

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

ΤΟΜΟΣ 2 / VOL.2

Proceedings

4^o

Πανελλήνιο
Συνέδριο
Γεωτεχνικής &
Γεωπεριβαλλοντικής
Μηχανικής

*4th Hellenic Conference
on Geotechnical &
Geoenvironmental Engineering*

*Athens
30/5 - 1/6/2001*

30/5-1/6 2001
ΑΘΗΝΑ-ΣΤΑΔΙΟ ΕΙΡΗΝΗΣ ΚΑΙ ΦΙΛΙΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2001

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

Εντοπισμός Περιοχών Υψηλής Πιθανότητας Ρευστοποίησης με τη Χρήση Δεδομένων Τηλεπισκόπησης στην Δυτική Ελλάδα

Remote Sensing-Aided Localization of Liquefaction-Prone Sites. Existing Data and Application of the Method in Western Greece

ΛΕΚΚΑΣ, Ε. Α. Γεωλόγος, Αν. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ Ε. Μ. Γεωλόγος, Υπ. Διδάκτωρ Τηλεπισκόπησης, Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα φαινόμενα των ρευστοποιήσεων εδαφών, τα οποία εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια των σεισμικών κινήσεων, αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα που είναι υπεύθυνος σε μεγάλο βαθμό για την πρόκληση καταστροφών. Στον εντοπισμό περιοχών στις οποίες υφίσταται η πιθανότητα να προκληθούν τέτοια φαινόμενα μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά η ανάλυση δορυφορικών εικόνων LANDSAT5-TM σε ορισμένες φασματικές περιοχές και ειδικότερα στο κανάλι 7. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε και επιβεβαιώθηκε στην περιοχή Κόμπτε Ιαπωνίας (M=7.2R, 1995), στην περιοχή Πύργου Ηλείας (M=5.5R, 1993) και στη περιοχή του Αιγίου (M=6.1R, 1995) ενώ γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού πιθανών περιοχών στη Δυτική Ελλάδα.

ABSTRACT: The liquefaction of the soils that appears during earthquakes is one of the most significant natural disasters. The definition of the regions that are possible to be affected by liquefaction could be aided by analyzing optical satellite images in some parts of the spectrum especially by using band 7 of the Landsat-TM images. This technique was applied and verified at the Kobe area, Japan, (M=7.2R, 1995), at the Pyrgos area, Helia, (M=5.5R, 1993) and at the Aegio earthquake (M=6.1R, 1995). Based on the same technique an effort is made of defining liquefaction potential in other regions of western Greece and specifically at the region of Mytikas and at the mouth of Acheloos river in Messologi, Aetolia and Akarnania county.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό, το φαινόμενο της ρευστοποίησης εδαφών εκδηλώνεται κυρίως κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων με αποτέλεσμα να προξενούνται σημαντικές καταστροφές στις κατασκευές και γενικότερα στα τεχνικά έργα, τα οποία είναι θεμελιωμένα στους συγκεκριμένους σχηματισμούς. Κατά τη ρευστοποίηση, τα εδαφικά υλικά και κυρίως άμμοι, ιλύες και χάλικες με παρουσία νερού, υποβάλλονται σε διατμητικές ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, χάνουν τη διατμητική τους αντοχή και αποκτούν συμπεριφορά βαρέως υγρού (SEED, 1979). Συνήθεις εκδηλώσεις ρευστοποιήσεων στην επιφάνεια του εδάφους είναι η έκχυση των ρευστοποιημένων υλικών,

η παρουσία κρατήρων έκχυσης, οι εδαφικές διαρρήξεις, οι καθιζήσεις, οι κατολισθήσεις και η δημιουργία ανώμαλων κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια (LEKKAS et al., 1996b).

Ο εντοπισμός περιοχών στις οποίες υφίσταται η πιθανότητα να προκληθούν φαινόμενα ρευστοποιήσεων αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για τη μείωση του σεισμικού κινδύνου και γενικότερα τον χωροταξικό Αντισεισμικό Σχεδιασμό. Πρόκειται για μια εξαιρετικά σύνθετη έρευνα με μεγάλη χρονική διάρκεια, η οποία περιλαμβάνει αξιολόγηση γεωμορφολογικών, γεωλογικών, γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών δεδομένων, ενώ παράλληλα απαιτεί μεγάλη δαπάνη εξαιτίας των πολυάριθμων εργασιών υπαίθρου, επιτόπου δοκιμών και εξειδικευμένων

εργαστηριακών δοκιμών και αναλύσεων που πρέπει να εκτελεστούν.

Στην επίλυση του προβλήματος αυτού μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά η ανάλυση δορυφορικών εικόνων, δεδομένου ότι υπάρχει η δυνατότητα διερεύνησης της φύσης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών σε ορισμένες φασματικές περιοχές του μέσου υπέρυθρου του LANDSAT5-TM δορυφορικού συστήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην Ιαπωνία κατά τους σεισμούς του Nihonkai-Cyubu $M=7.7$ (26 Μαΐου 1983), Kushiro-Oki $M=7.8$ (15 Ιανουαρίου 1993), Hokkaido-Nansei-Oki $M=7.8$ (12 Ιουλίου 1993) εφαρμόστηκαν με κυμαινόμενο βαθμό επιτυχίας δεδομένα τηλεπισκόπησης, προκειμένου να διαπιστωθεί ποιες φασματικές περιοχές του δορυφορικού συστήματος LANDSAT5-TM αναδεικνύουν και προσεγγίζουν - επικαλύπτουν περιοχές στις οποίες εμφανίστηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων (TOMATSU et al., 1992, TOMATSU et al., 1993, KUBO, 1994, TOMATSU & SATO, 1994, TOMATSU et al., 1995).

