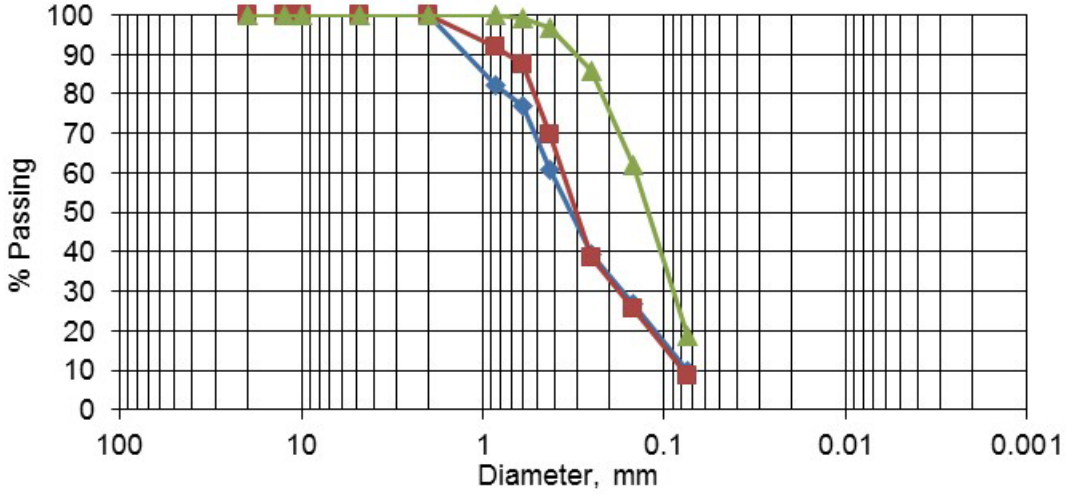
6.3.19 Η τοποθεσία Manamaiju.

Φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν σε κενές επιφάνειες γης καθώς και κάτω από θεμελιώσεις κτιρίων στην τοποθεσία Manamaiju. (Εικ.150). Πρόκειται για ένα εγαταλελειμένο ποτάμιο κανάλι. Υπήρξαν

αμμώδεις ρευστοποιήσεις / αναμοχλεύσεις (boils) λεπτόκοκκης άμμου (εργαστηριακά τεστ Εικ.151), μερικές μικρού μεγέθους κλίσεις κτιρίων και μερικές πιθανές πλευρικές εξαπλώσεις σε επιφάνειες τοίχου. Σύμφωνα με μαρτυρίες αμμώδεις αναμοχλεύσεις εκτόξευσαν υλικό έως και 1μ. πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτήν την τοποθεσία η ρευστοποίηση ενεργοποιήθηκε αλλά δεν υπήρξε επαρκής δόνηση για να προκαλέσει μεγάλες εκτοπίσεις. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως τοποθεσία «περιθωριακής» ρευστοποίησης σύμφωνα με την ορολογία των Seedetal. (1985) και αν οι εδαφικές δονήσεις μπορούν να προσδιοριστούν κατά τον δέοντα τρόπο σε αυτήν την τοποθεσία θα έδιναν ένα ακριβές σημείο πολύ κοντά στο σημείο ενεργοποίησης του φαινομένου. Ένα ελάχιστο δείγμα του αναδυόμενου εκτοξευμένου (ejecta) υλικού συλλέχτηκε και πέρασε από δοκιμές. στο πανεπιστήμιο Tribhuvan, FC, διαβάθμισης και PI.

Εικόνα 150: Μεγάλη περιοχή ψαμμίτη που βράζει σε ένα πεδίο στο Manamaiju. Η περιοχή εκτόξευσης του υλικού ήταν μιας λεπτόκοκκης ιλυώδους ψαμμιτικής σύστασης με συντεταγμένες (27,745523 ° N, 85,302223 ° E). Δεξία : Η κλίση του αριστερού κτιρίου μακριά από το δεξί κτίριο, μετρούμενη σε περίπου 2 μοίρες με συντεταγμένες (27.745523 ° N, 85.302223 ° E). (NepalGEERreportversion1,2015).

Τα πρόσφατα περιστατικά από αυτήν την τοποθεσία παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Βάσει μαρτυριών, το αρχικά αμμώδες επιφανειακό έδαφος αφαιρέθηκε και χρησιμοποιήθηκε για οικοδομικές εργασίες. Κατόπιν η περιοχή από την οποία αφαιρέθηκε το υλικό μπαζώθηκε με φερτά υλικά. Το αρχικό επίπεδο της φυσικής εδαφικής επιφάνειας είναι ορατό στα άκρα της κοιλάδας και έχει ύψους περίπου 1μ. από το τωρινό επίπεδο του εδάφους. Χειροκίνητες δειγματοληψίες (Handaugering) καταδεικνύουν ότι το υπάρχον επιφανειακό στρώμα (πιθανώς μπάζωμα) έχει περίπου ύψος 1μ. και αποτελείται από μείγμα ιλυώδους αργίλου και αργιλώδους ιλύος με κατά τόπους κόκκους μεγαλύτερου διαμετρήματος. Το υπόγειο νερό εντοπίστηκε σε βάθη 0,8μ.και σε βάθη 1.1μ. παρατηρήθηκε ένα λεπτόκοκκο στρώμα άμμου με μικρές χαλικοειδείς ποσότητες. Τα μεγέθη των κόκκων γενικά αυξάνονται σύμφωνα με το βάθος όπου περίπου στα 1.3μ. παρατηρούνται κόκκοι έως 5χιλ. διαμέτρου.



Εικόνα 151: Κατανομή μεγέθους κόκκων για δείγματα εδάφους από το Manmaiju. Βάθος 1m, FC = 9 έως 10%, Κλάσμα Άργιλου (<0.005) = 0%, => Καλή άμμος με ιλύ. (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.20 Η περιοχή Guheshwori.

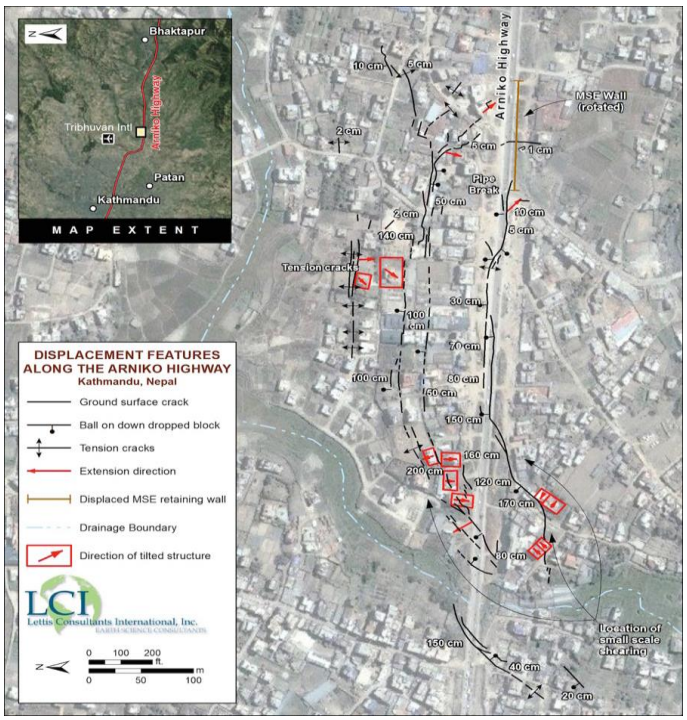
Βάσει τοπικών μαρτυριών, στην περιοχή Guheshwori η άμμος και το νερό εκτοξεύονταν από το έδαφος και η περιοχή πλημμύρισε κατά τη διάρκεια και μετά τις δονήσεις του κυρίως σεισμού (συντεταγμένες 27.109253^{o} B 85.357553^{o}A). Η περιοχή αυτή είναι παρόμοια γεωλογικά με την περιοχή του Manamaiju εκ του γεγονότος ότι στην πλημμυρική επιφάνεια το ανώτερο στρώμα άμμου είχε αφαιρεθεί για οικοδομικές χρήσει. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές ζημιές στις κατασκευές από το τοπικό φαινόμενο της ρευστοποίησης (υπήρχαν μόνο λίγα κτίρια στην περιοχή αυτή, Εικ.152).

Το νερό δημιουργούσε πίδακα ύψους περίπου 1μ. από την επιφάνεια του εδάφους για ένα έως δύο λεπτά, και η περιοχή πλημμύρισα για περίπου δύο ώρες μετά τον σεισμό της 25^{ης} Απριλίου.

Εικόνα 152: Θέση της υγροποίησης στο Guheshwori με συνταγμένες (27.709253 N, 85.357553 E). (NepalGEERreportversion1,2015)

6.3.21 Η περιοχή Lokanthali.

Η περιοχή Lokanthali καθώς και οι γύρω περιοχές της λεκάνης του Κατμαντού αποτελούν μια εξαιρετική περίπτωση εδαφικών αστοχιών από τους σεισμούς του Νεπάλ (27.674816^{o}B, 85.362646^{o}A). Εκτενή πλευρικά σπασίματα βάθους 2 μ. και με υψόμετρο έως 1,2 μ. από πλευρικά κάθετα πρανή έχουν προκύψει σε μια μεγάλη περιοχή πάνω ή κοντά σε κεκλιμένο έδαφος. Η έρευνα περιλαμβάνει λεπτομερή χαρτογράφηση των σπασιμάτων, διακεκομμένα δείγματα από υλικό στη βάση των σπασιμάτων, χειροκίνητες ορύξεις και δειγμαγματοληψίες σε βάθος, χειροκίνητες ελικοειδείς γεωτρήσεις σε βάθος και ορύξεις με JCB (μηχάνημα εκσκαφής) για να χαρτογραφηθεί η υπό επιφανειακή δομή.



Εικόνα 153: Οι ρωγμές χαρτογραφήθηκαν στην τοποθεσία Lokanthali με συντεταγμένες (27.674816 ° 85.362646 ° και γύρω περιοχή). Κάθετες μετατοπίσεις της τάξης του 1m, οριζόντιες μετατοπίσεις της τάξης των 0,5m, με ρηξιγενή επιφάνεια περίπου 2 m βάθος. (NepalGEERreportversion1,2015).

Σε μια τοποθεσία, ένα δείγμα ιλυώδους αργίλου είχε χαμηλό PI . Το δείγμα αυτό ελήφθη με γεώτρηση «τύπου καρότου» στη βάση των σπασιμάτων. Σε μια κοντινή τοποθεσία σκάφτηκε χειροκίνητα ένα όρυγμα βάθους 2 μ., εντός ενός σπασίματος, προκειμένου να ληφθεί δείγμα του ίδιου εδάφους. Τα κτίρια δίπλα στο όρυγμα είχαν υποστεί κάθετες εκτοπίσεις 0,75μ. και τα δείγματα της ιλυώδους αργίλου αποκτήθηκαν από την εκσκαφή των θεμελίων τους. Αποσχηματισμοί αναφέρθηκαν από ντόπιους ως ταυτόχρονοι με το κύριο σεισμικό γεγονός εντάσεως 7.8 Mw με μικρές εκτοπίσεις εδάφους και έπειτα ο μεγάλος όγκος των εκτοπίσεων προήλθε εξ αιτίας του πρώτου μετασεισμού εντάσεως 6.7 Mw.

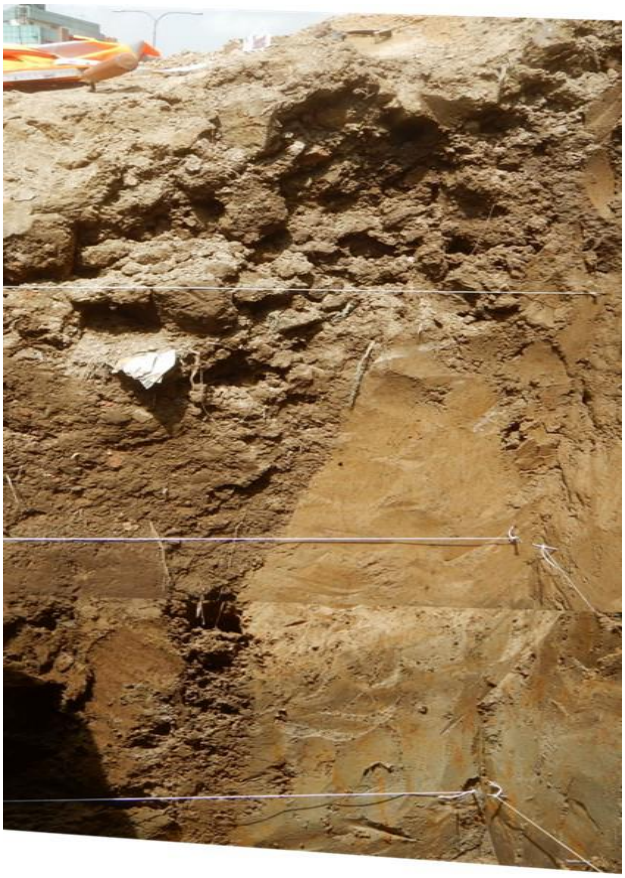
Εικόνα 154: Ρωγμές κοντά στην κορυφή της ανόδου στο Lokanthali με συντεταγμένες (27.674816 ° 85.362646 ° και γύρω περιοχή). Βάθος ρωγμών βάθους 2 έως 3 m. Το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης αναφέρθηκε ότι εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου μετασεισμού, με μόνο μια μικρή ποσότητα παραμόρφωσης από το κύριο σεισμικό γεγονός. (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 155: Το κατώτερο επίπεδο της ρωγμής σε βάθος 2 μέτρων όπου έγινε η δειγματοληψία του "μαύρου βαμβακιού" με συντεταγμένες (27,674816 ° N, 85,362646 ° E). (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 156:Χειροκίνητη τάφρο σε βάθος 2 μέτρων για την απόκτηση χονδρόκοκκου δείγματος ιλυούχου πηλού "μαύρου βαμβακιού". Το βάθος συμπίπτει με την επιφάνεια ολίσθησης των κοντινών σπιτιών που γνώρισαν κατακόρυφη παραμόρφωση έως και 0,75 μ. Εδώ σκάβεται η τάφρος στο κρεμαστό τοίχωμα της ρωγμής με συντεταγμένες (27.674316 ° B, 85.362654 ° A). (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 157: Σπίτι στο σημείο που περνάει η ρωγμή από ένα κρεμαστό τοίχο. Το έδαφος απομακρύνθηκε από τη δομή που πέφτει προς τα πάνω 3/4 m και κινείται πλευρικά 1/2 m. Πριν από τον κυρίως σεισμό, τα θεμέλια που αποτελούνταν από δομή τούβλων ήταν εντελώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. (NepalGEERreportversion1,2015).

Αρχικές έρευνες έδειξαν ότι τα επίπεδα των αστοχιών εισήλθαν σε ένα στρώμα ιλυώδους αργίλου και αργιλώδους ιλύος με χαμηλό PI . Κοντά στην τοποθεσία της μέγιστης ολίσθησης με συντεταγμένες 27.67439^{o}B, 85.36267^{o}A διανοίχτηκε ένα όρυγμα βάθους 2μ.. Χρησιμοποιήθηκε ένα ελικοειδές διατμητικό μέσο για να μετρηθεί η κορύφωση της καθαρής ισχύος των 150 kPa και της εναπομείνασας καθαρής ισχύος 112 kPa σε 1 μ. κάτω από τη βάση του ορύγματος (ευαισθησία περίπου 1.3). Όμως θα πρέπει να γίνει προσεκτική χρήση αυτών των τιμών εφόσον δεν επιβεβαιώθηκε ότι τα στρώματα της ιλυώδους αργίλου σε αυτό το βάθος ήταν πλήρως εμποτισμένα. Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων καθώς και του μήκους των σπασιμάτων και των τοπικών περιγραφών ότι οι αστοχίες εξαπλώθηκαν με αργό ρυθμό, ο μηχανισμός αστοχίας αρχικά αποδόθηκε σε κυκλική αστοχία των στρωμάτων της αργίλου.



Εικόνα 158: Διατομή του επιπέδου αστοχίας στον τοίχο της τάφρου στο EMT04. Η οριζόντια συμβολοσειρά χωρίζεται κάθετα κατά 0,5 m με συντεταγμένες (27,67439 N, 85,36267 E). (NepalGEERreportversion1,2015).

Στη συνέχεια έγιναν εργασίες σε ένα οικόπεδο χωρίς κατασκευές (συντεταγμένες 26.675524^{o}B, 85.363983^{o}A) και ανοίχτηκε μεγάλο όρυγμα βάθους περίπου 2.25μ. Στο σημείο αυτό, το έδαφος έχει κλίση περίπου 4 μοίρες προς το ποτάμι. Η εκσκαφή αποκάλυψε περισσότερες αστοχίες των πεδίων από ό,τι ήταν ορατό στην επιφάνεια ή από προηγούμενες εκσκαφικές προσπάθειες. Ένα παραπλήσιο πηγάδι έδειξε ότι το υπόγειο νερό βρίσκεται σε βάθος περίπου 4,5μ. Το όρυγμα δεν έφτασε τη στάθμη του νερού αλλά αποκάλυψε ρευστοποιητικές δομές διαφυγής σκεπασμένες με στρώματα από άργιλο. Έγινε διάνοιξη από τη βάση του

ορύγματος και έφτασε μέχρι το στρώμα της υγρής άμμου. Η στάθμη του υπογείου νερού βρισκόταν 1,8 μ. χαμηλότερα από τον πυθμένα του ορύγματος (ή σε περίπου 4μ. βάθος) το οποίο συμπίπτει με την παρατήρηση στο πηγάδι. Οι επιφάνειες ολίσθησης στο υψηλότερο στρώμα αργίλου/ιλύος σταματούσαν στο στρώμα άμμου το οποίο αναδύθηκε στη βάση του αργιλικού στρώματος. Τα σπασίματα συνεχίζουν διαπερνώντας τα στρώματα άμμου αλλά μετακινούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα προεξέχοντα στρώματα σχηματίζουν μια αύλακα μεταξύ παράλληλων ρηγμάτων και είναι εμφανή σε βάθη μεγαλύτερα των 2μ. Ενδιαφέρον προκαλούν οι επιφάνειες ολίσθησης μεταξύ των πρανών της αύλακος οι οποίες έχουν δημιουργήσει μεγάλα κενά στα οποία δεν έχει προξενηθεί κοιλότητα κατά τη διάρκεια της όρυξης. Αυτά τα χαρακτηριστικά ήταν εμφανή μόνο στη βάση του ορύγματος και έτσι είναι δύσκολο να διευκρινιστεί η πλήρης έκταση των κενών.

Εικόνα 159: Διατομή κάθετη προς την κεκλιμένη επιφάνεια της ρωγμής στο EMT09. Η οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση της γραμμής της διατομής είναι 0,5 m και 1,0 m αντίστοιχα με συντεταγμένες (27,675524 N, 85,363083 E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Μεγάλες ρωγμές και εδαφικά σπασίματα εκτείνονται σε μια μεγάλη απόσταση επάνω σε μια ρηχή γραμμή. Δείγματα του πυθμένα των σχισμάτων συλλέχτηκαν από το τεχνητό όρυγμα, από τα εκσκαμένα θεμέλια με δειγματολήπτη καρότου (bamboosampler).

Τα χειροκίνητα δείγματα του ορύγματος μορφής «μαύρου βάμβακος» στρώματος αργίλου CL ήταν ενιαία και αδιατάρακτα. Τα δείγματα τύπου καρότου ήταν υψηλά διαταραγμένα εξ αιτίας του πρόχειρου τρόπου δειγματοληψίας. Αν τα δείγματα αυτά θεωρηθούν ως παχύρευστος σχηματισμός (remolded) από τα καθαρά απευθείας τεστς τότε αυτός ο σχηματισμός αργίλου CL έχει κορύφωση γωνιάς παραμένουσας τριβής 1.9, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ευαισθησίας (St) ακόμα και όταν αυτά τα δείγματα δεν είναι χαρακτηριστικού υγρού τύπου χρησιμοποιούμενα για τον υπολογισμό της ευαισθησίας. Ο δείκτης υγρασίας (LI) κυμαίνεται σε εύρος περίπου από 1.0 έως 2.3.

St ~ 1.9

LI ~ 1.0 έως 2.3

Αυτές οι περιορισμένες εργαστηριακές δοκιμές του αργιλικού στρώματος μορφής «μαύρου βάμβακος» καταδεικνύουν μέτρια ευαισθησία και δείκτη υγρασίας υψηλότερο του ενός βαθμού (Holtz, KovacsandSheahan, 2011). Αυτό σημαίνει ότι άπαξ και σπάσει η δομή το χώμα μπορεί να κινητοποιηθεί σε χαμηλότερη ισχύ και να έχει βιαιότερη αντίδραση καταλήγοντας σε αποσχηματισμούς. Με την προσθήκη των κατευθυντήριων καθαρών τάσεων (drivingshearstreses) από το ολισθαίνον πρανές και από τις κτιριακές τάσεις, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυκλικής αστοχίας (IdrissandBoulager, 2004) ως πιθανό μοντέλο αστοχίας για κάποιες από τις τοποθεσίες στην περιοχή Lokanthali. Η περίπτωση του Lokanthali έχει μεγάλο ενδιαφέρον εξ αιτίας των στρωμάτων ιλυώδους αργίλου μορφής «μαύρου βάμβακος). Σημειώνεται ότι το PL=7 έως 9 και το wc/LL>1 ώστε να υπάρχει κυκλική κινητικότητα σύμφωνα με τους Bray και Sancio (2006) Είτε αναπτύχθηκε από πορώδη πίεση και υπέστη κυκλική κινητικότητα είτε υπήρξε δομική κατάρρευση ενός ασταθούς / ευαίσθητου στρώματος αργίλου το οποίο οδήγησε σε κυκλική αστοχία, είχαμε τη δημιουργία σημαντικών εδαφικών σπασιμάτων.

6.3.22 Η περιοχή Syuchatar.

Οι ρωγμές στην περιοχή Syuchatar (συντεταγμένες 27.69723°B, 85.27408°A) είναι σχεδόν όμοιες με αυτές της περιοχής Lokanthali. Οι ρωγμές αυτές έχουν μεγάλο μήκος (μεγαλύτερο του 1 χιλιομέτρου) αν και το προεξέχον πρανές (offset) είναι σχετικά μικρό σε σύγκριση με αυτό της περιοχής Lokanthali. Διανοιχτηκαν οπές σε βάθος περίπου 3μ. σε μικρό αριθμό σημείων. Στις περισσότερες των περιπτώσεων παρατηρούνται στρώματα ιλυώδους αργίλου / αργιλώδους ιλύος με κηλίδες οξείδωσης χρώματος πορτοκαλί. Σε μεγαλύτερα βάθη παρατηρήθηκαν μικρές φακοειδείς στρώσεις / φακοί λεπτής άμμου. Σε μια περιοχή με συντεταγμένες 27.69794°B, 85.27374°A βρέθηκαν οι φακοειδείς στρώσεις / φακοί της λεπτής άμμου κοντά στην επιφάνεια και δεν υπήρχε η δυνατότητα δειγματοληψίας (τα δείγματα της άμμου προέρχονται από βάθη 0,5 έως 1,1μ.).

Στο σημείο αυτή οι στρώσεις άμμου είναι υγρές, αν και σε άλλες τοποθεσίες το υπόγειο νερό βρισκόταν σε βάθος μεγαλύτερο των 2-3μ. Η ποικιλότητα του εδάφους και της στάθμης του υπογείου νερού είναι δύσκολο να συμβαδίσουν με το μήκος και την απλότητα της επιφανειακής έκφρασης των ρωγμών. Είναι πιθανό το σπάσιμο να προκύπτει από δομή βαθύτερη από το σημείο στο οποίο είναι δυνατό να φτάσει η έρευνα.

Το χειροκίνητο γεωτρητικό εργαλείο έδωσε γενικότερα μικρότερες τιμές ισχύος στο στρώμα αργίλου από ότι σε αυτό στην περιοχή Lokanthali.

6.3.23 Περιοχή Bungamati.

Η ρευστοποίηση της άμμου (αναβρασμός) συνέβη στο πλημμυρικό πεδίο σε απόσταση περίπου 200μ. από τον ποταμό Bagmati (Εικ. 160). Το υπόγειο νερό μετρήθηκε σε βάθος περίπου 1.3μ. Με χειροκίνητη διάτρηση αποτυπώθηκε η στρωματογραφία κατά μήκος εγκάρσιας τομής 23μ. Η στρωματογραφία ήταν σχετικά ομοιόμορφη: 0,5μ λεπτοειδούς εδαφικού καλύμματος ιλυώδους αργίλου καφέ χρώματος ακολουθούμενη από στρώμα απόθεσης αργίλου μορφής «μαύρου βάμβακος» έως 1,5μ., ακολουθούμενο από λεπτόκοκκη άμμο η οποία μεταβάλλονταν σε μεσόκοκκη με το βάθος. Είναι πιθανό, αυτό το στρώμα υγρής

άμμου να υγροποιήθηκε αλλά προφανέστατα δεν κατέστη δυνατό ως τώρα τι ισχύει σε μεγαλύτερα βάθη. Με βάση τοπικές μαρτυρίες το υπόγειο νερό εκτοξεύονταν από την επιφάνεια του εδάφους σε ύψος περίπου 1μ. και για 30 λεπτά μετά την παύση των ισχυρών δονήσεων, και αυτό το πλημμυρικό φαινόμενο διήρκεσε 2-3 ημέρες. Επί πλέον οι ντόπιοι ανέφεραν ότι κοντινά αγροκτήματα κατά μήκος του ποταμού Bagmati είχαν επιφανειακά ίχνη ρευστοποιήσεων μετά από τον σεισμό της 25^{ης} Απριλίου.

Εικόνα 160: Αναβρασμός του ψαμμίτη στο Bungamati με συντεταγμένες 27.62863 N, 85.29665 E (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.24 Η περιοχή ChanguNarayan.

Αυτή είναι μια ακόμα τοποθεσία με την εμφάνιση φαινομένου ρευστοποίησης όπως καταδεικνύεται από τους αναβρασμούς των αμμωδών στρωμάτων. Η αυτή η τοποθεσία βρίσκεται σε απόσταση περίπου 300μ.από τον ποταμό στην πλημμυρική επιφάνεια / υδροκρίτη floodplain (Εικ. 161) Όπως και με την περιοχή Bungamati, έγινε ένας αριθμός χειροκίνητων διατρητικών δειγματοληψιών σε διάφορα σημεία της περιοχής. Το εδαφικό προφίλ είναι σχετικά ομοιόμορφης σύστασης από λεπτοειδές εδαφικό κάλυμμα (topsoil) ιλυώδους

αργίλου το οποίο μετασχηματίζεται σε στρώμα γκρίζας ιλύος με κηλίδες οξείδωσης χρώματος πορτοκαλί σε βάθος περίπου 0.9μ. και έπειτα μετασχηματίζεται σε λεπτόκοκκη άμμο σε βάθος 1.1 έως 1.2μ. Καθώς τα στρώματα αργίλου βαθμιαία γίνονται υγρότερα, οι γεωτρήσεις δεν προσέγγισαν το επίπεδο του υπογείου νερού σε αυτή την τοποθεσία. Δοθείσης της τοποθεσίας στην πλημμυρική επιφάνεια / υδροκρίτη ./ floodplain, της εγγύτητας στο ποτάμι, και της οξείδωσης τμημάτων των στρωμάτων αργίλου εκτιμάται ότι η στάθμη του υπογείου νερού είναι πολύ ρηχή και επιδεικνύει μεγάλες εποχικές διακυμάνσεις και συχνά είναι πολύ ρηχότερη.

Εικόνα 161: Αναβρασμός ψαμμίτη στο Changu Narayan με συντεταγμένες (27.70943 B, 85.41397 E). (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.25 Η περιοχή Mulpani.

Ρευστοποιήσεις στην τοποθεσία κοντά στην περιοχή Mulpani εντοπίζονται στην ίδια πλημμυρική επιφάνεια του υδροκρίτη με αυτήν της περιοχής CanguNarayan, αλλά περίπου 1,5χιλιόμ. ΝΑ (Εικ. 162). Με βάση τοπικές μαρτυρίες ολόκληρη η περιοχή γύρω από τον ποταμό είχε ρευστοποιηθεί και το υπόγειο νερό είχε δημιουργήσει πίδακες παντού. Πολλές τοπικές καλλιέργειες με βολβούς όπως πατάτες και καρότα είχαν βγει στην επιφάνεια του εδάφους εξ αιτίας των σεισμικών δονήσεων.

Εικόνα 162: Οπωροκηπευτικά φυτά που αναδύθηκαν από το έδαφος λόγω υγροποίησης στο Mulpani, με συντεταγμένες 27.704575 N, 85.399617 E. (NepalGEERreportversion1,2015).

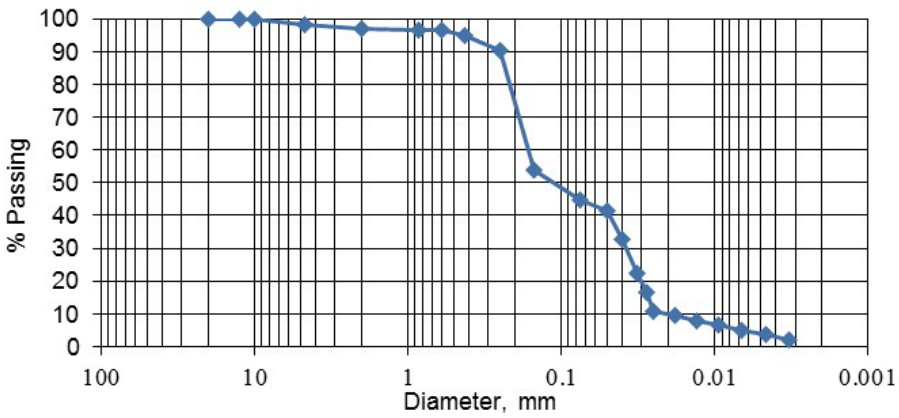
6.3.26 Περιοχή Gwarko / Imado.

Παρατηρήθηκαν αμμώδεις αναβρασμοί σε εδάφη με καλλιέργειες σιτηρών κοντά στην περιοχή Gwarko / Imado με συντεταγμένες 27.666782^{o}B, 85.338346^{o}A. Αν και υπήρχε εμφανής εδαφική ρευστοποίηση δεν υπήρξε καμία συσχετιζόμενη με αυτήν δομική ζημιά στις κατασκευές

6.3.27 Περιοχή Hattiban.

Πολυάριθμα φαινόμενα αναβρασμού των στρωμάτων της άμμου παρατηρήθηκαν στην Περιοχή Hattiban. Αντίθετα με άλλες περιοχές στις οποίες παρατηρήθηκε ρευστοποίηση αυτή η περιοχή δεν ήταν μια λεκάνη άμμου. Έγινε μια δειγματοληπτική γεώτρηση (Εικ. 163). Στην περιοχή της γεώτρησης είχαμε την εκτόξευση περίπου 25 χιλιοστών λεπτόκοκκης άμμου πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Κάτω από αυτήν την εκτόξευση άμμου παρατηρήθηκε ότι η τοποθεσία χαρακτηριζόταν από ένα στρώμα ιλύος ή ιλυώδους αργίλου χαμηλής πλαστικότητας στα πρώτα 1.9μ. του εδαφικού καλύμματος. Αναχώματα λεπτόκοκκης άμμου βρέθηκαν στα δείγματα της γεώτρησης σε βάθος περίπου 0.9 έως 1.6μ. Κάτω από τα στρώματα ιλύος και ιλυώδους αργίλου εντοπίσθηκε ένα παχύ στρώμα 0,5μ. αργίλου τύπου «μαύρου βάμβακος». Κάτω από αυτό το στρώμα εντοπίστηκε ένα στρώμα λεπτόκοκκης άμμου και η στάθμη του υπόγειου νερού εντοπίστηκε περίπου στα 2.5μ. κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Εικόνα 163: Τρυπάνι δειγματοληψίας από έδαφος αναβράζουν ψαμμίτη στο Hattiban, με συντεταγμένες 85.33441 N, 27.65567 E.(NepalGEERreportversion1,2015).



FC = 45%, Clay fraction (<0.005) = 4%, => Silt

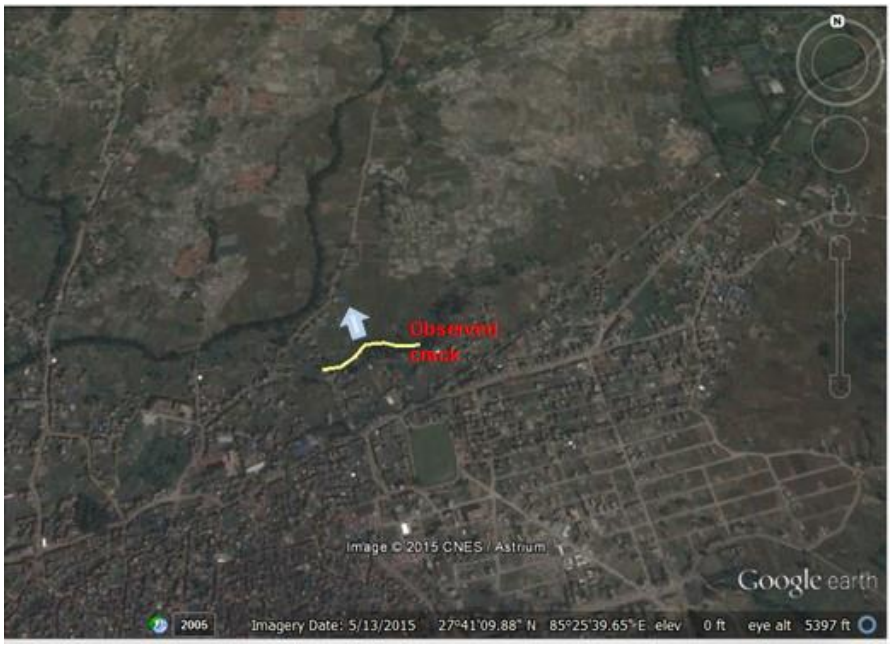
Εικόνα 164: Καμπύλη κατανομής μεγέθους κόκκων στην περιοχή Hattiban (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.28 Περιοχές Kamal Vinayak και Bhaktapur

Στις 23 Μαΐου του 2015, έχοντας πάρει πρώτα οδηγίες από ντόπιους κάτοικους , έγινε έρευνα στο Kamal Vinayak στο Bhakapur , ανατολικά της κοιλάδας του Kathmandu , ούτως ώστε να γίνει παρατήρηση των εκτεθειμένων επιφανειακών ρηγμάτων (Εικ.165). Τα ρήγματα αυτά είχαν σχηματιστεί κατά μήκος του ορίου της λεκάνης απορροής και των χαμηλού ύψους και ανάγλυφου λόφων , 5 μέτρα πιο ψηλά από την λεκάνη απορροής. Κατά την διάρκεια της μελέτης πεδίου εντοπίστηκε πως το ρήγμα είχε έως και 250 μέτρα μήκος και σύμφωνα με αναφορές από τον γηγενή πληθυσμό φαίνεται πως η διάδοση του ρήγματος είναι μεγαλύτερη . Τα ρήγματα έφταναν έως και 0,8 μέτρα σε πλάτος και 1,5 μέτρα βάθος (Εικ. 166). Ένα ρυάκι εντοπίστηκε κοντά στο ένα άκρο τους ρήγματος . Πιθανόν, οι ρηξιγενής επιφάνειες που αναπτύχθηκαν εξαιτίας πλευρικής εξάπλωσης οι οποίες πιθανόν να έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα υγροποίησης του υποκείμενου εδάφους.

Οι ντόπιοι κάτοικοι είχαν ήδη γεμίσει τα ρήγματα που βρίσκονταν κοντά στα κτίρια με σκοπό να εμποδίσουν την περαιτέρω αστοχία του εδάφους , εξαιτίας της τροφοδοσίας των κενών των ρηγμάτων από το νερό της βροχής . Επίσης παρατηρηθήκαν βλάβες σε τοίχους κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας της πλευρική εξάπλωση του φαινομένου και σε ρωγμές οι οποίες διέρχονταν δια μέσω των θεμελίων του κτιρίου. (Εικόνα 167) .

Ωστόσο , δεν παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ζημιές στο πλευρικό σύστημα αντιστήριξης του κτιρίου. Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκαν ζημίες σε κάποιο άλλο κτίριο στην ίδια περιοχή καθώς οι ρηξιγενής επιφάνειες δεν μπορούσαν να διέλθουν δια μέσω των θεμελίων (Εικ.167). Σύμφωνα με ντόπιους κατοίκους, μερικά κτίρια δομημένα από τούβλα λάσπης, που βρίσκονταν στον λόφο είχαν καταρρεύσει.



Εικόνα 165: Χάρτης παρατηρημένης επιφανειακής ρηξιγενής επιφάνειας στο Kamalvinayak στο Μπακταπούρ του Νεπάλ (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 166: Παρατηρημένες ρωγμές επιφάνειας εδάφουςαπό περίπου 250m μήκος, πλάτος έως 0,8m και βάθος έως 1,5m (Τοποθεσία: 27˚40'42.20 "B, 85˚26'13.12"E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 167:Αριστερά : Παρατηρήθηκε ρωγμή στον τοίχο ενός κτιρίου RC λόγω πλευρικής παραμόρφωσης του εδάφους. Δεξιά: Καμία ζημιά σε ένα κτίριο στην ίδια τοποθεσία με αυτή του κτιρίου RCκαθώς οι ρωγμές δεν μπορούσαν να διέλθουν από τα θεμέλια (Τοποθεσία: 27˚40'43,22 "B, 85˚26'10,52" E) (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.29 Περιοχές Nagarjun και Syunchatar

Στις 22 Μαΐου του 2015, είχαμε την δημιουργία ενός επιφανειακού ρήγματος έκτασης 3 χιλιομέτρων ,που παρατήρηθηκε στη βορειοδυτική πλευρά της κοιλάδας του Κατμαντού (Kathmandu Valley) . Καθώς η τοποθεσία της προαναφερόμενου ρήγματος δεν προσδιορίστηκε με σαφήνεια, έγινε μια μελέτη πεδίου σε δυο διαφορετικές τοποθεσίες με εμφανές το εκτεθειμένο επιφανειακό ρήγμα, που βρίσκονταν κοντά στις περιοχες Nagarjun και Syunchatar, δυτικά της πόλης του Kathmandu, αντίστοιχα. Κανένα από τις επιφανειακά ρήγματα που παρατηρήθηκαν σε αυτές τις περιοχές δεν βρέθηκε να είναι μήκους τριών χιλιομέτρων. Το επιφανειακό ρήγμα της περιοχής Nagarjun είναι πιο πιθανό να οφείλεται σε πρόβλημα σταθερότητας κλίσης των πρανών , ενώ το επιφανειακό ρήγμα της περιοχής Syuchatar οφείλεται περισσότερο σε πλευρική εξάπλωση .

Για να αποδοθεί καλύτερα ο μηχανισμός γένεσης της επιφανειακού ρήγματος στη δεύτερη τοποθεσία , υπήρξε μια δεύτερη μελέτη πεδίου στις 27 Μαΐου του 2015, η οποία σύλλεξε δείγματα από τρία διαφορετικά σημεία κατά μήκος του παρατηρηθέντος επιφανειακού ρήγματος σε συνεργασία με την ομάδα Γεωλογικής Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) . Δείγματα εδάφους που συλλέχθηκαν σε κάθε ένα από τα τρία προαναφερθέντα σημεία απέδειξαν την παρουσία ενός αμμώδους στρώματος το οποίο μπορεί να έχει υποστεί ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια του κυρίως σεισμού στις 25 Απριλίου 2015 που προκάλεσε την επιφανειακό ρήγμα εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης .

Πρωτίστως μελετήθηκε το επιφανειακό ρήγμα που παρατηρήθηκε στο Nagarjun/Ramkot. Το επιφανειακό ρήγμα βρισκόταν σε ένα ελαφρά κεκλιμένο επίπεδο σε μεγαλύτερο υψόμετρο της πλαγιάς του λόφου. Το ρήγμα αυτό απείχε κατά προσέγγιση 5 ίντσες απόσταση από το λόφο όπως απεικονίζεται στην εικόνα 168. Το μήκος του ρήγματος ήταν κατά προσέγγιση 170 πόδια .Τα περισσότερα σημεία του επιφανειακού ρήγματος είχαν ήδη καλυφθεί με λάσπη από τους ντόπιους ως προληπτικό μέτρο πριν την εμφάνιση των μουσώνων , ενάντια σε πιθανές κατολισθήσεις και αστοχίες των πρανών οι οποίες μπορεί να προκληθούν από την τροφοδοσία υλικού εντός του επιφανειακού ρήγματος από το νερό της βροχής. Παρότι η περιοχή δεν ήταν ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένη, παρατηρήθηκαν στην πλαγιά του λόφου κτίρια λασπώδους δομής ενός ή 2 ορόφων να έχουν μερικώς καταρρεύσει , τα οποία προστίθενται στα μερικώς κατεστραμμένα κτίρια με πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος (Εικόνα 169). Προσωρινά καταφύγιά χτιζόντουσαν στην περιοχή αυτή.

Εικόνα 168: Παρατηρούμενη επιφανειακή ρωγμή επιφάνειας μήκους 170 πόδια, πλάτους 5 ιντσών στο Nagarjun (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 169: Ζημιές σε κατασκευές γύρω από την επιφανειακή ρωγμή που παρατηρήθηκε στο Nagarjun (NepalGEERreportversion1,2015).

Το δεύτερο σημείο της μελέτης πεδίου ήταν στο Syuchatar. Το επιφανειακό ρήγμα εντοπίστηκε σε ένα ήπιας κλίσης πρανές στο οποίο είχαν δομηθεί κτίρια 1 με 2 ορόφων κυρίως με πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος (Εικόνα 170). Μερικά από τα κτίρια λασπώδους κατασκευής και τοιχοποιίας σκυροδέματος που βρίσκονταν στην περιοχή υπέστησαν ζημιές , ωστόσο τα περισσότερα κτίρια με δομή πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος δεν εμφάνισαν κάποια σοβαρή ζημιά. (Εικόνα 171) . Σε μερικά σημεία όπου το επιφανειακό ρήγμα διαπερνά τις κατασκευές παρατηρήθηκε ένα ρήγμα στις πλάκες των θεμελίων και στους τοίχους των κτιρίων (Εικόνα 172). Η επιφανειακή διάρρηξη στο συγκεκριμένο σημείο εκτιμήθηκε να είναι κατά προσέγγιση 1800 ft σε μήκος , σε μερικά σημεία το βάθος του ρήγματος παρατηρήθηκε να είναι έως και 14 ft και το πλάτος του ρήγματος παρατηρήθηκε να είναι έως και 1 ft πλάτος. (Εικόνα 172) . Ο μηχανισμός αστοχίας εικάζεται πως είναι κάποιο είδος πλευρικής διάδοσης. Με σκοπό να κατανοηθεί καλύτερα η κατάσταση του υπεδάφους , συλλέχτηκε δείγμα και να εκτελέστηκαν επί τόπου δοκιμές αντοχής σε διάτμηση. Σε τρία διαφορετικά σημεία κατά μήκος του ρήγματος, συλλέχτηκαν δείγματα εδάφους με το χέρι και πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντοχής με επί τόπου διάτμηση με πίεση (vaneshear) σε συνεργασία με την ομάδα USGS (Εικόνα 173) . Τα συλλεγμένα δείγματα έδειξαν παρουσία στρώματος αμμώδους ιλύς το οποίο ρευστοποιήθηκε και προκάλεσε πλευρική εξάπλωση του ρήγματος .

Εικόνα 170: Παρατηρούμενη επιφάνεια ~ 1800 πόδια, πλάτος ~ 1 πόδια και 14 πόδια βαθιά επιφανειακή ρωγμή στο Syuchatar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 171: Ζημιές σε κατασκευές γύρω από την επιφανειακή ρωγμή που παρατηρήθηκε στο Syuchatar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 172:Ρωγμές στο πάτωμα και στους τοίχους λόγω πλευρικής εξάπλωσης στο Syuchatar (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 173: Η δειγματοληψία εδάφους και η δοκιμή αντοχής πεδίου πραγματοποιήθηκαν στο Syuchatar (NepalGEERreportversion1,2015).

6.3.30 Η Πλευρική εξάπλωση στο φράγμα της παγετώδους λίμνης του Tsho Lorpa , σε υψόμετρο 4,535μ.

Η παγετώδης λίμνη Tsho Lorpa είναι μία φυσική λίμνη που βρίσκεται σε υψόμετρο 4,535 μ, (Εικόνα 174) . Στην περιοχή αυτή κατασκευάστηκε ένας υπερχειλιστής για τον έλεγχο της στάθμης του νερού στη λίμνη , την αποφυγή της υπερχείλισης και την πιθανή παραβίαση του φυσικού φράγματος. Διεξήχθη έρευνα σε αυτή την περιοχή ούτος ώστε να εξετάσει η ακεραιότητα του υλικού του φυσικού φράγματος περιμετρικά από τη λίμνη (Εικόνα 175), όπως επίσης και τον υπερχειλιστή (Εικόνα 176).

Το υλικό του φυσικού φράγματος εμφάνισε ρηγμάτωση ή καταβύθιση. Στον υπερχειλιστή παρατηρήθηκε πλευρική εξάπλωση στο περιοχή που έρχεται σε επαφή με τη λίμνη. Σημαντικές πλευρικές και κατακόρυφες μετατοπίσεις (Εικόνα 177), έχουν παρατηρηθεί να υπερβαίνουν του συνόλου του 1,5 μέτρου πλευρικά και του 0,5 μέτρου καθέτως.

Εικόνα 174: Κάτοψη του φράγματος της παγετώδους λίμνης της περιοχής TshoLorpa με συντεταγμένες (270 52 ’9,57” N, 860 27 ’44” E) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 175: Παγετώδης λίμνη με συντεταγμένες (270 52 ’9,57” B, 860 27 ’44” A) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόνα 176: Ο υπερχειλιστής της παγετώδους λίμνης με συντεταγμένες (270 52 ’9,57” Β, 860 27 ’44’ Ε) (NepalGEERreportversion1,2015).

Εικόμα 177: Πλευρική διάδοση κατά μήκος των ανάντη του υπερχειλιστή με συντεταγμένες (270 52 ’9,57” Β, 860 27 ’44” Ε) (NepalGEERreportversion1,2015).

7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

7.1 Η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα EMS-98

Η νέα κλίμακα EMS (EuropeanMacroseismicScale) προτάθηκε από την XXIII Γενική συνέλευση της Ευρωπαϊκής Σεισμολογικής Επιτροπής ESC (EuropeanSeismologicalCommision) το 1992, για να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με τις υπάρχουσες κλίμακες για χρονική περίοδο τριών ετών, ώστε να αποκτηθεί εμπειρία κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες, ειδικότερα στα πειραματικά μέρη της κλίμακας: στον βαθμό τρωτότητας και στις κατασκευές (Gruenthal, 1998). Η βάση της κλίμακας EMS ήταν η MSK που βασίζεται στην εμπειρία των αρχών του 1960 από την εφαρμογή της κλίμακας MCS (Mercalli – Cancani – SiebergScale), της κλίμακας MM-31 και MM-56 (ModifiedMercalli), και της κλίμακας Medvedev γνωστής επίσης και ως GEOFIAN κλίμακα. Το 1976 και 1977 προτάθηκαν από τον Medvedev μερικές αλλαγές στη κλίμακα MSK-64. Εκείνη την περίοδο, πολλοί χρήστες της κλίμακας άρχισαν να βλέπουν την ανάγκη να βελτιωθεί, π.χ. να δοθεί μεγαλύτερη σημασία στις νεοεισερχόμενες τεχνικές των κατασκευών και να προσαρμοστεί σε αυτές. Έτσι, η καινούργια κλίμακα EMS αποτελεί βελτίωση της κλίμακας MSK-64 και προσαρμογή της σε ευρωπαϊκά δεδομένα.

Η κλίμακα EMS εισάγει ένα πολύ σημαντικό όρο, την τρωτότητα. Η τρωτότητα χρησιμοποιείται για να εκφράσει διαφορές στον τρόπο απόκρισης των κτιρίων στη σεισμική δόνηση. Έτσι, εάν δύο ομάδες κτηρίων υπόκεινται ακριβώς στην ίδια δόνηση και η μία ομάδα συμπεριφέρεται καλύτερα από την άλλη, τότε μπορούμε να πούμε ότι τα κτήρια που υπέστησαν μικρότερες βλάβες είχαν μικρότερη τρωτότητα ή ότι παρουσίασαν μεγαλύτερη αντίσταση στη σεισμική δόνηση.

Η μακροσεισμική ένταση ορίζεται ως «μια διαβάθμιση της σοβαρότητας των εδαφικών κινήσεων στην βάση των παρατηρούμενων επιπτώσεων σε μια ορισμένη περιοχή» (Grunthalet al., 1998, σελ. 21)

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών κλιμάκων μακροσεισμικής έντασης. Η ευρέως χρησιμοποιουμένη κλίμακα Μερκάλι, για παράδειγμα, βασίζει τις αποδόσεις τιμών σε ανέκδοτες ή αντιπροσωπευτικές περιγραφές σεισμικών παρατηρήσεων και επιπτώσεων.

Ημι-ποσοτικές εκτιμήσεις όπως οι εκφράσεις «έγινε αισθητός σχεδόν απ' όλους» (κλίμακα V) και «Μεγάλες καταστροφές σε κακώς δομημένα κτίρια» (ένταση VIII) χρησιμοποιούνται για να αποδόσουν εντάσεις στην κλίμακα Μερκάλι (USGS 1989)

Η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα είναι παρόμοια με την Μερκάλι αλλά επιτρέπει τον περιορισμό τέτοιων υποκειμενικών εκφράσεων σχετικά με την ένταση. Επιπλέον, η μεθοδολογία EMS-98 περιέχει μετρήσεις μηχανικών συντελεστών όπως δεδομένα από μεγάλης κλίμακας μελέτες πεδίου δομικών ή μη δομικών καταστροφών (Grunthal et al. 1998).

Για παράδειγμα η ένταση V θα πρέπει να αποδίδεται μέσω της μεθοδολογίας EMS-98 αν παρατηρηθεί «μέγεθος ζημιάς κατηγορίας 1 σε μερικά κτίρια της κατηγορίας αντοχής A και B»

Ενώ αυτό μπορεί να ακούγεται κάπως υποκειμενικό και αθεμελίωτο στην πραγματικότητα τέτοιες εργασίες βασίζονται σε τρία εμφανή χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μακροσκοπικών ενδείξεων:

1. Παρατηρείται συγκεκριμένη σοβαρότητα ζημιών (Damage of Grade 1)

2. Η αναλογία των ζημιών σε δομές αυτής της έκτασης («λίγα κτίρια», «λίγα», «πολλά», και «τα περισσότερα» ποσοτικοποιούνται στον EMS-98)

3. Η αντοχή σε σεισμικές δονήσεις συγκεκριμένων τύπων των αναφερομένων δομών ("of Vulnerability Class A and B")

Ακολουθούν οι βαθμοί της έντασης σύμφωνα με την κλίμακα EMS-98 με τις αντίστοιχες για κάθε βαθμό σεισμικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Κουσκουνά-Τσιμπιδάρου,Gruenthal, G. 1998) :

I. **Μη αισθητός**: Δεν γίνεται αισθητός από τους ανθρώπους, ακόμα και υπό τις ευνοϊκότερες συνθήκες.

II. **Ανεπαίσθητος:** Η δόνηση είναι αισθητή μόνο σε μεμονωμένες περιπτώσεις (<1%) ατόμων που αναπαύονται και σε ειδικές θέσεις μέσα στα κτήρια.

III. **Ασθενής:** α) Ο σεισμός είναι αισθητός μέσα σε κτήριο από λίγους. Όσοι αναπαύονται αισθάνονται μια ταλάντωση ή τρεμούλιασμα του φωτός. β) Ανηρτημένα αντικείμενα αιωρούνται ελαφρά.

IV. **Ευρέως παρατηρητός:** α) Ο σεισμός είναι αισθητός από πολλούς μέσα σε κτήρια και από λίγους έξω. Λίγοι ξυπνούν. Το επίπεδο της ταλάντωσης δεν προκαλεί φόβο. Η ταλάντωση είναι μέτρια. Οι παρατηρητές αισθάνονται ένα ελαφρό τρεμούλιασμα ή ταλάντωση του κτιρίου, δωματίου, κρεβατιού, καρέκλας, κλπ. β) Πιατικά, ποτήρια, παράθυρα και πόρτες κροτούν. Ανηρτημένα αντικείμενα αιωρούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις ελαφρά έπιπλα δονούνται εμφανώς. Σε ορισμένες περιπτώσεις ξύλινες κατασκευές τρίζουν.

V. **Ισχυρός:** α) Ο σεισμός είναι αισθητός από τους περισσότερους μέσα στα κτήρια και από λίγους έξω. Λίγοι φοβούνται και τρέχουν έξω. Πολλοί ξυπνούν. Οι παρατηρητές αισθάνονται μια δυνατή ταλάντωση ή τράνταγμα όλου του κτιρίου, δωματίου ή επίπλου. β) Ανηρτημένα αντικείμενα αιωρούνται αισθητά. Πιατικά, ποτήρια, παράθυρα και πόρτες χτυπούν μεταξύ τους. Μικρά ασταθή αντικείμενα μπορεί να μετακινηθούν ή να πέσουν. Πόρτες και παράθυρα ανοιγοκλείνουν. Υγρά ταλαντώνονται και μπορεί να χυθούν από γεμάτα δοχεία. Τα ζώα μέσα στο σπίτι μπορεί να είναι ανήσυχα. γ) Βλάβες βαθμού 1 σε λίγα κτήρια τάξης τρωτότητας A και B.

VI. **Ελαφρά βλαβερός:** α) Ο σεισμός είναι αισθητός από τους περισσότερους μέσα στα κτήρια και από πολλούς έξω. Λίγοι χάνουν την ισορροπία τους. Πολλοί φοβούνται και προσπαθούν να βγουν έξω. β) Μικρά αντικείμενα κανονικής σταθερότητας μπορεί να πέσουν και έπιπλα μπορεί να μετακινηθούν. Σε ορισμένες περιπτώσεις πιάτα και ποτήρια μπορεί να σπάσουν. Τα κατοικίδια ζώα (ακόμα και όταν είναι έξω) μπορεί να τρομάξουν. γ) Βλάβες βαθμού 1 σε πολλά κτήρια τάξης τρωτότητας A και B. Βλάβες βαθμού 2 σε λίγα κτήρια τάξης A και B. Βλάβες βαθμού 1 σε λίγα τάξης C.

VII. **Βλαβερός**: α) Οι περισσότεροι φοβούνται και προσπαθούν να βγουν έξω. Πολλοί δεν μπορούν να σταθούν, κυρίως στους ανώτερους ορόφους. β) Έπιπλα μετακινούνται και ασταθή έπιπλα μπορεί να ανατραπούν. Μεγάλος αριθμός αντικειμένων πέφτουν από τα ράφια. Το νερό ξεχύνεται από δοχεία, δεξαμενές και λίμνες. γ) Βλάβες βαθμού 3 σε πολλά κτήρια τάξης τρωτότητας A· σε 31 λίγα βαθμού 4. Βλάβες βαθμού 2 σε πολλά κτήρια τάξης B· σε λίγα βαθμού 3. Βλάβες βαθμού 2 σε λίγα κτήρια τάξης C. Βλάβες βαθμού 1 σε λίγα κτήρια τάξης D.

VIII. **Βαριά βλαβερός:** α) Πολλοί δεν μπορούν να σταθούν όρθιοι, ακόμα και έξω. β) Έπιπλα μπορεί να ανατραπούν. Αντικείμενα όπως τηλεοράσεις, γραφομηχανές κλπ. πέφτουν στο έδαφος. Ταφόπλακες ενίοτε μετακινούνται, περιστρέφονται ή ανατρέπονται. Σε πολύ χαλαρό έδαφος μπορεί να παρατηρηθεί κυματισμός. γ) Βλάβες βαθμού 4 σε πολλά κτήρια τάξης τρωτότητας A· σε λίγα βαθμού 5. Βλάβες βαθμού 3 σε πολλά κτήρια τάξης B· σε λίγα βαθμού 4. Βλάβες βαθμού 2 σε πολλά κτήρια τάξης C· σε λίγα βαθμού 3. Βλάβες βαθμού 2 σε λίγα κτήρια τάξης D.

IX. **Καταστρεπτικός:** α) Γενικός πανικός. Άνθρωποι μπορεί να πέσουν στο έδαφος. β) Πολλά μνημεία και στύλοι ανατρέπονται ή περιστρέφονται. Παρατηρείται κυματισμός σε χαλαρό έδαφος. γ) Βλάβες βαθμού 5 σε πολλά κτήρια τάξης τρωτότητας A. Βλάβες βαθμού 4 σε πολλά κτήρια τάξης B· σε λίγα βαθμού 5. Βλάβες βαθμού 3 σε πολλά κτήρια τάξης C· σε λίγα βαθμού 4. Βλάβες βαθμού 2 σε πολλά κτήρια τάξης D· σε λίγα βαθμού 3. Βλάβες βαθμού 2 σε λίγα κτήρια τάξης E.

X. **Πολύ καταστρεπτικός:** Βλάβες βαθμού 5 στα περισσότερα κτήρια τάξης τρωτότητας A. Βλάβες βαθμού 5 σε πολλά κτήρια τάξης B. Βλάβες βαθμού 4 σε πολλά κτήρια τάξης C· σε λίγα βαθμού 5. Βλάβες βαθμού 3 σε πολλά κτήρια τάξης D· σε λίγα βαθμού 4. Βλάβες βαθμού 2 σε πολλά κτήρια τάξης E· σε λίγα βαθμού 3. Βλάβες βαθμού 2 σε λίγα κτήρια τάξης F.

XI. **Συντριπτικός:** Βλάβες βαθμού 5 στα περισσότερα κτήρια τάξης τρωτότητας B. Βλάβες βαθμού 4 στα περισσότερα κτήρια τάξης C· σε πολλά βαθμού 5. Βλάβες βαθμού 4 σε πολλά κτήρια τάξης D· σε λίγα βαθμού 5. Βλάβες βαθμού 3 σε πολλά κτήρια τάξης E· σε λίγα βαθμού 4. Βλάβες βαθμού 2 σε πολλά κτήρια τάξης F· σε λίγα βαθμού 3.

XII. **Ολοκληρωτικά συντριπτικός**: Όλα τα κτήρια τάξης τρωτότητας A, B και σχεδόν όλα τάξης C καταστρέφονται. Τα περισσότερα κτήρια τάξης D, E και F καταστρέφονται. Οι επιπτώσεις του σεισμού έχουν προσεγγίσει τις μέγιστες δυνατές επιπτώσεις.

7.2 Προβλήματα υπολογισμού της έντασης από ιστορικές καταγραφές

Η εισαγωγή σε καταλόγους των ιστορικών πληροφοριών των σεισμών γίνεται με βάση τη μακροσεισμική ένταση. Ο προσδιορισμός, όμως, της έντασης από ιστορικές καταγραφές παρουσιάζει προβλήματα που προκύπτουν από την ποιότητα και ποσότητα της διαθέσιμης πληροφορίας. Ειδικότερα, και οι δύο κλίμακες, η MSK-64 και η EMS απαιτούν τα ακόλουθα:

1. τύπος της κατασκευής. Συνήθως πρέπει να γίνει επιλογή μεταξύ βαθμού τρωτότητας A και B
2. ποσότητες: για κάθε τύπο κατασκευής πρέπει να γνωρίζουμε το συνολικό αριθμό κτιρίων και αυτών που παρουσίασαν βλάβες
3. βλάβες σε κτίρια

7.3 Ιστορικά δεδομένα και δεδομένα από έγγραφα

Ο όρος «ιστορικά δεδομένα» χρησιμοποιείται συχνά για να δώσει την έννοια των περιγραφών των αποτελεσμάτων ενός σεισμού από ιστορικές καταγραφές, δηλαδή γραπτές πηγές προγενέστερες από την ενόργανη περίοδο (πριν το 1900). Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι παρόμοια σημαντικά μακροσεισμικά δεδομένα είναι ακόμη διαθέσιμα και χρησιμοποιήθηκαν για σεισμούς του 20ου αιώνα, ακόμα και πρόσφατους.

Επομένως, είναι πρακτικό να μελετηθούν από κοινού οι ιστορικές και οι σύγχρονες γραπτές αναφορές ως «δεδομένα από γραπτά κείμενα». Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται εδώ για να διαφοροποιηθούν οι περιγραφές των αποτελεσμάτων ενός σεισμού που έχουν καταγραφεί για μη σεισμολογικούς σκοπούς από δεδομένα ερωτηματολογίων που συγκεντρώθηκαν υπό την επίβλεψη σεισμολόγων. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να ανακτηθούν και να ερμηνευθούν σύμφωνα με ιστορικές μεθόδους, ανεξαρτήτως του κατά πόσο συνδέονται π.χ. με το 1890 ή το 1980.

Η ανάκτηση και η διαχείριση των αναφορών απαιτεί φροντίδα και εμπειρία,. Ιδιαίτερα εκείνος που διεξάγει την έρευνα και επεξεργάζεται τις αναφορές, πρέπει να αντιλαμβάνεται ότι η πληροφορία έχει φτάσει σε αυτόν μετά από μία μακρά και πολύπλοκη πορεία. Επομένως είναι σημαντικό να εργαστεί λαμβάνοντας υπόψη το περιεχόμενο των δεδομένων με ιστορικούς, γεωγραφικούς αλλά και λογοτεχνικούς 33όρους.

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στα ακόλουθα σημεία :

(i) Η σπουδαιότητα της πηγής, λαμβάνοντας υπόψη το κίνητρο για την καταγραφή της και το πλαίσιο στο οποίο δημιουργήθηκε. Ποια είναι η σχέση της πηγής με τους σεισμούς και με άλλα φυσικά φαινόμενα; (Για παράδειγμα, σε χαμηλότερες εντάσεις είναι πιο πιθανό να έχει καταγραφεί ένας σεισμός σε ένα προσωπικό ημερολόγιο από ότι στα πρακτικά ενός Δημοτικού Συμβουλίου).

(ii) Η μελέτη στην οποία εμφανίζεται η αναφορά μπορεί να περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες και δεν θα πρέπει να αγνοηθεί. Για παράδειγμα, ένα βιβλίο μπορεί να περιλαμβάνει μία σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων ενός σεισμού σε ένα κεφάλαιο, αλλά να περιλαμβάνει κάποιες λεπτομέρειες που να διορθώνουν την πληροφορία σε ένα άλλο σημείο στον τόμο. Αν η αναφορά του σεισμού είναι μεμονωμένη, μπορεί να παρέχει μία ζωτικής σημασίας πληροφορία, αλλά θα χαθεί. Ο τρόπος διατύπωσης είναι επίσης

σημαντικός, και η πληροφορία δεν θα πρέπει να περιορισθεί σε μία περίληψη, έτσι ώστε να αφαιρεθεί η χροιά του πρωτοτύπου.

(iii) Η χωρο-χρονική τοποθέτηση της πληροφορίας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό: η απρόσεκτη διαχείριση εδώ μπορεί να καταλήξει σε διπλές καταχωρίσεις σεισμών, δεδομένα για έναν σεισμό να αποδοθούν σε ένα διαφορετικό γεγονός ή στον σωστό σεισμό αλλά σε λάθος τόπο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα δεδομένα δεν είναι δυνατόν να αναλυθούν επαρκώς όσον αφορά στον χώρο ή στον χρόνο ή και στα δύο – σε τέτοιες περιπτώσεις, αυτό πρέπει να υποδεικνύεται ξεκάθαρα όταν τα δεδομένα χαρτογραφούνται.

7.4 Τύποι κατασκευών και τάξεις τρωτότητας σε ιστορικές αναφορές

Σε ιστορικές μαρτυρίες αναφέρονται συχνά λεπτομερώς βλάβες σε σημαντικά μνημεία (κάστρα, εκκλησίες, παλάτια, πύργους, κίονες, κλπ.). Σπανιότερα αναφέρονται τα αποτελέσματα κοινών κτιρίων, τα οποία είναι τα μόνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην δομή της κλίμακας.

Όσον αφορά στα κοινά κτήρια, οι τάξεις τρωτότητας των παραδοσιακών σπιτιών κυμαίνονται στις περισσότερες περιπτώσεις από A έως B, ακόμη και έως C και D (ξύλινες κατασκευές). Για παράδειγμα, από την βιβλιογραφία ξέρουμε ελάχιστα για τους τύπους των κτιρίων στην Ευρώπη κατά τον 17ο αιώνα, εκτός από το γεγονός ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνταν ήταν εκείνα που μπορούσαν να κατασκευασθούν με τα χέρια και ότι οι οικονομικά εύποροι είχαν πιο γερά κατασκευασμένα και καλύτερα διατηρημένα σπίτια. Το σίγουρο, πάντως, είναι ότι στον Μεσαίωνα τα περισσότερα σπίτια στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης ήταν φτιαγμένα από ξύλο, ενώ η διαδικασία της μετάβασης στα σπίτια από πέτρα ή τούβλα ήταν μακρά και σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο εν μέρει. Χωρίς λεπτομερή πληροφορία, όμως, είναι πολύ να γίνει οποιαδήποτε αξιόπιστη εκτίμηση της αντοχής αυτών των κατασκευών.

Μπορούν να προταθούν ορισμένες μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος αυτού της τρωτότητας των κατασκευών. Για παράδειγμα, αν πιθανολογείται ότι ο τύπος της κατασκευής σε ένα συγκεκριμένο χώρο και χρόνο είχε τάξη τρωτότητας τόσο A όσο και B, είναι πιθανό να εκτιμηθεί η ένταση θεωρώντας τάξη A, στην συνέχεια να γίνει μία δεύτερη εκτίμηση θεωρώντας τάξη B και μετά να χρησιμοποιηθεί το εύρος των βαθμών της έντασης που δίνεται από τις δύο διαφορετικές εκτιμήσεις.

7.5 Συνολικοί αριθμοί κτιρίων

Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της έντασης χρησιμοποιώντας το ποσοστό των κτηρίων που έπαθαν βλάβες, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε όχι μόνο πόσα σπίτια έπαθαν βλάβες, αλλά και πόσα σπίτια δεν έπαθαν. Οι πηγές των δεδομένων που περιγράφουν τις βλάβες δεν μεταφέρουν συστηματικά (ή συχνά) και αυτό το είδος της πληροφορίας. Ωστόσο, πληροφορίες για τον συνολικό αριθμό των κτιρίων σε μία περιοχή μπορεί συχνά να ληφθούν με κάποια επιτυχία ερευνώντας άλλα είδη πηγών, όπως δημογραφικές μελέτες, τοπογραφικές εργασίες, απογραφές πληθυσμού, κλπ.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να βρεθούν χωρίς δυσκολία ορισμένα αξιόπιστα διαγράμματα. Πιο συχνά είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν εκτιμήσεις βασισμένες σε δεδομένα πληθυσμού με διάφορες υποθέσεις και συσχετισμούς, που μεταφέρουν κάποια αβεβαιότητα που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στην εκτίμηση της έντασης, και συχνά οδηγούν σε αβέβαιες – αλλά και πάλι χρήσιμες – εκτιμήσεις. Μία επιπλέον επιπλοκή είναι ότι τα διαθέσιμα σχήματα μπορεί να σχετίζονται με την περιοχή που περιβάλλει μία μικρή πόλη, καθώς και ορισμένα χωριά, μικρούς οικισμούς, και ερειπωμένα σπίτια, αν και η διατύπωση προτείνει ότι είναι η ίδια η πόλη που περιγράφεται. Οι περιγραφές των βλαβών μπορούν να έχουν το ίδιο πρόβλημα. Είτε μπορεί να λυθεί είτε όχι αυτό το πρόβλημα σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, πρέπει επίσης να αναγνωρισθεί ότι μία τέτοια κατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνείες της τάξης του ±1 βαθμού έντασης. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ίσως καλύτερο να μένουμε πιστοί σε ένα εύρος εντάσεων όπως 7 – 8, κλπ.

7.6 Βλάβες σε μνημεία

Οι βλάβες σε μνημεία συνήθως αντιπροσωπεύονται καλύτερα σε αρχειακές πηγές από ότι οι βλάβες σε κοινά σπίτια, για δύο λόγους :

(i) Αυτά τα κτήρια είναι πιο σημαντικά για τους συγγραφείς τέτοιων αναφορών εξαιτίας της κοινωνικής, οικονομικής, συμβολικής ή πολιτιστικής τους αξίας.

(ii) Η δομική και η μη-δομική πολυπλοκότητα τέτοιων κτιρίων είναι τέτοια που είναι πιο πιθανό να πάθουν βλάβες από ότι τα κοινά κτήρια, ακόμη και αν είναι καλύτερα χτισμένα. Αυτή είναι η περίπτωση, για παράδειγμα, όταν μικρές αρχιτεκτονικές διακοσμήσεις αποκολλώνται από εκκλησίες κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Για τον λόγο αυτό πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί ώστε να μην γίνει υπερεκτίμηση της έντασης ως συμπέρασμα τέτοιου είδους αποτελεσμάτων.

Σε ένα μέρος, τα μνημεία είναι συνήθως μοναδικά ή ελάχιστα. Επομένως, είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που σχετίζονται με αυτά τα κτήρια με ένα στατιστικό τρόπο όπως απαιτεί η κλίμακα. Τέτοια δεδομένα πρέπει, λοιπόν, να διαχειρίζονται με προσοχή, ως συμπληρωματικά σε άλλες αποδείξεις (αν είναι διαθέσιμες). Αν τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα είναι αυτού του είδους, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εύρος έντασης για να υποδειχθεί η αβεβαιότητα στην ερμηνεία.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, στις οποίες δίνονται πολύ λεπτομερείς περιγραφές βλαβών για ένα κτήριο το οποίο υπάρχει ακόμη και μπορεί να ερευνηθεί ή για το οποίο υπάρχουν λεπτομερείς περιγραφές, χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν για έναν σεισμό κάνοντας εξειδικευμένες αναλύσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ακρόπολη στην Αθήνα για την οποία έχουν γίνει μελέτες μετά από μεγάλους σεισμούς στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών, όπως για παράδειγμα για τους σεισμούς του 1981 στις Αλκυονίδες και του 1999 στην Πάρνηθα.

7.7 Ένταση και σεισμική ακολουθία

Οι ιστορικοί παραμετρικοί κατάλογοι και οι βάσεις δεδομένων με εντάσεις περιέχουν και δεδομένα από σεισμούς, όπου προκλήθηκαν βλάβες ή καταστροφές, οι οποίοι έπληξαν την ίδια περιοχή σε μικρό χρονικό διάστημα (μήνες, ημέρες ή και ώρες).

Τέτοιοι σεισμοί, είναι π.χ. της Δράμας στις 11/13-04-1829 και 05-05-1829, της Λέσβου στις 11-10-1845 με την έντονη ακολουθία προσεισμών, της Θήβας στις 18-08-1853 και 29-09-1853, της Αταλάντης στις 20 και 27-04-1894, κ.ά.

Στις περιπτώσεις αυτές, η αξιοπιστία των δεδομένων επηρεάζονται από:

1. την τρωτότητα των κτιρίων η οποία μπορεί να αυξήθηκε κατά την μετασεισμική ακολουθία.
2. το ότι οι αναφερόμενες βλάβες, μπορεί να είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα της μετασεισμικής ακολουθίας.

7.8 Τρωτότητα και μετασεισμική ακολουθία

Ένα κτήριο που έχει υποστεί βλάβες από ένα σεισμό, μπορεί να χάσει την αντοχή του μέχρις ενός σημείου. Δηλαδή η τρωτότητά του μπορεί να αυξήθηκε, ή με άλλα λόγια, το κτήριο να μην ανήκει πια στον αρχικό βαθμό τρωτότητας. Έτσι μπορούμε να κάνουμε τις εξής υποθέσεις :

Α. η τρωτότητα να αυξάνει κατά ένα βαθμό, μετά από οποιοδήποτε βαθμό βλάβης (αρχίζοντας από βαθμό βλάβης 1). προφανώς αυτή είναι μια ακραία υπόθεση

Β. η τρωτότητα να αυξάνει κατά ένα βαθμό, μόνο μετά από βαριά βλάβη στη κατασκευή (βαθμός βλάβης 4). αυτή είναι η πιο λογική υπόθεση.

Γ. η τρωτότητα να μην αυξάνει καθόλου σε σχέση με τις βλάβες. αυτή η υπόθεση αντιστοιχεί στην τρέχουσα πρακτική. Βλάβες και μετασεισμική ακολουθία

Είναι γεγονός ότι κατά την διάρκεια μιας μετασεισμικής ακολουθίας, οι βλάβες μόνον αυξάνονται. Έτσι ένας παρατηρητής μπορεί μόνο να αναφέρει αύξηση βλαβών. Επίσης, είναι γεγονός ότι αυτοί που αναφέρουν τα γεγονότα, συνήθως περιγράφουν, λεπτομερειακά, την κατάσταση που μπορούν να παρατηρήσουν μετά το μεγαλύτερο γεγονός, ή ακόμη και μετά το πέρας ολόκληρης της μετασεισμικής ακολουθίας. Πολύ σπάνια έχουμε αξιόπιστες ιστορικές πηγές που καταγράφουν βλάβες μετά από κάθε γεγονός. Παρόλα αυτά, ακόμη και αν έχουμε πηγές που αναφέρουν τα αποτελέσματα μετά από κάθε ξεχωριστό γεγονός, μπορούμε μόνο να περιμένουμε:

•Αξιόπιστα δεδομένα για το πρώτο γεγονός

•Αθροιστικό αποτέλεσμα για όλη τη μετασεισμική ακολουθία.

7.9 Βλάβες και ένταση

Απλά κτίρια: Οι ιστορικοί κατάλογοι και οι βάσεις δεδομένων μπορεί να περιέχουν τιμές εντάσεων που έχουν υπολογιστεί βασισμένες σε αναφορές για απομονωμένα κτήρια, όπως «εάν η εκκλησία κατέρρευσε τότε τουλάχιστον μερικά σπίτια θα έχουν καταρρεύσει επίσης». Αυτό σαφώς δεν ενθαρρύνεται στην κλίμακα EMS-98, καθώς αντιβαίνει τη στατιστική φύση της έντασης. Αυτές όμως τις εντάσεις που εκτιμήθηκαν από τέτοιες καταγραφές, δεν σημαίνει ότι πρέπει να τις αγνοήσουμε. Το να προσδιορίσουμε ένα βαθμό βλάβης σύμφωνα με τους ορισμούς της κλίμακας EMS- 98 είναι πιο ρεαλιστικό.

Κατανομή των βλαβών: Ιδανική είναι η περίπτωση στην οποια έχουμε πηγές που παρουσιάζουν με λεπτομέρεια (σπίτι-με-σπίτι) δεδομένα με βλάβες για μια πόλη ή μια επαρχία. Αυτή είναι η περίπτωση στην οποία συνήθως γίνονται οι επίσημες καταγραφές βλαβών και μπορούν να ενοπιστούν σε λεπτομερείς καταγραφές. Η κατανομή των βλαβών μπορεί να βοηθήσει στις μελέτες των μικροζωνικών ή της σεισμικότητας, με δεδομένο ότι:

•Οι τύποι των κτιρίων μπορεί να έχουν αλλάξει ουσιαστικά

•Η σημερινή πόλη μπορεί να εκτείνεται σε μεγαλύτερη περιοχή, και πιθανόν σε διαφορετικά εδάφη.

7.10 Εκτίμηση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων

Η αισθητότητα των σεισμών, και σε μεγάλο βαθμό τα μακροσεισμικά αποτελέσματά τους, εξαρτώνται από την μετάθεση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση της σεισμικής κίνησης. Η σύγκριση των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων με βάση τη μέτρηση ενός τέτοιου φυσικού μεγέθους παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες για δυο βασικούς λόγους.

Ο πρώτος λόγος είναι ότι τα μακροσεισμικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται, όπως αναφέρθηκε, από ένα μόνο φυσικό μέγεθος.

Ο δεύτερος λόγος είναι ότι το μετρούμενο φυσικό μέγεθος αφορά μόνο στο σημείο στο οποίο γίνεται η μέτρηση και είναι δυνατό, ακόμη και όχι μακριά από το σημείο αυτό, η τιμή του μεγέθους αυτού να είναι πολύ διαφορετική λόγω διαφορετικών εδαφικών συνθηκών. Συνεπώς, για να έχουμε ποσοτικές πληροφορίες για τα αποτελέσματα ενός σεισμού σε ορισμένο τόπο, θα πρέπει να λάβουμε μεγάλο αριθμό πυκνών μετρήσεων διαφόρων φυσικών μεγεθών. Αυτό βέβαια παρουσιάζει μεγάλες πρακτικές δυσκολίες. Επειδή τα μακροσεισμικά αποτελέσματα εξαρτώνται και από τη σεισμική επιτάχυνση, παλαιότερα πίστευαν ότι η σεισμική επιτάχυνση περιγράφει μόνο αυτή τα αποτελέσματα αυτά, καλύτερα από κάθε άλλο φυσικό μέγεθος. Έτσι, έγινε προσπάθεια εκτίμησης της σεισμικής επιτάχυνσης βάσει διαφόρων παρατηρήσεων, όπως είναι η ανατροπή και εκσφενδόνηση αντικειμένων. Ακριβής μέτρηση της σεισμικής επιτάχυνσης με τη δυνατότητα συγχρόνου καθορισμού της ταχύτητας, της μετάθεσης, της συχνότητας και της διάρκειας της σεισμικής κίνησης πραγματοποιείται με τις αναγραφές των επιταχυνσιομέτρων.

7.11 Εφαρμογή της κλίμακας EMS-98 στις κατασκευές που υπέστησαν βλάβες εξαιτίας του σεισμικού γεγονότος του Κατμαντού

Στις 25 Απριλίου 2015 ο σεισμός της περιοχής Ghorka κλίμακας Mw 7,8 καθώς και οι ακόλουθες μετασεισμικές ακολουθίες προκάλεσαν τεράστιες υλικές και ανθρώπινες απώλειες στο κεντρικό Νεπάλ. Η μετασεισμική δραστηριότητα συνεχίστηκε για πολλούς μήνες μετά τον κυρίως σεισμό. Ακολούθησαν περίπου 550 μετασεισμικές δονήσεις τοπικού μεγέθους >4.0 Mw στις πρώτες 45 ημέρες (Adhikarietal., 2015).Τέσσερα σεισμικά γεγονότα κλίμακας 6.0 Mw ή και μεγαλύτερα έλαβαν χώρα καθ' όλη την έκταση της κοιλάδας του Κατμαντού τα οποία προξένησα επιπρόσθετες καταστροφές. Μεταξύ αυτών το μεγαλύτερο μετασεισμικό γεγονός (12/05/2015) κλίμακας 7.3 Mw προκάλεσε σοβαρές καταστροφές στις περιοχές Dolakha και Sindhupalchok του ΒΒΑ Κατμαντού.

Η κοιλάδα του Κατμαντού αποτελείται από τις περιοχές Κταμαντού, Lalitpur και Bakhtapur, καλύπτοντας τις αυτοδιοικητικές περιοχές Κατμαντού, Patan, Bhatapur, KirtipurMandhapur και Timi καθώς και έναν αριθμό μικρών κοινοτήτων. Εντός της κοιλάδας του Κατμαντού το μέγεθος των καταστροφών ήταν ετερογενές και συσσωρρεύθηκαν κυρίως εντός των περιοχών, Gongabu, Dhapasi. Ramkot, στο παλαιό κέντρο της πόλης Bakhtapur, Sankhu και μερικούς θύλακες κατά μήκος του ποταμού Bungamati.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Οργανισμού Ανθρωπίνων Υποθέσεων (OCHA) περισσότεροι από 8800 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους, τουλάχιστόν 21000 άνθρωποι τραυματίστηκαν σοβαρά. Σχεδόν 500 χιλιάδες κατοικίες καταστράφηκαν και 250 χιλιάδες κατοικίες καταστράφηκαν μερικών. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να μείνουν περισσότεροι από 280 χιλιάδες άνθρωποι άστεγοι (OCHA 2015)

Συνολικά, σχεδόν το ένα τρίτο του πληθυσμού του Νεπάλ επηρεάστηκε άμεσα ή έμμεσα.

Η μελέτη PostDisasterNeedsAssesment (υπολογισμού των μετακαστροφικών αναγκών) (PDNA) η οποία διεξήχθη από την κυβέρνηση του Νεπάλ καθώς και οι εκτιμήσεις των ειδικών της Παγκόσμιας Τράπεζας υποδεικνύουν ότι οι επιπτώσεις των καταστροφών εκτιμώνται περίπου στα 7 δις δολάρια (τα οποία είναι περίπου τον ένα τρίτο του ΑΕΠ του Νεπάλ κατά την περίοδο 2013-2014). Από αυτά τα 5,3 δις δολάρια αποδίδονται σε άμεσες ζημιές επί του οικοδομημένου περιβάλλοντος (PDNA 2015).

Η επίδραση του κυρίως σεισμού της 25^{ης} Απριλίου στη Gorkha του Νεπάλ επεκτάθηκε στις γειτονικές περιοχές της Κίνας και της Ινδίας. Πολλά χωριά των περιοχών Gorkha και Sindhupalchok κοντά στο επίκεντρο υπέστησαν σοβαρές ζημιές. Αν και η περιοχή του επικέντρου υπέστη σοβαρότατες σεισμικές δονήσεις, οι περισσότερες επιπτώσεις εντοπίστηκαν κατά μήκος του ρήγματος.

Οι απώλειες συσσωρεύτηκαν εντός των πυκνοκατοικημένων κέντρων των πόλεων Dhading, Nuwakot, Sindhupalchok και Κατμαντού. Σε αυτά τα κέντρα υπήρξαν οι μεγαλύτερες ανθρώπινες απώλειες καθώς και οι μεγαλύτερες υλικές καταστροφές (σχεδόν το 80% των ανθρωπίνων απωλειών συσχετιζομένων με το σεισμικό γεγονός και σχεδόν το 65 – 70% του συνόλου των κατεστραμμένων κτιρίων). Τα ποσοστά θανάτων τα οποία παρατηρήθηκαν στο κέντρο του Κατμαντού (0,07% σε αντίθεση με το 0,48% του σεισμού του 1934, σύμφωνα με τους Sapkotaetal., 2016) και στο κέντρο του Bhaktapur (0,1% σε αντίθεση με το 2% σύμφωνα με τους Sapkotaetal., 2016) ήταν σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού χαμηλότερα από αυτά του σεισμικού γεγονότος του 1934 κλίμακας 8,2 Mw της περιοχής Bihar του Νεπάλ.

Το υψηλότερο ποσοστό θανάτων της τάξης του 1,2% συνέβη στην περιοχή Rasua η οποία βρισκόταν κοντά στο σεισμικό ρήγμα της Gorkha.

Κατά την ώρα του σεισμού, στην κοιλάδα του Κατμαντού ήταν σε λειτουργία ένας μικρός αριθμός οργάνων καταμέτρησης ισχυρών δονήσεων. Δοθείσης της περιορισμένης κάλυψης για ισχυρές εδαφικές δονήσεις, είναι δύσκολο να διαπιστωθεί η έκταση των δονήσεων οι οποίες προκλήθηκαν από τον κυρίως σεισμό και πώς ποικίλει εντός και εκτός της κοιλάδας.

Προκειμένου να συμπληρωθούν οι διαθέσιμες καταγραφές καθώς και να τεθεί μια βάση σύγκρισης μεταξύ των καταγεγραμμένων δονήσεων και των τοπικών καταστροφών, αποδώθηκαν μακροσεισμικές ακολουθίες σε μερικές τοποθεσίες εντός της κοιλάδας.

Επίσης αποδώθηκαν στατιστικές καταστροφών σε γεωλογικές φωτογραφίες χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία ταξινόμησης σεισμικών καταστροφών, EuropeanMacroseismcScale 1998 (EMS-98) (Grunthaletal., 1998). Επελέγησαν πληγέντα και μη πληγέντα κτίρια σε διάφορες περιοχές της κοιλάδας του Κατμαντού εντός ακτίνας ενός χιλιομέτρου από κάθε σταθμό καταγραφής (είτε υπήρχαν είτε όχι σεισμικά δεδομένα). Ένα σημαντικό σημείο της ανάλυσης ήταν ο «παρονομαστής»¨. Δηλαδή μέσα στην περιοχή της

έρευνας καταγράφηκαν αμφότερες κατασκευές με ή χωρίς βλάβη (το άθροισμα των οποίων καλούμε παρονομαστή) και το πλήθος τους ήταν στατιστικά αποδεκτό σύμφωνα με την EMS-98).

Η παρατήρηση αυτή γίνεται εφόσον, ακόμα και σε πρόσφατες μελέτες πεδίου και αναγνωριστικές αποστολές, συχνά ο ερευνητής δεν λαμβάνει υπόψη του τις άθικτες κατασκευές (οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην τεκμηρίωση της πλήρους εικόνας των επιπτώσεων) και έτσι οι στατιστικές ζημιών είναι σπάνιες.

Κατά τον ίδιο τρόπο, οι νεώτερες μακροσεισμικές εργασίες πραγματοποιούνται χωρίς τη γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών και κάποιες φορές στηρίζονται σε μη καταγεγραμμένες περιπτώσεις βλαβών και όχι στις ελάχιστες στατιστικές πληροφορίες βλαβών σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EMS-98.

Μετά τη διερεύνηση της έκτασης δομικών και μη δομικών βλαβών σε περισσότερα από 300 κτίρια, εφαρμόσθηκαν τιμές διαβάθμισης των βλαβών με βάση τον EMS-98 με στατιστική ανάλυση.

Ελήφθησαν υπόψη είτε συσσωρευτικά είτε μέσος όρος των τιμών των βλαβών ανά τοποθεσία.

Η σύγκριση των δομικών βλαβών εντός και περιφερειακά των σταθμών ανίχνευσης ισχυρών δονήσεων έχει αναγνωρισθεί ευρέως ως μια στρατηγική ανάπτυξης καλύτερης κατανόησης αντισεισμικών κανονισμών και δομικής αντοχής. (π.χ. Somervilleetal., 1995; Spenceetal., 1992).

Σε αυτό το σημείο γίνεται μια πρωτογενής σύγκριση των ανώτερων διαθέσιμων τιμών εδαφικών δονήσεων εφόσον μια περισσότερο ποσοτική ανάλυση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη δημοσίευση περισσοτέρων δεδομένων ισχυρών δονήσεων.

Παρά ταύτα εργασίες βασισμένες στον EMS-98, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα προκειμένου να επικαιροποιήσουν τα μοντέλα απώλειας.

7.11.1 Τύποι δομών

Η έρευνα εστιάζεται σε τρεις συγκεκριμένου τύπους κτιρίων

1. **Σκελετός οπλισμού ενισχυμένου σκυροδέματος με μη ενισχυμένη επένδυση τοιχοποιίας**
2. **Μη ενισχυμένους τοίχους αντιστήριξης με πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος (URMslabs)**
3. **Μη ενισχυμένους τοίχους αντιστήριξης με ξύλινο πλαίσιο και ξύλινο πάτωμα (URMtimber).**

Οι δομές πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες βασισμένες στο ύψος των κτιρίων: χαμηλά κτίρια (1-3 ορόφους) και μεσαίου ύψους κτίρια (4-7 ορόφους). Επιλέχτηκαν αυτοί οι τρεις δομικοί τύποι για τη θέση τους εντός και πέριξ της κοιλάδας του Κατμαντού. Ο κάθε τύπος εντάσσεται στη δική του κατηγορία αντοχής. Ο όρος «κατηγορία αντοχής» χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδώσει την αντοχή στις σεισμικές δονήσεις του κάθε τύπου και εκτείνεται από A (χαμηλή ανθεκτικότητα) έως F (υψηλή αντοχή).

Για παράδειγμα χαλικοκατασκευές εντάσσονται στην κατηγορία αντοχής A ενώ οι χαλυβδοκατασκευές είναι σχεδιασμένες να αντέχουν τα σεισμικά φορτία εντάσσονται στην κατηγορία αντοχής F.

Ενώ η μεθοδολογία EMS-98 εκφράζει «πολύ πιθανή κατηγοριοποίηση αντοχής» για κάθε δομικό τύπο, σημειώνεται ότι επίσης εκφράζει μία «πιθανό εύρος» προκειμένου να περιγράψει την αβεβαιότητα που οφείλεται σε παράγοντες όπως «κατάσταση μη-επισκευής, ποιότητα κατασκευής, ανωμαλία οικοδομικής μορφής, επίπεδο αντισεισμικού σχεδιασμού» (EMS-98, σ. 24)

7.11.1.1 Δομές ενισχυμένου σκυροδέματος

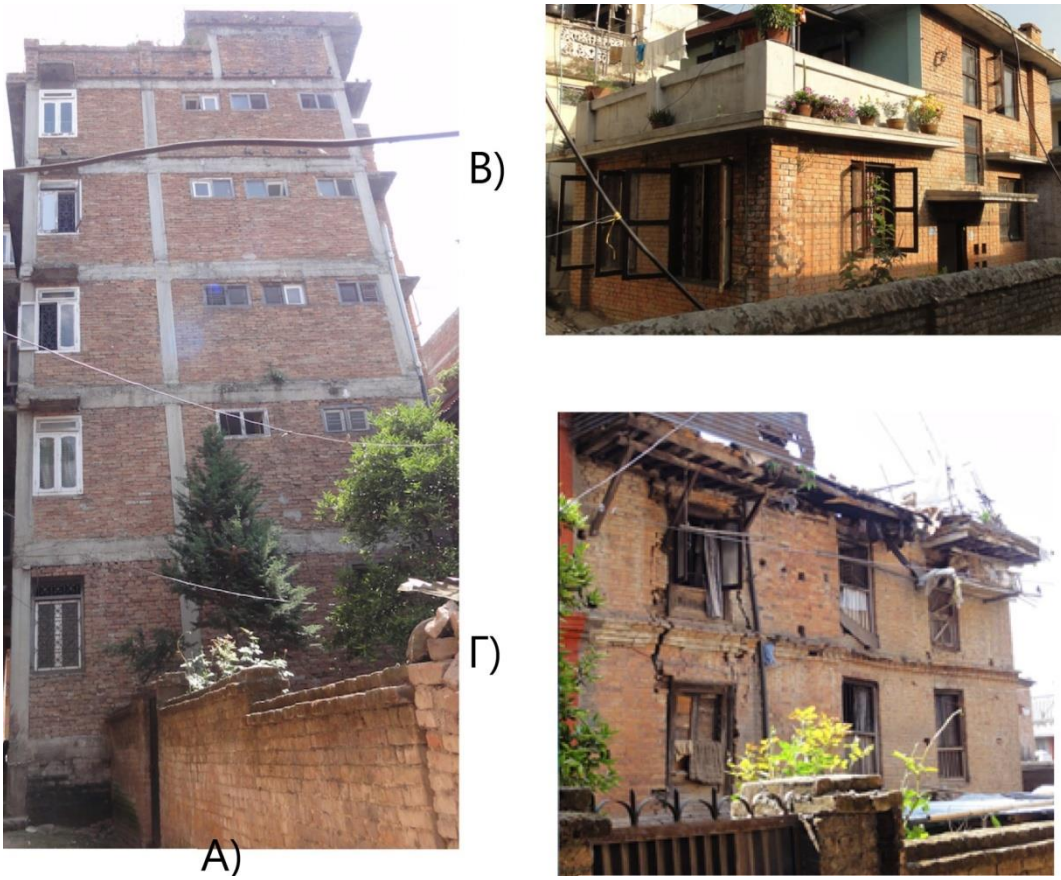
Οι δομές ενισχυμένου σκυροδέματος είναι πολύ διαδεδομένες στο Νεπάλ, σε αστικές και προαστιακές περιοχές (Marhattaetal., 2014). Αυτά τα κτίρια κατασκευάζονται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη οι πλάκες τσιμέντου, οι κολώνες και οι δοκοί διαμορφώνονται, πέφτει το μπετόν και αφήνεται να στεγνώσει. Μη ενισχυμένη τοιχοποιία με τούβλα τοποθετείται μεταξύ των εξωτερικών κολονών, και δένονται με πρέκι τσιμέντου ώστε να δημιουργηθούν λεπτοί τοίχοι μέσα στη τοιχοποιία. Παράδειγμα αυτής της κατασκευής φαίνεται στην εικόνα 178 (Α).

Οι κατασκευές ενισχυμένου σκυροδέματος στο Νεπάλ σχεδιάζονται συνήθως για κάποια αντισεισμική προστασία (είτε ακολουθώντας τους υποχρεωτικούς εμπειρικούς κανόνες του Νεπάλ είτε τον εθνικό αντισεισμικό κώδικα).

Αυτό εξαρτάται από τις λεπτομέρειες του οικοδομικού σχεδίου και περιλαμβάνουν το πλαίσιο αντοχής ποικίλων εντάσεων σεισμικών δονήσεων.

Τα κοινά παραδείγματα χαμηλού έως μετρίου βαθμού ζημιών για τις κατασκευές ενισχυμένου σκυροδέματος περιλαμβάνουν: ρωγμές στους τοίχους γωνίας 45 μοιρών, κάθετες τομές κατά μήκος του πρεκιού και ζημιές σε άδετους τοίχους.

Κοινά παραδείγματα μετρίου ως υψηλού βαθμού ζημιών περιλαμβάνουν αστοχίες/κλίσεις της τοιχοποιίας και ρωγμές σε συνδέσμους ενισχυμένων δοκών. Χαρακτηριστικά υψηλών βλαβών περιλαμβάνουν αστοχίες στους συνδέσμους δοκού και κολώνας και ακόλουθη κατάρρευση ενός ή περισσοτέρων ορόφων εξ αιτίας ανεπαρκούς ενίσχυσης ή/και κακής κατασκευής.



Εικόνα 178: (Α) Ένα πλαίσιοοπλισμένου σκυροδέματος με κτίριο τοιχοποιίας πλήρωσης: τάξη τρωτότητας C. (Β) Μη ενισχυμένη τοιχοποιία με πλάκα RC: τάξη τρωτότητας C. (Γ) Τυπική μη ενισχυμένη τοιχοποιία με ξύλινο Δάπεδο: τάξη τρωτότητας Β (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

7.11.1.2 Δομές με μη ενισχυμένους τοίχους αντιστήριξης με πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος (URM slabs)

Κατασκευές οι οποίες περιλαμβάνουν μη ενισχυμένες πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται ευρέως στο Νεπάλ. Για να κατασκευασθούν αυτά τα κτίρια, οι μη ενισχυμένοι τοίχοι ενός ορόφου οικοδομούνται με συμπαγή ορθογώνια τούβλα τα οποία δένονται με πρέκι τσιμέντου. Επειδή αυτοί οι τοίχοι φέρουν βαρύ φορτίο είναι γενικώς παχύτεροι (2 τούβλα πλάτος) από τους μη ενισχυμένους οι οποίοι κατασκευάζονται στον προηγούμενο τύπο οικοδομής.

Κατόπιν τοποθετείται η ενισχυμένη πλάκα στην περίκλειστη περιοχή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε όροφο του κτιρίου.

Οι παχείς και ευαίσθητοι μη ενισχυμένοι φέροντες τοίχοι παραμένουν το κυρίως οικοδομικό σύστημα αντοχής οριζόντιων σεισμικών δονήσεων (SinhaandPrezev, 2014).Ένα παράδειγμα τέτοιας κατασκευής φαίνεται στην εικόνα 178(Β).

Παρά ορισμένες αδυναμίες στο κατασκευαστικό σύστημα ή/και στην κακή ποιότητα των δομικών υλικών, αυτός ο τύπος κατασκευής υπερέχει της μη ενισχυμένης κατασκευής με ξύλο (Εικ 178(Β) και (Γ)). Συνεπώς αυτός ο τύπος κατασκευής κατατάσσεται στην κατηγορία αντοχής C της EMS-98 .

Τα κοινά παραδείγματα χαμηλού έως μετρίου βαθμού ζημιών για τις κατασκευές με πλάκες μη ενισχυμένου σκυροδέματος περιλαμβάνουν ρωγμές γωνίας 45 μοιρών μέσω των τοίχων και βλάβες σε άδετους τοίχους.

Κοινά παραδείγματα μετρίου ως υψηλού βαθμού ζημιών περιλαμβάνουν αστοχίες με κατακόρυφες ρωγμές κατά μήκος της ένωσης μεταξύ δύο τοίχων στις γωνίες των κτιρίων.

Παραδείγματα υψηλών βλαβών περιλαμβάνουν αστοχίες τοίχων και ακόλουθη κατάρρευση ενός ή περισσοτέρων ορόφων.

7.11.1.3 Μη ενισχυμένοι τοίχοι αντιστήριξης με ξύλινο πλαίσιο και ξύλινο πάτωμα (URM timber)

Οι κατασκευές όπως οι παραπάνω ή Nawari απαντώνται πολύ συχνά στο Νεπάλ και ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές και παλιές γειτονιές των πόλεων. (D' AyalaandBajracharya, 2014). Αυτά τα κτίρια κατασκευάζονται από φέροντες μη ενισχυμένους τοίχους πάχους δύο τούβλων οι οποίοι αποτελούνται από ορθογώνια τούβλα τα οποία είναι δεμένα με πρέκι από λάσπη. Μόλις κάθε όροφος τοποθετηθεί, ξύλινα πλαίσια εισάγονται στο κενό μεταξύ των τοίχων προκειμένου επάνω στα οποία στηρίζονται οι ξύλινες πλάκες του πατώματος. Κομμάτια ξύλου επίσης χρησιμοποιούνται για υποστήριξη της οροφής και να διατηρηθούν ανοίγματα για πόρτες και παράθυρα. Ενώ τα κομμάτια ξύλου χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν την συνολική ελαστικότητα του κτιρίου, δεν δένονται μεταξύ τους για αντισεισμικούς λόγους προκειμένου να σχηματίσουν ένα αντισεισμικό σύστημα. Οι παχείς μη ενισχυμένοι φέροντες την τοίχοι παραμένουν τα μοναδικά ισχυρά οικοδομικά στοιχεία τα οποία ανθίστανται των οριζόντιων σεισμικών δονήσεων. Παράδειγμα απεικονίζεται στην εικόνα 178(Γ).

Τα κοινά παραδείγματα χαμηλού έως μετρίου βαθμού ζημιών περιλαμβάνουν ρωγμές γωνίας 45 μοιρών στους τοίχους.

Τα κοινά παραδείγματα μετρίου έως υψηλού βαθμού ζημιών για τις κατασκευές περιλαμβάνουν μερική αστοχία στις γωνίες της ένωσης μεταξύ τοίχων.

Τα κοινά παραδείγματα υψηλού βαθμού ζημιών για τις κατασκευές περιλαμβάνουν αστοχίες και εν δυνάμει καταρρεύσεις ενός ή περισσοτέρων ορόφων.

Δοθεισών αυτών των αδυναμιών στο δομικό σύστημα και της κακής ποιότητας των δομικών υλικών αυτός ο τύπος κατασκευής κατατάσσεται στην κατηγορία αντοχής Β της EMS-98.

7.11.2 Απόδοση τιμών έντασης

Η απόδοση μακροσεισμικής έντασης χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία EMS-98 κατ' αρχάς απαιτεί εξοικείωση με έναν ή περισσότερους τους δομικούς τύπους . Η μεθοδολογία EMS-98 διαθέτει έναν πίνακα (σ. 14) για να αποδώσει μία «κατηγοριοποίηση αντοχής» σε καθένα από 15 διαφορετικούς δομικούς τύπους από χαλικοκατασκευές έως χαλυβδοκατασκευές.

Όταν προσδιορισθεί η ο επιθυμητός τύπος και αποδοθεί στην αντίστοιχη κατηγορία αντοχής, πρέπει να γίνει μια οπτική επιθεώρηση βλαβών για ένα επαρκές στατιστικό δείγμα αυτών των δομικών τύπων στην κοντινή περιοχή.

Ερευνώνται ενδείξεις από τις προφανείς (κατάρρευσης τμήματος ενός κτιρίου) έως λιγότερο προφανείς (μια δεξαμενή στην οροφή ενός κτιρίου η οποία έχει υποστεί κλίση). Αυτά τα δομικά και μη δομικά στοιχεία καταγράφονται και χρησιμοποιούνται για να αποδοθεί συγκεκριμένος βαθμός ζημιάς (EMS-98 σ. 15 για ξύλινες κατασκευές, σ. 16 για ενισχυμένο σκυρόδεμα). Αυτά τα στοιχεία έχουν εύρος τιμών από Νο 1 (αμελητέα έως ελαφρά ζημιά) έως Νο5 (ολική καταστροφή).

Όταν το μέγεθος του δείγματος ενός δομικού τύπου είναι επαρκές για να αντιπροσωπεύσει τον πληθυσμό αυτού του δομικού τύπου, τότε μπορεί να αποδοθεί μια μακροσεισμική ένταση σύμφωνα με τη μεθοδολογία EMS-98

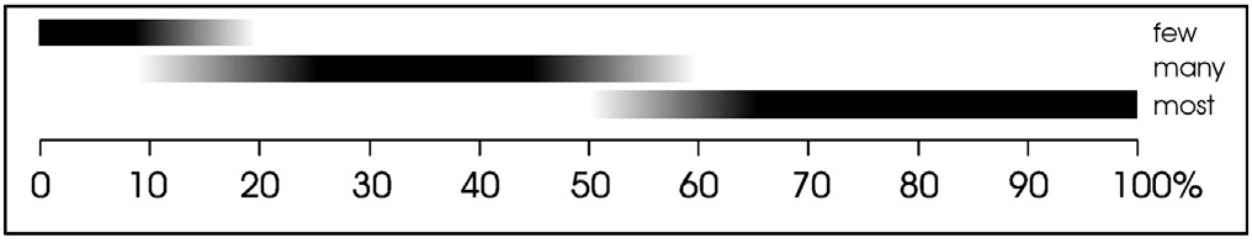
Για παράδειγμα, αν «πολλά» κτίρια κατηγορίας αντοχής Β έχουν υποστεί ζημιές βαθμού 4, ενώ «λίγα» ενταχθούν στην κατηγορία ζημιών βαθμού 5, τότε αποδίδεται ένταση IX για την προς μελέτη περιοχή.

Οι όροι «λίγα», «πολλά» και «τα περισσότερα» σκοπίμως έχουν ευέλικτο εύρος τιμών, όπως προσδιορίζονται στην εικόνα 179.

Για παράδειγμα ο όρος «λίγα» αντιστοιχεί στο 15% ή λιγότερο από το σύνολο των κτιρίων. Όμως το άνω όριο δεν είναι σταθερό, και μπορεί να φθάσει το ποσοστό 20%. Το ίδιο συμβαίνει και με το κάτω όριο του όρου «πολλά», επικεντρώνεται περίπου στο 15% αλλά έχει εύρος από 10 έως 20%. Το ανώτατο όριο του όρου «πολλά» (άρα και το κατώτερο του όρου «περισσότερα») κυμαίνεται στο 55% αλλά εκτείνεται από 50 έως 60%. Η σκοπίμως κατά προσέγγιση των ορίων αυτών δείχνει ότι τα όρια δεν προσδιορίζονται με ακρίβεια. Ο λόγος για την μη συγκεκριμένη απόδοση είναι διττός.

Α. Αναγνωρίζει τις δυσκολίες και τις μη σκόπιμες επιπτώσεις του ακριβούς προσδιορισμού των ορίων

Β. Επιτρέπει τη γνωμοδότηση εμπειρογνωμόνων για περιπτώσεις στις οποίες μια συγκεκριμένη ποσότητα κτιρίων εμπίπτει σε μια αλληλοκαλυπτόμενη περιοχή τιμών, τότε ο μελετητής θα πρέπει να εντάξει στη μία ή την άλλη κατηγορία λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις από την ένταξη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με δεδομένα από κάποια άλλη πηγή για την ίδια περιοχή .



Εικόνα 179: Κλίμακα"Ορισμοίποσότητας"(McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

7.11.3 Απόδοση έντασης από απόσταση

Η απόδοση της έντασης σύμφωνα με τον EMS-98 παραδοσιακά διενεργείται επί τόπου μετά από ένα καταστρεπτικό σεισμικό γεγονός. Όμως δεδομένα τα οποία αφορούν πληγέντα κτίρια είναι δυσεύρετα. Κτίρια τα οποία παθαίνουν ζημιές ανακαινίζονται, επισκευάζονται ή κατεδαφίζονται σε διάφορες χρονικές περιόδους οι οποίες εξαρτώνται από την τοπική έκταση της καταστροφής, την αναμονή μετασεισμών και από διάφορους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Έχοντας υπόψη ότι τα απαραίτητα δεδομένα για την απόδοση της έντασης είναι ευμετάβλητα, είναι αναγκαία η αποστολή διερευνητικών ομάδων οι οποίες θα επιθεωρήσουν όσα περισσότερα είναι δυνατόν και σε όσο το δυνατόν σύντομο χρονικό διάστημα μετά το σεισμικό γεγονός.

Αλλά για να εμπλακεί κάποιος σύμφωνα με τις απαιτούμενες προϋποθέσεις σε έναν οπτικό έλεγχο των πληγέντων κτιρίων απαιτεί χρόνο. Το γεγονός ότι οι μηχανικοί συχνά μεταβαίνουν στον τόπο του γεγονότος ως εθελοντές δεν τους επιτρέπει να μείνουν εκεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

7.11.4 Παράδειγμα διαδικασίας απόδοσης εντάσεως

7.11.4.1 Πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος

Από μελέτη για την καταγραφή των βλαβών του σεισμικού γεγονός έχουν συμπεριληφθεί 42 κτίρια κατασκευής Πλαισίου Ενισχυμένου Σκυροδέματος μικρού και μεσαίου ύψους.

Εικόνα 180: Ρωγμές σε μη δομικό τοίχο τοιχοποιίας στο ισόγειο [βλάβη EMS-98 Βαθμού 2] από δομή πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα χαμηλής ανύψωσης (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

Το παράδειγμα της εικόνας 180 είναι μια τριώροφη κατοικία (μικρού ύψους).

Η διαδικασία απόδοσης εντάσεως ξεκινά με την κατηγοριοποίηση βασισμένη στην EMS-98.

Το ενισχυμένο σκυρόδεμα συνιστά το πρώτο δομικό σύστημα αυτού του τύπου κατασκευών. Επειδή υπάρχει έλλειψη εντισεισμικού σχεδιασμού στην περιοχή έχει επιλεχθεί γι' αυτήν την περίπτωση να χρησιμοποιείται ως παράδειγμα το πλαίσιο χωρίς αντισεισμικό σχεδιασμό.

Αυτή η επιλογή δείχνει ότι οι κατασκευές πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος εμπίπτουν στις κατηγορίες τρωτότητας A – D (vulnerabilityclass) με πιο πιθανή την κατηγορία C.

Αυτή η χαμηλού ύψους κατασκευή εμφανίζεται να έχει ανταποκριθεί καλώς στο σεισμικό γεγονός και έχει υποστεί μόνο μη δομικές βλάβες.

Έχουν σχηματισθεί μεγάλες οριζόντιες και γωνίας shear 45μοιρών ρωγμές σε μια τοιχοποιία στο ισόγειο. Επιπλέον μεγάλα τμήματα επιχρίσματος έχουν πέσει. Αλλά οι βλάβες δεν είναι εκτεταμένες και το δομικό πλαίσιο των κτιρίων έχει παραμείνει άθικτο.

Βάσει των παραπάνω κατατάχθηκαν οι δομές στην κατηγορία βλαβών 2.

Η διαδικασία απόδοσης κατηγορίας βλαβών επαναλήφθηκε και στα 31 μικρού ύψους κατασκευές ενισχυμένου σκυροδέματος στην περιοχή Ράμκοτ.

Εφόσον η κάθε μια από αυτές τις κατασκευές έχει δομηθεί με ενισχυμένο πλαίσιο σκυροδέματος χωρίς αντισεισμική προστασία, όλη η ομάδα κτιρίων αυτή αποδίδεται σε κατηγορία τρωτότητας C.

Υπάρχουν δείγματα κατασκευών που αναφέρονται στο 32% του συνόλου των κτιρίων τα οποία έχουν υποστεί βλάβες κατηγορίας 2. Αυτά τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται επίπεδο έντασης VIII η οποία αποδίδεται στην περιοχή Ράμκοτ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η μέτρηση της έντασης λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία των κατασκευών αποδίδοντας μια κατηγορία τρωτότητας σε κάθε ένα από τα δείγματα δομών.

Συνεπώς αυτή η απόδοση έντασης είναι ανεξάρτητη του δομικού τύπου και επομένως μπορεί να εφαρμοσθεί στην υπό μελέτη περιοχή Ράμκοτ.

Για να διασφαλισθεί μια ακριβής απόδοση έντασης για μια δεδομένη περιοχή, αποδίδουμε ανεξάρτητα μια τιμή έντασης βασισμένη σε κάθε δείγμα (δείγμα τουλάχιστον 10 κατασκευών) η οποία αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο τύπο κατασκευής που υπάρχει στην περιοχή.

Στην περίπτωση του Ράμκοτ, μεσαίου ύψους κατασκευές ενισχυμένου σκυροδέματος (αποδιδόμενη ένταση VII) και μη ενισχυμένες ξύλινες κατασκευές (αποδιδόμενη ένταση XI) επίσης ανταποκρίνονταν με την συγκεκριμένη απόδοση.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος εντάσεων της Ράμκοτ βασισμένο στον αριθμό των κατασκευών σε κάθε δομικού τύπου δείγμα (πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος, μεσαίο): 11 κτίρια πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος, μεσαίου ύψους, 31 κτίρια πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος, μικρού ύψους και 15 κτίρια μη ενισχυμένου ξύλινου πλαισίου. Το αποτέλεσμα του μέσου όρου τιμής τιμής εντάσεων περίπου VIII για την περιοχή Ράμκοτ.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μια από τις υπόλοιπες 8 περιοχές (Lainchor, KATNP, PTN, TVU, THM, Congabu, Swayambh, Bakhtapur).

7.11.4.2 Πλάκες μη ενισχυμένου πλαισίου URMslab

Σε μια περιοχή κοντά στον σεισμικό σταθμό TVU στην ευρύτερη περιοχή του Κατμαντού καταγράφηκαν 8 κτίρια πλακών μη ενισχυμένου πλαισίου τα οποία υπέστησαν ποικίλου βαθμού βλάβες κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος της Gorkha. Το παράδειγμα της εικόνας 181 κτιρίων πλακών μη ενισχυμένου πλαισίου, είναι μια τετραώροφη οικία.

Εικόνα 181: Μια μεσαία ανυψωμένη κατασκευή τοιχοποιίας με τοιχοποιία με πλάκα RC (URMslab) κοντά στο σεισμικό σταθμό TVU που εμφανίζει ζημιά βαθμού 3 (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

Το κτίριο αυτό αποδίδεται σε μια κατηγορία «μη ενισχυμένου πλαισίου με επίπεδα ενισχυμένου σκυροδέματος». Η συγκεκριμένη κατασκευή αποδίδεται σε κατηγορία τρωτότητας C.

Ενώ πολλά κτίρια κατασκευής πλακών μη ενισχυμένου πλαισίου ανταποκρίθηκαν καλώς στο σεισμικό γεγονός, το κτίριο του παραδείγματος της εικόνας 181 υπέστη μέτριες βλάβες. Μια μεγάλη κατακόρυφη ρωγμή διαπερνά τη δεξιά πλευρά του τετάρτου ορόφου ενώ ο μη δομικός αψιδωτός τοίχος της σκεπής (gablewall) κατέρρευσε μερικώς στο εφαπτόμενο κτίριο. Το συγκεκριμένο κτίριο κατατάσσεται στην κατηγορία βλαβών 3.

Με τον ίδιο τρόπο αποδίδονται κατηγορίες βλαβών σε κάθε μια από τις 8 κατασκευές πλακών μη ενισχυμένου πλαισίου κοντά στον σταθμό TVU. Κάθε κτίριο σε αυτό το δείγμα έχει κατασκευασθεί από πλάκες ενισχυμένου σκυροδέματος με υποστήριξη από φέροντες τοίχους μη ενισχυμένου πλαισίου. Σε όλα αυτά τα κτίρια αποδίδεται κατηγορία τρωτότητας C.

Συμπερασματικά, 7 στα 8 (88%) κτίρια του δείγματος της κατηγορίας τρωτότητας C έχουν υποστεί ζημιές κατηγορίας 1 δηλαδή το μεγαλύτερο τμήμα του δείγματος. Εν τω μεταξύ 1 στα 8 ή λιγότερα (12%) κτίρια έχουν υποστεί ζημιές κατηγορίας 3 (εικόνα 7). Αυτά τα αποτελέσματα αποδίδονται σε επίπεδο εντάσεως VII. Όμως δεδομένης της μικρής ποσότητας δειγμάτων η αξιολόγηση είναι λιγότερο ακριβής. Ο μοναδικός τύπος κτιρίων στην περιοχή TVU με επαρκές μέγεθος δείγματος είναι τα κτίρια πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος (μεσαίου ύψους) στα οποία έχει γίνει απόδοση έντασης μεγέθους XII στην περιοχή του TVU.

7.11.4.3 Μη ενισχυμένες ξύλινες κατασκευές URM timber

Στην πόλη Bakhtapur η οποία βρίσκεται στην κοιλάδα του Κατμαντού ενσωματώθηκαν 42 κτίρια, μη ενισχυμένης ξύλινης τοιχοποιίας . Το κτίριο, στο παράδειγμα της εικόνας 182 είναι μια τετραώροφη οικία μη ενισχυμένης ξύλινης τοιχοποιίας . Το κτίριο αυτό είναι "μη ενισχυμένη κατασκευή με τοιχοποιία από τούβλα / πλίνθους" (unreinforcedwithmanufacturedStoneunits) Αυτό υποδηλώνει ότι οι μη ενισχυμένες ξύλινες κατασκευές κατατάσσονται σε κατηγορία τρωτότητας A έως C, με πιο πιθανή τιμή την B. Ενώ αυτός ο τύπος κατασκευής ενσωματώνει ποικίλες ποσότητες ξυλείας, η οποία ενισχύει την ελαστικότητα (dyctility), βασίζεται πρωτίστως σε μια παχιά μη ενισχυμένη φέρουσα τοιχοποιία προκειμένου να ανθίσταται στις σεισμικές δυνάμεις. Συνεπώς η πιο πιθανή αποδιδόμενη κατηγορία τρωτότητας είναι η κατηγορία B.

Εικόνα 182: Χαμηλό κτίριο ξυλείας URM στο Μπακταπούρ που παρουσιάζει ζημιά Βαθμού 4 (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

Το δείγμα αυτού του μη ενισχυμένου ξύλινου κτιρίου έχει υποστεί σοβαρές βλάβες από τις σεισμικές δονήσεις και ένα τμήμα του κτιρίου έχει καταρρεύσει τελείως και βάσει των πληροφοριών από την εικόνα 182 αποδίδουμε στο κτίριο κατηγορία βλαβών 4.

Επίσης γίνεται παράθεση των εικόνων 183 και 184 για να δείξουμε τα επιπλέον επίπεδα βλαβών στις δομές των κτηρίων στις οποίες συμβάλει και η ανθρώπινη παρέμβαση.

Εικόνα 183: Προσωρινή στήριξη στη θέση για ένα κατεστραμμένο μη ενισχυμένο κτίριο τοιχοποιίας με ξύλινο δάπεδο (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

Εικόνα 184: Μια προσπάθεια να κλείσει η περιοχή γύρω από ένα βαριά κατεστραμμένο κτίριο στο Μπακταπούρ. Αυτό το εγκαταλελειμμένο κτίριο υπέστη μερική κατάρρευση και στέκεται επισφαλώς, παρουσιάζοντας ζημιά Βαθμού 4 (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

7.11.5 Ανάλυση και αποτελέσματα

7.11.5.1 Πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος (μεσαίου βαθμού)

Από το σύνολο 132 κτιρίων τα οποία ελέγχθηκαν από τη μελέτη τα περισσότερα αποτελούνταν από 4 έως 7 ορόφους, κατασκευασμένα από από πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος . Αυτά τα κτίρια ανταποκρίθηκαν πολύ καλά όπως και η πλειοψηφία των κτιριακών δομών οι οποίες αποδόθηκαν στην κατηγορία ζημιών 1.

Το υποσύνολο των κτιρίων με πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος (μεσαίου βαθμού) στις κεντρικές περιοχές της κοιλάδας του Κατμαντού, κοντά στους σεισμικούς σταθμούς LAINCHOR, PTN, TVU και THM ανταποκρίθηκαν ελαφρώς καλύτερα από τον γενικότερο πληθυσμό των κτιρίων αυτής της κατηγορίας.

7.11.5.2 Πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος (χαμηλά κτίρια)

Τα 76 κτίρια πλαισίου ενισχυμένου σκυροδέματος με 1 έως 3 ορόφους τα οποία συμπεριελήφθησαν σε αυτή τη μελέτη επίσης ανταποκρίθηκαν καλώς με τις περισσότερα από τα κτίρια του δείγματος να έχουν υποστεί ζημιά κατηγορίας 2 ή μικρότερη κατά τη διάρκεια του σεισμού. Τα κτίρια ενισχυμένου σκυροδέματος (χαμηλό) στα προάστια της κοιλάδας του Κατμαντού (συμπεριλαμβανομένων των περιοχών Ramkot, δυτικά του Swayambhu, και Congabu) επίσης ανταποκρίθηκαν σχετικά καλώς.

7.11.5.3 Πλακών μη ενισχυμένου σκυροδέματος

Συνολικά 33 από τις κατασκευές αυτής της κατηγορίας συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση. Αυτά τα κτίρια επίσης ανταποκρίθηκαν ευλόγως καλά κατά τη διάρκεια του σεισμού με την πλειοψηφία αυτού του τύπου των κτιρίων να υφίσταται ζημιές βαθμού 1. Εξ αιτίας του μικρού μεγέθους των δειγμάτων από άλλες περιοχές, η ανάλυση περιορίστηκε σε δεδομένα από τις περιοχές κοντά στους σταθμούς Rmkot, Lainchor, PTN και TVU.

7.11.5.4 Μη ενισχυμένου σκυροδέματος ξύλινα

Τα κτίρια αυτής της κατηγορίας υπέστησαν σημαντικές ζημιές σε μερικές τις υπό μελέτη περιοχές, με πολλά από αυτά να υφίστανται ζημιές κατηγορίας 3 ή μεγαλύτερης.

Επέδειξαν την χειρότερη ανταπόκριση στον σεισμό.

Οι κατασκευές αυτού του τύπου επίσης επέδειξαν την μεγαλύτερη ποικιλία ανταπόκρισης από τις άλλες τρεις κατηγορίες.

Αυτή η κατηγορία κτιρίων στις έξω περιοχές των Ramkot, Bakhtapur και ΝΔ της περιοχής, Swayambhu καθώς και κοντά στον σταθμό KATNP υπέστησαν τα ισχυρότερα πλήγματα.

Η ενσωμάτωση ποσότητας ξυλείας σε αυτές τις κτιριακές κατασκευές είχε ως αποτέλεσμα μια ελαστικότητα η οποία αποδείχθηκε ζωτικής σημασίας στην αποφυγή καταστρεπτικών καταρρεύσεων σε κάποιες περιπτώσεις (επέτρεψε την έξοδο από τα κτίρια με αποτέλεσμα να σωθούν ζωές)

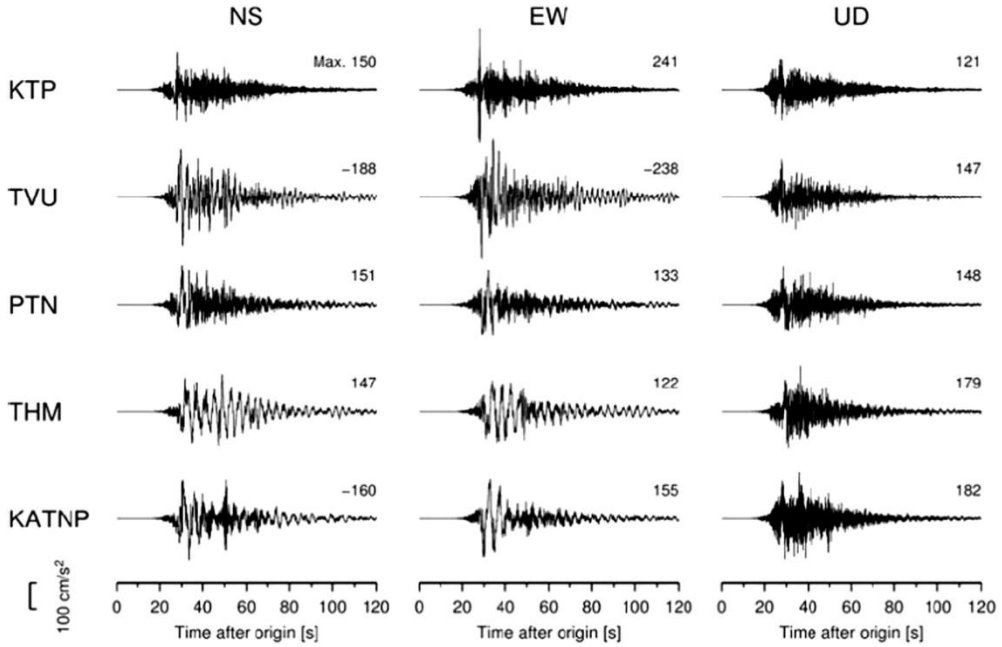
Για παράδειγμα, αυτή η ελαστικότητα ίσως να ήταν ο λόγος εκ του οποίου το κτίριο της εικόνας 182 κατέρρευσε μερικώς.

7.11.5.5 Απόδοση κατασκευών εντός 1,5 χλμ. από τους σταθμούς PTN&TVU ως ενιαία περιοχή μελέτης

Κατά την απόδοση των οικοδομών στον πλησιέστερο σταθμό παρατηρήθηκε ότι μερικές από τις φωτογραφίες είχαν ληφθεί σε σχετικά κοντινή απόσταση με τους εν λόγω σταθμούς. Αντί να δοθεί μια συμβατική απόδοση η οποία θα διαχώριζε το δείγμα, παρατηρήθηκε ότι μια ομάδα κτιρίων ευρίσκετο κατά μήκος ενός ποταμού όπως και ο σταθμός TVU. Χωρίς να προσδιορισθεί ακριβώς η τοποθεσία και η κατηγορία της περιοχής, ελήφθη υπόψη ότι τα κτίρια είχαν κατασκευασθεί στην περιοχή αυτή με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά του σταθμού TVU. Αντιστρόφως μια άλλη ομάδα κτιρίων εντοπισμένη περίπου 1 χιλιόμετρο από την όχθη του ποταμού είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με τον σταθμό PTN. Ως εκ τούτου εκτιμήθηκε ότι αυτές οι κατασκευές αποτίθενται σε εδαφικές συνθήκες παρόμοιες με αυτές του σταθμού PTN.

7.11.5.6 Αποδόσεις εντάσεων

Όπως απαιτείται από την μεθοδολογία EMS-98 μακροσεισμικές εντάσεις αποδόθηκαν για κάθε μια από τις περιοχές της έρευνας, 6 από τις οποίες περιλαμβάνουν σεισμικούς σταθμούς όπως δείχνει η εικόνα 185.



Εικόνα 185: Ισχυρά ρεκόρ κίνησης εδάφους για σεισμό της Gorkha M7.8 στο Νεπάλ και καταγράφονται στην κοιλάδα του Κατμαντού (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

Σημαντικές παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν βάσει των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων.

Κατ' αρχάς λαμβάνοντας υπόψη την εγγύτητα των 9 τοποθεσιών μεταξύ τους και την μεγάλη απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού σε σχέση με την κοιλάδα του Κατμαντού υπάρχει αρκετή ετερογένεια στα αποτελέσματα. Από τις 9 περιοχές έρευνας, οι περιοχές Gongabu, Bhaktapur και Ramkot εμφανίζονται να έχουν υποστεί τη μεγαλύτερη καταστροφή. Οι γεωλογικές, τοπογραφικές και εδαφικές συνθήκες (π.χ. το βάθος των ιζημάτων, ο σχηματισμός τους, η εγγύτητα στο ποτάμι, η επιρροή από το σχήμα της λεκάνης) ποικίλουν από μια τοποθεσία σε άλλη. π.χ η περιοχή Ramkot κείται κατά μήκος του πρανούς στα δυτικά της κοιλάδας του Κατμαντού. Όμως η περιοχή Bakhtapur βρίσκεται κοντά στο κέντρο της λεκάνης σε σχετικά επίπεδο έδαφος. Είναι πιθανό ότι οι επιπτώσεις στη λεκάνη απορροής όξυναν τη σεισμική δόνηση στην περιοχή του Bakhtapur και συνέβαλαν στην καταγραφή των μεγάλων εντάσεων στην περιοχή.

Εκτός από αυτούς τους εδαφικά σχετιζόμενους παράγοντες, ένας από τους πιθανότερους παράγοντες στη δυσανάλογη απόδοση των υψηλών ζημιών των κτιρίων στην περιοχή του Bakhtapur οφείλεται στην παλαιότητά τους. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν πολλά κτίρια μη ενισχυμένου σκυροδέματος με ξύλο τα οποία κατά μέσο όρο είναι γηραιότερα από αυτά που βρίσκονται σε άλλες περιοχές της κοιλάδας του Κατμαντού. Η ξυλεία σε αυτά τα κτίρια έχει διαβρωθεί με την πάροδο του χρόνου, και τυπικά έχει ελλιπή αντισεισμική προστασία. Και οι δύο αυτοί παράγοντες μειώνουν κατά πολύ την ελαστικότητα αυτών των κατασκευών. Είναι εύκολα κατανοητό ότι αυτό το γεγονός συνετέλεσε στο σχετικά μεγάλο βαθμό ζημιών που σημειώθηκε στην περιοχή του Bakhtapur. Το συγκεκριμένο γεγονός υποδηλώνει επίσης ότι κάποια παλαιότερα κτίρια αυτής της κατηγορίας που συμπεριλαμβάνονται σε αυτή τη μελέτη μπορεί να έχουν διαχωρισθεί σε ένα μικρό δείγμα κτιρίων μη ενισχυμένου σκυροδέματος με ξυλεία σε κατηγορία σεισμικής αντοχής Α.

7.11.5.7 Η επίδραση των μακροσεισμικών δεδομένων στις εκτιμήσεις απωλειών

Η απόδοση των μακροσεισμικών εντάσεων προσδίδει ένα εύρος αντικειμενικών περιορισμών για την ποσοτικοποίηση των σεισμικών επιπτώσεων και των ζημιών, συσχετίζοντας τις καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις με τις ζημιές, συμπληρώνοντας τα κενά μεταξύ των σταθμών και παρέχοντας πληροφορίες για την εκτίμηση των ζημιών.

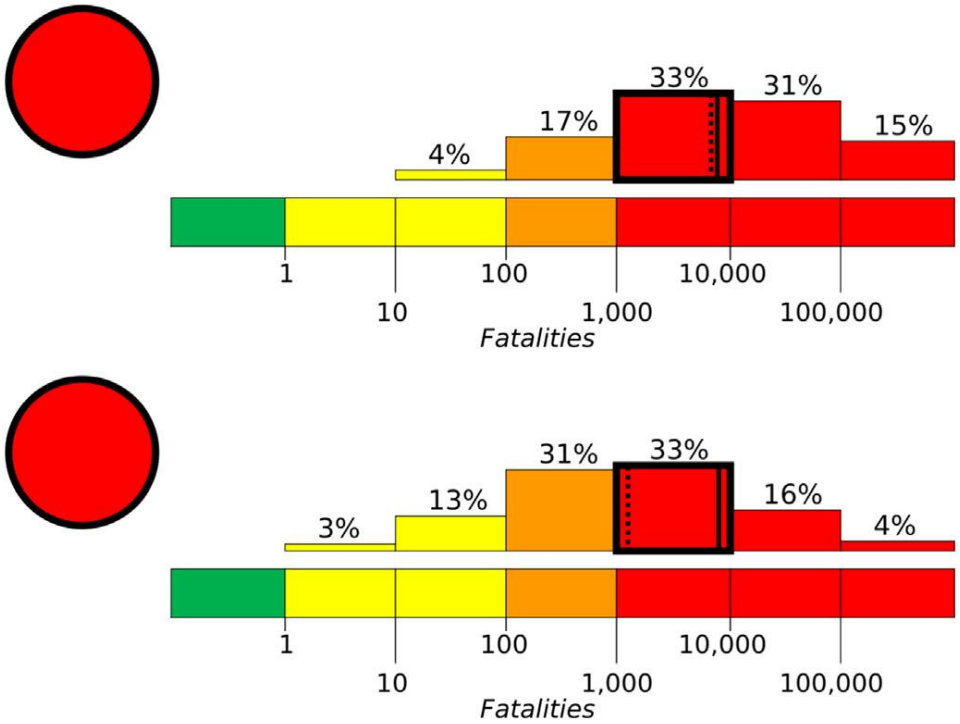
Το σύστημα USGSShakemap συμπληρώνει τις εκτιμώμενες και καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις με ιστορικά δεδομένα εντάσεων για την τροφοδοσία του μοντέλου απωλειών και με τα τρέχοντα μακροσεισμικά δεδομένα για την γρήγορη εκτίμηση των απωλειών (πχ. Το σύστημα PAGER).

Για να ποσοτικοποιηθεί η σημαντικότητα των λεπτομερών αποδόσεων έντασης έγινε επανυπολογισμός των ShakeMaps και ελήφθησαν υπόψη οι εκτιμήσεις του συστήματος PAGER προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων απωλειών που προέκυψαν με τα συνολικά αποτελέσματα της περιοχής.

Μεγάλη πλειοψηφία αυτών των αναφορών προέρχονται από τη βόρεια Ινδία και πολλές επικεντρώνονται στις μακροσεισμικές επιπτώσεις σε ανθρώπους, αντικείμενα και στη φύση.

Αντί να ληφθούν υπόψη οι ποσοτικές αναφορές με ορίζοντα μία περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο EMS-98, κεφ 1.2.3. , αποδώθηκαν οι EMS-98 εντάσεις στο σημείο της κάθε καταγραφής. Συνολικά οι αποδόσεις εντάσεων των MEA15 είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα USGSShakeMap.

Σύγκριση από τοποθεσία σε τοποθεσία καταδεικνύει ότι οι αποδόσεις των εντάσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις συγκρινόμενες με αυτές αυτής της μελέτης ή είναι μικρότερες. Ως αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις των απωλειών οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση των εντάσεων είναι σχεδόν μια τάξη μικρότερου μεγέθους από αυτές που χρησιμοποιούνται στις αποδόσεις του ShakeMap (εικ. 186).



Εικόνα 186: Το ιστόγραμμα της εκτιμώμενης θνησιμότητας από σεισμό Gorkha κυμαίνεται από το σύστημα PAGER για τα ίδια μοντέλα πρόβλεψης, αλλά ποικίλες εντάσεις περιορισμού. Κορυφή: οι εντάσεις αυτής της μελέτης με διάμεσο θάνατο είναι 7600. Κάτω: με βάση την ένταση απώλειες, με διάμεσο 1200 θανάτους (McGowan et al_EMS-98 scale within the Kathmandu valley for the 2015 M7.8 Gorkha%2c Nepal earthquake, 2016).

7.11.6 Περιορισμοί

Ενώ η παρούσα μελέτη αποτελεί εφαρμογή της μεθοδολογίας EMS-98 δεν σημαίνει ότι δεν υπήρξαν και περιορισμοί.

Σκοπός ήταν να αναλυθούν φωτογραφίες κτιρίων χαμηλού και μεσαίου (ύψους) ενισχυμένου σκυροδέματος, πλακών μη ενισχυμένης τοιχοποιίας και μη ενισχυμένης τοιχοποιίας με ξυλεία στις υπό μελέτη περιοχές. Δεν υπήρξε όμως επαρκής ποσότητα δειγματικού υλικού για κάθε μια από τις δομές των κτιρίων. Το γεγονός οφείλεται σε δύο παράγοντες. Δεν απαντώνται συχνά όλα τα είδη κατασκευών σε ολόκληρη την περιοχή. Επί πλέον οι ομάδες αναγνώρισης των φαινομένων δεν διέθεταν τις απαραίτητες πληροφορίες για την τοποθεσία των σεισμικών σταθμών και δεν είχαν οδηγίες για την σωστή ανταπόδοση των εικόνων ως προς τον τύπο κατασκευής και την τοποθεσία.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μεθοδολογία EMS-98 είναι ανεξάρτητη από τον τύπο κατασκευής, το γεγονός ότι υπήρξαν επαρκή φωτογραφικά δείγματα για τουλάχιστο έναν απ' όλους τους δομικούς τύπους σε κάθε περιοχή ελαχιστοποίησε τους περιορισμούς. Ομοίως, με τόσα περιορισμένα δείγματα δεν ήταν εφικτό να αποδοθούν κατηγορίες αντισεισμικής αντοχής κατά προσέγγιση βασισμένες στα ειδικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.

Ενώ έχουν τεκμηριωθεί τα θετικά σημεία της μακροσκοπικής έρευνας ζημιών των εικόνων των δομών (διατήρηση των ευαίσθητων πληροφοριών σε μικρό χρονικό διάστημα) αυτούς του είδους η προσέγγιση έχει τους δικούς της περιορισμούς.

Για τις περισσότερες κατασκευές οι οποίες αναλύονται σε αυτή τη μελέτη το φωτογραφικό υλικό παρουσιάζει την εξωτερική κατάσταση των κτιρίων, οι φωτογραφίες λήφθηκαν από επίπεδο δρόμου. Η έλλειψη πρόσβασης στο εσωτερικό των κτιρίων καθιστά τις εσωτερικές βλάβες όπως ρωγμές στο πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος, μη παρατηρήσιμες.

Ενώ η απόδοση της μακροσεισμικής έντασης γενικά αντλεί τις πληροφορίες της από τις εξωτερικές δομές, είναι γνωστό ότι κάποια λιγότερο εμφανή σημεία βλαβών είναι καλύτερο να διαπιστώνονται δια ζώσης.

Επί πλέον ήταν εφικτή η απεικόνιση εικόνων από κάποια κτίρια από μια μόνο οπτική. Αυτό σημαίνει ότι οι βλάβες στις μη προσβάσιμες περιοχές των κτιρίων δεν μπόρεσαν να ληφθούν υπόψη.

Είναι όμως πιθανό κάποια στοιχεία εσωτερικών βλαβών να πέρασαν απαρατήρητα στη μακροσεισμική αυτή ανάλυση εξ αιτίας της υποκειμενικής απόδοσης των βαθμών ζημιάς η οποία τείνει να είναι ηπιότερη από την πραγματική.

Δεν υπήρξε επίσης δυνατότητα πρόσβασης είτε πεζή είτε οδικώς.

Αυτό συνέβη κυρίως σε περιοχές με σοβαρές ζημιές ή απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλο βαθμό αυθαιρέτων κατασκευών.

Καις τις δύο περιπτώσεις η μη ενσωμάτωση των μη προσβάσιμων κατασκευών σε αυτές τις περιοχές θα είχε δώσει χαμηλότερο μέσο όρο ζημιών από αυτές που εκτιμώνται βάσει του κατασκευαστικού τύπου των κτιρίων.

Τελικώς, ενώ ακολουθήθηκε πιστά η μεθοδολογία EMS-98, είναι αδύνατο να περιορισθεί η υποκειμενικότητα από μια τέτοια ανάλυση. Δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη τη φύση της αποστολής είναι εύλογο η μη απεικόνιση κτιρίων χωρίς ζημιές στο συνολικό δείγμα φωτογραφιών.

Αυτό είναι πιθανό να αυξήσει τον μέσο όρο των βλαβών απ’ ότι αν συμπεριλαμβάνονταν.

Επί πλέον υπάρχει ένας αριθμός κτιρίων των οποίων οι βλάβες τα κατατάσσουν στο όριο μεταξύ δύο κατηγοριών βλαβών.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. MEGH RAJ DHITAL «GEOLOGY OF THE NEPAL HIMALAYA», REGIONAL PERSPECTIVE OF THE CLASSIC COLLIDED OROGEN ,CENTRAL DEPARTMENT OF GEOLOGY TRIBHUVAN UNIVERSITY KIRTIPUR, KATHMANDU ,NEPAL, P.499.

2. AHMAD A, ALAM JM (1978) THE GANGA BASIN, ITS SUBSURFACE SEQUENCES, THEIR AFFINITY, SEDIMENTOLOGICAL AND TECTONIC IMPLICATIONS. HIMALAYAN GEOL 8(PART I):583–608 (WADIA INSTITUTE OF HIMALAYAN GEOLOGY,DEHRADUN).

3. ARGAND E (1924) LA TECTONIQUE DE L'ASIE. CONGRÈS GÉOLOGIQUE INTERNATIONAL, BELGIQUE, COMPTES RENDUES DE LA 13ÈME SESSION, EN BELGIQUE 1922. H. VAILLANT-CARMANNE, LIÈGE, PP 171–372.

4. BURG JP (1992) HIMALAYAN OROGENY AND GLOBAL TECTONICS SEEN FROM THE TSANGPO SUTURE ZONE OF TIBET (CHINA). IN: SINHA AK (ED) HIMALAYAN OROGENY AND GLOBAL TECTONICS, PUBLICATION NO. 197 OF THE INTERNATIONAL LITHOSPHERE PROGRAMME. OXFORD & IBH PUBLISHING CO., NEW DELHI, (343 PP), PP 35–44.

5. CHANG C-F, CHENG H-L (1973) SOME TECTONIC FEATURES OF THE MT. JOLMO LUNGMA AREA, SOUTHERN TIBET, CHINA. SCIENTIA SINICA XVI(2):257–265 DEWEY JF, SHACKLETON RM, CHANG C, SUN Y (1988) THE TECTONIC EVOLUTION OF THE TIBETAN PLATEAU. PHILOS TRANS R SOC LOND, SER A 327:379–413.

6. OLDHAM RD (ED) (1893) A MANUAL OF THE GEOLOGY OF INDIA STRATIGRAPHIC AND STRUCTURAL GEOLOGY, 2ND EDN. GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA, CALCUTTA, 543 PP (WITH A GEOLOGICAL MAP OF INDIA IN COLORS, SCALE: 1 INCH = 96 MILES) 20 2 GEOLOGICAL SETTING OF HIMALAYA.

7. OLDHAM RD (1886) ON PROBABLE CHANGES IN THE GEOGRAPHY OF THE PUNJAB AND ITS RIVERS: AN HISTORICO-GEOGRAPHICAL STUDY. J ASIATIC SOC BENGAL, CALCUTTA LV:(PART II, 4):322–343 (WITH A MAP) OLLIER CD, PAIN CF (2000) THE ORIGIN OF MOUNTAINS. ROUTLEDGE, LONDON, 345 PP.

8. GEOTECHNICAL FIELD RECONNAISSANCE: «GORKHA (NEPAL) EARTHQUAKE OF APRIL 25 2015 AND RELATED SHAKING SEQUENCE» ,GEOTECHNICAL EXTREME EVENT RECONNAISSANCE, GEER ASSOCIATION REPORT NO. GEER-040. VERSION 1.1 ,AUGUST 7, 2015. P.250.
9. S.M. MCGOWAN , K.S. JAISWAL, D.J.WALD « USING STRUCTURAL DAMAGE STATISTICS TO DERIVE MACROSEISMIC INTENSITY WITHIN THE KATHMANDU VALLEY FOR THE 2015 M7.8 GORKHA, NEPAL EARTHQUAKE», U.S. GEOLOGICAL SURVEY, GOLDEN, CO, USA, P.15.
10. ΔΡ. Β.ΚΟΥΣΚΟΥΝΑ-ΤΣΙΜΠΙΔΑΡΟΥ «ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΗ», ΣΕΛ. 47.
11. GRUENTHAL, G. (EDITOR), 1998. EUROPEAN MACROSEISMIC SCALE. CONSEUIL DE L' EUROPE.
12. MUSSON R.M.W. & I. CECIC, 2002. MACROSEISMOLOGY. INTERNATIONAL HANDBOOK OF EARTHQUAKE & ENGINEERING SEISMOLOGY, PART A, 807-822.

13. EARTHQUAKE ENVIRONMENTAL EFFECTS, INTENSITY AND SEISMIC HAZARD ASSESSMENT: " 2.7 Η ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΉ ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΝΤΑΣΗΣ ESI 2007", PAPATHANASSIOU G. & PAVLIDES S. , MEMORIE DESCRITTIVE CARTA GEOLOGICA D'ITALIA, VOL. XYZ, 2011, PP. 69-78.
14. AHMAD A, ALAM JM (1978) THE GANGA BASIN, ITS SUBSURFACE SEQUENCES, THEIR AFFINITY, SEDIMENTOLOGICAL AND TECTONIC IMPLICATIONS. HIMALAYAN GEOL 8(PART I):583–608 (WADIA INSTITUTE OF HIMALAYAN GEOLOGY, DEHRADUN).
15. ARGAND E (1924) LA TECTONIQUE DE L'ASIE. CONGRÈS GÉOLOGIQUE INTERNATIONAL, BELGIQUE, COMPTES RENDUES DE LA 13ÈME SESSION, EN BELGIQUE 1922. H. VAILLANT-CARMANNE, LIÈGE, PP 171–372.
16. BURG JP (1992) HIMALAYAN OROGENY AND GLOBAL TECTONICS SEEN FROM THE TSANGPO SUTURE ZONE OF TIBET (CHINA). IN: SINHA AK (ED) HIMALAYAN OROGENY AND GLOBAL TECTONICS, PUBLICATION NO. 197 OF THE INTERNATIONAL LITHOSPHERE PROGRAMME. OXFORD & IBH PUBLISHING CO., NEW DELHI, (343 PP), PP 35–44.
17. CHANG C-F, CHENG H-L (1973) SOME TECTONIC FEATURES OF THE MT. JOLMO LUNGMA AREA, SOUTHERN TIBET, CHINA. SCIENTIA SINICA XVI(2):257–265.
18. DEWEY JF, SHACKLETON RM, CHANG C, SUN Y (1988) THE TECTONIC EVOLUTION OF THE TIBETAN PLATEAU. PHILOS TRANS R SOC LOND, SER A 327:379–413.
19. DIENER C (1895) ERGEBNISSE EINER GEOLOGISCHEN EXPEDITION IN DEN CENTRAL- HIMALAYA VON JOHAR, HUNDES, UND PAINKHANDA. DENKSCHRIFTEN DER KAISERLICHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN, WIEN 62:533–608.
20. DIENER C (1898) NOTES ON THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE CHITICHUN REGION. MEM GEOL SURV INDIA XXVIII(PART 1):1–27.
21. DING L, KAPP P, WAN XQ (2005) PALEOCENE–EOCENE RECORD OF OPHIOLITE OBDUCTION AND INITIAL INDIA ASIA COLLISION, SOUTH CENTRAL TIBET. TECTONICS, VOL 24, TC3001. DOI: 10.1029/2004TC001729.
22. DUFF P, MCL D (1992) HOLMES' PRINCIPLES OF PHYSICAL GEOLOGY, 4TH EDN. ELBS, LONDON, 791 PP.
23. FERGUSSON J (1863) ON RECENT CHANGES IN THE DELTA OF THE GANGES. Q J GEOL SOC LOND XIX(PART 1):321–354 (WITH 1 PLATE).
24. FULORIA RC (1969) GEOLOGICAL FRAMEWORK OF GANGA BASIN. IN: SELECTED LECTURES ON PETROLEUM EXPLORATION, VOL 1. PETROLEUM GEOLOGY, GEOPHYSICS & GEOCHEMISTRY, PP 170–186 (WITH A GEOLOGICAL SKETCH MAP), INSTITUTE OF PETROLEUM EXPLORATION, OIL AND NATURAL GAS COMMISSION, DEHRADUN, INDIA.
25. GANSSER A (1964) GEOLOGY OF THE HIMALAYAS. INTERSCIENCE, NEW YORK, 289 PP.
26. GANSSER A (1977) THE GREAT SUTURE ZONE BETWEEN HIMALAYA AND TIBET, A PRELIMINARY ACCOUNT, COLLOQUES INTERNATIONAUX DU C.N.R.S., NO. 268—ÉCOLOGIE ET GÉOLOGIE DE L'HIMALAYA, PP 181–191.

27. GUTENBERG B, RICHTER CF (1954) SEISMICITY OF THE EARTH AND ASSOCIATED PHENOMENA, 2ND EDN. PRINCETON UNIVERSITY PRESS, PRINCETON, 310 PP.

28. HEIM A, GANSSER A (1939) CENTRAL HIMALAYA: GEOLOGICAL OBSERVATIONS OF THE SWISS EXPEDITION 1936. DENKSCHRIFTEN DER SCHWEIZERISCHEN NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT, BAND LXXIII, ABH. 1, 245 PP (WITHGEOLOGICAL MAPS IN COLORS, SECTIONS, AND PLATES).

29. JIMÉNEZ-MUNT I, FERNÀNDEZ M, VERGÉS J, PLATT JP (2008) LITHOSPHERE STRUCTURE UNDERNEATH THE TIBETAN PLATEAU INFERRED FROM ELEVATION, GRAVITY AND GEOID ANOMALIES. EARTH PLANET SCI LETT 267:276–289.

30. MASCLE G, PÊCHER A, GUILLOT S, RAI SM, GAJUREL AP (2012) THE HIMALAYA–TIBET COLLISION. NEPAL GEOLOGICAL SOCIETY AND SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE, PARIS, 264 PP.

31. MINGTAO Z (1982) THE ROOF OF THE WORLD. HARRY N. ABRAMS, INCORPORATED, NEW YORK, 227 PP.

32. MISRA R, PHUKAN RK (2005) SEARCH FOR HYDROCARBON IN GANGA BASIN: SOUTH-EASTERN PART OF GANDAK DEPRESSION MERITS FURTHER PROBE. IN: BHATTACHARYA AR, AGARWAL KK (EDS) HIMALAYAN OROGEN—FORELAND INTERACTION, VOL 2. PALAEONTOLOGICAL SOCIETY OF INDIA, LUCKNOW, PP 11–21.

33. OLDHAM RD (ED) (1893) A MANUAL OF THE GEOLOGY OF INDIA: STRATIGRAPHIC AND STRUCTURAL GEOLOGY, 2ND EDN. GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA, CALCUTTA, 543 PP (WITH A GEOLOGICAL MAP OF INDIA IN COLORS, SCALE: 1 INCH = 96 MILES).

34. OLDHAM RD (1886) ON PROBABLE CHANGES IN THE GEOGRAPHY OF THE PUNJAB AND ITS RIVERS: AN HISTORICO-GEOGRAPHICAL STUDY. J ASIATIC SOC BENGAL, CALCUTTA LV:(PART II, 4):322–343 (WITH A MAP).

35. OLLIER CD, PAIN CF (2000) THE ORIGIN OF MOUNTAINS. ROUTLEDGE, LONDON, 345 PP.

36. PATRIAT P, ACHACHE J (1984) INDIA-ASIA COLLISION CHRONOLOGY HAS IMPLICATIONS FOR CRUSTAL SHORTENING AND DRIVING MECHANISM OF PLATES. NATURE 311:615–621.

37. RADHAKRISHNA BP, MERH SS (EDS) (1999) VEDIC SARASVATI: EVOLUTIONARY HISTORY OF A LOST RIVER OF NORTHWESTERN INDIA, VOL 42. GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA, BANGALORE, 329 PP.

38. RODRÍGUEZ-ITURBE I, RINALDO A (2001) FRACTAL RIVER BASINS: CHANCE AND SELF-ORGANIZATION. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, 547 PP.

39. ROWLEY DB (1996) AGE OF INITIATION OF COLLISION BETWEEN INDIA AND ASIA: A REVIEW OF STRATIGRAPHIC DATA. EARTH PLANET SCI LETT 145:1–13.

40. SEN GUPTA S (1964) POSSIBLE SUBSURFACE STRUCTURES BELOW THE HIMALAYAS AND THE GANGETIC PLAINS. IN: INTERNATIONAL GEOLOGICAL

CONGRESS, REPORT OF THE TWENTY-SECOND SESSION, PART XI, PROCEEDINGS OF SECTION 11: ALPINE AND HIMALAYAN OROGENY, NEW DELHI, PP 334–352.

41. SHILLINGFORD FA (1893) ON CHANGES IN THE COURSE OF THE KUSĪ RIVER, AND THE PROBABLE DANGERS ARISING FROM THEM. J ASIAT SOC BENGAL, CALCUTTA LXIV(PART I, 1):1–25 (WITH A MAP).
42. SINGH IB (1999) TECTONIC CONTROL ON SEDIMENTATION IN GANGA PLAIN FORELAND BASIN: CONSTRAINTS ON SIWALIK SEDIMENTATION MODELS. IN: JAIN AK, MANICKAVASAGAM RM (EDS) GEODYNAMICS OF THE NW

43. HIMALAYA, VOL 6. GONDWANA RESEARCH GROUP MEMOIR, OSAKA, PP 247–262.

44. SINHA YB (2005) HYDROCARBON PROSPECTIVITY OF THE GANGA BASIN AND THE FRONTAL THRUST—FOLD BELT OF THE HIMALAYAS: SOME THOUGHTS. IN: BHATTACHARYA AR, AGARWAL KK (EDS) HIMALAYAN OROGEN FORELAND INTERACTION, VOL 2. PALAEONTOL SOCIETY OF INDIA, LUCKNOW, PP 1–9.

45. SINHA R, TANDON SK, GIBLING MR, BHATTACHARJEE PS, DASGUPTA AS (2005) LATE QUATERNARY GEOLOGY AND ALLUVIAL STRATIGRAPHY OF THE GANGA BASIN. HIMALAYAN GEOL 26(1):223–240.

46. STÖCKLIN J (1980) GEOLOGY OF NEPAL AND ITS REGIONAL FRAME. J GEOL SOC LOND 137:1–34.

47. VALDIYA KS (1998) DYNAMIC HIMALAYA. UNIVERSITIES PRESS (INDIA) LIMITED, HYDERABAD, 178 PP.

48. VON KRAFFT A (1902) NOTES ON THE “EXOTIC BLOCKS” OF MALLA JOHAR IN THE RHOT MAHALS OF KUMAON. MEM GEOL SURV INDIA XXXII(PART3):127–183 (WITH MAP AND SECTIONS).

49. YIN A, HARRISON TM (2000) GEOLOGIC EVOLUTION OF THE HIMALAYAN- TIBETAN OROGEN. ANN REV EARTH PLANET SCI 28:211–280.
50. BARNARD PL, OWEN LA, FINKEL RC (2006) QUATERNARY FANS AND TERRACES IN THE KHUMBU HIMAL SOUTH OF MOUNT EVEREST: THEIR CHARACTERISTICS, AGE AND FORMATION. J GEOL SOC LONDON 163:383–399.
51. BURBANK DW (1992) CAUSES OF RECENT HIMALAYAN UPLIFT DEDUCED FROM DEPOSITED PATTERNS IN THE GANGES BASIN. NATURE 357:680–683.
52. DOI (DEPARTMENT OF IRRIGATION) (1993) FEASIBILITY STUDY ON EXPANDING GROUNDWATER DEVELOPMENT FOR IRRIGATION IN THE BIRGANJ AREA OF THE TERAI. NIPPON KOEI CO., LTD. AND NEPALCONSULT (P) LTD., KATHMANDU, VOL. II, ANNEXES, P I-27 (UNPUBLISHED).
53. HAGEN T (1969) REPORT ON THE GEOLOGICAL SURVEY OF NEPAL. VOLUME 1: PRELIMINARY RECONNAISSANCE. DENKSCHIIFTEN DER SCHWEIZERISCHEN NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT, BAND LXXXVI/1, 185 PP (WITH A GEOLOGICAL MAP).
54. HEIM A, GANSSER A (1939) CENTRAL HIMALAYA: GEOLOGICAL OBSERVATIONS OF THE SWISS EXPEDITION 1936. DENKSCHRIFTEN DER SCHWEIZERISCHEN NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT, BAND LXXIII, ABH. 1, 245 PP (WITH GEOLOGICAL MAPS IN COLORS, SECTIONS, AND PLATES).

55. HERBERT JD (1842) REPORT OF THE MINERALOGICAL SURVEY OF THE HIMMALAYA MOUNTAINS LYING BETWEEN THE RIVERS SUTLEJ AND KALEE. ILLUSTRATED BY A GEOLOGICAL MAP. J ASIATIC SOC BENGAL, CALCUTTA XI (126*) (EXTRA NUMBER), PP I–CLV.
56. HERON AM (1922) GEOLOGICAL RESULTS OF THE MOUNT EVEREST RECONNAISSANCE EXPEDITION. REC GEOL SURV INDIA LIV(2):215–234 (WITH A GEOLOGICAL MAP IN COLORS).
57. KRISHNAN MS, AIYENGAR NKN (1940) DID THE INDOBRAHM OR SIWALIK RIVER EXIST? RECORDS OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA, VOL LXXV, PROFESSIONAL PAPER NO. 6, PP 1–24.
58. MASCH L, PREUSS E (1977) DAS VORKOMMEN DES HYALOMYLONITS VON LANGTANG, HIMALAYA (NEPAL). NEUES JAHRB MINERAL ABH 129:292–311.
59. MEDLICOTT HB, BLANFORD WT (1879) A MANUAL OF THE GEOLOGY OF INDIA, PART II: EXTRA-PENINSULAR AREA. PUBLISHED BY ORDER OF THE GOVERNMENT OF INDIA, CALCUTTA, PP 445–817 (WITH 21 PLATES AND A MAP IN COLORS).
60. MEDLICOTT HB (1875) NOTE OF THE GEOLOGY OF NEPAL. RECORDS OF THE GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA, VOL. VIII, PART 4, PP 93–101 (WITH A GEOLOGICAL MAP ON 1 INCH = 6 MILES).
61. MINGTAO Z (1982) THE ROOF OF THE WORLD. HARRY N. ABRAMS, INCORPORATED, NEW YORK, 227 PP.
62. PASCOE EH (1919) THE EARLY HISTORY OF THE INDUS, GANGES, AND THE BRAHMAPUTRA. Q J GEOL SOC LXXV:138–155.
63. PILGRIM GE (1919) SUGGESTIONS CONCERNING THE HISTORY OF THE DRAINAGE OF NORTHERN INDIA, ARISING OUT OF A STUDY OF THE SIWALIK BOULDER CONGLOMERATE. J ASIATIC SOC BENGAL, NEW SERIES, XV:81–99 (WITH 2 PLATES).
64. SCHEIDEGGER AE (1999) MORPHOTECTONICS OF EASTERN NEPAL. INDIAN J LANDSCAPE SYST ECOL STUD CALCUTTA 22(2):1–9.
65. SCOTT JS, DREVER HI (1953) FRICTIONAL FUSION ALONG A HIMALAYAN THRUST. IN: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF EDINBURGH, SECTION B, VOL 65, PART 2, NO. 10, PP 121–142.
66. STRACHEY R (1851) ON THE GEOLOGY OF PART OF THE HIMALAYA MOUNTAINS AND TIBET. Q J GEOL SOC LONDON 7:292–310 (WITH A GEOLOGICAL MAP AND TWO CROSS-SECTIONS IN COLORS).
67. WAGER LR (1934) A REVIEW OF THE GEOLOGY AND SOME NEW OBSERVATIONS. IN: RUTTLEDGE H (ED) EVEREST 1933. HODDER AND STOUGHTON LIMITED, LONDON, PP 312–336.
68. WAGER LR (1937) THE ARUN RIVER DRAINAGE PATTERN AND THE RISE OF THE HIMALAYA. GEOGR J LONDON LXXXIX(3):239–250 (WITH A MAP AND PROFILE OF THE ARUN AND TISTA RIVERS).
69. ARGAND E (1924) LA TECTONIQUE DE L’ASIE. CONGRÈS GÉOLOGIQUE INTERNATIONAL, BELGIQUE, COMPTES RENDUES DE LA 13ÈME SESSION, EN BELGIQUE 1922. H. VAILLANT-CARMANNE, LIÈGE, PP 171–372.
70. AUDEN JB (1935) TRAVERSES IN THE HIMALAYA. REC GEOL SURV INDIA LXIX(PART 2):123–167 (WITH 6 PLATES INCLUDING A GEOLOGICAL SKETCH MAP).
71. DEWEY JF, BIRD JM (1970) MOUNTAIN BELTS AND THE NEW GLOBAL TECTONICS. J GEOPHYS RES 75(14):2625–2647.
72. DIENER C (1895) ERGEBNISSE EINER GEOLOGISCHEN EXPEDITION IN DEN CENTRAL-HIMALAYA VON JOHAR, HUNDES, UND PAINKHANDA, VOL 62.

DENKSCHRIFTEN DER KAISERLICHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN, WIEN, PP 533–608.
73. MEDLICOTT HB (1875) NOTE OF THE GEOLOGY OF NEPAL. REC GEOL SURV INDIA VIII(PART 4):93–101 (WITH A GEOLOGICAL MAP ON 1 IN. = 6 MILES).
74. GANSSER A (1964) GEOLOGY OF THE HIMALAYAS. INTERSCIENCE, NEW YORK, 289 PP.
75. GANSSER A (1981) THE GEODYNAMIC HISTORY OF THE HIMALAYA. IN: GUPTA HK, DELANY FM (EDS) ZAGROS, HINDU KUSH, HIMALAYA, GEODYNAMIC EVOLUTION, GEODYNAMIC SERIES, VOL 3. AM GEOPHYS UNION, WASHINGTON, PP 111–121.
76. MCMAHON CA (1879) NOTES ON A TOUR THROUGH HANGRANG AND SPITI. REC GEOL SURV INDIA XII:57–69 (WITH A GEOLOGICAL MAP IN COLORS; SCALE: 1 IN. = 8 MILES).
77. HEIM A, GANSSER A (1939) CENTRAL HIMALAYA: GEOLOGICAL OBSERVATIONS OF THE SWISS EXPEDITION 1936. DENKSCHRIFTEN DER SCHWEIZERISCHEN NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT, BAND, VOL LXXIII, ABH. 1. 245 PP (WITH GEOLOGICAL MAPS IN COLORS, SECTIONS, AND PLATES).
78. HELMSTAEDT H (1969) EINE AMMONITEN-FAUNA AUS DEN SPITI-SCHIEFERN VON MUKTINATH IN NEPAL, VOL 1. ZITTELIANA, MÜNCHEN, PP 63–89 (WITH PLATES 3 TO 5).
79. TOLLMANN A, KRISTAN-TOLLMANN E (1985) PALEOGEOGRAPHY OF THE EUROPEAN TETHYS FROM PALEOZOIC TO MESOZOIC AND THE TRIASSIC RELATIONS OF THE EASTERN PART OF TETHYS AND PANTHALASSA. IN: NAKAZAWA K, DICKINS JM (EDS) THE TETHYS: HER PALEOGEGRAPHY AND PALEOBIOGEOGRAPHY FROM PALEOZOIC TO MESOZOIC. TOKAI UNIVERSITYPRESS, TOKYO, PP 3–22.
80. ADER, T., ET AL. (2012), CONVERGENCE RATE ACROSS THE NEPAL HIMALAYA AND INTERSEISMIC COUPLING ON THE MAIN HIMALAYAN THRUST: IMPLICATIONS FOR SEISMIC HAZARD, J. GEOPHYS. RES., 117, B04403, DOI:10.1029/2011JB009071.
81. AMBRASEYS, N., AND BILHAM, R. (2000). A NOTE ON THE KANGRA EARTHQUAKE OF 4 APRIL 1905. CURR. SCI. 79, 46–50.
82. AVOUAC, J. P., 2003, MOUNTAIN BUILDING, EROSION, AND THE SEISMIC CYCLE IN THE NEPAL HIMALAYA, ADV. GEOPHYS. 46, PP. 1–80.
83. BETTINELLI, P., J.-P. AVOUAC, M. FLOUZAT, F. JOUANNE, L. BOLLINGER, P. WILLIS, AND G. CHITRAKAR, 2006, PLATE MOTION OF INDIA AND INTERSEISMIC STRAIN IN THE NEPAL HIMALAYA FROM GPS AND DORIS MEASUREMENTS, J. GEOD., 80, 567–589.
84. BILHAM, R., 1995, LOCATION AND MAGNITUDE OF THE 1833 NEPAL EARTHQUAKE AND ITS RELATION TO THE RUPTURE ZONES OF CONTIGUOUS GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES. CURR. SCI. 69, 101–128.
85. BILHAM, R., BLUME, F., BENDICK, R., AND GAUR, V. K. (1998). GEODETIC CONSTRAINTS ON THE TRANSLATION AND DEFORMATION OF INDIA: IMPLICATIONS FOR FUTURE GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES, CURR. SCI. 77, 213–229.
86. GEER-NEPAL EARTHQUAKE-V1.1 PAGE 30 OF 250 AUGUST 7, 2015
87. BILHAM, R., GAUR, V.K., MOLNAR, P (2001) HIMALAYAN SEISMIC HAZARD. SCIENCE, 293, 1442–1444
88. BILHAM, R., AND ENGLAND, P., 2001, PLATEAN ‘POP-UP’ IN THE GREAT 1897 ASSAM EARTHQUAKE, NATURE 410 (6830), 806–809.

89. BILHAM, R (2004) EARTHQUAKES IN INDIA AND THE HIMALAYA: TECTONICS, GEODESY AND HISTORY. ANNALS OF GEOPHYSICS, 47 (2), 839-858.
90. BILHAM, R (2009). THE SEISMIC FUTURE OF CITIES. BULLETIN OF EARTHQUAKE ENGINEERING, 7, 839–887.
91. BOLLINGER, L., HENRY, P., AND AVOUAC, J.P., 2006, MOUNTAIN BUILDING IN THE NEPAL HIMALAYA: THERMAL AND KINEMATIC MODEL, EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS 244, 58–71
92. BOLLINGER, L., SAPKOTA, S.N., TAPPONNIER, P., KLINGER, Y., RIZZA, M., VAN DER WOERD, J., TIWARI, J.R., PANDEY, R., BITRI, A., AND BES DE BERC, S., 2014, ESTIMATING THE RETURN TIMES OF GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES IN EASTERN NEPAL: EVIDENCE FROM THE PATU AND BARDIBAS STRANDS OF THE MAIN FRONTAL THRUST, J. GEOPHYS. RES. SOLIDEARTH, 119, DOI:10.1002/2014JB010970.
93. CATTIN, R., AND AVOUAC, J. P., 2000, MODELING OF MOUNTAIN BUILDING AND THE SEISMIC CYCLE IN THE HIMALAYA OF NEPAL. J. GEOPHYS. RES. 105, 13389–13407.
94. CHANDER, R. (1989). SOUTHERN LIMITS OF MAJOR EARTHQUAKE RUPTURES ALONG THE HIMALAYA BETWEEN LONGITUDES 75_ AND 90_E. TECTONOPHYSICS 170, 115–123.
95. DECELLES, P. G., ROBINSON, D. M., QUADE, J., OJHA, T. P., GARZIONE, C. N., COPELAND, P., AND UPRETI, B. N., 2001, STRATIGRAPHY, STRUCTURE, AND TECTONIC EVOLUTION OF THE HIMALAYAN FOLD-THRUST BELT IN WESTERN NEPAL. TECTONICS 20, 487–509.
96. DELCAILLAU, B. (1986). DYNAMIQUE ET. EVOLUTION STRUCTURALE DU PIEMONT FRONTAL DE LMALAYA: LES SIWALIKS DU NE´PAL ORIENTAL. REV. GEOL. DYN. GEOGR. PHYS. 27, 319–337.
97. GANSSER, A., 1964, GEOLOGY OF THE HIMALAYAS, INTERSCIENCE PUBLISHERS, LONDON, 289 PP.
98. HOUGH, S.E., AND BILHAM, R., 2008, SITE RESPONSE OF THE GANGES BASIN INFERRED FROM RE-EVALUATED MACROSEISMIC OBSERVATIONS FROM THE 1897 SHILLONG, 1905 KANGRA, AND 1934 NEPAL EARTHQUAKES, J. EARTH SYST. SCI. 117, S2, PP. 773–782
99. LARSON, K., BÜRGMANN, R., BILHAM, R., FREYMUELLER, J.T., 1999, KINEMATICS OF THE INDIA–EURASIA COLLISION ZONE FROM GPS MEASUREMENTS, J. GEOPHYS. RES. 104, 1077–1093.
100. LAVE, J., AND AVOUAC, J. P., 2000, ACTIVE FOLDING OF FLUVIAL TERRACES ACROSS THE SIWALIKS HILLS, HIMALAYAS OF CENTRAL NEPAL. J. GEOPHYS. RES. 105, 5735–5770.
101. LE FORT, P., 1975, HIMALAYA: THE COLLIDED RANGE: PRESENT KNOWLEDGE OF THE CONTINENTAL ARC, AM. J. SCI. 275A, 1–44.
102. MOLNAR, P. (1990). A REVIEW OF THE SEISMICITY AND THE RATES OF ACTIVE UNDERTHRUSTING AND DEFORMATION AT THE HIMALAYA. J. HIM. GEOL. 1, 131–154.
103. GEER-NEPAL EARTHQUAKE-V1.1 PAGE 31 OF 250 AUGUST 7, 2015
104. MUGNIER, J. L., LETURMY, P., MASCLE, G., HUYGHE, P., CHALARON, E., VIDAL, G., HUSSON, L., AND DELCAILLAU, B. (1999). THE SIWALIKS OF WESTERN NEPAL 1: GEOMETRY AND KINEMATICS. J. ASIAN EARTH SCI. 17, 629–642.

105. NAKATA, T. (1989). ACTIVE FAULTS OF THE HIMALAYA OF INDIA AND NEPAL, IN “TECTONICS OF THE WESTERN HIMALAYAS”, L. L. MALINCONICO, JR., AND R. LILLIE, EDS. GEOL. SOC. OF AMERICA, PP. 243–264.
106. PANDEY, M. R., AND MOLNAR, P., 1988, THE DISTRIBUTION OF INTENSITY OF THE BIHAR-NEPAL EARTHQUAKE OF 15 JANUARY 1934 AND BOUNDS ON THE EXTENT OF THE RUPTURE ZONE. J. NEPAL GEOL. SOC. 5, 23–45.
107. PANT, M. R., 2002, A STEP TOWARD A HISTORICAL SEISMICITY OF NEPAL. ADARSA 2, 29–60.
108. PATRIAT, P., AND J. ACHACHE, INDIA-EURASIA COLLISION CHRONOLOGY HAS IMPLICATIONS FOR CRUSTAL SHORTENING AND DRIVING MECHANISMS OF PLATES, NATURE, 311, 615–621, 1984.
109. POWELL, C. M. A., AND CONAGHAN, P. J., 1973, PLATE TECTONICS AND THE HIMALAYAS, EARTH PLANETARY SCIENCE LETTERS 20, 1–12.
110. RANA, B. S. J. B., 1935, ‘‘NEPALAKO MAHABHUKAMPA (1990 SALA) NEPAL’S GREAT EARTHQUAKE.’’
111. RATSCHBACHER, L., FRISCH,W., LIU, G., AND CHEN, C., 1994, DISTRIBUTED DEFORMATION IN SOUTHERN AND WESTERN TIBET DURING AND AFTER INDIA-ASIA COLLISION: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, V. 99, P. 19917–19945.
112. ROBINSON, D. M., DECELLES, P. G., PATCHETT, P. J., AND GARZIONE, C. N., 2001, THE KINEMATIC EVOLUTION OF THE NEPALESE HIMALAYA INTERPRETED FROM ND ISOTOPE. E.P.S.L. 192, 507–521.
113. SEARLE, M., CORFIELD, R. I., STEPHENSON, B., AND MCCARRON, J., 1997A, STRUCTURE OF THE NORTH INDIAN CONTINENTAL MARGIN IN THE LADAKH-ZANSKAR HIMALAYAS: IMPLICATIONS FOR THE TIMING OF OBDUCTION OF THE SPONTANG OPHIOLITE, INDIA-ASIA COLLISION AND DEFORMATIONAL EVENTS IN THE HIMALAYA: GEOLOGICAL MAGAZINE, V. 134, P. 297–316.
114. YEATS, R. S., NAKATA, T., FARAH, A., MIZRA, M. A., PANDEY, M. R., AND STEIN, R. S., 1992, THE HIMALAYAN FRONTAL FAULT SYSTEM. ANNALES TECTONICAE, SPECIAL ISSUE (SUPP. TO VOL. 6), PP. 85–98.
115. AAGAARD, B., J. HALL, AND T. V. HEATON (2004), EFFECTS OF FAULT DIP AND SLIP RAKE ANGLES ON NEAR-SOURCE GROUND MOTIONS: WHY RUPTURE DIRECTIVITY WAS MINIMAL IN THE 1999 CHI-CHI, TAIWAN, EARTHQUAKE, BULL. SEISMOL. SOC. AM., 94, 155– 170.
116. BOLLINGER, L., SAPKOTA, S.N., TAPPONNIER, P., KLINGER, Y., RIZZA, M., VAN DER WOERD, J., TIWARI, J.R., PANDEY, R., BITRI, A., AND BES DE BERC, S. (2014). ESTIMATING THE RETURN TIMES OF GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES IN EASTERN NEPAL: EVIDENCE FROM THE PATU AND BARDIBAS STRANDS OF THE MAIN FRONTAL THRUST, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH, 119, 7123-7163, DOI:10.1002/2014JB010970.
117. DONAHUE, J. L., AND N. A. ABRAHAMSON (2014). SIMULATION-BASED HANGING WALL EFFECTS, EARTHQUAKE SPECTRA, VOL. 30, NO. 3, 1269-1284.
118. GALETZKA, J., D. MELGAR, J. F. GENRICH, J. GENG., S. OWEN, E. O. LINDSEY, X. XU, Y. BOCK, J. P. AVOUAC, L. B. ADHIKARI, B. N. UPRETI, B. PRATT-SITAULA, A. MORE, K. W. HUDNUT, W. SZELIGA, J. NORMANDEAU, M. FEND, M. FLOUZAT, L. BOLLINGER, P. SHRESTHA, B. KOIRALA, U. GAUTAM, M. BHATTERAI, R. GUPTA, T. KANDEL, C. TIMSINA, S. N. SAPKOTA, S. RAJAURE, AND N. MAHARJAN (2015). SLIP PULSE AND RESONANCE OF KATHMANDU BASIN DURING THE 2015 MW 7.8

GORKHA EARTHQUAKE, NEPAL IMAGED WITH SPACE GEODESY, SUBMITTED TO SCIENCE.

119. MOSS, R. E. S., STANTON, K. V., AND BUELNA, M. (2013). THE IMPACT OF MATERIAL STIFFNESS ON THE LIKELIHOOD OF FAULT RUPTURE PROPAGATING TO THE GROUND SURFACE, SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS, 84, 485-488, MAY/JUNE.
120. LEONARD, M. (2010). EARTHQUAKE FAULT SCALING: SELF-CONSISTENT RELATING OF RUPTURE LENGTH, WIDTH, AVERAGE DISPLACEMENT AND MOMENT RELEASE, BULL. SEISM. SOC. AM., VOL. 100, NO. 5A, 1971-1988.
121. LINDSEY, E. O., R. NATSUAKI, X. XU, M. SHIMADA, M. HASHIMOTO, D. MELGAR, AND D. T. SANDWELL (2015). LINE OF SIGHT DISPLACEMENT FROM ALOS-2 INTERFEROMETRY: MW7.8 GORKHA EARTHQUAKE AND MW 7.3 AFTERSHOCK, SUBMITTED TO GEOPHYSICS. RES. LETT.
122. MOSS, R. E. S., STANTON, K. V., AND BUELNA, M. (2013). THE IMPACT OF MATERIAL STIFFNESS ON THE LIKELIHOOD OF FAULT RUPTURE PROPAGATING TO THE GROUND SURFACE, SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS, 84, 485-488, MAY/JUNE.
123. ROLANDONE, F., D. DREGER, M. MURRAY, AND R. BURGMANN (2006). COSEISMIC SLIP DISTRIBUTION OF THE 2003 MW6.6 SAN SIMEON EARTHQUAKE, CALIFORNIA, DETERMINED FROM GPS MEASUREMENTS AND SEISMIC WAVEFORM DATA, GEOPHYS. RES. LETT., 33, L16315, DOI:10.1029/2006GL027079.
124. AMBRASEYS N AND DOUGLAS J (2004). MAGNITUDE CALIBRATION OF NORTH INDIAN EARTHQUAKES, GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL, 159(1): 165–206.
125. ASIMAKI, D. (2015). UNDERSTANDING, SIMULATION AND PARAMETERIZATION OF 3D TOPOGRAPHY EFFECTS, SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA 2015 ANNUAL MEETING, PASADENA, CA, APRIL 29-MAY 1.
126. ASSIMAKI, D., LI, W., STEIDL, J. H., & TSUDA, K. (2008). SITE AMPLIFICATION AND ATTENUATION VIA DOWNHOLE ARRAY SEISMOGRAM INVERSION: A COMPARATIVE STUDY OF THE 2003 MIYAGI-OKI AFTERSHOCK SEQUENCE, BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 98(1), 301-330.
127. BARD, P-Y AND M. BOUCHON (1995). THE TWO-DIMENSIONAL RESONANCE OF SEDIMENT-FILLED VALLEYS. BULL. SEISM. SOC. AM., 75, PP. 519–541. 15
128. CHITRAKAR, G.R., PANDEY, M.R. (1986). HISTORICAL EARTHQUAKES OF NEPAL, BULLETIN GEOLOGICAL SOCIETY OF NEPAL 4, 7–8.
129. DIXIT A, DWELLY-SAMANT L, NAKARMI M, PRADHANANG S AND TUCKER B (1998). THE KATHMANDU VALLEY EARTHQUAKE MANAGEMENT PLAN, PUBLISHED BY NATIONAL SOCIETY FOR EARTHQUAKE TECHNOLOGY-NEPAL, PP. 38.
130. FIELD, E. H., & JACOB, K. H. (1995). A COMPARISON AND TEST OF VARIOUS SITE-RESPONSE ESTIMATION TECHNIQUES, INCLUDING THREE THAT ARE NOT REFERENCE-SITE DEPENDENT, BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 85(4), 1127-1143.
131. HAGEN, T. (1969). REPORT ON THE GEOLOGICAL SURVEY OF NEPAL, DENKSCHR SCHWEIZERISCHEN NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT 81, 185.
132. JICA (2002), THE STUDY ON EARTHQUAKE DISASTER MITIGATION IN THE KATHMANDU VALLEY KINGDOM OF NEPAL, JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA) AND MINISTRY OF HOME AFFAIRS HIS MAJESTY'S GOVERNMENT OF NEPAL, VOLUME I 2002, SUMMARY P. 110, VOLUME III, MAIN REPORT 2/2, EARTHQUAKE DISASTER ASSESSMENT AND DATA BASE SYSTEM, PP. 76.

133. KATEL, T.P., UPRETI, B.N., POKHAREL, G.S. (1996). ENGINEERING PROPERTIES OF FINE GRAINED SOILS OF KATHMANDU VALLEY NEPAL, JOURNAL OF NEPAL GEOLOGICAL SOCIETY 13, 121–138.
134. LACHET, C., HATZFELD, D., BARD, P. Y., THEODULIDIS, N., PAPAIOANNOU, C., & SAVVAIDIS, A. (1996). SITE EFFECTS AND MICROZONATION IN THE CITY OF THESSALONIKI (GREECE) COMPARISON OF DIFFERENT APPROACHES. BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 86(6), 1692-1703.
135. MOHAMMADI, K. (2014). SCATTERING OF IN-PLANE WAVES BY ELASTIC WEDGES, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION 2014 FALL MEETING, SAN FRANCISCO, CA, DECEMBER 15-19.
136. MORIBAYASHI, S., MARUO, Y. (1980). BASEMENT TOPOGRAPHY OF THE KATHMANDU VALLEY, NEPAL – AN APPLICATION OF THE GRAVITATIONAL METHOD TO THE SURVEY OF A TECTONIC BASIN IN THE HIMALAYA. JOURNAL OF JAPAN SOCIETY OF ENGINEERING GEOLOGY 21, 30–37.
137. MUGNIER JL, HUYGHE P, GAJUREL AP, UPRETI BN AND JOUANNE F (2011). SEISMITES IN THE KATHMANDU BASIN AND SEISMIC HAZARD IN CENTRAL HIMALAYA, TECTONOPHYSICS, 509 (1-2): 33–49.
138. NAKAMURA Y (1989). A METHOD FOR DYNAMIC CHARACTERISTICS ESTIMATION OF SUBSURFACE USING MICROTREMOR ON THE GROUND SURFACE, QUARTERLY REPORT OF THE RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE, 30(1): 25–33.
139. NAKATA, T., KUMURA, K., ROCKWELL, T. (1998). FIRST SUCCESSFUL PALEOSEISMIC TRENCH STUDY ON ACTIVE FAULTS IN THE HIMALAYAS. PROCEEDINGS OF AGU 1998 FALL MEETING: EOS, TRANSACTIONS AGU, 79, P. 45.
140. PAUDYAL, Y. R., YATABE, R., BHANDARY, N. P., & DAHAL, R. K. (2012). A STUDY OF LOCAL AMPLIFICATION EFFECT OF SOIL LAYERS ON GROUND MOTION IN THE KATHMANDU VALLEY USING MICROTREMOR ANALYSIS. EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING VIBRATION, 11(2), 257-268.
141. PIYA, B. K. (2004). GENERATION OF A GEOLOGICAL DATABASE FOR THE LIQUEFACTION HAZARD ASSESSMENT IN KATHMANDU VALLEY, NATURAL HAZARD STUDIES. ENSCHEDE, THE NETHERLANDS, ITC.
142. RANA, B.J.B. (1935). NEPAL KO MAHA BHUKAMPA (GREAT EARTHQUAKE OF NEPAL), JORGANESH PRESS.
143. SAKAI, H. (2001). STRATIGRAPHIC DIVISION AND SEDIMENTARY FACIES OF THE KATHMANDU BASIN GROUP, CENTRAL NEPAL. JOURNAL OF NEPAL GEOLOGICAL SOCIETY 25, 19–32 (SPECIAL ISSUE).
144. SAKAI, T., TAKAGAWA, T., GAJUREL, A.P., TABATA, H., O'I, N., UPRETI, B.N. (2006). DISCOVERY OF SEDIMENT INDICATING RAPID LAKE-LEVEL FALL IN THE LATE PLEISTOCENE GOKARNA FORMATION, KATHMANDU VALLEY, NEPAL: IMPLICATION FOR TERRACE FORMATION. QUATERN. RES. 45, 99–112.
145. STÖCKLIN, J., BHATTARAI, K.D. (1981). GEOLOGY OF KATHMANDU AREA AND CENTRAL MAHABHARAT RANGE, NEPAL HIMALAYA. UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM, MINERAL EXPLORATION NEPAL (DP/UN/NEP-73-019/3). P. 64.
146. UPRETI, B.N., YOSHIDA, M. (2009). SEISMIC HAZARD AND MITIGATION ACTIVITIES IN NEPAL, WITH EMPHASIS ON KATHMANDU VALLEY, JOURNAL OF SOUTH ASIA DISASTER STUDIES 2 (1), 1–19.

147. YOSHIDA M AND IGARASHI Y (1984), NEOGENE TO QUATERNARY LACUSTRINE SEDIEMNTS IN THE KATHAMANDU VALLEY, NEPAL, JOURNAL OF NEPAL GEOLOGICAL SOCIETY, 4: 73–100.
148. COLLINS, B.D., AND JIBSON, R.W., 2015, ASSESSMENT OF EXISTING AND POTENTIAL LANDSLIDE HAZARDS RESULTING FROM THE APRIL 25, 2015 GORKHA, NEPAL EARTHQUAKE SEQUENCE: U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 2015–1142, 50 P., HTTP://DX.DOI.ORG/10.3133/OFR20151142.
149. NEPAL MINISTRY OF HOME AFFAIRS, 2014. NEPAL DISASTER REPORT 2013.
150. TIWARI, B., AND MARUI, H. 1998. LANDSLIDE INVESTIGATION AND PREVENTION PRACTICE IN NEPAL. ANNUAL REPORT OF RESEARCH INSTITUTE FOR HAZARDS IN SNOWY AREAS, 20, 37-55. NEPAL MINISTRY OF HOME AFFAIRS. 2014. NEPAL DISASTER REPORT 2013.
151. TIWARI, B., JUIS, S., COHELHO, M. (2015) LANDSLIDES TRIGGERED BY MW7.8 NEPAL EARTHQUAKE, POSTER PRESENTED AT BRAZILIAN SCIENCE MOBILITY PROGRAM RESEARCH WORKSHOP, CALIFORNIA STATE UNIVERSITY FULLERTON, JULY 2015.
152. ZISELSBERGER, M., 2016. INVENTORY OF EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDES IN THE SINDULPALCHOK DISTRICT OF NEPAL RESULTING FROM THE M7.8 GORKHA EARTHQUAKE AND RELATED AFTERSHOCK SEQUENCE. M.S. THESIS, INSITUTE OF APPLIED GEOSCIENCES, GRAZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (IN PREPARATION).
153. BRAY, JONATHAN D., AND RODOLFO B. SANCIO. "ASSESSMENT OF THE LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY OF FINE-GRAINED SOILS." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 132.9 (2006): 1165-1177.
154. DMG (1998). ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY MAP OF THE KATHMANDU VALLEY. DEPARTMENT OF MINES AND GEOLOGY, KATHMANDU (NEPAL).
155. IDRISS, I. M., AND R. W. BOULANGER. "SEMI-EMPIRICAL PROCEDURES FOR EVALUATING LIQUEFACTION POTENTIAL DURING EARTHQUAKES." SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING 26.2 (2006): 115-130.
156. PIYA, B. K. (2004). GENERATION OF A GEOLOGICAL DATABASE FOR THE LIQUEFACTION HAZARD ASSESSMENT IN KATHMANDU VALLEY. THESIS IN PARTIAL FULFILLMENT OF MS, INTERNATIONAL INSTITUTE FOR GEO-INFORMATION SCIENCE AND EARTH OBSERVATION, ENSCHEDE, THE NETHERLANDS, MARCH.
157. SAPKOTA, S. N., BOLLINGER, L., KLINGER, Y., TAPPONNIER, P., GAUDEMER, Y., & TIWARI, D. (2013). PRIMARY SURFACE RUPTURES OF THE GREAT HIMALAYAN EARTHQUAKES IN 1934 AND 1255. NATURE GEOSCIENCE, 6(1), 71-76. SAKAI, H. (2001A). THE KATHMANDU BASIN AS ARCHIVE OF HIMALAYAN UPLIFT AND PAST MONSOON CLIMATE, JOUR. NEPAL GEOL. SOC., V 25 (SP. ISSUE), PP.1-7.
158. SAKAI, H. (2001B). DANUWARGAUN FAULT AS A TRIGGER FOR DRAINING OF THE PALAEO-KATHMANDU LAKE, CENTRAL NEPAL, JOUR. NEPAL GEOL. SOC., V 25 (SP. ISSUE), PP.89-92.
159. BOLTON SEED, H., TOKIMATSU, K., HARDER, L. F., & CHUNG, R. M. (1985). INFLUENCE OF SPT PROCEDURES IN SOIL LIQUEFACTION RESISTANCE EVALUATIONS. JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, 111(12 BOULANGER, R. W., & IDRISS, I. M. (2004). EVALUATING THE POTENTIAL FOR LIQUEFACTION OR CYCLIC FAILURE OF SILTS AND CLAYS (P. 131). CENTER FOR GEOTECHNICAL MODELING.

160. HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. & SHEAHAN, T.C. 2011. AN INTRODUCTION TO GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2ND ED. PEARSON EDUCATION, NJ.
161. ADHIKARI, L.B., GAUTAM, U.P., KOIRALA, B.P., BHATTARAI, M., KANDEL, T., GUPTA, R.M., TIMSINA, C., MAHARJAN, N., MAHARJAN, K., DAHAL, T., HOSTE-COLOMER, R., CANO, Y., DANDINE, M., GUILHEM, A., MERRER, S., ROUDIL, P., BOLLINGER, L., 2015. THE AFTERSHOCK SEQUENCE OF THE APRIL 25 2015 GORKHA-NEPAL EARTHQUAKE. GEOPHYS. J. INT. 203, 2119–2124.
162. BHATTARAI, M., ADHIKARI, L.B., GAUTAM, U.P., LAURENDEAU, A., LABONNE, C., HOSTE-COLOMER, R., SÈBE, O., HERNANDEZ, B., 2015. ELECTRONIC SUPPLEMENT TO OVERVIEW OF THE LARGE 25 APRIL 2015 GORKHA, NEPAL, EARTHQUAKE FROM ACCELEROMETRIC PERSPECTIVES. SEISMOL. RES. LETT. 86-6, 1540–1548. HTTP://DX.DOI.ORG/10.1785/0220150140.
163. BIJUKCHHEN, TAKAI, N., 2015. STRONG GROUND-MOTION CHARACTERISTICS IN THE KATHMANDU BASIN (STRONG-MOTION OBSERVATION AND DAMAGE ASSESSMENT OF 2015 GORKHA, NEPAL EARTHQUAKE). ABSTRACT AVAILABLE AT HTTP://WWW.ENG.HOKUDAI.AC.JP/E3/ALUMNI/FILES/ ABSTRACT/M286.PDF (ACCESSED 03/25/2016).
164. D'AYALA, D., BAJRACHARYA, 2014. TRADITIONAL NAWARI HOUSE IN KATHMANDU VALLEY, WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA. (HTTP://DB.WORLD-HOUSING.NET/BUILDING/99). FIVETHIRTYEIGHT.COM, 2015. USGS MODEL SUGGESTS THE NEPAL EARTHQUAKE DEATH TOLL WILL KEEP CLIMBING. HTTP://FIVETHIRTYEIGHT.COM/DATALAB/USGS-MODEL-SUGGESTS-THENEPAL-EARTHQUAKE-DEATH-TOLL-WILL-KEEP-CLIMBING/ (POSTED 4/27/2015. ACCESSED 03/20/2016).
165. GRÜNTHAL, G., MUSSON, R., SCHWARZ, J., STUCCHI,M. (EDS.), 1998. THE EUROPEAN MACROSEISMIC SCALE EMS-98CONSEIL DE L'EUROPE, CAHIERS DU CENTRE EUROPÉEN DE GÉODYNAMIQUE ET DE SÉISMOLIGIE VOL. 15. EUROPEAN SEISMOLOGICAL COMMISSION JOS PRINTING EPH BEFFORT, HELFENT-BERTRANGE – 1998, LUXEMBOURG, HTTP://WWW.FRANCESEISME.FR/EMS98_ ORIGINAL_ENGLISH.PDF (101 PP.).
166. HAYES, G.P., BRIGGS, R.W., BARNHART,W.D., YECK,W.L.,MCNAMARA, D.E.,WALD, D.J., NEALY, J.L., BENZ, H.M., GOLD, R.D., JAISWAL, K.S., MARANO, K., EARLE, P.S., HEARNE, M.G., SMOCZYK, G.M., WALD, L.A., SAMSONOV, S.V., 2015. CHARACTERIZATION OF THE 2015 MW 7.8 NEPAL (GORKHA) EARTHQUAKE SEQUENCE AND ITS SEISMOTECTONIC CONTEXT. SEISMOL. RES. LETT. 86, 1557–1567. HTTP://DX.DOI.ORG/10.1785/0220150145.
167. MARHATTA, Y.B., BOTHARA, J.K., MAGAR, M.B., CHAPAGAIN, G., 2014. PILLAR WALA GHAR (URM INFILLED RC FRAME BUILDINGS). WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA. (HTTP://DB.WORLDHOUSING. NET/BUILDING/145).
168. MARTIN, S.S., HOUGH, S.E., HUNG, C., 2015. GROUND MOTIONS FROM THE 2015 MW 7.8 GORKHA, NEPAL, EARTHQUAKE, CONSTRAINED BY A DETAILED ASSESSMENT OF MACROSEISMIC DATA. SEISMOL. RES. LETT. 86 (6). HTTP://DX.DOI.ORG/10.1785/0220150138.
169. OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS (OCHA), 2015,. HTTP://RELIEFWEB.INT/ SITES/RELIEFWEB.INT/FILES/RESOURCES/NPL_EQ_SNAPSHOT_150707.PDF.

170. POST DISASTER NEEDS ASSESSMENT (PDNA), 2015. NEPAL EARTHQUAKE 2015: POST DISASTER NEEDS ASSESSMENT, PUBLISHED BY GOVERNMENT OF NEPAL. WWW.NPC.GOV.NP.
171. SAPKOTA, S.N., BOLLINGER, L., PERRIER, F., 2016. FATALITY RATES OF THEMW 8.2, 1934. BIHAR-NEPAL EARTHQUAKE AND COMPARISON WITH THE APRIL 2015 GORKHA EARTHQUAKE, EARTH, PLANETS AND SPACE (IN PRESS).
172. SHABESTARIA, K.T., YAMAZAKI, F., 2001. A PROPOSAL OF INSTRUMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE COMPATIBLE WITH MMI EVALUATED FROM THREE-COMPONENT ACCELERATION RECORDS. EARTHQUAKE SPECTRA 17 (4), 711 723.
173. SINHA, R., BRZEV, S., 2014. UNREINFORCED BRICK MASONRY BUILDINGWITH REINFORCED CONCRETE ROOF SLAB, WORLD HOUSING ENCYCLOPEDIA. (HTTP://DB.WORLD-HOUSING.NET/BUILDING/21).
174. SOMERVILLE, P.G., GRAVES, R.W., SAIKIA, C.K., 1995. CHARACTERIZATION OF GROUND MOTIONS AT THE SITES OF SUBJECT BUILDINGS, REPORT ON TASK 4 OF THE SAC JOINT VENTURE PROGRAM FOR THE REDUCTION OF EARTHQUAKE HAZARDS IN STEEL MOMENT FRAME BUILDINGS.
175. SPENCE, R., COBURN, A., POMONIS, A., 1992. CORRELATION OF GROUND MOTION WITH BUILDING DAMAGE: THE DEFINITION OF A NEW DAMAGE-BASED SEISMIC INTENSITY SCALE. PROCEEDINGS OF TENTH WORLD CONF. ON EARTHQ. ENG. VOL. 1, PP. 551–556 MADRID (HTTP://WWW.IITK. AC.IN/NICEE/WCEE/ARTICLE/10_VOL1_551.PDF).
176. TAKAI, N., SHIGEFUJI, M., RAJAURE, S., BIJUKCHHEN, S., ICHIYANAGI, M., DHITAL, M.R., SASATANI, T., 2016. STRONG GROUND MOTION IN THE KATHMANDU VALLEY DURING THE 2015 GORKHA, NEPAL, EARTHQUAKE, EARTH. PLANETS SPACE 68 (1), 1–8. HTTP://DX.DOI.ORG/10.1186/ S40623-016-0383-7.
177. TERTULLIANI, A., GRAZIANI, L., CASTELLANO, C., MARAMAI, A., ROSSI, A., 2016. COMMENT ON “GROUND MOTIONS FROM THE 2015 MW 7.8 GORKHA, NEPAL, EARTHQUAKE CONSTRAINED BY A DETAILED ASSESSMENT OF MACROSEISMIC DATA” BY STACEY S. MARTIN, SUSAN E. HOUGH, AND CHARLEEN HUNG. SEISMOL. RES. LETT. 87 (4). HTTP://DX.DOI.ORG/10.1785/0220150258.
178. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 1989. THE SEVERITY OF AN EARTHQUAKE. GENERAL INTEREST PUBLICATION, U.S. GOVERMENT PRINTING OFFICE, PP. 288–913.
179. WORDEN, C.B., WALD, D.J., 2016. SHAKEMAP MANUAL. HTTP://DX.DOI.ORG/10.5066/F7D21VPQ (FEBRUARY 01, 2016).

ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΚΕΙΜΕΝΩΝ.