

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**<< 3D Οπτικοποίηση του τσουνάμι του 365 μ.Χ. στο
Παλιό λιμάνι των Χανίων με τη χρήση του ArcGis >>**

Μαρμάνης Δημήτρης

Χανιά
Ιούλιος 2010

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος της
ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κώστας Συνολάκης (Επιβλέπων Καθηγητής)

Τσουχλαράκη Ανδρονίκη

Καρατζάς Γεώργιος

Ευχαριστίες

Επιθυμώ να εκφράσω όλο μου το σεβασμό και την ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Κώστα Συνολάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες του εργαστηρίου Φυσικών Καταστροφών και Παράκτιας Μηχανικής, Νίκο Καλλιγέρη, Ειρήνη Κουτσογιαννάκη και Σπύρο Φωτείνη για την πολύ σημαντική τους βοήθεια και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της μου της προσπάθειας.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη Μαργαρίτα Σαμψάκη για τη βοήθειά της στο συντακτικό μέρος της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία OrbitLab για τη πολύ σημαντική συμβολή της στη δημιουργία του animation, που χωρίς αυτή δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διατριβής.

Εισαγωγή

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου απεικόνισης της Παλιάς Πόλης των Χανίων και ταυτόχρονα η δημιουργία του πραγματικού κύματος τσουνάμι που έπληξε την περιοχή το 365 μ.Χ.. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι δημιουργία του κώδικα μοντελοποίησης των τσουνάμι MOST (*Method of Splitting Tsunami*).

Για τη δημιουργία της αναπαράστασης αυτής χρησιμοποιήθηκαν πολλά προγράμματα ενώ κύριο ρολό ανάμεσα τους έπαιξε το λογισμικό ArcGIS 9.3, το οποίο είναι ένα από τα καλύτερα και πιο σύγχρονα εργαλεία στον τομέα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

Αν και προέκυψε πληθώρα προβλημάτων όσον αφορά στο λογισμικό δημιουργήθηκε επιτυχώς ένα μοντέλο της Παλιάς Πόλης των Χανίων, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί εντελώς ελεύθερα (πετώντας ή περπατώντας) και βάσει αυτού δημιουργήθηκε ένα animation. Επίσης ένα ίδιο μοντέλο δημιουργήθηκε για το τσουνάμι του 365 μ.Χ. σε σχέση με τη τοπογραφία της περιοχής, ενώ συνθέθηκε επίσης ένα βίντεο - animation που δείχνει την επίδραση του κύματος αυτού στην περιοχή.

Δυστυχώς ο συνδυασμός απεικόνισης της Παλιάς Πόλης των Χανίων σε σχέση με το τσουνάμι σε τρισδιάστατη μορφή δεν ήταν εφικτός, λόγω τεχνικών προβλημάτων. Παρ' όλα αυτά, το αποτέλεσμα είναι άκρως ρεαλιστικό και εντυπωσιακό.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΤΣΟΥΝΑΜΙ

1.1: Κυματική θεωρία.....	1
1.2: Τσουνάμι.....	6
1.2.1. Τι είναι τ τσουνάμι.....	7
1.2.2. Στάδια ζωής του κύματος τσουνάμι.....	8
1.2.3. Χαρακτηριστικά των τσουνάμι σε ανοιχτή θάλασσα.....	9
1.2.4. Τσουνάμι κοντά στην ακτή.....	10
- Χαρακτηριστικά των τσουνάμι σε ρηχά νερά.....	11
- Αναρρίχηση.....	13
- Πλημμύρα.....	15
1.2.5. Τρόποι γένεσης των τσουνάμι.....	15
- Τεκτονικά τσουνάμι.....	16
- Τσουνάμι που οφείλονται σε κατολισθήσεις	17
- Τσουνάμι από ηφαιστειογενή δραστηριότητα.....	21
- Τσουνάμι από την υποθαλάσσια εκπομπή ενυδατωμένου μεθανίου.....	22
- Τσουνάμι από πτώση αστεροειδών.....	23
1.2.6. Σχέση μεταξύ σεισμών και τσουνάμι.....	24
1.2.7. Κλίμακες τσουνάμι.....	26
1.3. Ιστορικά Τσουνάμι.....	29
1.3.1. Τσουνάμι στον ελληνικό χώρο.....	29
1.3.2. Χαρακτηριστικοί σεισμοί & τσουνάμι στον ελλαδικό χώρο.....	30
1.3.3. Σεισμός από την έκρηξη του ηφαιστείου της Σαντορίνης.....	30
1.3.4. Ο σεισμός του 1303 μ.Χ.....	31
1.3.5. Σεισμός της 9ης Ιουλίου 1956.....	33
1.3.6. Σεισμός Μελέτης 365 μ.Χ.....	37
- Χαρακτηριστικά του σεισμού του 365 μ.Χ.....	37
- Έκταση της καταστροφής του σεισμού 365 μ.Χ.....	40
- Γεωμορφολογικά στοιχεία τσουνάμι.....	42
1.3.7. Σκέψεις και αποτελέσματα.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : GIS και τσουνάμι

2.1. Τι είναι τα GIS.....	45
2.1.1. Περιγραφή των GIS.....	46
2.1.2. Συστήματα συντεταγμένων και γεωαναφορές.....	49
2.1.3. Εφαρμογές.....	50
2.1.4. 3D GIS.....	51
2.1.5. Οι λειτουργίες των GIS.....	53
2.1.6. Εμπορικά διαθέσιμα 3D GIS προγράμματα.....	54
2.1.7. ArcGIS 3D Analyst.....	54
2.1.8. Εφαρμογή του software Amira σε τσουνάμι.....	55
- Αποτελεσματα.....	57
2.2. Εφαρμογές GIS στα τσουνάμι.....	58
2.2.1. Δεδομένα δορυφόρων και GIS software χρήσεις σε τσουνάμι... ..	58
- Αξιολόγηση κινδύνων μέσω GIS	58
- Διαχείριση κρίσεων τσουνάμι μέσω GIS	61
- Καταγραφή της καταστροφής των τσουνάμι και λύσεις για ανάκαμψη.....	66
• Μελέτη του πυθμένα των παράκτιων περιοχών.....	66
• Μελέτη περιοχών καταστροφής μέσω δορυφόρων.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Οπτικοποίηση

3.1. Ιστορική Εξέλιξη της οπτικοποίησης.....	74
3.2. Γενικές αρχές και έννοιες της οπτικοποίησης.....	76
3.3. Γεω-Οπτικοποίηση.....	77
3.4. 3D οπτικοποίηση.....	78
- Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση.....	78
- Τεχνολογία και θεωρία της 3D οπτικοποίηση.....	80
- 3D Τεχνικές απόδοσης σε πραγματικό χρόνο	82
• Μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης.....	83
• Μοντέλα απόδοσης της υψής και πολλαπλής υψής.....	83
• Εφαρμογές στη γεωαπεικόνιση.....	84
3.5. Δημιουργία δυναμικών υφών.....	85
3.6. Προχωρημένες τεχνικές απόδοσης.....	86
3.7. Η έννοια της κλίμακας σε περιβάλλον υπολογιστή.....	87
- Προβλήματα που παρουσιάζονται από την επίδραση της κλίμακας... ..	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Υλοποίηση μοντέλου τσουνάμι 365 μ.Χ

4.1. Γενικά.....	89
4.2. Εισαγωγή.....	89
4.3. Προγράμματα που χρησιμοποιήσαμε.....	90
4.3.1 Google Sketchup 6 & 7.....	90
- Περιγραφή.....	90
- Προβλήματα.....	90
- Διαδικασία σχεδίασης κτιρίων.....	91
4.3.2. Google Earth.....	92
- Γενικά.....	92
- Η γλώσσα KML.....	92
- Προβλήματα.....	93
4.3.3. Global Mapper.....	93
4.3.4. ArcGIS.....	94
- ArcGIS-Desktop.....	94
- ArcInfo.....	95
- ArcGIS Extensions.....	96
- ArcGIS 3D Analyst.....	96
- ArcGlobe – ArcScene.....	98
- Γενικά.....	98
- Εφαρμογές.....	99
- Προβλήματα.....	99
- Αποτελέσματα.....	99
4.4. Λεπτομερής διαδικασία σχεδίασης μοντέλου.....	101
4.4.1. Δημιουργία 3D τοπογραφίας.....	101
4.4.2. Ορθοφωτοχάρτες.....	102
4.4.3. Σχεδιασμός 3D κτιρίων.....	107
4.4.4. Ολοκλήρωση σχεδίου και οπτικοποίηση.....	109
- Τοπογραφία.....	109
- Ενσωμάτωση κτηρίων.....	110
- Δημιουργία animation Παλιού Λιμανιού.....	111
- Δημιουργία μοντέλου τσουνάμι.....	112
- Δημιουργία animation τσουνάμι.....	114

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1. Γενικά.....	115
5.2. Προβλήματα.....	115
5.3. Αποτελέσματα.....	117
5.4. Προτάσεις για το μέλλον.....	118

Κεφάλαιο 1: Τσουνάμι

Γενικά

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται αρχικά, σε μερικά σημαντικά σημεία της κυματικής θεωρίας έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία των κύματων γενικότερα και στη συνέχεια στο φαινόμενο των τσουνάμι, το οποίο μελετάται εκτενώς στη διπλωματική αυτή εργασία. Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι τα τσουνάμι αποτελούν μονό μια πτυχή των κυματικών φαινομένων που συναντώνται στο φυσικό περιβάλλον, παρόλα αυτά όμως είναι τα πιο μεγάλα και τα πιο καταστρεπτικά κύματα που συναντώνται και έτσι η μελέτη τους αποκτά ξεχωριστό ενδιαφέρον. Η συστηματική μελέτη και κατανόηση τους μπορεί πραγματικά να σώσει χιλιάδες ανθρώπινες ζωές.

1.1 Κυματική Θεωρία

Κύματα ονομάζονται οι περιοδικές και μη περιοδικές μεταβολές της στάθμης της θάλασσας. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να προκληθούν από την πνοή του ανέμου πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας, οπότε δημιουργούνται τα ανεμογενή κύματα (Wind Driven Waves), από την έλξη των ουράνιων σωμάτων και κυρίως της σελήνης, οπότε δημιουργούνται οι παλίρροιες (Tides) και τέλος τα κύματα που προκαλούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς, οπότε δημιουργούνται τα τσουνάμι.

Οι φυσικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα κύματα είναι οι εξής :

- Κορυφή κύματος (Wave Crest) : είναι κάθε στιγμιαίο μέγιστο σημείο του κύματος.
- Κοιλία κύματος (Wave Through) : είναι κάθε ελάχιστο σημείο του κύματος.
- Ύψος κύματος (H : Wave Height) : είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της αντίστοιχης κοιλίας.
- Πλάτος κύματος (Amplitude) : είναι η απόσταση της κορυφής από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Mean Sea Level). Η σχέση που συνδέει το ύψος κύματος με το πλάτος α, είναι:

$$a=H/2$$

- Μέση στάθμη νερού (Mean Sea Level), θεωρείται η οριζόντια γραμμή που θα παρίστανε την επιφάνεια του νερού αν αυτό ήταν σε ηρεμία.
- Μήκος κύματος L (Wave Length), είναι η απόσταση δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών.

- Περίοδος κύματος T (Wave Period), θεωρείται το χρονικό διάστημα μεταξύ της διέλευσης δυο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών από ένα σταθερό σημείο.
- Συχνότητα (f), ορίζεται το αντίστροφο της περιόδου κύματος και εκφράζει τον ρυθμό των κυμάτων που περνάει από ένα σημείο στη μονάδα του χρόνου.
- Ταχύτητα κύματος C (Wave Celerity), είναι η ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται ένα κύμα.
- Κλίση κύματος S (Wave Steepness), είναι ο λόγος του ύψους (H) προς το μήκος του κύματος (L)

$$S=H/L$$

Αν το κύμα διαδίδεται στη θάλασσα, έτσι ώστε σε διαδοχικές χρονικές στιγμές μια κορυφή του να κινείται κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, τότε το κύμα ονομάζεται τρέχον (Progressive wave).

Το κύμα του οποίου οι κορυφές δεν προχωρούν κατά τη διεύθυνση διάδοσης, αλλά παραμένουν σε καθορισμένες θέσεις ονομάζεται στάσιμο κύμα (stationary wave). Στάσιμο κύμα δημιουργείται όταν δυο τρέχοντα κύματα με το ίδιο πλάτος, την ίδια περίοδο T και την ίδια φάση κινούνται με αντίθετες διευθύνσεις.

Η σχέση διάδοσης του κύματος στον ωκεανό είναι :

$$Y = A(z,t) \cos(\omega t - kz + \phi)$$

όπου:

- $A(z,t)$ είναι το πλάτος κύματος
- k είναι ο αριθμός κύματος
- ϕ η φάση.

Αυτή η σχέση περιγράφει τα κύματα 'Airy' (ή γραμμικά κύματα) και χρησιμοποιείται με τις εξής παραδοχές: το νερό έχει ένα ενιαίο ενδιάμεσο βάθος, είναι μη συμπιεζόμενο, έχει αστρόβιλη ροή και είναι ανιζώδες (42).

Το φάσμα των κυμάτων στους ωκεανούς είναι ευρύ και αποτελείται από τους εξής τύπους κυμάτων:

α) Τριχοειδή κύματα: είναι κύματα περιόδου $T < 0,1$ sec και η δύναμη που ουσιαστικά ελέγχει τα χαρακτηριστικά τους είναι η επιφανειακή τάση, ενώ η γένεσή τους οφείλεται στον άνεμο.

β) Τριχοειδή βαρυτικά κύματα: είναι κύματα περιόδου $0,1 < T < 1$ sec, η δύναμη που ελέγχει τα χαρακτηριστικά τους είναι η επιφανειακή τάση και η βαρύτητα και η γένεσή τους οφείλεται στον άνεμο.

γ) Κύματα βαρύτητας : είναι κύματα περιόδου $1 < T < 30$ sec, ελέγχονται από τις δυνάμεις

της βαρύτητας, ο μηχανισμός γένεσής τους είναι ο άνεμος και διακρίνονται σε κύματα (Waves) και κυματισμούς (Swells).

δ) Κύματα βαρύτητας - αδράνειας: είναι κύματα περιόδου $30\text{sec} < T < 5\text{min}$, η δύναμη που ελέγχει τα χαρακτηριστικά τους είναι η βαρυτική επιτάχυνση και οφείλονται σε καταιγίδες ή σεισμούς.

ε) Κύματα μεγάλης περιόδου: είναι κύματα περιόδου $T > 5\text{min}$, ελέγχονται από τη δύναμη της βαρυτικής επιτάχυνσης και οφείλονται σε καταιγίδες και σεισμούς.

στ) Παλιρροιακά κύματα (Tides): η περίοδός τους διαρκεί μερικές ώρες, ελέγχονται από τη βαρυτική επιτάχυνση και οφείλονται στην έλξη της Σελήνης και του Ήλιου.

ζ) Υπέρ - παλιρροιακά κύματα: χαρακτηρίζονται από περίοδο $T > 24\text{h}$, ελέγχονται από την βαρυτική επιτάχυνση και οφείλονται είτε σε καταιγίδες, είτε στην έλξη Σελήνης και Ήλιου.

Η κλασσική μελέτη των κυμάτων συνίσταται στην εξέταση της υδροδυναμικής ενός ιδανικού κύματος που έχει ημιτονοειδή μορφή. Στη πραγματικότητα τα κύματα που απαντώνται στους ωκεανούς απέχουν από τα ιδανικά κύματα ημιτονοειδούς μορφής και χαρακτηρίζονται από πολυμορφία και ακανόνιστη περιοδικότητα. Τα κύματα που παρατηρούνται στους ωκεανούς, στην ουσία είναι άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού ιδανικών κυμάτων, δηλαδή η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας σε ένα σημείο μπορεί να θεωρηθεί σαν αποτέλεσμα της σύνθεσης πολλών ημιτονοειδών κυμάτων διαφόρων πλατών, φάσεων και συχνοτήτων [Ferentinos - Gionis, 1995] (1).

Το κύμα στην ουσία αποτελεί μια διαταραχή που επεκτείνεται από το ένα τμήμα του μέσου διάδοσης (θάλασσα) στο άλλο, χωρίς να προκαλείται ουσιαστική κίνηση στο ίδιο το μέσο διάδοσης.

Κατά την διάδοση ενός κύματος, κάτω από την κορυφή του, το νερό μετακινείται με διεύθυνση προς τα μπροστά και ανοδική, ενώ κάτω από την κοιλία, το νερό μετακινείται καθοδικά και με διεύθυνση προς τα πίσω. Συνολικά, τα σωματίδια του νερού δεν μετατοπίζονται κατά την διάδοση του κύματος και πραγματοποιούν κυκλική κίνηση. Αυτή η τροχιακή κυκλική κίνηση των σωματιδίων του νερού οφείλεται σε μια δύναμη που συμβάλλει από τη μια στην μετατόπισή τους και από την άλλη στην επανατοποθέτησή τους. Η διαταραχή που εκδηλώνεται στο μέσο διάδοσης δεν προκαλεί σημαντική διαστρέβλωση στην κυματομορφή και διαδίδεται με συνεχόμενη ταχύτητα.

Τα κύματα των ρηχών νερών εντοπίζονται σε νερά βάθους μικρότερου του $1/20$ του αρχικού μήκους κύματος, τα ενδιάμεσα κύματα εντοπίζονται σε θαλάσσιες περιοχές βάθους μεγαλύτερου του $1/20$ του μήκους κύματος και μικρότερου του $1/2$ του μήκους κύματος, ενώ τα κύματα μεγάλου βάθους εντοπίζονται σε θαλάσσιες περιοχές βάθους μεγαλύτερου του $1/2$ του αρχικού μήκους κύματος.

Στα βαθιά νερά στα οποία το βάθος είναι μεγαλύτερο από το $1/2$ του μήκους κύματος, η ταχύτητα και το μήκος του κύματος δίδονται από τους τύπους :

$$C = \sqrt{gL / 2\delta}$$

$$L = \frac{g}{2\delta} \cdot T^2$$

όπου

- L είναι το μήκος κύματος,
- $g=9,8\text{m/sec}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας
- T η περίοδος του κύματος

Στα ρηχά νερά, στα οποία το βάθος είναι μικρότερο του 1/20 του μήκους κύματος, το βάθος της θάλασσας είναι η μόνη μεταβλητή που επηρεάζει την ταχύτητα του κύματος.

$$C = \sqrt{g \cdot d}$$

$$L = L \sqrt{g \cdot h}$$

όπου

- $g=9,8\text{m/sec}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας
- d είναι το βάθος της θάλασσας
- T η περίοδος του κύματος

Στα μεταβατικά βάθη, όπου το βάθος της θάλασσας είναι μικρότερο από το 1/2 του μήκους κύματος και μεγαλύτερο από το 1/20 αυτού, η σχέση γίνεται πολυπλοκότερη :

$$C = \sqrt{gL / 2\delta (\tanh 2pd / L)}$$

$$L = g/2\delta T^2 \tanh 2\delta h/L$$

όπου

- $\tanh$ είναι η υπερβολική εφαπτομένη
- L το μήκος κύματος
- T η περίοδος του κύματος

Επειδή το μήκος κύματος είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μετρηθεί στο πεδίο, υπολογίζεται έμμεσα μέσω της τιμής της περιόδου του κύματος. Το μήκος κύματος, όπως και η ταχύτητα του κύματος είναι ανάλογο της περιόδου του κύματος και συνδέονται με τη σχέση :

$$L = g/2 \cdot T^2 = 1,56 \cdot T^2$$

όπου

- T η περίοδος κύματος
- $g = 9,8\text{m/sec}^2$

Η Ενέργεια κύματος δίδεται από τον τύπο :

$$\dot{A} = 1/8 \dot{n} \cdot g \cdot h^2$$

όπου

- ρ είναι η πυκνότητα της θάλασσας
- $g=9,8\text{m/sec}^2$ η βαρυτική επιτάχυνση
- h το ύψος κύματος.

Τα κύματα βαθέων νερών τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλα μήκη και περιόδους, ταξιδεύουν με την μεγαλύτερη ταχύτητα και καταφθάνουν πολύ γρήγορα σε περιοχές απομακρυσμένες σε σχέση με το σημείο εκδήλωσής τους.

Η διάδοση των κυμάτων βασίζεται στο φαινόμενο της διασποράς. Τα κύματα εξαπλώνονται από το σημείο γένεσης σε διαδοχικούς κυματισμούς, και όσο μεγαλώνει η απόσταση από το σημείο εκδήλωσης της αρχικής διαταραχής, τα κύματα μεγαλύτερου μήκους σταδιακά ξεπερνούν εκείνα τα οποία έχουν μικρότερο μήκος. Τα κύματα ουσιαστικά εκδηλώνονται σε συστοιχίες μικρότερων κυμάτων με διαφορετικούς ρυθμούς και ταχύτητες εκδήλωσης.

Στις συστοιχίες κυμάτων, το κύμα που οδηγεί την συστοιχία χάνει την ενέργειά του, αλλά μόλις ολοκληρωθεί η κίνηση της συστοιχίας, παραμένει αρκετή ενέργεια για τη δημιουργία νέου κύματος.

- Όταν σειρές κυμάτων προκαλούνται στον ίδιο χώρο από διαφορετικές διαταραχές θα υπάρξει ανάμειξη.
- Όταν οι κορυφές δύο κυματικών συστοιχιών συμπίπτουν, τα πλάτη των κυμάτων ουσιαστικά προστίθενται και το φαινόμενο ονομάζεται εποικοδομητική ανάμειξη.
- Όταν οι συστοιχίες κυμάτων είναι εκτός φάσης, οι κορυφές των κυμάτων συμπίπτουν με τις κοιλίες, τα πλάτη των κυμάτων αλληλοεξουδετερώνονται και το φαινόμενο ονομάζεται καταστροφική ανάμειξη
- Όταν οι κορυφές με τις κοιλίες δεν συμπίπτουν, έχουμε το φαινόμενο της μεικτής ανάμειξης.

Στα αβαθή νερά, το μήκος κύματος δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο και η ταχύτητα του κύματος προσεγγίζει την ταχύτητα της συστοιχίας. Έτσι, όλα τα κύματα διαδίδονται με περίπου την ίδια ταχύτητα, χωρίς να παρατηρούνται φαινόμενα ανάμειξης.

Οι δυο βασικές δυνάμεις που διέπουν την εκδήλωση και τα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι η δύναμη της βαρυτικής έλξης και η επιφανειακή τάση.

Όταν το βάθος του νερού είναι μικρότερο από το $1/2$ του μήκους κύματος, η κίνηση του κύματος επηρεάζεται από τον βυθό, ο οποίος διακόπτει την κυκλική κίνηση των μορίων του νερού. Η αλληλεπίδραση του κύματος με τον βυθό οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας του πρώτου κύματος μιας συστοιχίας, με τα υπόλοιπα κύματα της συστοιχίας να διατηρούν την ταχύτητά τους. Γι' αυτό τον λόγο, ενώ η περίοδος παραμένει αμετάβλητη, το μήκος κύματος ελαττώνεται και ταυτόχρονα το ύψος του κύματος αυξάνεται. Όταν οι κυματισμοί εισέρχονται στα αβαθή νερά, δηλαδή όταν το βάθος νερού είναι ίσο ή μικρότερο του μισού του κύματος, τότε οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους κυματισμούς αρχίζουν να μεταβάλλονται. Η ταχύτητα του κυματισμού και το μήκος κύματος ελαττώνονται προοδευτικά, η περίοδος παραμένει σταθερή, ενώ το ύψος αυξάνεται. Όταν ένας κυματισμός εισέρχεται στα αβαθή νερά υπό γωνία σε σχέση με τις ισοβαθείς, τότε τμήματα της κορυφής του κυματισμού βρίσκονται σε πιο ρηχά νερά και επομένως επιβραδύνονται σε σχέση με τα τμήματα της κορυφής που βρίσκονται στα βαθύτερα, με αποτέλεσμα η κορυφή του κύματος να αρχίσει να κάμπτεται. Η κάμψη της κορυφής του κυματισμού λέγεται διάθλαση κυματισμού (Wave refraction) [Ferentinos - Gionis,1995] (1).

1.2 Τσουνάμι



Εικ 1. Το τσουνάμι της Sumatra το 2004 καθώς χτυπάει τη περιοχή Koh Pu στη Ταϊλανδή [NOAA]

Γενικά

Ο όρος τσουνάμι [Εικ.1] προέρχεται από τις ιαπωνικές λέξεις <<τσου>> που σημαίνει λιμάνι και <<ναμι>> που σημαίνει κύμα, δηλαδή κύμα του λιμανιού. Το όνομα αυτό υιοθετήθηκε το 1963 κατά τη διάρκεια επιστημονικού συνεδρίου που ασχολήθηκε με τα κύματα αυτά, προς τιμήν των Ιαπώνων που υποφέρουν πολύ από το συγκεκριμένο φαινόμενο.

Στην ισπανική γλωσσά υπάρχει η λέξη <<maremoto>> (τρόμος στη θάλασσα) που ταιριάζει για την περιγραφή του φαινομένου αλλά τελικά στα αγγλικά επικράτησαν οι ονομασίες θαλάσσια σεισμικά κύματα και τσουνάμι [Bruce A. Bolt, 1991] (2).

1.2.1 Τι είναι τα τσουνάμι



Εικ 2. Πολύ γνωστό σκίτσο κύματος τσουνάμι (*The Great Wave of Kanagawa*), ζωγραφισμένο από το Γιαπωνέζο ζωγράφο K.Hokusai στις αρχές του 19^{ου} αιώνα [Erik O.D. Sevre, Dave A. Yuen, Yingchun Liu, 2008] (35).

Τα τσουνάμι είναι θαλάσσια κύματα που δημιουργούνται από απότομες διαταράξεις της επιφάνειας (ή του πυθμένα) της θάλασσας. Αν μια διατάραξη λάβει χώρα κοντά σε μια ακτή μπορεί να δημιουργηθούν ισχυρότατα κύματα και να καταστρέψουν την περιοχή μέσα σε μερικά λεπτά. Μια μεγάλη διατάραξη της θαλάσσιας επιφάνειας μπορεί να δημιουργήσει τόσο ισχυρά τσουνάμι που ενδέχεται να καταστρέψουν περιοχές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από το επίκεντρο την “γέννησης” τους.

Από το 1800 έως σήμερα τα τσουνάμι έχουν αποβεί μοιραία για σχεδόν 360.000 ανθρώπινες ζωές και έχουν προκαλέσει καταστροφές δισεκατομμυρίων δολαρίων σε παράκτιες περιοχές που επλήγησαν. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τεράστιας καταστροφής είναι το τσουνάμι της 26ης Δεκεμβρίου του 2004 που είχε ως μοιραίο αποτέλεσμα του την απώλεια σχεδόν 228.000 ανθρώπινων [NGDC] (44).

Το να προβλέψουμε ποτέ και που θα χτυπήσει το επόμενο τσουνάμι είναι αδύνατο. Με τη βοήθεια όμως σύγχρονων μεθόδων και εφόσον γίνει ένας σεισμός, μπορούμε να βγάλουμε σημαντικές ανακοινώσεις για την πληροφόρηση πληθυσμών από τη στιγμή γένεσης των τσουνάμι καθώς και πληροφορίες για την ένταση τους. Έτσι μπορούν να σωθούν χιλιάδες ανθρώπινες ζωές.

Τα τσουνάμι θεωρούνται ένα φαινόμενο μεγάλης κλίμακας με σχετικά μικρή χρονική διάρκεια. Διαδίδονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα με κατεύθυνση πάντα προς τη στεριά. Η περίοδος και το μήκος κύματος τους είναι πολύ μεγάλο και δημιουργούνται σε σχετικά αβαθή νερά λόγω της βίαιης εκτόπισης της μάζας του νερού σε εκείνη την περιοχή. Η ταχύτητα του τσουνάμι μειώνεται σημαντικά καθώς πλησιάζει προς την ακτή λόγω της τραχύτητας του εδάφους και του μικρού βάθους της θάλασσας. Κατά το διάστημα αυτό το κύμα αρχίζει να υψώνεται πάνω από τη θάλασσα” και τότε αρχίζει και η καταστρεπτική του επίδραση.

Αν και πολλές φορές τα τσουνάμι συναντώνται στην βιβλιογραφία ως παλιρροιακά

κύματα αυτό δεν είναι απολύτως ακριβές. Το τσουνάμι μπορεί να παρομοιαστεί σαν ένα τεράστιο ρεύμα νερού που εισχωρεί στη στεριά και ξεπερνά κάθε εμπόδιο που συναντά μπροστά του. Το μεγαλύτερο μέγεθος της ζημιάς προκαλείται από την μεγάλη μάζα νερού που κρύβεται πίσω από το αρχικό κύμα, καθώς το ύψος του θαλάσσιου κύματος ανεβαίνει με μεγάλη ταχύτητα και πλημμυρίζει δυναμικά μια παράκτια περιοχή.

Τα τσουνάμι, σε αντίθεση με άλλα κύματα, καθώς κινούνται επηρεάζουν όλη την υδάτινη στήλη του ωκεανού και όχι μόνο την υδάτινη επιφάνεια. Επίσης, μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας έχοντας την ικανότητα να καλύψουν τεράστιες υπερωκεάνιες αποστάσεις χάνοντας μονό ένα μικρό μέρος από την ενέργειά τους.

1.2.2. Στάδια ζωής του κύματος τσουνάμι

Η ζωή των τσουνάμι χωρίζεται σε 3 βασικά στάδια:

- Γένεση
- Διάδοση
- Αναρρίχηση

Γένεση των τσουνάμι

Η γένεση των τσουνάμι οφείλεται στην απότομη παραμόρφωση του πυθμένα του ωκεανού που με τη σειρά της έχει δημιουργηθεί από έναν σεισμό. Η ανατάραξη αυτή της επιφάνειας του ωκεανού οδηγεί στο σχηματισμό ενός κύματος βαρύτητας που κινείται ακτινωτά από το επίκεντρο του σεισμού. Έτσι, για τη μελέτη αυτού του σταδίου της ζωής των τσουνάμι είναι πολύ σημαντική η μελέτη του σεισμού που το προκάλεσε.

Ο υπολογισμός της μετατόπισης του πυθμένα που προκαλεί ο σεισμός βασίζεται στο μοντέλο επιπέδου ρήγματος πηγής του σεισμού το οποίο υποθέτει ένα ασυμπίεστο στρώμα ύδατος επάνω σε ένα ελαστικό ημιεπίπεδο, που περιγράφουν αντίστοιχα τον ωκεανό και τον φλοιό της γης [Gusiakov, 1978; Okada, 1985].

Διάδοση

Το δεύτερο στάδιο της ζωής των τσουνάμι είναι η διάδοση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα τσουνάμι είναι ικανό να διανύσει τεράστιες αποστάσεις χωρίς σημαντική μείωση της ενέργειας του και να χτυπήσει ακτές που βρίσκονται χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή του.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις τεράστιες αποστάσεις που καλύπτει, είναι σημαντικό στην μοντελοποίησή του να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως η καμπυλότητα της γης και η δύναμη Coriolis.

Αναρρίχηση

Όταν το τσουνάμι φτάσει στην ακτή αρχίζει να πλημμυρίζει τη στεριά, καθώς συνεχίζει τη πορεία του πάνω σε αυτή. Αυτό είναι το τρίτο στάδιο της ζωής του τσουνάμι που ονομάζεται αναρρίχηση. Σε αυτό το στάδιο το κύμα προκαλεί τεράστιες καταστροφές και ανθρώπινες απώλειες στους πληθυσμούς της περιοχής.

1.2.3. Χαρακτηριστικά των τσουνάμι σε ανοιχτή θάλασσα

Στην ανοιχτή θάλασσα τα τσουνάμι χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες περιόδους και μήκη κύματος. Αυτά τα μήκη κύματος μπορούν να φτάσουν σε μήκος μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων σε αντίθεση με τα ανεμογενή κύματα που έχουν περιόδους 0.5-30 sec περίπου και μήκη κύματος μέχρι 200 μέτρα [Prager, 1999] (3).

Το ύψος ενός κύματος τσουνάμι σε ανοιχτή θάλασσα είναι συχνά μικρότερο του ενός μέτρου (αυτό αλλάζει κοντά στην ακτή) και έτσι ακόμα και τα πλοία που ταξιδεύουν πάνω του δεν το καταλαβαίνουν. Τα κύματα αυτά ταξιδεύουν στην ανοιχτή θάλασσα με ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 200 m/sec ή αλλιώς 700 km/h (ταχύτητα ενός jet αεροπλάνου).

Η ταχύτητα ενός τσουνάμι κατά τη διάδοση του δίνεται από τον τύπο:

$$c = \sqrt{g \cdot h}$$

- ❖ g : επιτάχυνση της βαρύτητας
- ❖ H : το βάθος του πυθμένα στο σημείο αυτό

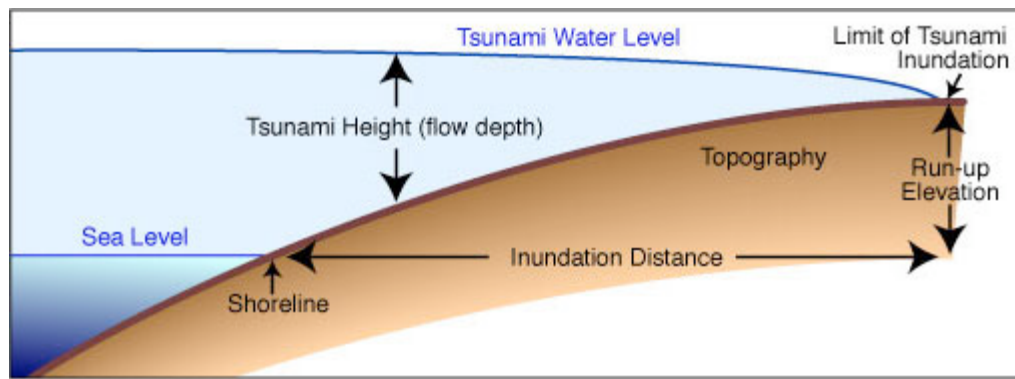
Η περίοδος ενός τσουνάμι δίνεται από τον τύπο :

$$T = \frac{\lambda}{c} \approx 10^2 - 10^4 \text{ sec}$$

- ❖ λ : μήκος κύματος

Πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την εμφάνιση ενός τσουνάμι μπορούν να δημιουργηθούν από ένα έως και έξι διαφορετικά κύματα από το σεισμό. Επίσης χαρακτηριστικές περίοδοι αυτών των κυμάτων είναι συνήθως της τάξεως των 10 λεπτών έως και 60 λεπτών ανά κύμα.

1.2.4. Τσουνάμι κοντά στη ακτή



Εικ.3 Αναρρίχηση (*run-up*) και πλημμύρα (*inundation*) που προκαλείται από το τσουνάμι
[http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/srilanka05/images/run_up_height_inundation.jpg]

Όταν τα τσουνάμι φτάσουν στην ακτή αρχίζουν να 'αναρριχόνται' (*run-up*) και να εισβάλλουν στην στεριά (*inundation*) [Εικ.3]. Κατά τη πορεία τους αυτή αρχίζουν καταστρέφουν ό,τι βρεθεί στο πέρασμά τους, όπως παραδείγματος χάριν δέντρα, ανθρώπινες κατασκευές, οχήματα, καθώς μπορούν να μεταφέρουν ακόμα και καράβια στη στεριά εφόσον αυτά βρίσκονταν κοντά στην ακτή.

Καταγεγραμμένα παραδείγματα τέτοιων καταστροφών υπάρχουν πολλά. Ένα χαρακτηριστικό της δύναμης των τσουνάμι είναι αυτό του Μιντόρο στις Φιλιππίνες το 1994 όπου ένα τσουνάμι 2 μέτρων κατάφερε να μεταφέρει ένα μεγάλο καράβι 10.000 τόνων (πλωτή εξέδρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δέλτα του ποταμού Barya), 1 μίλι μέσα στη στεριά [Εικ.4] [Imamura, Synolakis, 1995] (10).



Εικ.4 Μιντόρο Φιλιππίνες. Το τσουνάμι έχει μεταφέρει αυτή τη πλωτή εξέδρα παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας (10.000 τόνοι) ένα μίλι μέσα στη στεριά [Tsunami research center].

Χαρακτηριστικά των τσουνάμι σε ρηγά νερά

Καθώς το κύμα πλησιάζει την ακτογραμμή, το βάθος της θάλασσας μειώνεται και η ταχύτητα του κύματος μειώνεται και αυτή σταδιακά, έτσι σε βάθος 30m η ταχύτητα του έχει μειωθεί στα 59 km/h περίπου. Παράλληλα με την μείωση του βάθους αρχίζει και η ανύψωση της εμπρόσθιας πλευράς του κύματος ενώ η απόσταση των κορυφών στο μπροστινό μέρος του κύματος μικραίνει. Είναι σημαντικό να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι η συνεχής αλληλεπίδραση του τσουνάμι με τον βυθό στα ρηγά νερά, οδηγούν στη συνεχή αλλαγή του αρχικού σχήματος του. Έτσι, ένα τσουνάμι που δημιουργήθηκε π.χ. κοντά στο Περού, θα δείχνει πολύ διαφορετικό μόλις φτάσει στην Καλιφόρνια και ακόμα πιο διαφορετικό μόλις φτάσει στα νησιά της Χαβάης [Synolakis,2003] (3).

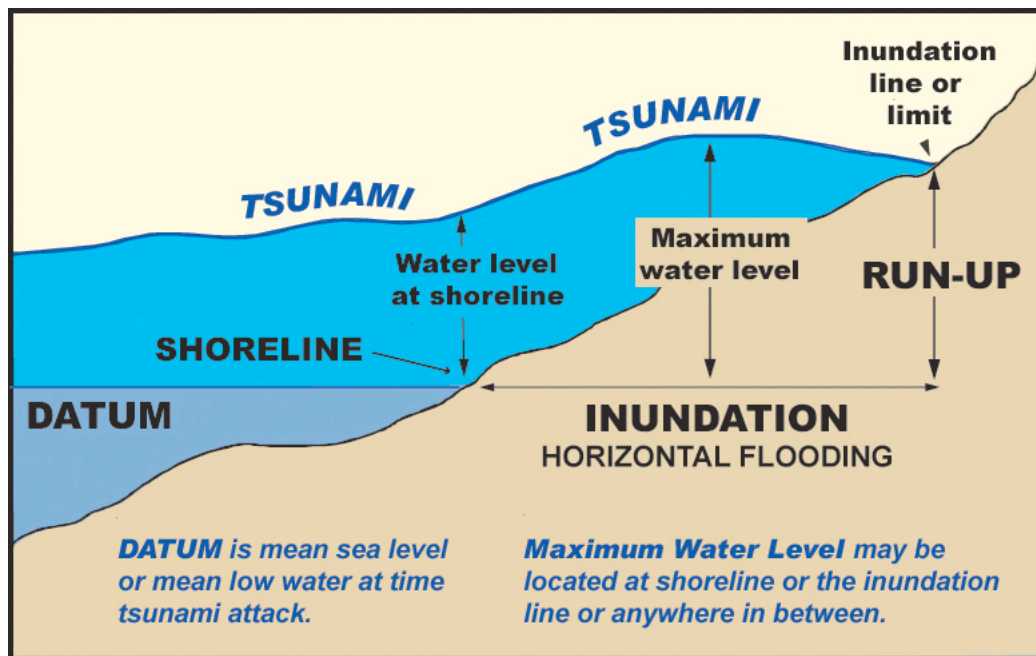
Σε αυτό το σημείο που η αναλογία ανάμεσα στο μήκος κύματος και το βάθος έχει ελαχιστοποιηθεί λέμε ότι το τσουνάμι συμπεριφέρεται ως κύμα ρηχού νερού. Γενικά για τον χαρακτηρισμό των κυμάτων σχετικά με το βάθος του σημείου που βρίσκονται χρησιμοποιούμε το λόγο:

$$d/L$$

- ❖ L : το βάθος έως τον πυθμένα στο συγκεκριμένο σημείο
- ❖ d : το μήκος κύματος

Αν ισχύει ότι $d/L > 20$ τότε θεωρείται ότι το κύμα ταξιδεύει σε βαθιά νερά, ενώ εάν ισχύει $d/L > 1.5$, τότε λέμε ότι το κύμα είναι σε αβαθή νερά (swallow water). Αυτή είναι μια πολύ σημαντική σχέση, μιας και το βάθος καθώς και τα χαρακτηριστικά του πυθμένα επηρεάζουν σημαντικά την διάδοση των κυμάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μιας και το μέσο βάθος της θάλασσας είναι 4 km και τα τσουνάμι έχουν πολύ μεγαλύτερα μήκη κύματος, θεωρούμε ότι ταξιδεύουν πάντα σε ρηχά νερά [Prager, 1999] (3).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναρρίχηση (run-up) του κύματος που πραγματοποιείται όταν ένα τσουνάμι φτάσει στην ακτή (shoreline), καθώς και η έκταση της πλημμύρας που δημιουργείται (inundation).



Εικ.5 Στο σχήμα φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του τσουνάμι, δηλαδή η αναρρίχηση (run-up) και η πλημμύρα (inundation) σε σχέση με την ακτή (shoreline).
[\[http://ioc3.unesco.org/itic/images/upload/Runup_Inundation_big.jpg\]](http://ioc3.unesco.org/itic/images/upload/Runup_Inundation_big.jpg)

Αναρρίχηση (run-up)

Μια σημαντική παράμετρος εκτίμησης του μεγέθους ενός τσουνάμι (και της καταστροφής που προκαλεί) είναι το υψόμετρο διείσδυσης των πλημμυρικών ροών που ορίζεται ως η κάθετη απόσταση του σημείου στην ενδοχώρα μέχρι το οποίο εκτείνονται οι πλημμυρικές ροές από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Εικ.5). Τα τσουνάμι εμφανίζουν ικανότητα διείσδυσης σε υψόμετρα που φτάνουν και το διπλάσιο ύψος του

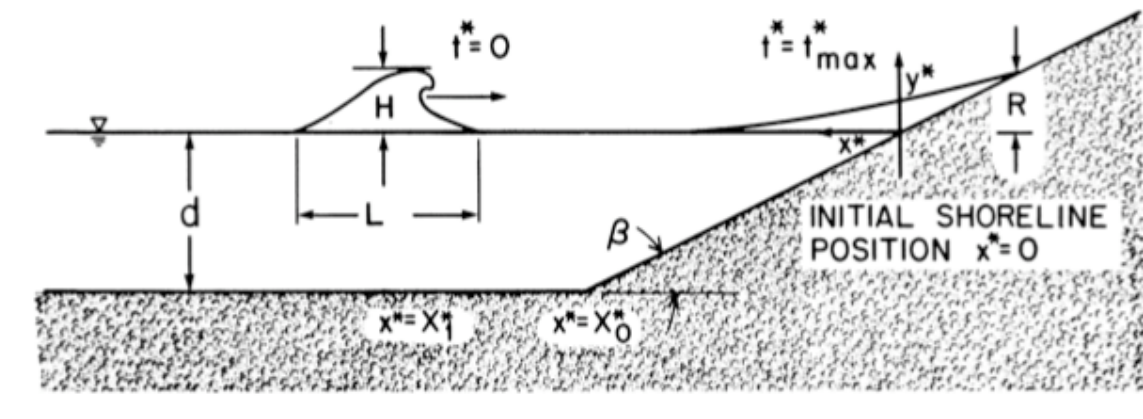
κύματος πριν αυτό "σκάσει" στην ακτή.

Η αναρρίχηση ενός τσουνάμι τύπου μοναδιαίου κύματος (solitary wave) για ιδεατή τοπογραφία και βαθυμετρία μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς με το παρακάτω τύπο [Synolakis, 1986] (47) :

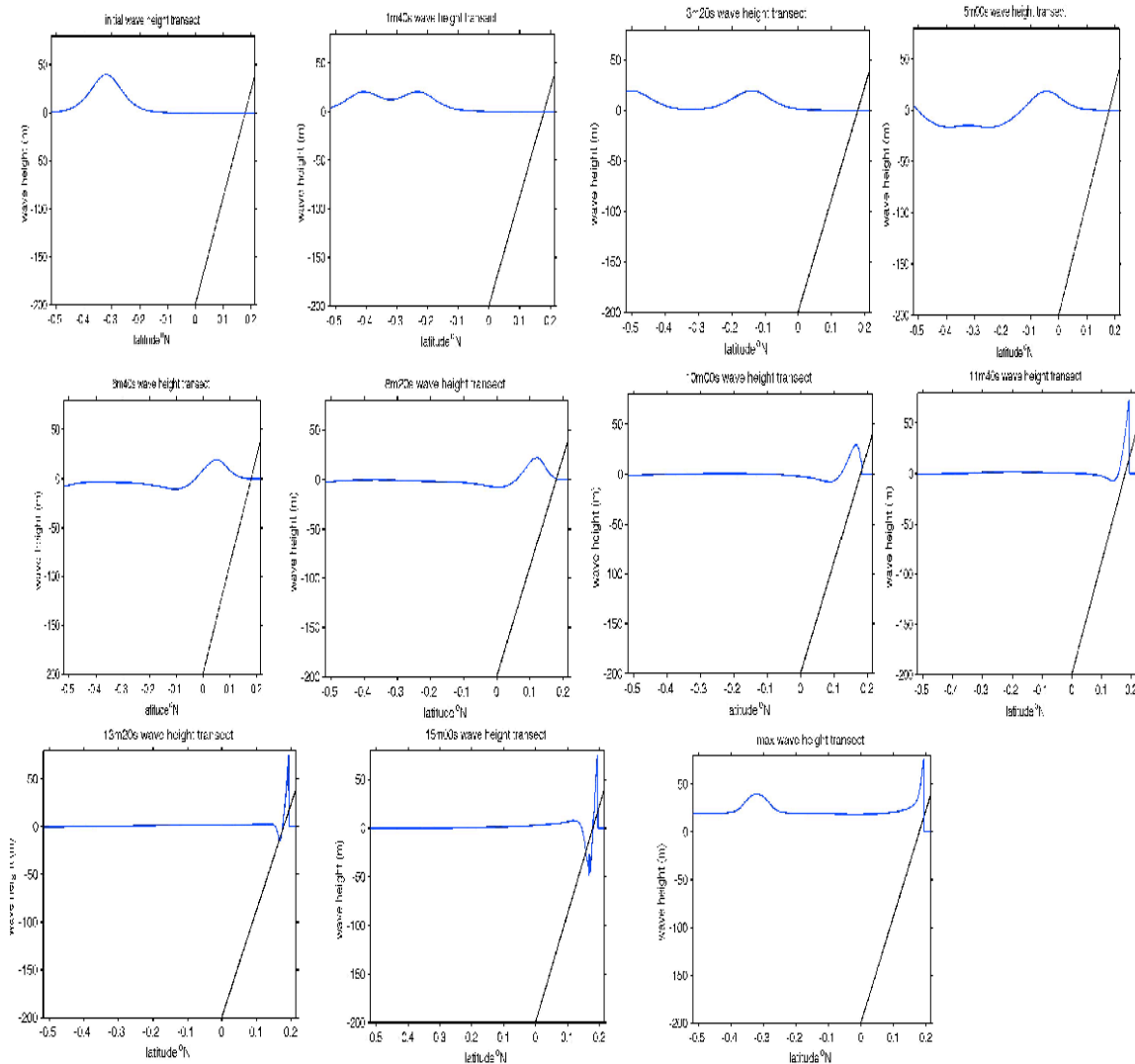
$$H_{r \max} = 2.83 (\cot \beta)^{0.5} \cdot H_s^{1.25}$$

Όπου:

- ❖ $H_{r \max}$: είναι το μέγιστο υψόμετρο διεξόδου των πλημμυρικών ροών
- ❖ H_s : το ύψος κύματος πριν αυτό θραύσει (σκάσει)
- ❖ β : κλίση της παραλίας



Η ακρίβεια της παραπάνω σχέσης έχει ελεγχτεί και από το κώδικα μοντελοποίησης τσουνάμι MOST. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής απεικονίζονται στα διαγράμματα της Εικ. 6.



Εικ.6 Η μορφή και το ύψος του τσουνάμι (solitary wave) σε διάφορες χρονικές στιγμές. Αποτελέσματα ελέγχου της παραπάνω εξίσωσης με τον κώδικα MOST [N.Καλλιγερης](48)

Η αναρρίχηση του κύματος εξαρτάται από ένα συνδυασμό παραμέτρων όπως είναι ο τύπος της ακτής, η διάθλαση, ο συντονισμός των κυμάτων, η δημιουργία στάσιμων κυμάτων και η ενέργεια του τσουνάμι. Όλα τα παραπάνω προκαλούν μεγάλες διαφοροποιήσεις στις τιμές της αναρρίχησης των κυμάτων κάθε φορά.

Ισχύει ότι και ακόμα περιοχές που φαίνονται προστατευμένες από την ορμητική δύναμη των τσουνάμι έχουν στη πραγματικότητα υψηλή επικινδυνότητα για καταστροφή, λόγω της μεγάλης διείσδυσης των πλημμυρικών ροών. Μοντέλα προσομοίωσης έχουν δείξει πως οι ταχύτητες των ροών αυτών μπορεί να αυξηθούν ως και τρεις φορές όταν βρεθούν στην ενδοχώρα. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το τσουνάμι της 12ης Ιουλίου 1993, στη νήσο Okushiri της Ιαπωνίας όπου τα κύματα έφτασαν στο πίσω μέρος του νησιού έχοντας ταχύτητα μεγαλύτερη από την αρχική, προκαλώντας πολλούς θανάτους. [Yeh, Titov, 2001] (45)

Πλημμύρα (inundation)

Θεωρητικά η επιφάνεια της ξηράς που θα πλημμυρίσει είναι ίση με την επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από το ύψωμα που δημιουργεί το κύμα. Έτσι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος ενός τσουνάμι, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του νερού που θα μεταφερθεί από το κύμα και θα πλημμυρίσει την ενδοχώρα (Εικ.4) [Bryant, 2001] (5).

Η μέγιστη διείσδυση στη ενδοχώρα μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$X_{\max} = (H_s)^{3/3} n^{-2} k$$

όπου

- ❖ $X_{\max}$ η μεγίστη απόσταση διείσδυσης στην ξηρά
- ❖ k σταθερά = 0.06
- ❖ n συντελεστής τριβής του Manning

1.2.5. Τρόποι γένεσης των τσουνάμι

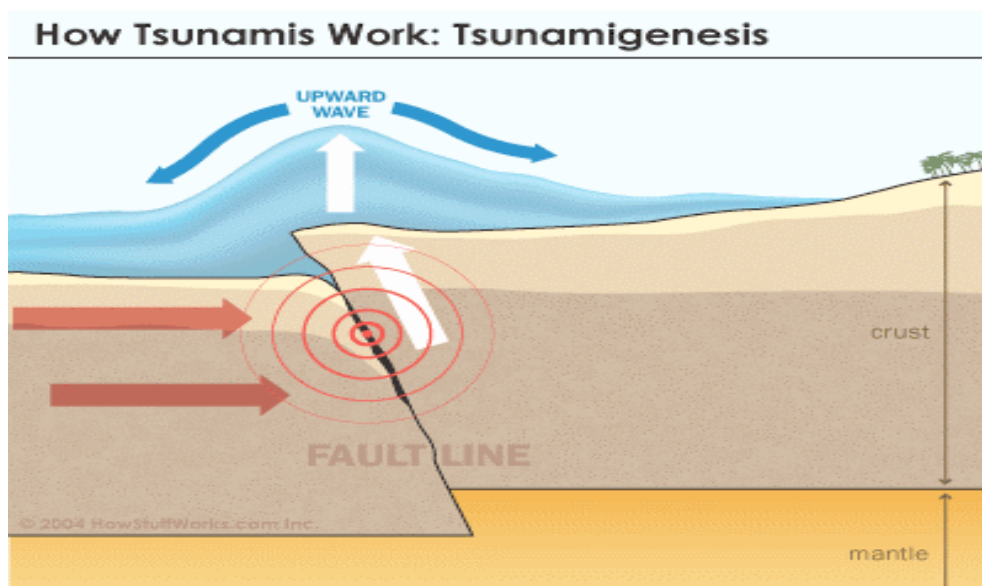
Τα κυριότερα αίτια της γένεσης των τσουνάμι είναι :

- κατακόρυφες μετατοπίσεις του θαλάσσιου πυθμένα που προκαλούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς που με τη σειρά τους προκαλούνται από τη μετατόπιση κατά μήκος ενός υποθαλάσσιου ρήγματος. Τα τσουνάμι συνήθως προκαλούνται από σεισμούς μεγαλύτερους των 7 βαθμών και εστιακού βάθους μικρότερο των 50 km. Οι υποθαλάσσιοι αυτοί σεισμοί δεν δημιουργούν πάντα τσουνάμι.
- οριζόντιες μετατοπίσεις στη στήλη του νερού, σαν αποτέλεσμα των δονήσεων ενός σεισμού. Με αυτό το τρόπο είναι δυνατό να δημιουργηθεί τσουνάμι από σεισμούς που λαμβάνουν χώρα πάνω στη στεριά εφόσον αυτοί συμβούν κοντά στην ακτή.
- απότομη μετατόπιση της θαλάσσιας μάζας που μπορεί να προκληθεί από ηφαιστειακές εκρήξεις (volcanic collapse).
- τσουνάμι που δημιουργείται εξαιτίας θαλάσσιων κατολισθήσεων.

Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις, υπάρχουν και άλλοι τρόποι δημιουργίας τσουνάμι, που όμως συναντώνται πιο σπάνια (περιγράφονται παρακάτω).

Τεκτονικά τσουνάμι

Ο πιο συχνός λόγος δημιουργίας τσουνάμι είναι οι μεγάλοι υποθαλάσσιοι σεισμοί. Οι συγκεκριμένοι σεισμοί ονομάζονται 'τσουναμογενείς' σεισμοί και παρουσιάζονται σε σημεία του πυθμένα όπου υπάρχει σύγκρουση των τεκτονικών πλακών. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη απελευθέρωση ενέργειας και έντασης που υπερβαίνει τους 7 βαθμούς (Εικ. 7). Αυτές οι σεισμικές δονήσεις προκαλούν αιφνίδια παραμόρφωση και μετακίνηση του ωκεάνιου πυθμένα, με αποτέλεσμα την εκτόπιση της άνωθεν μεγάλης υδάτινης μάζας, η οποία μετατοπίζεται κατακόρυφα στην υδάτινη στήλη και φθάνει έως την επιφάνεια προκαλώντας την εκδήλωση κύματος τσουνάμι. Όσον αφορά στη μετατόπιση του ωκεάνιου πυθμένα, το μέγεθος της κάθετης μετατόπισης μπορεί να αγγίξει τα 20 μέτρα και το μέγεθος της οριζόντιας τα 2 χιλιόμετρα.