Μια ιδιαίτερη τεχνική εφαρμόστηκε και επιβεβαιώθηκε ήδη σε δύο περιοχές οι οποίες επλήγησαν από σεισμούς, κατά τους οποίους προκλήθηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων (LEKKAS, et al., 1996a LEKKAS, et al., 1996b). Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε στην περιοχή Kobe-Nankai (Κεντρική Ιαπωνία), η οποία επλήγη από σεισμό $M=7.2R$ στις 17 Ιανουαρίου 1995 και στην περιοχή του Πύργου Ηλείας (Δυτική Ελλάδα), η οποία επλήγη από σεισμό $M=5.5R$ στις 26 Μαρτίου 1993.

Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται για περαιτέρω επιβεβαίωση στο σεισμό του Αιγίου (Ελλάδα) $M=6.1R$ που έλαβε χώρα στις 15 Ιουνίου 1995, κατά τον οποίο εκδηλώθηκαν εκτεταμένες ρευστοποιήσεις. Στη συνέχεια γίνεται μια νέα εφαρμογή της μεθόδου εντοπισμού πιθανών μελλοντικών φαινομένων σε περιοχές στη Δυτική Ελλάδα, οι οποίες χαρακτηρίζονται από το ίδιο σεισμοτεκτονικό - γεωλογικό πλαίσιο, παρόμοιες γεωτεχνικές συνθήκες, ενώ βρίσκονται κάτω από "πιεστική διαδικασία" αστικοποίησης και καθορισμού χρήσεων γης. Συγκεκριμένα γίνεται εφαρμογή της μεθόδου στην ευρύτερη περιοχή του Μύτικα και στην περιοχή εκβολών του Αχελώου ποταμού - Μεσολογίου στο νομό Αιτωλίας-Ακαρνανίας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Με τη χρήση της τηλεπισκόπησης (Θεματικός

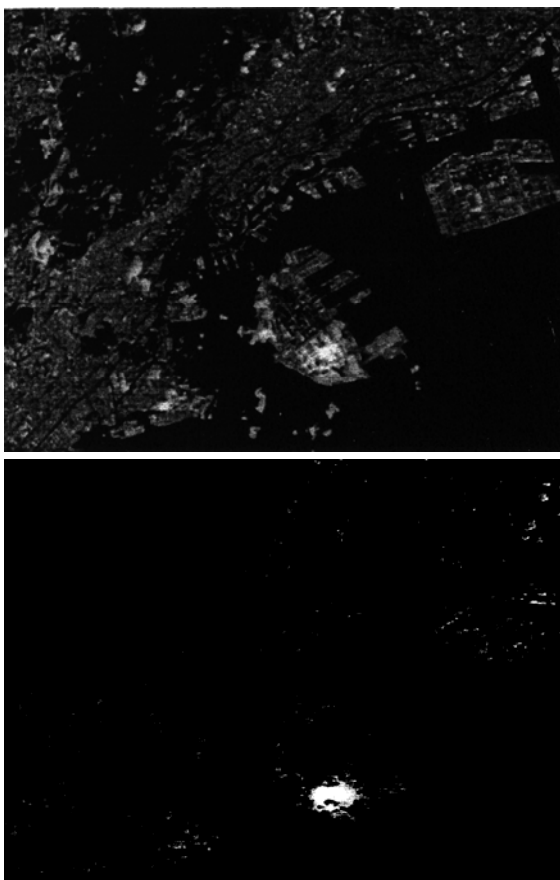
Χαρτογράφος TM του LANDSAT 5 δορυφορικού συστήματος) προσφέρεται η δυνατότητα να απεικονισθούν τα επιφανειακά δεδομένα και μάλιστα σε σχετικά μεγάλη έκταση. Το συγκεκριμένο δορυφορικό σύστημα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα υφιστάμενα δορυφορικά συστήματα λόγω της ευρύτητας των φασματικών δεδομένων σε συνδυασμό με την σχετικά υψηλή ανάλυση. Η όλη διαδικασία της έρευνας περιλαμβάνει αρχικά την επιλογή των εικόνων που αντιστοιχούν στην περιοχή και οι οποίες θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατό μικρότερη νέφωση και στην επιφάνεια να μην υπάρχει πολύ πυκνή βλάστηση με μεγάλο ύψους φυτά και πολύ νερό από βροχοπτώσεις. Η ανάλυση των εικόνων γίνεται σε πρώτο στάδιο από πλήρως ανεπεξέργαστες εικόνες του καναλιού 7, που απεικονίζουν ανακλώμενη ενέργεια στο μέσο υπέρυθρο, με μήκος κύματος 2.08-2.35 μm (LILLESAND & KIEFER, 1994). Ως γνωστόν οι ψηφιακές δορυφορικές εικόνες στη φυσική τους μορφή αποτελούν μια δυσδιάστατη σειρά μικρών περιοχών που ονομάζονται pixels και τα οποία χωρικά αντιστοιχούν σε μικρά τεμάχια της επιφάνειας της γης. Σε κάθε pixel αντιστοιχεί ένας ακεραίος αριθμός με τιμές από 0 έως 255, ανάλογα με την ακτινοβολία την οποία ανακλά το εδαφικό τεμάχιο το οποίο απεικονίζει. Καθορίζεται η αρχική τιμή threshold για την δημιουργία μιας δυαδικής εικόνας (άσπρο-μαύρο) η οποία αποτελεί και την πρώτη επεξεργασμένη εικόνα, στην οποία στη συνέχεια μπορεί να γίνει αύξηση της αντίθεσης για να γίνει πιο ευδιάκριτη. Η εικόνα που παράγεται είναι δυνατό να ταυτίζεται πολύ με τον χάρτη κατανομής των ρευστοποιήσεων που μπορούν να παρατηρηθούν κατά την διάρκεια ενός σεισμού σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Η χρήση των δεδομένων τηλεπισκόπησης για επιφανειακή πληροφόρηση στις αστικές περιοχές περιορίζεται και κυρίως αφορά στις επί μέρους θέσεις όπου δεν υπάρχουν κτίρια. Με το δεδομένο όμως ότι και οι κατοικημένες περιοχές έχουν αρκετούς ανοιχτούς χώρους η επιφανειακή πληροφόρηση μπορεί να ληφθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης, η κατάσταση του εδάφους μπορεί να αναγνωριστεί έμμεσα ακόμα και όταν ένα μικρού πάχους πεζοδρόμιο καλύπτει το έδαφος, αφού το κανάλι 7 απεικονίζει μεγάλο μήκος κύματος ανακλώμενη ακτινοβολία που έχει διεισδύσει στο έδαφος για μερικά εκατοστά (VINCENT, 1997). Επισημαίνεται ότι η εδαφική

πληροφόρηση που λαμβάνεται δεν υποδεικνύει το βάθος της ρευστοποίησης ή ρευστοποιήσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε τυχόν γεωλογικούς σχηματισμούς, που βρίσκονται σε ικανό βάθος.

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΟΒΕ (ΙΑΠΩΝΙΑ) ΚΑΙ ΗΛΕΙΑΣ (ΕΛΛΑΔΑ)

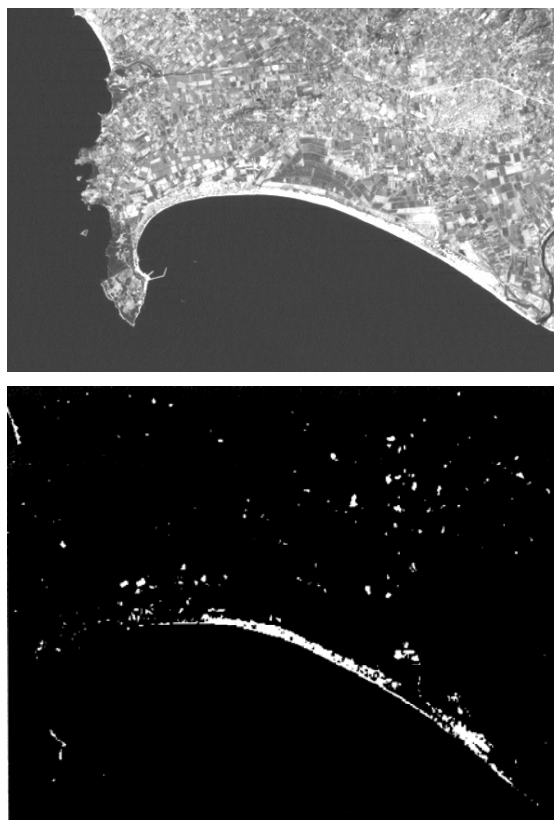
Όπως είναι γνωστό, καταστροφές από ρευστοποιήσεις προκλήθηκαν σε μεγάλη έκταση στην πόλη του Kobe κατά την εκδήλωση του σεισμού Hanshin της 17^{ης}



Σχήμα 1. Το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT5-TM (πάνω) και η επεξεργασμένη δυαδική εικόνα της περιοχής Kobe με τιμή threshold 27 (κάτω). Τα λευκά τμήματα της δυαδικής εικόνας αντιστοιχούν σε περιοχές στις οποίες εμφανίστηκαν ρευστοποιήσεις κατά το σεισμό της 17^{ης} Ιανουαρίου 1995.

Figure 1. Band 7 of Landsat5-TM image (up) and the interpreted binary image of the same area, using threshold value 27 (down). The white areas represent liquefactions observed after the main shock of 17-1-1995, at Kobe.

Ιανουαρίου 1995 (M=7.2R) στην επαρχία Nankai (Κεντρική Ιαπωνία). Η ανάλυση της εικόνας LANDSAT5-TM, που πάρθηκε πριν το σεισμό, έγινε επιλέγοντας την περιοχή του μέσου υπέρυθρου φάσματος στην περιοχή του καναλιού 7. Στη συνέχεια η εικόνα αυτή μετατράπηκε σε δυαδική και με τιμή threshold 27 (Σχ. 1), με αποτέλεσμα τα τμήματα με υψηλή τιμή ανάκλασης που είναι οι λευκές περιοχές να αντιστοιχούν ως επί το πλείστον στις περιοχές στις οποίες εμφανίστηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων και τα οποία χαρτογραφήθηκαν μετά το σεισμό (LEKKAS et



Σχήμα 2. Το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT-5TM (πάνω) της περιοχής Πύργου - Κατακόλου και η επεξεργασμένη δυαδική εικόνα με τιμή threshold 35 (κάτω). Οι λευκές περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές στις οποίες παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης ή σε περιοχές που αποδεδειγμένα, με βάση δεδομένα ερευνών, μπορούν να ρευστοποιηθούν.

Figure 2. Band 7 of Landsat5-TM image (up) and the interpreted binary image of the same area, using threshold value 35 (down). The white areas represent liquefactions observed after the main shock at Pyrgos or regions of liquefaction potential.

al., 1996a, LEKKAS et al., 1996b, ΛΕΚΚΑΣ & ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ, 1999). Οι περιοχές αυτές είναι κυρίως οι νησίδες Port Island και Rokko Island καθώς και τμήματα της παράκτιας ζώνης, τα οποία καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό από έργα εξωραϊσμού - διαμόρφωσης ελεύθερων χώρων. Στα ίδια περίπου αποτελέσματα κατέληξαν και παράλληλες έρευνες με δορυφορικά δεδομένα που υφίσταντο πριν και μετά το σεισμό (TOMATSU & SATO, 1996). Ρευστοποιήσεις εδαφών παρατηρήθηκαν στις παραλιακές περιοχές του Πύργου της Ηλείας μετά τον σεισμό μεγέθους 5.5R της 26ης Μαρτίου του 1993. Εφαρμόζοντας την προηγούμενη μέθοδο, δηλαδή μετατρέποντας το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT 5-TM σε δυαδική μορφή και δίνοντας τιμή threshold 35, παρήχθη μια εικόνα η οποία με αύξηση της αντίθεσης έγινε πιο ευδιάκριτη. Οι περιοχές που έχουν υψηλό βαθμό κινδύνου για ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια κάποιου σεισμού παρουσιάζονται με άσπρο σε αντίθεση με την υπόλοιπη περιοχή που φαίνεται μαύρη (Σχ. 2). Η ανωτέρω κάλυψη συμπίπτει ως επί το πλείστον με τις περιοχές στις οποίες εκδηλώθηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων κατά τον προηγούμενο σεισμό ή τις περιοχές που αποδεδειγμένα με βάση δεδομένα ερευνών μπορούν να ρευστοποιηθούν (LEKKAS, 1994). Αντιστοιχούν δε σε περιοχές οι οποίες είναι χέρσες ή καλλιεργούνται και στις οποίες εμφανίζονται παράκτιες αποθέσεις, ποτάμιοι σχηματισμοί και αλλούβια.

Οι διαφορές οι οποίες εντοπίζονται στις δύο περιπτώσεις σε ότι αφορά στις τιμές threshold, αποδίδονται κυρίως στο γεγονός ότι στη μεν περίπτωση του σεισμού του Κόμπτε η περιοχή ήταν αστικοποιημένη και καλυπτόταν κατά θέσεις από κτίρια, χώρους αναψυχής, ασφαλοστρώσεις και εν γένει εξωραϊστικά έργα, στη δε περίπτωση του σεισμού του Πύργου επρόκειτο για περιοχή επί το πλείστον χέρσο με μικρή κάλυψη από γεωργικές καλλιέργειες και οικιστική ανάπτυξη. Η μη πλήρης ταύτιση των λευκών περιοχών στις επεξεργασμένες εικόνες με τις υπαίθριες διαπιστώσεις μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό μέγεθος και τις λοιπές ιδιότητες της σεισμικής κίνησης στις δύο περιπτώσεις.

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΙΓΙΟΥ

Ο σεισμός του Αιγίου (Βόρεια Πελοπόννησος, Ελλάδα) έλαβε χώρα στις 15 Ιουνίου 1995 και είχε μέγεθος 6.1R. Από το σεισμό

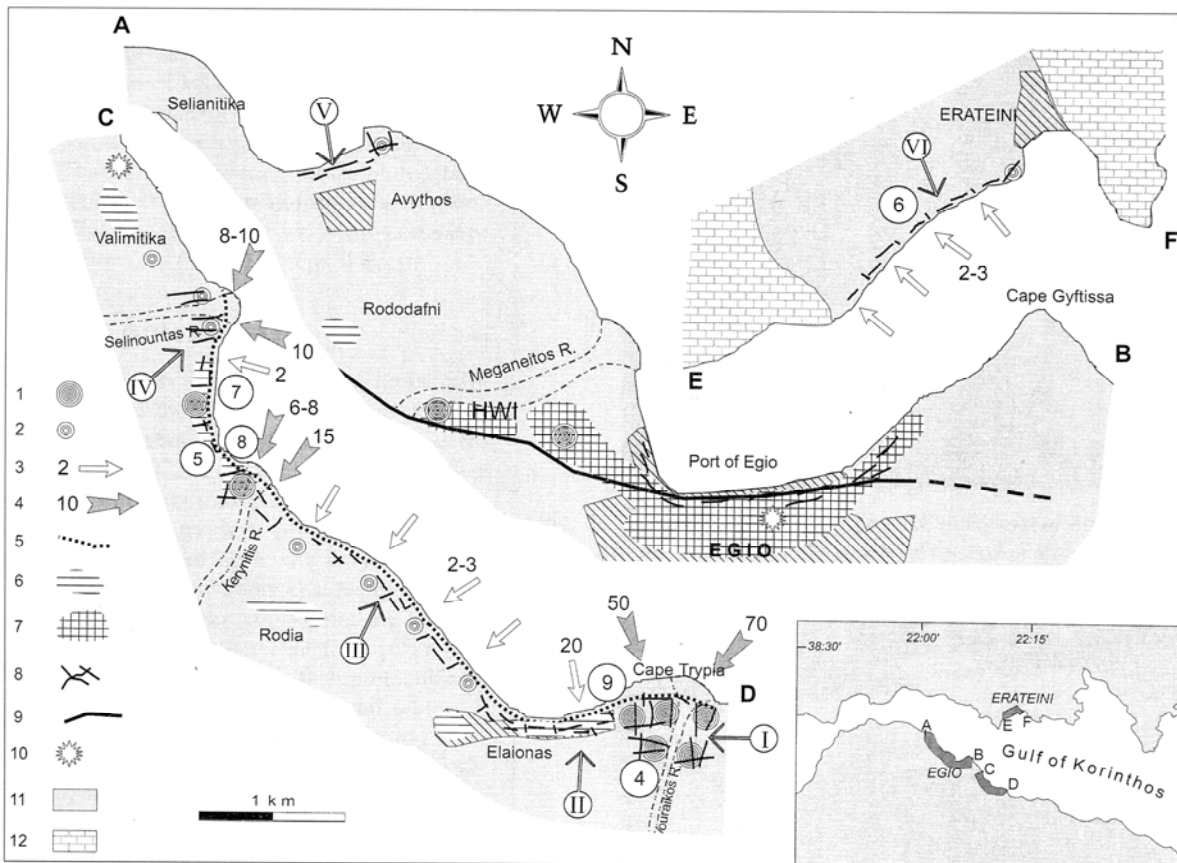
προκλήθηκαν αρκετοί θάνατοι και καταρρεύσεις κτιρίων, ενώ στην επικεντρική περιοχή παρατηρήθηκε μια ποικιλία γεωδυναμικών φαινομένων όπως εδαφικές και σεισμικές διαρρήξεις, ρευστοποιήσεις εδαφών, μεταβολές ακτογραμμών, κατολισθήσεις που ενδεικτικά παρουσιάζονται στο σχήμα 3 (LEKKAS et al, 1996c).

Ειδικότερα, οι ρευστοποιήσεις εδαφών καταλάμβαναν ένα μεγάλο τμήμα στην παράκτια έκταση δυτικά και ανατολικά του Αιγίου, στη δομή της οποίας λαμβάνουν μέρος σχηματισμοί του Ολοκαινού και ειδικότερα αλλούβια, παράκτιες και ποτάμιες αποθέσεις. Η μορφολογία της περιοχής εκδήλωσης των ρευστοποιήσεων είναι σχεδόν επίπεδη και σχετικά ομαλή με μικρή κλίση προς τη θάλασσα (βόρεια), ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια.

Από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων που λήφθηκαν πριν το σεισμό και σύμφωνα με τα δεδομένα των δύο προηγούμενων περιπτώσεων προέκυψε ότι αν γίνει επεξεργασία του καναλιού 7 με τιμή threshold 35, τότε υπάρχει μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ ρευστοποιήσεων και περιοχών ανοικτών χρωματισμών της δορυφορικής εικόνας. Αν η συγκεκριμένη εικόνα μετατραπεί σε δυαδική, τα τμήματα υψηλής ανάκλασης (λευκές περιοχές) φανερώνουν ενδεικτικά τις περιοχές ρευστοποιήσεων (Σχ. 4). Η μη απόλυτη ταύτιση των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων αλλά και των περιοχών εκδήλωσης ρευστοποιήσεων αποδίδονται κυρίως στην επιφανειακή κάλυψη του εδάφους από έργα εξωραϊσμού ενώ η περαιτέρω απόλυτη ταύτιση είναι απόλυτα συνδεδεμένη και ανάλογη με το μέγεθος του σεισμού και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΤΗΝ ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑ

Οι περιοχές στις οποίες επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η μέθοδος βρίσκονται στη Δυτική ηπειρωτική Ελλάδα, δεδομένου ότι χαρακτηρίζονται από το ίδιο σεισμοτεκτονικό - γεωλογικό πλαίσιο και τις ίδιες γεωτεχνικές συνθήκες. Μορφολογικά είναι πεδινές παράκτιες περιοχές στη δομή των οποίων λαμβάνουν μέρος Μεταλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από χαλαρές Ολοκαινικές αποθέσεις όπως αλλούβια, παράκτιες αποθέσεις, ελώδεις και



Σχήμα 3. Χάρτης των ρευστοποιήσεων και των υπόλοιπων γεωδυναμικών φαινομένων που έλαβαν χώρα στο σεισμό του Αιγίου του 1995 (1-2 Ρευστοποιήσεις, 3-4 Μετακινήσεις ακτών, 5 Ακτογραμμή μετά το σεισμό, 6-7 Περιοχές με καταστροφές, 8 Εδαφικές διαρρήξεις, 9 Σεισμική διάρρηξη, 10 Καταρρεύσεις κτιρίων, 11 Μεταλπικά ιζήματα, 12 Αλπικό υπόβαθρο), (LEKKAS et al, 1996c).

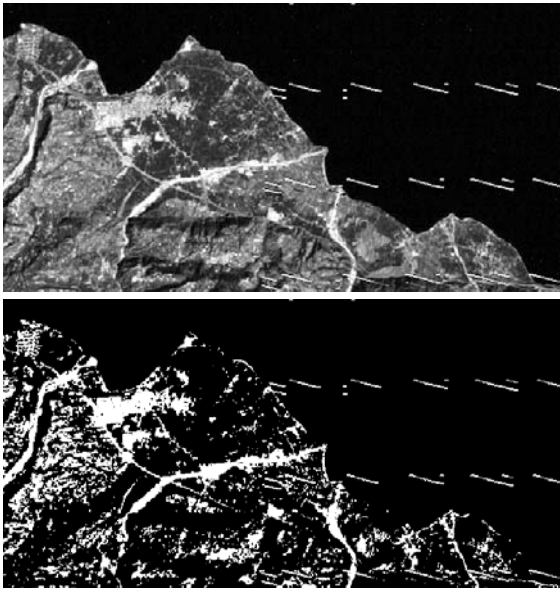
Figure 3. Map of the geodynamic phenomena that took place after the Egion earthquake, 1995 (1-2 Liquefactions, 3-4 Shoreline movements, 5 Shoreline after the shock, 6-7 Damage areas, 8 Ground ruptures, 9 Seismic ruptures, 10 Building collapse, 11 Post alpine sediments, 12 Alpine basement), (LEKKAS et al, 1996c).

ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, καθώς επίσης και Πλειο-Πλειστοκαινικές αποθέσεις όπως ερυθρές άργιλοι, συνεκτικά κροκαλοπαγή, κλπ. Οι σχηματισμοί αυτοί επικάθονται ασύμφωνα σε μάργες του Μειόκαινου και σε ασβεστόλιθους, φλύσχη και εβαπορίτες της Ιονίου ενότητας. Συγκεκριμένα στην περιοχή του Μύτικα (Δυτική Αιτωλοακαρνανία) ερευνήθηκε η πεδινή παράκτια περιοχή, η οποία καταλαμβάνεται ως επί το πλείστον από πρόσφατους σχηματισμούς του Ολοκαίνου και ειδικότερα ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, αλλούβια, ελώδεις και κατά θέσεις παράκτιες αποθέσεις. Εκτός από τη θέση στην οποία αναπτύσσεται ο ομώνυμος οικισμός, όλη η υπόλοιπη έκταση είναι αγροτική,

καλλιεργήσιμη με κατά θέσεις κάλυψη από δέντρα, ενώ τμήμα της είναι χέρσο.

Στην περιοχή Μύτικα επιλέχθηκε το κανάλι 7 με τιμή threshold 35 δεδομένου ότι αντιστοιχεί στις περιοχές Αιγίου και Πύργου, όπου η ανωτέρω τιμή έδειξε σημαντική προσέγγιση των δορυφορικών δεδομένων και των δεδομένων από την εκδήλωση των φαινομένων. Οι περιοχές αυτές που υφίστανται μεγάλη πιθανότητα να ρευστοποιηθούν εμφανίζονται ως λευκές περιοχές στο σχήμα 5, στην οποία έγινε και αύξηση της αντίθεσης για να είναι πιο ευδιάκριτες.

Με βάση τα υφιστάμενα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής και τα δεδομένα της προηγούμενης επεξεργασίας των



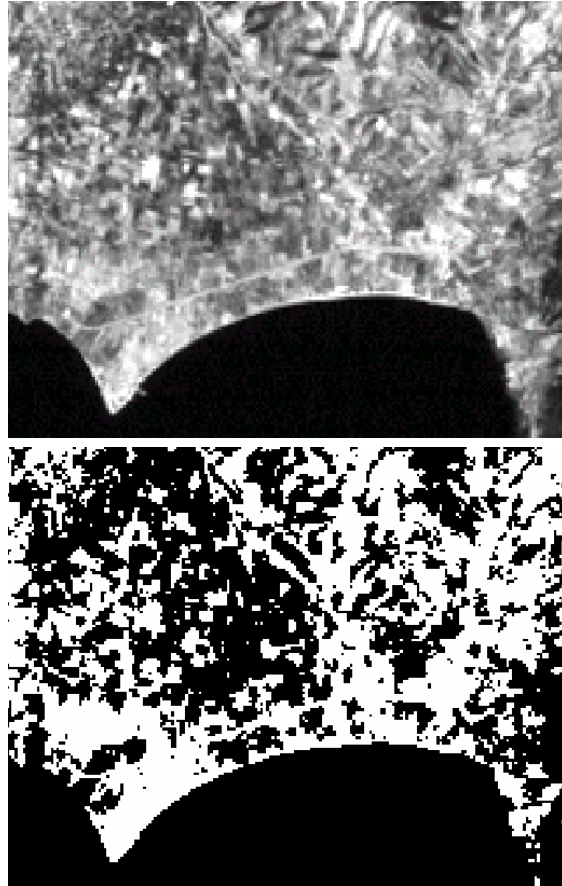
Σχήμα 4. Το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT 5 TM της περιοχής του Αιγίου και επεξεργασμένη δυαδική εικόνα με τιμή threshold 35. Οι λευκές περιοχές της δυαδικής εικόνας συμπίπτουν με τις περιοχές στις οποίες εκδηλώθηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων.

Figure 4. Band 7 of Landsat5-TM image (up) and the interpreted binary image of the same area, using threshold value 35 (down). The white areas represent liquefactions observed after the main shock at Egion or regions that had the potential of liquefaction but for some reasons it didn't occur.

δορυφορικών εικόνων διαπιστώνεται ότι οι λευκές περιοχές καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση των περιοχών στις οποίες εμφανίζονται οι Ολοκαινικοί σχηματισμοί και ειδικότερα τα αλλούβια, οι ελώδεις, οι παράκτιες αποθέσεις και οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, σχηματισμοί δηλαδή που είναι δυνατό από άποψη γεωτεχνικής συμπεριφοράς καταρχήν να ρευστοποιηθούν. Αντίθετα στις περιοχές όπου εμφανίζονται σχηματισμοί του Μειόκαινου και ειδικότερα μάργες ή αρχαιότεροι σχηματισμοί, όπως φλύσχη, σχηματισμοί δηλαδή που από γεωτεχνική άποψη δεν είναι δυνατό να ρευστοποιηθούν, συμπίπτουν με το μαύρο τμήμα της δυαδικής επεξεργασμένης δορυφορικής εικόνας.

Στην περιοχή των εκβολών του Αχελώου ποταμού - Μεσολογγίου εμφανίζονται κυρίως πρόσφατοι σχηματισμοί του Ολοκαιίνου, όπως αλλούβια, ποταμοχειμάρριες αποθέσεις,

ελώδεις αποθέσεις, παράκτιες αποθέσεις, κ.ά., ενώ υπάρχουν μόνο μερικές μικρές μορφολογικές εξάρσεις στις οποίες εμφανίζονται οι Αλπικοί σχηματισμοί του υποβάθρου. Η περιοχή καλύπτεται κυρίως από αγροτικές καλλιέργειες, ενώ σε μεγάλα τμήματα είναι χέρσος.



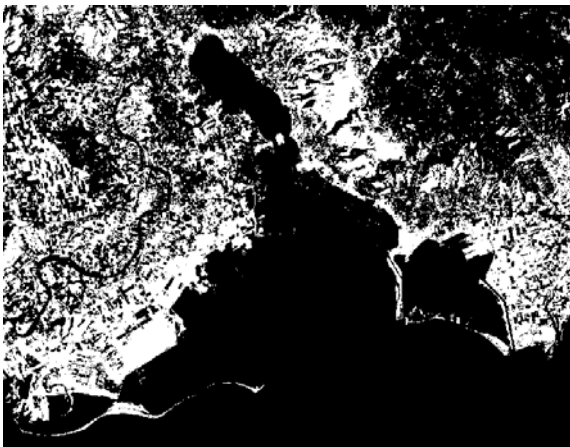
Σχήμα 5. Άποψη της περιοχής του Μύτικα στο κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT5-TM και επεξεργασμένη δυαδική εικόνα με τιμή threshold 35. Οι λευκές περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές στις οποίες είναι δυνατή η εκδήλωση ρευστοποιήσεων.

Figure 5. Band 7 of Landsat5-TM image (up) and the interpreted binary image of the same area (Mytikas), using threshold value 35 (down). The white areas represent regions of liquefaction potential after a possible future earthquake.

Στην περιοχή των εκβολών του Αχελώου ποταμού επιλέχθηκε επίσης το κανάλι 7 με τιμή threshold 35, δεδομένου ότι από πλευράς χαρακτηριστικών επιφάνειας αλλά και από πλευράς εμφάνισης γεωλογικών σχηματισμών αντιστοιχεί στις περιοχές του Αιγίου και του

Πύργου. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας εμφανίζονται στο σχήμα 6, όπου έχει γίνει αύξηση της αντίθεσης. Οι λευκές περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές στις οποίες υφίσταται μεγάλη πιθανότητα εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποιήσεων, ενώ αντίθετα οι μαύρες περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές, στις οποίες δεν υφίσταται η δυνατότητα ρευστοποιήσεων.

Και σε αυτή την περίπτωση με βάση τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής και τα δεδομένα της επεξεργασία των εικόνων διαπιστώνεται ότι οι λευκές περιοχές



Σχήμα 6. Άποψη της περιοχής των εκβολών του Αχελώου ποταμού στο κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT-5TM και επεξεργασμένη δυαδική εικόνα με τιμή threshold 35. Οι λευκές περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές στις οποίες είναι δυνατή η εκδήλωση ρευστοποιήσεων.

Figure 6. Band 7 of Landsat5-TM image (up) and the interpreted binary image of the same area (Acheloos debouchments – Messologi), using threshold value 35 (down). The white areas represent regions of liquefaction potential after a future earthquake.

καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής στην οποία εμφανίζονται οι σχηματισμοί του Ολοκαίνου και ειδικότερα τα αλλούβια, οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, οι ελώδεις και οι παράκτιες αποθέσεις, οι οποίοι είναι σχηματισμοί που από γεωτεχνική άποψη είναι δυνατό να ρευστοποιηθούν. Αντίθετα, παλαιότερης ηλικίας σχηματισμοί, όπως εβαποριτές, ασβεστόλιθοι, κλπ. που από γεωτεχνική άποψη δεν είναι δυνατό να ρευστοποιηθούν, συμπίπτουν με το μαύρο τμήμα της δυαδικής επεξεργασμένης δορυφορικής εικόνας.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Τα δορυφορικά δεδομένα τηλεπισκόπησης είναι δυνατό, αφού επεξεργαστούν κατάλληλα, να δώσουν σημαντικά στοιχεία για πολλά θεματικά αντικείμενα που αφορούν στην επιφάνεια της γης. Όπως διαπιστώθηκε και επιβεβαιώθηκε σε πρόσφατες σεισμικές κινήσεις, οι ρευστοποιήσεις εδαφών που έλαβαν χώρα σε περιοχές και ειδικότερα στο Κόμπτε (Ιαπωνία), στον Πύργο Ηλείας και στο Αίγιο (Ελλάδα) αντιστοιχούν σε γενικές γραμμές σε ορισμένα κανάλια του θεματικού χαρτογράφου (TM) του δορυφορικού συστήματος LANDSAT 5 που αντιστοιχεί στο μέσο υπέρυθρο. Μεγαλύτερη προσέγγιση και μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να ληφθεί εάν δημιουργηθούν εικόνες με τιμές threshold από 27 έως 37, ενώ οι ίδιες περιοχές αναδεικνύονται εάν οι συγκεκριμένες εικόνες μετατραπούν σε δυαδικές, των οποίων το λευκό-ανοικτό χρώμα αντιστοιχεί στις περιοχές που εμφανίζονται ρευστοποιήσεις.

Όπως διαπιστώνεται, οι τιμές threshold δεν παραμένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται και αυτό πιθανά οφείλεται στις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής, η οποία μπορεί να έχει αλλοιωθεί ή να καλύπτεται ως ένα ποσοστό από τις ανθρώπινες παρεμβάσεις και δραστηριότητες. Γενικά διαπιστώνεται ότι όσο πιο μεγάλη παρέμβαση έχει γίνει στην επιφάνεια της γης, τόσο μικρότερες τιμές threshold αντιστοιχούν με μεγαλύτερη ακρίβεια στις περιοχές που ρευστοποιούνται.

Κυρίαρχο εξάλλου ρόλο, στην έκταση των ρευστοποιήσεων παίζει το σεισμικό μέγεθος. Έτσι, διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται σε κάθε περίπτωση σεισμού μεταξύ των πραγματικών εκτάσεων εμφάνισης των ρευστοποιήσεων και των εκτάσεων που προκύπτουν από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων οφείλονται όπως είναι

επόμενο και στο μέγεθος του σεισμικού φαινομένου αλλά και σε λοιπές παραμέτρους, όπως λόγου χάρη την επικεντρική απόσταση. Για να διατυπωθούν σαφέστερα και να τεκμηριωθούν οι ανωτέρω συσχετίσεις, θα πρέπει να υφίστανται περισσότερα δεδομένα που θα αντληθούν κυρίως από μελλοντικές σεισμικές κινήσεις, οι οποίες θα προκαλέσουν ανάλογα φαινόμενα. Έτσι, θα υπάρχει ικανοποιητικό στατιστικό δείγμα από την επεξεργασία του οποίου δύναται να προκύψει η επίδραση του μεγέθους, της επιτάχυνσης, της διάρκειας, της επικεντρικής απόστασης, στην αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία της μεθόδου.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι η ανάλυση και επεξεργασία δορυφορικών εικόνων αποτελεί μια αισιόδοξη μεθοδολογία η οποία μπορεί να συμβάλλει στον εντοπισμό περιοχών που αντιμετωπίζουν προβλήματα ρευστοποιήσεων γρήγορα και με χαμηλό κόστος. Επισημαίνεται ότι η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο θα πρέπει να ενταθεί κυρίως σε περιπτώσεις εκδήλωσης νέων φαινομένων ρευστοποιήσεων στα αμέσως επόμενα χρόνια, οπότε και η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη, κυρίως με την αύξηση της διακριτικής ικανότητας, θα επιτρέψει τη λήψη και αξιοποίηση ενός πολύ μεγαλύτερου αριθμού πληροφοριών μέσω των δορυφορικών συστημάτων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Kubo, K. (1994). "Annual Report on Study of Weak Soil and Lifeline to Earthquake". Association for the Development of Earthquake Prediction, 39-92.
- Lekkas, E. (1994). "Liquefaction, risk zonation and urban development at Western Peloponnesus". Proceedings 7th International Congress International Association of Engineering Geology, publ. A.A. Balkema, 2095-2102, Lisboa.
- Lekkas, E., Kranis, H., Leounakis, M. & Stylianos, P. (1996a). "The seismotectonic setting of Kobe area (Japan) - The concomitant geodynamic phenomena of the Hanshin earthquake (January 17, 1995)". Advances in Earthquake Engineering, The Kobe Earthquake: Geodynamic Aspects, 1-16, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- Lekkas, E., Kranis, H., Leounakis, M. & Stylianos, P. (1996b). "Liquefaction phenomena caused by the Kobe earthquake (Japan)". 6th Spanish Congress and International Conference on Environmental Geology and Land-use Planning. Natural Hazards, Land-Use Planning and Environment. Eds. J. Chacon & C. Irigaray, p. 463-470, Granada.
- Lekkas, E., Lozios, S., Skourtsos, E. & Kranis, H. (1996c). "Liquefaction, ground fissures and coastline change during the Egio earthquake (15 June 1995, Central-Western Greece)". Terra Nova, Vol. 8, N. 6, 648-654.
- Lillesand, T. & Kiefer, R., (1994), "Remote sensing and image interpretation". John Wiley & Sons Inc., USA, 3d ed., p.750.
- Λέκκας, Ε. & Βασιλάκης, Ε., (1999). "Ανάλυση δορυφορικών εικόνων για τον εντοπισμό ρευστοποιήσεων - Συγκριτικά στοιχεία από το σεισμό του Πύργου (26 Μαρτίου 1993) και το σεισμό του Κόμπτε (17 Ιανουαρίου 1995)". 5^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, Αθήνα, σελ. 318-325.
- Seed, H.B. (1979). "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes". Jnl. Geotechnical Eng. Div., ASCE, 105:GT2, 201-255.
- Tomatsu, Y., Koshiishi, H., Sato, Y. & Hosokawa, K. (1992). "Basic research to estimating of liquefaction risk using by remote sensing data". Annual Conference of Japan, Society of Civil Engineers. JSCE, Vol. 47, No 1, 80-81.
- Tomatsu, Y., Sato, Y., Takada, S., & Fukuda, M. (1993). "Distribution of Liquefaction and Ground Freezing Surrounding Kushiro-city at the Time of Kushiro-oki Earthquake - Risk analysis of Liquefaction use of remote sensing data". JSCE Earthquake Engineering Symposium, JSCE, No 22, 407-410.
- Tomatsu, Y. & Sato, Y. (1994). "Case studies on hazard estimation of liquefaction using remote sensing data". 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Science Council of Japan. Vol. 1, 127-132.
- Tomatsu, Y., Sato, Y., & Akashi, T. (1995). "Characteristics of the remote sensing images in the liquefied regions". First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society, Vol. 1, 25-30.
- Tomatsu, Y. & Sato, Y. (1996). "Analysis of satellite images in the liquefied regions". 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Vincent, R. (1997). "Geological and environmental remote sensing". Prentice-Hall Inc., USA, p.366.