Εικ. 7 Τρόπος γένεσης των τσουνάμι από σεισμό

[<http://cyberdera.com/wp-content/uploads/2010/02/how-tsunami-works.gif>]

Η αρχική ενέργεια που προκύπτει από την ανοδική κίνηση του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του κύματος, το οποίο αρχίζει να διαδίδεται. Το αρχικό κύμα τσουνάμι που δημιουργείται λίγα λεπτά μετά το σεισμικό γεγονός χωρίζεται, σε ένα κύμα το οποίο κατευθύνεται προς τα πέρατα του ωκεανού (Μακρινό Τσουνάμι) και ένα κύμα το οποίο διαδίδεται με κατεύθυνση προς την ακτή (Τοπικό Τσουνάμι). Το ύψος και των δυο αυτών κυμάτων τσουνάμι είναι το μισό του ύψους του αρχικού τσουνάμι, με το Τοπικό Τσουνάμι να διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα απ' ότι το Μακρινό (τα παραπάνω ισχύουν μόνο για τον δισδιάστατο χώρο).

Κατά την μετάδοση του Τοπικού Τσουνάμι προς την ακτή, το μήκος του μετώπου του αυξάνει, ενώ σε αντίθεση το μήκος του μειώνεται. Τόσο στην περίπτωση του Μακρινού, όσο και στην περίπτωση του Τοπικού Τσουνάμι καθώς τα κύματα προσεγγίζουν τις ακτογραμμές το ύψος τους αυξάνεται. Όσον αφορά στον τρόπο διάδοσης αυτών των κυμάτων πρέπει να επισημανθεί ότι σε αντίθεση με την αντίληψη που ευρέως επικρατεί, τα τσουνάμι δεν έχουν την μορφή ενός τεραστίου μεγέθους κύματος, αλλά αποτελούνται συνήθως από 3 έως 4 κύματα που εκδηλώνονται ιδιαιτέρως

γρήγορα καθώς προσεγγίζουν την ακτή.

Από τη στιγμή που τα τσουνάμι πλήξουν την ακτή, μέρος του κύματος και της ενέργειας που αυτό περικλείει επιστρέφει στην ανοικτή θάλασσα. Σε αρκετές περιπτώσεις τα τσουνάμι μπορούν να μετατραπούν σε συγκεκριμένο τύπο κύματος (Κύματα Άκρης - Edge waves), τα οποία κινούνται διαδοχικά μπροστά και πίσω, παράλληλα προς την ακτή.

Καθώς το τσουνάμι προσεγγίζει την ακτή, οι φυσικοί σχηματισμοί και η κλίση του εδάφους επηρεάζουν την εξέλιξη του κύματος. Το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας στην ακτή μπορεί να ανέλθει από μερικά εκατοστά μέχρι αρκετά μέτρα. Σε ακραίες περιπτώσεις το νερό μπορεί να φτάσει και το ύψος των 15μ. στη στεριά (όταν το κύμα έρχεται από μακρινή περιοχή) ή ακόμα και τα 30μ (όταν προέρχεται από κοντινή περιοχή. Το πρώτο κύμα που θα φτάσει στη ακτή είναι πολύ πιθανόν να μην είναι το πιο ισχυρό ενώ κατά τη διάδοσή του είναι πιθανόν κάποιες γειτονικές περιοχές να πληγούν περισσότερο από κάποιες άλλες.

Τσουνάμι που οφείλονται σε κατολισθήσεις

Η ιδέα των τσουνάμι που παράγονται από κατολισθήσεις δεν είναι καινούρια. Ένας από τους πρώτους που έκανε αυτή τη παρατήρηση είναι ο Gutenberg [1939], που υποστήριξε ότι ίσως να αποτελεί έναν από τους κύριους λόγους σχηματισμού των τσουνάμι. Στην έρευνά του αυτή υποστήριξε ότι είναι πολύ πιθανόν τα τεράστια κύματα στο Ceraμ της Χιλής το 1899 να δημιουργήθηκαν από ένα τέτοιο γεγονός.

Σήμερα γνωρίζουμε πλέον ότι ένας μεγάλος αριθμός τσουνάμι οφείλεται σε υποθαλάσσιες (και μη) κατολισθήσεις. Αυτές οι κατολισθήσεις δημιουργούν τσουνάμι με τοπικό συνήθως χαρακτήρα και ένταση, αν και σε περιπτώσεις εκτεταμένης υποθαλάσσιας κατολίσθησης που σχετίζεται με την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα ή την κατακρήμνιση ενός παγόβουνου στη θάλασσα, η περιοχή επιρροής του τσουνάμι που δημιουργείται είναι αρκετών χιλιομέτρων.

Τα τσουνάμι από κατολισθήσεις έχουν μερικές σημαντικές διαφορές από τα τσουνάμι που μελετήσαμε παραπάνω. Τα κύρια χαρακτηριστικά των σεισμογενών τσουνάμι είναι τα μεγάλα μήκη κύματος και οι πολύ μεγαλύτεροι περίοδοι σε σχέση με αυτά που προκαλούνται από κατολισθήσεις. Αντιθέτως, τα κύρια χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη μορφή των τσουνάμι από κατολισθήσεις είναι ο χρόνος μετακίνησης της μάζας, το πλάτος της, το πάχος καθώς και η κλίση της επιφάνειας από την οποία ξεκινάει την πτώση. Τα γεω-μηχανικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας που κυλάει η μάζα κατά την πτώση της είναι ακόμα υπό αμφισβήτηση ως προς τη σημασία τους στη διαδικασία.

Οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις συνήθως σχετίζονται με την εκτεταμένη συσσώρευση ιζημάτων στον πυθμένα των ωκεανών. Αυτά τα ιζήματα συχνά εκτίθενται σε θαλάσσια ρεύματα, ανεμογενή κύματα και τεκτονικές κινήσεις που οδηγούν στην αποσταθεροποίησή τους.

Κατολισθήσεις μπορούν να προκύψουν από εκτεταμένες βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις και πλημμύρες ποταμών. Η υποθαλάσσια κατολίσθηση του πυθμένα, έχει σαν αποτέλεσμα την κατακόρυφη μετατόπιση υδάτινης μάζας πάνω από το σημείο κατολίσθησης, που οδηγεί στην δημιουργία κύματος τσουνάμι [Levin, 2005] (6).

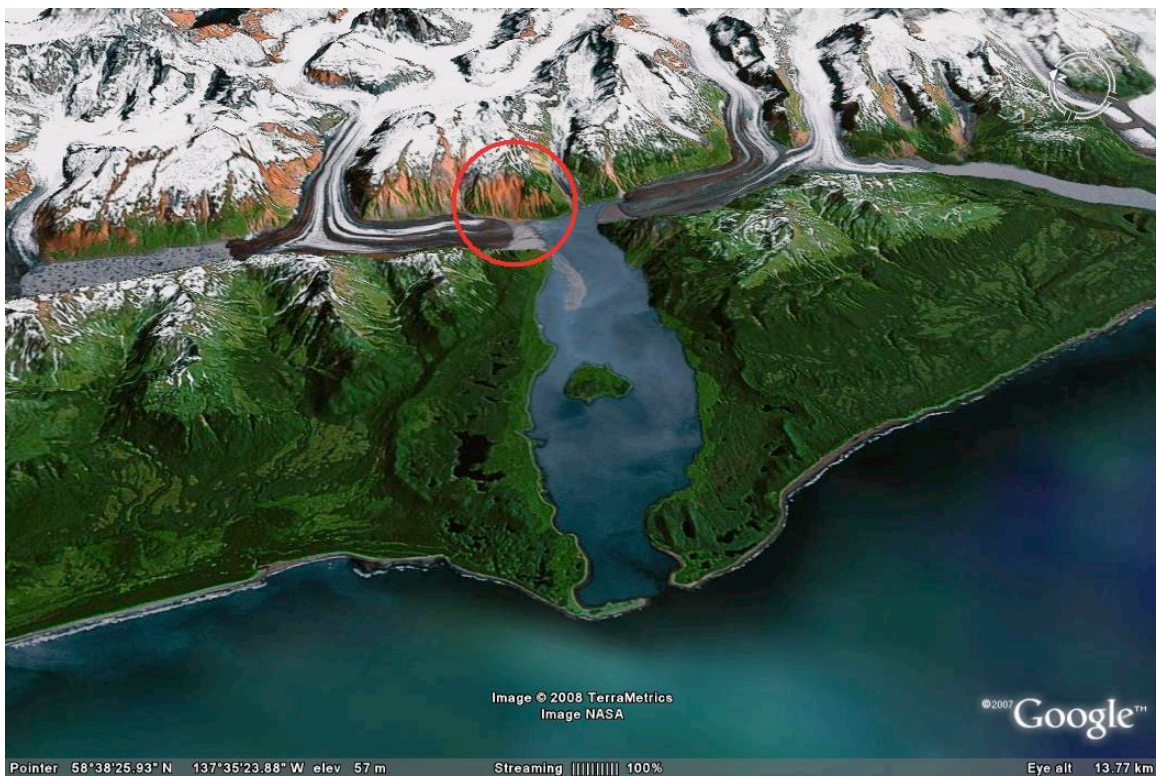
Τα τσουνάμι που προκαλούνται από κατολισθήσεις δεν έχουν την δυνατότητα

διάδοσης από τη μια μεριά του ωκεανού στην άλλη. Όμως στην περιοχή υποθαλάσσιας κατολίσθησης συχνά αποκτούν μεγάλο ύψος, γίνονται βίαια και τοπικά αποβαίνουν ιδιαίτερος καταστροφικά.

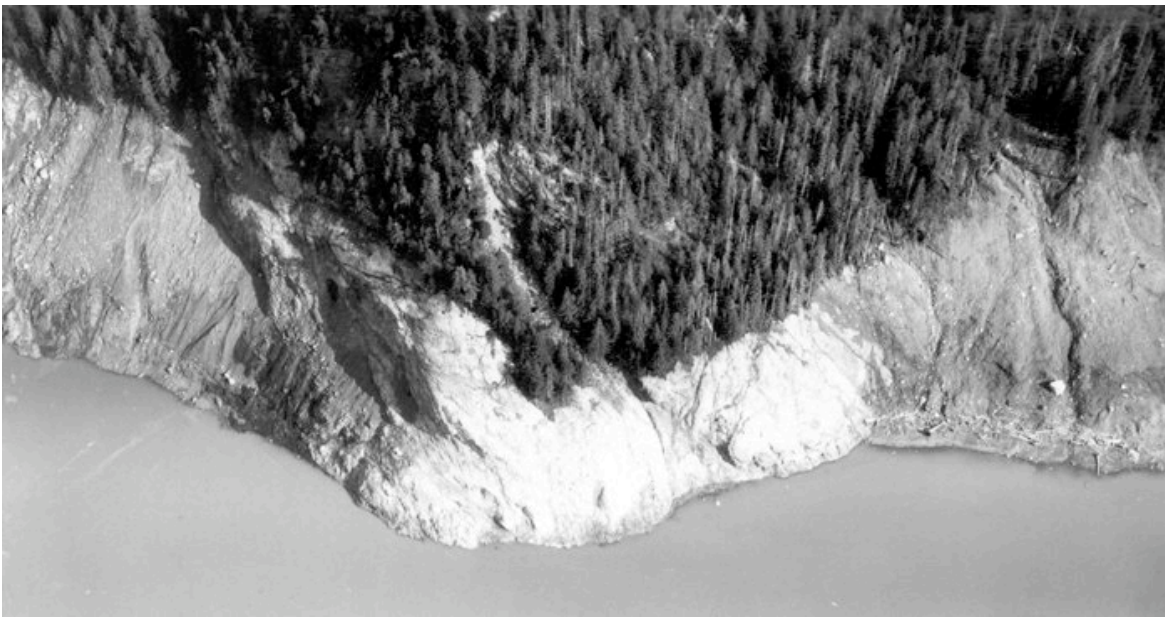
Ένα χαρακτηριστικό παραδείγματα τσουνάμι από κατολίσθηση είναι αυτό που συνέβη στο κόλπο Lituya στις 9 Ιουλίου του 1958 στην Αλάσκα [Εικ.8, Εικ.9]. Το γιγαντιαίο κύμα που δημιουργήθηκε προκλήθηκε από 30 εκατομμύρια κυβικά μέτρα πετράς και χώματος που έπεσαν ξαφνικά μέσα στο κόλπο από μια πλαγιά. Πρόκειται για το πρώτο καταγεγραμμένο συμβάν ενός τόσο μεγάλου τσουνάμι (megatsunami) στα χρονικά που επιβεβαιώνεται και από μαρτυρίες ανθρώπων που ήταν παρόντες. Το κύμα που δημιουργήθηκε έφτασε σε ύψος τα 524 m και είχε τόση δύναμη που ξερίζωσε εντελώς τα δέντρα που βρίσκονταν μέχρι εκείνο το ύψος στις πλαγιές του κόλπου (τα δέντρα είχαν μέσο πάχος κορμού 2 μέτρα) [Εικ.10] [Synolakis,2003](3).



Εικ.8 Αεροφωτογραφία του κόλπου Lituya [Google Earth].



Εικ.9 Αεροφωτογραφία του κόλπου Lituya. Με κόκκινο κύκλο υποδεικνύεται το σημείο της κατολίσθησης.
[Google Earth]



Εικ.10 Η καταστροφή της πανίδας του κόλπου Lituya, από το τσουνάμι
[<http://libraryphoto.cr.usgs.gov/html/lib/btch132/btch132j/btch132z/mdj01257.jpg>]

Μοντελοποίηση τσουνάμι από κατολισθήσεις

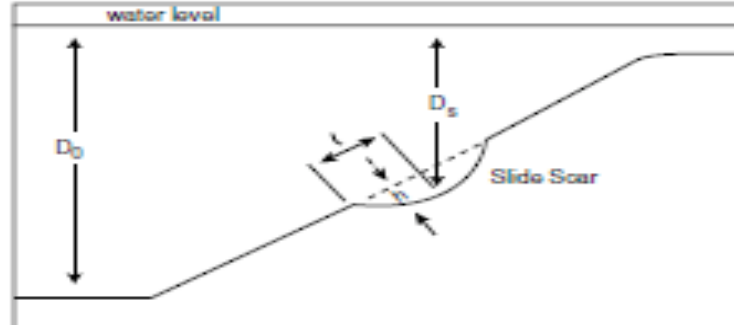
Λίγες υπολογιστικές τεχνικές έχουν σχηματιστεί μέχρι σήμερα που να μοντελοποιούν τις διαδικασίες σχηματισμού τσουνάμι από κατολισθήσεις. Επιστήμονες που πραγματεύονται αυτές τις μεθόδους είναι ο Wiegel [1955], Miloh [1975], Murty [1979], McCulloch [1985], Heinrich [1992], Jiang-LeBlond [1992], Pelinovsky-Poplavsky, Watts [1997,1998], Jiang-Synolakis [2002].

Μία από τις σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί είναι η εξίσωση του Murty :

$$H = \frac{1}{D} \left[8(3)^{1/2} \mu l h \cdot (\gamma - 1)(D_o - D_s) \right]^{2/3}$$

- H : το ύψος του κύματος
- μ : εμπειρική παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη μεταφορά της ενέργειας από τη μάζα στο κύμα από νερό που δημιουργείται
- γ : η πυκνότητα της μάζας προς τη πυκνότητα του νερού
- D_o, D_s, h, l καθορίζονται από το παρακάτω σχήμα

[Synolakis,2003] (3)



Εικ.11 [Synolakis,2003] (3)

Τσουνάμι από ηφαιστειογενή δραστηριότητα

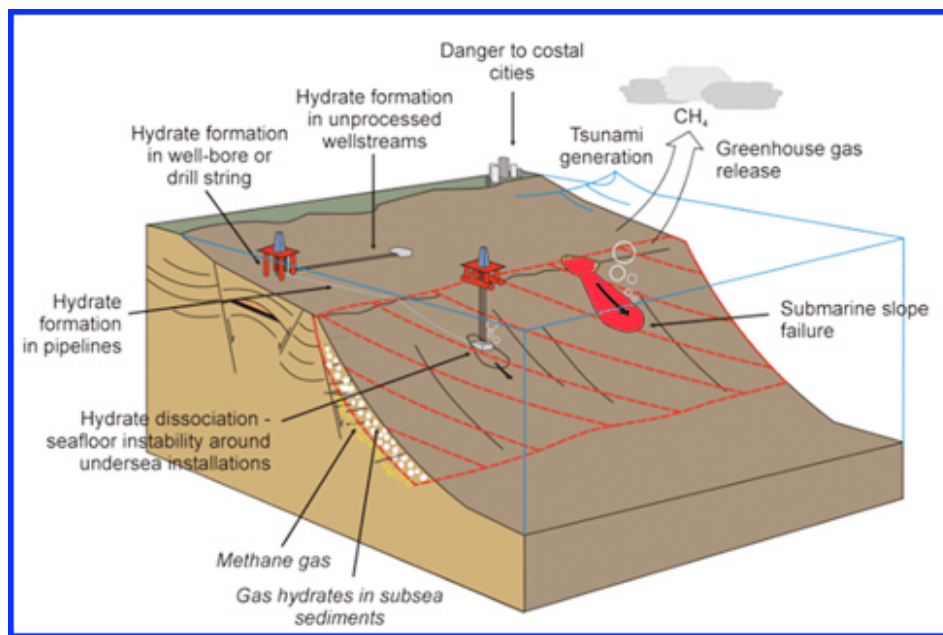


Εικ.12 Το υποθαλάσσιο ηφαίστειο κοντά στα νησιά Tonga εκρήγνυται
[http://wolafen.files.wordpress.com/2009/03/volcano_explosion.jpg].

Πολλά τσουνάμι δημιουργούνται από ηφαιστειογενείς εκρήξεις που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της γης ή και υποθαλάσσια. Οι ηφαιστειογενείς εκρήξεις μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες αναταράξεις στην επιφάνεια των ωκεανών και να οδηγήσουν στη δημιουργία κύματος τσουνάμι. Κατά τη διάρκεια της υποθαλάσσιας ηφαιστειακής δραστηριότητας απελευθερώνονται υποθαλάσσια αέρια τα οποία συντίθενται από καπνό ηφαιστειακής προέλευσης σε υψηλή θερμοκρασία καθώς και ατμό σε υψηλή πίεση [Εικ.12]. Τα αέρια αυτά ανυψώνονται από τα βάθη της θάλασσας και φτάνουν μέχρι την επιφάνεια όπου δημιουργούν μια ανύψωση στη στάθμη της θάλασσας. Μέσω της διαδικασίας αυτής, σχηματίζονται τσουνάμι [Levin, 2005] (6).

Ένα από τα πιο καταστροφικά τσουνάμι που έχει καταγραφεί στην ιστορία είναι αυτό του ηφαιστείου της Σαντορίνης που συνέβη μεταξύ του 1627-1600 π.Χ, αλλά και αυτό του ηφαιστείου Krakatoa στις 26 Αυγούστου 1833 που στοίχισε τη ζωή σε 34.000 ανθρώπους [Friedrich, W.L, et al (2006)] (46).

Τσουνάμι από υποθαλάσσια εκπομπή Ενυδατωμένου Μεθανίου (Hydrates)



Εικ.13 Δημιουργία τσουνάμι από απελευθέρωση μεθανίου σε υδάτινο περιβάλλον
[<http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/images/allissues.gif>]

Η εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων ενυδατωμένου μεθανίου στους ωκεάνιους πυθμένες είναι ικανή να δημιουργήσει κύματα τσουνάμι. Αποθέματα ενυδατωμένου μεθανίου εντοπίζονται στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα όλων των ωκεανών καθώς και στον πυθμένα λιμνών [Εικ.13]. Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι τα αποθέματα ενυδατωμένου μεθανίου στον πυθμένα των ωκεανών εντοπίζονται σε μεγάλης έκτασης περιοχές. Άλλες έρευνες επίσης εντόπισαν τέτοιες περιοχές στην Αλάσκα, στον Ατλαντικό ωκεανό, πολύ κοντά στις ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών, καθώς και σε μεγάλη λίμνη της Νότιας Καλιφόρνια.

Τα αποθέματα ενυδατωμένου μεθανίου αποσταθεροποιούνται και ανοικοδομούνται με παράλληλη ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας και πτώση της πίεσης και η αποσταθεροποίηση αυτή μπορεί να οφείλεται σε μικροσεισμούς ή κίνηση των τεκτονικών πλακών, που επιφέρει την ενεργοποίηση ρηγμάτων σε περιοχές του πυθμένα όπου υπάρχουν αποθέματα ενυδατωμένου μεθανίου.

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι οι πιθανότητες δημιουργίας κυμάτων τσουνάμι μέσω της υδροδυναμικής αποσταθεροποίησης που οφείλεται στην απελευθέρωση ενυδατωμένου μεθανίου του ιζηματογενούς πυθμένα είναι μικρές αλλά υπαρκτές [Levin, 2005] (6).

Τσουνάμι από πτώση αστεροειδών

Άλλη μια πιθανή αιτία δημιουργίας ενός τσουνάμι είναι η πτώση αστεροειδών ή μετεωριτών σε μια υδάτινη επιφάνεια. Ένα τέτοιο φαινόμενο πτώσης ενός μετεωρίτη σε έναν ωκεανό θα μπορούσε να προξενήσει μια τεράστια (ακόμα και παγκόσμια) καταστροφή με τον κατακλυσμό που ενδέχεται να προκαλούσε.



Εικ.14 Φανταστικό σκίτσο αστεροειδή κατά τη πτώση του στη γη
[http://thenewmt.files.wordpress.com/2009/11/big_meteor_hitting_earth.jpg].

Εκτιμάται ότι από την εποχή της εμφάνισης του ανθρώπινου είδους μέχρι σήμερα περίπου 200 έως 500 τέτοια σώματα έχουν προσκρούσει στην επιφάνεια της γης με πιο πιθανή περιοχή πτώσης την ωκεάνια ζώνη, μιας και καλύπτει τα $\frac{3}{4}$ της επιφάνειας της γης. Βάσει πυρηνικών δοκιμών έχει υπολογιστεί ότι η πτώση ενός μετεωρίτη διαμέτρου 100m και ταχύτητα σύγκρουσης 20 km/sec θα απελευθέρωνε ενέργεια ίση με 10^{18} J που ισούται με έκρηξη βόμβας 100 μεγατόνων. Προκύπτει ότι από τη πτώση ενός τέτοιου αστεροειδούς σε θαλάσσια επιφάνεια με βάθος μικρότερο των 3km μια τεράστια μάζα νερού θα μετακινούνταν οδηγώντας στην ολοκληρωτική απογύμνωση μιας θαλάσσιας περιοχής περί του 1 km. Έτσι το κύμα που θα δημιουργούταν θα είχε ύψος 50m.

Μελέτες έχουν δείξει ότι τέτοιες πτώσεις μετεωριτών θα μπορούσαν να δημιουργήσουν τεράστιες διαταράξεις στον ωκεάνιο βυθό και τσουνάμι παγκόσμιας κλίμακας (mega-tsunami) [Levin, 2005] (6).

Η πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος πρόσκρουσης μετεωρίτη δίνεται από το τύπο:

$$P(L) = P(D) AD / AE$$

όπου :

- $P(D)$: η πιθανότητα πρόσκρουσης ενός αστεροειδούς διαμέτρου D
- AD : η περιοχή καταστροφής λόγω πρόσκρουσης
- AE : η συνολική επιφάνεια της γης συμπεριλαμβανομένης και των ωκεανών.

Έχει αποδειχτεί ότι η πτώση ενός μετεωρίτη μεσαίου μεγέθους διαμέτρου 5 με 6 χιλιόμετρα στο μέσο του Ατλαντικού ωκεανού θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα τσουνάμι που θα κάλυπτε τα 2/3 των Ηνωμένων Πολιτειών. Αντίστοιχα, η πτώση ενός αστεροειδούς στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ των νησιών της Χαβάης και των δυτικών ακτών της νότιας Αμερικής, θα δημιουργούσε κύμα τέτοιου μεγέθους το οποίο θα κάλυπτε ολοσχερώς το σύνολο όλων των παράκτιων οικισμών και αστικών κέντρων των δυτικών ακτών του Καναδά, των Ηνωμένων Πολιτειών, του Μεξικού καθώς και σχεδόν το σύνολο των νησιών της Χαβάης.

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα πτώσης μετεωρίτη στη γη είναι αυτό που συνέβη στο τέλος της Κρητιδικής περιόδου 65 εκατομμύρια χρόνια πριν, όπου ένας μετεωρίτης 10 χιλιομέτρων προσέκρουσε σε ρηχή θάλασσα στη περιοχή κοντά στο Chicxulub του Μεξικού. Το τσουνάμι που δημιουργήθηκε ήταν τόσο μεγάλο που έφτασε σε περιοχές μέσα στη στεριά όπως στη Φλόριντα και στο Μεξικό των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Πρέπει να σημειωθεί όμως σε αυτό το σημείο ότι πτώση αστεροειδών στην επιφάνεια της γης είναι ένα παρά πολύ σπάνιο φαινόμενο μιας και οι περισσότεροι διαλύονται κατά την είσοδο τους στην ατμόσφαιρα της γης.

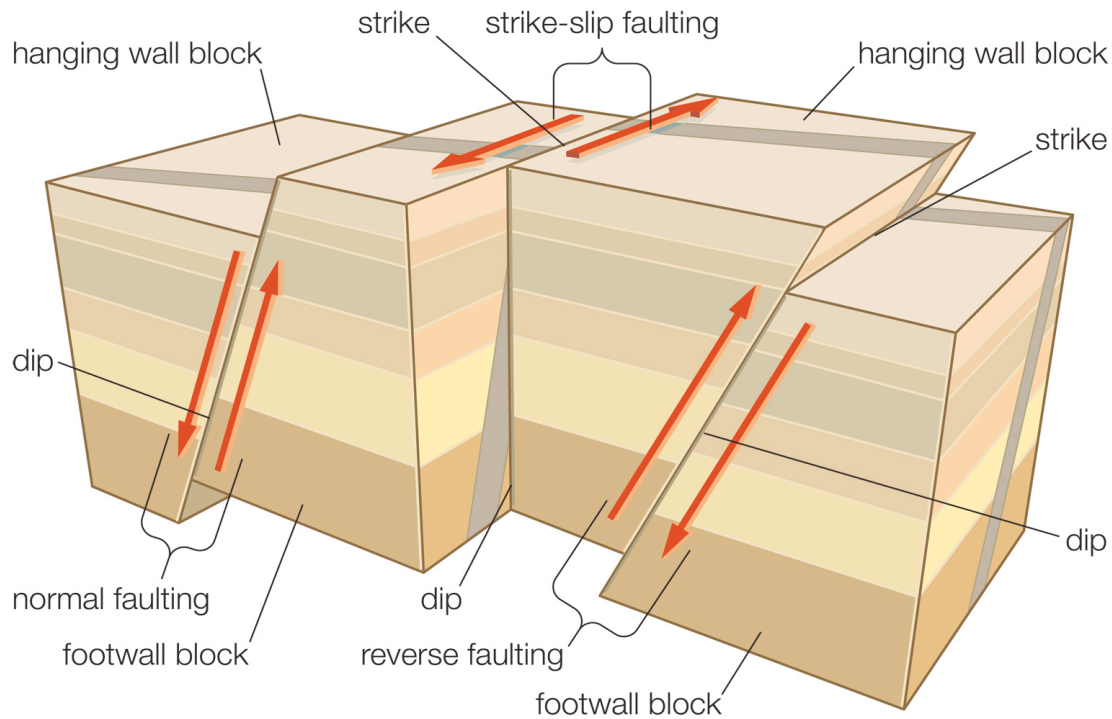
1.2.6 Σχέση μεταξύ σεισμών και τσουνάμι

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η πιο συχνή αιτία πρόκλησης τσουνάμι με διαφορά είναι οι σεισμοί. Δεν είναι όμως όλοι οι σεισμοί ικανοί για να δημιουργήσουν τέτοια τεράστια κύματα. Είναι πολλές οι περιπτώσεις που ακόμα και μεγάλοι σεισμοί δεν κατάφεραν να κινήσουν τις τεράστιες μάζες νερού που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός τέτοιου κύματος.

Μελετώντας τα στοιχεία των προηγούμενων δεκαετιών μπορούμε να δούμε ότι ο μέσος όρος συχνότητας σεισμών είναι ένας με μέγεθος 8 ή μεγαλύτερος ανά έτος και περίπου δέκα υποθαλάσσιοι σεισμοί μεγέθους 7 ανά έτος. Παρόλα αυτά, τα τελευταία 30 χρόνια ο συνολικός αριθμός των τσουνάμι δεν ξεπερνά τους 20.

Ο τρόπος και το μέγεθος της κάθετης παραμόρφωσης στον πυθμένα που προκαλεί ένας σεισμός καθορίζουν κατά πόσο ένα τσουνάμι θα σχηματιστεί ή όχι. Υπάρχουν 3 διαφορετικά είδη ρηγμάτων [Εικ.15] :

- Κανονικά ρήγματα ή ρήγματα εκτάσεως (normal fault)
- Ρήγματα σμίκρυνσης ή ανάστροφα ρήγματα (reverse fault)
- Ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης (strike-slip fault)



Εικ.15 Τα κύρια είδη των ρηγμάτων από σεισμό
[\[http://media-2.web.britannica.com/eb-media/45/345-050-5D443974.jpg\]](http://media-2.web.britannica.com/eb-media/45/345-050-5D443974.jpg)

Πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η δημιουργία τσουνάμι συνήθως προκαλείται από τα δυο πρώτα είδη ρηγμάτων μιας και τα ρήγματα οριζόντιας παραμόρφωσης δεν προκαλούν τις απαιτούμενες για δημιουργία τσουνάμι κατακόρυφες μετατοπίσεις των υδάτων. Συνήθως τα ρήγματα δεν ανήκουν καθαρά σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες αλλά αποτελούνται από έναν συνδυασμό αυτών.

Γενικότερα ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση ενός σεισμού τόσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή επιρροής και η παραμόρφωση που δημιουργεί το ρήγμα. Αυτό με τη σειρά του έχει άμεση επίπτωση στο μέγεθος της απότομης μετακίνησης που δημιουργεί το τσουνάμι [Εικ.16].

M_w	W (km)	L (km)	D (m)	S (m)	L/V (sec)
7	30	70	0.6	0.16	23
8	80	200	2.7	0.70	70
9	240	60	9.0	2.30	200
9.5	250	1000	27.0	7.00	330

Εικ.16: Στον πίνακα φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση ενός σεισμού τόσο μεγαλύτερο είναι και το ρήγμα που δημιουργείται. Το W αντιστοιχεί στο πλάτος του ρήγματος, το L στο μήκος του, D στην οριζόντια μετατόπιση και το S στη κάθετη μετατόπιση του [Synolakis et al. ,1997a].

Επιπλέον όσο βαθύτερα βρίσκεται το επίκεντρο ενός σεισμού τόσο δυνατόν μικρότερη παραμόρφωση δημιουργεί στην επιφάνεια της γης. Έτσι όσο πιο βαθιά λαμβάνει χώρα ένας σεισμός σε μια περιοχή "απελευθερώνει" μεγαλύτερο ποσό της ενέργειάς του, οδηγώντας ένα μικρό μόνο τμήμα της επιφάνειας της γης στο βυθό της λιθόσφαιρας. Λαμβάνοντας υπόψη όλα αυτά μπορούμε να πούμε ότι σπάνια σεισμοί με εστιακό βάθος μεγαλύτερο από 30 km προκαλούν τσουνάμι λόγω του μεγάλου βάθους τους. Εξαιρέσεις όμως όπως ο σεισμός του 1960 στη Χιλή που δημιούργησε τσουνάμι, αφήνουν ακόμα κάποια μικρά περιθώρια για σεισμούς με βαθύτερα επίκεντρα.

Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι σεισμοί που έχουν το επίκεντρο τους πάνω στην ξηρά πολύ σπάνια δημιουργούν τσουνάμι στους ωκεανούς και αυτό γιατί πρέπει η ενέργεια τους να είναι τόσο μεγάλη ώστε να μπορεί οδηγήσει σε κάθετη παραμόρφωση την επικείμενη υδάτινη μάζα εκτός από την παραμόρφωση στη στεριά [Synolakis,2003] (3)

1.2.7. Κλίμακες τσουνάμι

Χρησιμότητα κλίμακας τσουνάμι

Σήμερα έχουν δημιουργηθεί αρκετές κλίμακες που περιγράφουν την ένταση και το μέγεθος της καταστροφής των τσουνάμι. Άλλες έχουν ως βάση τους τα μέγιστα ύψη των κυμάτων ενώ άλλες βασίζονται στις επιπτώσεις που δημιουργεί ο σεισμός στο ανθρωπογενές περιβάλλον.

Οι κλίμακες των τσουνάμι δεν βρίσκουν σήμερα μεγάλη εφαρμογή μιας και οι επιτόπου μετρήσεις των επιστημόνων στο πεδίο μετά από ένα τσουνάμι περιγράφουν επακριβώς και με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τις παραμέτρους του τσουνάμι σε σχέση με αυτές που θα μπορούσε να αποδώσει μια κλίμακα.

Οι κλίμακες των τσουνάμι βρίσκουν εφαρμογή για την περιγραφή και απόδοση χαρακτηριστικών σε περιπτώσεις ιστορικών τσουνάμι που η επιστημονική κοινότητα δε διαθέτει δεδομένα. Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μάλλον οι κλίμακες των τσουνάμι είναι κάτι το ξεπερασμένο για τα σημερινά δεδομένα.

Δημιουργία και εξέλιξη των κλιμάκων τσουνάμι

Η μέτρηση της ισχύς των τσουνάμι δεν είναι μια εύκολη διαδικασία. Η δύναμή τους μπορεί να ποικίλλει, από πολύ μικρά κύματα που μπορούν να μετρηθούν μόνο με τη βοήθεια ειδικών οργάνων μέχρι τεράστια καταστροφικά κύματα. Η δυσκολία στη δημιουργία μιας ικανής κλίμακας είναι ανάλογη με αυτή που αντιμετώπισαν οι σεισμολόγοι στο παρελθόν προσπαθώντας να κάνουν το ίδιο για τους σεισμούς.

Η πρώτη προσπάθεια για μέτρηση μέσω κλίμακας ισχύος ενός τσουνάμι σε σχέση με την ένταση ενός σεισμού έγινε από τον Sieberg (1927). Αποτελείται από 6 βαθμίδες και βασίστηκε στις μακροσκοπικές επιπτώσεις των τσουνάμι καθώς και στα καταστροφικά αποτελέσματα που προκαλούν. Η προσπάθεια αυτή του Sieberg εμπλουτίστηκε και

αναβαθμίστηκε από τον Ambraseys (1962) και οδήγησε στην νέα κλίμακα μέτρησης της έντασης των τσουνάμι, την κλίμακα Sieberg-Ambraseys. Παρόλα αυτά, αυτή η κλίμακα θεωρείται σήμερα από πολλούς επιστήμονες πρόχειρη και μη επαρκώς στοιχειοθετημένη.

Μια νεότερη κλίμακα δημιουργήθηκε και πάλι με βάση την ένταση των τσουνάμι από τους Imamura (1942,1949), Iida (1956,1970) και Iida et al (1967) στα πλαίσια της οποίας το μέγεθος ενός τσουνάμι προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$m = \log_2 \cdot H_{\max}$$

όπου $H_{\max}$: μέγιστο ύψος που παρατηρείται σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή η μετριέται σε σταθμούς μέτρησης.

Στην ουσία η κλίμακα μέτρησης των Imamura και Iida είναι μια κλίμακα που ξεκινάει από το -1 και καταλήγει στο + 4. Η κλίμακα αυτή δίνει περισσότερο βάρος στην ένταση (intensity) και όχι τόσο στο μέγεθος (magnitude) των τσουνάμι.

Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της παραπάνω κλίμακας το 1970 ο Soloviev προτείνει μια καινούργια μέθοδο υπολογισμού της έντασης των τσουνάμι :

$$i = \log_2 H \sqrt{2}$$

I = ένταση του τσουνάμι

H = μέσο ύψος κύματος

Παρόλα αυτά αυτή η κλίμακα του Soloviev είναι άλλη μια κλίμακα βασισμένη στο μέγεθος (magnitude) μιας και εμπεριέχει φυσικά μεγέθη όπως είναι το H.

Αντίστοιχη κλίμακα με αυτή που προτάθηκε παραπάνω είναι και η σχέση των Abe (1979,1981 ,1985 ,1989) και Hatori (1986) όπου η ένταση και ισχύς ενός τσουνάμι δίνεται από τη σχέση:

$$Mt = a \cdot \log H + b \log \Delta + D$$

- H είναι το μέγιστο ύψος που μετριέται
- Δ είναι η απόσταση σε χιλιόμετρα από το επίκεντρο του τσουνάμι έως τους σταθμούς μέτρησης του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας κατά μήκος του ωκεανού
- a , b , D είναι σταθερές.

Άλλη μια πρόταση για νέα κλίμακα έγινε από τους Murty και Loomis (1980) η οποία βασίζεται στη σχέση :

$$ML = 2 \cdot (\log E - 19)$$

- E είναι η δυναμική ενέργεια του τσουνάμι

Άλλη μια διαφορετική προσέγγιση είναι αυτή του Shuto (1993) η οποία αναφέρεται με βάση τη σχέση :

$$i = \log_2 H$$

- Η είναι το ύψος του τοπικού τσουνάμι.

Μια νέα κλίμακα μέτρησης της έντασης δημιουργήθηκε το 2001 από τους Imamura και Papadopoulos η οποία προσπάθησε να βασιστεί μόνο στην ένταση και όχι στο μέγεθος των τσουνάμι. Επίσης αυτή η κλίμακα προσπάθησε να καλύψει την αδυναμία των προηγούμενων στο να κατατάξουν επακριβώς τα τσουνάμι σύμφωνα με την ένταση τους και έτσι να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών γεγονότων.

Οι βασικές αρχές στις οποίες στηρίχτηκε η νέα αυτή κλίμακα είναι:

- ανεξαρτησία της σχέσης από οποιαδήποτε φυσική παράμετρο όπως το ύψος του κύματος,
- ευαισθησία της σχέσης που επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης ενός επαρκούς αριθμού βαθμίδων στην κλίμακα μέτρησης, με σκοπό την καλύτερη δυνατή περιγραφή ακόμα και των μικροδιαφορών όσον αφορά στις επιπτώσεις των τσουνάμι και
- μία λεπτομερής περιγραφή κάθε βαθμού μέτρησης της έντασης λαμβάνοντας υπ' όψη όλες τις επιπτώσεις των τσουνάμι.

Τελικά αυτή η νέα κλίμακα αποτελείται από 12 διαφορετικές βαθμίδες (αναλυτική παρουσίαση στο παράρτημα 2) [Papadopoulos- Imamura,2001] (8).

1.3. Ιστορικά Τσουνάμι

1.3.1. Τσουνάμι στον ελληνικό χώρο

Στις ακτές της Ελλάδας, αλλά και της ευρύτερης περιοχής έχει παρατηρηθεί ένας αξιοσημείωτος αριθμός από τσουνάμι μέσα σε μια χρονική περίοδο που εκτείνεται από την αρχαιότητα έως το πρόσφατο παρελθόν, πολλά εκ των οποίων ήταν και ιδιαίτερα καταστροφικά. Η πλειοψηφία αυτών των τσουνάμι έχει δημιουργηθεί από σεισμούς έντασης που κυμαίνονται από 5.2 έως 8.3. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των σεισμών έχουν μεγέθη από 6.5 έως 7.1, με πιο συνηθισμένο μέγεθος αυτό των 7.

Οι περισσότεροι από αυτούς τους σεισμούς που προκάλεσαν τσουνάμι είχαν ως επίκεντρο μικρό εστιακό βάθος που έφτανε μέχρι 70 χιλιόμετρα. Μικρός αριθμός από τσουνάμι είχε ηφαιστειακή προέλευση (Ηφαίστειο Σαντορίνης), και μόνο ένα τσουνάμι αναφέρεται ότι δημιουργήθηκε από εδαφική κατολίσθηση, η οποία όμως δεν συνοδεύτηκε από σεισμική δραστηριότητα. Είναι προφανές ότι η βασική αιτία δημιουργίας τσουνάμι στον ελληνικό χώρο είναι η σεισμική δραστηριότητα, που είτε προκαλεί μετατόπιση του πυθμένα κατά μήκος του ρήγματος που ενεργοποιείται από τον σεισμό, είτε πυροδοτεί υποθαλάσσια κατολίσθηση. [Papadopoulos, 2003] (10).

Πολλοί μελετητές συμφωνούν ότι τα επίκεντρα αυτών των σεισμών που πραγματοποιούνται σε μικρά βάθη, στην Ελλάδα και την ευρύτερη περιοχή, διαμορφώνονται σε δυο κύριες σεισμικές ζώνες. Η πρώτη, η εξωτερική σεισμική ζώνη έχει σχήμα τοξοειδές, επεκτείνεται παράλληλα προς το Ελληνικό τόξο, έχει ως αφετηρία την Αλβανία, περικλείει Δυτική Ελλάδα, Κρήτη και Δωδεκάνησα και καταλήγει στη Νοτιοδυτική Τουρκία. Η δεύτερη ζώνη που αποκαλείται εσωτερική, καλύπτει όλη την υπόλοιπη περιοχή και διακρίνεται σε άλλες σεισμικές υποζώνες [Papadopoulos and Chalkis, 1983] (11).

Μελετώντας την χωρική κατανομή των σεισμικών επικέντρων που οδήγησαν στην γένεση τσουνάμι, διαπιστώθηκε ότι η πλειοψηφία αυτών των επικέντρων εντοπίζεται σε θαλάσσιες ή παράκτιες περιοχές. Αξίζει να επισημανθεί ότι μέχρι το 1981, από το σύνολο όλων των μεγάλων σεισμικών γεγονότων, άνω του 6.5, ένας στους τέσσερις οδήγησε στην δημιουργία κύματος τσουνάμι. Από μελέτη και έρευνα των ιστορικών δεδομένων, προκύπτει ότι ένα στα δεκαπέντε τσουνάμι που εκδηλώθηκαν έως το 1981 απέβησαν ιδιαίτερος καταστροφικά. Με βάση αυτό ακριβώς το κριτήριο εντοπίστηκαν ως περιοχές μεγάλης επικινδυνότητας οι ακτές της Αλβανίας, το Ιόνιο Πέλαγος, η Νότια Πελοπόννησος, η Βόρεια Κρήτη, τα νοτιοδυτικά παράλια της Τουρκίας, τα Δωδεκάνησα, το Ανατολικό Αιγαίο, ο βόρειος Ευβοϊκός κόλπος, ο Μαλιακός, ο Παγασητικός, ο Πατραϊκός, ο Κορινθιακός, το στενό των Δαρδανελίων και η θάλασσα του Μαρμαρά. [Papadopoulos - Chalkis, 1983] (11).

1.3.2 . Χαρακτηριστικοί σεισμοί & τσουνάμι στον ελλαδικό χώρο

Γενικά

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τέσσερις από τους πιο σημαντικούς σεισμούς που έχουν συμβεί στον ελλαδικό χώρο και έχουν προκαλέσει ταυτόχρονα τσουνάμι. Η μελέτη των σεισμών αυτών καθώς και η προσομοίωσή τους δεν είναι καθόλου εύκολη και αυτό γιατί δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα πολλά (και σωστά πάντα) δεδομένα που τα περιγράφουν. Έτσι η μελέτη τους γίνεται κυρίως μέσα από ιστορικές αναφορές και μαρτυρίες παλιών κειμένων καθώς και από δεδομένα ανασκαφών σε αρχαιολογικούς χώρους (εκτός του σεισμού του 1956). Οι αντιθέσεις, οι υπερβολές καθώς ακόμα και οι λάθος εκτιμήσεις όλων αυτών των στοιχείων οδηγεί συχνά σε αδιέξοδα και ακόμα και οι επιστήμονες που τους μελετούν σχηματίζουν πολλές φορές διαφορετικές απόψεις για το ίδιο γεγονός.

Μελετώντας κανείς τις πηγές των γεγονότων καταλαβαίνει γρήγορα ότι τα δεδομένα δεν είναι ξεκάθαρα και πολλές φορές είναι ακόμα και αντιφατικά. Έτσι, μια θεωρία που σήμερα φαίνεται σωστή και λογική μπορεί στο μέλλον να αποδεχτεί λάθος λαμβάνοντας υπόψη νέα δεδομένα που ενδέχεται να βρεθούν σε ανασκαφές.

1.3.3. Σεισμός από την έκρηξη του Ηφαιστείου της Σαντορίνης

Ένας σεισμός που θεωρείται από πολλούς ο μεγαλύτερος των 10.000 τελευταίων ετών είναι ο σεισμός της Σαντορίνης, που μελέτες τον έχουν προσδιορίσει χρονικά μεταξύ 1613 και 1614 π.Χ.. Η μελέτη ενός τέτοιου σεισμού αν και συναρπάζει τους επιστήμονες δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση.

Η απουσία ιστορικών στοιχείων ή άλλων δεδομένων οδηγεί τους επιστήμονες σε μια δύσκολη μελέτη των ιζημάτων που βρίσκονται μέσα στη θάλασσα αλλά και των γεωλογικών στρωμάτων του εδάφους στη περιοχή των γύρω νησιών.

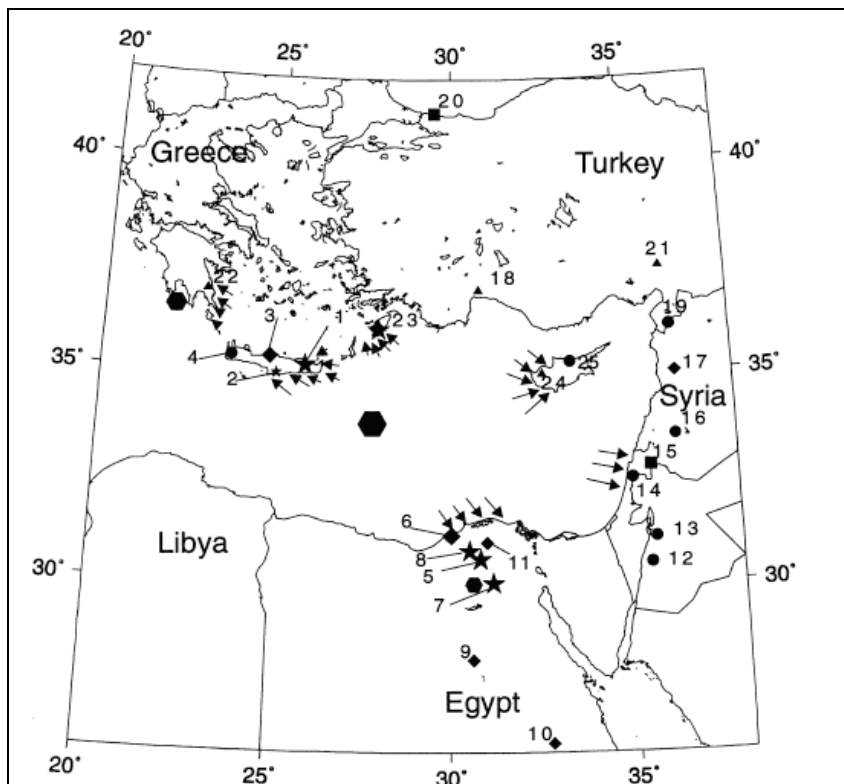
Η τρομερή έκρηξη του ηφαιστείου διέσπειρε στην ατμόσφαιρα 150 δισεκατομμύρια τόνους πετρωμάτων σε ύψος 35 χιλιομέτρων στον αέρα φέρνοντας το χειμώνα πρόωρα στο Αιγαίο. Η αιωρούμενη τέφρα έκρυψε τον ήλιο ρίχνοντας σταδιακά την θερμοκρασία κατά τουλάχιστον 2 βαθμούς Κελσίου κάτω από τα κανονικά επίπεδα της εποχής.

Η έκρηξη του ηφαιστείου χωρίζεται σε τέσσερις βασικές φάσεις. Κατά τη διάρκεια αυτών των φάσεων σχηματίστηκε η καλντέρα, με αποτέλεσμα να δημιουργήσει με τη σειρά της τσουνάμι 20 μέτρων που θεωρείται ότι έπληξαν την Ανατολική Μεσόγειο, τη Φοινίκη, τη Κύπρο, την Αίγυπτο και την Κρήτη οδηγώντας το Μινωικό πολιτισμό σε παρακμή [THE NEW YORK TIMES , WILLIAM J. BROAD] (27).

1.3.4 Ο σεισμός του 1303 μ.Χ.

Γενικά

Ένας ακόμα από τους πιο ισχυρούς σεισμούς στη Μεσόγειο, κοντά στα παράλια της Κρήτης (επίκεντρο νοτιοανατολικά της Κρήτης) ήταν αυτός της 8^{ης} Αυγούστου του 1303 μ.Χ.. Ο σεισμός αυτός ήταν πολύ ισχυρός (7.0 με 7.5 Ρίχτερ) και το μικρό εστιακό του βάθος (10-15 km) είχε σαν αποτέλεσμα μια εκτενή καταστροφή σε πολλά παράλια της Μεσογείου. Περιοχές που επλήγησαν περισσότερο είναι το νησί της Κρήτης, η Ρόδος καθώς και η Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου, όπου η καταστροφή ήταν πολύ μεγάλη. Εκτός όμως από αυτές, περιοχές της Παλαιστίνης, της Ιορδανίας, της Συρίας, την Τουρκίας και της Κύπρου επλήγησαν επίσης [Εικ 17]. [A. El-Sayed,2000] (23).



Εικ.17: Σημεία τα οποία επλήγησαν από το σεισμό του 1303. Με αστερίσκο σημειώνονται οι περιοχές που υπέστησαν πολύ μεγάλη καταστροφή, με ρόμβο οι περιοχές που υπέστησαν αρκετά μεγάλη καταστροφή, με κύκλο οι περιοχές με μικρή καταστροφή, με τρίγωνο περιοχές με πολύ μικρή καταστροφή και με τετράγωνο περιοχές που απλώς ένιωσαν το γεγονός. Το εξάγωνο υποδεικνύει το επίκεντρο σύμφωνα με το Sieberg 1932 (μικρό), σύμφωνα με τον Maamoun 1984 (μεσαίο), Ambraseys 1994 (μεγάλο). Με τα βέλη υποδεικνύονται τα σημεία που επλήγησαν από τσουνάμι [A. El-Sayed, 2000] (23).

Κρήτη

Η Κρήτη είναι το νησί που βρισκόταν πιο κοντά στο επίκεντρο από όλα τα άλλα μέρη και υπέστη τη μεγαλύτερη καταστροφή. Στην Candia (Ηράκλειο) όπου είναι και η πρωτεύουσα του νησιού ο σεισμός προκαλεί πτώση των τειχών της πόλης, πτώση εκκλησιών, καταστροφή του δημαρχείου καθώς και καταστροφές στο τοπικό κάστρο και στους πύργους του λιμανιού. Μια αναφορά ενός μάρτυρα που αναφέρεται στη περιοχή μιλάει για μια πόλη που έχουν απομείνει μόνο ερείπια. Οι πηγές αναφέρουν περίπου 4000 νεκρούς από το σεισμό. Επίσης πολλά από τα μεγάλα οχυρά κάστρα σε όλο το νησί καταρρέουν από την ένταση που έχει ο σεισμός.

Αίγυπτος

Στην Αίγυπτο πολλά σημεία στην περιοχή του Νείλου υπόκεινται σε σοβαρές καταστροφές όπως η Abyar, η Damanhur al-Wahsh και η Sakha. Στην πόλη της Αλεξάνδρειας ένα μεγάλο μέρος του τοίχους της πόλης καταρρέει, όπως επίσης και ο πολύ γνωστός φάρος του λιμανιού της.

Ακόμα και στην περιοχή του Καΐρου προκαλούνται σημαντικές καταστροφές (ακόμα οι επιστήμονες δεν είναι σίγουροι αν οι καταστροφές εκεί οφείλονταν στο σεισμό ανοιχτά της Κρήτης ή είναι επακόλουθα ενός δεύτερου τοπικού σεισμού).

Παλαιστίνη-Συρία

Στην περιοχή της Παλαιστίνης καταστροφές προκαλούνται στην πόλη Safad όπου μια πλευρά της ακρόπολης και δύο πύργοι καταρρέουν. Μερικές καταστροφές στις πόλεις Karak και Shaubak.

Στη Συρία μικρές σχετικά ζημιές καταγράφονται στις πόλεις της Hamah, Antioch και στο Great Mosque στη Δαμασκό.

Στερεά Ελλάδα

Στη περιοχή της στερεάς Ελλάδας πολλά σημεία χτυπιούνται από την καταστροφή, όπως η Μεθώνη και η Κορώνη στην Πελοπόννησο καθώς και το νησί της Ρόδου όπου η καταστροφή είναι πολύ μεγάλη [E.Guidoboni, 1997] (24).

Το τσουνάμι του 1303 μ.Χ.

Το τσουνάμι που δημιουργήθηκε από το σεισμό του 1303 μ.Χ. ήταν πολύ ισχυρό σε πολλά σημεία της Μεσογείου, πνίγοντας πολλούς ανθρώπους και προκαλώντας τεράστιες καταστροφές στο διάβα του.

Χαρακτηριστικά στην Candia (Ηράκλειο) κείμενα αυτοπτών μαρτύρων αναφέρουν ότι το κύμα μπήκε με τεράστια ορμή μέσα στην πόλη καταστρέφοντας κτίρια και πνίγοντας ανθρώπους [Ricobaldo da Ferrara (14th c.), Annales Caesenates (14th c.), Annales Forolivienses (15th c.) και Bartolomeo della Pugliola (15th c.)].

Στην πόλη Acre στο Ισραήλ η θάλασσα ξαφνικά τραβήχτηκε τόσο πολύ, που ναυάγια από την αραβική πολιορκία της πόλης που ήταν χρόνια μέσα στο νερό εμφανίστηκαν ξαφνικά στην επιφάνεια. Πολλοί άνθρωποι έτρεξαν να δουν το φαινόμενο από κοντά, αλλά η ξαφνική επιστροφή της θάλασσας τους παρέσυρε και τους έπνιξε πλημμυρίζοντας ταυτόχρονα και την πόλη.

Στην πόλη της Αλεξάνδρειας εκτενείς καταστροφές προκλήθηκαν σε κτίρια που βρίσκονταν κοντά στη ακτή καθώς και σε καράβια στο λιμάνι που το τσουνάμι σήκωσε και πέταξε με δύναμη πάνω στα βράχια κομματιάζοντάς τα [E.Guidoboni, 1997] (24).

Επιπτώσεις

Ο πολύ ισχυρός σεισμός και το τσουνάμι που ακολούθησε το 1303 μ.Χ. είχε σαν αποτέλεσμα την καταστροφή μιας πολύ μεγάλης περιοχής της Μεσογείου και προξένησε το θάνατο σε πολλούς ανθρώπους σε παρά πολλές περιοχές. Οι καταστροφικές συνέπειες του ήταν τεράστιες και ιδίως στη Κρήτη καθώς το γεγονός αυτό οδήγησε σε μια οικονομική αλλά και κοινωνική κρίση που ως βάση της είχε την καταστροφή των υποδομών του νησιού [E.Guidoboni, 1997] (24).

1.3.5. Σεισμός της 9ης Ιουλίου 1956

Χαρακτηριστικά σεισμού

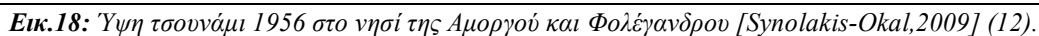
Ο σεισμός της 9ης Ιουλίου του 1956, μεγέθους $M_s=7.8$ (B.Gutenberg-Pasadena) έγινε στις 03:11:43.7 GMT (05:11:43.7 τοπική ώρα). Ο προσδιορισμός της εστίας του κύριου σεισμού έγινε από τους Makropoulos et al. (1989) και είχε συντεταγμένες 36.64°N/25.91°E (20 km Βόρεια της Αμοργού).

Ο σεισμός αυτός ήταν ο μεγαλύτερος και ο πιο καταστρεπτικός σεισμός που είχε συμβεί στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου τον τελευταίο αιώνα. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από τους πιο σημαντικούς στη νεότερη ιστορία της χώρας, μιας και προκάλεσε 53 θύματα, 100 τραυματίες καθώς και βλάβες σε περίπου 3760 κατασκευές (κυρίως στο νησί της Σαντορίνης), ενώ είναι και ο μοναδικός που προκάλεσε τσουνάμι στον ελλαδικό χώρο τον προηγούμενο αιώνα.

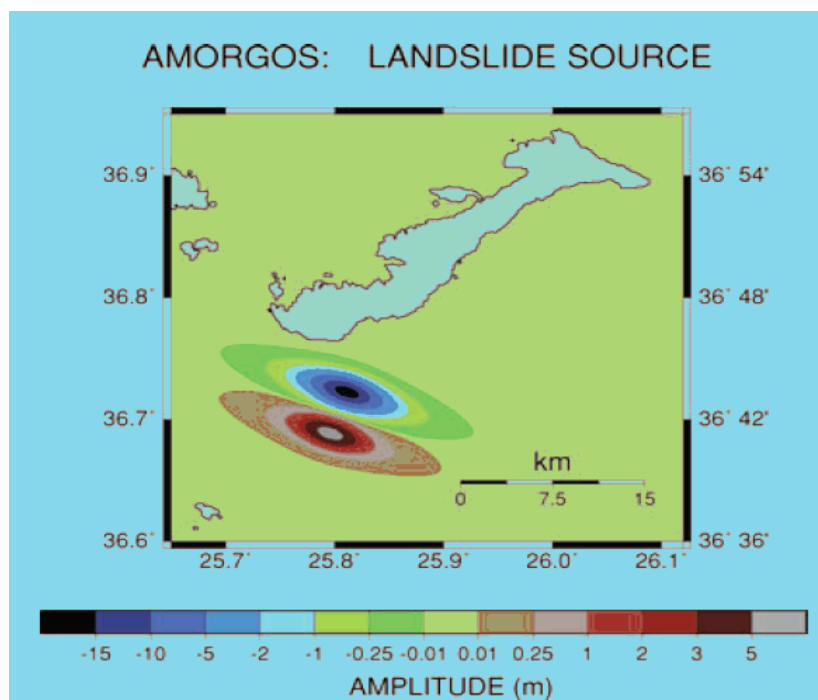
Το τσουνάμι που δημιουργήθηκε από το σεισμό αυτό επηρέασε πολλά νησιά των Κυκλάδων, των Δωδεκανήσων, την Κρήτη καθώς και κάποια μέρη στα παράλια της Μ.Ασίας. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι το ρήγμα που προκάλεσε το σεισμό είναι οριζόντιας μετατόπισης και βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο της τάφρου της Αμοργού έχοντας διεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά [Dominey-Howes,2000] (39).

Αν και πολλές αναφορές που είχαν συνταχθεί για τις επιπτώσεις του τσουνάμι της

Η πιο χαρακτηριστική μέτρηση σε σημείο περιοχής που έπληξε το τσουνάμι είναι ο “Μούρος” στο νησί της Αμοργού. Σε αυτή την τοποθεσία η αναρρίχηση του κύματος έφτασε τα 20 m (σημείο 6, *Εικ.18*). Μάρτυρες στο γεγονός αυτό ήταν δύο βοσκοί που βρίσκονταν τυχαία πάνω από το σημείο αυτό. Άλλες μεγάλες τιμές αναρρίχησης μετρήθηκαν σε περιοχές της Φολέγανδρου και στην Αστυπάλαια [Synolakis-Okal,2009] (12).



34



Εικ.19 Σενάριο υποθαλασσίου σεισμού ανοιχτά της Αμοργού, [Synolakis- Okal,2009]

Στον παρακάτω πίνακα [Εικ.20] φαίνονται οι τιμές αναρρίχησης που προκάλεσε το τσουνάμι στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου [Εικ.17] [Synolakis-Okal ,2009] (12). Πιο χαρακτηριστικό σημείο αυτού του τσουνάμι είναι η περιοχή Μούρος στην Αμοργό όπου η αναρρίχηση του κύματος έφτασε τα 20 μέτρα. Ευτυχώς αν και το τσουνάμι σε αυτό το σημείο ήταν πολύ μεγάλο, λόγω της απομόνωσης που είχε η περιοχή δεν υπήρξαν ανθρώπινα θύματα.

Είναι πολύ σημαντικό ότι από το σεισμό και το τσουνάμι που ακολούθησε έχουμε καταγεγραμμένες μαρτυρίες ανθρώπων που τα βίωσαν από κοντά. Για τη συλλογή των πολύτιμων αυτών δεδομένων συνέβαλε σε τεράστιο βαθμό η εκτεταμένη ερευνα που έγινε από τον Dr K. Συνολάκη και τους συνεργάτες του, καταγράφοντας έτσι όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα και μαρτυρίες. Η λεπτομερής παρουσίαση των μαρτυριών αυτών γίνεται στο παράρτημα 1 της διπλωματικής εργασίας.

Site number	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Run-up (m)	Island	Site and notes
1	36.901615	25.977066	2.5	Amorgos	Ormos Aigialis
2	36.904316	25.978149	1.0	Amorgos	Ormos Aigialis
3	36.878235	25.931616	2.5	Amorgos	Agios Pavlos
4	36.825565	25.905884	9.7	Amorgos	Agia Anna
5	36.830750	25.867216	1.5	Amorgos	Katapalo
6	36.785900	25.830183	20.0	Amorgos	Mouros
7	36.805534	25.783199	1.5	Amorgos	Katokampos
8	36.570435	26.356133	7.0	Astypalaia	Stavros
9	36.542549	26.342884	2.5	Astypalaia	Livadia, vacant lot
10	36.576935	26.389584	1.2	Astypalaia	Maltezana, eastern end of beach
11	36.576683	26.385000	2.2	Astypalaia	Maltezana, Swamp east of hotel
12	36.575401	25.383699	2.0	Astypalaia	Maltezana, Road to beach
13	36.574234	26.383167	3.0	Astypalaia	Maltezana, western end of beach
14	36.587234	26.404083	7.5	Astypalaia	Vai, Cave on cliff
15	36.605499	26.398899	4.0	Astypalaia	Bay 1, Below house at end of road
16	36.620483	26.394184	3.0	Astypalaia	Vathi, Road above taverna
17	36.548901	26.353201	2.6	Astypalaia	Skala, Blockhouse in front of school
18	36.548584	26.352800	4.0	Astypalaia	Skala, interpreted from postcard
19	36.570435	26.357483	10.0	Astypalaia	Stavros, DH Point 2
20	36.541100	26.339634	2.0	Astypalaia	Livadia, DH point 1
21	36.356266	25.475283	3.0	Santorini	Perissa, shops on waterfront
22	36.336266	25.436516	2.0	Santorini	Vlichada, waterfront
23	36.344601	25.771067	3.0	Anafi	Agios Nikolaos, steps near parked car
24	36.615501	24.948166	1.3	Folegandros	Karavostasis, Port
25	36.630932	24.894117	12.6	Folegandros	Aggali, Ex-river bed
26	36.630199	24.884600	3.1	Folegandros	Agios Nikolaos, Beach
27	36.650234	24.845900	14.6	Folegandros	Ambeli, Splash on cliff behind beach
28	36.664616	24.859983	1.1	Folegandros	Agios Georgios, Beach
29	36.937433	25.473683	1.2	Naxos	Kalantos, flat terrain
30	36.958933	25.539467	1.6	Naxos	Panormos
31	36.986750	25.559733	1.9	Naxos	Kleidos 1
32	36.990117	25.559400	2.3	Naxos	Kleidos 2
33	37.007700	25.567450	2.1	Naxos	Zo
34	37.017367	25.572117	3.1	Naxos	Kanakis
35	37.078617	25.587217	3.1	Naxos	Moutsouna
36	37.181983	25.551983	2.0	Naxos	Apollonas
37	37.103800	25.374900	2.0	Naxos	Chora Naxou
38	37.070067	25.353917	2.1	Naxos	Agia Anna
39	36.987017	25.391767	1.8	Naxos	Glyfada Beach
40	35.488950	24.060833	1.5	Crete	Chania Souda In. 250
41	35.341650	25.135867	2.0	Crete	Iraklion Inun 30
42	35.190700	25.718883	1.5	Crete	Agios Nikolaos Inun. 5
43	35.264033	25.719317	1.5	Crete	Agios Nikolaos Elunta In. 150
44	37.354924	26.540595	3.0	Patmos	
45	37.350042	26.565976	3.0	Patmos	Agriolivado
46	37.302541	26.561283	1.7	Patmos	
47	37.295479	26.767131	3.0	Lipsi	Wharf destroyed
48	37.152485	26.828033	4.0	Leros	Gourna
49	37.131248	26.854233	2.0	Leros	Laki, Cycle shop
50	37.132351	26.852716	2.7	Leros	Laki, Statue
51	36.949663	26.985553	2.0	Kalymnos	Boat sunk
52	36.61390	27.13845	2.9	Nisyros	Mandraki, post office
53	36.61172	27.13223	3.7	Nisyros	Mandraki, KlearchouKourouni str.
54	36.45925	27.33533	2.5	Tilos	Agios Antonios, Tavern
55	36.41678	27.38562	0.8	Tilos	Livadia, older dock
56	36.43347	27.34763	3.1	Tilos	Eristos, sand dune
57	36.43433	27.34793	2.2	Tilos	Eristos, Hotel Ereisos
58	36.54832	27.84643	2.4	Symi	Panormitis, Monastery
59	36.61562	27.85550	1.1	Symi	Pedi, entrance to tavern
60	36.61418	27.85546	1.3	Symi	Pedi, Agios Georgios church
61	36.26860	27.71128	2.1	Alimia	Agios Georgios Church
62	35.89208	27.77338	2.1	Rhodos	Prasonissi, Mini Market

Εικ.20 Αναρρίχηση τσουνάμι 1968 σε διάφορα σημεία νησιών του Αιγαίου, [Synolakis- Okal,2009] (12).

1.3.6. Σεισμός Μελέτης 365 μ.Χ

Γενικά

Ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς σεισμούς στην ελληνική ιστορία, ο οποίος και μελετάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, είναι ο σεισμός της 21 Ιουλίου του 365 μ.Χ. Αυτός ο σεισμός προκάλεσε εκτενείς καταστροφές τόσο με την έντασή του αλλά και με το τσουνάμι που δημιουργήθηκε από τον υποθαλάσσιο σεισμό [Εικ.21].

Ο σεισμός του 365 μ.Χ αν και έχει αναφερθεί σε πολλά κείμενα ιστορικών και λόγιων της εποχής (Ammianus Marcelinus, Jerome (Saint, Hieronymous), Zosimus, Athanasios of Alexandria, Sozomenus, Libanius, Gregory of Nyssa, Socrates Scholasticus, Filostorgios, John Cassian, Synesios of Cyrene) [Stathis C. Stiros, 2000] (15), συνεχίζει ακόμα και σήμερα να διχάζει την επιστημονική κοινότητα. Οι κύριοι λόγοι είναι δύο:

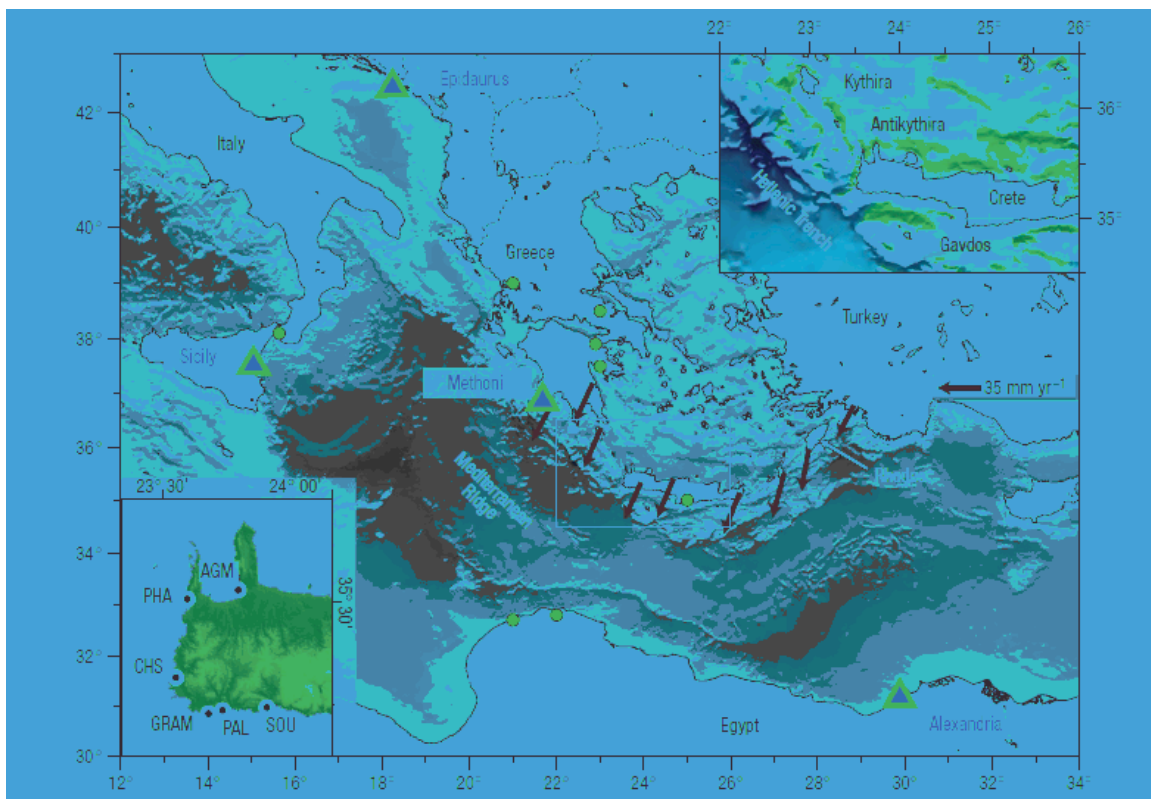
- η έκταση της καταστροφής στη Μεσόγειο και
- η καθολικότητα του σεισμού (πολλοί επιστήμονες πιστεύουν ότι ήταν μια ακολουθία πολλών σεισμών, όχι μόνο ένας).

<i>Crete</i>	
Kissamos, West Crete	Shortly after AD355–AD361
Eleutherna, West Crete	Shortly after AD355–AD361
Gortyn, Central Crete	10–15 years before AD383
<i>Libya</i>	
Leptis Magna, Tripolitania, NW coast	Shortly after AD364–367
Sabratha, Tripolitania, NW coast	Shortly after AD364–367, before AD378
Balagrae (El Beida), Cyrenaica, NE coast	Shortly after AD364
Cyrene, Cyrenaica, NE coast	Shortly after AD361
Ptolemais, Cyrenaica, NE coast	Shortly before AD364–378
<i>Cyprus</i>	
Kourion and Paphos (west coast)	Between late AD364–September 365
<i>Sicily</i>	
Agrigento	Shortly after AD364–367
Selinunte, Temple C	After AD330
Reggio Calabria (S. mainland Italy)	Before AD374

Εικ.21: Καταστροφές αρχαίων πόλεων γύρω στην περίοδο του 365 μ.Χ. Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από μελέτη επιγραφών, νομισμάτων αλλά και ιστορικών στοιχείων [Stiros, S.C,2009] (17).

Χαρακτηριστικά του σεισμού του 365 μ.Χ

Εκτενείς μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με το σεισμό του 365 μ.Χ. μέσω μοντέλων, έχουν δείξει ότι ο σεισμός είχε ένταση 8-8,5 βαθμών τουλάχιστον και δημιούργησε μια επιφάνεια διάρρηξης περίπου 100 χιλιομέτρων, που είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτές που συναντάμε συνήθως στην περιοχή [B. SHAW,2008](16).



Εικ.22: Με κίτρινους κύκλους απεικονίζονται τα σημεία που καταστράφηκαν στο σεισμό του 365 μ.Χ.. Με μπλε τρίγωνα σημειώνονται τα σημεία που επλήγησαν από το τσουνάμι που δημιουργήθηκε. Με κόκκινα βέλη σημειώνονται τα σημεία μετρήσεων με σύστημα GPS [B. SHAW,2008](16).

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η περίοδος που συνέβει ο καταστρεπτικός σεισμός του 365 μ.Χ, χαρακτηρίζεται από πολύ έντονη σεισμική δραστηριότητα (355-450 μ.Χ.) στη Μεσόγειο και στον ελλαδικό χώρο. Επίσης ένα στοιχείο που δείχνει την ένταση αυτή των σεισμών είναι η ανύψωση της νοτιοδυτικής πλευράς της Κρήτης [Εικ.23, Εικ.24] κατά 9 μέτρα και της βορειοδυτικής πλευράς των Αντικύθηρων κατά 2.7 μέτρα σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας [B.SHAW,2008] (16). Ακόμα όμως οι επιστήμονες δεν μπορούν να είναι σίγουροι αν η ανύψωση αυτή της Κρήτης οφείλεται μόνο στο σεισμό του 365 μ.Χ. ή σε μια ακολουθία σεισμών της εποχής [Stiros, S.C,2009] (17).



Εικ.23 Επίπεδο θάλασσας πριν από το σεισμό του 365 μ.Χ, παραλία της Σούγιας, Νότια Κρήτη [Stiros, S.C,2009] (17).



Εικόνα 24 (a) Στην εικόνα φαίνεται το παλιό επίπεδο της θάλασσας πριν από το σεισμό στη Παλαιόχωρα που ανύψωσε τη νοτιοδυτική πλευρά της Κρήτης. Ύψος παλιού επιπέδου +9 m.

Εικόνα 24(b) Παλιό επίπεδο της θάλασσας στην περιοχή της Σούγιας, +7m.

Εικόνα 24(c) Σε απόσταση μεγαλύτερη από 100km από τη νοτιοδυτική άκρη της Κρήτης, στην περιοχή Άγιος Παύλος το παλιό ύψος της θάλασσας είναι +1.6m.

Εικόνα 24 (d) Κοράλλι μέσα σε πέτρωμα στη στεριά στα Φαλάσαρνα [Shaw et al. Supplementary Material](19).

Έκταση της καταστροφής του σεισμού 365 μ.Χ.

Γενικά

Η καταστροφή και από το σεισμό του 365 μ.Χ. και από το τσουνάμι που ακολούθησε είχε αντίκτυπο σε πάρα πολλά μέρη και πόλεις της Μεσογείου. Εκτός από την Κρήτη που η καταστροφή ήταν πολύ μεγάλη, ανασκαφές έχουν δείξει ότι περιοχές που επλήγησαν από το καταστροφικό γεγονός είναι η Κύπρος, η Λιβύη και η νότια Ιταλία [Stiros, S.C,2009] (17).

Κρήτη

Ιστορικά στοιχεία από αναφορές (Athanasio, Georius Monachus) αναφέρουν το καταστροφικό γεγονός του πολύ δυνατού σεισμού και το τσουνάμι που ακολούθησε και έπληξε την Κρήτη. Χαρακτηριστικά αναφέρουν την ολική ή σχεδόν ολική καταστροφή περισσότερων από 100 πόλεων στο νησί, καθώς αναφέρεται επίσης και η ανύψωση της δυτικής πλευράς του νησιού (Socrates Scholasticus: η θάλασσα υποχώρησε τόσο που φάνηκε ο βυθός και πλέον, εκεί που παλιά οι άνθρωποι περπατούσαν, τώρα πια διαπλέουν) [Stathis C. Stiros, 2000] (15).

Η καταστροφή όμως δεν επηρέασε μόνο το φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον στην Κρήτη αλλά και τη βάση της ίδιας της κοινωνίας, καθώς μετά από το καταστροφικό αυτό γεγονός άρχισε να δείχνει σημάδια παρακμής. Χαρακτηριστικά μέσα από τις αρχαιολογικές ανασκαφές προκύπτει ότι πολλοί άνθρωποι μετά το σεισμό δε θάφτηκαν με το πρέπον τελετουργικό, το οποίο στην αρχαία ελληνική κοινωνία αποτελούσε κάτι ιερό. Αυτό το κοινωνικό γεγονός σε συνδυασμό με την καταστροφή των αρχαίων πολύ σημαντικών λιμανιών σκιαγραφεί το μέγεθος της καταστροφής στο νησί.

Λιβύη

Καταστροφές στις βορειοανατολικές ακτές της Λιβύης την περίοδο του 365 μ.Χ. δείχνουν ότι και αυτή η περιοχή επηρεάστηκε έντονα από την καταστροφή. Οι μεγαλύτερες καταστροφές συναντώνται στη πόλη Cyrenaica όπου σπίτια κατέρρευσαν θάβοντας ζωντανούς τους κατοίκους. Επίσης καταστροφές μικρότερης κλίμακας απαντώνται και στη πόλη Tripolitis

Κύπρος

Στην Κύπρο η έκταση της καταστροφής ήταν πολύ μεγάλη καθώς τα ιστορικά κείμενα αναφέρουν χαρακτηριστικά ότι η πόλη της Πάφου ήταν μόνο ένας σωρός από ερείπια μετά την καταστροφή. Επίσης ανασκαφές στη πόλη Kourion δείχνουν ολική καταστροφή στην περιοχή, τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Ηπειρωτική Ελλάδα

Καταστροφές αναφέρονται στην περιοχή της Κορίνθου από τη δύναμη του σεισμού καθώς και από το τσουνάμι που ακολούθησε καθώς έγινε αισθητό σε πολλά μέρη της ηπειρωτικής Ελλάδος. Επιπλέον στοιχεία όπως επισκευές στα κτίρια της πόλης του Ναυπλίου και ''αντιπλημμυρικά έργα'' επιδεικνύουν ότι ακόμα και στην περιοχή εκείνη η καταστροφική δύναμη του σεισμού είχε επιπτώσεις. [Stathis C. Stiros, 2000] (15)

Νότια Ιταλία-Σικελία

Αν και υπάρχουν ιστορικές αναφορές της εποχής για καταστροφή από ισχυρούς σεισμούς στην νότια Ιταλία, αρχαιολογικές ανασκαφές και ευρήματα δεν έχουν βρεθεί ώστε να γίνει σίγουρη συσχέτιση με το σεισμό του 365 μ.Χ. Αν και υπάρχει μια έντονη παρακμή των πόλεων Messina και Calabria στη Σικελία οι επιστήμονες δεν είναι βέβαιοι αν αυτό οφείλεται σε ένα σεισμό τοπικού χαρακτήρα ή αν ο σεισμός κοντά στην Κρήτη επηρέασε την περιοχή αυτή [Stathis C. Stiros, 2000] (15)

Αίγυπτος

Από το σεισμό της 21 Ιουλίου του 365 μ.Χ. ανοιχτά της Κρήτης και το τσουνάμι που ακολούθησε επλήγησε και η πόλη της Αλεξάνδρειας στην Αίγυπτο. Το πιο γνωστό κείμενο που αναφέρεται σε αυτήν την καταστροφή γράφτηκε από το λόγιο της εποχής Ammianus Marcellius. Η έκταση της καταστροφής πρέπει να ήταν τόσο μεγάλη ώστε μεταγενέστεροι συγγραφείς αναφέρουν ότι το γεγονός έγινε θρύλος στην Αίγυπτο για περισσότερο από μια χιλιετία, ενώ για περισσότερα από 200 χρόνια η μέρα αυτή έγινε μια μέρα πένθους και ονομάστηκε ''Μέρα του τρόμου''. Το τσουνάμι που έπληξε την πόλη της Αλεξάνδρειας ήταν τόσο μεγάλο που προκάλεσε σοβαρές πλημμύρες σε πάνω από 50.000 σπίτια, ενώ πάνω από 5.000 άτομα πνίγηκαν από τα κύματα [Ambraseys et al., 1994] (23).

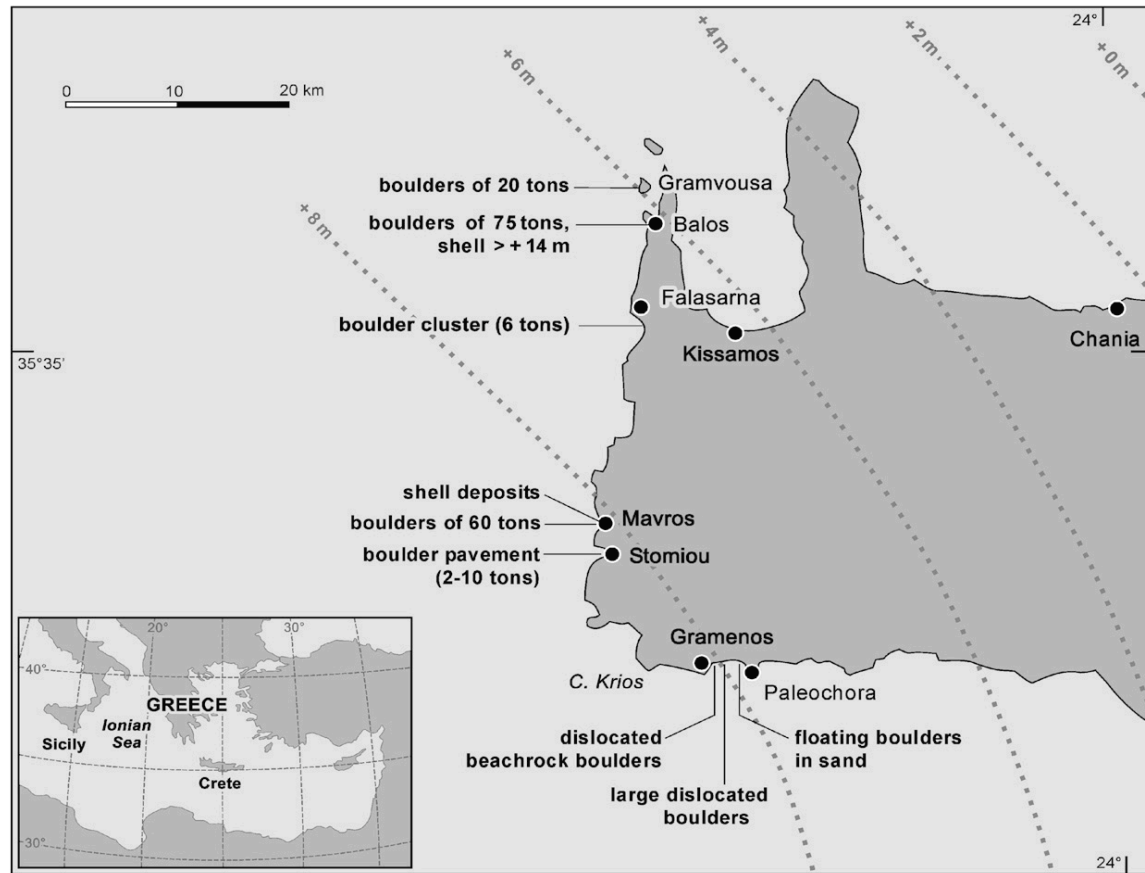
Γεωμορφολογικά στοιχεία τσουνάμι

Σύγχρονες μελέτες επιστημών στο πεδίο έχουν βρει πολλά στοιχεία που αποδεικνύουν ότι η περιοχή της Κρήτης έχει χτυπηθεί από πολλά τσουνάμι στο παρελθόν ακόμα και στην αρχαιότητα, για τα οποία δεν έχουμε κανένα στοιχείο. Μερικές από αυτές τις έρευνες έχουν ως βάση τους τη μελέτη τεραστίων βράχων που βρίσκονται πάνω στη στεριά σε παραθαλάσσιες περιοχές [Εικ.25].



Εικ.25 Ογκόλιθος τουλάχιστον 40 τόνων επικαλυμμένος με ασβεστολιθικά φύκη, περίπου 60 m μακριά από την ακτογραμμή στο κόλπο Μαύρος στα δυτικά Χανιά. [A.Scheffers,2007] (19).

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούν ότι αυτοί οι τεράστιοι βράχοι είναι δυνατόν να ξεβράστηκαν από τη θάλασσα μόνο με την τεράστια δύναμη που τα τσουνάμι έχουν ή ακόμα και από το φαινόμενο της ανύψωση της Κρήτης κατά 9 μέτρα το 365 μ.Χ. όπου δημιούργησε στεριά σε σημεία που πριν ήταν θάλασσα. Η τεράστια μάζα αυτών των βράχων (>20 τόνους) κάνει αδύνατη τη μετακίνησή τους από ανεμογενή κύματα και θύελλες. Επίσης η ηπειρωτική προέλευση τους έχει αποκλειστεί μιας και πάνω τους έχουν στοιχεία θαλάσσιας ζωής όπως άλγη που παραπέμπουν σε υδάτινο περιβάλλον.



Εικ.26: Χάρτης που δείχνει την κατανομή των ογκόλιθων που πιστεύεται ότι έχουν ξεβρασθεί στη στεριά από τσουνάμι και την ανύψωση της Κρήτης, Δυτική Κρήτη [A.Scheffers,2007] (19).

Locality	Sedimentological and geomorphological evidence	Min. run up (based on setting of deposits) (m)	Likelihood of tsunami	Age assessment
Ormos Stomiou	Shell bed	>3	High	5660±60 yrs BP (Beta-209491)
Ormos Stomiou	Boulder (40 t)	>6	High	?
5 km S Ormos Stomiou	Boulder pavement	>5	High	?
Falasama S	Tilted notches at boulder > 50 t	>8	Moderate to high	365 AD or later
Balos	Dislocated boulders (10–40 t) with borings	>6	High	365 AD or later
Balos	Dislocated boulders (67 t, 75 t) at 15–25 m asl	>25	High	365 AD or later
W Paleochora	Dislocated boulders (> 20–200 t)	>8	High	Post 365 AD
Gramenos Peninsula	Dislocated beachrock slabs	>3	Moderate	Post 365 AD
Balos	Shell bed at 15–25 m asl	>25	High	500±60 yrs BP (Beta-210649)

Εικ.27 Ιζηματογενή και γεωμορφολογικά στοιχεία που θεωρείται ότι προέρχονται από τσουνάμι του παρελθόντος. Προσπάθεια και για χρονικό προσδιορισμό της απόθεσης τους [A.Scheffers,2007] (19).

1.3.7. Σκέψεις και αποτελέσματα

Η Ελλάδα αποτελεί πεδίο εκδήλωσης τσουνάμι (από το μακρινό παρελθόν), με περισσότερο από 160 γεγονότα να έχουν καταγραφεί τα τελευταία 3.500 χρόνια. Λόγω των μεταβολών ως προς τον τρόπο και την πυκνότητα αξιοποίησης, χρήσης και κατοίκησης της παράκτιας ζώνης στην Ελλάδα, οι μελλοντικές ενδεχόμενες συνέπειες κυμάτων τσουνάμι αναμένεται να είναι ισχυρότερες σε σχέση με το παρελθόν. Ο μελλοντικός χωροταξικός σχεδιασμός και πιο συγκεκριμένα ο παράκτιος σχεδιασμός, πρέπει οπωσδήποτε να λάβει υπ' όψην του τα ενδεχόμενα εκδήλωσης τσουνάμι και τις συνέπειές τους στον παράκτιο χώρο [Papathoma and Howes, 2003] (20).

Ο μικρός αριθμός καταστροφών και θυμάτων από τσουνάμι στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα έχουν κάνει τους ανθρώπους να αγνοήσουν τις καταστρεπτικές συνέπειες που μπορούν να προκαλέσουν. Οι ιστορικές καταστροφές που αναφέρθηκαν παραπάνω δείχνουν όμως τον επικείμενο κίνδυνο που εδρεύει. Σήμερα η δημιουργία ενός τσουνάμι στον ελλαδικό χώρο θα μπορούσε να προκαλέσει πολύ περισσότερους θανάτους λαμβάνοντας υπόψην μας και την παράκτια ξέφρενη και μη ορθή δόμηση κατοικιών και τουριστικών συγκροτημάτων των παράκτιων περιοχών.

Εάν ληφθεί υπ' όψην η σύνθετη μορφολογία των ελληνικών ακτών καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα προστασίας από ενδεχόμενο τσουνάμι είναι πολύ πιο σύνθετο από την απλή εγκατάσταση σταθμών έγκυρης προειδοποίησης στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος, διότι ενώ ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να προσφέρει προστασία από ένα ενδεχόμενο τσουνάμι μεγάλου μεγέθους το οποίο θα πλήξει την Ανατολική Μεσόγειο, δεν μπορεί να παρέχει προστασία από τα συνήθη τοπικού χαρακτήρα τσουνάμι. Η ουσιαστική αντιμετώπιση του κινδύνου των τσουνάμι επιβάλλει τη διεξαγωγή συγκεκριμένων μελετών ανά περιοχή ενδιαφέροντος. Οποιαδήποτε άλλη βεβαιωμένη και πρόχειρη λύση θα αποτελέσει ημίμετρο και θα αυξήσει μακροπρόθεσμα το κόστος αντιμετώπισης ενός δυνητικά μεγάλου κινδύνου [Ferentinos, 2005] (21).

Όλες οι αναφορές και τα ιστορικά στοιχεία μας δείχνουν ότι πολύ ισχυροί σεισμοί και μεγάλα τσουνάμι είναι αρκετά συχνό φαινόμενο τελικά στο ελληνικό χώρο. Μέτρα και ενημέρωση που είναι πολύ συχνά σε χώρες με τέτοιους κινδύνους είναι εντελώς ανύπαρκτα στη χώρα μας. Πρέπει η πολιτεία σύντομα να μεριμνήσει για αυτά γιατί αλλιώς αργά η γρήγορα η χώρα μπορεί να θρηνησει πολλά θύματα από μια καταστροφή ακόμα και τεραστίου μεγέθους.

Κεφάλαιο 2 : GIS και τσουνάμι

2.1. Τι είναι τα GIS

G.I.S (Geographical Informations Systems) ή Γ.Σ.Π (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ή Σύστημα Πληροφοριών Γης Σ.Π.Γ): είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης πληροφοριών σχετικών με ζητήματα γεωγραφικής φύσης. Ο όρος ‘ολοκληρωμένος’ σημαίνει ότι το Γ.Σ.Π αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως ένα άθροισμα μηχανημάτων και προγραμμάτων, αλλά ως μία νέα, διαφορετική τεχνολογία. Ένας επιτυχημένος επίσης ορισμός δόθηκε από τον Carter (1989) και σύμφωνα με αυτόν Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών είναι ‘‘όλα εκείνα τα πληροφοριακά συστήματα τα οποία εστιάζουν σε χωρικά ενδιαφέροντα και φαινόμενα σε κλίμακες από όλη τη γη μέχρι τη μοναδιαία ιδιοκτησία’’ (Land Parcel).

Επίσης Σύστημα Πληροφοριών Γης είναι ένα εργαλείο για λήψη αποφάσεων νομικής, διοικητικής κοινωνικής και οικονομικής υφής και ένα όργανο την ανάπτυξη και το σχεδιασμό, το οποίο αποτελείται από μία Βάση Δεδομένων που περιέχει για μία έκταση στοιχεία προσδιορισμένα στο χώρο και τα οποία σχετίζονται με τη γη και από την άλλη (αποτελείται) από διαδικασίες και τεχνικές για τη συστηματική συλλογή, ενημέρωση, επεξεργασία και διανομή των στοιχείων. Η Βάση ενός Σ.Π.Γ είναι ένα ενιαίο σύστημα (γεωγραφικής) αναφοράς, το οποίο επίσης διευκολύνει τη σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους καθώς και με άλλα συστήματα που περιέχουν στοιχεία για τη ‘γη’.

Ο όρος Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αναφέρεται σε κάθε σύστημα Η/Υ που έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται γεωγραφικά δεδομένα. Δεν περιλαμβάνει μόνο λογισμικό και υλικό αλλά και ειδικές συσκευές για εισαγωγή και δημιουργία χαρτών, καθώς και τα συστήματα επικοινωνιών που απαιτούνται για να συνδέσουν τα διάφορα συστατικά από τα οποία αποτελούνται.

Σε σύγκριση με τους απλούς χάρτες, ένα σύστημα GIS έχει το πλεονέκτημα ότι η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται χωριστά από την αναπαράστασή τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα ίδια δεδομένα να μπορούν να αναπαρασταθούν με διαφορετικούς τρόπους. Π.χ. μπορούμε να μεγεθύνουμε τον (ψηφιακό πλέον) χάρτη, να εμφανίσουμε συγκεκριμένες μόνο περιοχές, να κάνουμε υπολογισμούς αποστάσεων μεταξύ τοποθεσιών, να δημιουργήσουμε πίνακες που να δείχνουν τα διάφορα χαρακτηριστικά του χάρτη, να υπερθέσουμε επιπλέον πληροφορία πάνω στο χάρτη, ακόμα και να αναζητήσουμε ποιές είναι οι καλύτερες τοποθεσίες για να ιδρύσουμε τα επόμενα καταστήματά μας. Επιπλέον ένα σύστημα GIS έχει όλα εκείνα τα πλεονεκτήματα από τη χρήση των Η/Υ όπως, διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων εύκολα και γρήγορα κλπ.

Όλα τα δεδομένα σε ένα σύστημα GIS είναι γεωκαταχωρημένα, δηλ. συνδεδεμένα με μια συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία της επιφάνειας της γης μέσω ενός συστήματος συντεταγμένων. Ένα από τα πιο συνηθισμένα συστήματα γεωγραφικών συντεταγμένων είναι αυτό του γεωγραφικού μήκους και γεωγραφικού πλάτους. Σ' αυτό το σύστημα

συντεταγμένων, κάθε τοποθεσία προσδιορίζεται σχετικά με τον ισημερινό και τη γραμμή μηδενικού γεωγραφικού μήκους που περνά από το αστεροσκοπείο Greenwich της Αγγλίας. Υπάρχουν πολλά άλλα γεωγραφικά συστήματα συντεταγμένων, και κάθε GIS σύστημα θα πρέπει να μπορεί να μετατρέπει τις συντεταγμένες από το ένα σύστημα στο άλλο.

Η χωρική πληροφορία αναπαρίσταται με δυο τρόπους:

- ως διανυσματικά δεδομένα με τη μορφή σημείων, γραμμών και πολυγώνων,
- ως δικτυωτά (raster) δεδομένα, οργανωμένα συστηματικά σε κελιά (όπως π.χ. μια ψηφιακή εικόνα).

2.1.1. Περιγραφή των GIS

Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα GIS περιλαμβάνει:

- Τεχνικές για εισαγωγή γεωγραφικής πληροφορίας σε ηλεκτρονική μορφή, δηλ. μετατροπή της σε ψηφιακή μορφή,
- Τεχνικές για αποθήκευση αυτής της (μεγάλης σε όγκο) πληροφορίας σε συμπίεσμένη μορφή σε ψηφιακά αποθηκευτικά μέσα,
- Μεθόδους αυτοματοποιημένης ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων, αναζήτηση προτύπων, συνδυασμό διαφορετικών ειδών δεδομένων, δυνατότητα μετρήσεων, εύρεση των συντομότερων διαδρομών και πολλά άλλα,
- Μεθόδους πρόβλεψης των αποτελεσμάτων πιθανών σεναρίων, όπως π.χ. της επίδρασης της αλλαγής του κλίματος στη βλάστηση,
- Τεχνικές αναπαράστασης των δεδομένων σε μορφή χαρτών, εικόνων κλπ.
- Δυνατότητες για έξοδο των αποτελεσμάτων σε μορφή αριθμών και πινάκων.

Ένα σύστημα GIS επιτρέπει πράξεις πάνω σε χωρικά δεδομένα, δηλ. χρησιμοποιώντας γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Παράδειγμα μιας τέτοιας πράξης είναι: «Ποιες πόλεις βρίσκονται λιγότερο από 1000 χλμ. η μία από την άλλη;». Επιτρέπει δηλ. τον προσδιορισμό των χωρικών σχέσεων ανάμεσα στα χαρακτηριστικά (features) του χάρτη. Επιπλέον συνδέει χωρικά δεδομένα με γεωγραφική πληροφορία για ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του χάρτη. Η πληροφορία αποθηκεύεται ως ιδιότητες

(attributes) του γραφικά παρουσιαζόμενου χαρακτηριστικού σε μια Βάση Δεδομένων. Για κάθε χαρακτηριστικό αποθηκεύονται τρεις βασικές πληροφορίες στη βάση δεδομένων: η γεωγραφική πληροφορία, η προβολή (projection) πάνω στην οποία εκφράζεται η γεωγραφική πληροφορία και οι ιδιότητές του. Για κάθε χαρακτηριστικό του χάρτη αποθηκεύονται ακόμα στη βάση δεδομένων του GIS οι εξής πληροφορίες: τι χαρακτηριστικό είναι, που βρίσκεται και πως σχετίζεται με άλλα χαρακτηριστικά.

Πέραν της δυνατότητας σχεδίασης/χειρισμού χαρτών, ένα σύστημα GIS μπορεί να συνδέει εξωτερικές βάσεις δεδομένων με αντικείμενα που ανήκουν στο χάρτη. Αυτή η σύνδεση επιτρέπει σε όποιες αλλαγές γίνονται στις βάσεις δεδομένων να φαίνονται αμέσως στο χάρτη καθώς και να μπορούμε να κάνουμε ερωτήσεις στη βάση δεδομένων απευθείας από το χάρτη. Επίσης, διαθέτει ένα σύνολο από εργαλεία που μπορούν να διαχωρίσουν τα διάφορα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στις εξωτερικές βάσεις δεδομένων, εμφανίζοντας π.χ. αντικείμενα ή περιοχές που ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια με διαφορετικά χρώματα ή σχήματα.

Ένα σύνολο από χαρακτηριστικά (π.χ. όλο το οδικό δίκτυο) θεωρούνται ως ένα στρώμα (layer). Στην πραγματικότητα οι ψηφιακοί χάρτες δεν είναι τίποτα άλλο από μια συλλογή από στρώματα. Φανταστείτε αυτά τα στρώματα ως διαφάνειες όπου κάθε στρώμα περιέχει ένα διαφορετικό μέρος του χάρτη. Τα στρώματα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και μας επιτρέπουν να δούμε όλες τις όψεις του χάρτη την ίδια χρονική στιγμή. Π.χ. ένα στρώμα θα μπορούσε να περιέχει τα σύνορα των χωρών της γης, ένα άλλο στρώμα να περιέχει σύμβολα που να αναπαριστούν τις πρωτεύουσες, ένα τρίτο στρώμα μπορεί να περιέχει τις εθνικές οδούς κλπ. Τοποθετώντας αυτές τις διαφάνειες τη μια πάνω στην άλλη δημιουργούμε έναν πλήρη χάρτη. Το GIS σύστημα συνδυάζει διάφορα στρώματα για να απαντήσει σε συγκεκριμένες χωρικές ερωτήσεις. Χαρακτηριστικά που σχετίζονται μεταξύ τους, όπως π.χ. ποτάμια και κανάλια, θα μπορούν να εμφανίζονται σε ένα στρώμα, ενώ υποδομή, όπως δρόμοι, να εμφανίζονται σε άλλο στρώμα. Όταν κάποια χαρακτηριστικά δεν ενδιαφέρουν το χρήστη σε κάποια χρονική στιγμή, θα μπορεί να τ' αποκρύπτει εμφανίζοντας μόνο την πληροφορία που τον ενδιαφέρει.

Όπως είπαμε, οι χάρτες σ' ένα GIS σύστημα αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή σε μια βάση δεδομένων. Σ' αυτή τη βάση δεδομένων αποθηκεύονται δυο είδη πληροφορίας (ή αλλιώς, η πληροφορία που αποθηκεύεται σ' ένα GIS έχει δυο ιδιότητες - χωρικές και περιγραφικές):

- χωρική πληροφορία που περιγράφει την τοποθεσία και το σχήμα των γεωγραφικών χαρακτηριστικών και τις χωρικές σχέσεις τους με άλλα χαρακτηριστικά και
- περιγραφική πληροφορία που αφορά τα χαρακτηριστικά.

Η χωρική πληροφορία αποθηκεύεται με τη μορφή τριών βασικών χαρακτηριστικών: του σημείου, της γραμμής και του πολυγώνου. Η περιγραφική πληροφορία εμφανίζεται με τη μορφή συμβόλων και ετικετών πάνω στο χάρτη. Η δύναμη του συστήματος βασίζεται στη δυνατότητα που έχει να συνδυάζει αυτά τα δυο είδη πληροφορίας.

Συνοψίζοντας έως εδώ, ένα χαρακτηριστικό (feature) του χάρτη αποτελείται από ιδιότητες (attributes). Ένα GIS αποθηκεύει τα χαρακτηριστικά σε πίνακες, έτσι ώστε κάθε γραμμή του πίνακα να αποτελεί ένα χαρακτηριστικό του χάρτη, και κάθε στήλη μια ιδιότητα αυτού του χαρακτηριστικού. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν τις ίδιες ιδιότητες και επομένως ο πίνακας αποτελεί ένα στρώμα (layer) καθώς είναι ένα σύνολο από ίδια χαρακτηριστικά. Το σύνολο όλων αυτών των πινάκων (στρωμάτων), από τα οποία αποτελείται ο χάρτης, αποθηκεύεται στην GIS Βάση Δεδομένων.

Όποιος έχει δουλέψει με βάση δεδομένων θα είναι οικείος με την ιδέα της *εγγραφής*. Μια εγγραφή είναι ένα σύνολο από στήλες που περιέχουν σχετική πληροφορία. Π.χ., μια βάση δεδομένων πελατών θα περιέχει μια εγγραφή για κάθε πελάτη και θα περιέχει στήλες για το όνομα, τη διεύθυνση κλπ. του πελάτη. Ένα χαρακτηριστικό είναι απλά μια εγγραφή που συνδυάζει δεδομένα σε μορφή πίνακα και γεωγραφική πληροφορία. Κάθε εγγραφή περιλαμβάνει αρκετές στήλες με δεδομένα καθώς και μια αναφορά σε γεωμετρική πληροφορία που περιγράφει το σχήμα και την τοποθεσία κάθε χαρακτηριστικού. Τα δεδομένα σε μορφή πίνακα ονομάζονται *ιδιότητες* και τα γεωμετρικά δεδομένα *γεωμετρία*. Αυτοί οι δυο τύποι δεδομένων αποτελούν το χαρακτηριστικό.

Μία άλλη σημαντική έννοια είναι αυτή της τοπολογίας. *Τοπολογία* ονομάζεται η μαθηματική διαδικασία βάση της οποίας ορίζονται χωρικές σχέσεις. Προσδιορίζονται δηλ. οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων χαρακτηριστικών. Τρεις τοπολογικές έννοιες είναι: ο σύνδεσμος (κόμβος), ο ορισμός της περιοχής (το πολύγωνο) και η γειτνίαση.

Τα *θέματα (themes)* μας επιτρέπουν να αλλάξουμε προγραμματιστικά την εμφάνιση ορισμένων ή όλων των χαρακτηριστικών ενός στρώματος βασιζόμενοι σε συγκεκριμένα κριτήρια. Πρότυπα και τάσεις που είναι σχεδόν αδύνατο να ανιχνευθούν σε λίστες δεδομένων αποκαλύπτονται ξεκάθαρα όταν χρησιμοποιείται θεματική σκίαση για αναπαράστασή τους στο χάρτη. Ένας χάρτης σκιάζεται θεματικά χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα στρώμα. Το πιο κοινό παράδειγμα θεματικού χάρτη είναι ο χάρτης καιρού. Οι κόκκινες περιοχές δηλώνουν ζέστη, οι μπλε κρύο. Οι θεματικοί χάρτες αναπαριστούν τα δεδομένα με χρωματικές αποχρώσεις, πρότυπα, σύμβολα ή γεμίσματα και μπορεί κάποιος να δημιουργήσει διαφορετικούς θεματικούς χάρτες με αυτά τα αντικείμενα βασιζόμενος στα δεδομένα του.

Η αναζήτηση, τέλος, είναι μια από τις πιο σημαντικές δυνατότητες ενός GIS. Επιτρέπει την ανάκτηση συγκεκριμένων δεδομένων βασισμένη σε γεωγραφική πληροφορία.

Ένα GIS σύστημα μπορεί να απαντήσει στους παρακάτω τύπους ερωτήσεων:

- Με βάση την *τοποθεσία*, δηλ. τι βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία;
- Με βάση μια *συνθήκη*, δηλ. η εύρεση μιας τοποθεσίας που ικανοποιεί συγκεκριμένες συνθήκες,

- Με βάση κάποιες *τάσεις*, δηλ. τι άλλαξε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα;
- Με βάση κάποια *πρότυπα* (patterns) π.χ. χρονική καθυστέρηση όταν κυριαρχούν συγκεκριμένες εδαφικές συνθήκες με βάση κάποια *μοντελοποίηση*, δηλ. «τι θα συνέβαινε εάν» ερωτήσεις.

2.1.2. Συστήματα συντεταγμένων και γεωαναφορές

Προτού ανόμοια γεωγραφικά δεδομένα χρησιμοποιηθούν σε ένα GIS, θα πρέπει να αναφερθούν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Υπάρχουν πολλά συστήματα γεωαναφορών που περιγράφουν τον πραγματικό κόσμο με διαφορετικούς τρόπους και με διαφορετική ακρίβεια. Ως *γεωαναφορά* (georegistration) ορίζεται η τοποθέτηση των αντικειμένων στον δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο. Υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι γεωαναφοράς:

- Τα συνεχή συστήματα γεωαναφοράς
- Τα διακριτά συστήματα γεωαναφοράς.

Στα συνεχή συστήματα γεωαναφοράς γίνεται συνεχής μέτρηση της θέσης των φαινομένων σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς χωρίς απότομες αλλαγές ή διακοπές. Τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από την *ανάλυσή* τους (resolution) και την *ακρίβειά* τους (precision). Τα συνεχή συστήματα γεωαναφοράς χωρίζονται με τη σειρά τους σε *άμεσα* και *σχετικά*. Τα άμεσα περιλαμβάνουν:

- Τα συστήματα συντεταγμένων στην καμπύλη επιφάνεια της γης
- Τις γεωκεντρικές συντεταγμένες
- Τις ορθογώνιες συντεταγμένες

Τα σχετικά περιλαμβάνουν:

- Πολικές συντεταγμένες,
- Οριζόντιες αποστάσεις
- Μετρήσεις κατά μήκος οδικών δικτύων

Βασικές έννοιες των άμεσων συστημάτων γεωαναφοράς είναι:

- Το *χωροσταθμικό σημείο* (datum). Όπως γνωρίζουμε, η γη δεν είναι σφαιρική αλλά περισσότερο ελλειψοειδής. Διάφορα ελλειψοειδή έχουν προταθεί εξαρτώμενα από το με πόσο μεγάλη ακρίβεια περιγράφουν το μέγεθος της γης.

Ένα χωροσταθμικό σημείο είναι ένα μοντέλο (ελλειψοειδές) της γης που χρησιμοποιείται για γεωδαιτικούς υπολογισμούς. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο χωροσταθμικό σημείο σήμερα είναι το WGS84 (World Geodetic System 1984).

- Η *προβολή χάρτη* (projection). Τα διάφορα γεωαναφορικά δεδομένα μπορούν να αποτυπωθούν πάνω στο χάρτη μόνο όταν αναφερθούν στο επίπεδο και όχι στην καμπύλη επιφάνεια της γης. Διάφορες προβολές της σφαιρικής επιφάνειας της γης στο επίπεδο έχουν προταθεί και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: *κυλινδρικές* (π.χ. Mercator, UTM κ.ά.), *κωνικές* και *αξιμουθιακές* προβολές. Κάθε προβολικό σύστημα εισάγει λάθη στις αποστάσεις, το σχήμα των περιοχών κλπ.
- Το *σύστημα συντεταγμένων*. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της επιφάνειας της γης είναι το *γεωγραφικό μήκος* και το *γεωγραφικό πλάτος*. Σ' αυτό το σύστημα συντεταγμένων οι αποστάσεις θα πρέπει να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας σφαιρική γεωμετρία και την ακτίνα της γης. Πολλές χώρες έχουν εθνικά συστήματα συντεταγμένων που τους επιτρέπουν να περιγράφουν τις περιοχές με μονάδες μήκους σχετικά με ένα σημείο αναφοράς. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούν ορθογώνιες συντεταγμένες με μειονέκτημα την αναπόφευκτη εισαγωγή λάθους. Για να περιοριστεί το λάθος τα συστήματα αυτά περιορίζονται σε μικρές περιοχές. Για μεγαλύτερες περιοχές πολλά τέτοια συστήματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετατοπισμένα το ένα σε σχέση με τα άλλα. Πολλά συστήματα GIS προσφέρουν δυνατότητες μετατροπής από ένα σύστημα συντεταγμένων σε άλλο, βασισμένα σε κοινά σημεία στα δυο συστήματα. Το πιο γνωστό σύστημα συντεταγμένων είναι το UTM (Universal Transverse Mercator Grid).
- Τέλος, το *γεωειδές*, η επιφάνεια που περνά από τα σημεία της γης με μηδενικό υψόμετρο (το μέσο επίπεδο θαλάσσης). Το γεωειδές επηρεάζεται από τη μάζα της γης και επομένως ακολουθεί τις υψομετρικές καμπύλες.

2.1.3. Εφαρμογές

Τα συστήματα GIS έχουν μια ευρεία περιοχή εφαρμογών. Τυπικές εφαρμογές τους είναι στη διαχείριση του περιβάλλοντος και των πόρων του, στο σχεδιασμό και ανάπτυξη νέας υποδομής των πόλεων, δρόμων κλπ, στις θαλάσσιες και επίγειες μεταφορές, στην ασφάλεια στη θάλασσα, στις βιομηχανίες τηλεπικοινωνιών, ύδατος, ηλεκτρικού όπου η έμφαση ρίχνεται στη συντήρηση και λειτουργία των δικτύων τους, ακόμα και για φυσικές καταστροφές όπως θα δούμε παρακάτω.

Τα συστήματα GIS είναι μια ενεργή περιοχή της ψηφιακής τεχνολογίας με ετήσια ανάπτυξη 20% και πωλήσεις της τάξης των \$500 εκατομμυρίων. Η ικανότητα των συστημάτων αυτών να αποθηκεύουν σχέσεις ανάμεσα στα χαρακτηριστικά, πέρα από τα ίδια τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ισχύος και ευελιξίας αυτής της τεχνολογίας [Γιάννη Ν. Κωστάρα] (43).

2.1.4. 3D (τρισδιάστατα) GIS

Τα σύγχρονα GIS έχουν ανάγκη από νέες τεχνικές απεικόνισης των χωρικών δεδομένων και έτσι πλέον σύγχρονα software GIS έχουν αναπτυχθεί από τους κατασκευαστές. Αυτά τα GIS νέας γενιάς ονομάζονται 3D (τρισδιάστατα) GIS. Οι νέες αυτές τεχνολογίες μπορούν να μας βοηθήσουν σημαντικά στην βελτίωση της ζωής μας προσχεδιάζοντας και μελετώντας τεράστιες εγκαταστάσεις και κατασκευές όπως επίσης προβλέποντας κινδύνους και φυσικές καταστροφές που μπορεί να προκύψουν στην εκάστοτε περιοχή.

Περιορισμοί 2D (δισδιάστατων) GIS

Περιορισμοί λόγο της 2D φύσης των GIS και κυρίως στις επιστήμες έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία από τους Jones (1989), Raper and Kelk (1991), Rongxing Li (1994), Houlding (1994), Bonham-Carter (1996) και Wei Guo (1996). Οι περιορισμοί κυρίως έχουν να κάνουν με τη διαστατικότητα των δεδομένων

Ζούμε σε ένα 3D κόσμο. Οι γεωλόγοι και οι μηχανικοί από πολύ παλιά προσπάθησαν να “αναπαράγουν” τέτοιους τρισδιάστατους χώρους μέσα από σχέδια και ζωγραφιές. Πλέον η σύγχρονη τεχνολογία μας βοηθάει να ξεπεράσουμε όλα αυτά τα προβλήματα και να αναπαράγουμε ξανά τους περιορισμένους 2D χάρτες σε 3D μορφή με τη βοήθεια του 3D Modeling. Οι τρισδιάστατες απεικονίσεις του χώρου έχουν ξεπεράσει τα στατικά μοντέλα του παρελθόντος και οι χρήστες μπορούν πολύ εύκολα να μεταφερθούν και να αλλάξουν το σημείο προβολής τους. Κλάδοι όπως αυτοί της γεωλογίας (Carlson, 1987; Bak and Mill, 1989; Jones, 1989; Youngman, 1989; Raper and Kelk, 1991), υδρολογίας (Turner, 1989), πολιτικών μηχανικών (Petrie and Kennie, 1990), μηχανικών περιβάλλοντος (Smith and Paradis, 1989), αρχιτεκτονικής (Batten, 1989), αρχαιολογίας, μετεωρολογίας (Slingerland and Keen, 1990), μεταλλευτικών ερευνών (Sides 1992), 3D σχέδια πόλεων (Shibasaki et al., 1990; Shibasaki and Shaobo, 1992), έχουν πλέον κατανοήσει την σημασία και τα πλεονεκτήματα της χρήσης του 3D modeling για την διεκπεραίωση των εργασιών τους [A.Abdul-Rahman, M.Pilouk, 2007] (41).

Το CAD είναι ένα πολύ διαδεδομένο και δυνατό εργαλείο 3D modeling στους τομείς που έχουν να κάνουν με αυτοκινητοβιομηχανία, μηχανολογία, αερονautιλία, σχεδιασμό διαστημοπλοίων, σχεδιασμό βιομηχανιών και αρχιτεκτονική. Το CAD επικεντρώνεται κυρίως στις γεωμετρικές πτυχές του μοντέλου και στην απεικόνιση του.

Αν και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για χρήση του και στους τομείς της γεωλογίας η εφαρμογή του δεν ήταν και τόσο επιτυχημένη για τους εξής λόγους:

- Το CAD είναι ένα εργαλείο που επικεντρώνεται σε προβλήματα που έχουν να κάνουν με ανθρώπινες κατασκευές που διαθέτουν συγκεκριμένο σχήμα. Έτσι μια βασική αδυναμία του είναι η μη δυνατότητα επεξεργασίας πιο ‘συγκεχυμένων’ σχημάτων που συναντάμε στη φύση.

- Το CAD έχει την τάση να δημιουργεί και να επεξεργάζεται αντικείμενα 3D και 2D που έχουν προκαθορισμένες σχέσεις μεταξύ τους. Στις γεωλογικές επιστήμες αντιθέτως προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε <<μέρη>> της πραγματικότητας ξεχωριστά έτσι ώστε να απλοποιήσουμε πολύπλοκα συστήματα. Μην έχοντας αυτά τα εργαλεία το CAD χάνει την ικανότητα των διαφοροποιήσεων και των συσχετίσεων μεταξύ των δεδομένων.

Ένα εργαλείο GIS που θα ήταν ικανό να κάνει μια πλήρη 3D μοντελοποίηση-απεικόνιση θα ήταν η λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Δυστυχώς ακόμα δεν υπάρχει κάποιο τέτοιο εργαλείο διαθέσιμο στην αγορά που να ανταποκρίνεται πλήρως σε αυτό το ζητούμενο [A.Abdul-Rahman, M.Pilouk, 2007] (41).

Ένα βήμα πιο κοντά στη 3D μοντελοποίηση μέσω GIS είναι η τεχνολογία ``raster``, που ακόμα όμως δεν μπορεί να απεικονίσει πλήρως ένα 3D περιβάλλον σαν να ήταν πραγματικό.

Χρήσης 3D GIS

Οι Raper και Kelk (1991), Rongxing Li (1994), Förstner (1995), και Bonham-Carter (1996) έχουν προτείνει μερικές σημαντικές εφαρμογές των 3D GIS:

- Περιβαλλοντικές επιστήμες
- Περιβαλλοντική παρακολούθηση (environmental monitoring)
- Γεωλογικές αναλύσεις
- Επιστήμη πολιτικών μηχανικών
- Επιστήμες εξόρυξης
- Ωκεανογραφία
- Αρχιτεκτονική
- Πλοήγηση οχημάτων
- Αρχαιολογία
- Αστικός 3D σχεδιασμός

2.1.5. Οι λειτουργίες των GIS

Οποιοδήποτε GIS πρόγραμμα πρέπει να μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για τα γεω-χωρικά φαινόμενα. Οι κύριες λειτουργίες τους είναι:

- Σύλληψη
- Δόμηση
- Χειρισμός
- Ανάλυση
- Παρουσίαση

Σύλλληψη : Είναι η διαδικασία της εισόδου των πληροφοριών στο πρόγραμμα GIS. Για την συλλογή των δεδομένων αυτών έχουν αναπτυχτεί πολλές τεχνικές και συσκευές που η χρήση τους και ο σκοπός τους ποικίλλει.

Δόμηση : Είναι το πολύ σημαντικό στάδιο δημιουργίας των βάσεων δεδομένων που θα χρειαστούν για την απεικόνιση των πληροφοριών. Η λανθασμένη δόμηση μπορεί να επιφέρει αδυναμία του προγράμματος στην απεικόνιση της πληροφορίας.

Χειρισμός : Μεταξύ των πιο σημαντικών λειτουργιών του χειρισμού είναι οι λειτουργίες της “γενίκευσης” και του “μετασχηματισμού”. Η γενίκευση χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των χωρικών δεδομένων και ο μετασχηματισμός για την αντιστοίχιση των δεδομένων σε σχέση με την κλίμακα.

Ανάλυση : Είναι η καρδιά των GIS προγραμμάτων. Ασχολείται με τις μετρικές και τυπολογικές λειτουργίες της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα μερικές από τις λειτουργίες της ανάλυσης είναι η ανάλυση μιας περιοχής, γεωμετρικοί υπολογισμοί (όγκος , εμβαδό), οι επικαλύψεις (overlay) και η δημιουργία ζωνών.

Παρουσίαση : Σε αυτό το τελευταίο στάδιο των GIS έχουμε την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την επεξεργασία των των δεδομένων σε μορφές όπως χάρτες, γραφήματα, πίνακες, αναφορές. [Raper and Maguire, 1992].

Δυστυχώς ακόμα προγράμματα που θα μπορέσουν να κάνουν μια πραγματική απεικόνιση 3D δεν υπάρχουν, μιας και τα σημερινά προγράμματα έχουν καταφέρει να κάνουν κυρίως 2D και 2.5D απεικονίσεις (και κάποιες 3D κάτω από προϋποθέσεις).

2.1.6. Εμπορικά Διαθέσιμα 3D GIS προγράμματα

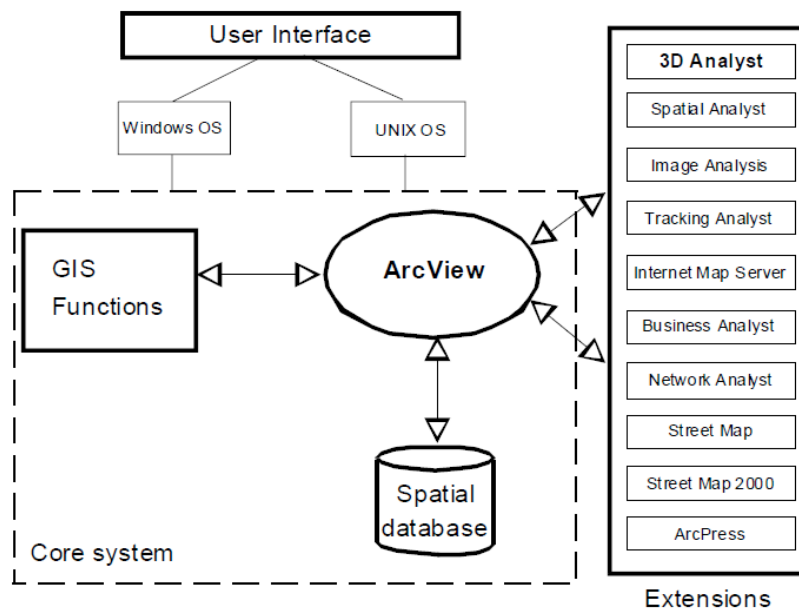
Στην αγορά υπάρχουν κάποια λίγα προγράμματα που έχουν την δυνατότητα να κάνουν τρισδιάστατες απεικονίσεις των γεωγραφικών πληροφοριών.

Τέτοια προγράμματα είναι τα εξής:

- 3D Analyst ArcGIS (Environmental System Research Institute or ESRI Inc.)
- Imagine VirtualGIS (ERDAS Inc.)
- GeoMedia Terrain (Intergraph Inc)
- PAMAP GIS Topographer
- Amira (Πρόγραμμα 3D scientific visualization- δεν είναι GIS)

2.1.7. ArcGIS 3D Analyst

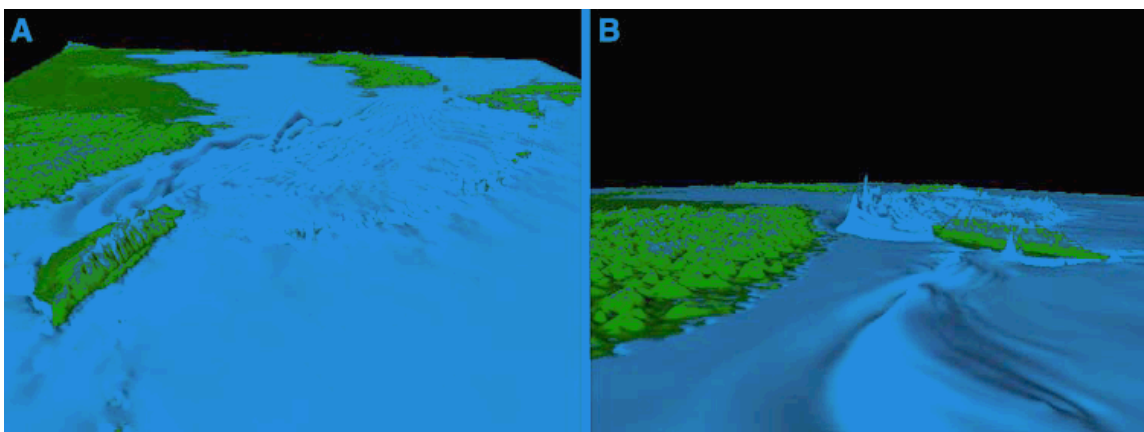
Το 3D Analyst είναι μια ξεχωριστή επέκταση του ArcGIS που το έχει και ως βάση του για τη λειτουργία του. Το 3D Analyst πρέπει να αγοραστεί ξεχωριστά από τις διάφορες εκδόσεις του ArcGIS [Εικ.28]. Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει εκτεταμένη χρήση του εν λόγω software για την δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης. Λεπτομερή περιγραφή του προγράμματος γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο [A.Abdul-Rahman, M.Pilouk, 2007] (41).



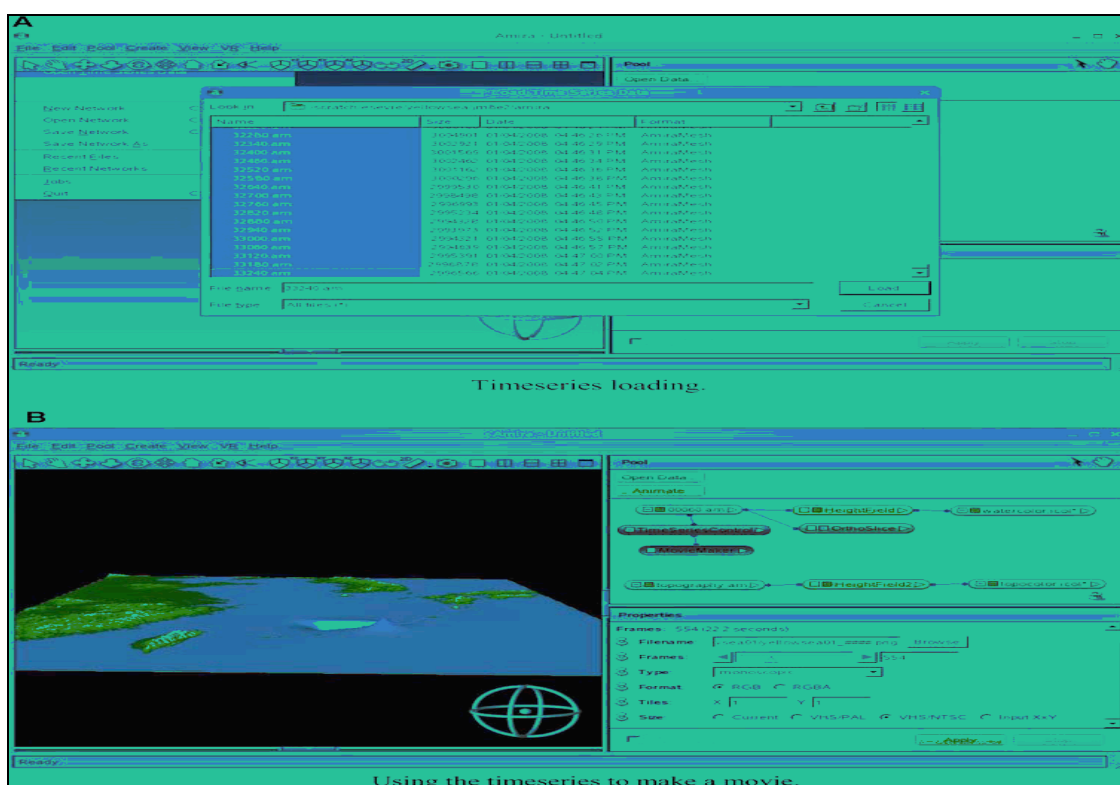
Εικ.28 Το 3D Analyst στη δομή του ArcView, A.Abdul-Rahman, M.Pilouk, 2007 (41).

2.1.8. Εφαρμογή του software οπτικοποίησης Amira σε τσουνάμι

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των προγραμμάτων αυτών έχει γίνει από τους Erik O. D. Sevre, Dave A. Yuen, Yingchun Liu όπου με τη χρήση του προγράμματος Amira δημιούργησαν μια πολύ ενδιαφέρουσα 3D απεικόνιση πραγματικών τσουνάμι [Εικ.29]. Μέσα από αυτή την απεικόνιση ο χρήστης είναι δυνατόν να μελετήσει με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια το φαινόμενο και να εξάγει πολλά συμπεράσματα για τα τσουνάμι.

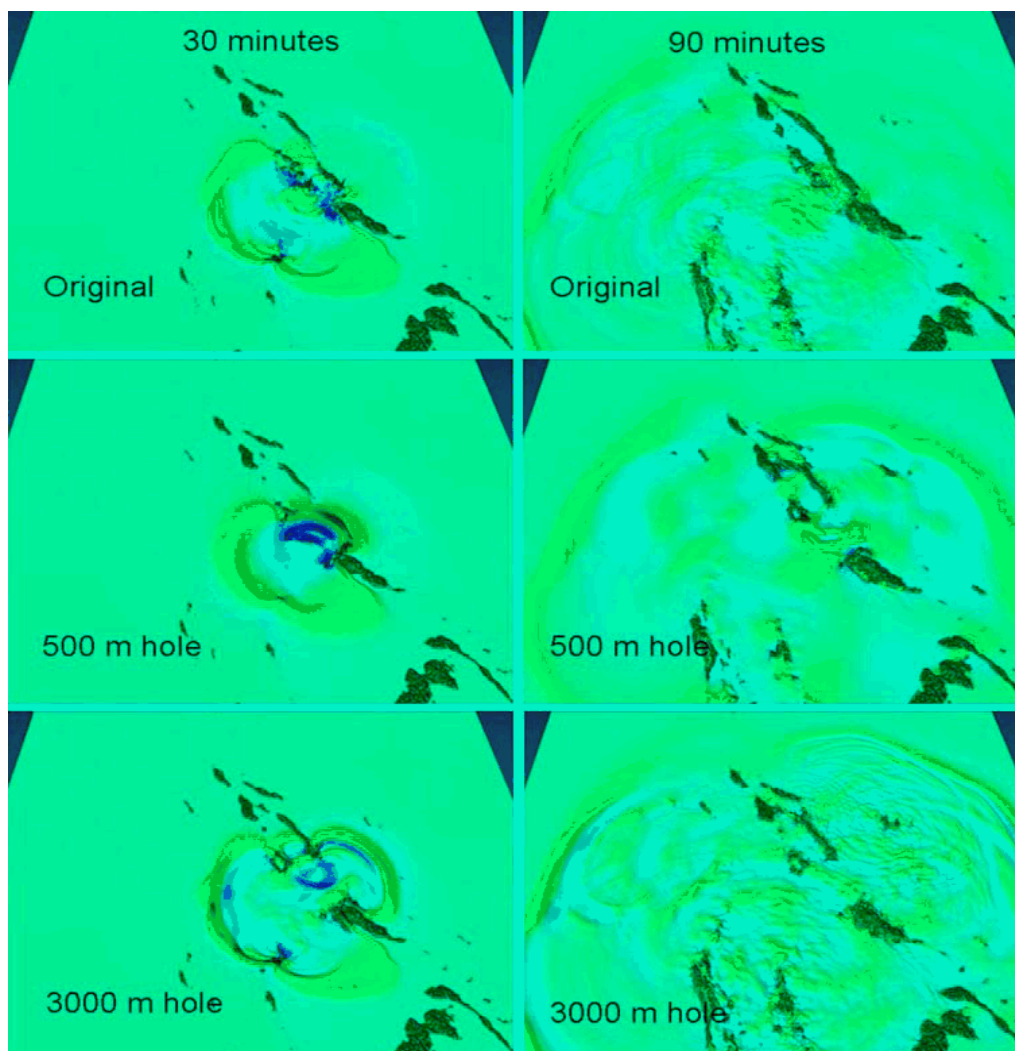


Εικ.29 Απεικόνιση του πουνάμι με τη χρήση του προγράμματος Amira από δυο διαφορετικές οπτικές γωνίες
[Erik O. D. Sevre, 2008] (35).



Εικ.30 Διαδικασία δημιουργίας οπτικοποίησης με το πρόγραμμα Amira [Erik O. D. Sevre, 2008] (35).

Η μελέτη του σεισμού της 1 Απριλίου 2007 κοντά στα νησιά του Σωλομώντα όπου και δημιουργήθηκε τσουνάμι έδωσε την δυνατότητα στους επιστήμονες να μελετήσουν μια θεωρία παρεμπόδισης της διάδοσης του τσουνάμι εξαιτίας της γεωγραφίας των νησιών. Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζοντας τη βαθυμετρία και τα υψομετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, δημιούργησαν μια "τρύπα" 500 μέτρα στο σημείο του επίκεντρου του σεισμού, μελετώντας έτσι κατά πόσο η ύπαρξη των νησιών εμπόδισε τη διάδοση του κύματος στο Ειρηνικό Ωκεανό. Μελετώντας πάλι το ίδιο τσουνάμι δημιούργησαν ακόμα μια τρύπα 3000 μέτρων στο ίδιο σημείο και κατέγραψαν τις διαφορές του κύματος [Εικ.31].



Εικ.31 Οπτικοποίηση τσουνάμι στα νησιά του Σωλομώντα στο πρόγραμμα Amira με μετασχηματισμό του πυθμένα [Erik O. D. Sevre, 2008] (35).

Τα αποτελέσματα της 3D οπτικής αυτής έρευνας έδειξαν ότι στην πραγματικότητα τα νησιά πράγματι εμπόδισαν σημαντικά τη καταστροφική εξάπλωση του φαινομένου στον Ειρηνικό. Στην περίπτωση της τρύπας των 500 μέτρων η οπτικοποίηση έδειξε ότι αν και η βαθυμετρία έχει αλλάξει τα νησιά επιδρούν ακόμα στη διάδοση του κύματος, ενώ στην περίπτωση των 3000 μέτρων το κύμα χάνει πολύ μικρό ποσοστό από την ενέργεια του και έτσι συνεχίζει προς τα νησιά της Χαβάης [Erik O. D. Sevre, 2008] (35).

Αποτελέσματα

Στο διάστημα διεξαγωγής της διπλωματικής αυτής εργασίας έγινε εκτενής μελέτη του προγράμματος Amira για την οπτικοποίηση του τσουνάμι, που είναι και το ο κεντρικός άξονας αυτής της εργασίας. Αδυναμίες του προγράμματος όπως η μη ικανότητα του να δεχτεί γεωαναφερόμενα δεδομένα και η αδυναμία του να δημιουργήσει ένα ρεαλιστικό

γραφικό περιβάλλον οδήγησαν στην αναζήτηση άλλων πιο κατάλληλων προγραμμάτων. Παρόλα αυτά το Amira είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για μια γρήγορη οπτικοποίηση των τσουνάμι με ένα πολύ απλό και εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Τέτοιες δυνατότητες μοντελοποίησης είναι πολύ χρήσιμες σε έκτακτες ανακοινώσεις για τσουνάμι, που ο χρόνος δράσης και ενημέρωσης είναι πολύ περιορισμένος.

Στην οπτικοποίηση που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία το περιθώριο χρόνου ήταν πολύ μεγαλύτερο και επιλέχτηκε να γίνει μια πιο “ολοκληρωμένη” και αληθοφανής οπτικοποίηση που σε σχέση με αυτές του Amira. Φυσικά αυτό δεν αναιρεί τις μεγάλες δυνατότητες και χρήσεις του εν λόγω προγράμματος και την σημασία που έχει η δημιουργία γρήγορης οπτικοποίησης.

2.2. Εφαρμογές GIS στα τσουνάμι

2.2.1. Δεδομένα δορυφόρων και GIS software χρήσεις σε τσουνάμι

Τα δεδομένα των δορυφόρων και οι εφαρμογές των GIS προγραμμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τρεις βασικούς σκοπούς όσον αναφορά στα τσουνάμι:

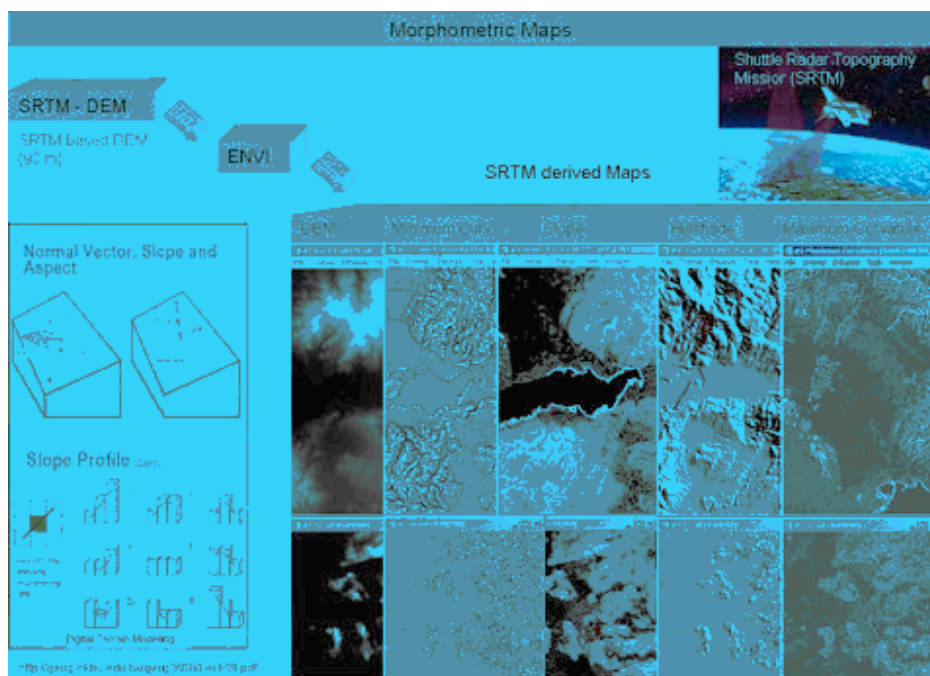
- Στη μείωση του κινδύνου που προκαλούν
- Στην επέμβαση σε περίπτωση καταστροφής από αυτά
- Στη φάση της ανάκαμψης μιας περιοχής μετά την επέλαση τους

Αξιολόγηση κινδύνων μέσω GIS (Φάση 1^η)

Μέσω των πολύ προηγμένων προγραμμάτων και εφαρμογών GIS, έχουμε πλέον τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε σύγχρονους ψηφιακούς χάρτες οι οποίοι μπορούν με ακρίβεια να επιδείξουν τις περιοχές που κινδυνεύουν με πλημμύρα από πιθανά τσουνάμι που ενδέχεται να δημιουργηθούν.

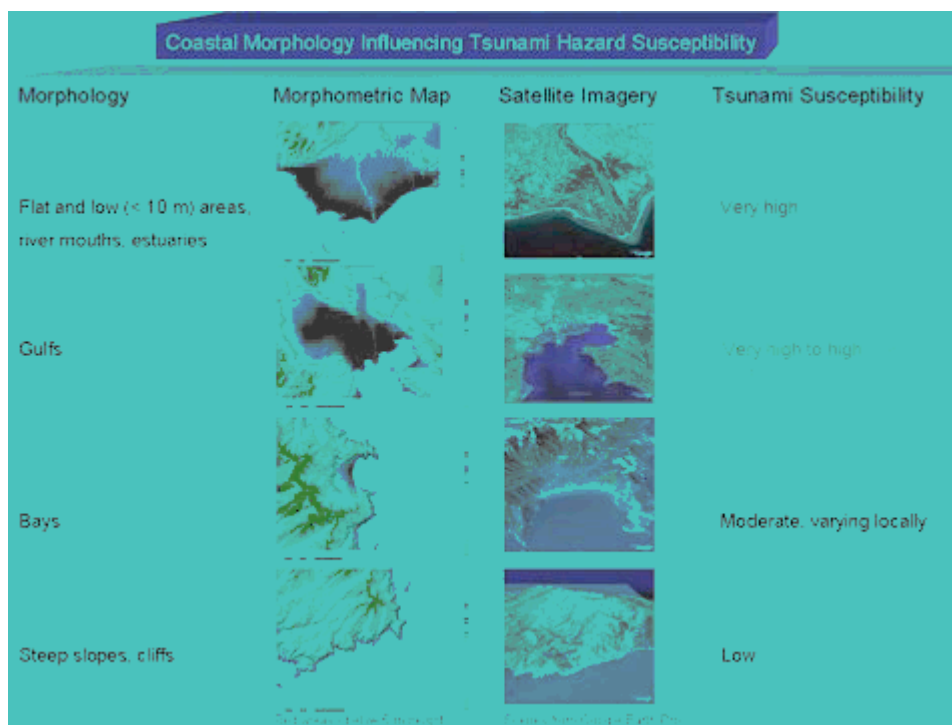
Για να γίνει όμως μια σωστή μοντελοποίηση αυτών των πολύπλοκων φαινομένων και των παρενεργειών τους κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας είναι πολύ σημαντικό να διαθέτουμε ακριβή και πραγματικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης. Τέτοια σημαντικά δεδομένα για παράδειγμα είναι το υψόμετρο και η κλίση του εδάφους που μπορούν να παρουσιαστούν από μοντέλα DEM (digital elevation models) [Εικ.32].

Η περιοχή του Αιγαίου θεωρείται ιδιαίτερα υψηλού κινδύνου για την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων όπως είναι τα τσουνάμι, λόγω της υψηλής σεισμικότητας και των στοιχείων εμφάνισής τους στο παρελθόν. Έτσι, για τη δημιουργία χαρτών πιθανού κινδύνου και πλημμύρας από τσουνάμι στο Αιγαίο χρειαζόμαστε στοιχεία που εξάγονται με μεθόδους τηλεπισκόπησης (με τη βοήθεια δορυφόρων), σεισμοτεκτονικά στοιχεία, τοπογραφικά στοιχεία, γεωλογικά στοιχεία όπως και ιστορικά γεγονότα από πηγές .

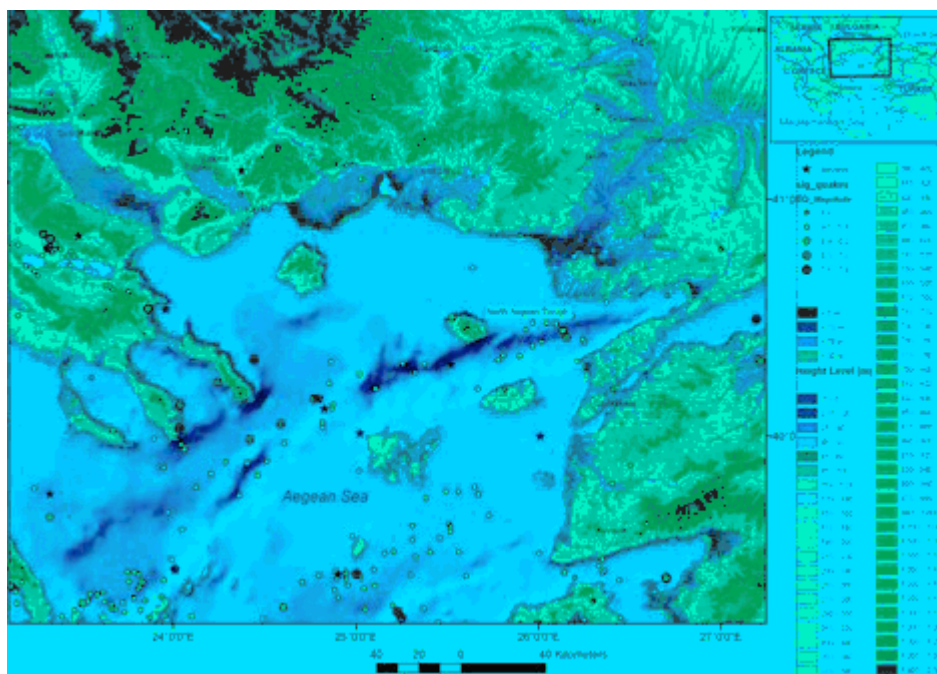


Εικ.32 Δημιουργία μορφομετρικού χάρτη από δεδομένα SRTM DEM μέσω περιβάλλοντος GIS. Η περιοχή απεικόνισης είναι η Σμύρνη στα παράλια της Μ.Ασίας, Αιγαίο [Barbara Theilen-Willige,2008] (13).

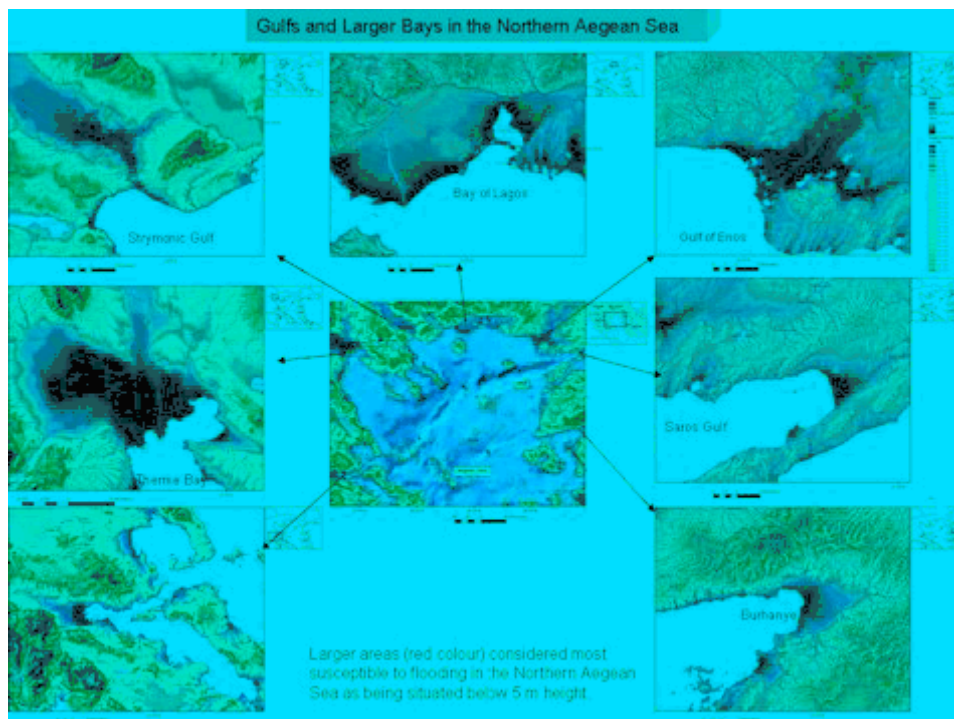
Περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο από 30m είναι πολύ πιθανό να παρουσιάσουν πλημμύρες μεγάλης έκτασης σε περίπτωση που χτυπηθούν από τσουνάμι. Είναι επίσης πολύ πιθανό μερικές από αυτές τις περιοχές να έχουν πληγεί και στο παρελθόν [Barbara Theilen-Willige,2008] [Εικ.33, Εικ.34, Εικ.35] (13).



Εικ.33 Η μορφολογία των ακτών επηρεάζει σημαντικά την πιθανότητα πλημμύρας σε περίπτωση τσουνάμι [Barbara Theilen-Willige,2008] (13).



Εικ.34 Στο χάρτη σημειώνονται τα σημεία στο Αιγαίο που έχει γίνει σεισμός στο παρελθόν. Η περιοχές στο βόρειο Αιγαίο που έχουν σημειωθεί με κόκκινο έχουν υψηλή πιθανότητα πλημμύρας σε περίπτωση που πληγούν από τσουνάμι ([Barbara Theilen-Willige,2008] (13).



Εικ.35 Περιοχές υψηλού κινδύνου από πλημμύρα σε περίπτωση τσουνάμι στο βόρειο Αιγαίο [Barbara Theilen-Willige,2008] (13).

Διαχείριση κρίσεων τσουνάμι μέσω GIS (Φάση 2^η)

Εφαρμογές στο σεισμό του 2004

Η χρήση και ο ρόλος των προγραμμάτων GIS στις φυσικές καταστροφές είναι πολύ μεγάλος. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της χρήσης τους στις τεράστιες καταστροφές που προκάλεσε το τσουνάμι του 2004 στον Ινδικό Ωκεανό. Τα GIS έπαιξαν τεράστιο ρόλο στην διαχείριση δεδομένων και σημαντικών πληροφοριών όπως:

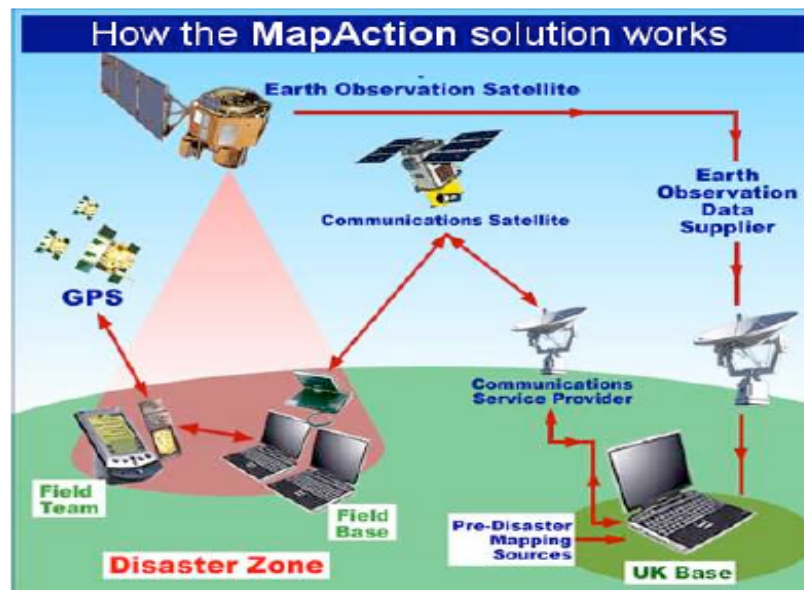
- που ακριβώς βρίσκονται τα νοσοκομεία, τα αεροδρόμια, τα σχολεία στις πληγείσες περιοχές και ποσά είναι.
- πόσο απέχουν τα αεροδρόμια από τα διάφορα σημεία που χρειάζονται άμεση υποστήριξη
- ποιά είναι τα καλύτερα σημεία για εγκατάσταση καταβλισμών των αστέγων και κέντρα συντονισμού των επιχειρήσεων
- ποιά είναι η έκταση της ζημιάς.

Σε αυτήν την πολύ σημαντική προσπάθεια πολλοί παγκόσμιοι και εθνικοί οργανισμοί προσέφεραν τις υπηρεσίες τους έτσι ώστε να είναι δυνατή η συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών για την αντιμετώπιση της κρίσης [ESRI, 2006] (14).

Εφαρμογές GIS σε φυσικές καταστροφές από οργανισμούς

MapAction

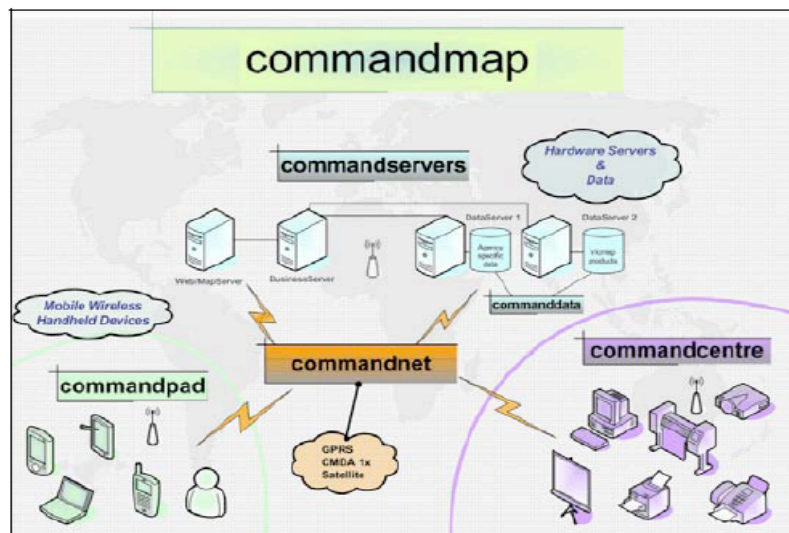
Το MapAction είναι μία μη κυβερνητική οργάνωση που με τη χρήση GIS συγκεντρώνει πολύτιμα δεδομένα αμέσως μετά από ένα καταστρεπτικό γεγονός και μέσω της κεντρικής του βάσης στη Αγγλία τα οργανώνει και τα χρησιμοποιεί για δημιουργία χαρτών, δεδομένων και άλλων αναγκών που προκύπτουν [Εικ.36].



Εικ.36 Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του MapAction [ESRI, 2006] (14)

Martel-Commandmap

Η Martel είναι μια οργάνωση με βάση της την Αυστραλία, που με τη χρήση προηγμένων προγραμμάτων GIS δημιούργησε το <<commandmap>>. Μέσω αυτού έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί τα GIS σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με την ασύρματη τεχνολογία. Έτσι η δυναμική ανταλλαγή δεδομένων από το πεδίο στο κέντρο αποφάσεων και αντιστρόφως γίνεται δυνατή, κάνοντας τη λήψη σημαντικών αποφάσεων ευκολότερη [Εικ.37].



Εικ.37 Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του Comandmap [ESRI, 2006] (14)

Σημαντικές παράμετροι για την ορθή λειτουργία των GIS σε φυσικές καταστροφές

Γενικά

Ακόμα και τα πιο προηγμένα προγράμματα GIS, σε εφαρμογές πεδίου και φυσικών καταστροφών όπως είναι τα τσουνάμι δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά άμα δεν έχουν τεθεί οι σωστές βάσεις. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για λήψη κάποιων καίριων παραμέτρων που εγγυώνται την ορθή λειτουργία του συστήματος.

Βάση δεδομένων

Μια καλά οργανωμένη βάση δεδομένων παίζει ζωτικό ρόλο στη διαχείριση μιας κρίσης. Ο χρόνος που έχει δαπανηθεί για τη δημιουργία μιας καλής βάσης δεδομένων στο παρελθόν μειώνει σημαντικά το χρόνο που χρειάζεται για να έρθει μια σωστική ομάδα σε επαφή με ανθρώπους που διατρέχουν κίνδυνο ή έχουν κάποια ανάγκη. Πολύτιμες πληροφορίες σε μορφή δεδομένων που πρέπει να έχουν προετοιμαστεί εκ των προτέρων είναι η καταγραφή:

- Μεταφορών
- Σύνορα
- Επικοινωνίες
- Ηλεκτρικό δίκτυο
- Εγκαταστάσεις ύδρευσης και δίκτυο ύδρευσης
- Εγκαταστάσεις φυσικού αερίου και πετρελαίου
- Τράπεζες
- Υπηρεσίες παροχής βοήθειας
- Κυβερνητικές εγκαταστάσεις

Στο τσουνάμι του 2004 όλα αυτά τα δεδομένα που προαναφέραμε δεν υπήρχαν ή δεν ήταν ακόμα έτοιμα προς χρήση. Επίσης η έλλειψη σωστής επικοινωνίας επιβράδυνε τις διαδικασίες και την άμεση λήψη αποφάσεων που θα οδηγούσε σε μια πιο γρήγορη σωστική επέμβαση

Πολύ σημαντικό ρόλο στο τσουνάμι του Ινδικού ωκεανού όμως έπαιξαν και οι εικόνες που τραβήχτηκαν από τους δορυφόρους που βρίσκονταν πάνω από τις περιοχές αυτές, οδηγώντας στη λήψη σημαντικών αποφάσεων, ενώ παράλληλα συνέβαλαν στην ενημέρωση για μέγεθος της καταστροφής σε παγκόσμιο επίπεδο.

Συντονισμός

Ο σωστός συντονισμός είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα σε επιχειρήσεις επέμβασης-διάσωσης και μπορεί να δώσει λύσεις σε πολλά προβλήματα μέσα από την χρήση των GIS, ακόμα και σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Στο τσουνάμι του 2004 ένα πρόβλημα σε σχέση με το συντονισμό των επιχειρήσεων που πρόεκυψε ήταν ο <<διπλασιασμός>> των δεδομένων. Πολλές ομάδες διάσωσης προσπαθούσαν να δημιουργήσουν τα ίδια ακριβώς δεδομένα μέσω προγραμμάτων GIS (π.χ έκταση της καταστροφής) σχεδόν ταυτόχρονα, χάνοντας πολύτιμο χρόνο. Εάν όμως είχε γίνει ομαδική χρήση των δεδομένων αυτών μέσω τεχνολογιών επικοινωνίας θα υπήρχε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και μπορεί να είχαν σωθεί περισσότερες ανθρώπινες ζωές.

Σε μια σωστή και πιο οργανωμένη διαχείριση της κρίσης θα μπορούσε σε διεθνές επίπεδο να υπάρξει συνεργασία έτσι ώστε κάθε υπηρεσία να ασχολείται με μια μόνο εργασία και να ενημερώνει άμεσα τις άλλες για τα δεδομένα της.

Μια επιτυχημένη εφαρμογή αυτού του μοντέλου των GIS έλαβε χώρα στη Σρι Λάνκα όταν το "international Water Management Institute"(IWMI) και το πανεπιστήμιο του "Cornell" δημοσίευσαν σημαντικά δεδομένα online στα οποία είχε πρόσβαση ο καθένας. Χρησιμοποιώντας σύγχρονες διακρατικές τεχνολογίες GIS ήταν σε θέση παρουσιάσουν μέσω διαδικτύου τα δεδομένα του τσουνάμι λίγες ώρες μετά το συμβάν.

Η τεχνολογία των GIS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους για συντονισμό ομάδων σε τέτοιες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Χαρακτηριστικά μπορούμε να πούμε ότι μέσω των GIS είναι δυνατή η :

- Αποστολή οχημάτων ανάγκης (πυροσβεστικά οχήματα, νοσοκομειακά οχήματα κτλ) και η παρακολούθησή τους σε πραγματικό χρόνο.
- Αποστολή ομάδων διάσωσης.
- Υπολογισμός των καταστροφών.

Σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση του συντονισμού αυτού παίζουν το διαδίκτυο, οι δορυφορικές συνδέσεις, τα GIS software, τα GPS, οι φορητοί υπολογιστές και τα φορητά GIS [ESRI, 2006] (14).

Σωστή εφαρμογή των GIS σε φυσική καταστροφή

Στην Οκλαχόμα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής το τμήμα GIS και πληροφορικής έκανε μια πρωτότυπη εφαρμογή σε θέματα δράσης μετά από φυσικές καταστροφές. Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν το Internet, το ArcGIS, το ArcSDE και το Microsoft® .NET.

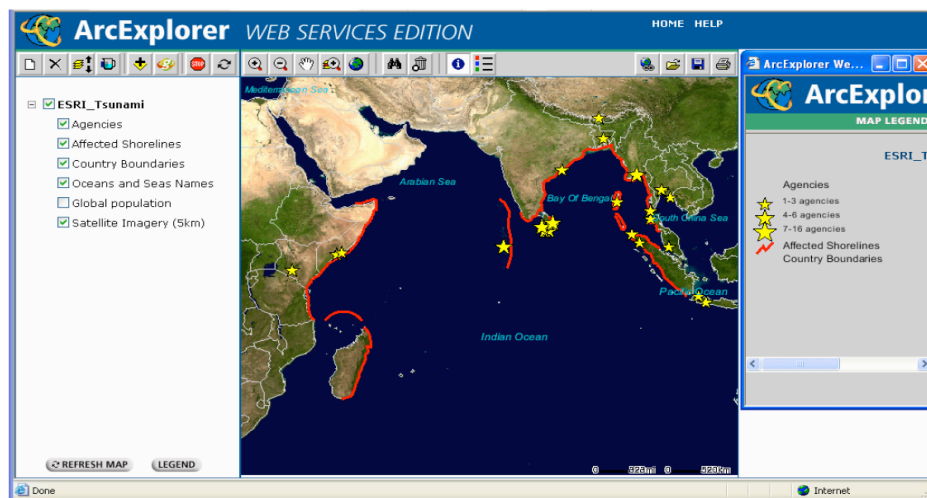
Στην περιοχή που είναι γνωστή με το όνομα 'Tornado Alley' στην Οκλαχόμα η συχνότητα και η ένταση των ανεμοστρόβιλων είναι χαρακτηριστική και σε αυτήν την περιοχή οι επιστήμονες αποφάσισαν να δοκιμάσουν τις δυνατότητες των GIS. Έτσι, μετά το πέρας ενός ανεμοστρόβιλου, το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για να εντοπιστούν οι άνθρωποι που κρύβονταν στα προσωπικά τους καταφύγια, τα οποία βρίσκονταν κάτω από συντρίμια που είχε μεταφέρει ο ανεμοστρόβιλος. Έτσι μέσω του διαδικτύου και της ανταπόκρισης των κατοίκων στο σχέδιο, είχε γίνει από πριν μια εκτενής βάση δεδομένων 3000 θέσεων με τις ακριβείς συντεταγμένες των θέσεων της κάθε οικογένειας. Το αποτέλεσμα φάνηκε μετά το χτύπημα του τυφώνα όπου τα συνεργεία διάσωσης κατάφεραν να ανασύρουν τις οικογένειες που ήταν εγκλωβισμένες σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με άλλες φορές [Meldrum, S. 2004. "Shelter from the Storm." ArcUser, January–March 2004. 16–17] (22).

Παραδείγματα εφαρμογών μέσω ArcGIS

Παράδειγμα ArcExplorer

Δεδομένα που συγκεντρώθηκαν κατά τις περιόδους διάσωσης από γεγονότα φυσικών καταστροφών οργανώθηκαν σε χάρτες με χρήση GIS έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η παρακολούθηση τους.

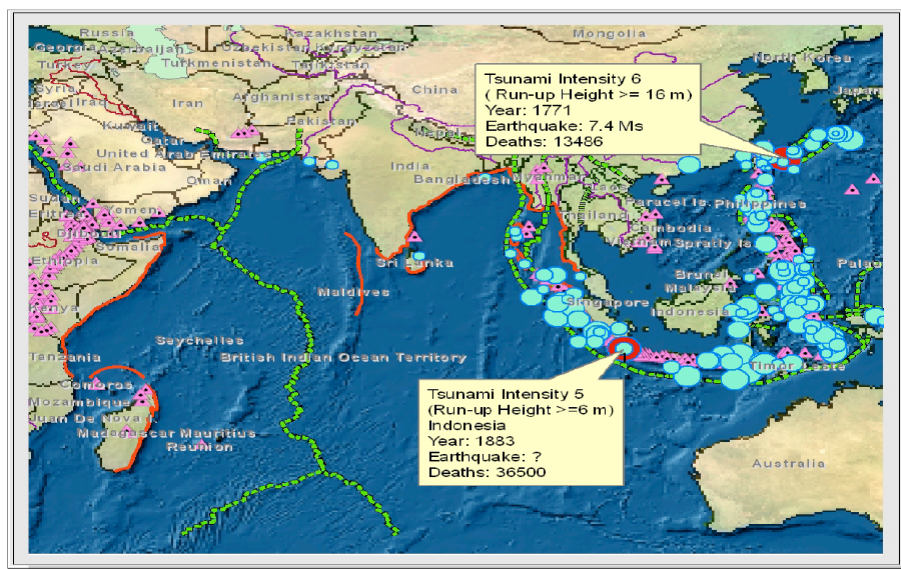
Στην παρακάτω εικόνα [Εικ.38] φαίνονται τα στοιχεία 21 μη κυβερνητικών οργανισμών που οργανώθηκαν σε ένα διαδραστικό περιβάλλον που πληροφορεί άμεσα το χρήστη για αυτά (ArcExplorer--ESRI).



Εικ.38 Δεδομένα και πληροφορίες για πληθώρα φυσικών καταστροφών σε διακρατικό περιβάλλον GIS [ESRI, 2006] (14).

Εφαρμογές GIS με δεδομένα από το διαδίκτυο

Ο παρακάτω διακρατικός χάρτης έχει βασιστεί σε δεδομένα τα οποία βρέθηκαν στο Internet και πιο συγκεκριμένα στο διαδικτυακό ιστοχώρο NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [Εικ.39]. Με βάση αυτά τα δεδομένα και τη χρήση των προγραμμάτων της ESRI (ArcGis) έγινε ο χάρτης που απεικονίζει τσουνάμι και άλλες φυσικές καταστροφές που έχουν συμβεί στη περιοχή, καθώς δίνονται και επιπλέον πληροφορίες κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει ένα συγκεκριμένο γεγονός. Το χρονικό διάστημα όλων των γεγονότων που παρουσιάζονται καλύπτει μια εκτεταμένη χρονική περίοδο από το 416 μέχρι το 2004 [ESRI ,2004] (14).

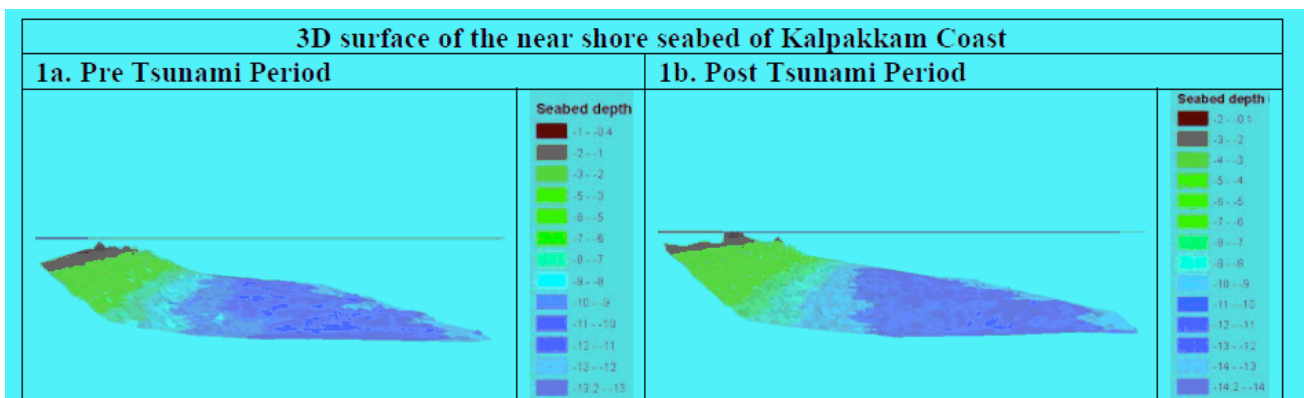


Εικ.39 Τσουνάμι διαφόρων χρονικών περιόδων. Χάρτης σχεδιασμένος με δεδομένα αποκλειστικά από το Ίντερνετ [ESRI ,2004] (14)

Καταγραφή της καταστροφής των τσουνάμι και λύσεις για ανάκαμψη (Φαση3^η)

Μελέτη του πυθμένα των παράκτιων περιοχών

Οι δυνάμεις των τσουνάμι είναι τεράστιες και αυτός είναι ο λόγος που επιφέρουν συχνά τόσο μεγάλες αλλαγές στη γεωμορφολογία της περιοχής αλλά και καταστροφές. Ακόμα και η μορφή και το βάθος μιας παράκτιας περιοχής είναι πιθανό να αλλάξει σημαντικά μετά από το πέρασμα ενός τσουνάμι [Εικ.40].



Εικ.40 Πυθμένας της θάλασσας στη περιοχή Kalpakkam (ανατολικές Ινδίες) πριν και μετά από το τσουνάμι του 2004 [C. Anandan, 2008] (25).

Μελετώντας τα παραπάνω δεδομένα σχετικά με την αλλαγή της ακτής στη Kalpakkam στις ανατολικές Ινδίες αλλά και από ανάλογα δεδομένα σε άλλα σημεία μπορούμε να πούμε γενικά ότι το τσουνάμι μεταφέροντας υλικά και άμμο από τα πιο βαθιά νερά και αποθέτοντάς τα κοντά στην ακτή μείωσε κατά 10 έως 50cm [Εικ.41] [C. Anandan, 2008] (25).

Sl.No.	Depth measurement at a typical profile	Pre bathymetry (m)	Post bathymetry (m)	Difference in bathymetry (m)*
	a	b	c	d= b-c
1.	Point1	2.2	1.7	-0.50
2.	Point2	3.8	3.9	+0.10
3.	Point3	4.3	3.8	-0.50
4.	Point4	4.6	4.1	-0.50
5.	Point5	6.3	5.8	-0.50
6.	Point6	6.9	6.6	-0.30
7.	Point7	6.6	6.7	+0.10
8.	Point8	6.7	7.2	+0.50
9.	Point9	6.8	7.0	+0.20
10.	Point10	7.0	7.4	+0.40
11.	Point11	7.1	7.0	-0.10
12.	Point12	7.3	7.0	-0.30
13.	Point13	7.5	7.8	+0.30
14.	Point14	7.8	7.3	-0.50
15.	Point15	8.0	7.8	-0.20

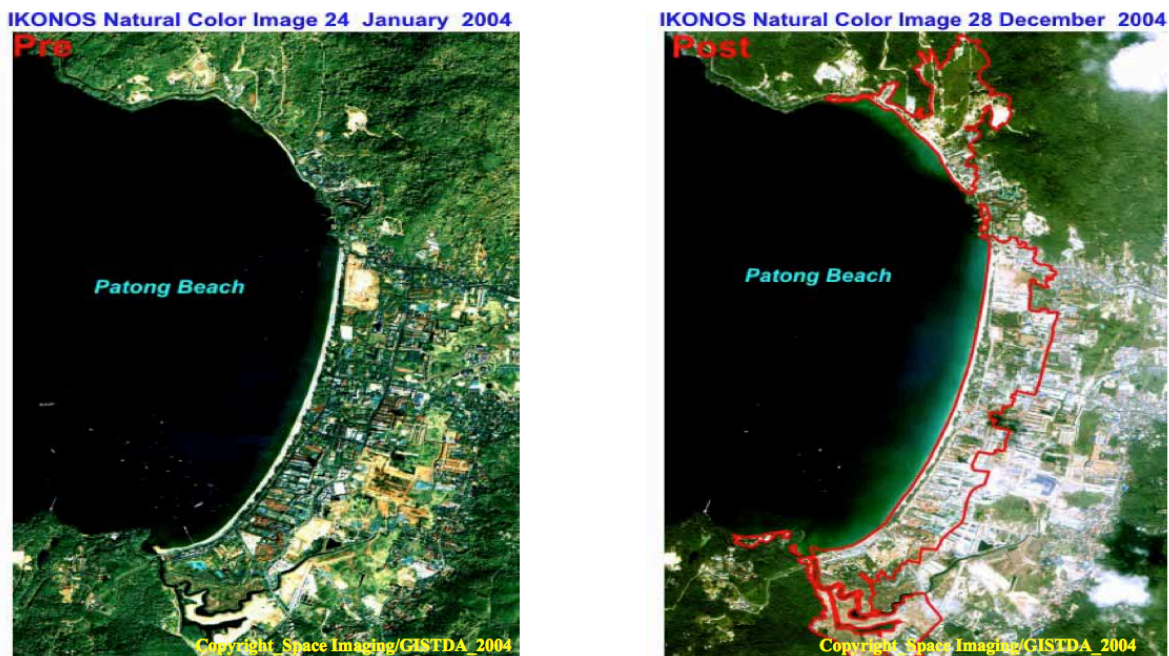
* (-) decrease in depth (deposition): (+) increase in depth (erosion)

Εικ.41 Βαθυμετρία της περιοχής Kalpakkam πριν και μετά το τσουνάμι του 2004, [C. Anandan, 2008] (25).

Μελέτη περιοχών καταστροφής μέσω δορυφόρων

Οι δορυφόροι σε συνεργασία με τα προγράμματα GIS πλέον μας παρέχουν τη δυνατότητα λεπτομερούς καταγραφής της έκτασης της καταστροφής που έχει προκληθεί από τσουνάμι. Η καταγραφή δεδομένων καταστροφής ακτών, κατοικιών αλλά ακόμα και του φυσικού περιβάλλοντος με τη βοήθεια των δορυφόρων είναι πλέον μια πολύ εύκολη, γρήγορη και με τρομερή ακρίβεια διαδικασία.

Δορυφόροι όπως ο IKONOS και ο QUICKBIRD έχουν τη δυνατότητα λήψης φωτογραφιών με ανάλυση 1 μέτρου και 61 εκατοστών αντίστοιχα (πολύ λεπτομερή απεικόνιση πληροφοριών). Έτσι, μέσω μιας βάσης δεδομένων οι διαφορές μεταξύ των φωτογραφιών πριν και μετά από την καταστροφή σκιαγραφούν τις τρομερές αλλαγές που μπορούν να επιφέρουν τα τσουνάμι.



Εικ.42 Οι φωτογραφίες έχουν παρθεί από το δορυφόρο IKONOS στις 24/12/2004 και 29/12/2004 στην παραλία της Patong, στο Phuket. Η αριστερή είναι πριν την καταστροφή και η δεξιά μετά. Η καταστροφή είναι εμφανής στην πανίδα της περιοχής [Supariss POLNGAM, 2005] (26).



Εικ.43 Φωτογραφίες του δορυφόρου IKONOS στις 24 και 28 Δεκέμβρη 2004 αντίστοιχα στην περιοχή Patong, στο Phuket. Με κίτρινα βέλη σημειώνονται τα σημεία που υπέστησαν μεγάλη διάβρωση από το τσουνάμι. [Supapis POLNGAM, 2005] (26.)

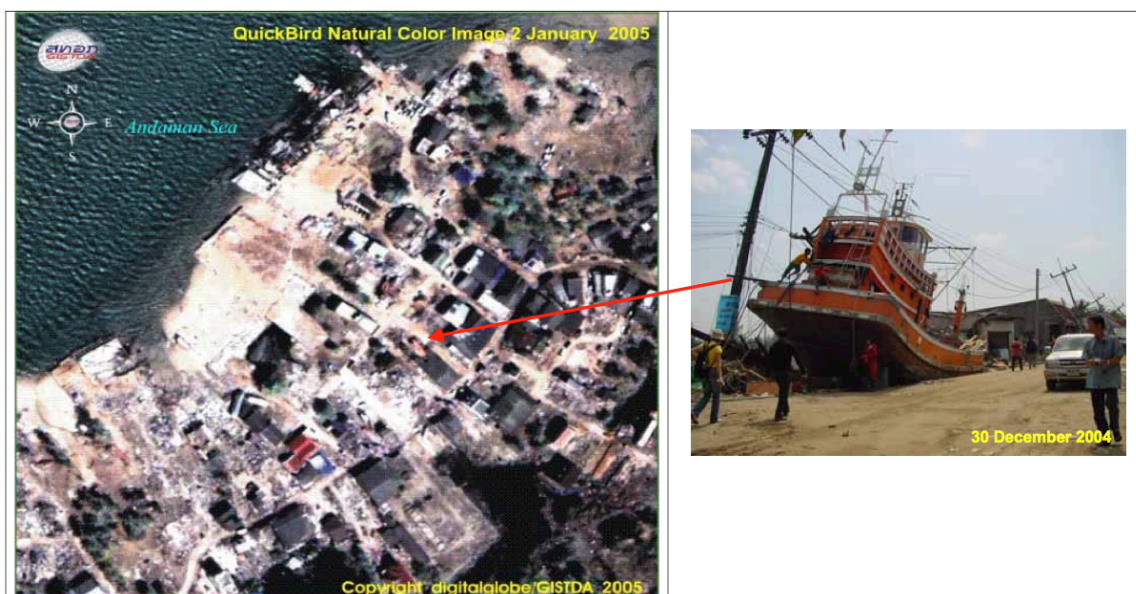




Εικ.44 Φωτογραφίες του δορυφόρου IKONOS στις 24 και 289 Δεκέμβρη 2004 αντίστοιχα στην παραλία της Kammala, στο Phuket. Με κόκκινο σημειώνονται τα σημεία που υπέστησαν μεγάλη διάβρωση εξαιτίας του τσουνάμι [Suparis POLNGAM, 2005] (26).



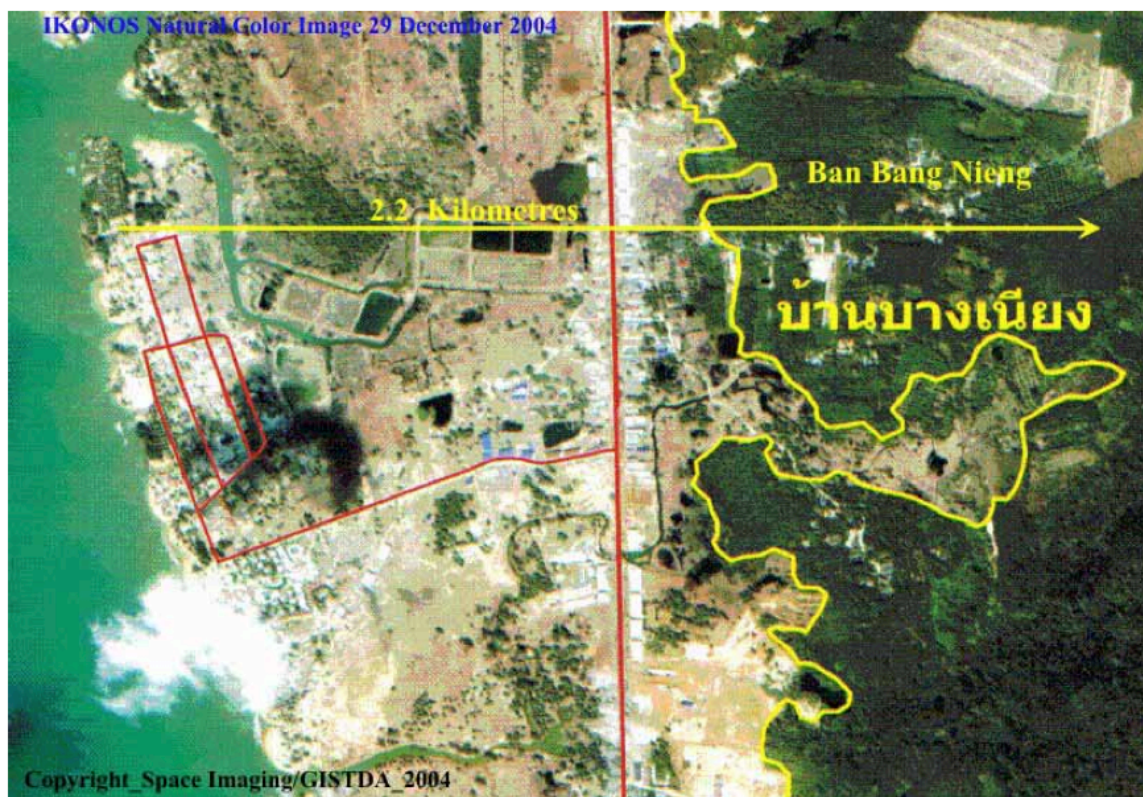
Εικ.45 Φωτογραφίες του δορυφόρου IKONOS πριν και μετά την καταστροφή στην περιοχή του Merlin Beach Resort στην παραλία Tri Trang στο Phuket. Εδώ καταγράφεται η καταστροφή σε πισίνες, δρόμους και σε δασικές εκτάσεις [Suparis POLNGAM, 2005] (26).



Εικ.46 Η τεράστια καταστροφή στην περιοχή Ban Nam Khem στην επαρχία Phang-nga. Πολλά πλοία παρασυρθήκαν από το τσουνάμι 600-700 m μέσα στη στεριά [Suparis POLNGAM, 2005] (26).

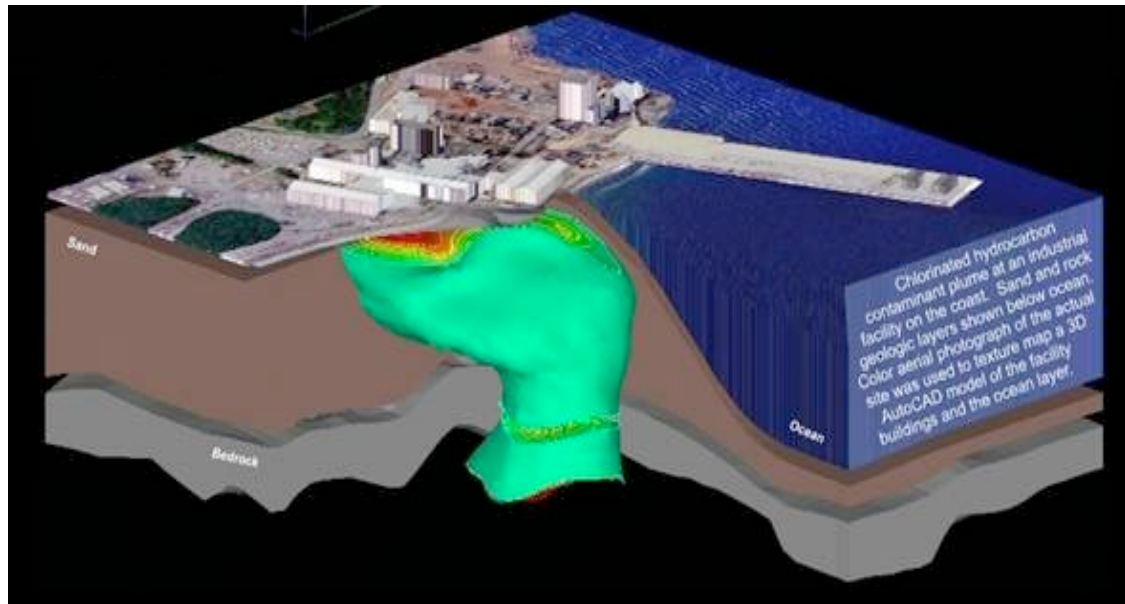


Εικ.47 Φωτογραφίες από το δορυφόρο IKONOS στις 30/1/2003 και στις 29/12/2004 αντίστοιχα. Χαρακτηριστικά φαίνεται η διάβρωση της ακτής (με κόκκινο) και πολλές καταστροφές στα κτήρια, στους δρόμους, στις γέφυρες αλλά και στις τοπικές φάρμες [Suparis POLNGAM, 2005] (26).



Εικ.48 Φωτογραφίες από το δορυφόρο IKONOS της καταστροφής στην περιοχή Nan Bang Niang όπου το τσουνάμι εισέβαλε 2.200 μετρά στην ακτή [Suparis POLNGAM, 2005] (26).

Κεφάλαιο 3 : Οπτικοποίηση



*Εικ.49 3D οπτικοποίηση αναπαράστασης της μόλυνσης με το software EVS της C-tech
[<http://www.afcee.af.mil>]*

Γενικά

Το πεδίο της επιστημονικής οπτικοποίησης έχει ως στόχο τη δημιουργία εικόνων οι οποίες δίνουν βασικές πληροφορίες για τα εκάστοτε δεδομένα και τις διαδικασίες τους. Στις τελευταίες 3 δεκαετίες έχουν γίνει τεράστια βήματα στην ανάπτυξη της υπολογιστικής τεχνολογίας που οδήγησε σε καλύτερη κατανόηση του φυσικού κόσμου και στη λεπτομερή μελέτη του, όπως επίσης και στη μοντελοποίηση και εξομοίωση πολύπλοκων συστημάτων του.

Με γνώμονα τα παραπάνω, η επιστημονική οπτικοποίηση παίζει μείζονα ρόλο στην ικανότητα μας να κατανοήσουμε αυτά τα φαινόμενα και τα πολύπλοκα δεδομένα τους. Η επιστημονική οπτικοποίηση βρίσκει εφαρμογή σε μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών σε θέματα ιατρικής, γεωεπιστήμης και διαστημικής, σε περίπλοκες ροές υγρών και βιολογικές εφαρμογές μεταξύ άλλων.

Το πεδίο της επιστημονικής οπτικοποίησης περιγράφηκε στην αναφορά του συνεδρίου του Εθνικού Ιδρύματος Οπτικών Επιστημών και Υπολογιστικής (National Science Foundation's Visualization in Scientific Computing) το 1987 με το παρακάτω κείμενο:

Οπτικοποίηση είναι μια μέθοδος υπολογισμού. Μετασχηματίζει το "συμβολικό" σε "γεωμετρικό", επιτρέποντας στους ερευνητές παρατηρήσουν τις προσομοιώσεις τους και τους υπολογισμούς τους. Η οπτικοποίηση είναι μια μέθοδος για να δούμε το αόρατο. Επίσης εμπλουτίζει τη διαδικασία της επιστημονικής ανακάλυψης και προωθεί βαθιές και

απροσδόκητες γνώσεις με τα αποτελέσματα της. Σε πολλούς επιστημονικούς τομείς ήδη καινοτομεί στον τρόπο που οι ερευνητές παράγουν έργο. Ο στόχος της οπτικοποίησης είναι να βοηθήσει τις ήδη γνωστές επιστημονικές τεχνικές παρέχοντας νέα επιστημονική γνώση μέσα από οπτικές απεικονίσεις.

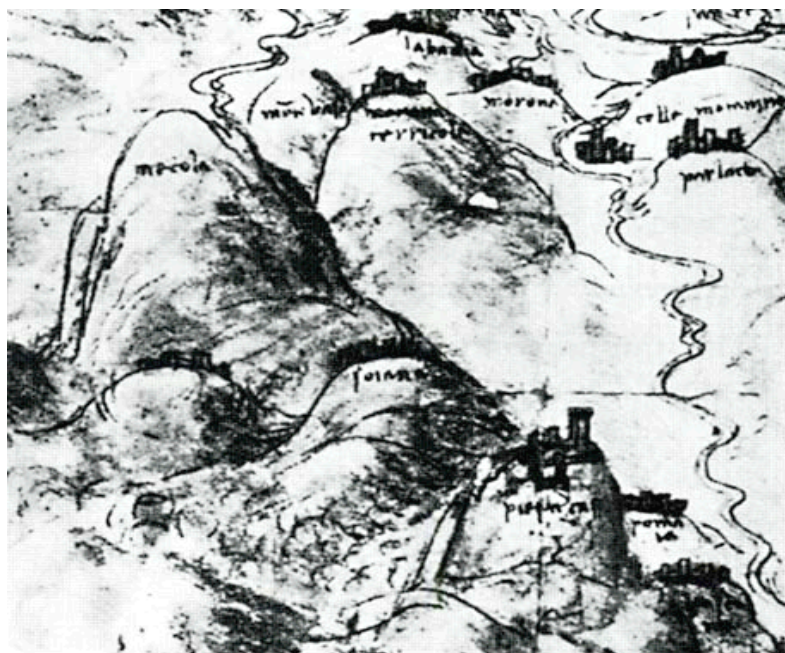
Ο τομέας της οπτικοποίησης δημιουργήθηκε παράλληλα με την ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών και χρήση των ηλεκτρονικών γραφικών (computer graphics) για την επίδειξη των δεδομένων. Ταυτόχρονα η ανάγκη για κατανόηση δεδομένων από συστήματα που έχουν την ικανότητα να καταγράφουν το φυσικό κόσμο όπως είναι τα ιατρικά scanner, γεωφυσικοί και δορυφορικοί αισθητήρες κτλ οδήγησαν στην ανάπτυξη του επιστημονικού τομέα της οπτικοποίησης.

Όσον αφορά στον κλάδο της χαρτογραφίας όπου και θα επικεντρωθούμε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, ένας από τους πιο σημαντικούς στόχους που τίθεται είναι η απεικόνιση του γεωγραφικού χώρου και του αναγλύφου με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαρτών δύο ή τριών διαστάσεων από τους οποίους μπορούμε να αντλήσουμε ποιοτικές, ποσοτικές και θεματικές πληροφορίες για μια περιοχή. Η οπτικοποίηση ανάγλυφου χρησιμοποιείται στην ανάλυση του τοπίου, αντικείμενο της οποίας είναι η ανάλυση, η αξιολόγηση, ο σχεδιασμός και η διαχείριση του φυσικού περιβάλλοντος [WILLIAM J.SCHROEDER & KENNETH M. MARTIN,2005] (28).

3.1 Ιστορική Εξέλιξη της οπτικοποίησης

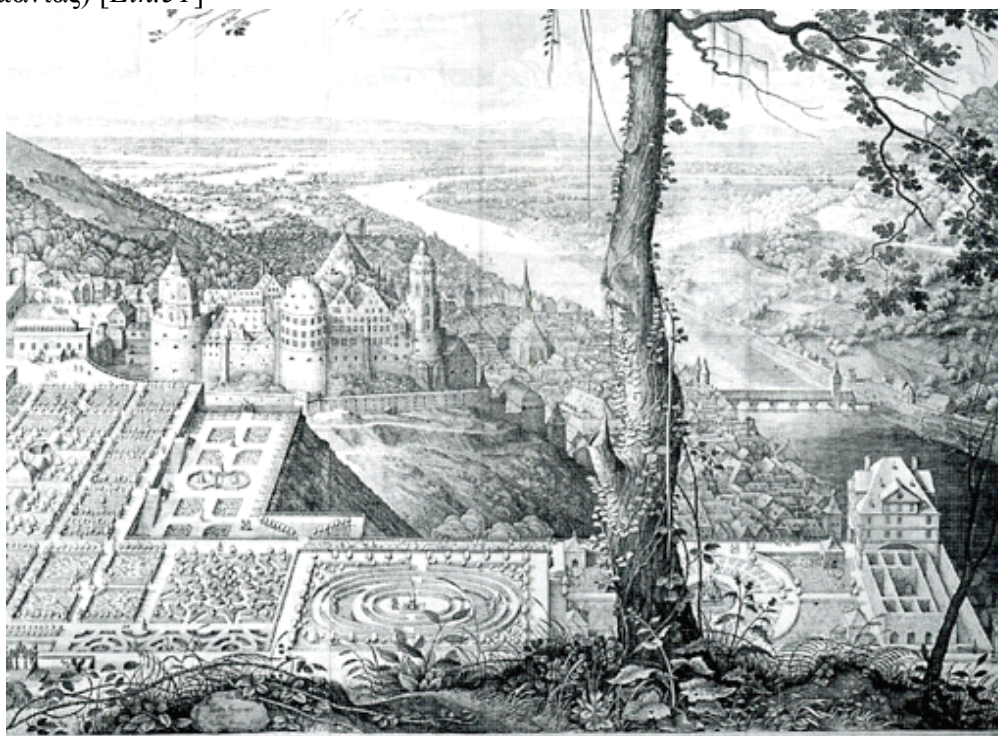
Ενώ η οπτικοποίηση είναι μια σχετικά νέα επιστήμη ο κεντρικός της άξονας ως ιδέα, η παρουσίαση δηλαδή δεδομένων που θα μας βοηθήσει να καταλάβουμε πολύπλοκα φαινόμενα δεν είναι καινούργια. Μια από τις αρχαιότερες χαρτογραφικές απεικονίσεις τοπίου είναι αυτή που ανακαλύφθηκε το 1963 κατά τη διάρκεια ανασκαφών στο Catal Huyuk στη κεντρική Ανατολία. Πρόκειται για μια τοιχογραφία τριών μέτρων που χρονολογείται από την περίοδο του 6200 π.Χ.. Σύμφωνα με τη γνώμη επιστημόνων αναπαριστά την πόλη Catal Huyuk, όπου εκτός από τα σπίτια και τις αναβαθμίδες απεικονίζονται και οι δύο κορυφές του ηφαιστείου Hasan Dag.

Κατά την περίοδο της Αναγέννησης, νέες τεχνικές απεικόνισης με τη χρήση της προοπτικής αναπτύσσονται κάνοντας την οπτικοποίηση των τοπίων πιο ρεαλιστική και προσδίδοντάς της μια τρίτη διάσταση. Παράδειγμα τέτοιων απεικονίσεων αποτελούν οι χάρτες της Τοσκάνης του Leonardo da Vinci [Εικ.50] (1502-1503) [Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (29).



Εικ.50 Κομμάτι του χάρτη της Τοσκάνης του Leonardo da Vinci
[Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (29)

Άλλη μία πρωτοπόρα απεικόνιση τοπίου με ύπαρξη 3^{ης} διάστασης είναι του καλλιτέχνη Salomon de Caus στο έργο του Hortus Palatinus (κάστρο της Χαϊδελβέργης της Γερμανίας) [Εικ.51]



Εικ.51 Χάραξη πάνω σε χαλκό του Hortus Palatinus στο κάστρο της Χαϊδελβέργης (1620)
[Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (29).

Την ίδια περίοδο αρχίζει και η χρήση ισοϋψών καμπυλών για την αναπαράσταση της υψομετρικής πληροφορίας του εδάφους. Πρόκειται για γραμμές οι οποίες ενώνουν σημεία ίδιου υψομέτρου – με υψομετρική αφετηρία συνήθως το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας - και δημιουργούνται από παρεμβολές μεταξύ σημείων γνωστού υψομέτρου. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η απόδοση ποσοτικής πληροφορίας του εδάφους [Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (29).

Ο πρώτος που χρησιμοποίησε τις ισοϋψείς καμπύλες ήταν ο Pieter Bruinss το 1584 στο ναυτιλιακό χάρτη της Ολλανδίας. Οι Humphrey Repton, Lancelot Brown και William Kent άσκησαν τη μεγαλύτερη επιρροή στις αναπαραστάσεις των αγγλικών κήπων (1720-1820), η οποία έγινε γνωστή και στην Ευρώπη μετά το 1750. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου κατασκευάστηκαν μεγάλοι κήποι, όπως το Stowe στην Αγγλία και το Woerlitzer στη Γερμανία.

Η μετάβαση σε μια πιο ολοκληρωμένη θεώρηση της χαρτογραφικής απόδοσης έλαβε χώρα λίγο πριν το τέλος του 19ου αιώνα, όπου μέχρι τότε η διαφορά ύψους απεικονιζόταν με διαφορετική χρωματική διαβάθμιση, ενώ σε άλλες εφαρμογές χρησιμοποιούσαν τη σκίαση του ανάγλυφου κλπ.

Τα πρώτα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) στο πεδίο της χαρτογραφίας δημιουργήθηκαν από τους Miller και Laflamme, στο τέλος της δεκαετίας του 50, στο εργαστήριο φωτογραμμετρίας του τμήματος πολιτικών μηχανικών του M.I.T. [30]

3.2. Γενικές αρχές και έννοιες της οπτικοποίησης

Κάποιες από της πιο βασικές έννοιες της οπτικοποίησης είναι ο φορμαλισμός, ο ρεαλισμός, η αυθεντικότητα και η αξιοπιστία. Όλες αυτές οι έννοιες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξαρτήτως μεταξύ τους και σε διαφορετικές περιπτώσεις, ενώ η σημασία τους εξαρτάται από το γενικότερο πλαίσιο των εφαρμογών [Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (31).

Ένα παράδειγμα για την κατανόηση αυτών των όρων είναι μια σκηνή κινουμένων σχεδίων που ενώ είναι αξιόπιστη, δεν αναπαριστά μια πραγματική εικόνα. Επίσης, οι ρεαλιστικές σκηνές που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά παιχνίδια έχουν μια εντύπωση αξιόπιστου και αυθεντικού μοντέλου αλλά δεν είναι ταυτόχρονα και φωτορεαλιστικές. Από την άλλη, η σκηνή μιας ταινίας πρέπει να είναι φωτορεαλιστική και παράλληλα αυθεντική [Rudiger Mach, Peter Petschek, 2007] (31). Έτσι καταλαβαίνουμε ότι είναι πολύ σημαντικό ο χρήστης από την αρχή να έχει καθορίσει τον τρόπο που θα χρησιμοποιήσει για την οπτικοποίηση των δεδομένων του.

Όσον αναφορά στο Sheppard πέντε είναι οι βασικές αρχές οπτικοποίησης στην τοπογραφία περιοχής. Η πρώτη αναφέρεται στον αντιπροσωπευτικό χαρακτήρα μιας

απεικόνισης μέσα από την οποία αναπαρίστανται τα βασικά χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης τοπογραφίας. Η δεύτερη αρχή αφορά την ακρίβεια της αναπαράστασης σύμφωνα με την οποία η απεικόνιση πρέπει να δείχνει τη πραγματική όψη της τοπογραφίας. Η τρίτη αρχή είναι αυτή της οπτικής σαφήνειας και αναφέρεται στις λεπτομέρειες και τα στοιχεία του εδάφους που πρέπει να είναι ευπροσδιόριστα. Η τέταρτη αρχή έχει να κάνει με το ενδιαφέρον που προκαλεί μια απεικόνιση στον παρατηρητή αποσπώντας του την προσοχή για όσο το δυνατόν περισσότερο. Πέμπτη αρχή είναι η γνησιότητα που έχει να κάνει με την επαλήθευση της πραγματικότητας [Sheppard Stephen, 1989] (32).

3.3. Γεω-Οπτικοποίηση

Η γεω-οπτικοποίηση (geovisualization) ορίζεται ως η διαδικασία αξιοποίησης και απεικόνισης δεδομένων με γεωαναφορά, μέσω οπτικών μεθόδων και εργαλείων. Επίσης η γεωαναφορά είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα περισσότερα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) και γίνεται χρήση της σε πολλές εφαρμογές. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές είναι τα συστήματα πλοήγησης οχημάτων, τα συστήματα ελέγχου και οι κινητές συσκευές που παρέχουν πληροφορίες για με ψηφιακούς χάρτες.

Ειδικότερα, η γεωοπτικοποίηση αποτελεί ένα θεμελιώδη τομέα εφαρμογής της τρισδιάστατης ηλεκτρονικής γραφιστικής. Τα τρισδιάστατα γραφικά πραγματικού χρόνου προσφέρουν μια αναπτυσσόμενη συλλογή εξεζητημένων εικόνων σύνθεσης. Η τεχνολογία, εάν προορίζεται για τη γεωγραφική πληροφορία, μπορεί να βελτιώσει και να επεκτείνει τις δυνατότητες των συστημάτων γεω-οπτικοποίησης αφού οι έννοιες και οι εφαρμογές εξαρτώνται από την τεχνολογία των τρισδιάστατων γραφικών. Η τρισδιάστατη απόδοση σε πραγματικό χρόνο επιτυγχάνει την οπτικοποίηση πολύπλοκων χαρακτηριστικών προσφέροντας ρεαλισμό υψηλού επιπέδου. Οι εφαρμογές συνήθως βασίζονται σε αλγόριθμους και σε δομές δεδομένων, οι οποίες υποβοηθούνται από την ταχύτητα των γραφικών. Λεπτομερής εισαγωγή σε γενικές έννοιες έγινε από τους Akenine – Moiller και Haines [Akenine-Moller T. and Haines E., 2002] (33).

Η Χαρτογραφία και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών που αποτελούν τις ρίζες της γεω-οπτικοποίησης, μπορούν να συμβάλλουν σε στρατηγικές οπτικού σχεδιασμού και αναπαράστασης, καθώς και να προσφέρουν δυνατότητες για τη σύνδεση της οπτικής αναπαράστασης με βάσεις δεδομένων. Για παράδειγμα, οι χαρτογραφικές μέθοδοι γενίκευσης που αφορούν την κλίμακα και σημασιολογικά συσχετισμένα χαρακτηριστικά μπορούν να εφαρμοστούν σε μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο, η γεω-οπτικοποίηση μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων κατευθύνσεων στην οπτικοποίηση και να βελτιώσει τις υπάρχουσες τεχνικές τρισδιάστατων γραφικών.

3.4. 3D οπτικοποίηση

Γενικά

Νέες τεχνολογίες στον τομέα των υπολογιστών και σύγχρονες επιστημονικές θεωρίες έχουν κάνει δυνατή σήμερα την δημιουργία και χρήση 3D γραφικών περιβαλλόντων. Για πρώτη φορά μπορούμε όχι απλά να κατασκευάσουμε τέτοια περιβάλλοντα αλλά και να πλοηγηθούμε μέσα σε αυτά με τη χρήση Η/Υ. Έτσι, με τη χρήση τέτοιων νέων τεχνολογιών τίθενται ερωτήματα όπως: ποιός είναι ο πιο αξιόλογος τρόπος να τα χρησιμοποιήσουμε, πόσο ρεαλιστικά μπορούμε να τα απεικονίσουμε καθώς και τι καινούργιες πληροφορίες μπορούμε να αντλήσουμε από τη χρήση τους.

Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση

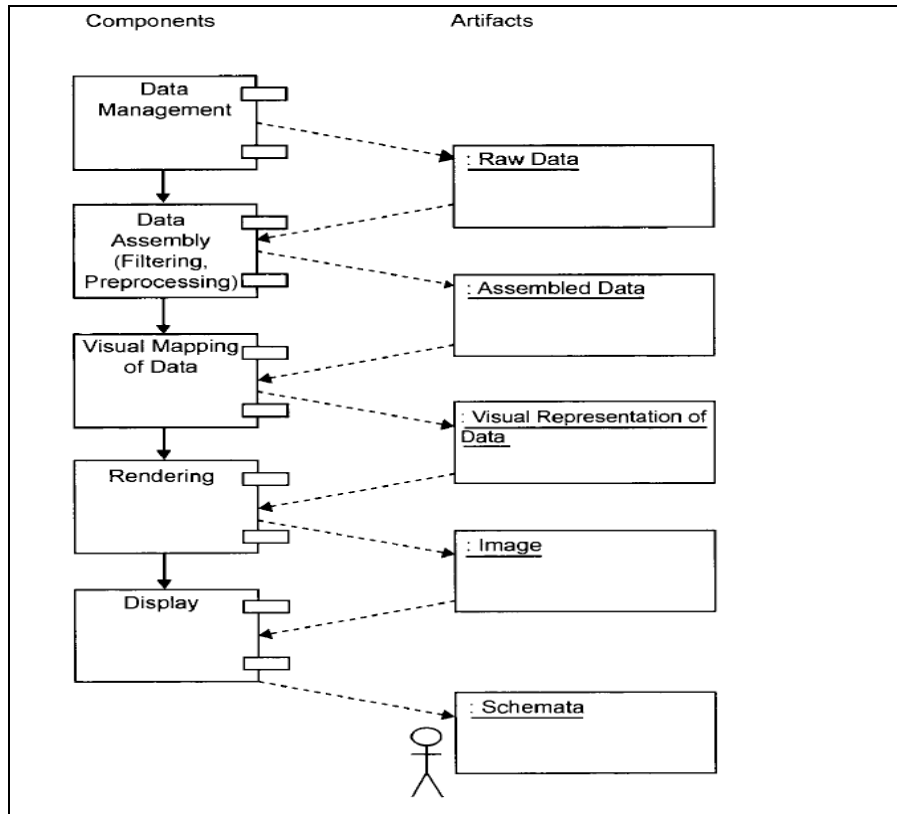
Η έννοια της τρισδιάστατης οπτικοποίησης αναφέρεται στην αναπαράσταση τρισδιάστατων αντικειμένων και επιφανειών. Για αρκετά χρόνια η τρίτη διάσταση, ως κεντρικό και μεταβαλλόμενο φαινόμενο, χρησιμοποιήθηκε από πολλά συστήματα οπτικοποίησης χωρίς όμως να παρατηρείται διάκριση του πότε και του πώς μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιο αποτελεσματικά.

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση κρίνεται αναγκαία για πολλούς λόγους. Ένας από τους βασικούς λόγους είναι ότι ο παρατηρητής μπορεί να παρατηρήσει το μοντέλο από διαφορετικές οπτικές γωνίες και να δει ένα αντικείμενο ή μια περιοχή τρισδιάστατα. Αυτό συνδέεται με τη φυσική ικανότητα του ανθρώπου να βλέπει τρισδιάστατα με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανόηση της πολυπλοκότητας των επιφανειών και της γεωμετρίας τους.

Επίσης, μέσω της τρισδιάστατης οπτικοποίησης καθίσταται δυνατή η αλληλεπίδραση του παρατηρητή με τις τρεις διαστάσεις, ενώ ταυτόχρονα οι προβληματικές περιοχές (αδύναμα σημεία) πολύπλοκων κατασκευών μπορούν να αναπαρασταθούν ευκολότερα τρισδιάστατα. Επιπρόσθετα, η τρισδιάστατη οπτικοποίηση επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων ενώ οι έννοιες και οι ιδέες στη διαδικασία του σχεδιασμού μπορούν να αποδοθούν ευκολότερα.

Για να εξηγήσουμε τον όρο "3D" θα χρησιμοποιήσουμε ένα μοντέλο που ως βάση του έχει τη κλασική θεώρηση "**visualization pipeline**" (διάγραμμα πληροφοριών οπτικοποίησης) Upson et al., 1989; Haber and McNabb, 1990. Αυτό αποτελείται από μια ακολουθία γεγονότων που συνθέτουν τα διάφορα στάδια της διαδικασίας της οπτικοποίησης [Εικ.52].

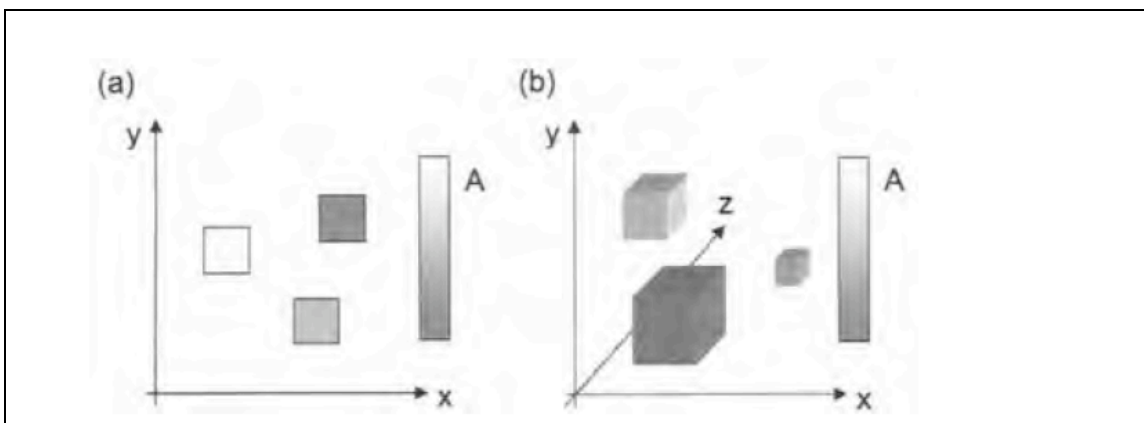
- Διαχείριση δεδομένων (data management)
- Σύνδεση δεδομένων (data assembly)
- Οπτική αντιστοίχιση (visual mapping)
- Απόδοση (rendering)
- Απεικόνιση (display)



Εικ.52 Διάγραμμα πληροφοριών οπτικοποίησης (*visualization pipeline*) [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).

Η οπτικοποίηση ασχολείται με την αντιστοίχιση των διαστάσεων των δεδομένων σε ένα σύνολο γραφικών στοιχείων οπτικών μεταβλητών. Αυτή η διαδικασία σχεδόν πάντα εμπεριέχει την απλοποίηση και την μερική αφαίρεση πληροφοριών ώστε να είναι δυνατή η οπτικοποίησή τους με τη χρήση απλούστερων δομών. Τέτοιες μεταβλητές απεικόνισης είναι η τοποθεσία, το μέγεθος, το χρώμα, η υφή και ο προσανατολισμός κτλ [Bertin, 1983, Monmonier, 1991, MacEachren, 1994] (34).

Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι η αποτελεσματική οπτικοποίηση περιλαμβάνει την αντιστοίχιση των οπτικών μεταβλητών και των δεδομένων για λογαριασμό του χρήστη. Έτσι για παράδειγμα σε ένα κλασικό 2D χάρτη δεν είναι αναγκαία η διαμεσολάβηση του υπολογιστή για κατανόηση των δεδομένων από τον χρήστη μιας και απεικονίζονται σε δισδιάστατη επιφάνεια. Αντιθέτως για την αναπαράσταση μιας 3D κατασκευής ενός κτηρίου σε μια δισδιάστατη επιφάνεια όπως είναι η οθόνη ενός υπολογιστή θεωρείται αναγκαία η διαμεσολάβηση του κάνοντας χρήση διαφόρων τεχνικών. Αυτές οι τεχνικές έχουν ως βάση τους την ικανότητα αντίληψης του βάθους από το ανθρώπινο μάτι. Έτσι ενισχύοντας την ανθρώπινη αυτή αντίληψη μέσα από τεχνικές σαν την προοπτική, της σύγκλεισης και τη παράλληλη κίνησης μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τέτοιους χώρους προσθέτοντας ακόμη ένα “βαθμό ελευθερίας” στην οπτική αναπαράσταση [Εικ.53].



Εικ.53 Στην εικόνα (a) γίνεται χρήση 2 χωρικών μεταβλητών (x,y) και μιας ακόμα χρωματικής μεταβλητής (A). Στην εικόνα (b) γίνεται χρήση 3 μεταβλητών (x,y,z) και μιας χρωματικής μεταβλητής (A) [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak] (34).

Το πιο προφανές πλεονέκτημα των τεχνικών αυτών είναι η δυνατότητα απεικόνισης της χωρικής πληροφορίας σε τρεις διαστάσεις. Αυτή η πρακτική έχει εφαρμογή κυρίως σε τεχνικές χαρτογράφησης εδάφους και σε 3D γεωλογικές και ατμοσφαιρικές απεικονίσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η απεικόνιση μιας 3D κατασκευής σε δισδιάστατη επιφάνεια είναι μια πολύπλοκη διαδικασία να μοντελοποιηθεί.

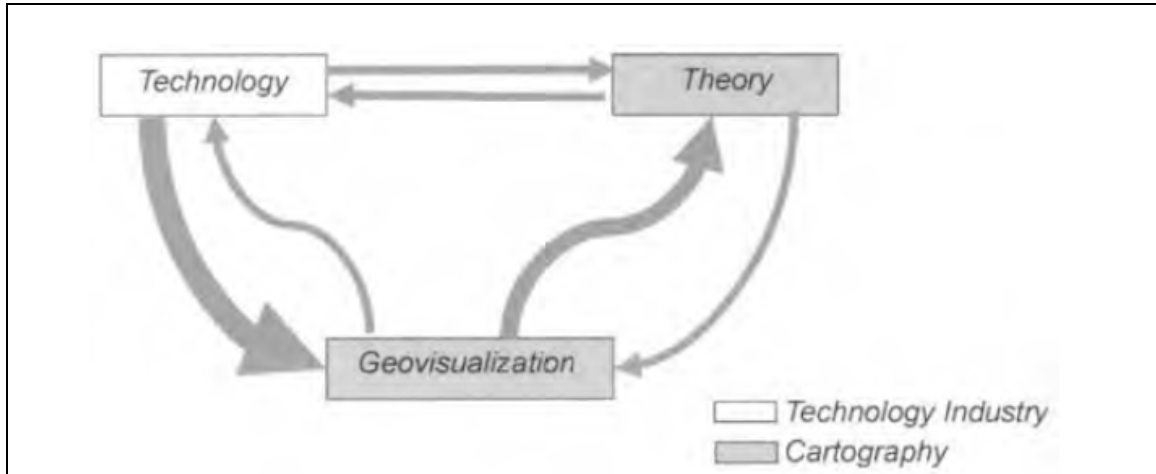
Φυσικά στη 3D γεωαπεικόνιση δεν είναι ανάγκη αυτός ο νέος βαθμός ελευθερίας που δημιουργήσαμε να αντιστοιχιστεί με μια τρίτη χωρική διάσταση αλλά μπορεί παραδείγματος χάριν να εκφράζει το χρόνο (Hagerstrand, 1968; Forer, 1998), πυκνότητα πληθυσμού (Wood et al., 1999), θερμοκρασία (Paetsch and Kuhn, 1999) ή την συχνότητα (Wise et al., 1995; Fabricant and Supine) σε μια συγκεκριμένη απεικόνιση.

Επομένως γίνεται φανερό ότι πλέον είναι δυνατόν οι στατικές απεικονίσεις να εξελιχτούν σε δυναμικές με τη χρήση 4 βασικών μεταβλητών: τη σειρά, τη διάρκεια, το βαθμό αλλαγής και τη φάση (MacEachren, 1994; MacEachren, 1995; Kraak and MacEachren, 1999) και να εφαρμοστούν στα δεδομένα μένοντας ανεξάρτητες μεταξύ τους [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak] (34).

Τεχνολογία και θεωρία της 3D οπτικοποίησης

Η χαρτογραφία και η γεωαπεικόνιση συνεχώς εξελίσσονται (MacEachren and Kraak, 2001). Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι και οι δύο επιστήμες έχουν μεγάλη εξάρτηση σε άλλες τεχνολογίες. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η επιρροή που δέχονται από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών (Taylor, 1993).

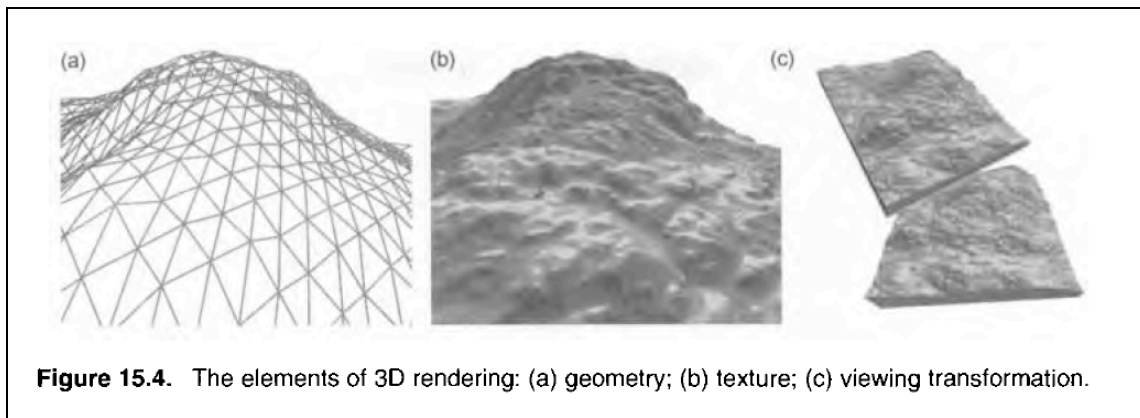
Το παρακάτω μοντέλο [Εικ.54] δείχνει την επιρροή που οδηγεί στην ανάπτυξη της γεωαπεικόνισης και της χαρτογραφίας γενικότερα. Αυτές οι επιρροές δεν είναι όμοιες και ίσες μεταξύ τους. Για παράδειγμα η γεωαπεικόνιση που πραγματεύεται αυτή τη διπλωματική εργασία βασίζεται στην τεχνολογία των υπολογιστών, της οποίας η ανάπτυξη όμως βασίζεται σε πολύ μεγαλύτερους οικονομικούς και επιστημονικούς παράγοντες από αυτούς της γεωδαισίας και της γεωαπεικόνισης.



Εικ.54 Συσχέτιση μεταξύ γεωαπεικόνισης- θεωρίας της οπτικοποίησης και τεχνολογιών απεικόνισης [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak] (34).

3D rendering (3D απεικόνιση)

Για να γίνει δυνατή μια τρισδιάστατη απεικόνιση ενός χώρου, η γεωμετρική κατασκευή του πρέπει να επικαλυφτεί από μια επιφανειακή υφή (texture) [Εικ.55]. Αυτή η υφή μπορεί να είναι πολύ απλή φανερώνοντας απλά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ αναλυτικά αποδίδοντας ακόμα και τις μικρές λεπτομέρειες της περιοχής ή ακόμα και χαρακτηριστικά του φωτισμού.

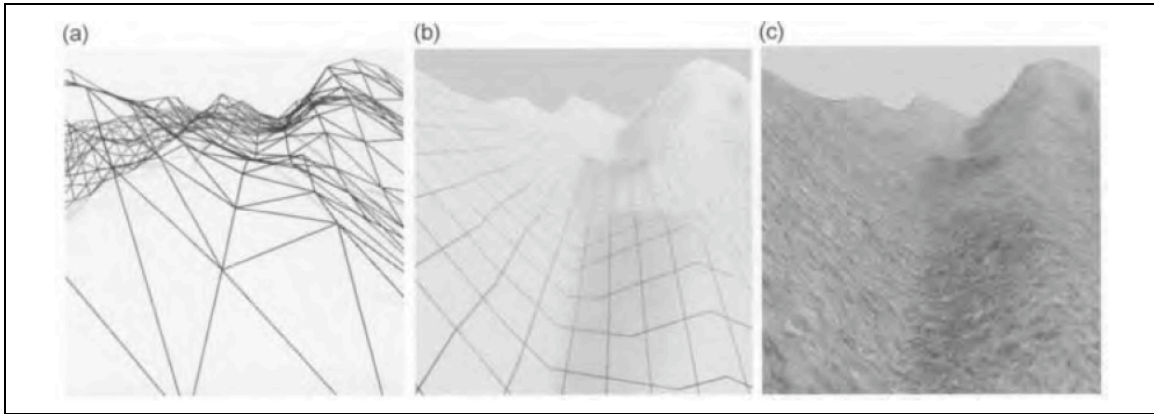


Εικ.55 3D απεικόνιση (a), γεωμετρία (b), οπτική αλλαγή (c).

Για να είναι δυνατή η δυναμική 3D απεικόνιση πρέπει να γίνεται ένας συνεχής μετασχηματισμός-μεταμόρφωση και αλλαγή των δεδομένων. Αυτός ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται με τη συνεχή μεταμόρφωση της εικονιζόμενης υφής που βλέπει ο χρήστης. Πιο συγκεκριμένα, για να είναι φυσική και ρεαλιστική η απεικόνιση στο

ανθρώπινο μάτι πρέπει τα δεδομένα μας να υφίστανται αλλαγές μέσω υπολογισμών περίπου 10 έως 100 φορές ανά δευτερόλεπτο.

Η βασική διαφορά μεταξύ της εικονιζόμενης γεωμετρίας και της υφής είναι ότι η γεωμετρική κατασκευή του χώρου είναι πολύ πιο δαπανηρή σε ότι αφορά τους πόρους του υπολογιστή σε σχέση με τις υφές (textures) που την επικαλύπτουν. Έτσι, για να είναι δυνατή η απεικόνιση ο υπολογιστής κάνει πολλές απλοποιήσεις στην απεικόνιση της γεωμετρίας [Εικ.56].



Εικ.56 Παράδειγμα απλοποίησης της γεωμετρίας μιας επιφάνειας.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι η χρήση της υφής σε μια τρισδιάστατη απεικόνιση εκμεταλλεύεται την ιδιότητα του ανθρώπινου ματιού να κατανοεί μια επιφάνεια λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση του φωτός με την επιφάνεια. [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).

3D Τεχνικές απόδοσης σε πραγματικό χρόνο

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί πάρα πολλές νέες τεχνικές για 3D Real time rendering που έχουν οδηγήσει σε νέες μεθόδους όσον αναφορά στη γεωαπεικόνιση. Τέτοια μοντέλα είναι τα :

- Μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης (multi-resolution models)
- Μοντέλα πολλαπλής υφής (multi-texturing models)
- Μοντέλα δυναμικής υφής (dynamic texturing models)
- Μοντέλα προγραμματιζόμενης σκίασης (programmable shading models)
- multi-pass rendering

Παρακάτω θα δοθεί ο ορισμός των παραπάνω τεχνικών και η αναλυτική παρουσίασή τους.

Μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης (multi-resolution models)

Ορισμός: Η μοντελοποίηση πολλαπλής ανάλυσης επικεντρώνεται στην αποθήκευση ενός σχήματος-κατασκευής σε πολλά διαφορετικά επίπεδα απεικόνισης των λεπτομερειών και είναι ικανό να τα παρουσιάσει όταν του ζητηθεί. Η ποιότητα της εικονίζουσας επιφάνειας σε σχέση με τις λεπτομέρειες που μπορούν να φανούν χαρακτηρίζονται από την ανάλυση του μοντέλου η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την πυκνότητα των γεωμετρικών στοιχείων και την ακρίβεια (μετράει το σφάλμα που προκύπτει από την απόκλιση της επιφάνειας από το πραγματικό χώρο).

Εφαρμογές στην γεωαπεικόνιση: Τα μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης είναι ιδανικά για απεικόνιση γεωγραφικών δεδομένων πολύ υψηλής ανάλυσης.

Σύγχρονες τεχνικές πάνω στα μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης έχουν οδηγήσει σε βελτιστοποιημένες μεθόδους για απεικόνισης εδάφους και μοντέλα πόλεων. Πιο συγκεκριμένα νέες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί σε :

- Υβριδικές μοντελοποιήσεις εδάφους, οι οποίες περιέχουν TINs (triangulated irregular networks) και κανονικά πλέγματα απεικόνισης εδάφους ταυτόχρονα σε ένα μόνο μοντέλο πολλαπλής απεικόνισης. Με αυτό τον τρόπο τα πλεονεκτήματα των 2 μεθόδων συνδυάζονται παράλληλα, κάνοντας όμως τον αλγόριθμο κατασκευής τους πιο 'αδύναμο'.
- Μοντέλα διατήρησης της εμφάνισης (Appearance-preserving terrain models), τα οποία εγγυούνται υψηλή ποιότητα εικόνας χάρη στα ειδικά συστήματα απλοποίησης που διαθέτουν. Σε αυτά η σκίαση και ο φωτισμός κωδικοποιούνται μέσω 2D υφών (D611ner et al., 2000).
- Ολοκληρωμένη μοντελοποίηση πολλαπλής ανάλυσης εδάφους. Τα συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για καινοτόμες εφαρμογές και λύσης στην παρουσίαση θεματικών δεδομένων που σχετίζονται με τις επιφάνειες.
- Τρισδιάστατα αστικά μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης. Τα τρισδιάστατα αστικά μοντέλα πολλαπλής ανάλυσης τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους τα χαρακτηριστικά των κτισμάτων και υποστηρίζουν τη γενίκευση των οικοδομικών τετραγώνων και των κτισμάτων, αντί της μείωσης πολυγώνων.

Μοντέλα απόδοσης της υφής (texturing) και πολλαπλής υφής (multi-texturing).

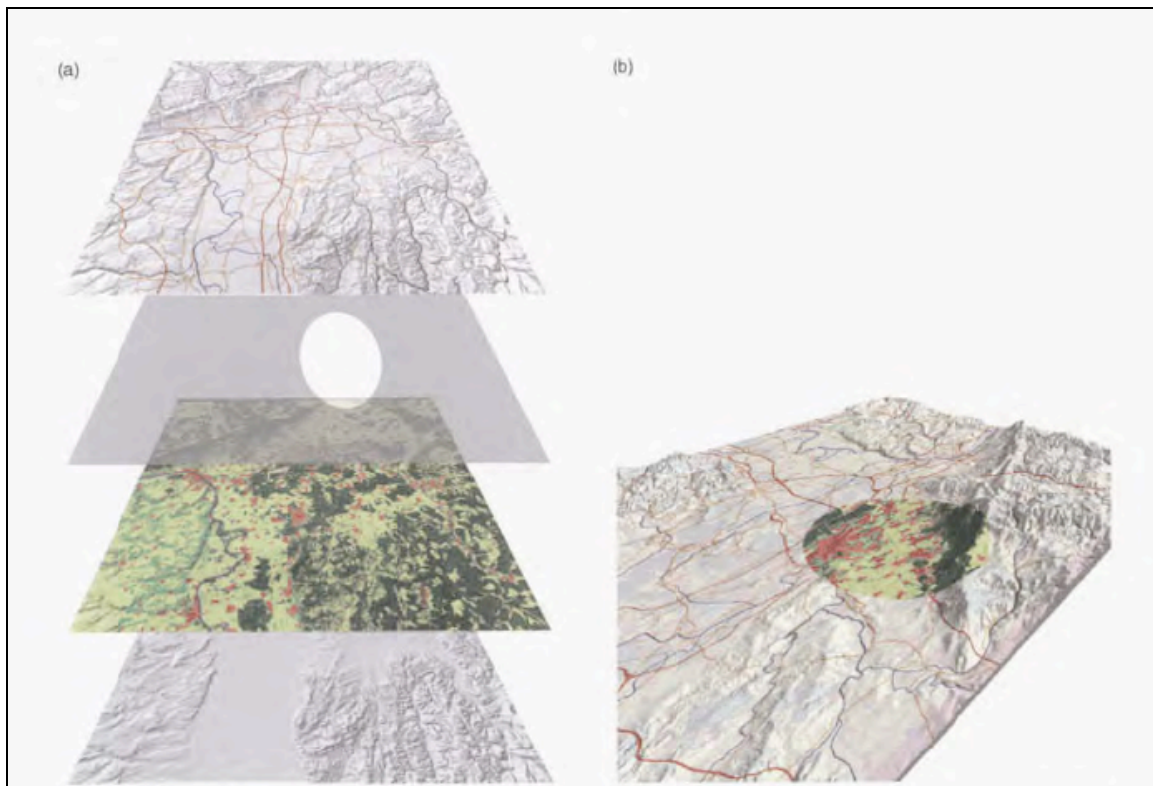
Ορισμός: Η δημιουργία υφών αποτελεί μια πολύ σημαντική λειτουργία των γραφικών απεικόνισης και αντιστοιχεί πολυδιάστατες εικόνες σε πολυδιάστατα γραφικά περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση μιας 2D εικόνας πάνω σε μια 3D επιφάνεια είναι μια τέτοια διαδικασία.

Η πολλαπλή δημιουργία υφών (Multi-texturing) είναι μια γραφική λειτουργία που ταυτόχρονα αντιστοιχεί πολλαπλές υφές σε ένα μοναδικό πολυδιάστατο χώρο δημιουργώντας ένα συνδυασμό από αυτές.

Εφαρμογές στην γεωαπεικόνιση: Η διαδικασία απόδοσης συγκεκριμένης υφής αποτελεί την πιο σημαντική τεχνική της γεωοπτικοποίησης και στοχεύει στο να κάνει ορατά τα γεωγραφικά δεδομένα. Ταυτόχρονα, με αυτή τη διαδικασία μπορούν να καλυφθούν δισδιάστατες γεωαναφερόμενες εικόνες (π.χ. αεροφωτογραφίες) μέσω της κωδικοποίησης των δισδιάστατων βασικών δομών της τρισδιάστατης γεωμετρίας, όπως των επιφανειών εδάφους. Γενικά, οι επιφάνειες αυτού του είδους βελτιώνουν το βαθμό ρεαλισμού ο οποίος εξαρτάται από τις ρεαλιστικές απεικονίσεις.

Μια εφαρμογή των τρισδιάστατων βασικών δομών περιλαμβάνει την κωδικοποίηση και την οπτικοποίηση των ογκομετρικών δεδομένων, όπως για παράδειγμα των γεωλογικών δομών του εδάφους. Επίσης, μπορούν να αναπαρασταθούν ογκομετρικά αντικείμενα και ειδικότερα η κίνηση και η παραμόρφωση ασαφών γεωαντικειμένων, π.χ. των συννέφων.

Η γεωοπτικοποίηση έχει πολλές εφαρμογές σε multitexturing μοντέλα, μερικές από τις οποίες περιλαμβάνουν την αναπαράσταση των πολυμερών θεματικών πληροφοριών μέσω μιας συλλογής βασικών δομών [Εικ.57]. Επίσης, περιλαμβάνουν οπτικούς συνδυασμούς των ανεξάρτητων δομών, καθώς και μια ποικιλία τοπικών στοιχείων των θεματικών δεδομένων μέσω της χρήσης κάποιου φίλτρου [Dykes J., MacEachren A. M., Kraak M. J., 2005, *Exploring Geovisualization*, Elsevier Ltd., All rights reserved]



Εικ.57 Στο σχήμα (α) φαίνονται πολλαπλές απεικονίσεις διαφόρων υφών μιας περιοχής ενώ στην εικόνα (β) βλέπουμε έναν συνδυασμό αυτών των υφών σε ένα μοναδικό μοντέλο [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).

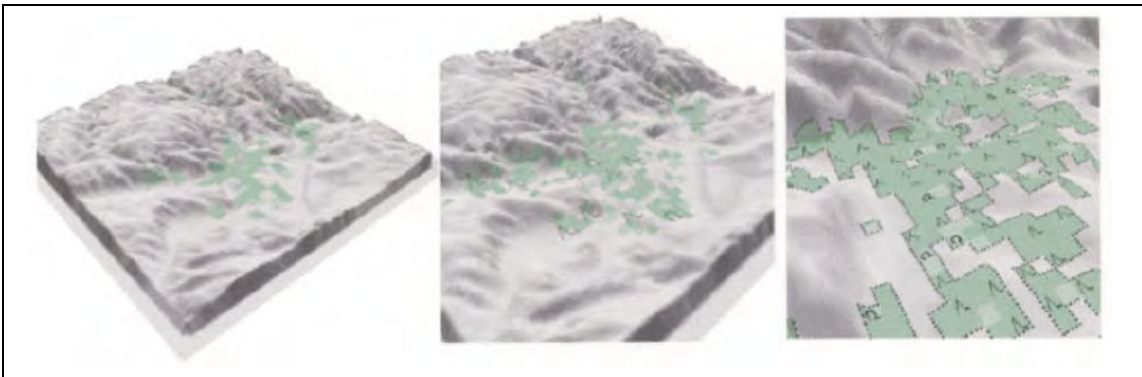
3.5. Δημιουργία δυναμικών υφών (Dynamic texture generation)

Ορισμός: Πρόκειται για μια διαδικασία που υποδηλώνει τη δυναμική δημιουργία αυτών των δεδομένων καθώς και την άμεση ανάπτυξη των αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία της απόδοσης. Ο δυναμικός τρόπος απόδοσης της υφής καθιστά εφικτή μια μεγάλη αλληλουχία τεχνικών αποτύπωσης των δεδομένων κυρίως των δυναμικών δεδομένων και των animated-παρουσιάσεων.

Εκτέλεση: Τα περιεχόμενα των βασικών δομών μπορούν να προσδιοριστούν στα δισδιάστατα διανυσματικά γραφικά από ιεραρχικές περιγραφές, όπως για παράδειγμα από τα γραφικά σχημάτων. Επίσης, αυτές οι δομές περιλαμβάνουν δισδιάστατα σχήματα (σημεία, γραμμές και πολύγωνα), καθώς και τις περιγραφές τους (χρώμα, πάχος και στυλ γραμμής).

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να κωδικοποιηθεί το περιεχόμενο μιας εικόνας έτσι ώστε να μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή οποιασδήποτε ανάλυσης. Πριν το στάδιο της απόδοσης η κύρια τρισδιάστατη σκηνή, της οποίας η περιγραφή αποδίδεται σε off-screen canva, ονομάζεται ψηφιακή ζώνη, γνωστή ως P - buffer σε ένα OpenGL σύστημα. Στη συνέχεια, το P - buffer αντιγράφεται στη μνήμη της δομής και σιγά σιγά η σκηνή μπορεί να αποδοθεί σε on-screen canva.

Εφαρμογές στην γεωαπεικόνιση: Ο δυναμικός τρόπος απόδοσης της συγκεκριμένης υφής προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης δυναμικών χαρτογραφικών αναπαραστάσεων. Στην εικόνα 58 επεξηγείται αυτή η διαδικασία στην περίπτωση θεματικών δεδομένων, μέσω της παράθεσης διαφορετικών επιπέδων λεπτομέρειας της απεικόνισης των χρήσεων γης. Ειδικότερα, η βλάστηση απεικονίζεται σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας με τη χρήση διαφορετικού χαρτογραφικού συμβολισμού. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην απόσταση από την κάμερα.



Εικ.58 Διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας απεικόνισης των χρήσεως γης [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).

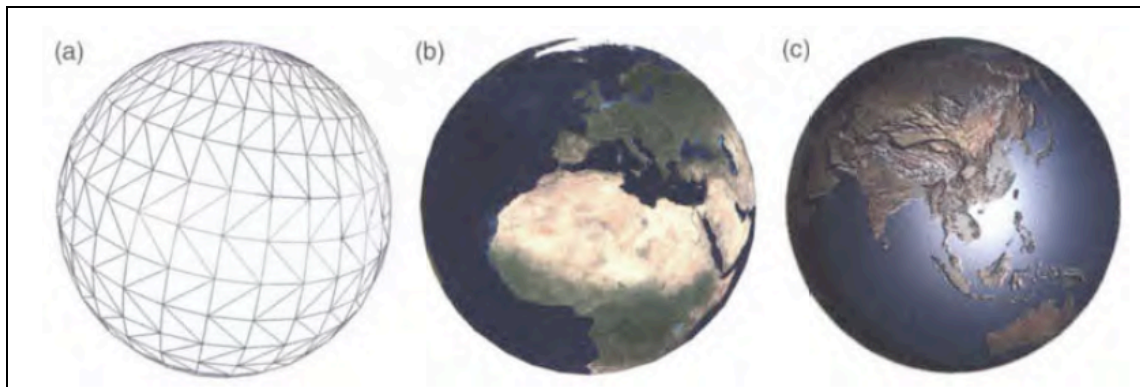
3.6. Προχωρημένες τεχνικές απόδοσης

Οι προχωρημένες τεχνικές απόδοσης αναφέρονται σε μια κατηγορία αλγορίθμων πραγματικού χρόνου τρισδιάστατης απόδοσης οι οποίοι επιτυγχάνουν ένα υψηλό βαθμό οπτικού ρεαλισμού και δυναμισμού. Γενικά, αυτές οι τεχνικές βασίζονται στον επαναληπτικό αλγόριθμο πολλαπλής απόδοσης και σκίασης.

Ορισμός: Ο επαναληπτικός αλγόριθμος απόδοσης χρειάζεται να επεξεργαστεί αρκετές φορές την απεικόνιση του τοπίου με τη χρήση διαφορετικών ρυθμίσεων. Γενικά, η τελευταία επανάληψη συνδυάζει τα αποτελέσματα των προηγούμενων επαναλήψεων σε μια εικόνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη χρήση του επαναληπτικού αλγόριθμου απόδοσης μπορούν να επιτευχθούν επιδράσεις, όπως η αντανάκλαση του φωτός, η σκίαση κλπ..

Εφαρμογές στην γεωαπεικόνιση: Το Bump-mapping (Kilgard, 2000) είναι μια προχωρημένη τεχνική απόδοσης που έχει σαν βάση της την multi-pass απόδοση, την προγραμματιστική γεωμετρία και τη σταδιακή σκίαση. Το Bump-map χρησιμοποιεί μια 2D υφή (texture) προσπαθώντας να αποδώσει την υψομετρία μιας περιοχής μέσω φωτισμού και σκίασης χωρίς να επεμβαίνει πραγματικά στη γεωμετρία της περιοχής.

Στην παρακάτω εικόνα [Εικ.59] αναπαρίσταται η γη και χρησιμοποιείται η μέθοδος Bump-map για να δώσει στην οπτικοποίηση μια πιο “ζωντανή” απεικόνιση με περισσότερο “βάθος” [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).



Εικ.59 (a) Γεωμετρική απεικόνιση της γης σε 3D, **(b)** Απεικόνιση της γης χρησιμοποιώντας κλασική υφή που αποδίδει γεωγραφικά χαρακτηριστικά στο γεωμετρικό μοντέλο, **(c)** Απόδοση υφής στη σφαίρα με παράλληλη χρήση της τεχνικής bump-map (Images: NVidia Inc.).

3.7. Η έννοια της κλίμακας σε περιβάλλον υπολογιστή

Η έννοια της κλίμακας αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία που είναι η χαρτογραφική κλίμακα, η συχνότητα δειγματοληψίας και η χωρική έκταση. Η πληροφορία που αναπαριστάται με τη χρήση των τριών διαστάσεων αποτελεί έναν τρόπο οπτικοποίησης των πολυδιάστατων δεδομένων (multi-dimensional data).

Η έννοια της κλίμακας μπορεί να περιγραφεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους και αλλάζει σε σχέση με το ποιός την επικαλείται και για ποιό σκοπό. Σε αυτήν τη διπλωματική εξετάζονται τρεις πτυχές της κλίμακας όπως έχουν αναφερθεί από Lam and Quattrochi [1992] (37).

Η κλασική θεώρηση της κλίμακας στη χαρτογραφία επιδεικνύει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους μιας χαρτογραφικής απεικόνισης και της ίδιας της απεικόνισης. Έτσι, ένας μεγάλος χάρτης περιγράφεται με μια απλή γραμμική αναλογία που δίνεται από μια σχέση αριθμών (πχ 1:2500). Αυτή η θεωρία είναι ικανοποιητική όσον αφορά κλασικούς χάρτες που απεικονίζονται σε χαρτί. Παρουσιάζει όμως ελλείψεις όταν καλείται να περιγράψει δυναμικούς χάρτες που μελετώνται με την βοήθεια του υπολογιστή.

Αυτό μπορεί να φανεί με τη χρήση ενός GIS software που η κλίμακα απεικόνισης των χωρικών δεδομένων μπορεί συνεχώς να αλλάζει. Πιο συγκεκριμένα, ακόμα και το μέγεθος της οθόνης του υπολογιστή μπορεί να επηρεάζει την κλίμακα. Επίσης, σε μια διαδικασία 'fly through' μιας 3D απεικόνισης η έννοια της σταθερής κλίμακας δεν υφίσταται.

Έτσι, σε τέτοια γραφικά περιβάλλοντα είναι δυνατό να 'σπάσουμε' την έννοια της κλίμακας σε 2 ημιανεξάρτητα τμήματα. Το ένα είναι το επίπεδο απεικόνισης της λεπτομέρειας (resolution) και το άλλο η χωρική έκταση-δηλαδή στο μέγεθος του (spatial extent or domain or geographic scale, Bian,1997). Έτσι, συνήθως όταν μεγαλώνουμε τη λεπτομέρεια (περισσότερες πληροφορίες) μικραίνει η έκταση της απεικόνισης (zoom in-zoom out). Λαμβάνοντας υπόψη όλα αυτά γίνεται κατανοητό ότι σε τέτοια ψηφιακά περιβάλλοντα η έννοια της κλίμακας δεν παίζει τόσο μείζονα ρόλο όσο στους κλασικούς χάρτες.

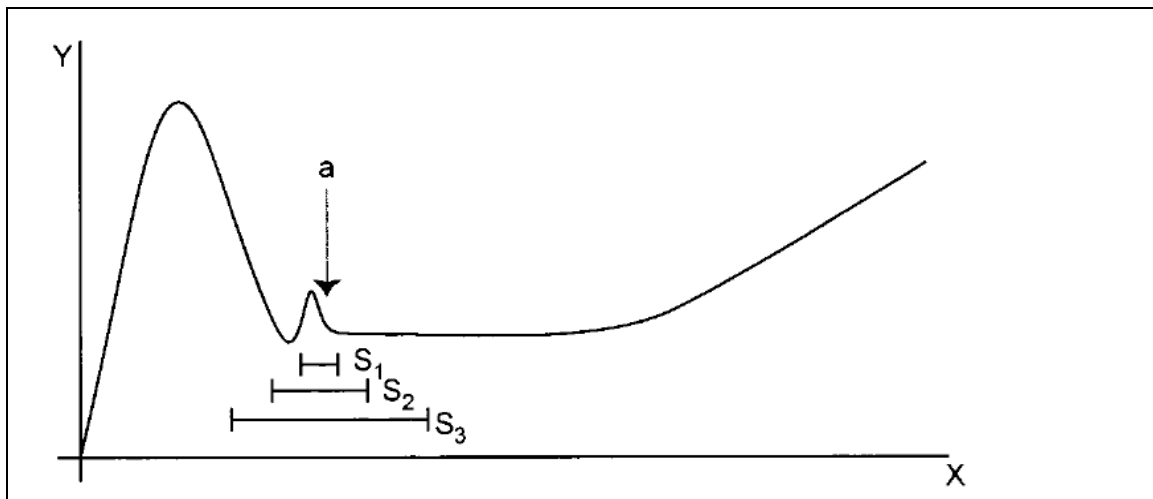
Άλλο ένα πρόβλημα που είναι στενά συνδεδεμένο με την έννοια της κλίμακας είναι η ικανότητα απεικόνισης των επιφανειών. Μια φυσική επιφάνεια έχει εξ' ορισμού άπειρα δυνατά σημεία που θα μπορούσαν να επιλεγούν. Οι υπολογιστές όμως μπορούν να πάρουν μόνο μερικά από αυτά τα σημεία ως δείγματα και μέσω αυτών να κάνουν την απεικόνιση της επιφάνειας που ζητείται. Έτσι το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι δεν μπορούμε να έχουμε μια φυσική (η ακόμα και ικανοποιητική) απεικόνιση σε όλες τις κλίμακες προβολής. Πιο συγκεκριμένα, όσο λιγότερα σημεία έχουμε για την απεικόνιση μιας επιφάνειας τόσο λιγότερο μπορούμε να εστιάσουμε πιο κοντά σε αυτήν έχοντας παράλληλα μια λογική-πραγματική επιφάνεια.

Προβλήματα που παρουσιάζονται από την επίδραση της κλίμακας (scale dependency)

Το παρακάτω μοντέλο [Εικ.60] μπορεί να απεικονίζει οποιαδήποτε 1D δεδομένα συνεχούς επιφάνειας. Υποθέστε ότι μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά του σημείου 'a' στην καμπύλη μας. Παρατηρούμε ότι τα σημειακά δεδομένα (μονό ένα μικρό σημείο) μπορούν εύκολα να μετρηθούν με τη βοήθεια των αξόνων για το σημείο μας. Αντιθέτως, οι γραμμικές ιδιότητες του σημείου (linear trend), όπως η τραχύτητα και η κλίση επηρεάζονται άμεσα από την κλίμακα απεικόνισης. Έτσι καλούμαστε να επιλέξουμε και κατάλληλη χωρική έκταση αλλά και απόσταση μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας ώστε να έχουμε συγκεκριμένα αποτελέσματα.

Παραδείγματος χάριν μετρώντας με βάση την κλίμακα S1, το σημείο a είναι τοπικό μέγιστο και έχει απότομη κλίση προς τα δεξιά. Μετρώντας όμως με τη κλίμακα S2 το σημείο μας είναι σχεδόν επίπεδο και βρίσκεται μέσα σε περιοχή τοπικού ελαχίστου. Και τα δυο αυτά αποτελέσματα είναι εξίσου έγκυρα και είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε αυτή τους την απόκλιση κατά τη μελέτη των δεδομένων [Fisher and Wood, 1998; Fisher et al., 2004](34).

Σε αυτήν την 1D στατική απεικόνιση η εξάρτηση της κλίμακας (scale dependency) ήταν εύκολο να αποδοθεί, όμως σε 2D και 3D απεικονίσεις αυτή η διαδικασία είναι πολύ πιο πολύπλοκη. Έτσι, για αυτές τις πολύπλοκες απεικονίσεις έχουν δημιουργηθεί τεχνικές όπως το "multi-scale parameterization (Wood, 1998)" και το "fractal characterization [Mark and Aronson, 1984 (38) ; Tate and Wood, 2001(39)]".



Εικ.60 Ιδιότητες μιας γραμμής σε 1D. Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης αλλάζουν ανάλογα με τη κλίμακα μέτρησης που χρησιμοποιούμε. Έτσι, χαρακτηριστικά όπως η κλίση, η κυρτότητα, η τραχύτητα και άλλα μετασχηματίζονται ανάλογα με την επιλογή που κάνουμε [J. Dykes, A.M. Maceachren, M.-J. Kraak, 2005] (34).

Κεφάλαιο 4: Υλοποίηση Μοντέλου Τσουνάμι 365 μ.Χ.

4.1. Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία της 3D οπτικοποίησης του παλιού λιμανιού των Χανίων κατά την περίοδο του 365 μ.Χ.. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη οπτικοποίηση, θα προσπαθήσουμε να αναπαράγουμε το τσουνάμι κατά τη χρονική στιγμή που φτάνει στο λιμάνι των Χανίων και πλημμυρίζει τη στεριά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε ότι αυτό είναι εν μέρει ένα φανταστικό σενάριο, μιας και η μορφή και το πολεοδομικό σχέδιο του παλιού λιμανιού σήμερα δεν έχει καμία σχέση με τη μορφή που είχε το 365 μ.Χ.. Εμείς έχουμε κάνει χρήση του σημερινού πολεοδομικού σχεδίου, σε σχέση με το πραγματικό τσουνάμι του 365 μ.Χ.. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να δείξουμε πόσο μεγάλο αντίκτυπο θα είχε ένα αντίστοιχο γεγονός στην ίδια περιοχή, με τα σημερινά δεδομένα. Το μοντέλο του κύματος τσουνάμι δημιουργήθηκε με τη χρήση του κώδικα MOST, που αποτελεί έναν από τους κορυφαίους και πιο αξιόπιστους κώδικες μοντελοποίησης κυμάτων τσουνάμι.

4.2. Εισαγωγή

Αν και η 3D μοντελοποίηση μιας περιοχής μπορεί να φαντάζει κάτι απλό στις μέρες μας που υπάρχει μια συνεχή ανάπτυξη μεγάλης πληθώρας εφαρμογών τόσο σε επίπεδο υπολογιστών όσο και σε επίπεδο γραφιστικών μεθόδων και animation, δεν είναι μια καθόλου απλή υπόθεση.

Για τη δημιουργία της απεικόνισης αυτής ερευνήθηκαν πολλά προγράμματα και μεθοδολογίες καθώς συνεχείς αλλαγές και εξελίξεις στους τομείς αυτούς οδηγούν συνέχεια στην ανακάλυψη καλύτερων και γρηγορότερων εφαρμογών προς χρήση. Για τη δημιουργία αυτού του μοντέλου απαιτήθηκε συνδυασμός και παράλληλη χρήση πολλών προγραμμάτων που πολλές φορές συνοδεύεται και από ασυμβατότητες των δεδομένων τους. Προβλήματα όπως σφάλματα στη γεωαναφοράτων περιοχών, διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων, ελλιπή δεδομένα καθώς και προβλήματα στην επεξεργασία των στοιχείων, οδήγησαν σε αδιέξοδο και αλλαγές στο προκαθορισμένο διάγραμμα ροής της διαδικασίας μας.

4.3. Προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν

Πολλά προγράμματα μελετήθηκαν έως ότου γίνει η τελική επιλογή των παρακάτω εξής προγραμμάτων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν:

- **Google Earth**
- **Google Sketchup 6 & 7**
- **Global Mapper 11**
- **Arcgis 9.3 → ArcGlobe (3D Analyst extension)**
- **AutoCad 2010**
- **Google Ozi**
- **Adobe Photoshop CS4**

4.3.1. Google Sketchup 6 & 7

Περιγραφή

Το Google Sketchup αποτελεί ένα σύγχρονο και πολύ επαναστατικό πρόγραμμα για τη σχεδίαση κτιρίων, εξωτερικών και εσωτερικών χώρων καθώς και άλλων ανθρώπινων κατασκευών. Η πολύ απλή λογική του, η εύκολη και άμεση εφαρμογή των εργαλείων του σε συνδυασμό με την γρήγορη και ευχάριστη εκμάθησή του, το κάνουν ιδανικό για το σχεδιασμό των 3D κτιρίων του παλιού λιμανιού, σε αντίθεση με άλλα πιο δύσχρηστα αρχιτεκτονικά εργαλεία, όπως το AutoCad και το Maya. Επιπλέον, η πολύ εύκολη αλληλεπίδραση των δεδομένων του με το Google Earth καθώς και η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων του σε διάφορες πολύ διαδεδομένες μορφές όπως VRML (3D programming language), KMZ (Google Earth), DXF (AutoCad), DWG (AutoCad), DAE (Collada) κτλ. το κάνουν εύκολα "συνεργάσιμο" με πολλά άλλα προγράμματα.

Προβλήματα

Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα που έχει το Google Sketchup είναι η αδυναμία του να εισάγει άλλα δεδομένα εκτός από αυτά του Google Earth. Αυτό δημιούργησε πολλά προβλήματα στη διαδικασία της οπτικοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, τα μεγάλα σφάλματα στους ορθοφωτοχάρτες (γεωαναφερμένες αεροφωτογραφίες) της

περιοχής του παλιού λιμανιού των Χανίων του προγράμματος Google Earth έκαναν σχεδόν αδύνατη τη σωστή τοποθέτηση των κτιρίων πάνω στο χάρτη.

Άλλο ένα σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι η αδυναμία του Sketchup να χειριστεί σωστά άλλα γεωαναφερόμενα δεδομένα. Η εισαγωγή άλλων δεδομένων (εκτός Google Earth) ήταν δυνατή μέσω της χρήσης ενός plug-in που επέτρεπε την ελεύθερη αλληλεπίδραση μεταξύ sketch-up v.6 και ArcGis 9.2.. Δυστυχώς η μη επαρκής ανανέωση και αναβάθμιση του προγράμματος από την εταιρεία οδήγησε σε σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, αν και μέσα από πολύπλοκες μεθόδους καταφέραμε να γίνει εισαγωγή “ξένου” ορθοφωτοχάρτη στο Sketchup, αδυναμίες παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της 3D σχεδίασης των κτηρίων, καθώς πολλές επιφάνειες εξαφανίζονταν και εμφανίζονταν κατά την περιήγηση στο μοντέλο και κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Ένα άλλο πρόβλημα που ο χρήστης αντιμετωπίζει με το Sketchup είναι η αδυναμία του προγράμματος να εισάγει μια έγχρωμη κάτοψη στο γραφικό του περιβάλλον. Έτσι, το πρόγραμμα εισάγει κατόψεις μονό σε ασπρόμαυρη μορφή κάνοντας τις επιθυμητές γραμμές σχεδίασης πιο δυσδιάκριτες. Στο σημείο αυτό πρέπει να πούμε ότι το συγκεκριμένο εμπόδιο μπορεί να ξεπεραστεί αν ο χρήστης κάνει έξυπνη χρήση των εργαλείων που το ίδιο το πρόγραμμα του προσφέρει.

Διαδικασία σχεδίασης κτιρίων

Η διαδικασία που ακλουθήθηκε για την σχεδίαση των κτιρίων στο Sketchup έχει ως εξής:

- 1) Εισαγωγή όλων των δεδομένων με μορφή <<WGS 1984>> συντεταγμένων στο Google Earth με σωστή σειρά.
- 2) Με την ειδική εντολή στην εργαλειοθήκη του Sketchup εισάχθηκαν τα δεδομένα που απεικονίζονταν στην επιφάνεια του Google Earth με μορφή κάτοψης και συντεταγμένες.
- 3) Μέσω εργαλείων έγινε η ασπρόμαυρη κάτοψη έγχρωμη, όπως ακριβώς δηλαδή εμφανίζεται και στο Google Earth. Αυτό κάνει πιο εύκολη και ακριβή τη διαδικασία σχεδίασης των κτιρίων, ειδικά στην περίπτωση μας, που χρησιμοποιήθηκαν και κατόψεις κτιρίων από σχέδια του AutoCad.
- 4) Με σωστή τοποθέτηση των σχεδιαστικών αξόνων, μελέτη φωτογραφιών, αεροφωτογραφιών, προσωπικές σημειώσεις και παρατηρήσεις στο χώρο, ξεκινά η εξωτερική σχεδίαση των κτιρίων του λιμανιού.
- 5) Με το πέρας της εξωτερικής σχεδίασης (γεωμετρίας) των κτιρίων στο χώρο, αρχίζει η τοποθέτηση φωτογραφιών πάνω στις επιφάνειες που θα δώσει ένα βαθμό ρεαλισμού και διαφοροποίησης στις μονότονες γεωμετρικές κατασκευές.

4.3.2. Google Earth

Γενικά

Το Google Earth αποτελεί μια εφαρμογή στην οποία υπάρχει ελεύθερη πρόσβαση στο Internet και οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να την ενσωματώσουν σε οποιοδήποτε λειτουργικό σύστημα όπως: windows (2000/XP/Vista), Linux, MacOSX. Το γεγονός ότι υποστηρίζει όλα αυτά τα λειτουργικά συστήματα είναι ένα δείγμα του αριθμού των χρηστών ηλεκτρονικών υπολογιστών για τους οποίους είναι διαθέσιμο αλλά και χρήσιμο. Επίσης, το ευρύ φάσμα γλωσσών που υποστηρίζει συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του αριθμού των χρηστών που το χρησιμοποιούν. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του Google Earth είναι η τρισδιάστατη απεικόνιση της γήινης σφαίρας και οι δυνατότητες που προσφέρει στους χρήστες για πλοήγηση, εστίαση σε συγκεκριμένες περιοχές, αλλά και την πρόσβαση σε όλα τα σημεία της γης. Σε ότι αφορά το Google Earth, πρόκειται για ένα πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε το 2004 από την εταιρία που αργότερα αγοράστηκε από την Google. Το πρόγραμμα αρχικά έγινε γνωστό με το όνομα Earth Viewer, ενώ η μετονομασία σε Google Earth έγινε το 2005. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι πλέον διαθέσιμο για χρήση σε προσωπικούς υπολογιστές όπου «τρέχουν » γνωστά λειτουργικά όπως το Microsoft Windows 2000 ή XP, το Mac OSX 10.3.9 και το Linux. Οι χάρτες που διατίθενται στο Google Maps έχουν τέτοια ανάλυση που επιτρέπει το διαχωρισμό των κτιρίων, των σπιτιών αλλά και των αυτοκινήτων. Σε μερικές περιοχές η ανάλυση είναι ακόμα μεγαλύτερη σε τέτοιο βαθμό που επιτρέπει τη διάκριση των ανθρώπινων φιγούρων. Αυτό συμβαίνει σε πόλεις όπως το Λονδίνο, η Ουάσιγκτον και το Σιάτλ. Η ανάλυση ποικίλλει ανάλογα με το ενδιαφέρον μιας περιοχής, αν και όλη η γη καλύπτεται από εικόνες με ανάλυση τουλάχιστον 15 μέτρων.

Η Γλώσσα KML

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τη γλώσσα KML. Πρόκειται για μια γλώσσα που βασίζεται στην γλώσσα XML, ούτως ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση της τρίτης διάστασης. Τα αρχεία KML συνήθως «εμφανίζονται» ως KMZ, ενώ προσδιορίζουν ένα χαρακτηριστικό όπως μια εικόνα, ένα πολύγωνο ή ένα σύμβολο μιας θέσης. Τέλος, το αρχείο KML περιέχει μια βασική περιγραφή μιας θέσης, όπως το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος, το αζιμούθιο και άλλες πληροφορίες σχετικά με τη θέση της κάμερας. Πρόκειται για μια γλώσσα τα αρχικά της οποίας προέρχονται από τις λέξεις Keyhole Markup Language (Keyhole). Η γλώσσα αυτή αποτελεί στην ουσία το μέσο με το οποίο γίνεται η αποθήκευση πληροφοριών στο Google Earth (Google Maps, Google Maps for mobile). Το Google Earth και συγκεκριμένα το «Google Maps» και το «Google Maps for mobile» αν και κάνουν χρήση ενός μικρού μέρους της KML, αναμφισβήτητα θεωρείται το πιο δυνατό μέσο το οποίο βοηθά στην διάδοση αλλά διάθεση πληροφοριών, κάνοντάς τις διαθέσιμες για διαφορετικές εφαρμογές. Σύμφωνα με το Google, η KML χρησιμοποιείται όχι μόνο για την κατάδειξη σημείων ενδιαφέροντος με τη χρήση τόσο εικονιδίων, όσο και ετικετών, αλλά και για τη χρήση εικόνων τις οποίες μπορεί κανείς με βάση κάποιες συντεταγμένες να ορίσει τη χωρική θέση τους στο έδαφος ή σε συγκεκριμένα σημεία στην οθόνη. Επίσης, η συγκεκριμένη γλώσσα δίνει τη δυνατότητα

δημιουργίας διαφορετικών θέσεων για την θέση της κάμερας με την οποία μπορεί κάποιος να δει τα σημεία που τον ενδιαφέρουν. Μια ακόμα δυνατότητα που προσφέρει η KML είναι αυτή του ορισμού διαφορετικών “styles” για το καθορισμό της εμφάνισης κάποιων χαρακτηριστικών. Κάποιες επιπλέον εφαρμογές της αναφέρονται στην έκθεση τρισδιάστατων αντικειμένων (COLLADA).

Προβλήματα

Το πιο σημαντικό πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας όσον αναφορά στο Google Earth είναι τα μεγάλα σφάλματα που έχουν οι αεροφωτογραφίες του προγράμματος πάνω από την περιοχή των Χανιών. Αυτό δημιούργησε πολλά προβλήματα μιας και έπρεπε να εισάγουμε νέες γεωαναφερμένες αεροφωτογραφίες, έτσι ώστε να αποφύγουμε τα σφάλματα στη σχεδίαση των κτιρίων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη έλλειψη δεδομένων που υπάρχουν για τη περιοχή των Χανιών, έκανε το πρόβλημα δυσχερέστερο.

Άλλο ένα πρόβλημα, είναι η αδυναμία του Google Earth να εισάγει πολλές μορφές δεδομένων, όπως παραδείγματος χάριν αρχεία του του ArcGIS. Αυτό οδηγεί σε χρονοβόρες διαδικασίες μετατροπής των δεδομένων από τη μια μορφή στην άλλη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αλληλεπίδραση των προγραμμάτων.

4.3.3. Global Mapper 11

Το Global Mapper είναι ένα σύγχρονο και πολύ εύχρηστο πρόγραμμα GIS που τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πάρα πολύ διάσημο λόγω των μεγάλων δυνατοτήτων του αλλά και της πολύ μεγάλης ευκολίας του. Αν και δε διαθέτει όλες εκείνες τις παραμέτρους των άλλων GIS προγραμμάτων έχει κάποια πάρα πολύ αξιόλογα χαρακτηριστικά

- Πολύ μεγάλη ευκολία στη διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων αλλά και στην εκμάθηση του προγράμματος.
- Εκτεταμένες δυνατότητες εισαγωγής και εξαγωγής πληθώρας δεδομένων με πολύ συνοπτικές διαδικασίες.
- Άμεση οπτικοποίηση δεδομένων στις δύο και τρεις διαστάσεις.
- Πολύ καλή τεχνική υποστήριξη μέσω της επίσημης ιστοσελίδας και του Forum της εταιρείας.
- Πολύ καλή τιμή.

Αν και οι δυνατότητες του προγράμματος δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτές του ArcGIS, η μεγάλη ευκολία στη μετατροπή δεδομένων συνέβαλε πολύ στη γρήγορη

ολοκλήρωση της εργασίας. Φυσικά, αυτές οι μετατροπές θα μπορούσαν να γίνουν και μέσω του προγράμματος ArcGIS, όμως η διαδικασία θα ήταν πιο χρονοβόρα και περίπλοκη σε ορισμένες περιπτώσεις.

4.3.4. ArcGIS

Το **ArcGIS** είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού GIS. Παρέχει μια πλατφόρμα για διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης.

Χρησιμότητα του ArcGIS

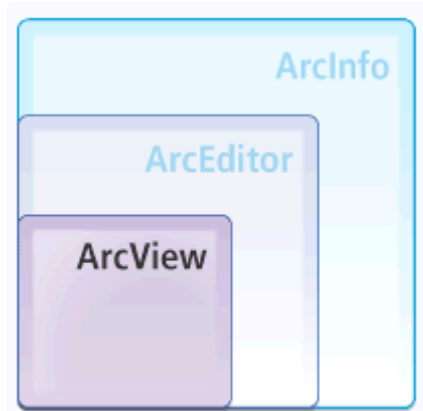
- **Διαχείριση δεδομένων/ πόρων:** ενσωμάτωση συστημάτων, διαχείριση υποθέσεων/αξιώσεων, διαχείριση περιοχών εξυπηρέτησης/ ευθύνης και διαχείριση πελατών.
- **Ανάλυση και σχεδιασμός:** προβλέψεις και ανάλυση κινδύνου.
- **Επιχειρησιακές διαδικασίες:** τηλεφωνικό κέντρο/αποστολές, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων από το πεδίο, επιθεωρήσεις, συντήρηση και λειτουργίες, δρομολόγηση.
- **Επίγνωση καταστάσεων:** υποστήριξη λήψης αποφάσεων και πρόσβαση από πελάτες/κοινό.

ArcGIS - Desktop

Το **ArcGIS Desktop** περιλαμβάνει μία ομάδα από ενοποιημένες εφαρμογές, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται **ArcCatalog**, **ArcMap**, **ArcGlobe**, **ArcToolbox** και **ModelBuilder**. Η ενοποιημένη αξιοποίηση των εφαρμογών ArcGIS Desktop επιτρέπει στους χρήστες της τεχνολογίας των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών να υλοποιήσουν οποιαδήποτε εργασία με επίκεντρο το χώρο, από την πιο απλή έως την πιο πολύπλοκη, όπως είναι η χαρτογραφία, η γεωγραφική ανάλυση, η επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων, η μετατροπή μεταξύ διαφορετικών μορφότυπων δεδομένων, η απεικόνιση, η διαχείριση των δεδομένων κ.α. Η δομή του ArcGIS Desktop είναι κλιμακούμενη ως προς τις δυνατότητές της προκειμένου να εκπληρώσει τις απαιτήσεις των διαφορετικών τύπων χρηστών. Έτσι, έχουν διαμορφωθεί τρία διακριτά επίπεδα δυνατοτήτων του λογισμικού ArcGIS Desktop που έχουν ως εξής:

- Λογισμικό απεικόνισης, επεξεργασίας και ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων – **ArcView**.
- Λογισμικό πλήρους διαχείρισης και επεξεργασίας των γεωγραφικών δεδομένων - **ArcEditor**.

- Λογισμικό πλήρους διαχείρισης, επεξεργασίας και ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων - **ArcInfo**.



Εικ.61 Διαβάθμιση λογισμικού ArcGIS
[<http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/index.html>]

ArcInfo

Το λογισμικό **ArcInfo** εμπεριέχει πλήρως τις λειτουργικές δυνατότητες των λογισμικών **ArcEditor** και **ArcView**, προσφέροντας επιπλέον τεχνικές προχωρημένων χωρικών αναλύσεων, διαχείρισης χωρικών δεδομένων και υψηλής χαρτογραφικής απόδοσης. Αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη λύση λογισμικού **GIS-Desktop**, έχοντας ως αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά:

- **Στο πεδίο της χωρικής ανάλυσης:** ένας μεγάλος αριθμός εργαλείων γεωγραφικής επεξεργασίας δίνει στο λογισμικό **ArcInfo** τη δυνατότητα υλοποίησης προχωρημένων αναλύσεων των χωρικών δεδομένων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι επόμενες δυνατότητες:
 1. Αναλύσεις επικάλυψης όπως Ένωση, Διατομή, Απαλοιφή.
 2. Αναλύσεις εγγύτητας όπως Δημιουργία ζώνης επιρροής, Εγγύτητα, Απόσταση σημείων.
 3. Αναλύσεις επιφανειών όπως Όψης, Σκίασης, Κλίσης.
 4. Επεξεργασία και μετατροπή πλεγματικών δεδομένων.
- **Στο πεδίο της διαχείρισης χωρικών δεδομένων:** στο λογισμικό ArcInfo προσφέρονται τεχνικές εκτεταμένης διαχείρισης του σχήματος και των δεδομένων της γεωγραφικής βάσης δεδομένων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι επόμενες δυνατότητες:
 1. Δημιουργία γεωγραφικών βάσεων δεδομένων ενός ή πολλών χρηστών.

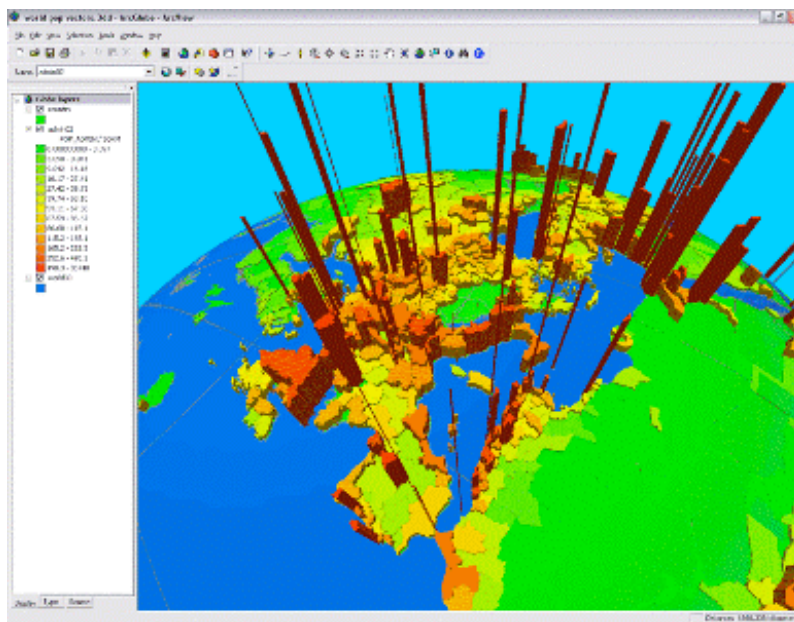
2. Εφαρμογή τεχνικών χωρικής ανάλυσης για τη μεταφορά δεδομένων από και προς την γεωγραφική βάση δεδομένων.
3. Μετατροπή των δεδομένων της γεωγραφικής βάσης σε πολλούς, διαφορετικούς μορφότυπους.
4. Υλοποίηση μαζικών επεξεργασιών στα δεδομένα της γεωγραφικής βάσης.

ArcGIS Extensions

Οι επεκτάσεις του περιβάλλοντος του ArcGIS, αποτελούν ξεχωριστά προϊόντα τα οποία προσθέτουν επιπλέον λειτουργικότητα στο λογισμικό πακέτο. Αυτά τα εξειδικευμένα εργαλεία επιτρέπουν στο χρήστη να ασχοληθεί με προχωρημένα θέματα, όπως **τρισδιάστατη οπτικοποίηση, χωρική ανάλυση, γεωστατιστική, ανάλυση δικτύων**, και πολλά ακόμα.

ArcGIS 3D Analyst

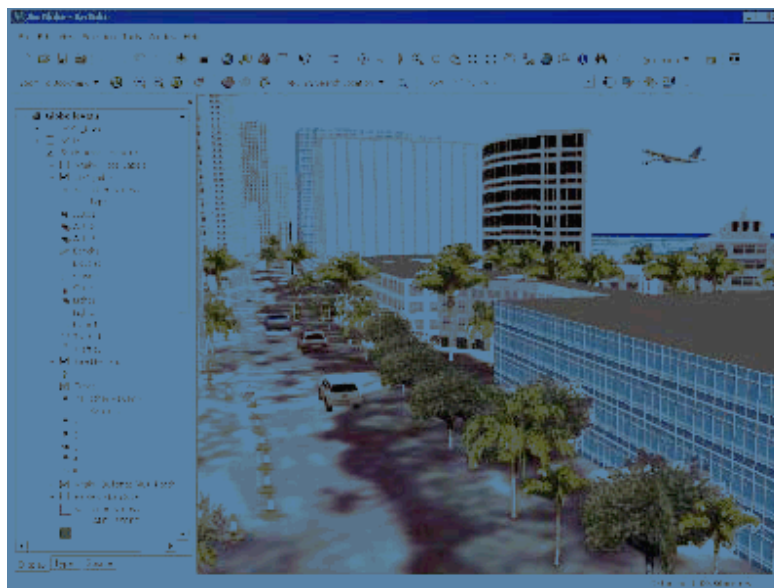
Το ArcGIS 3D Analyst είναι μια από τις βασικότερες επεκτάσεις του ArcGIS Desktop που επιτρέπει την αποτελεσματική απεικόνιση και ανάλυση δεδομένων. Η σημαντικότερη λειτουργία του, είναι η απεικόνιση της τρίτης διάστασης από ψηφιακά δεδομένα τα οποία έχουν στη βάση τους κάποια τιμή z (π.χ: ύψος, βάθος). Είναι επίσης η μόνη επέκταση που προσφέρει το δικό της εξειδικευμένο περιβάλλον εργασίας για την απεικόνιση, διαχείριση και ανάλυση των τρισδιάστατων δεδομένων, το ArcScene. Χρησιμοποιώντας το ArcGIS 3D ArcGIS, μπορείτε να δείτε μια επιφάνεια από τις πολλές οπτικές γωνίες, να θέσετε ερωτήματα σχετικά με μια επιφάνεια, με τους κατάλληλους αλγόριθμους να καθορίσετε τις περιοχές που είναι ορατές από μια επιλεγμένη θέση σε μια επιφάνεια, να δημιουργήσετε μια ρεαλιστική εικόνα προοπτικής που περιβάλει πλεγματικά και διανυσματικά στοιχεία πάνω από μια επιφάνεια και επιπλέον να καταγράψετε ή να εκτελέσετε τρισδιάστατη πλοήγηση.



Εικ.62 Απεικόνιση στο λογισμικό ArcGlobe, του πακέτου ArcGIS
[\[http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/brochures-whitepapers.html\]](http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/brochures-whitepapers.html)

Με το **ArcGIS 3D Analyst**, μπορούμε:

- Να δημιουργήσουμε τρισδιάστατες απόψεις χρησιμοποιώντας άμεσα τα GIS δεδομένα μας.
- Να αναλύσουμε τρισδιάστατα αντικείμενων με εργαλεία όπως τα cut/fill, line-of-sight και μοντελοποίηση της γήινης επιφάνειας.
- Να δούμε τα στοιχεία μας από σφαιρική σε τοπική προοπτική.
- Να πλοηγηθούμε ομαλά σε δεδομένα εδάφους και σε εικόνες με πολλαπλή ανάλυση.
- Να κάνουμε τη χωρική ανάλυση σε δύο ή τρεις διαστάσεις.
- Να απεικονίσουμε τα αποτελέσματα μοντελοποίησης ή ανάλυσης στις τρεις διαστάσεις.
- Να εξάγουμε τις οστικοποιήσεις μας σε βίντεο.
- Να χρησιμοποιήσουμε τρισδιάστατα μοντέλα και σύμβολα για πιο ρεαλιστική απεικόνιση.



Εικ.63 Απεικόνιση με τη χρήση του ArcView software, του πακέτου ArcGis
[\[http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/brochures-whitepapers.html\]](http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/brochures-whitepapers.html)

ArcGlobe - ArcScene

Γενικά

Το ArcGlobe είναι μια εφαρμογή για 3D οπτικοποίηση, η οποία επιτρέπει την οπτικοποίηση και παρακολούθηση έναν μεγάλο όγκο GIS δεδομένων πάνω σε σφαιρική επιφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η ανάλυση και η χωροθέτηση δεδομένων και κατασκευών με πραγματικές γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Μέσω του ArcGlobe, είναι δυνατή η μετάβαση από μια μακροσκοπική οπτικοποίηση δεδομένων σε ένα πολύ συγκεκριμένο σημείο (μικροσκοπική οπτικοποίηση), που ίσως είναι και ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής. Επίσης το ArcGlobe προσφέρει αυτόματα υψομετρικά δεδομένα ανά 30m όλης της γης στο χρήστη, ενώ επιτρέπει και την αντικατάστασή τους από οποιαδήποτε δεδομένα έχει ο χρήστης.

Το ArcGlobe είναι το βασικό εργαλείο, στο οποίο έγινε η προσπάθεια τελικής οπτικοποίησης των δεδομένων του τσουνάμι. Οι λόγοι που επιλέχτηκε η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι πολλοί. Μερικοί από αυτούς είναι:

- Η μεγάλη ικανότητα εισαγωγής δεδομένων (δέχεται και KML αρχεία και όλα τα αρχεία του ArcGIS).
- Ολοκληρωμένοι ορθοφωτόχαρτες σε όλη την επιφάνεια της γης χωρίς σημαντικά σφάλματα.
- Εκτεταμένες δυνατότητες animation, fly-through, time series animation.
- Εύκολη σχετικά χρήση.

Εφαρμογές

Η αρχική ιδέα μας ήταν η εξολοκλήρου σχεδίαση ενός τμήματος του παλιού λιμανιού σε 3D μορφή και η πραγματική οπτικοποίηση του τσουνάμι του 365 μ.Χ. στην περιοχή αυτή. Για την υλοποίηση θα γινόταν χρήση των εφαρμογών ArcGlobe και ArcScene του πακέτου ArcGis. Αν και ένα μέρος αυτής της ιδέας υλοποιήθηκε με επιτυχία, η αναπαράσταση 3D κυματικών δεδομένων εντός του ArcGlobe δεν ήταν εφικτή λόγω της αδυναμίας του προγράμματος να κάνει μια σωστή απεικόνιση αυτών των δεδομένων.

Προβλήματα

ArcGlobe

Δυστυχώς, αν και έγιναν πολλές προσπάθειες για την απεικόνιση των κυματικών δεδομένων του τσουνάμι του 365 μ.Χ. εντός του προγράμματος ArcGlobe, τελικά αυτό δεν ήταν εφικτό. Μετά από πολλές δοκιμές καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το πρόγραμμα δεν μπορεί να δεχτεί τα κυματικά δεδομένα και να τα απεικονίσει σωστά στο χώρο.

ArcScene

Αν και η απεικόνιση των κυμάτων ήταν δυνατή τόσο με μορφή 2D όσο 3D εντός της εφαρμογής ArcScene, δεν ήταν δυνατή η πλήρης αναπαραγωγή του μοντέλου μας. Πιο συγκεκριμένα, εντός της εφαρμογής ArcScene δεν είναι δυνατή η αναπαράσταση των 3D κτιρίων του παλιού λιμανιού των Χανίων, μιας και δεν είναι δυνατή εισαγωγή KML αρχείων. Έτσι η χρήση του προγράμματος αυτού περιορίστηκε στην αναπαραγωγή του κύματος σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής.

Αποτελέσματα

Αν και δεν πραγματοποιήθηκε η πλήρης απεικόνιση των δεδομένων έτσι ώστε να γίνει δυνατή η 3D οπτικοποίηση του τσουνάμι, έγινε μια πολύ λεπτομερής τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμορφολογίας του παλιού λιμανιού και των κτιρίων του.

Με τη χρήση του ArcGis ήταν εφικτά να γίνουν:

- Μια πολύ λεπτομερής 3D κατασκευή και αναπαράσταση της γεωμορφολογίας της περιοχής των Χανίων.
- Δημιουργία ενός ρεαλιστικού 3D μοντέλου της παλιάς πόλης των Χανίων.
- Δημιουργία animation με ικανότητα ‘fly through’ στην παραπάνω περιοχή ενδιαφέροντος.

- Αναπαράσταση του τσουνάμι σε 3D μορφή και δημιουργία animation σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής του παλιού λιμανιού.

Έτσι τελικά ένα μεγάλο μέρος των αρχικών στόχων της παρούσας εργασίας επιτεύχθηκε μέσω του προγράμματος ArcGIS.

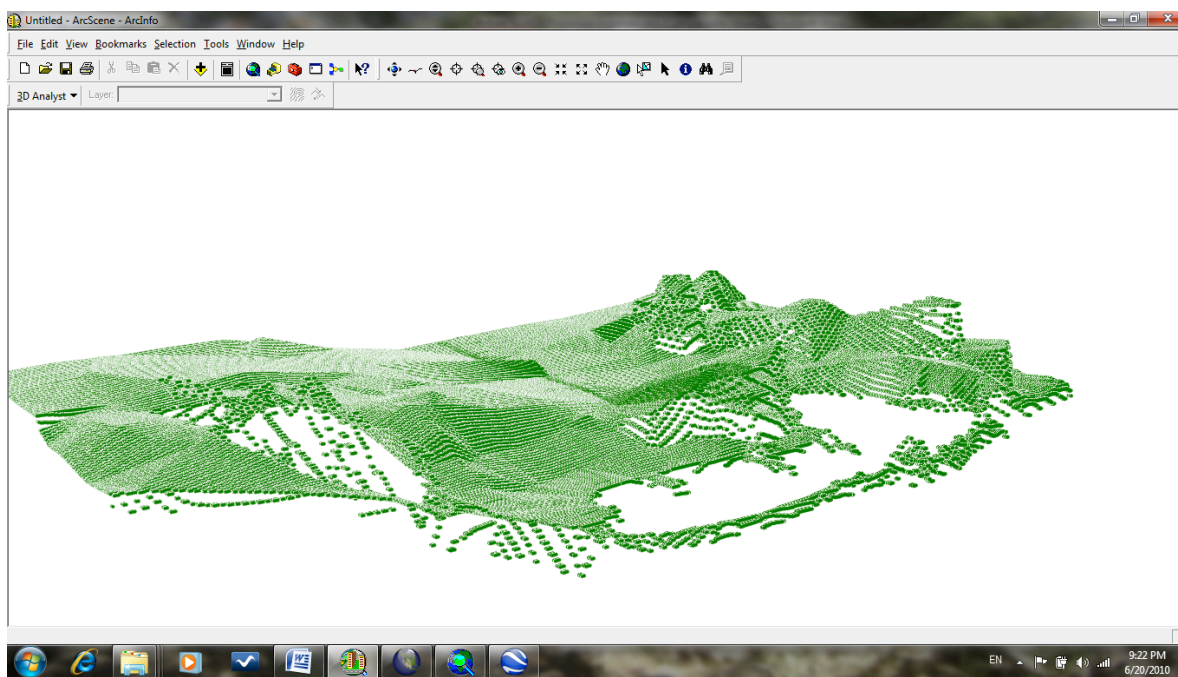
4.4. Λεπτομερής διαδικασία σχεδίασης μοντέλου

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια λεπτομερής αναφορά στα βήματα που ακολουθηθήκαν για τη δημιουργία του 3D μοντέλου της Παλιάς Πόλης των Χανίων.

4.4.1. Δημιουργία 3D τοπογραφίας

1. Μέσω της εφαρμογής ArcScene και των εργαλείων ‘ArcToolbox’ του ArcGIS, έγινε δυνατή η μετατροπή των τοπογραφικών δεδομένων μας από τη μορφή ASCII σε Shapefile. Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιήθηκε η εντολή ‘ASCII 3D to Feature Class’ [Εικ.64].

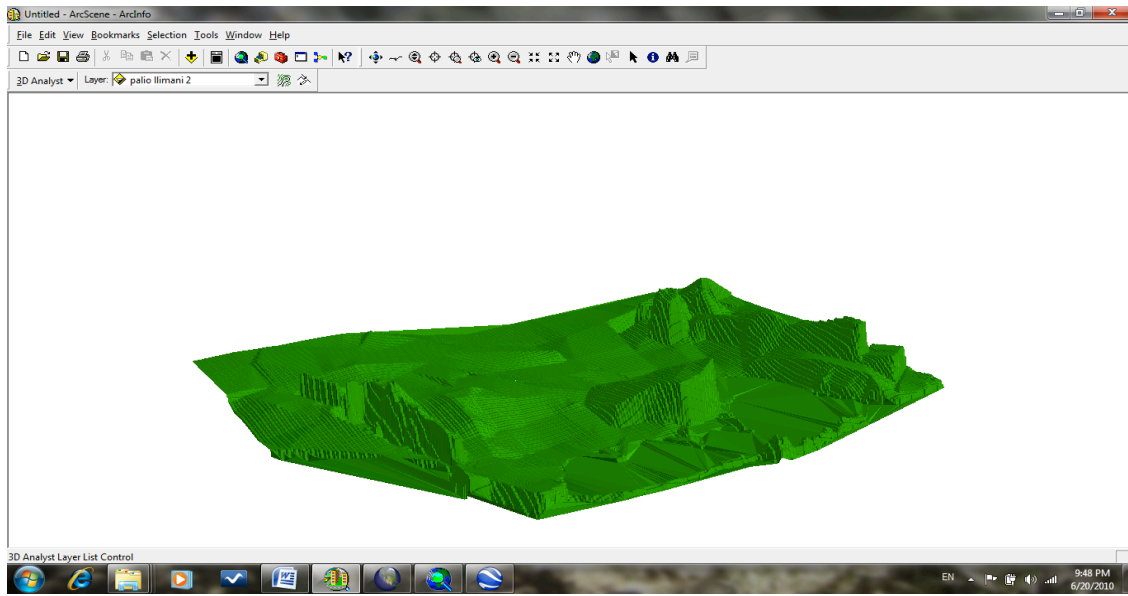
<<ArcToolbox → 3D Analyst Tools → Conversion → From File → ASCII 3D to Feature Class>>



Εικ.64 Δημιουργία shapefile από τα δεδομένα ASCII στη περιοχή των Χανίων

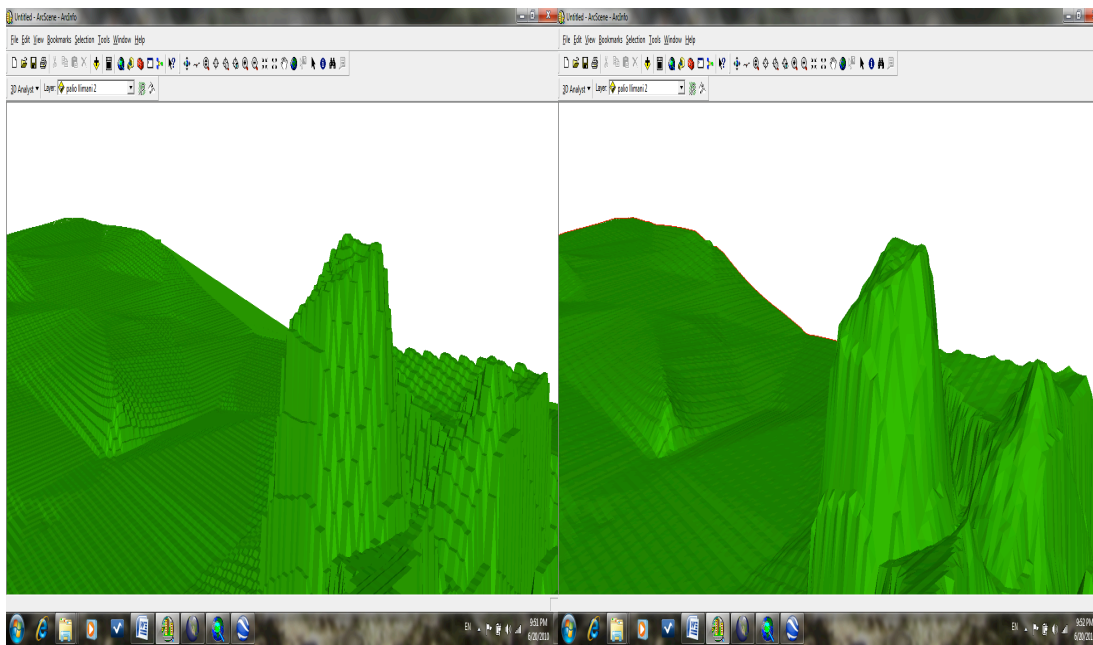
2. Μετατροπή των συντεταγμένων του μοντέλου μας από 'Greek Grid' στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων 'WGS 1984' μέσω της εφαρμογής ArcMap.
3. Δημιουργία 3D επιφάνειας μέσω του extension 3D Analyst.
 << Στο κεντρικό παράθυρο του ArcMap κάνουμε δεξί κλικ → Data Frame Properties → Coordinate System → Predifined → Geographic Coordinate System → World → WGS 1984>>
4. Δημιουργία 3D επιφάνειας μέσω του extension 3D Analyst [Εικ.65].

<<Από toolbar 3D Analyst → Create/ Modify TIN → Create TIN>>



Εικ.65 Δημιουργία TIN επιφάνειας από το shapefile αρχείο μέσω του 3D analyst

5. Επειδή τα δεδομένα είναι πολύ λεπτομερή (ανά 2 μετρά), η επιφάνεια που δημιουργείται έχει μεγάλη λεπτομέρεια και αυτό την κάνει μη ομαλή. Για να γίνει πιο ομαλή και πιο ρεαλιστική ακολουθείται η εξής διαδικασία: Δημιουργείται ένα 3D Raster αρχικά μέσω του 3D Analyst πάλι και μετά γίνεται μετατροπή αυτής της επιφάνειας σε TIN μέσω των εργαλείων του 3D Analyst ξανά. Έτσι, το μοντέλο αποκτά ένα πιο πραγματικό χαρακτήρα [Εικ.66].



Εικ.66 Ομαλοποίηση επιφάνειας μέσω Raster – TIN διαδικασίας

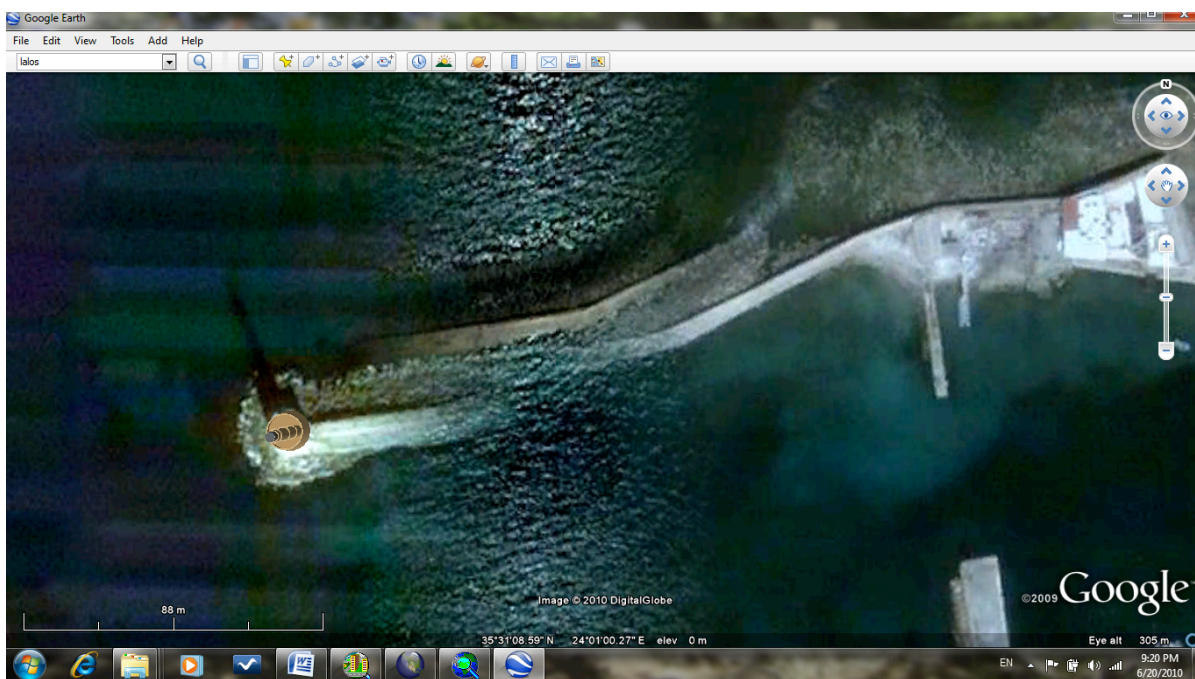
4.4.2. Ορθοφωτοχάρτες

Για τη σωστή δημιουργία και τοποθέτηση των 3D κτιρίων του παλιού λιμανιού στο χώρο, όπως αναφέρθηκε δεν ήταν δυνατή η χρήση μόνο των δεδομένων του Google Earth και αυτό γιατί η συγκεκριμένη εφαρμογή είχε πάρα πολλά σφάλματα πάνω από τη περιοχή της πόλης των Χανίων [Εικ.67 ,Εικ.68]. Για αυτό το λόγο αναζητήθηκαν άλλοι ορθοφωτοχάρτες της περιοχής, χωρίς σφάλματα.

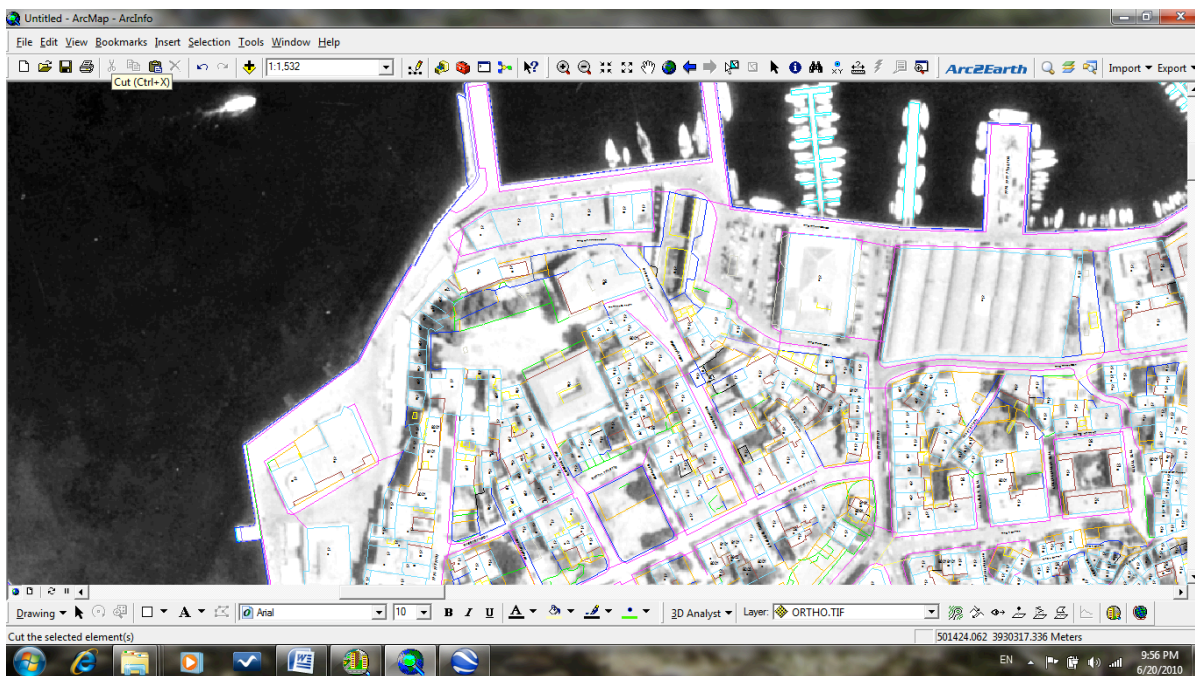
Μετά από αίτηση στο κτηματολόγιο αποκτήθηκε ένας ορθοφωτοχάρτη με σωστή απεικόνιση των δεδομένων που όμως είχε δημιουργηθεί τη δεκαετία του 1980. Αυτό δημιουργούσε πολλά προβλήματα μιας και η σημερινή μορφή του λιμανιού διαφέρει από αυτή που απεικονίζεται στην αεροφωτογραφία. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα εισήχθηκε ένα αναφερόμενο αρχείο AutoCAD που απεικονίζει τις κατόψεις όλων των κτιρίων του Παλιού Λιμανιού στη σημερινή τους μορφή [Εικ.69]. Έτσι δημιουργήθηκε ένας χάρτης που αναπαριστά με λεπτομέρεια τα περιγράμματα των κτιρίων και πλέον είναι δυνατή η εισαγωγή του στο Google Earth για το σωστό σχεδιασμό των κτιρίων.



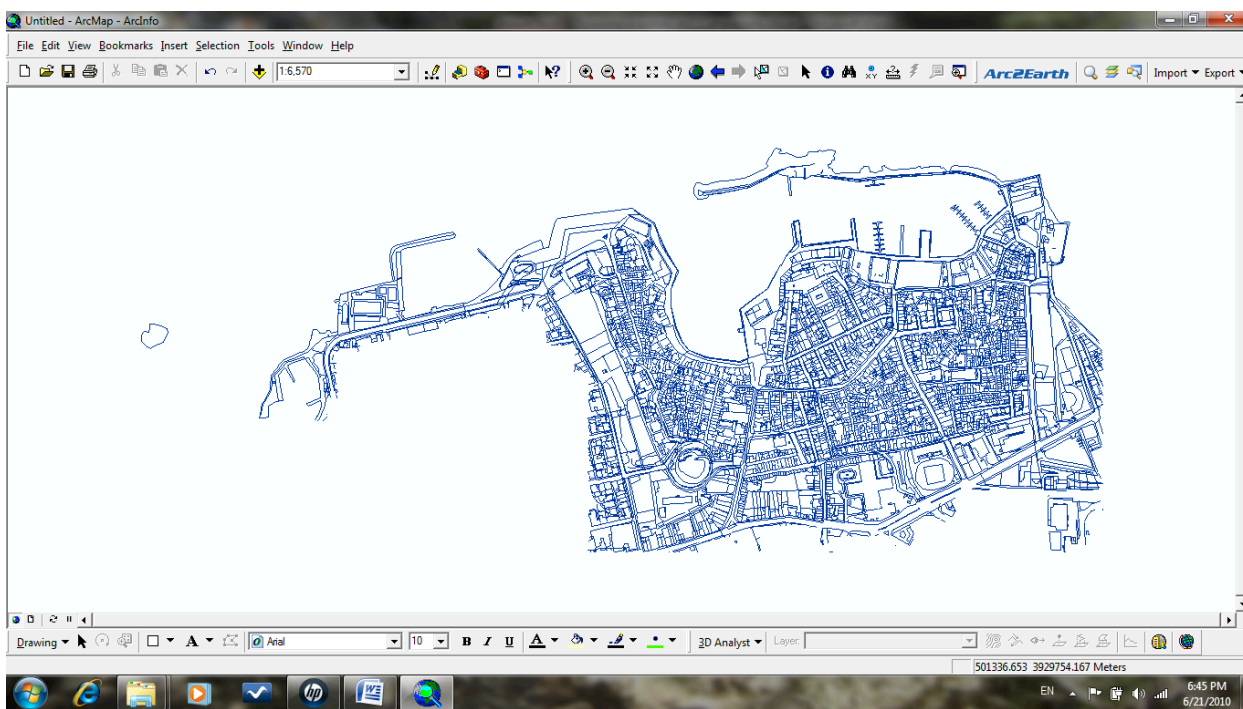
Εικ.67 Σφάλματα στην Πόλη των Χανίων της εφαρμογής Google Earth, Παλιό Λιμάνι Γραλί Τζαμί.



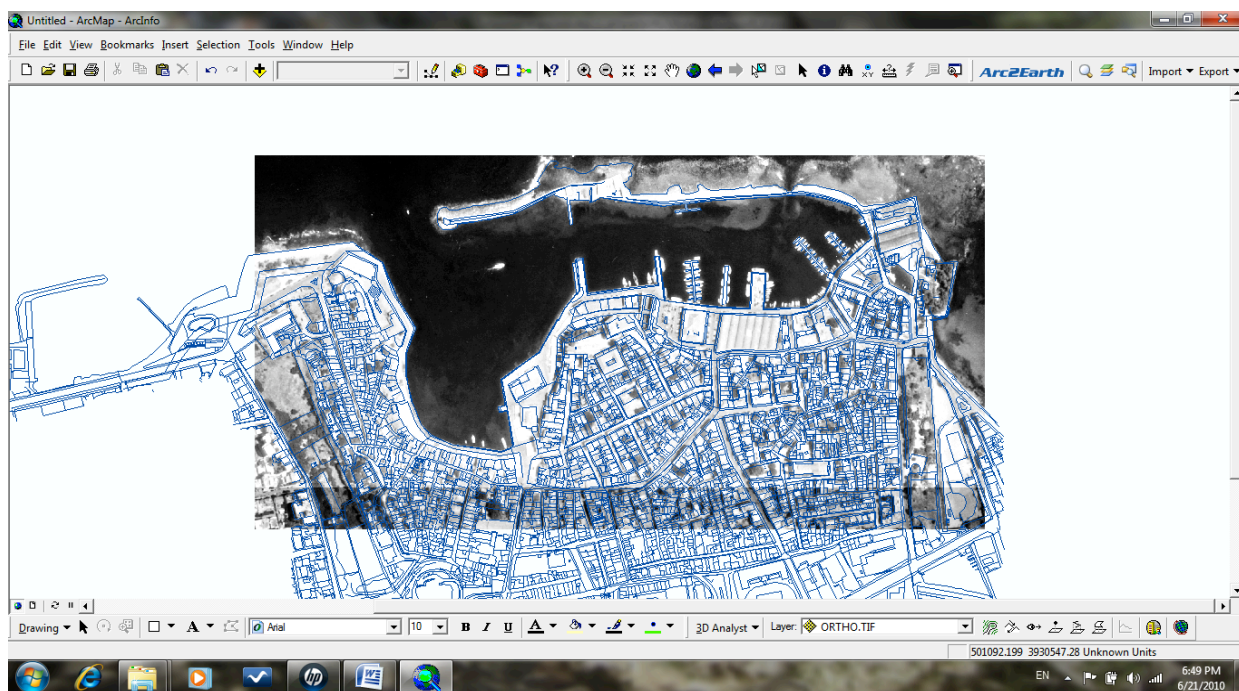
Εικ.68 Ασυνέχεια- σφάλμα της εφαρμογής Google Earth στο φάρο του Παλιού Λιμανιού των Χανίων.



Εικ.69 Ορθοφωτόχαρτης στην περιοχή του Παλιού Λιμανιού, με παράλληλη χρήση αρχείου Autocad (σκιαγράφιση κατόψεων των κτιρίων), ArcMap.

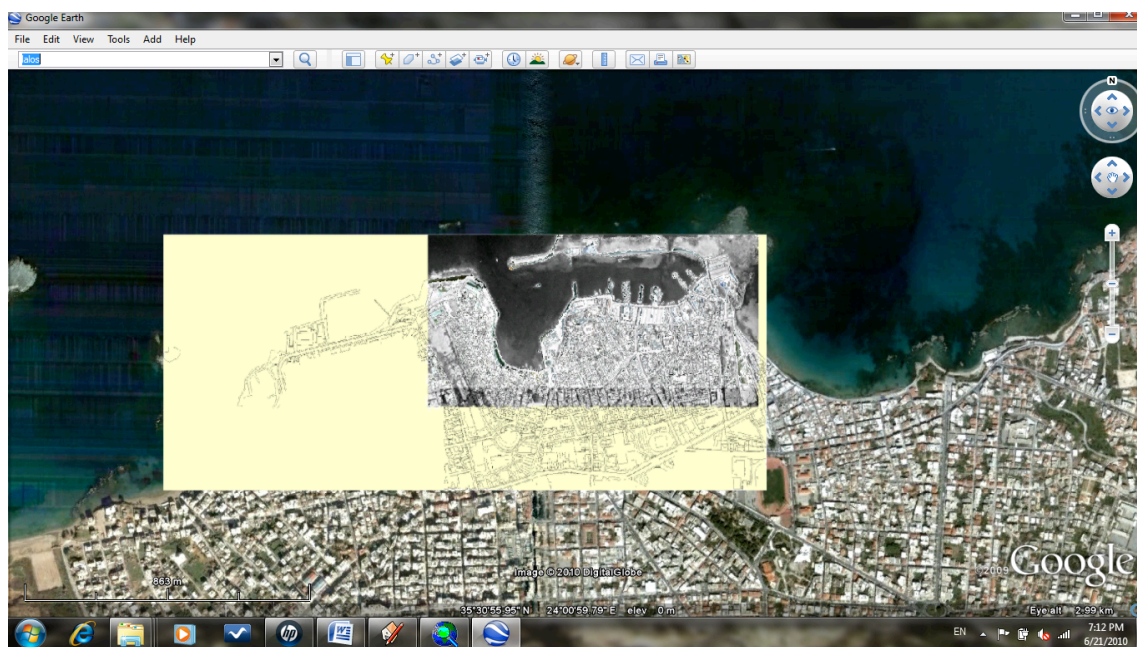


Εικ.70 Δημιουργία shapefile αρχείου των κατόψεων των κτηρίων του Παλιού Λιμανιού, ArcMap.



Εικ. 71 Συνδυασμός αρχείων shapefile κατόψεων και ορθοφωτοχάρτη Χανίων, ArcMap.

Μετά τη δημιουργία του παραπάνω χάρτη έγινε εξαγωγή του ως αρχείο JPEG και εισαγωγή του στο Google Earth και στο Google Sketchup [Εικ. 72].

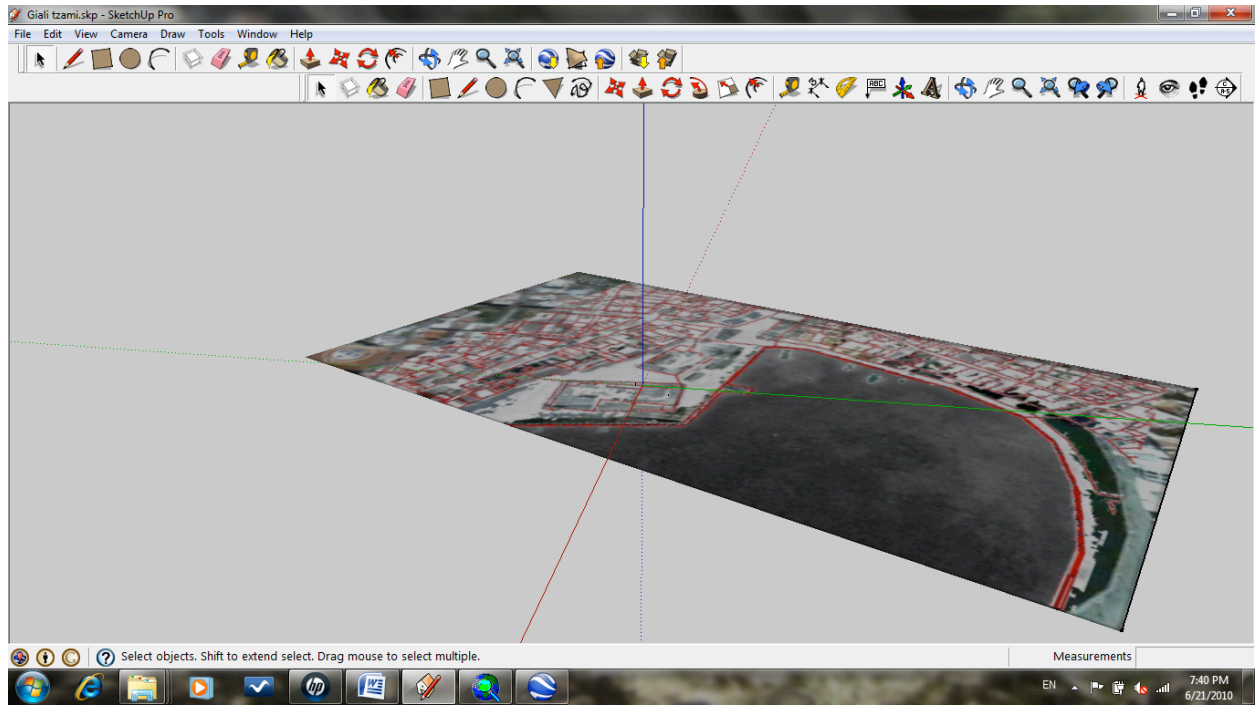


Εικ. 72 Εισαγωγή σωστού ορθοφωτοχάρτι που δημιουργήσαμε στο Google Earth.

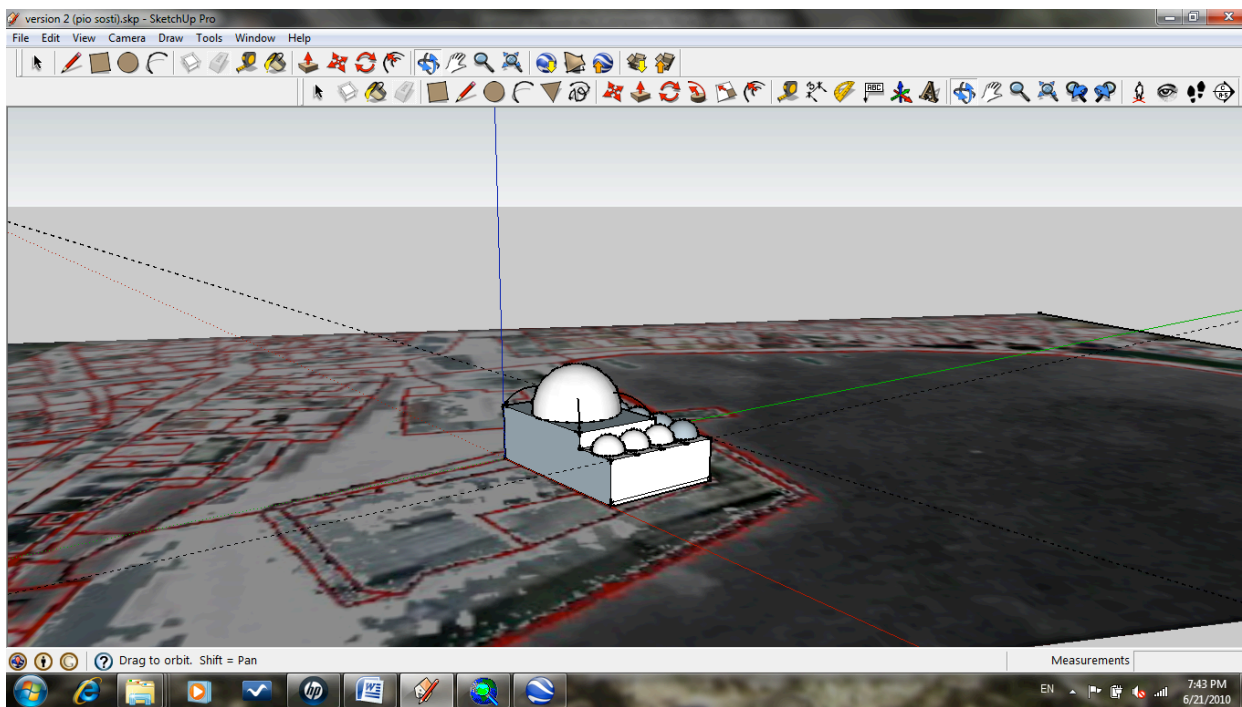
4.4.3 Σχεδιασμός 3D κτηρίων

Για τη σχεδίαση των κτηρίων έγινε εισαγωγή δεδομένων απευθείας από το Google Earth στο Google Sketchup μέσω των εντολών του ίδιου του προγράμματος. Έτσι, μπορούμε να εισάγουμε κατόψεις περιοχών ενδιαφέροντος, έχοντας παράλληλα και τη σωστή γεωαναφορά [Εικ. 73].

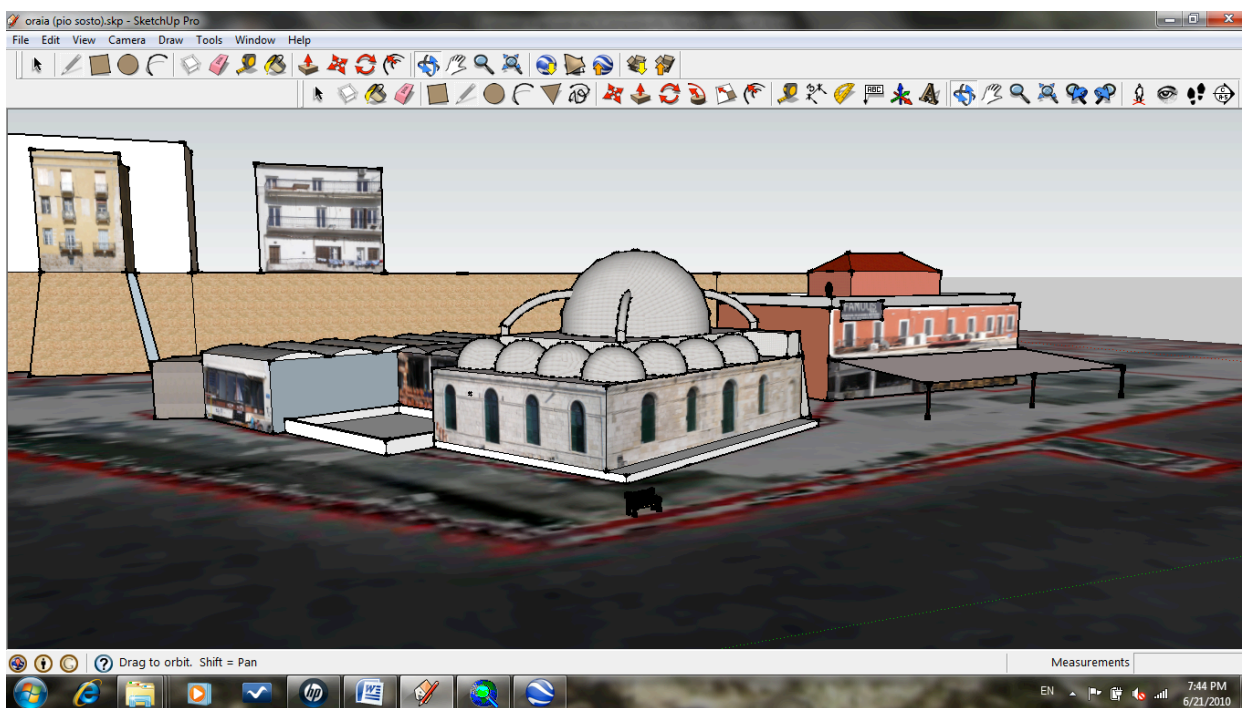
Μετά το πέρας της σχεδίασης της γεωμετρίας των κτηρίων εισάγονται φωτογραφίες των προσόψεών τους στο πρόγραμμα και τις τοποθετούνται σωστά πάνω στις επιφάνειες για να δοθεί μεγαλύτερος ρεαλισμός στην όλη απεικόνιση [Εικ. 74, Εικ. 75].



Εικ. 73: Εισαγωγή κάτοψης στο Google Sketchup μέσω του Google Earth. Αρχικά η κάτοψη είναι ασπρόμαυρη αλλά με σωστή χρήση των εργαλείων είναι δυνατό να γίνει έγχρωμη.



Εικ.74: Σχεδίαση 3D κτηρίου στο Google Sketchup 7.



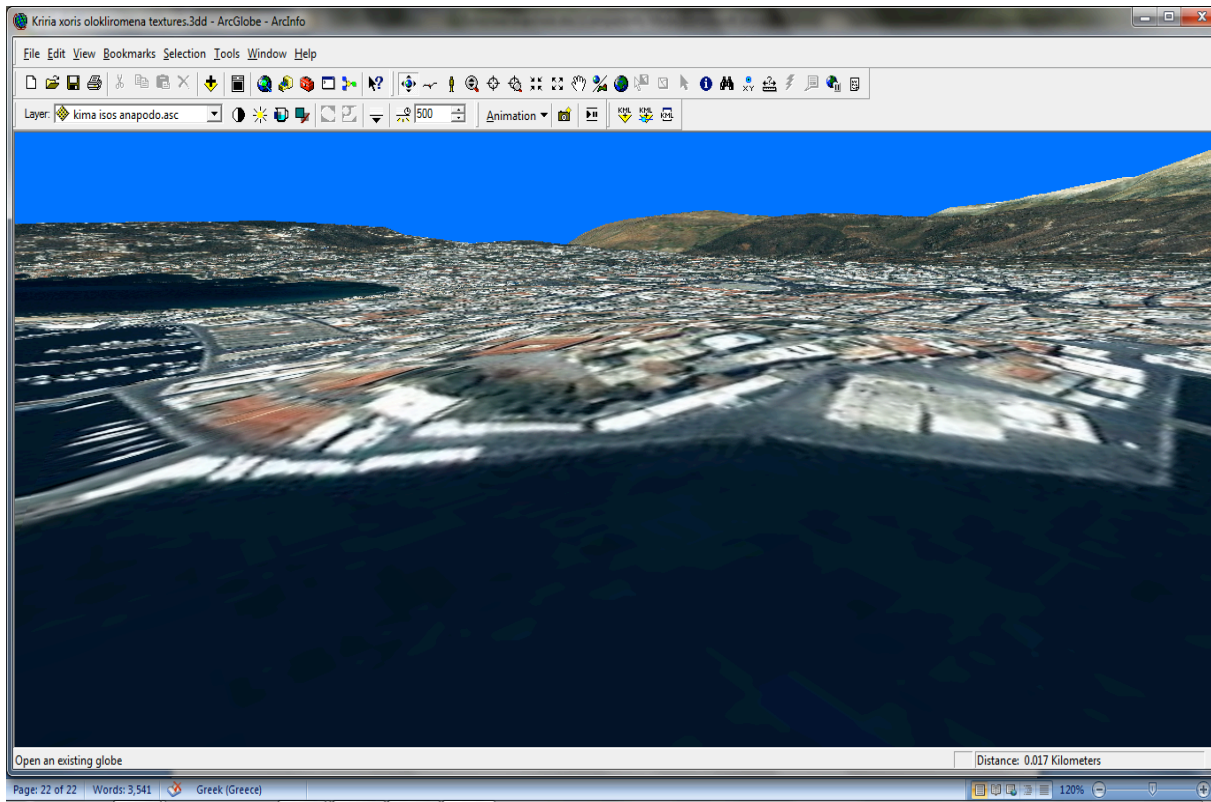
Εικ.75: Ολοκλήρωση κτηρίων στο Google Sketchup 7 με χρήση πραγματικών φωτογραφιών για πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα.

4.4.4. Ολοκλήρωση σχεδίου και οπτικοποίηση

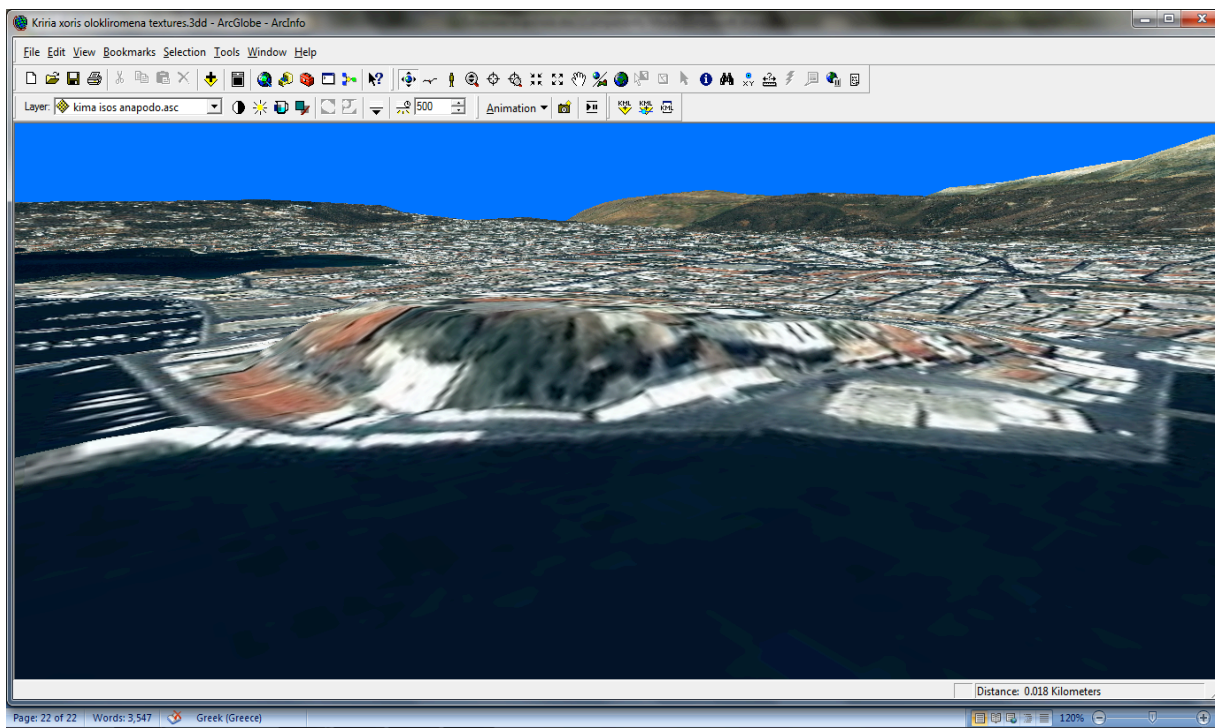
Στην εφαρμογή ArcGlobe έγινε η τελική σύνθεση των κτηρίων μας σε σχέση με την τοπογραφία. Επίσης, με τη βοήθεια των εργαλείων της εφαρμογής αυτής δημιουργήθηκε ένα animation πτήσης πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος.

Τοπογραφία

Αν και η εφαρμογή Arcglobe διαθέτει από μόνη της τοπογραφικά δεδομένα, δεν είναι πολύ λεπτομερές. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που παρουσιάζει από μόνη της η εφαρμογή είναι ανά 30μ [Εικ.73], έτσι σε μια περιοχή μικρής κλίμακας όπως είναι το Παλιό Λιμάνι των Χανίων, η απεικόνιση έχει μεγάλες διαφορές από την πραγματικότητα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν τα δικά μας τοπογραφικά δεδομένα που είναι αποτέλεσμα μετρήσεων ανά 2 μέτρα [Εικ. 76].



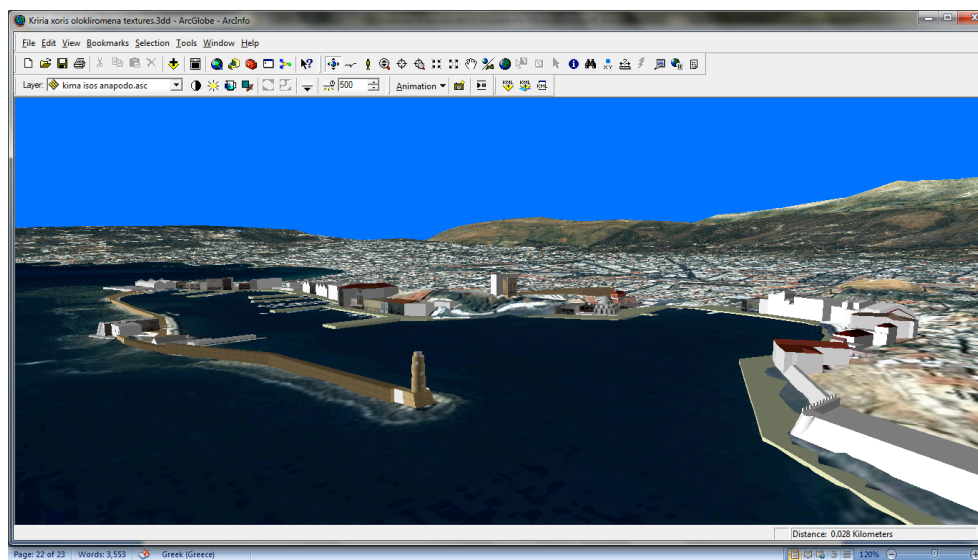
Εικ. 76 Τοπογραφικά δεδομένα στο Arcglobe ανά 30m.



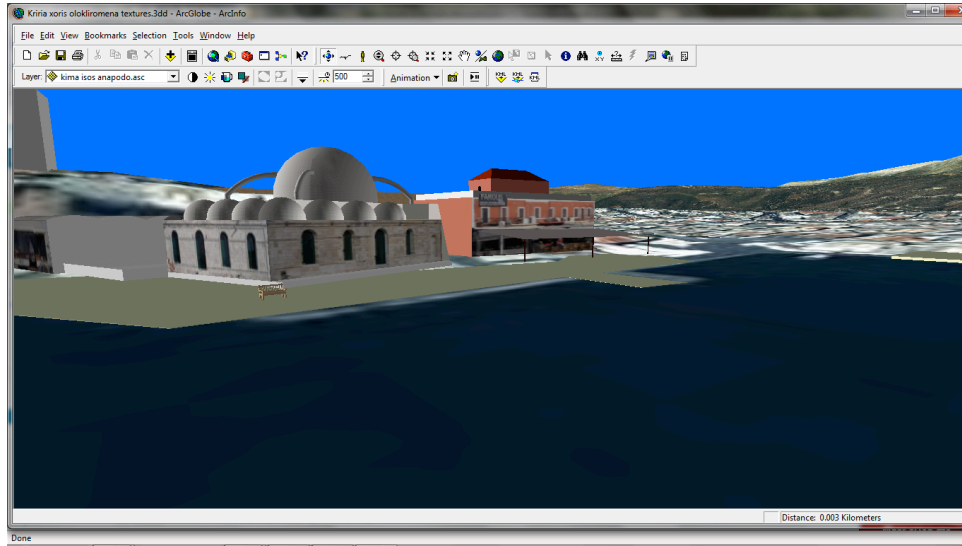
Εικ. 77: Τοπογραφικά δεδομένα στο ArcGlobe ανά 2m.

Ενσωμάτωση κτηρίων

Μετά την ολοκλήρωση της τοπογραφίας ακολουθεί η εισαγωγή των 3D κτηρίων στο μοντέλο. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω της δυνατότητας που έχει το ArcGlobe να εισάγει δεδομένα σε μορφή KML. Έτσι, μετά την ενεργοποίηση του ‘KML toolbar’ επιλέγεται ‘‘Add KML data’’ και στη συνέχεια τα αρχεία που ενδιαφέροντος [Εικ. 78, Εικ. 79].



Εικ. 78: Απεικόνιση μοντέλου του Παλιού Λιμανιού μετά την ενσωμάτωση των 3D κτηρίων στην εφαρμογή Arcglobe (πανοραμική απεικόνιση).

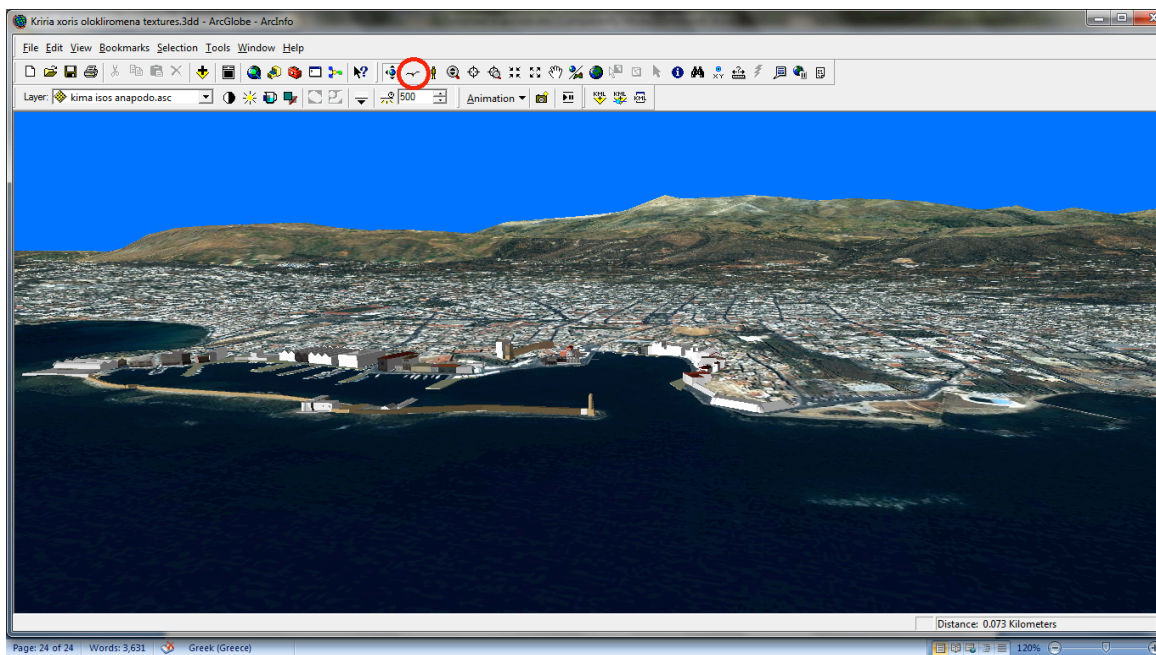


***Εικ. 79:** Απεικόνιση του Παλιού Λιμανιού από άλλη οπτική γωνία (κοντινό πλάνο).*

Δημιουργία animation Παλιού Λιμανιού

Η δημιουργία ενός βίντεο animation εντός της εφαρμογής ArcGlobe είναι μια πολύ απλή διαδικασία. Απλά επιλέγεται ένα σημείο από το οποίο θα ξεκινήσει η περιήγηση και ενεργοποιείται το 'REC' από το 'Animation Toolbar'. Εφόσον πλέον έχουν γίνει όλα τα προηγούμενα βήματα απλά επιλέγεται το εργαλείο 'Fly through' [Εικ.80] και αρχίζει η περιήγηση στο χώρο.

Η περιήγηση αυτή πλέον είναι ένα έτοιμο animation που μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές είναι επιθυμητό. Επίσης μπορεί να γίνει εξαγωγή του animation για αναπαραγωγή εκτός της εφαρμογής ArcGIS.

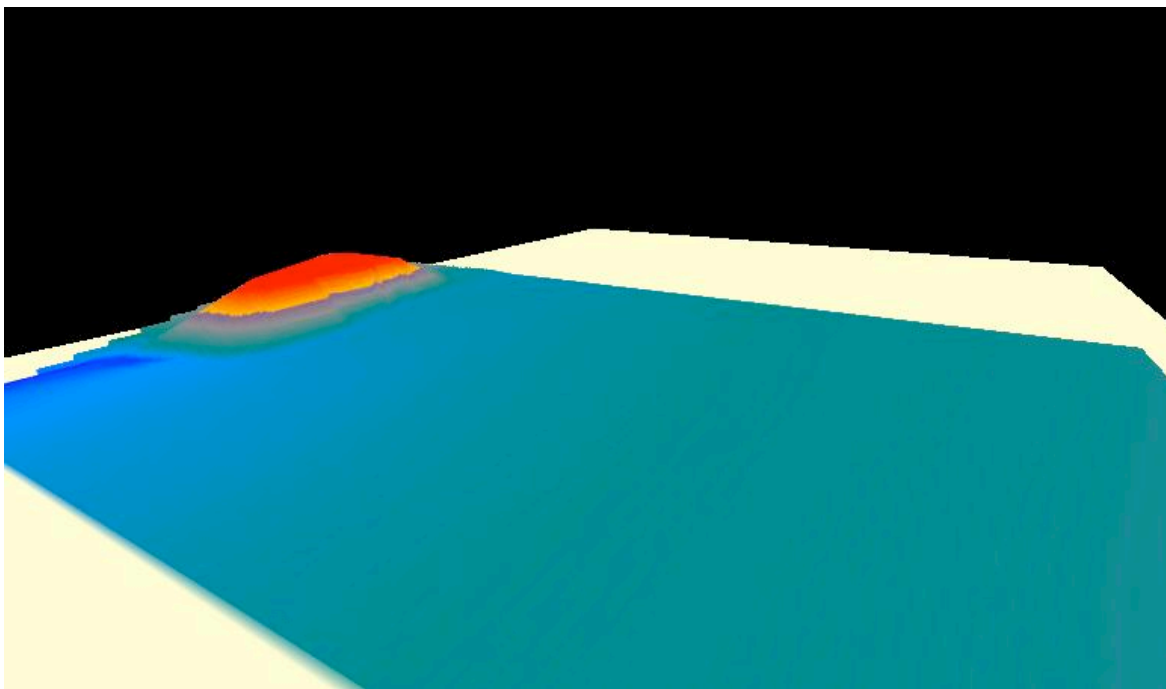


Εικ.80 Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται το εργαλείο ‘Fly Through’ που μας επιτρέπει να πετάμε ελεύθερα μέσα στο μοντέλο.

Δημιουργία μοντέλου τσουνάμι

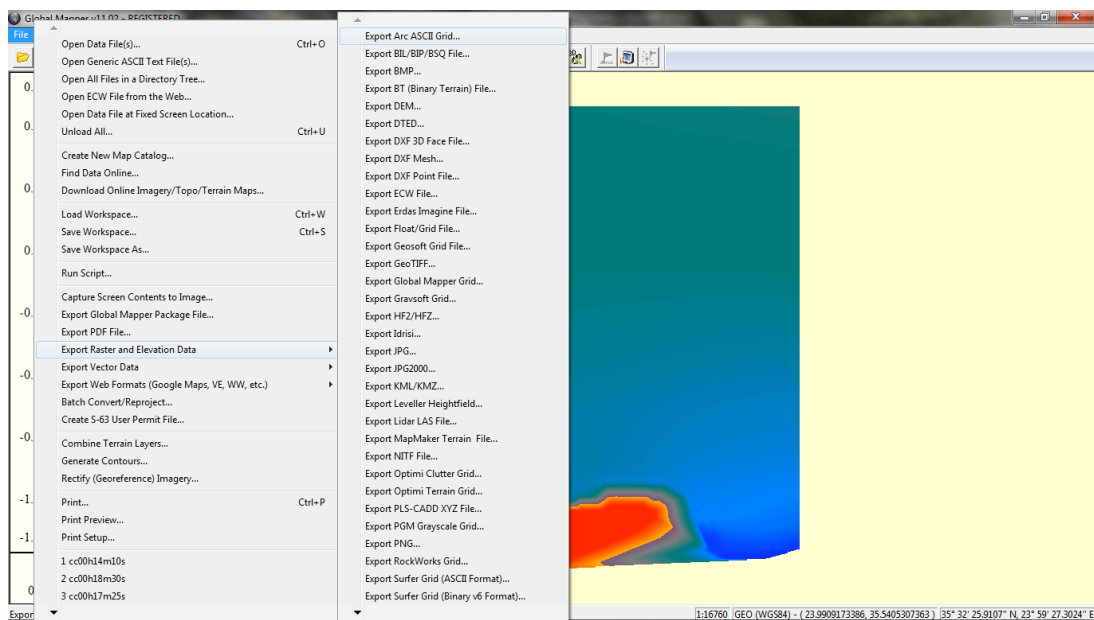
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για την οπτικοποίηση του τσουνάμι εντός της εφαρμογής ArcGlobe με παράλληλη απεικόνιση των κτηρίων. Παρόλα αυτά, έγινε εφικτή μόνο μια 3D απεικόνιση του τσουνάμι του 365 μ.Χ σε σχέση με την τοπογραφία και τη βαθυμετρία εντός της εφαρμογής του ArcScene και η δημιουργία ενός animation με τα δεδομένα που υπήρχαν.

Η τοπογραφία που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτή που είχε κατασκευαστεί νωρίτερα για τη περιοχή του Παλιού Λιμανιού. Για την οπτικοποίηση των τσουνάμι ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Από τη μοντελοποίηση που έκανε ο Δρ. Συνολάκης και οι συνεργάτες του, ελήφθησαν τα δεδομένα του τσουνάμι διαφόρων χρονικών στιγμών σε μορφή ‘xyz’ αρχείου. Για μεγαλύτερη ευκολία εισήχθηκαν αυτά τα δεδομένα στο Global Mapper (η διαδικασία οπτικοποίησης τους είναι πολύ πιο εύκολη σε αυτή την εφαρμογή) [Εικ.81].



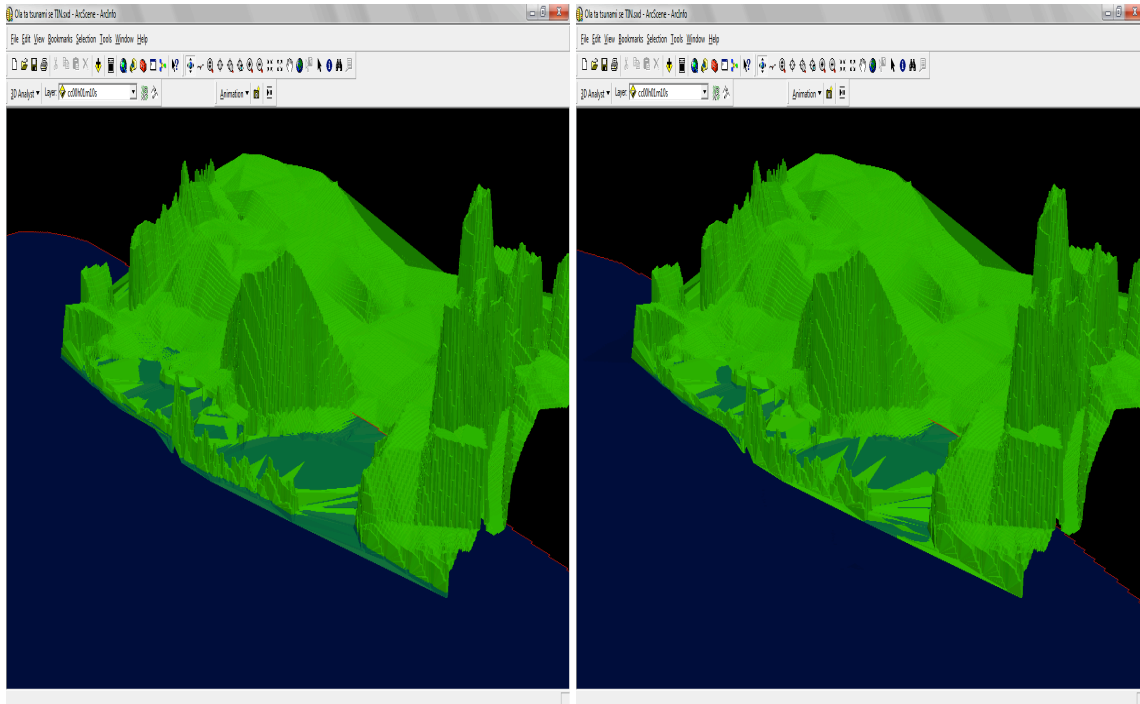
Εικ.81 Απεικόνιση 3Dκύματος τσουνάμι εντός της εφαρμογής Global Mapper 11.

Το πρόγραμμα αυτό μας προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων με πάρα πολλούς διαφορετικούς τύπους αρχείων [Εικ.82]. Μια μορφή που είναι ιδανική για αλληλεπίδραση των δεδομένων με το ArcGIS είναι το ‘Arc ASCII Grid’ το οποίο αναγνωρίζει άμεσα το ArcGIS. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύχθηκαν πολύπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες απεικόνισης των δεδομένων μας εντός της εφαρμογής ArcGIS.



Εικ.82 Πληθώρα δυνατοτήτων εξαγωγής δεδομένων με το software Global Mapper 11.

Αφού εισήχθησαν τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν στο Global Mapper στην εφαρμογή ArcGIS μετατράπηκαν σε TINs μέσω του extension '3D Analyst'. Αφού επαναλήφθηκε αυτή τη διαδικασία για κάθε κύμα ξεχωριστά πλέον, οπτικοποιήθηκαν όλα τα κύματα τσουνάμι και απεικονίστηκαν οι αλλαγές της στάθμης της θάλασσας [Εικ.83].



Εικ.83: Απεικόνιση της ίδιας περιοχής (Παλιό Λιμάνι) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του τσουνάμι. Στην εικόνα δεξιά φαίνεται ότι το λιμάνι έχει αρχίσει πλέον να αδειάζει.

Δημιουργία animation τσουνάμι

Η διαδικασία δημιουργίας ενός animation εντός της εφαρμογής Arcscene είναι ίδια με αυτή της εφαρμογής ArcGlobe αλλά υπάρχει και μια διαφορά όσον αφορά στην οπτικοποίηση των δεδομένων. Ενώ στην εφαρμογή ArcGlobe τα δεδομένα ήταν μη μεταβλητά στο χρόνο (κτιριακές κατασκευές – τοπογραφία), δε συμβαίνει το ίδιο και με τα κυματικά δεδομένα μας στο ArcScene. Αυτά μεταβάλλονται χρονικά και έτσι για τη δημιουργία animation πρέπει να μεταβάλλονται όσο ο χρόνος περνά. Για να γίνει λοιπόν δυνατή η οπτικοποίηση της μεταβολής τους χρονικά, χρησιμοποιούμε την επιλογή της εφαρμογής animation του ArcGIS <<Create time layer animation>>. Αυτή η επιλογή προσφέρει τη δυνατότητα “εμφάνισης” και “εξαφάνισης” των διαφόρων layers χρονικά και μέσω αυτής είναι δυνατή η δημιουργία animation του τσουνάμι.

Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1. Γενικά

Με τη χρήση όλων αυτών των προγραμμάτων και μέσα από πολύπλοκες διαδικασίες έγινε μία προσπάθεια τρισδιάστατης οπτικοποίησης ενός πραγματικού τσουνάμι, απεικονίζοντας παράλληλα και τις κτιριακές υποδομές της περιοχής. Μέχρι σήμερα κάτι τέτοιο δεν εφαρμόζεται στις απεικονίσεις των τσουνάμι, ενώ σπάνιες είναι γενικότερα οι απεικονίσεις που εμπεριέχουν και αυτές τις πληροφορίες (ανθρωπογενείς κατασκευές). Μέσα από αυτήν την εκτενή μελέτη είναι πλέον δυνατόν να ειπωθεί ότι δεν υπάρχουν στην αγορά ακόμα ολοκληρωμένα πακέτα software που να μπορούν να υποστηρίξουν ένα τέτοιο εγχείρημα, παρόλο που κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ χρήσιμο τόσο σε επίπεδο έρευνας, όσο και σε επίπεδο ενημέρωσης.

Η εφαρμογή ArcGIS ενώ αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα και πιο διαδεδομένα GIS software δεν μπορεί να υποστηρίξει πλήρως μια τέτοια εφαρμογή οπτικοποίησης τσουνάμι. Βασικές ελλείψεις του προγράμματος τόσο στη δυνατότητα οπτικοποίησης 3D αντικειμένων, όσο και στην πολυπλοκότητα των όλων διαδικασιών, κάνουν το εγχείρημα αυτό δυσπρόσιτο στον χρήστη. Έτσι, ενώ σε επίπεδο 2D το πρόγραμμα μπορεί να υποστηρίξει πληθώρα εφαρμογών, σε επίπεδο 3D η χρήση του γίνεται πολύ πιο δύσκολη και οι δυνατότητές του περιορίζονται σημαντικά.

5.2. Προβλήματα

Στην προσπάθεια δημιουργίας αυτού του τρισδιάστατου μοντέλου του τσουνάμι του 365 μ.Χ. αντιμετωπίστηκαν πολλά προβλήματα και δυσκολίες. Τα προβλήματα αυτά είχαν να κάνουν κυρίως με:

- ❖ Έλλειψη δεδομένων και αδυναμία στην απόκτηση τους.
- ❖ Μη ορθή πάντα λειτουργία των προγραμμάτων.
- ❖ Σφάλματα των εφαρμογών (π.χ. Google Earth).
- ❖ Πολυπλοκότητα των διαδικασιών.
- ❖ Έλλειψη βιβλιογραφίας και γενικότερα πληροφοριών πάνω στο αντικείμενο.

Έλλειψη δεδομένων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αποτέλεσε σημαντικό εμπόδιο είναι η αδυναμία απόκτησης καλών δεδομένων μεγάλης ακριβείας έτσι ώστε να είναι δυνατή μια καλή οπτικοποίηση. Δυστυχώς σε αντίθεση με άλλες χώρες στην Ελλάδα η απόκτηση δεδομένων είναι μια χρονοβόρα και παράλληλα ακριβή διαδικασία. Έτσι, ενώ π.χ. στην Αμερική η εύρεση καλών αεροφωτογραφιών είναι μια πολύ εύκολη υπόθεση που δεν στοιχίζει τίποτα, στην Ελλάδα ζητήθηκαν για την διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής, έγγραφα και βεβαιώσεις σπουδών (ελληνικό κτηματολόγιο) ή πολύ μεγάλα χρηματικά ποσά (3000 ευρώ από ιδιωτική εταιρεία με ειδικευση στα GIS) για αντίστοιχα δεδομένα.

Μη ορθή λειτουργία των προγραμμάτων

Για την ολοκλήρωση αυτού του μοντέλου όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, χρειάστηκε η συνεργασία πολλών διαφορετικών προγραμμάτων και εφαρμογών, που δεν ήταν πάντα εύκολο να λειτουργήσουν ταυτόχρονα και αρμονικά. Πιο συγκεκριμένα, υπήρχαν πολλές φορές που τα ίδια τα προγράμματα αν και υποστήριζαν θεωρητικά παράλληλη λειτουργία, πρακτικά εμφάνιζαν σημαντικές αδυναμίες κατά την εφαρμογή(λειτουργεί Google Sketchup plug-in και ArcGis). Αν και οι περισσότερες αυτού του είδους δυσκολίες ξεπεράστηκαν, χρειάστηκαν πιο πολύπλοκες διαδικασίες.

Σφάλματα εφαρμογών

Πολλές φορές συναντήσαμε σημαντικά σφάλματα στις εφαρμογές που χρησιμοποιούσαμε και αυτό δημιούργησε προβλήματα στην κατασκευή του μοντέλου. Ίσως το πιο σημαντικό σφάλμα που επηρέασε σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα της διατριβής, είναι τα λάθη των αεροφωτογραφιών (μεγάλα σφάλματα) της εφαρμογής Google Earth πάνω από την περιοχή των Χανίων. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε σε λανθασμένες χωροθετήσεις των κτιρίων, αλλά δημιούργησε και επιπρόσθετα προβλήματα μιας και χάθηκε μια σημαντική πηγή δεδομένων. Έτσι πλέον δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα αυτής της εφαρμογής στο μοντέλο.

Πολυπλοκότητα των διαδικασιών

Άλλο ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα που απαιτείται για τη δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου. Η κατασκευή του απαιτεί γνώση πολλών εφαρμογών και διαφορετικών επιστημονικών τομέων και αυτό κάνει την υλοποίησή του μη ελκυστική στον εκάστοτε χρήστη που δε διαθέτει όλες αυτές τις γνώσεις. Απαραίτητη επίσης για

την υλοποίηση του μοντέλου είναι η χρήση ενός H/Y με μεγάλη υπολογιστική ισχύ (δυνατός επεξεργαστής και πολύ μνήμη) μιας και η χρήση αυτών των προγραμμάτων γίνεται πολλές φορές πολύ απαιτητική σε πόρους.

Έλλειψη βιβλιογραφίας και γενικότερα πληροφοριών πάνω στο αντικείμενο

Ένα τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά τη προσπάθεια δημιουργίας αυτού του μοντέλου ήταν η έλλειψη βιβλιογραφίας και πληροφοριών όσον αναφορά στη 3D μοντελοποίηση των τσουνάμι. Δυστυχώς, πολύ λίγες πληροφορίες ήταν διαθέσιμες όσον αναφορά στη 3D μοντελοποίηση των τσουνάμι, ενώ υπάρχει σαφής έλλειψη πληροφοριών και βιβλιογραφίας σχετικά με τη μοντελοποίηση των τσουνάμι σε σχέση με ανθρώπινες κατασκευές. Ακόμα και στην τεράστια βάση πληροφοριών του ίντερνετ πολύ λίγες πληροφορίες ήταν διαθέσιμες. Σίγουρα αυτή η έλλειψη πληροφοριών έκανε την προσπάθειά μας αυτή δυσχερέστερη και συναντήσαμε προβλήματα, που με υποστήριξη καλής βιβλιογραφίας θα είχαν λυθεί πολύ πιο εύκολα και γρήγορα.

Ελπίζουμε αυτό το βιβλιογραφικό κενό να καλυφθεί σύντομα από επιστημονικά συγγράμματα, μιας και έχει τόσο μεγάλο ενδιαφέρον η μελέτη των τσουνάμι κατά αυτόν τον τρόπο.

5.3. Αποτελέσματα

Παρόλα τα προβλήματα και τις δυσκολίες που προέκυψαν, τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου είναι σαφώς ικανοποιητικά. Με τη χρήση των GIS δημιουργήθηκε μια λεπτομερής και ρεαλιστική απεικόνιση του παλιού λιμανιού των Χανίων, στην οποία ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί και να μεταφερθεί σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί στο χώρο. Σίγουρα ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να έχει παρά πολλές χρήσεις και εφαρμογές, από τουριστική ενημέρωση και προώθηση μέχρι και αρχιτεκτονικές παρουσιάσεις των Χανίων.

Εκτός όμως από αυτό δημιουργήθηκε επίσης και μια 3D απεικόνιση του πραγματικού τσουνάμι που έπληξε την περιοχή των Χανίων το 365 μ.Χ. Αυτό το μοντέλο μπορεί να δώσει πάρα πολλές πληροφορίες όσον αναφορά στο ύψος του κύματος σε σχέση με την τοπογραφία της περιοχής, στα σημεία που το κύμα διείσδυσε περισσότερο μέσα στη στεριά, στα χαρακτηριστικά του κύματος τη στιγμή που το τσουνάμι κατέφθανε στην περιοχή αυτή, ακόμα και στα προβλήματα ή ελλείψεις του κώδικα μοντελοποίησης των τσουνάμι. Επίσης, ο ρόλος μιας τέτοιας 'ικανοποιητικής' μοντελοποίησης μπορεί να είναι ενημερωτικός ή ακόμα και εκπαιδευτικός, έτσι ώστε οι άνθρωποι να καταλάβουν πως λειτουργεί στην πράξη αυτό το πολύπλοκο φαινόμενο που ονομάζεται τσουνάμι και μπορεί να επηρεάσει τις ζωές μας τόσο πολύ.

5.4. Προτάσεις για το μέλλον

Αν και η οπτικοποίηση των τσουνάμι με παράλληλη απεικόνιση των κατασκευών και των κτιρίων δεν μπορεί να απεικονιστεί πλήρως μόνο μέσα από εφαρμογές GIS, γίνεται δυνατή μέσα από παράλληλη χρήση προγραμμάτων GIS και εφαρμογών animation software. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση προγραμμάτων όπως το << ArcGIS >> σε σχέση με το κορυφαίο πρόγραμμα animation << 3Ds MAX >> μπορεί να οδηγήσει σε μια πλήρη και ολοκληρωμένη απεικόνιση με πολύ μεγάλο βαθμό ρεαλισμού.

Φυσικά κάτι τέτοιο προϋποθέτει ο χρήστης να είναι πολύ πεπειραμένος για να μπορεί να κάνει χρήση και των δυο αυτών ‘δύσκολων’ software, που έχουν μια πολύ διαφορετική φιλοσοφία χρήσης και εφαρμογών. Έτσι ο χρηστής πρέπει και να έχει ένα συνδυασμό γνώσεων τόσο σε επίπεδο animation υγρών στοιχείων όσο και σε επίπεδο GIS για να μπορέσει να δημιουργήσει ένα τέτοιο περίπλοκο μοντέλο. Από την άλλη πλευρά, μια τέτοια παράλληλη εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων θα μπορούσε να δώσει μια ακόμα μεγαλύτερη νότα ρεαλισμού στο μοντέλο αυτό, αποδίδοντας ‘πραγματικά’ χαρακτηριστικά ακόμα και στη θαλάσσια επιφάνεια (κάτι τέτοιο δεν γίνεται στο ArcGIS).

Ίσως μελλοντικά να αναπτυχθούν και άλλες εφαρμογές που να είναι προσανατολισμένες εξολοκλήρου σε τέτοια μοντέλα οπτικοποίησης, κάνοντας έτσι πιο εύκολη και πιο προσιτή τη διαδικασία αυτή σε περισσότερους χρήστες.

Βιβλιογραφία

- (1) Φερεντίνος Γ. & Γκιώνης Γ., Γεωμορφολογία Ακτών, *Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών*, 1995.
- (2) Bruce A. Bolt , Σεισμοί, [μεταφρ. Ε.Ιωαννιδου], *Αθηνά Εκδόσεις Τροχαλία* ,1991.
- (3) C. Synolakis ,*Earthquake Engineering Hanbook*, Chp 9 Tsunami and Seiche, 2002.
- (4) S. Farreras , Post-tsunami field survey procedures : an outline, *Natural Hazards* 21: 207-214, *Kluwer Academic Publishers*, 2004.
- (5) E.Bryant , Tsunami the underrated hazard, *Cambrige University Press*, 2001.
- (6) Levin B.W., Tsunamis : Causes, Consequences, Prediction and Response, *Natural Disaster*, 2005.
- (7) G. Papadopoulos, F.Imamura , A proposal for a new tsunami intensity scale, *Session 5*, Number 5-1 p. 569-577, 2001.
- (8) Παπαδόπουλος Γ, Τσουνάμι και μέτρα προστασίας, *Άρθρο*, 2005.
- (9) Papadopoulos G., Tsunami Hazard in the Eastern Mediterranean: Strong Earthquakes and Tsunamis in the Corinth Gulf, Central Greece, *Natural Hazards* 29 :437-464, 2003.
- (10) Imamura, F., Synolakis, C.E., Titov, V., and Lee, S., Field survey of the 1994 Mindoro island, Philippines tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 144, 3/4, pp. 875-89, 1995.
- (11) Papadopoulos G., Chalkis B.J., Tsunamis Observed in Greece and the Surrounding Area from Antiquity up to the Present Times, *Marine Geology* 56 : 309-317, 1983.
- (12) Emile A. Okal, Costas E. Synolakis, Burak Uslu, Nikos Kalligeris, Evangelos Voukouvalas, The 1956 earthquake and tsunami in Amorgos, *Greece, Geophys. J. Int.*, 2009.
- (13) Barbara Theilen-Willige, Tsunami hazard assessment in the northern Aegean sea, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 27, No. 1, 2008.
- (14) GIS and Emergency Management in Indian Ocean Earthquake/Tsunami Disaster, *ESRI, White Paper*, 2006.

- (15) Stathis C. Stiros, The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the fourth to sixth centuries AD in the Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data, 2000.
- (16) B. Shawi, N.N. Ambraseys, P.C. England, M.A. Floyd, G.J. Gorman, T.F.G. Higham, J. A. Jackson, J.M. Norquet, C C. Pain and M.D. Piggot, Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD 365 earthquake, 2008.
- (17) Stiros, S.C., The 8.5 $\pm$ magnitude, AD365 earthquake in Crete: Coastal uplift, topography changes, *Quaternary, International*, 2009.
- (18) Shaw et al., Supplementary Material, 2008.
- (19) A. Scheffers, S. Scheffers, Tsunami deposits on the coastline of west Crete (Greece), *Earth and Planetary Science Letters*, 259, 613–624, 2007.
- (20) Papathoma M., Howes Dominey D., Tsunami Vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 : 733-747, 2003.
- (21) Stefatos A., Charalambakis M., Papatheodorou G., Ghionis G., Ferentinos G., Potential Tsunami Hazard from Submarine Landslides in the Corinth Gulf, Greece, *22th IUGG International Tsunami Symposium*, Chania, 2005.
- (22) Meldrum, S. 2004, Shelter from the Storm, *ArcUser*, January–March , 2004.
- (23) A. El-Sayed, F. Romanellia, G. Panza, Recent seismicity and realistic waveforms modeling to reduce the ambiguities about the 1303 seismic activity in Egypt , 2000.
- (24) Emanuela Guidoboni & Alberto Comastri, The large earthquake of 8 August 1303 in Crete: seismic scenario and tsunami in the Mediterranean area, 1997.
- (25) C. Anandan, P. Sasidhar, ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE TSUNAMI OF DECEMBER 26, 2004 ON THE NEAR-SHORE BATHYMETRY OF THE KALPAKKAM COAST, EAST COAST OF INDIA, 2008.
- (26) Supapis Polngam, Remote sensing technology for Tsunami Disasters Along the Andaman Sea, Thailand, 2005.
- (27) WILLIAM J. BROAD, The volcano of Santorini changed the world, *The New YorkTimes*.
- (28) WILLIAM J.SCHROEDER & KENNETH M. MARTIN; TheVisualization Handbook, Overview of Visualization, 2005.

- (29) Rudiger Mach, Peter Petschek, Visualization of Digital Terrain and Landscape Data, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.
- (30) Miller C. L & Laflamme R. A., The Digital Terrain Model – Theory & Application in: Photogrammetric Engineering, *The American Society of Photogrammetry*, Vol. XXIV, No. 3, June 1958.
- (31) Rudiger Mach, Peter Petschek, Visualization of Digital Terrain and Landscape Data, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.
- (32) Sheppard Stephen, Visual Simulation, A User's Guide for Architects, Engineers and Planners, *Van Nostrand Reinhold*, New York 1989.
- (33) Akenine-Moller T. and Haines E., Real-Time Rendering, 2002.
- (34) Dykes J., MacEachren A. M., Kraak M. J., Exploring Geovisualization, *Elsevier Ltd.*, 2005.
- (35) Erik O. D. Sevre, Dave A. Yuen, Yingchun Liu, Visualization of tsunami waves with Amira package, *Vis Geoscience*, 2008.
- (36) Lam N. and Quattrochi D., On issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences, *The Professional Geographer*, 1992.
- (37) Mark D. and Aronson P., Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation with applications in geomorphology and computer mapping, *Mathematical Geology*, 16(7), pp. 671-683, 1984.
- (38) Tate N. and Wood J., Fractals and scale dependencies in topography, In: Tate N. and Atkinson P., (eds.), Scale in Geographical Information Systems, Chichester: Wiley, pp. 35-51, 2001.
- (39) Dominey-Howes, D., Cundy, A. & Croudace, I., High-energy marine flood deposits on Astypalaea Island, Greece: possible evidence for the AD 1956 southern Aegean tsunami, *Mar. Geol.*, 163, 303–315, 2000.
- (40) Okal, E.A. & Synolakis, Source discriminants for near-field tsunamis, *Geophys. J. Int.*, 158, 899–912, C.E., 2004.
- (41) A.Abdul-Rahman, M.Pilouk , Spatial Data Modelling for 3D GIS, 2007.
- (45) H.Yeh, V. Titov, The 1994 Shikotan Earthquake Tsunamis, Flores, *Nature*, 1994.
- (46) W.L Friedrich, Santorini Eruption Radiocarbon Dated to 1627-1600 B.C, *Science*, 2006.

(47) Synolakis C.E, The runup of Long Waves, PhD thesis, CalTech, 1986.

(48) N. Kalligeris, personal communication

Διαδικτυακοί σύνδεσμοι

(42) Airy wave theory Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Airy_wave_theory

(43) Γιάννη Ν. Κωστάρα, <http://gis.kkal.gr/gis.html>

(44) NGDC official website

Link:

http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?bt_0=1800&st_0=2010&type_8=EXACT&query_8=None+Selected&op_14=eq&v_14=&st_1=&bt_2=&st_2=&bt_1=&bt_10=&st_10=&ge_9=&le_9=&bt_3=&st_3=&type_19=EXACT&query_19=None+Selected&op_17=eq&v_17=&bt_20=&st_20=&bt_13=&st_13=&bt_16=&st_16=&bt_6=&st_6=&bt_11=&st_11=&d=7&t=101650&s=70

Παράρτημα 1

Μαρτυρίες από το σεισμό του 1956 και 1948

Κάρπαθος

Μαρτυρία 1

Όνομα μάρτυρα: οικογένεια Κουβαρδά

Περιοχή συνέντευξης: Φοινίκη

Μαρτυρία

Αναφέρουν ότι ο σεισμός έγινε στις 8.00 το πρωί καθώς εκείνοι βρίσκονταν στην περιοχή Πηγάδια του νησιού. Αναφέρουν ότι 5-10 λεπτά μετά που ένιωσαν το σεισμό είδαν τη θάλασσα να αδειάζει στο λιμάνι και οι γύρω άνθρωποι μπήκαν μέσα και άρχισαν να μαζεύουν ψάρια. Μετά από λίγο είδαν τη θάλασσα να επιστρέφει με μεγάλη ορμή πλημμυρίζοντας τη στεριά μέχρι το σημείο που σήμερα βρίσκεται η πιάτσα των ταξί στην περιοχή. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό πράγμα που θυμούνται (έχει αναφερθεί και από άλλους μάρτυρες) είναι ότι όταν το λιμάνι άδειασε από το νερό φάνηκαν ολόκληρα τα μικρά νησάκια που βρίσκονταν μπροστά από το λιμάνι. Όταν η θάλασσα επέστρεψε με ορμή το νερό τα σκέπασε εντελώς. Αναφέρουν ότι από τα πολλά κύματα που δημιουργήθηκαν, το πρώτο ήταν και το δυνατότερο και συνολικά το φαινόμενο θυμούνται να κράτησε μέχρι στις 11 το μεσημέρι.

Μαρτυρία 2

Όνομα μάρτυρα: Κα Φωτεινή Λαμπρίδου

Έτος γεννήσεως: 1912

Μαρτυρία

Γεννημένη το 1912 δεν θυμόταν πολλά πράγματα για το τσουνάμι και το σεισμό. Χαρακτηριστικά δεν θυμάται πόσα παιδιά είχε τη χρονιά εκείνη. Αναφέρει ότι μετά το

σεισμό φοβισμένοι έτρεξαν στο βουνό.

Μαρτυρία 3

Περιοχή συνέντευξης: Ηλέκτρα Hotel

Όνομα μάρτυρα : Μακρύ-Παπουτσάκι

Έτος γεννήσεως: 1927

Ένωσε το σεισμό την ώρα που έφευγε από τα χωράφια με κατεύθυνση προς το σπίτι της (δε βρισκόταν δίπλα στη θάλασσα όταν ένωσε το σεισμό. Ο σεισμός τη φόβισε πολύ και μετά το πέρας του έτρεξε προς το σπίτι της που βρισκόταν κοντά στη θάλασσα. Στη διαδρομή είδε ότι η θάλασσα είχε αδειάσει εντελώς και οι βάρκες ήταν καθισμένες στον πάτο. Αναφέρει ότι η θάλασσα πρέπει να άδειασε πολύ γρήγορα μετά το σεισμό μιας και το χρονικό διάστημα ήταν μικρό.

Ο πατέρας της ανέφερε ότι στο ισόγειο του σπιτιού τους όπου διατηρούσαν χώρο αποθήκευσης τροφικών το τσουνάμι προκάλεσε μεγάλη καταστροφή. Χαρακτηριστικά της είχε πει ότι τα κύματα σπάσανε τις βαριές ξύλινες πόρτες της αποθήκης και τις παρέσυραν μαζί με πολλά από τα πράγματα που είχαν εκεί μέσα. Μετά το τσουνάμι, είδαν πάνω στον τοίχο του ισογείου μέχρι ποιο σημείο ακριβώς είχε φτάσει η θάλασσα (2 μέτρα σε ύψος στο σημείο εκείνο). Επίσης αναφέρει ότι η προβλήτα του λιμανιού σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας εκείνη την εποχή ήταν ένα μέτρο περίπου (σε κανονικές συνθήκες).

Η θάλασσα δημιούργησε 3 ξεχωριστά μεγάλα και δυνατά κύματα. Το πρώτο ήταν και το δυνατότερο ενώ αυτά που ακλούθησαν εξασθενούσαν σταδιακά. Σπίτια δεν κατέρρευσαν στην περιοχή με το σεισμό, ούτε αναφέρθηκαν σοβαρές ζημιές στην περιοχή.

Μαρτυρία 4

Περιοχή συνέντευξης: Όλυμπος

Όνομα μάρτυρα : Φαρμακίδης Βασίλειος (*)

Έτος γεννήσεως: 1936

Μαρτυρία

Ο μάρτυρας βρισκόταν μέσα στη θάλασσα ανάμεσα στη Σαρία και στη Κάρπαθο (πιο κοντά στην ακτή της βόρειας Καρπάθου) , που ονομάζετε και στενό της Σαρίας και δεν ένιωσε το σεισμό. Ισχυρίζεται ότι ήταν πρωί (ξημέρωμα)και ξαφνικά ένιωσε τη θάλασσα να φουσκώνει και να σηκώνεται ενώ πριν από λίγο ήταν πολύ ήρεμη και ο καιρός καλός.

Στο χρονικό διάστημα που ακλούθησε, η θάλασσα σηκώθηκε για περίπου 30 δευτερόλεπτα και μετά έπεσε η στάθμη της τόσο πολύ ώστε η βάρκα έκατσε στον πάτο .Το βάθος σε εκείνο το σημείο που βρισκόταν κανονικά ήταν περίπου 2,5 μέτρα. Μετά από ένα λεπτό, η θάλασσα επέστρεψε φουσκωμένη. Όλο αυτό το φαινόμενο κράτησε περίπου 10 λεπτά. Η αναρρίχηση της θάλασσας στη στεριά ήταν περίπου 3 μέτρα.

Το σεισμό του 1948 τον ένιωσε, σε αντίθεση με αυτόν του 1956. Εκείνη τη στιγμή βρισκόταν στο σχολείο μαζί με άλλα παιδιά και βγήκαν όλοι έξω τρέχοντας φοβισμένοι από τη δύναμη του σεισμού.

Μαρτυρία 5

Όνομα μάρτυρα : Μανωλάκης

Έτος γεννήσεως:

Μαρτυρία για σεισμό του 1948

Ο μάρτυρας αναφέρει ότι ο σεισμός έγινε Δευτέρα 9 Φεβρουαρίου 1948, στις 14:00.Εκείνη τη χρονολογία ήταν 12-13 χρονών.
Μετά από 10 λεπτά από το πέρας του σεισμού είδε τη στάθμη της θάλασσας να κατεβαίνει μέχρι που άδειαζε εντελώς στη περιοχή του λιμανιού.
Από το σημείο που στεκόταν μέχρι εκεί που έβλεπε το μάτι του, η θάλασσα είχε αδειάσει εντελώς (10-15 μίλια).

Μετά από 5-6 λεπτά που η θάλασσα είχε αδειάσει, είδε ένα μεγάλο κύμα να έρχεται. Όταν αυτό έφτασε στη στεριά, η δύναμη του ήταν τόσο μεγάλη, που δεν σταμάτησε, αλλά συνέχισε να κινείται.

Το φαινόμενο αυτό επαναλήφθηκε, αλλά κάθε φορά η δύναμη του κύματος ήταν όλο και μικρότερη. Το πρώτο κύμα ήρθε κατά τις 2.00 η ώρα το μεσημέρι και συνολικά όλο το φαινόμενο διήρκησε μέχρι το βράδυ.

Ο μάρτυρας ανέφερε ότι το πιο δυνατό κύμα έφτασε μέχρι το σημείο που σήμερα βρίσκεται η πιάτσα των ταξί.

Μαρτυρία για σεισμό του 1956

Μετά τον κύριο σεισμό ένιωσε πολλούς μετασεισμούς για ένα διάστημα 1 με 1,5 μήνα .Ο σεισμός δε δημιούργησε γενικά καταστροφές στα σπίτια της περιοχής, ούτε καν ρωγμές στους τοίχους.

Μαρτυρία 6

Όνομα μαρτυρά : Μαργαρίτης Ιωάννης

Έτος γεννήσεως: 1934

Περιοχή συνέντευξης : Πλάζα Ταξί

Μαρτυρία για σεισμό του 1948

Τη χρονιά εκείνη που έγινε ο σεισμός ήταν μαθητής στο σχολείο της περιοχής. Τι στιγμή που έγινε το συμβάν, βρισκόταν στο προαύλιο με τους συμμαθητές του γιατί είχανδιάλλειμμα . Μόλις τα παιδιά αισθάνθηκαν το σεισμό, έτρεξαν να φύγουν. Καθώς ο μάρτυρας βρισκόταν στη διαδρομή προς το σπίτι του, είδε ξαφνικά τη θάλασσα να άδειαζει και το νησάκι κοντά στο λιμάνι να έχει αποκαλυφθεί εντελώς.

Ακλούθησε το παράξενο φαινόμενο που η θάλασσα ερχόταν και άδειαζε για περίπου μια ώρα (δεν ήταν σίγουρος). Μετά τον κύριο σεισμό θυμάται ότι ακολούθησαν πολλοί μετασεισμοί.

Μαρτυρία για σεισμό του 1956

Για το σεισμό του 1956 δε θυμάται να έχει αναφερθεί τίποτα στο νησί τους.

Αναφέρει ότι στην περιοχή που σήμερα βρίσκεται η πιάτσα των ταξί εκείνη την εποχή υπήρχε ένα ανοιχτό ρέμα. Το τσουνάμι έφτανε ακριβώς μέχρι εκείνο το σημείο αλλά δεν το περνούσε. Το ρέμα αυτό είχε βάθος 1.80 – 2.00 μέτρα.

Λέρος

Μαρτυρία 1

Όνομα μάρτυρα : Κωνσταντίνος Κουμούλης

Περιοχή συνέντευξης : Λάκκοι Λέρου

Ηλικία το 1956: 26 ετών

Κατά τη διάρκεια του σεισμού ο μάρτυρας βρισκόταν στο ίδιο σημείο όπου έγινε και η συνέντευξη (στο μαγαζί του). Ισχυρίζεται ότι ο σεισμός δεν ήταν πολύ δυνατός και λίγα μόνο πράγματα έπεσαν κάτω στο μαγαζί του από τη δόνηση. Κοιτώντας τη θάλασσα που βρίσκεται μπροστά είδε πως μια βάρκα που βρισκόταν σε εκείνο το σημείο (Βασίλισσα Όλγα) είχε κάτσει στον πάτο της θάλασσας. Όταν είδε αυτό το περίεργο φαινόμενο, κατέβηκε και αυτός στον πάτο και άρχισε να περπατά προς τα μέσα στη θάλασσα. Αναφέρει ότι η θάλασσα είχε τραβηχτεί ίσα με το σημείο που βρίσκεται το μπουράγιο. Μετά από λίγο, η θάλασσα άρχισε να επανέρχεται με μεγάλη δύναμη και επέδειξε ακριβώς τα σημεία όπου το τσουνάμι έφτασε σε ύψος. Επίσης επέδειξε τα σημεία που έφτασε το κύμα σε σχέση με το μαγαζί του, καθώς και το μέγεθος της πλημμύρας (inundation) που χαρακτηριστικά έφτασε μέχρι το ζαχαροπλαστείο του “Καρανικόλα”.

Θυμάται ότι το φαινόμενο αυτό που η θάλασσα ερχόταν και έφευγε συνεχίστηκε για πολλές ώρες μέχρι αργά το απόγευμα και κάθε φορά η θάλασσα έφτανε σχεδόν στο ίδιο σημείο. Ένα πράγμα που του έκανε εντυπωση είναι ότι ενώ η θάλασσα υποχωρούσε σιγά σιγά, επέστρεφε με τεράστια δύναμη και πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Ο μάρτυρας αναφέρει ότι στην περιοχή δεν έγινε κάποια σημαντική ζημιά από το τσουνάμι αλλά είχε ακούσει ότι στην περιοχή Ξερόκαμπο είχαν προκληθεί κάποιες καταστροφές στα αραγμένα καΐκια. Επίσης αναφέρει ότι στην περιοχή Τεμένια το τσουνάμι παρέσυρε ένα παλιό ναυάγιο που βρισκόταν μέσα στη θάλασσα κολλημένο στη λάσπη και το μετέφερε στη στεριά.

Μαρτυρία 2

Όνομα: Νικόλαος Καστής (Ψευδώνυμο Καμινάρης)

Γεννημένος: 1929

Ο μάρτυρας αναφέρει ότι εκείνη τη μέρα είχε παντρευτεί κι έτσι η ανάμνησή του

ήταν πολύ έντονη. Αρχικά, ένιωσε το σεισμό αλλά δεν έδωσε πολύ σημασία. Λίγο αργότερα μια γνωστή του, του είπε ότι στη θάλασσα συνέβαινε ένα περίεργο φαινόμενο. Αναφέρει ότι το φαινόμενο διήρκησε όλη την ημέρα.

Μαρτυρας : Μιγκές Παγώνης

Γεννημένος: 1939

Ο μάρτυρας αναφέρει ότι το κύμα έφτασε περίπου μέχρι το σημείο που βρίσκεται το καφενείο όπου δόθηκε και η συνέντευξη. Το σεισμό τον ένιωσαν κάπου στις 6.30 το πρωί, εκείνη την ώρα βρισκόταν στη περιοχή της Αγίας Μαρίνας όπου είδε τη θάλασσα να τραβιέται. Μετά συνέχισε για να πάει στη δουλειά του στο Παρθέني, όπου καθώς έφτανε εκεί είδε ότι όλο το λιμάνι είχε αδειάσει από νερό (κανονικό βάθος λιμανιού 1-1,5 μέτρα). Αναφέρει ότι στα σημεία που το κανονικό βάθος της θάλασσας ήταν μικρό είχε τραβηχτεί μέχρι και 100 μετρά μέσα, ενώ στα σημεία που το βάθος ήταν μεγαλύτερο περίπου 20 μέτρα. Μετά από λίγο είδε τη θάλασσα να έρχεται με δύναμη πίσω και να κατακλύζει τη στεριά. Είδε το κύμα να κάνει δυο μεγάλες διαδρομές (μέσα- έξω) και ισχυρίζεται ότι το μεσημέρι στην ατμόσφαιρα μύριζε έντονα θειάφι.

Αναφέρει ότι κάποια σπίτια γέμισαν με νερό εξαιτίας του τσουνάμι, ενώ κάποια καΐκια που βρίσκονταν στη θάλασσα παρασύρθηκαν ξαφνικά στη στεριά. Χαρακτηριστικό είναι όπως ισχυρίζεται ότι στο Ξερόκαμπο μια βάρκα βρέθηκε σφηνωμένη σε ένα πηγάδι στη στεριά. Άλλο ένα περιστατικό στην περιοχή της Τεμένιας ήταν ότι ένα βυθισμένο γερμανικό πλοίο παρασύρθηκε από τη δύναμη του τσουνάμι έξω στη στεριά κόβοντας τη συγκοινωνία. Ο κόσμος που βρισκόταν στις παραλίες κατέφυγε μετά στα βουνά της περιοχής.

Η γυναίκα του που κατάγεται από τους Λειψούς του είχε πει ότι στο νησί τους οι καταστροφές περιορίστηκαν σε λίγα σπίτια.

Μαρτυρία 3

Όνομα μάρτυρα : Νικόλας Καστής

Περιοχή συνέντευξης : Γούρνες

Έτος γέννησης: 1918

Ο μάρτυρας αναφέρει ότι ένιωσε το σεισμό, όπως και τους μετασεισμούς και λέει χαρακτηριστικά ότι το φαινόμενο διήρκησε πολύ. Προσδιορίζει την ώρα του τσουνάμι κάπου μεταξύ 6.00 και 7.00 το πρωί, καθώς είδε για πρώτη φορά τη θάλασσα να

αποτραβιέται. Τη χρονική στιγμή του φαινομένου βρισκόταν στο ίδιο ακριβώς σπίτι όπου έγινε και η συνέντευξη και αναφέρει ότι το πρώτο μεγάλο κύμα έφτασε ακριβώς μέχρι την πόρτα του. Όλο το φαινόμενο ισχυρίζεται ότι διήρκεσε 6 ώρες περίπου.

Όταν η θάλασσα αποτραβήχτηκε τη πρώτη φορά, είδε τον πάτο της θάλασσας που είχε αποκαλυφθεί, ενώ πάνω του βρίσκονταν και πολλά ψάρια. Μετά θυμάται ότι η θάλασσα επέστρεψε ξαφνικά με μεγάλη ταχύτητα. Χαρακτηριστικά θυμάται ότι είδε μια βάρκα με 3 ανθρώπους να παρασύρεται από τα δυνατά κύματα και να βγαίνουν έξω στη στεριά, σε ένα σημείο με καλαμιές. Επίσης, σε ένα γειτονικό σπίτι το νερό σήκωσε όλα τα πράγματα και τα συμπαρέσυρε μέσα στη θάλασσα. Σε ένα κοντινό σημείο, υπήρχε μια μικρή λίμνη. Μετά τον κατακλυσμό του τσουνάμι είδαν ότι στο σημείο εκείνο υπήρχε πλέον ένας βαθύς λάκκος. Ο μάρτυρας αναφέρει ότι πολλές καλλιέργειες καταστραφήκαν επίσης στην περιοχή εξαιτίας του τσουνάμι.

Η θάλασσα αποτραβιόταν μέσα μέχρι το σημείο που βρίσκονται κάτι μικρά νησάκια μπροστά από την ακτή (φαίνονταν από το σημείο της συνέντευξης). Το κανονικό βάθος της θάλασσας σε εκείνο το σημείο είναι 25 οργιές περίπου (45 μέτρα). Όσο περνούσε η ώρα το φαινόμενο εξασθενούσε.

Ο πρώτος σεισμός ισχυρίζεται ότι δεν ήταν τόσο ισχυρός όσο οι επόμενοι που ακλούθησαν. Στη περιοχή εκείνη το 1956 υπήρχαν μόνο πέντε σπίτια (ήταν απομονωμένη περιοχή). Πολλά πράγματα έπεσαν μέσα στο σπίτι του καθώς σχηματίστηκαν και ρωγμές στους τοίχους. Αναφέρει ότι λιγότερες ζημιές προκληθήκαν στα πέτρινα σπίτια σε σχέση με αυτά που ήταν από τσιμέντο. Οι άνθρωποι τότε δεν κατάλαβαν το φαινόμενο που είδαν και το απέδωσαν ως “Θεού Θυμός”.

Κασος

Μαρτυρία 1

Όνομα μάρτυρα : Εμμανουήλ Βρετός

Μαρτυρία:

Ο μάρτυρας βρισκόταν μπροστά στη θάλασσα ακριβώς.

Είδε πρώτα τη θάλασσα να μπαίνει μέσα (χωρίς να είναι σίγουρος) και στη συνέχεια να αδειάζει από νερό και τις βάρκες να κάθονται κάτω στον πάτο της θάλασσας.

Μάλλον από ότι θυμάται ήταν καλοκαίρι.

Μαρτυρία 2:

Όνομα μάρτυρα : Άγνωστο (2 κυρίες

Μαρτυρία:

Οι κυρίες ισχυρίζονται ότι τα σκαλοπάτια δίπλα στο λιμάνι είχαν καλυφτεί εντελώς. Μέτρηση στο σημείο έδειξε 2.65 μ κατακόρυφη αναρρίχηση.

Μαρτυρία 3:

Όνομα μάρτυρα : Γιάννης Διακολιος και Μανώλης Διακολιος

Έτος γέννησης: 1935 και 1944 αντιστοιχα

Μαρτυρία:

Σύμφωνα με τις μαρτυρίες τους το κύμα έφτασε 3.80μ κάθετη αναρρίχηση

Ναξος

Μαρτυρία 1

Όνομα μάρτυρα : Άγνωστο

Περιοχή συνέντευξης : Απόλλωνας

Μαρτυρία:

Δεν είδαν το πρώτο κύμα που έφτασε στην ακτή, μιας και οι ίδιοι έφτασαν στο σημείο τη στιγμή που διαδραματιζόταν το δεύτερο τσουνάμι. Θυμούνται ότι οι κάτοικοι της περιοχής μόλις υποχωρούσε η θάλασσα έμπαιναν μέσα και έπιαναν ψάρια με τα χέρια . Προσδιορίζουν την εποχή που συνέβη το φαινόμενο την άνοιξη και ισχυρίζονται ότι ο σεισμός έγινε στις γύρω στις 6 το πρωί.

Αναφέρουν χαρακτηριστικά ότι η θάλασσα ανέβηκε περίπου 20 πόντους στην παραλία (inundation) που όμως είχε διαφορετικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά τότε. Επίσης, υπολογίζουν την κάθετη αναρρίχηση του κύματος (run-up) στα 2 μέτρα σε σχέση με την κανονική της στάθμη. Άλλο ένα περίεργο χαρακτηριστικό που παρατήρησαν ήταν ότι το νερό έκανε έντονες κυκλικές κινήσεις προς τη στεριά και μετά πάλι αποτραβιόταν. Το φαινόμενο διήρκεσε συνολικά περίπου 5 ώρες.

Μαρτυρία 2

Όνομα μάρτυρα : Βαγγέλης Παπαδόπουλος του Δημητρίου

Περιοχή συνέντευξης : Χώρα

Μαρτυρία:

Το 1956 ήταν ακριβώς 20 ετών και είχε ένα γωνιακό μαγαζί επί του λιμανιού (σημερινό Cream). Ήταν 9 Ιουλίου του 1956 ώρα 5.12π.μ όταν συνέβη ο σεισμός. Εκείνη την ώρα κοιμόταν μέσα στο μαγαζί. Μόλις ένιωσε το σεισμό έτρεξε έξω από το μαγαζί μαζί με τους γονείς του και μετά το πέρας του σεισμού ανέβηκαν σε ένα κοντινό ύψωμα (Μπρατούν) με τους υπόλοιπους κατοίκους της περιοχής.

Όταν βρίσκονταν εκεί ένιωσαν το δεύτερο σεισμό (15-20 λεπτά μετά το πρώτο). Μετά το πέρας και αυτού κατέβηκε κάτω στο παραλιακό μαγαζί και τότε είδε ότι ερχόταν το τσουνάμι (περίπου στις 6 το πρωί).

Πρώτα ισχυρίζεται ότι ήρθε ένα μεγάλο κύμα και μετά τραβήχτηκε η θάλασσα. Το πρώτο κύμα δεν ήταν τόσο ισχυρό όσο ήταν τα επόμενα που ακολούθησαν και δεν κατάφερε να αναρριχηθεί στο ύψος του λιμανιού (προκυμαία). Ο ίδιος μπήκε μέσα στη θάλασσα μαζί με άλλους όταν αυτή είχε αποτραβηχτεί και έπιαναν ψάρια με τα χέρια. Θυμάται ότι στη θάλασσα συνέβαιναν έντονα φαινόμενα (έμπαινε και έβγαινε) μέχρι το μεσημέρι- μετά άρχισε να εξασθενεί. Επίσης άλλο ένα χαρακτηριστικό που θυμάται είναι ότι το φανάρι του λιμανιού (το δείχνει στο βίντεο) ήταν σημείο συνάντησης και σύγκρουσης των κυμάτων καθώς κάποια κατευθυνόντουσαν προς τη στεριά ενώ κάποια αποτραβιόντουσαν. Άλλο ένα χαρακτηριστικό που του έκανε εντύπωση είναι ότι πολλά ποντίκια που ζούσαν κρυμμένα κάτω από τη προκυμαία πριν φτάσει το πρώτο κύμα βγήκαν από τις φωλιές τους και έτρεχαν στο λιμάνι.

Από μαρτυρίες που έχει ακούσει από άλλους κατοίκους του νησιού λέει ότι το τσουνάμι πρώτα χτύπησε τον Άγιο Προκόπιο, την Αγία Άννα και το Καστράκι (παραθαλάσσιες περιοχές) κι έφτασε μέχρι μέσα στα σπίτια λόγω της μικρής υψομετρικής διαφοράς που έχουν σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας.

Σημαντικά σημεία που ο μάρτυρας ανέφερε

- Οι μετασεισμοί συνεχίστηκαν όλο το βραδύ
- Πολύ έντονος υπόκωφος θόρυβος από το σεισμό. Επίσης, το τσουνάμι έκανε ένα θόρυβο καθώς ερχόταν προς τη στεριά.

- Το κύμα αναρριγήθηκε 1.5-2 μέτρα κάθετα. Έτσι έφτασε μέχρι τις πόρτες των μαγαζιών του λιμανιού (σήμερα έχει ακριβώς την ίδια δομή). Επίσης, η θάλασσα σε ανοιχτή 'χαμηλή περιοχή' δίπλα στο λιμάνι μπήκε μέσα στη στεριά 23-25 μέτρα.
- Οι τουρίστες (λίγοι) μετά το σεισμό έφυγαν από το νησί φοβισμένοι.
- Στην παλιά πόλη του νησιού λόγω του σεισμού, κάποιες κατοικίες έπαθαν σοβαρές ζημιές.

Μαρτυρία 3

Όνομα μάρτυρα : Άγνωστο

Περιοχή συνέντευξης : Μουτσούνα

Μαρτυρία:

Ο μάρτυρας βρισκόταν δίπλα στη θάλασσα στην περιοχή Μουτσούνα. Είπε ότι το τσουνάμι έγινε το μήνα Μαΐο του 1956. Τότε ήταν 13 χρονών. Θυμάται ότι είδε τη θάλασσα να τραβιέται πίσω και να αδειάζει 50μ από το τέλος της προβλήτας (όχι από τη στεριά). Η θάλασσα πρώτα τραβήχτηκε, μετά ήρθε με ορμή και μπήκε μέσα στο προαύλιο του κτιρίου δίπλα στο λιμανάκι (φαίνεται στο βίντεο). Ενώ λέει χαρακτηριστικά ότι από την ένταση του σεισμού νόμιζες ότι όλα τα κτίρια θα πέσουν, καμία κατασκευή στο χωριό του δεν έπαθε τίποτα. Αμέσως μετά το σεισμό, είδε τη θάλασσα να τραβιέται περίπου για 3 λεπτά και μετά ήρθε το πρώτο δυνατό κύμα.. Μετά το πρώτο άδειασμα της θάλασσας ακλούθησε και δεύτερο, που όμως δεν ήταν τόσο μεγάλο όσο το πρώτο. Δε θυμάται ξεκάθαρα αν η θάλασσα τραβήχτηκε 2 ή 3 φορές αλλά λέει χαρακτηριστικά ότι κάθε φορά το 'τράβηγμα' ήταν και μικρότερο. Όλο το φαινόμενο κατά τη γνώμη του διήρκεσε περίπου 15 λεπτά. Το ύψος του κύματος έφτασε μέχρι το ύψος της αρχής των μαγαζιών που βρίσκονται δίπλα στο λιμανάκι.

Μαρτυρία 4

Όνομα μάρτυρα : Ανωμερίτης Ιωάννης

Περιοχή συνέντευξης : Παραλία-Γλυφάδας

Ηλικία: 80 χρονων

Μαρτυρία:

Η θάλασσα βγήκε έξω στην παραλία της Γλυφάδας 80-100μ και ύστερα τραβήχτηκε μέσα 100μ (άδειασε). Το σεισμό ο μάρτυρας δεν το θυμάται, μάλλον γιατί δεν τον είχε νιώσει, αφού ήταν σε εξωτερικό χώρο. Αναφέρει ότι είδε 2 φορές να αδειάζει η θάλασσα και 2 φορές να φτάνει μεγάλο κύμα στη στεριά.

Μαρτυρία 5

Όνομα μάρτυρα : Άγνωστο

Περιοχή συνέντευξης : Πανορμος

Μαρτυρία:

Ο μάρτυρας δεν βρισκόταν δίπλα στη θάλασσα όταν έγινε το περιστατικό, αλλά από μαρτυρίες άλλων έχει ακούσει ότι πρώτα άδειασε εντελώς η θάλασσα και μετά ακλούθησε το δυνατό κύμα.. Το ύψος του κύματος έφτασε μέχρι ένα πηγάδι δίπλα στην παραλία.

Μαρτυρία 6

Όνομα μάρτυρα : Άγιος Βσιλειος του Αποστολου και της Καλλιοπης

Περιοχή συνέντευξης : Άγιος Αρσενιος

Ετος γεννησεως: 1929 (78 χρονων)

Μαρτυρία:

Ο μάρτυρας ένιωσε το σεισμό δυνατά και ισχυρίζεται ότι έγιναν συγκεκριμένα δύο τέτοιες σεισμικές δονήσεις που είχαν χρονική διαφορά 15 λεπτών μεταξύ τους. Επίσης, θυμάται ότι το κύμα που δημιουργήθηκε παρέσυρε δυο βαρκάρηδες μαζί με τις βάρκες τους με την ορμή του. Τον έναν τον έβγαλε στην παραλία και τον άλλον τον παρέσυρε μέσα στη θάλασσα. Το τσουνάμι τράβηξε τη θάλασσα έως το ύψος της τούμπας των μαγαζιών. Δε θυμάται να είχαν αναφερθεί ζημιές στο νησί εξαιτίας του φαινομένου. Το μονό που θυμάται είναι ότι η θάλασσα πλημμύρισε λίγο κάποια χωράφια και κάτι μικρές λίμνες που βρίσκονταν σε παραθαλάσσιο σημείο.

Παράρτημα 2

Κλίμακα τσουνάμι- αναλυτική παρουσίαση

Κλίμακα Papadopoulos–Imamura

1. Δεν το αισθάνεσαι

- Δεν έχει κάποια επίδραση
- Δεν προκαλεί καταστροφές

2. Μόλις που το αισθάνεσαι

- Μόλις που το καταλαβαίνουν λίγοι άνθρωποι που βρίσκονται σε μικρές βάρκες στη θάλασσα. Δεν φαίνεται από τη στεριά.
- Δεν έχει κάποια επίδραση
- Δεν προκαλεί καταστροφές

3. Αδύναμος

- Το αισθάνονται οι περισσότεροι άνθρωποι που βρίσκονται σε μικρές βάρκες και μερικοί στη στεριά
- Δεν έχει κάποια επίδραση
- Δεν προκαλεί ζημιά

4. Παρατηρείται σε μεγάλη κλίμακα

- Το αισθάνονται όλοι οι άνθρωποι σε μικρές βάρκες και μερικοί στα μεγάλα πλοία. Το βλέπουν και οι περισσότεροι άνθρωποι από τη στεριά
- Μερικές μικρές βάρκες παρασύρονται ήπια στη στεριά
- Δεν υπάρχουν καταστροφές

5. Δυνατός

- Το αισθάνονται όλοι πάνω στα μεγάλα πλοία. Το παρατηρούν όλοι οι άνθρωποι από τη στεριά. Μερικοί φοβούνται και ανεβαίνουν σε υψηλότερα σημεία.
- Πολλά μικρά σκάφη παρασύρονται σε μεγάλη απόσταση πάνω στη στεριά, κάποιες συγκρούονται μεταξύ τους και άλλες ανατρέπονται. Τα κύματα μεταφέρουν και αποθέτουν στρώματα άμμου σε τοποθεσίες με ευνοϊκά αποτελέσματα. Περιορισμένη πλημμύρα της καλλιεργημένης γης κατά μήκος της ακτής.

- Περιορισμένη πλημμύρα των παρακτίων κατασκευών, κτηρίων και περιοχών (κήποι κτλ.) κοντά σε μονοκατοικίες.

6. Ελαφρώς επιβλαβής

- Πολλοί άνθρωποι φοβούνται και ανεβαίνουν σε υψόμετρο
- Τα πιο μικρά σκάφη και βάρκες παρασύρονται μέσα στη στεριά σε μεγάλες αποστάσεις, συγκρούονται δυνατά μεταξύ τους ή αναποδογυρίζουν.
- Μερικές ξύλινες κατασκευές καταστρέφονται και πλημμυρίζουν. Οι περισσότερες κατασκευές από τούβλα αντέχουν.

7. Επιβλαβής

- Οι περισσότεροι άνθρωποι φοβούνται και ανεβαίνουν σε υψόμετρο
- Τα περισσότερα μικρά πλοία και βάρκες καταστρέφονται. Αντικείμενα με μεγάλο όγκο και βάρος αναποδογυρίζουν ή μετατοπίζονται από τις θέσεις τους. Τα κύματα μεταφέρουν στρώσεις άμμου και βότσαλα στη στεριά. Μερικές κατασκευές που επιπλέουν, παρασύρονται μέσα στη θάλασσα.
- Πολλές ξύλινες κατασκευές καταστρέφονται, κάποιες αποκολλώνται εντελώς και παρασύρονται από τη θάλασσα. Καταστροφές πρώτου βαθμού και πλημμύρες σε μερικές κατασκευές από τούβλα.

8. Προκαλεί βλάβες σε μεγάλο βαθμό

- Όλοι οι άνθρωποι τρέχουν σε υψόμετρο να σωθούν, κάποιοι παρασύρονται από τη θάλασσα.
- Οι περισσότερες μικρές βάρκες και πλοία καταστρέφονται, πολλές παρασύρονται από τα κύματα. Μερικά από τα μεγάλα πλοία παρασύρονται από το τσουνάμι στη στεριά και συγκρούονται μεταξύ τους. Μεγάλα αντικείμενα παρασύρονται. Οι ακτές υφίστανται διάβρωση και γεμίζουν με απορρίμματα. Εκτεταμένη πλημμύρα, ασήμαντη καταστροφή στα παράκτια έργα για προστασία από τα τσουνάμι. Πολλές επιπλέουσες κατασκευές παρασύρονται από τα κύματα κάποιες υφίστανται μερική καταστροφή.
- Οι περισσότερες ξύλινες κατασκευές παρασύρονται από τα κύματα ή καταστρέφονται εντελώς. Καταστροφές δευτέρου βαθμού σε μερικές κατασκευές από τούβλο. Οι περισσότερες κατασκευές από σκυρόδεμα δεν καταστρέφονται καθόλου, λίγες υφίστανται καταστροφή πρώτου βαθμού.

9. Καταστροφικός

- Πολλοί άνθρωποι παρασύρονται από τα κύματα
- Τα περισσότερα πλοία καταστρέφονται και παρασύρονται από τα κύματα. Πολλά μεγάλα πλοία παρασύρονται βαθιά μέσα στη ξηρά και κάποια καταστρέφονται εντελώς. Εκτεταμένη διάβρωση και μεταφορά απορριμμάτων στην ακτή. Τοπική καθίζηση του εδάφους της περιοχής και μερική καταστροφή των έργων προστασίας από τα τσουνάμι. Οι περισσότερες ξύλινες κατασκευές παρασύρονται από τα κύματα ή καταστρέφονται εντελώς.

- Καταστροφές τρίτου βαθμού σε πολλές κατασκευές από τούβλα. Μερικές κατασκευές από σκυρόδεμα υφίστανται ζημιές δευτέρου βαθμού.

10. Πολύ καταστροφικός

- Επικρατεί πανικός. Οι περισσότεροι άνθρωποι παρασύρονται από τη θάλασσα
- Τα περισσότερα μεγάλα πλοία παρασύρονται μέσα στη στεριά σε μεγάλες αποστάσεις, πολλά καταστρέφονται και άλλα συγκρούονται με κτήρια. Πέτρες παρασύρονται από τα κύματα στη στεριά από τον βυθό της θάλασσας. Οχήματα αναποδογυρίζουν και παρασύρονται. Καθίζηση εδάφους, διαρροή πετρελαίου, φωτιές.
- Καταστροφές τετάρτου βαθμού σε κατασκευές από τούβλα και καταστροφές τρίτου βαθμού σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Τεχνητά φράγματα και κυματοθραύστες καταστρέφονται.

11. Τεράστια καταστροφή

- Οι επικοινωνίες καταστρέφονται. Φωτιές σε πολλά σημεία. Ανάστροφες ροές προς τη θάλασσα παρασέρνουν οχήματα και άλλα αντικείμενα. Μεγάλες πέτρες από το βυθό της θάλασσας παρασύρονται στη στεριά με τη βοήθεια των δυνατών κυμάτων.
- Καταστροφές πέμπτου βαθμού σε κατασκευές από τούβλα και τρίτου και τετάρτου βαθμού σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

12. Ολική καταστροφή

- Όλες οι κατασκευές καταστρέφονται εκτός από λίγες που είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα