

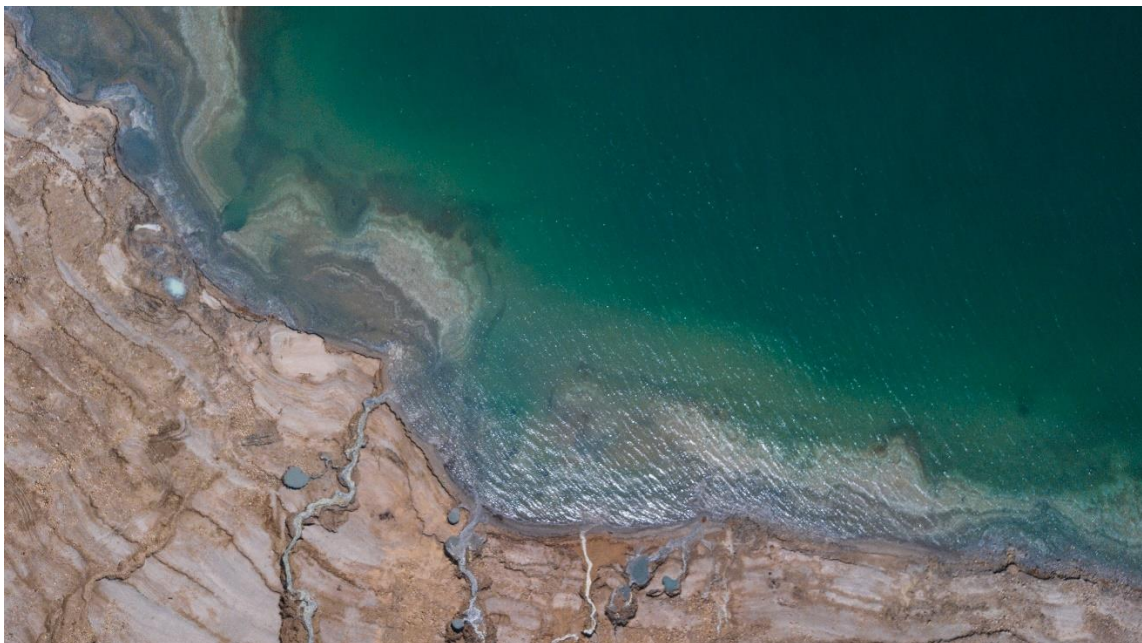


ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Διαχρονική παρατήρηση των μεταβολών της Νεκράς Θάλασσας

Πτυχιακή Εργασία

Τσιμάρα Ελένη



Αθήνα, Ιούλιος 2020



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ευθύμιος Καρύμπαλης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Ποτάμιας και Παράκτιας Γεωμορφολογίας, Τμήμα Γεωγραφίας,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Ισαάκ Παρχαρίδης

Καθηγητής Τηλεπισκόπησης - Φωτοερμηνείας,
Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Χρίστος Χαλκιάς

Καθηγητής Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και
Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας, Τμήμα Γεωγραφίας,
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Εγώ, η Ελένη Τσιμάρα δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- ❖ Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- ❖ Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εργασία αυτή, ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στο τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών. Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που βρέθηκαν δίπλα μου, με στήριξαν, μου μετέδωσαν τη γνώση τους και με βοήθησαν ώστε να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Ευθύμιο Καρύμπαλη ο οποίος είχε και την ευθύνη της επίβλεψης αυτής της εργασίας. Τον ευχαριστώ τόσο για την πολύτιμη συμβολή και υποστήριξη κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας, όσο και για τις καθοριστικής σημασίας παρατηρήσεις και υποδείξεις του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Ισαάκ Παρχαρίδη, καθηγητή του τμήματος Γεωγραφίας, για τις υποδείξεις και τις παρατηρήσεις του, οι οποίες αποδείχθηκαν πολύτιμες για την εργασία αυτή.

Επιπλέον, ευχαριστώ όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για τις προτάσεις και ιδέες που μου έδωσαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και κυρίως για την ψυχολογική τους υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, για την ψυχολογική υποστήριξη, αλλά και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε μέσα στο πέρασμα του χρόνου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	13
1.1 Γενικά – Γεωγραφική θέση	13
1.2 Μεταβολές στο επίπεδο υδάτων.....	15
1.3 Γεωλογία	25
1.3.1 Το ρήγμα μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας	25
1.3.2 Λεκάνη Νεκράς Θάλασσας	29
1.3.2.1 Νότια λεκάνη	32
1.3.2.2 Βόρεια λεκάνη	32
1.3.3 Παλαιότερα υδάτινα σώματα	33
1.4 Υδρογεωλογία	35
1.5 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά.....	36
1.6 Χημική σύσταση του νερού - Αλατότητα.....	41
1.7 Καταβόθρες.....	42
1.8 Τουρισμός και επιπτώσεις από την πτώση της στάθμης	49
1.9 Πολιτικές για την διάσωση της Νεκράς Θάλασσας	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	56
2.1 Δεδομένα.....	56
2.2 Μεθοδολογία	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ.....	90
ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ.....	97

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	98
ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διαχρονική παρακολούθηση των αλλαγών της Νεκράς Θάλασσας για τα έτη 1972 – 2019, με την αξιοποίηση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, και την χρήση δορυφορικών και λοιπών δεδομένων. Ειδικότερα, εξετάζεται το πρόβλημα της συρρίκνωσης της επιφάνειας των υδάτων, το οποίο αποτελεί ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Ο πυρήνας της μεθοδολογίας βασίζεται στην ψηφιοποίηση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας με την χρήση δορυφορικών εικόνων, και την αξιοποίηση του λογισμικού ArcGIS για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στο Δορυφορικό Προγράμμα Landsat της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration - NASA). Πιο συγκεκριμένα, για την διαδικασία της ψηφιοποίησης έγινε χρήση ψευδέγχρωμων εικόνων, οι οποίες εξήχθησαν με την αξιοποίηση του ArcMap. Οι εικόνες αυτές φέρουν υπέρυθρα κανάλια, διότι τα υδάτινα σώματα απορροφούν την ακτινοβολία των καναλιών αυτών, επομένως είναι περισσότερο διακριτό το όριο μεταξύ της ξηράς και των υδάτων. Παράλληλα, για την ανάλυση της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε και μια σειρά χαρτών, όπως ένας γεωλογικός χάρτης, ένας χάρτης καλύψεων γης, καθώς και ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ψηφιοποίηση, παράχθηκαν χάρτες που παρουσιάζουν την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας για όλο χρονικό διάστημα μελέτης και ανά δεκαετία. Συμπερασματικά, προέκυψε ότι μέσα σε 47 χρόνια, η στάθμη Νεκράς Θάλασσας έχει μειωθεί κατά 38 μέτρα και η έκτασή της κατά 375 km², που αντιστοιχεί σε 38% μείωσης από την αρχική έκταση. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η στάθμη της λίμνης συνεχίζει να μειώνεται με ρυθμό 1 m/έτος, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον της και χρήζει λήψης μέτρων από τις αρμόδιες αρχές.

Λέξεις κλειδιά: Μεταβολή στάθμης υδάτων, ΣΓΠ, Ψηφιοποίηση, Δορυφορικά Δεδομένα, Νεκρά Θάλασσα, Καταβόθρες

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the observation of the over-time changes of the Dead Sea for the years 1972 – 2019, with the utilization of Geographic Information Systems and the use of satellite and other data. Particularly, the problem of the shrinking of the water surface, which is a global environmental problem, is being addressed. The core of the methodology is based on the digitization of the Dead Sea level using satellite imagery, and the utilization of ArcGIS software for the extraction of the results. The satellite images that were used belong to the Landsat Satellite Program of National Aeronautics and Space Administration (NASA). Specifically, false color images were used for the digitization process, which were exported using ArcMap. These images include infrared bands, because water bodies absorb the radiation of these bands, so the boundary between land and water is more distinct. Moreover, in order to help analyze the study area a series of maps was created, such as a geological map, a land cover map and a digital elevation model. Based on the results obtained from the digitization, maps were produced showing the shrinkage of the Dead Sea for the entire study period and for every decade. In conclusion, it turned out that within 47 years the level of the Dead Sea has decreased by 38 meters and its area by 375 km², which corresponds to a 38% reduction from the original area. It is important to note that the level of the lake continues to decline at a rate of 1 m/year, which negatively affects its environment and requires measures to be taken by the competent authorities.

Keywords: Water Level Change, GIS, Digitization, Satellite Data, Dead Sea, Sinkholes

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Χάρτης της Νεκράς Θάλασσας. (Ιδία επεξεργασία, Πηγή δεδομένων: ESRI)	14
Χάρτης 2: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	73
Χάρτης 3: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	75
Χάρτης 4: Χάρτης καλύψεων γης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	78
Χάρτης 5: Χάρτης που παρουσιάζει την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας σε διάστημα 47 ετών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	83
Χάρτης 6: Χάρτης που παρουσιάζει την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας σε διάστημα 47 ετών με υπόβαθρο έγχρωμη true color εικόνα του 2019. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).....	84
Χάρτης 7: Χάρτης που παρουσιάζει το επίπεδο της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1972-2019 ανά δεκαετία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μεταβολές της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1810 μέχρι σήμερα. (Πηγή: Israel Water Authority, Swarieh et al. 2000)	18
Πίνακας 2: Επίπεδο της στάθμης το 1979/1980. (Israel Water Authority).....	22
Πίνακας 3: Επίπεδο της στάθμης το 1991/1992. (Israel Water Authority).....	23
Πίνακας 4: Πίνακας μέσης ελάχιστης, μέσης μέγιστης και μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας για την χρονική περίοδο 1995-2009. (Πηγή: Israel Meteorological Service)	36
Πίνακας 5: Μέση μηνιαία βροχόπτωση στην Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1981-2010. (Πηγή: Israel Meteorological Service).....	38
Πίνακας 6: Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής στην Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1981-2010. (Πηγή: Israel Meteorological Service).....	39
Πίνακας 7: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία στη Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1992-2011. (Πηγή: Israel Meteorological Service).....	40
Πίνακας 8: Η χημική σύσταση της Νεκράς Θάλασσας σε σύγκριση με την σύσταση μιας τυπικής λεκάνης εξάτμισης (g/l). (Πηγή: TAHAL Group, 2011)	41
Πίνακας 9: Αριθμός τουριστών στο Ισραήλ και την Ιορδανία από το 1995-2018. (Πηγή: World Bank Group)	49
Πίνακας 10: Πίνακας με τις ημερομηνίες λήψης των εικόνων και τους αντίστοιχους δορυφόρους. (Πηγή: USGS).....	57
Πίνακας 11: Πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων. (Πηγή: USGS).....	57
Πίνακας 12: Πίνακας με τα ποσοστά των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	76
Πίνακας 13: Ποσοστά καλύψεων γης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	79
Πίνακας 14: Επίπεδα της στάθμης από το 1970-2019. (Πηγή: Israel Water Authority).....	82
Πίνακας 15: Μεταβολή της έκτασης από το 1972-2019. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	85
Πίνακας 16: Μεταβολή της έκτασης ανά έτος μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	85
Πίνακας 17: Απώλειες εκτάσεων ανά δεκαετία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Υψομετρικό προφίλ της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Allan et al., 2012).....	14
Εικόνα 2: Χάρτης που απεικονίζει την θέση της Θάλασσας της Γαλιλαίας και του ποταμού Yarmouk σε σχέση με την Νεκρά Θάλασσα. (Πηγή: https://www.middleeasteye.net/opinion/dead-river-how-waters-jordan-run-foul , 10/7/2020).	19
Εικόνα 3: Τοποθεσία του καναλιού King Abdullah. (Πηγή: Al-Mashagbah, 2015)	20
Εικόνα 4: Απεικόνιση της ισορροπίας του νερού της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: TAHAL Group, 2011)	21
Εικόνα 5: Διάγραμμα με τον ρυθμό μεταβολής της στάθμης από το 1978-2014 σε m/έτος. (Πηγή: Lensky & Dente, 2015)	24
Εικόνα 6: Α) Σχέδιο που απεικονίζει τις βασικές γεωλογικές δομές κατά μήκος της Νεκράς Θάλασσας, Β) Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την αρχιτεκτονική της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας. Καθώς η πλευρική κίνηση συνεχίζεται, τα άκρα της λεκάνης απομακρύνονται και η λεκάνη γίνεται παράλληλη με τον μετασχηματισμό. (Πηγή: Garfunkel & Ben-Avraham, 1996) 25	
Εικόνα 7: Χάρτης του ρήγματος μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας, το οποίο συνδέει την διάνοιξη Κόλπου Σουέζ – Ερυθράς Θάλασσας, με την ζώνη σύγκλισης των ορέων Ταύρου – Ζάγκρος. Η πλάγια οριζόντια ολίσθηση δημιουργεί μια σειρά λεκανών πλάγιας απομάκρυνσης (pull-apart basins), που αναπτύσσονται κατά μήκος του ρήγματος. (Πηγή: Ben-Avraham et al., 2008)	26
Εικόνα 8: Α) Θέση της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας στο πλαίσιο του συστήματος μετασχηματισμού, Β) Κύρια ρήγματα της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Smit et. al., 2008)	27
Εικόνα 9: Χάρτης με τα κύρια ρήγματα και τα διάπυρα άλατος Lisan & Sodom στη Νεκρά Θάλασσα (Πηγή: Jackson & Hudc, 2017).....	30
Εικόνα 10: Χάρτης που δείχνει την έκταση της λιμνοθάλασσας Sedom και τη μέγιστη έκταση της λίμνης Lisan (Πηγή: Kafri & Yechieli, 2010).	34
Εικόνα 11: Αριθμός καταβοθρών από το 1980 έως το 2016 (κόκκινη γραμμή) και επίπεδα της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1976 έως το 2018 (μπλε γραμμή). (Πηγή: Nof et al., 2019)	42
Εικόνα 12: Καταβόθρες κατά μήκος της ακτής της Νεκράς Θάλασσας κοντά στο Ein Gedi. Η έκπλυση των μετάλλων δίνει χρώματα στις πισίνες των καταβοθρών. (Photo by: George Steinmetz)	43
Εικόνα 13: Α) Το ρήγμα μετασχηματισμού και η λεκάνη πλάγιας απομάκρυνσης (pull-apart basin) της Νεκράς Θάλασσας, Β) Ρήγματα (μάυρες γραμμές) και καταβόθρες (κόκκινα σημεία) στην περιοχή της Νεκράς Θάλασσας, Γ) Ρήγματα και περιοχές καταβοθρών στη δυτική ακτή. (Πηγή: Ezersky et al., 2017)	45

Εικόνα 14: Καταβόθρες σε πεδία πηλού (mudflats) ανατολικά του αλλουβιακού ριπιδίου (alluvial fan) του Wadi Zeelim. Το μήκος αυτής της τοποθεσίας είναι περίπου 500 μέτρα. (Πηγή: Yechieli et al., 2016).....	46
Εικόνα 15: Χάρτης των ζωνών επικινδυνότητας που σχετίζονται με την πτώση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας. Οι μαύρες κουκίδες/επιφάνειες είναι οι θέσεις καταβοθρών και εδαφικών υποχωρήσεων. Οι Περιοχές I, II και III υποδηλώνουν τον βαθμό επικινδυνότητας ή/και τον τρόπο πρόκλησης των εδαφικών υποχωρήσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε μεγάλα ρήγματα. (Πηγή: Closson & Abou Karaki, 2009).....	48
Εικόνα 16: Οι περιοχές των ποτάμιων αναβαθμίδων (fluvial terraces) στα ρέματα Al-Shaqiq, Ma'een και Mujib στην ανατολική ακτή της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Ghazleh et al., 2010) ..	51
Εικόνα 17: Χάρτης του έργου μεταφοράς νερού από την Ερυθρά Θάλασσα στην Νεκρά Θάλασσα. (Πηγή: https://www.hydroreview.com/2016/12/07/red-dead-project-in-the-middle-east-will-include-hydropower/ , 12/4/2020).....	54
Εικόνα 18: Επιλογή Data Frame Properties.....	60
Εικόνα 19: Επιλογή του συστήματος αναφοράς.....	60
Εικόνα 20: Λειτουργία Select Features και επιλογή της λεκάνης.....	61
Εικόνα 21: Εξαγωγή δεδομένων με την επιλογή Export Data.....	62
Εικόνα 22: Λειτουργία Clip.....	63
Εικόνα 23: Επιθυμητές πληροφορίες για το SRTM αρχείο.....	64
Εικόνα 24: Λειτουργία Mosaic to New Raster.....	65
Εικόνα 25: SRTM αρχεία πριν και μετά την διαδικασία του Mosaicing.....	66
Εικόνα 26: Λειτουργία Composite Bands.....	68
Εικόνα 27: Επιλογή Start Editing.....	69
Εικόνα 28: Επιλογή Create Features.....	70

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, τα ζητήματα περιβαλλοντικής υποβάθμισης έχουν γίνει πρωταρχικός τομέας έρευνας λόγω των υπερβολικών ανθρώπινων και φυσικών δραστηριοτήτων. Το πρόβλημα της συρρίκνωσης της επιφάνειας των υδάτων έχει καταστεί παγκόσμια περιβαλλοντική πρόκληση. Είναι γνωστό ότι το νερό είναι ο πολυτιμότερος φυσικός πόρος στη Γη και αποτελεί αναμφισβήτητο σημαντικό παράγοντα για την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της περιοχής, για την βιωσιμότητα του περιβάλλοντος αλλά και για την επιβίωση των ανθρώπων. Όμως, αυτή η πηγή ζωής αποτελεί πλέον είδος εν ανεπάρκεια, ιδιαίτερα στις περιοχές της Μέσης Ανατολής, όπου αντιμετωπίζουν προβλήματα μεγάλης λειψυδρίας εξαιτίας των συνθηκών ξηρασίας που δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση της ζήτησης για παροχή νερού. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχει αυξηθεί κατά μεγάλο βαθμό η διεξαγωγή περιβαλλοντικών μελετών που αφορούν ζητήματα όπως η συρρίκνωση της επιφάνειας του νερού.

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την παρατήρηση των μεταβολών της Νεκράς Θάλασσας για την περίοδο 1972-2019 με την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, δορυφορικών εικόνων και λοιπών βοηθητικών δεδομένων. Μέσα από τον εντοπισμό των μεταβολών έγινε προσπάθεια ερμηνείας τους και εξήχθησαν ορισμένα συμπεράσματα. Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε λόγω των εκτεταμένων διαχρονικών αλλαγών που έχει, καθώς και του ιδιαίτερου περιβάλλοντός της.

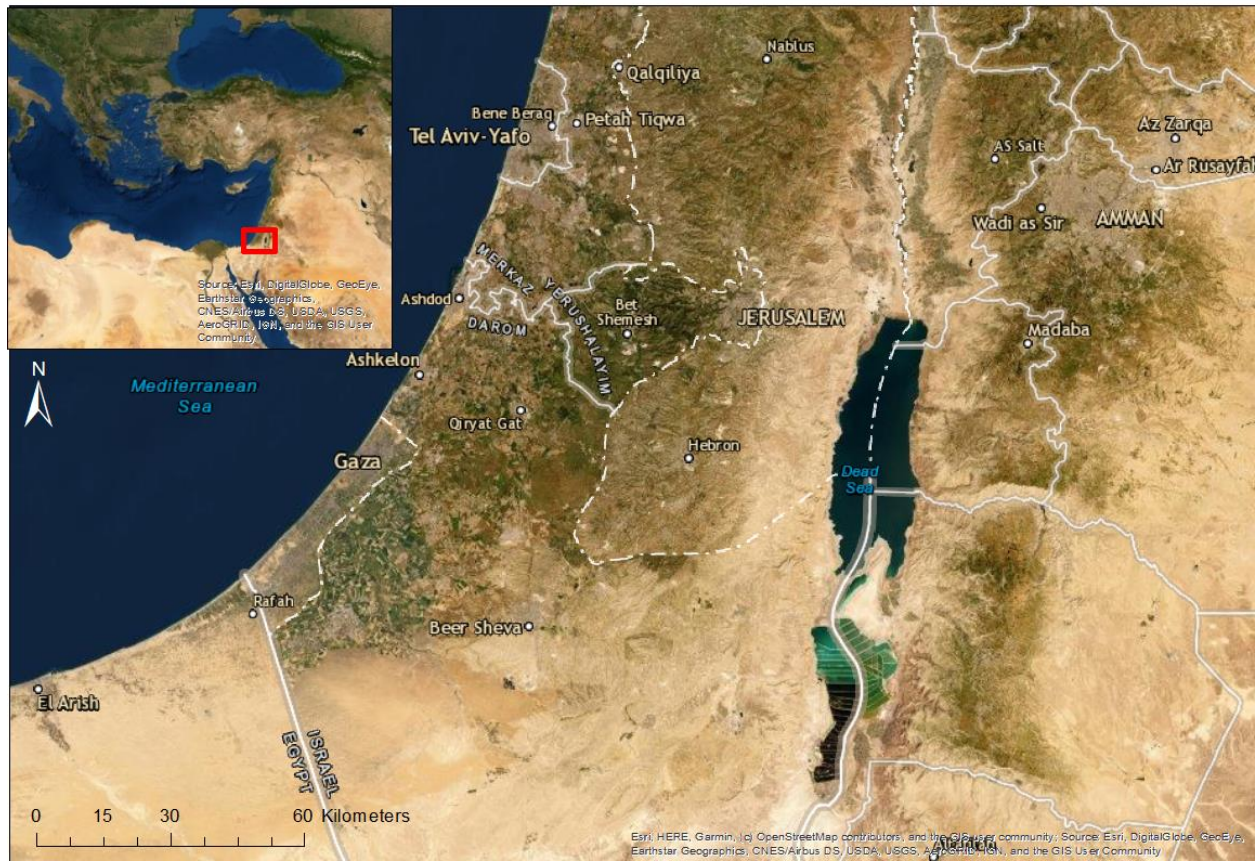
Με βάση όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η εργασία ακολουθεί μία συγκεκριμένη δομή. Αρχικά, δομείται το απαραίτητο θεωρητικό πλαίσιο γύρω από την περιοχή μελέτης, που έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά της περιοχής, τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που την πλήττουν καθώς και τις πολιτικές που πρόκειται να υιοθετηθούν για τους κινδύνους αυτούς. Στην συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και στην μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο, το τέταρτο, εξάγονται κάποια συμπεράσματα με βάση τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

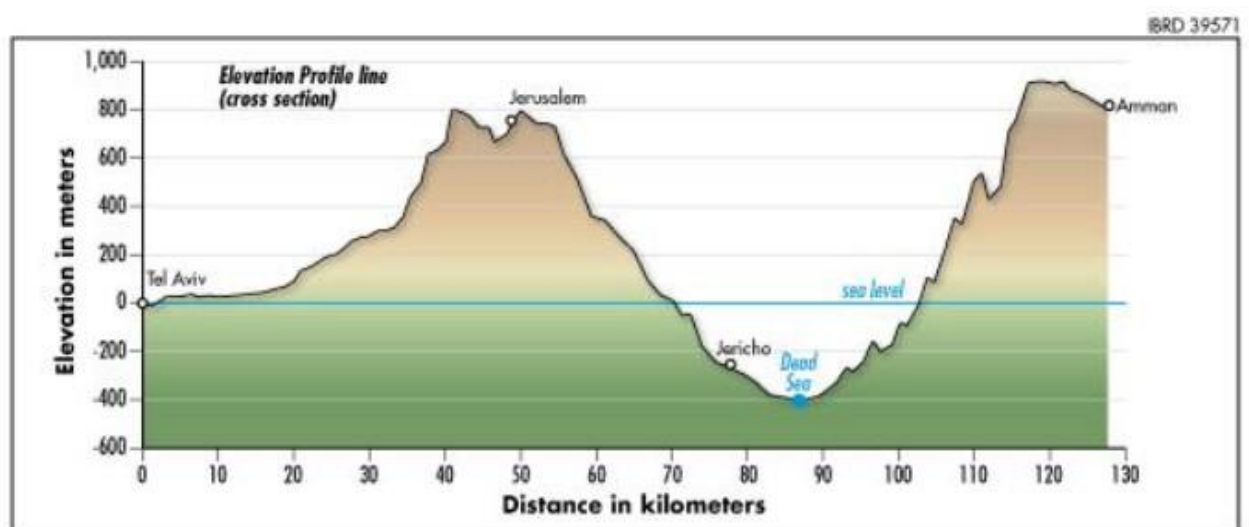
1.1 Γενικά – Γεωγραφική θέση

Η Νεκρά Θάλασσα, που αποκαλείται επίσης Θάλασσα Αραβά, είναι μια αλμυρή λίμνη, που βρίσκεται κεντρικά της ρηξιγενούς κοιλάδας της Ιορδανίας, η οποία εκτείνεται από την λίμνη Τιβεριάδα στα βόρεια, μέχρι τον Κόλπο της Άκαμπα στα νότια. (Alhusban & Almanasyeh, 2017). Στο σύστημα συντεταγμένων WGS84, έχει γεωγραφικό πλάτος (φ) 31° 30' 00" N και γεωγραφικό μήκος (λ) 35° 30' 00" E (<https://geohack.toolforge.org/>, 13/2/2020) αποτελώντας ένα φυσικό όριο μεταξύ του Ισραήλ στα δυτικά και της Ιορδανίας στα ανατολικά. Παράλληλα, βρίσκεται στον νότιο τομέα του ρήγματος μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας (DST), το οποίο χωρίζει την αραβική και αφρικανική πλάκα. Το ρήγμα αυτό, αποτελεί μία από τα πιο επιμήκεις και στενές γεωλογικές δομές στον κόσμο που εκτείνεται σε περίπου 1.000 χλμ. από την Ερυθρά Θάλασσα προς την αλπική ορογενετική ζώνη στην Τουρκία, κατά μήκος του περιθωρίου της Ανατολικής Μεσογείου. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι η πολύ υψηλή αλατότητα (340 g/L) και πυκνότητα (1.24 kg/L) (Lensky et al., 2005). Η λεκάνη απορροής της είναι περίπου 40.000km², ξεκινάει από το όρος Ερμών στα βόρεια και φτάνει 100 χλμ. νότια της ΝΘ, ενώ παράλληλα είναι από τις τελευταίες που σχηματίστηκαν κατά μήκος του ρήγματός της (Asmar, 2003, Greenbaum et al., 2006, Quennell, 1958, Enzel et al., 2003). Αξίζει να σημειωθεί ότι το βαθύτερο σημείο της λίμνης (-730 μ.) είναι το βαθύτερο χερσαίο σημείο της Γης. Επί του παρόντος, η ακτογραμμή της λίμνης βρίσκεται περίπου 434 μέτρα κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας λόγω αρνητικού υδατικού ισοζυγίου, κυρίως εξαιτίας ανθρωπογενών επιδράσεων (Israel Water Authority, 2020).

ΝΕΚΡΑ ΘΑΛΑΣΣΑ



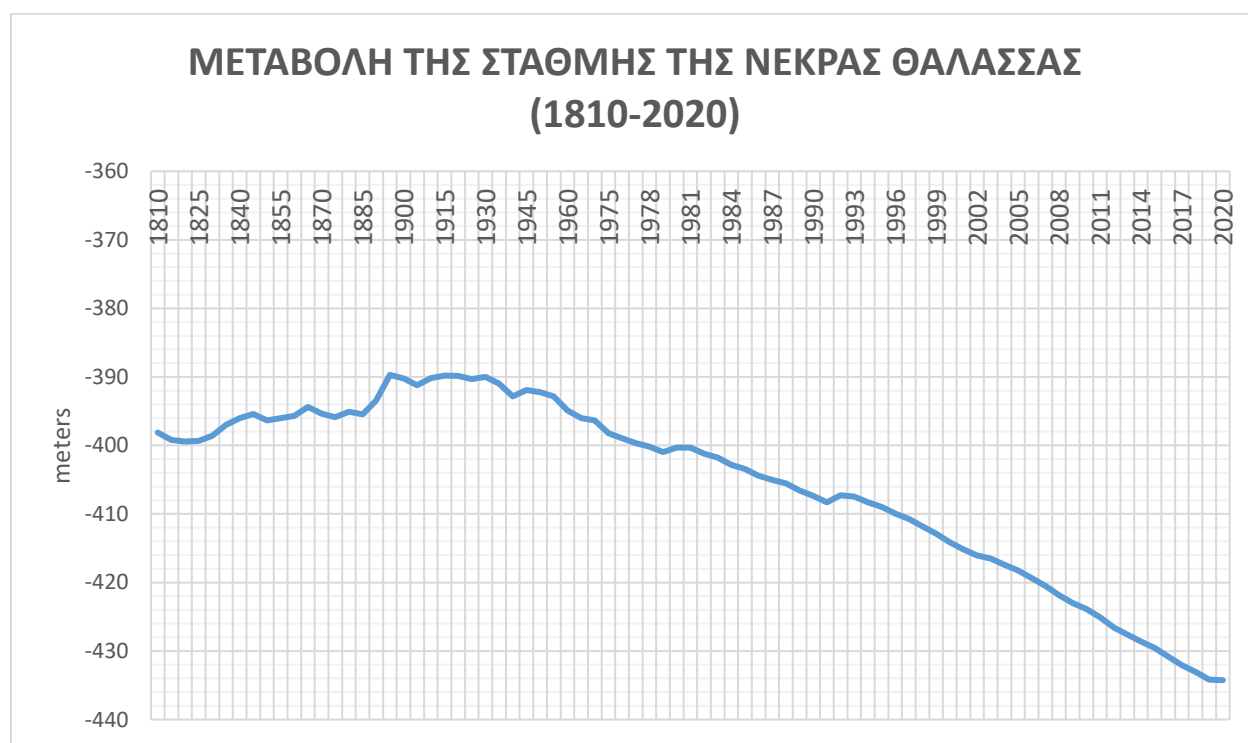
Χάρτης 1: Χάρτης της Νεκράς Θάλασσας. (Ιδία επεξεργασία, Πηγή δεδομένων: ESRI)



Εικόνα 1: Υψομετρικό προφίλ της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Allan et al., 2012)

1.2 Μεταβολές στο επίπεδο υδάτων

Το επίπεδο των επιφανειακών υδάτων της Νεκράς Θάλασσας και η γύρω περιοχή έχουν υποστεί αλλαγές που ξεκινούν από την δεκαετία του 1930, ενώ από την δεκαετία του 1950 η στάθμη άρχισε να μειώνεται με ανησυχητικούς ρυθμούς ενός μέτρου ετησίως, κατά μέσο όρο. Σύμφωνα με τον Πίνακα (1) από το 1810 μέχρι το τέλος του 19^{ου} αιώνα παρατηρείται μια αύξηση της στάθμης κατά 8,39 μέτρα, γεγονός που υποδηλώνει μια βροχερή περίοδο, ειδικά στο δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, το επίπεδο της Νεκράς Θάλασσας μειώθηκε κατά 22,62 μέτρα, ενώ από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα μέχρι σήμερα, η πτώση της στάθμης φτάνει τα 20,13 μέτρα.



Έτος	Επίπεδο νερού (m)
1810	-398,1
1815	-399,21
1820	-399,43
1825	-399,33
1830	-398,58
1835	-396,98
1840	-396
1845	-395,42
1850	-396,34
1855	-396,03
1860	-395,7
1865	-394,4
1870	-395,39
1875	-395,88
1880	-395,07
1885	-395,45
1890	-393,45
1895	-389,71
1900	-390,25
1905	-391,22
1910	-390,19
1915	-389,8
1920	-389,85
1925	-390,32
1930	-390,01
1935	-390,98
1940	-392,85

1945	-391,9
1950	-392,25
1955	-392,85
1960	-394,92
1965	-396
1970	-396,35
1975	-398,21
1976	-398,95
1977	-399,66
1978	-400,19
1979	-400,99
1980	-400,31
1981	-400,34
1982	-401,20
1983	-401,75
1984	-402,86
1985	-403,45
1986	-404,41
1987	-405,02
1988	-405,55
1989	-406,59
1990	-407,39
1991	-408,28
1992	-407,28
1993	-407,48
1994	-408,32
1995	-408,94
1996	-409,96

1997	-410,73
1998	-411,79
1999	-412,87
2000	-414,13
2001	-415,17
2002	-416,07
2003	-416,54
2004	-417,40
2005	-418,24
2006	-419,37
2007	-420,47
2008	-421,86
2009	-423,00
2010	-423,83
2011	-425,08
2012	-426,58
2013	-427,57
2014	-428,60
2015	-429,54
2016	-430,79
2017	-432,08
2018	-433,04
2019	-434,17

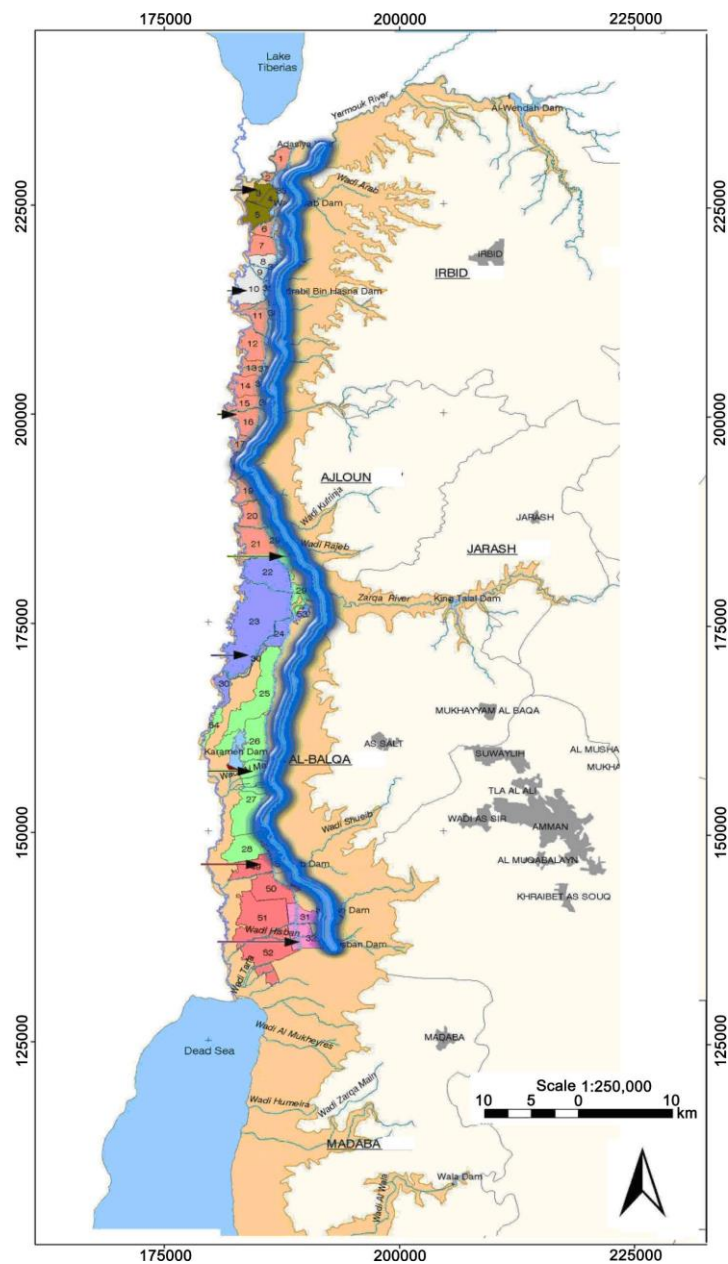
Πίνακας 1: Μεταβολές της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1810 μέχρι σήμερα. (Πηγή: Israel Water Authority, Swarich et al. 2000)

Ο κύριος λόγος αυτής της ταχείας πτώσης είναι η μείωση της εισροής γλυκού νερού μέσω του ποταμού Ιορδάνη στη Νεκρά Θάλασσα, η οποία έχει μειωθεί από περίπου 1.250 εκατομμύρια κυβικά μέτρα/έτος (MCM/yr) τη δεκαετία του 1950, σε 260 MCM/έτος το 2009, αντιπροσωπεύοντας λιγότερο από το 21% της αρχικής του ροής (Salem, H. S., 2009).

Από την ετήσια εισροή νερού ($\approx 1,3$ δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα MCM/έτος), η οποία ρέει στον ποταμό Ιορδάνη, καταλήγοντας στη Νεκρά Θάλασσα, περισσότερο από το 96% εκτρέπεται για γεωργικές και οικιακές χρήσεις από τις γειτονικές χώρες, αφήνοντας μόνο μια πολύ μικρή ποσότητα νερού να φτάσει στη Νεκρά Θάλασσα (Salem, 2020). Συγκεκριμένα, από τη δεκαετία του 1960, ύδατα από την Θάλασσα της Γαλιλαίας διοχετεύονται στον Εθνικό Φορέα Υδάτων του Ισραήλ και το μεγαλύτερο μέρος του ποταμού Yarmouk εκτρέπεται από τη Συρία και την Ιορδανία στο κανάλι King Abdullah, ενώ το υπόλοιπο καταλαμβάνεται από το Ισραήλ (TAHAL Group, 2011).



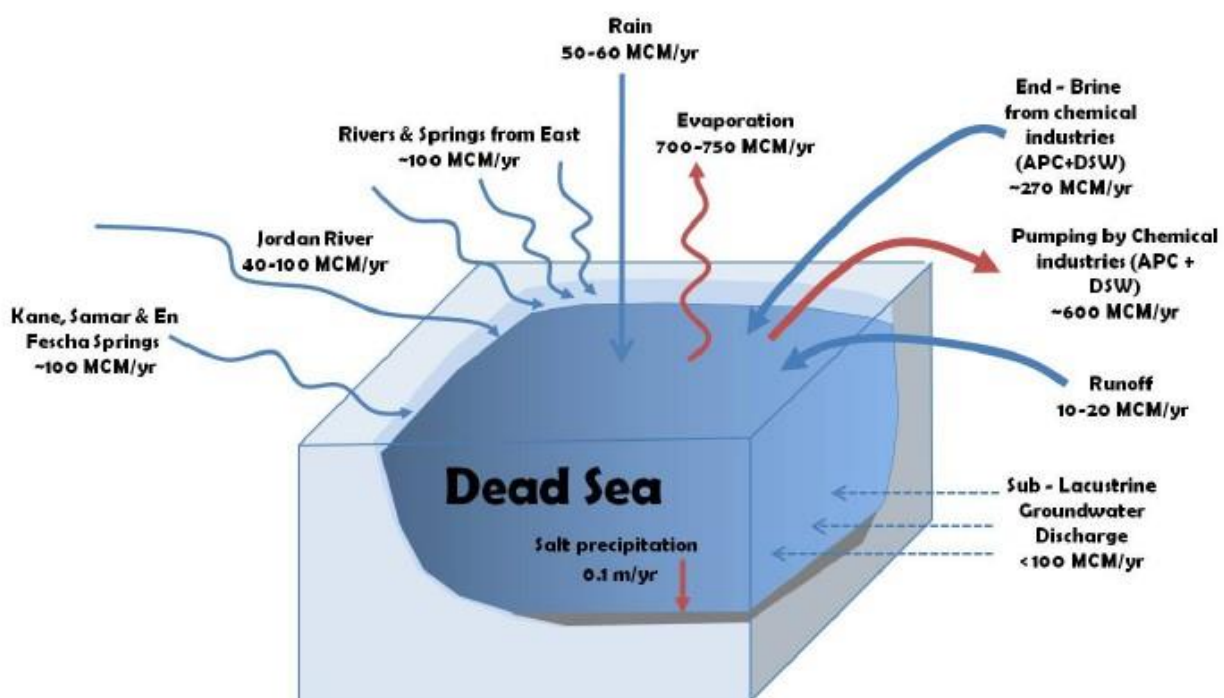
Εικόνα 2: Χάρτης που απεικονίζει την θέση της Θάλασσας της Γαλιλαίας και του ποταμού Yarmouk σε σχέση με την Νεκρά Θάλασσα. (Πηγή: <https://www.middleeasteye.net/opinion/dead-river-how-waters-jordan-run-foul>, 10/7/2020).



Εικόνα 3: Τοποθεσία του καναλιού King Abdullah. (Πηγή: Al-Mashagbah, 2015)

Παράλληλα, εκτός από την εκτροπή των υδάτων του Ιορδάνη, οι δραστηριότητες εξόρυξης ποτάσας που πραγματοποιούνται από Ισραηλινές και Ιορδανικές εταιρείες στις δυτικές και ανατολικές ακτές της Νεκράς Θάλασσας, κατά μήκος της νότιας λεκάνης, συμβάλλουν στη δραστική μείωση της στάθμης των υδάτων της, καθώς και στη μείωση της επιφάνειάς της και, συνεπώς, στη συρρίκνωση της έκτασής της (Salem, 2020). Οι εν λόγω βιομηχανίες μαζί

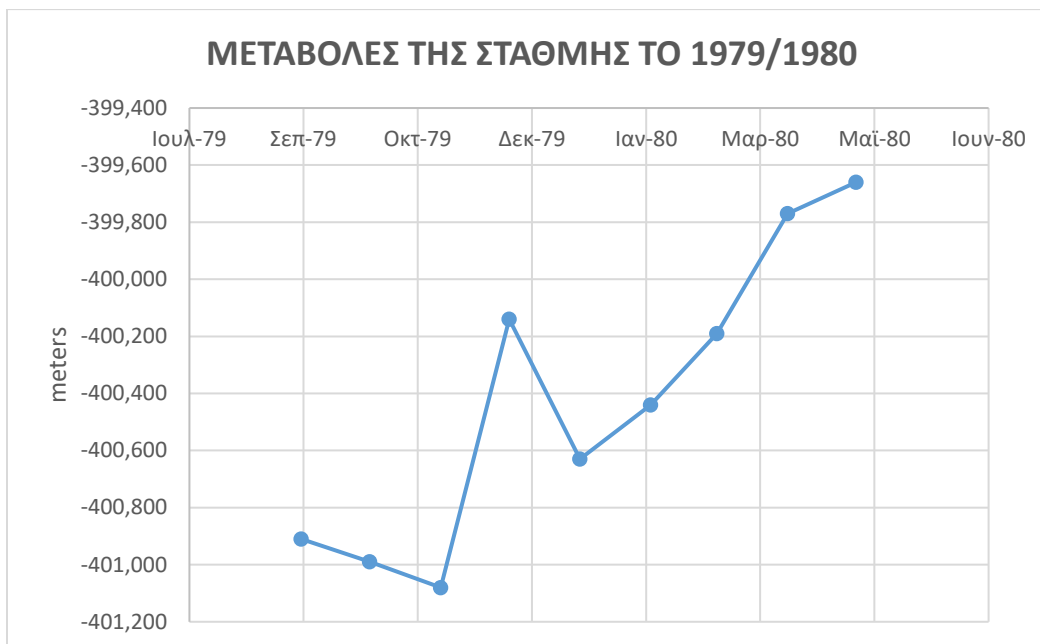
διοχετεύουν 600 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (MCM) άλμης από τη Νεκρά Θάλασσα στις λίμνες εξάτμισης (αλυκές), που βρίσκονται στη νότια λεκάνη, και επιστρέφουν πίσω στη λίμνη περίπου 270 MCM συμπυκνωμένης άλμης (TAHAL Group, 2011). Συνολικά, η εξάτμιση των νερών της λίμνης εκτιμάται ότι είναι περίπου 1.400 mm ετησίως. Αυτή η υψηλή εξάτμιση είναι πολύ πιθανό να ενταθεί στο μέλλον, λόγω της κλιματικής αλλαγής, και να προκαλέσει μεγαλύτερο πλήγμα στην ισορροπία του υδάτινου περιβάλλοντος της Νεκράς Θάλασσας.



Εικόνα 4: Απεικόνιση της ισορροπίας του νερού της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: TAHAL Group, 2011)

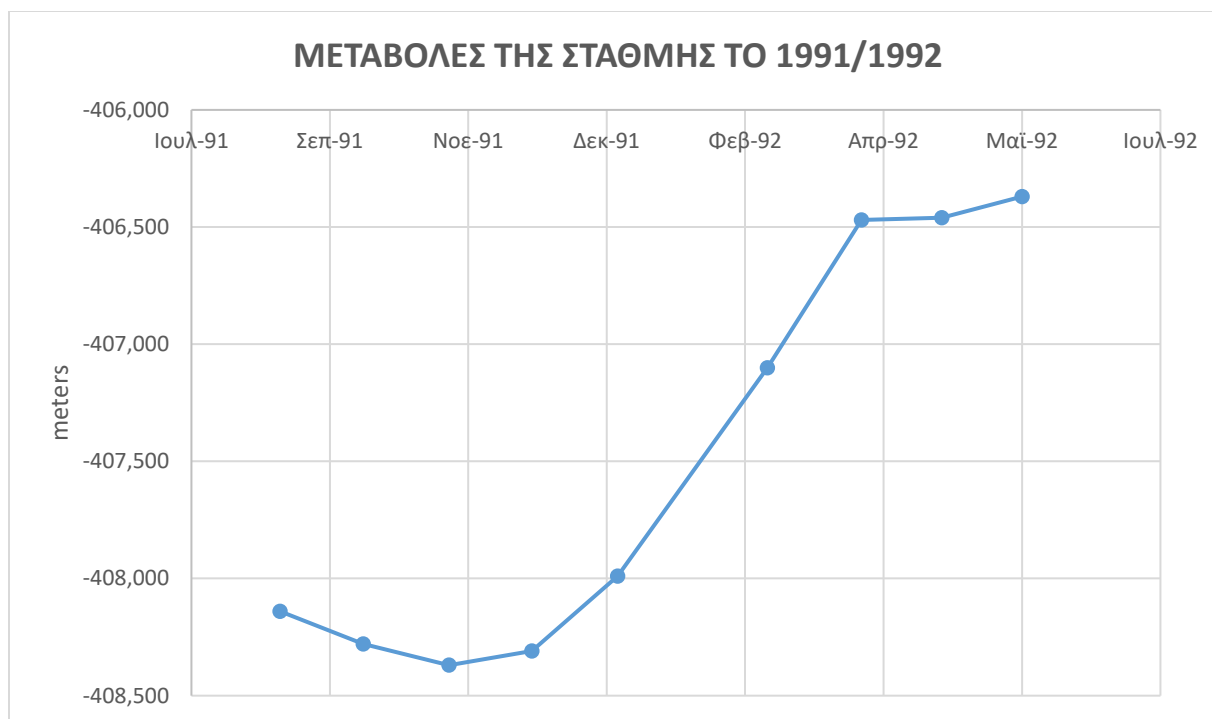
Ωστόσο, κατά τη διάρκεια ιδιαίτερα βροχερών χειμώνων, όταν πρέπει να ανοίξουν τα φράγματα στη Θάλασσα της Γαλιλαίας και στον ποταμό Yarmouk, μεγάλες ποσότητες νερού ρέουν μέσω του ποταμού Ιορδάνη. Τέτοιες ροές σημειώθηκαν τον βροχερό χειμώνα του 1979/1980 και 1991/1992 όταν η στάθμη της λίμνης αυξήθηκε γύρω στα 1,5 και 2 μέτρα, αντίστοιχα (Beyth et al., 1993). Μια πιο μέτρια αύξηση 60 εκατοστών σημειώθηκε μετά τον βροχερό χειμώνα του 2002/2003. Από την άλλη, τα χαμηλότερα επίπεδα αντικατοπτρίζουν τις ξηρές περιόδους, με

αρνητικό ισοζύγιο νερού και μεγάλη συρρίκνωση της περιοχής. Παρόλα αυτά, οι δραματικές αυξήσεις της στάθμης της λίμνης, αρχίζουν να εξαφανίζονται μέσα σε δύο έως τρία έτη και δεν αλλάζουν τη γενικότερη τάση της πτώσης του επιπέδου της λίμνης (TAHAL Group, 2011).



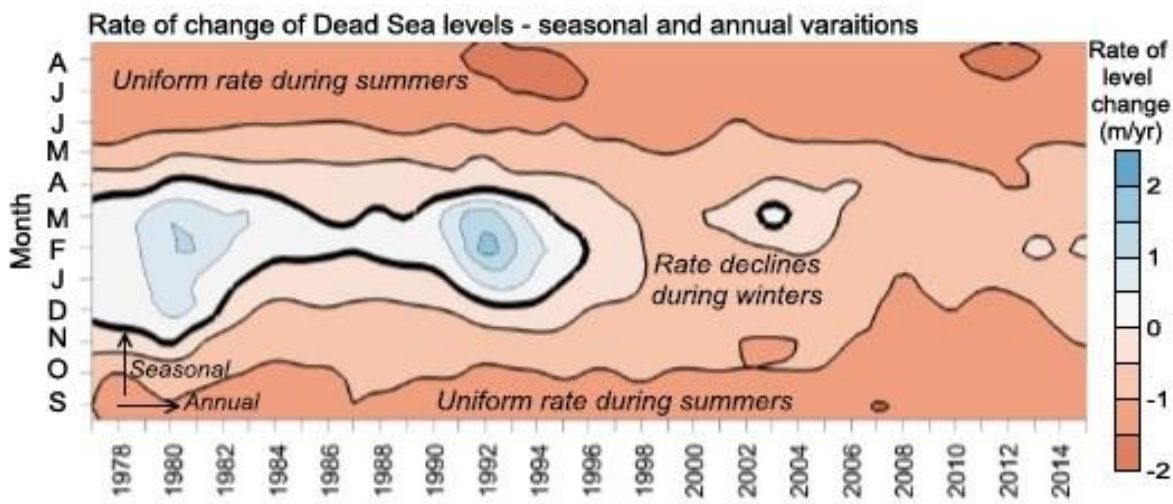
Χρονολογία	Επίπεδο στάθμης (m)
Σεπ-79	-400,910
Οκτ-79	-400,990
Νοε-79	-401,080
Δεκ-79	-400,140
Ιαν-80	-400,630
Φεβ-80	-400,440
Μαρ-80	-400,190
Απρ-80	-399,770
Μαϊ-80	-399,660

Πίνακας 2: Επίπεδο της στάθμης το 1979/1980. (Israel Water Authority)



Χρονολογία	Επίπεδο στάθμης (m)
Σεπ-91	-408,140
Οκτ-91	-408,280
Νοε-91	-408,370
Δεκ-91	-408,310
Ιαν-92	-407,990
Φεβ-92	-407,100
Μαρ-92	-406,470
Απρ-92	-406,460
Μαΐ-92	-406,370

Πίνακας 3: Επίπεδο της στάθμης το 1991/1992. (Israel Water Authority)



Εικόνα 5: Διάγραμμα με τον ρυθμό μεταβολής της στάθμης από το 1978-2014 σε m/έτος. (Πηγή: Lensky & Dente, 2015)

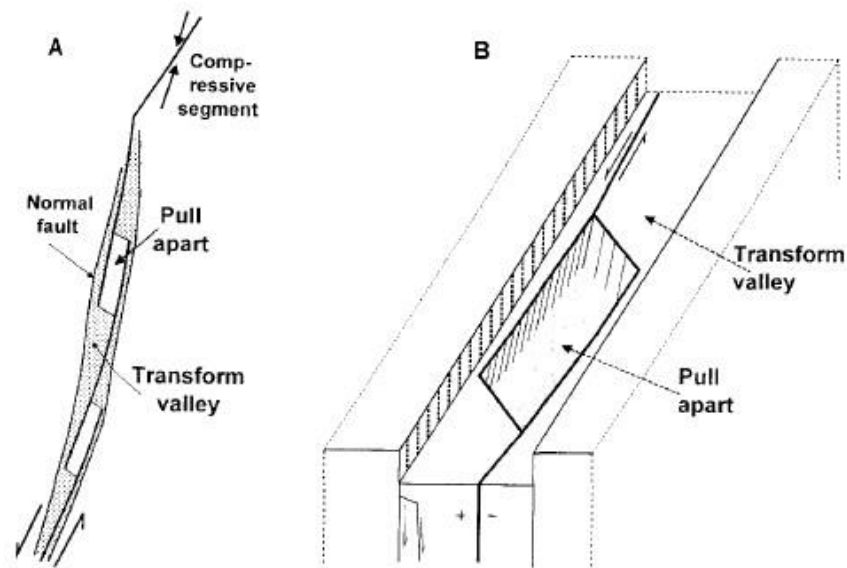
Η ποιότητα των υδάτων που ρέουν στον Ιορδάνη έχει υποβιβαστεί σημαντικά, διότι ένα μεγάλο μέρος του γλυκού νερού που χρησιμοποιούνταν για την αναπλήρωση των υδάτων της Νεκρής Θάλασσας μέσω του ποταμού Ιορδάνη έχει αντικατασταθεί, εδώ και πολλά χρόνια, από οικιακά και βιομηχανικά λύματα. Τα λύματα αυτά συνεχίζουν να ρέουν στη Νεκρή Θάλασσα, προκαλώντας μεγάλες ζημιές στην ίδια, στον ποταμό Ιορδάνη, καθώς και στο οικοσύστημα της λεκάνης. (Salem, 2020).

Μέσα σε 90 μόνο χρόνια (1960-2050), η στάθμη του νερού στη Νεκρά Θάλασσα ενδέχεται να έχει μειωθεί κατά τουλάχιστον 110 m (αυτό ισοδυναμεί με περισσότερο από 1,2 m/έτος, κατά μέσο όρο). Σε απόλυτους όρους, η στάθμη Νεκράς Θάλασσας έχει μειωθεί κατά 39 μέτρα από το 1960 μέχρι το 2019 και προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω 25-70 μέτρα έως το έτος 2100. (Asmar et al., 2002, Gertman et al., 2002, Salem, 2009). Ωστόσο, προσομοιώσεις που βασίζονται σε σενάρια απόσυρσης υδάτων έδειξαν ότι η Νεκρά Θάλασσα δεν θα εξαφανιστεί, αλλά πιθανώς να επιτευχθεί μια νέα ισορροπία σε περίπου 400 χρόνια μετά από πτώση της στάθμης των υδάτων κατά 100-150 μέτρα (Yechieli, 1998). Επίσης, η επιφάνεια της Νεκράς Θάλασσας, για την ίδια περίοδο (1960-2050), ενδέχεται να έχει συρρικνωθεί κατά περίπου 500 km², δηλαδή, κατά μέσο όρο, 5,5 km²/έτος.

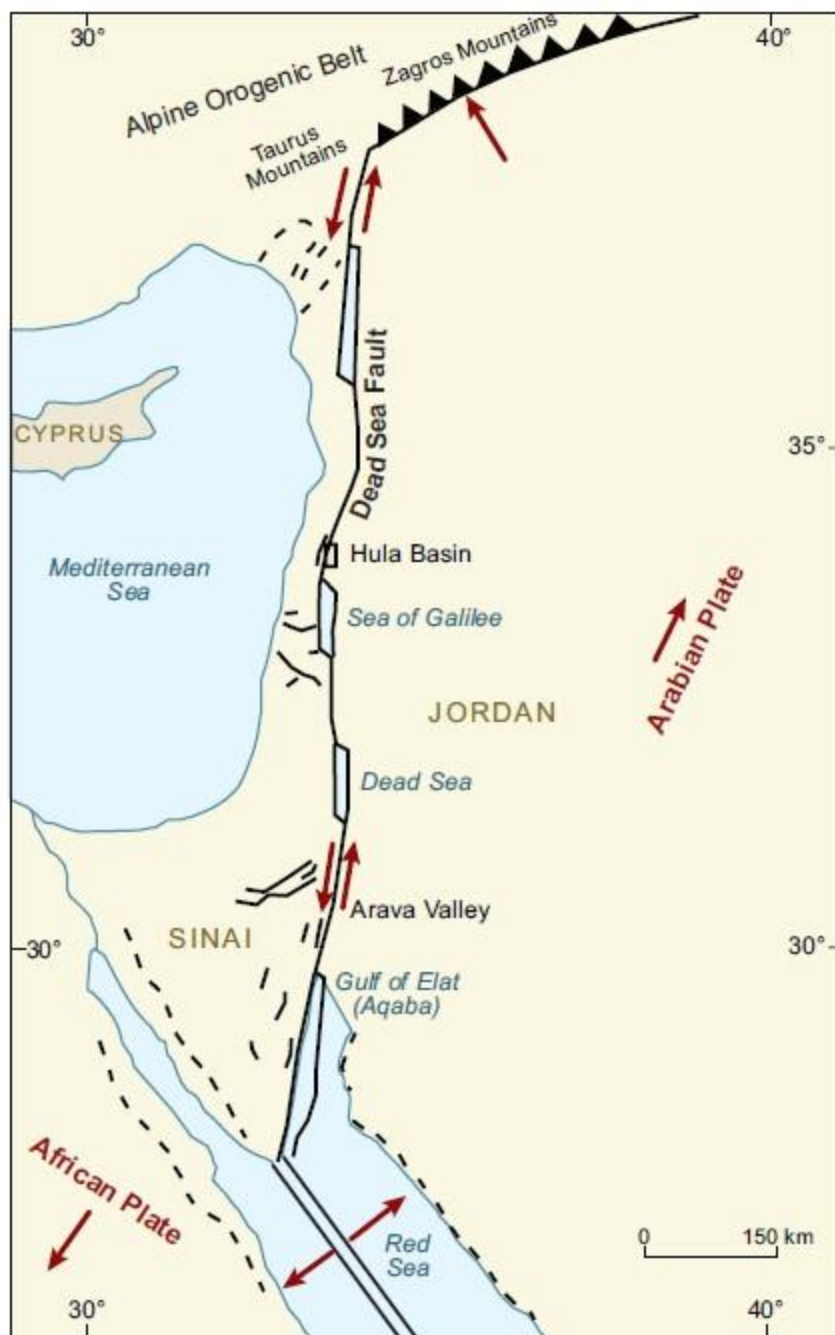
1.3 Γεωλογία

1.3.1 Το ρήγμα μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας

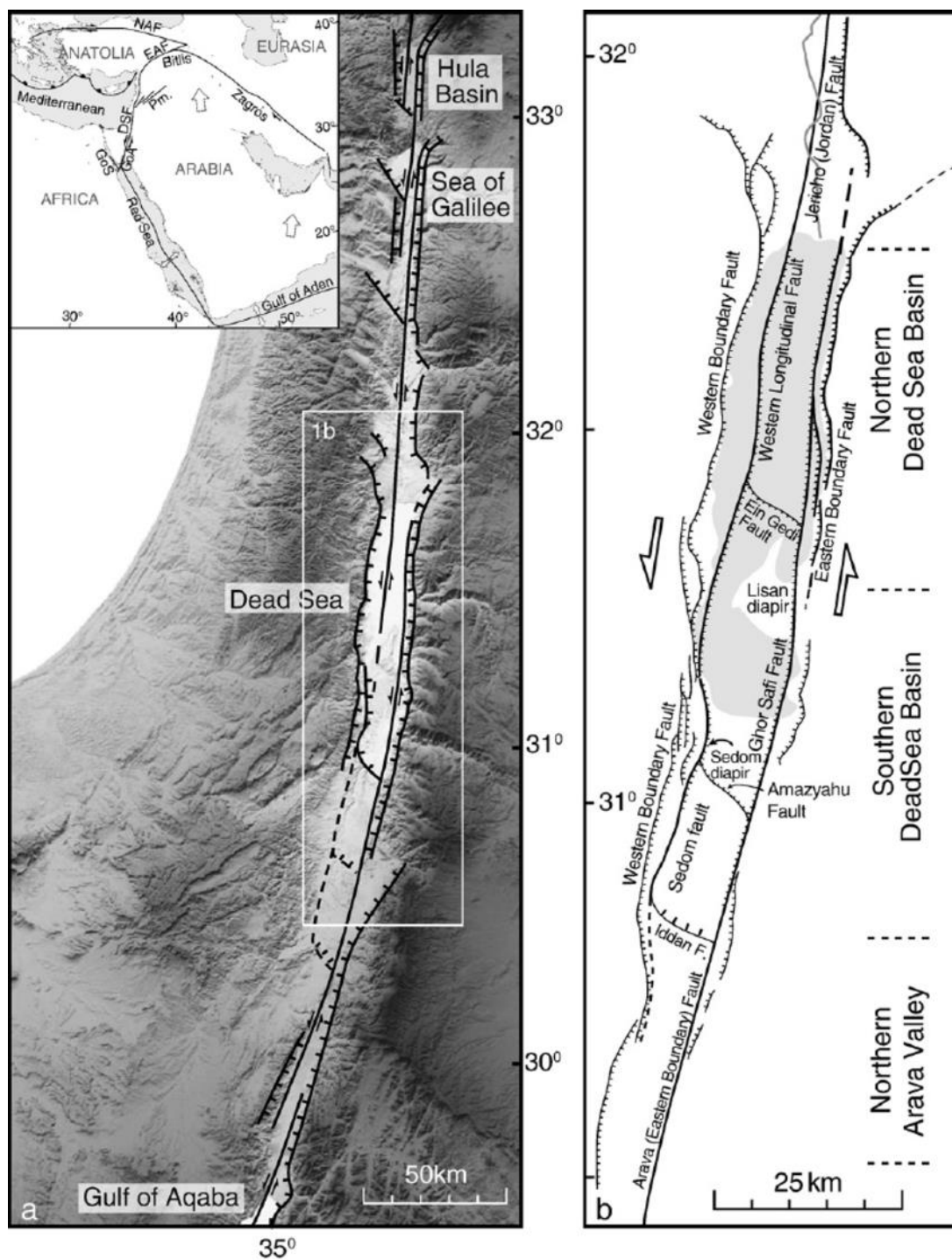
Η Νεκρά Θάλασσα βρίσκεται στη βαθύτερη ηπειρωτική λεκάνη πλάγιας απομάκρυνσης (pull-apart basin), η οποία σχηματίστηκε κατά μήκος του ρήγματος μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας (transform fault) (Quennel, 1958). Τα ρήγματα μετασχηματισμού είναι μεγάλης κλίμακας ενεργές τεκτονικές δομές, που αποτελούν όρια τεκτονικών λιθосφαιρικών πλακών. Το ρήγμα αυτό αποτελεί ένα οριζόντιας ολίσθησης, αριστερόστροφο, σύστημα ρηγμάτων, με συνολικό μήκος της τάξης των 1.000 km, που χωρίζει το σύστημα διάνοιξης Κόλπου Σουέζ – Ερυθράς Θάλασσας, από τη ζώνη σύγκλισης των ορέων Ταύρου – Ζάγκρος. Η κίνηση κατά μήκος του ρήγματος αυτού ξεκίνησε στο Τριτογενές, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της Αφρικανο-Αραβικής ασπίδας και του σχηματισμού της Ερυθράς Θάλασσας. (Λέκκας et al., 2006).



Εικόνα 6: Α) Σχέδιο που απεικονίζει τις βασικές γεωλογικές δομές κατά μήκος της Νεκράς Θάλασσας, Β) Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την αρχιτεκτονική της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας. Καθώς η πλευρική κίνηση συνεχίζεται, τα άκρα της λεκάνης απομακρύνονται και η λεκάνη γίνεται παράλληλη με τον μετασχηματισμό. (Πηγή: Garfunkel & Ben-Avraham, 1996)



Εικόνα 7: Χάρτης του ρήγματος μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας, το οποίο συνδέει την διάνοιξη Κόλπου Σουέζ – Ερυθράς Θάλασσας, με την ζώνη σύγκλισης των ορέων Ταύρου – Ζάγκρος. Η πλάγια οριζόντια ολίσθηση δημιουργεί μια σειρά λεκανών πλάγιας απομάκρυνσης (*pull-apart basins*), που αναπτύσσονται κατά μήκος του ρήγματος. (Πηγή: Ben-Avraham et al., 2008)



Εικόνα 8: Α) Θέση της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας στο πλαίσιο του συστήματος μετασχηματισμού, Β) Κύρια ρήγματα της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Smit et. al., 2008)

Τα ενεργά ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης εμφανίζουν διακριτά μορφολογικά χαρακτηριστικά. Το ρήγμα μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας στην κοιλάδα του Ιορδάνη, έχει μια σειρά από μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά, όπως κορυφογραμμές (pressure ridges) και λίμνες, τοπογραφικά βυθίσματα λόγω υποχώρησης (sag ponds). Αυτά τα χαρακτηριστικά σχηματίζονται σε κλιμακωτές κάμψεις ή καμπές ρήγματος (fault steps or bends). Παράλληλα, κατά μήκος του μεγαλύτερου μέρους του ίχνους του ρήγματος αναπτύσσονται κρημνοί (fault scarps) (Keller and Pinter, 1996).

Η ανάπτυξη του ρήγματος μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας συνοδεύτηκε από τεκτονική ανύψωση (uplifting) και μαγματικές διεργασίες (igneous activity) σε τοπικό επίπεδο. Η τεκτονική ανύψωση ήταν μεγαλύτερη σε αποστάσεις αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων και στις δύο πλευρές του ρήγματος μετασχηματισμού. Επιπλέον, η ανύψωση δεν είναι ενιαία αλλά συχνά φτάνει τα 0,7-1,5 χλμ., ενώ σε ορισμένα μέρη αυξάνεται στα 2-3 χλμ. πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι μαγματικές διεργασίες, που αφορούν κυρίως σε βασαλτική ηφαιστειότητα, πραγματοποιούνται σε τοπική κλίμακα, κυρίως ανατολικά του ρήγματος. Η ηφαιστειότητα ξεκίνησε 18-20 εκατομμύρια χρόνια πριν, κοντά στη Θάλασσα της Γαλιλαίας και στην περιοχή της Δαμασκού, ωστόσο, τα περισσότερα ηφαιστειακά φαινόμενα έλαβαν χώρα πριν από 5-12 εκατ. χρόνια (Garfunkel 1989, Steinitz & Bartov 1991, Mouti et al. 1992, Ilani et al. 2001).

Το ρήγμα μπορεί να διακριθεί σε δύο τμήματα: το νότιο και το βόρειο. Το νότιο τμήμα χαρακτηρίζεται από μια σχεδόν συνεχή κοιλάδα, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας βρίσκεται κάτω από μια σειρά βαθιών λεκανών που χωρίζονται από λιγότερο έντονα διάσελα (saddles) (Garfunkel 1981, Garfunkel & Ben-Avraham 2001). Αυτές οι δομές ελέγχονται από διαμήκη ρήγματα κλιμακωτής διάταξης (en echelon) τα οποία μετακινούνται πλευρικά. Αυτά συνοδεύονται από κανονικά ρήγματα (normal faults) που παρήγαγαν τα μορφολογικά όρια της κοιλάδας. Υπάρχουν επίσης εγκάρσια ρήγματα (transverse faults), αλλά είναι λιγότερο εμφανή. Το βόρειο τμήμα είναι αρκετά διαφορετικό. Περιλαμβάνει διαμήκη ρήγματα με διευθύνσεις που ποικίλλουν, ενώ κοιλάδες αναπτύσσονται μόνο σε ορισμένες περιοχές του τμήματος αυτού. Στον Λίβανο, το κύριο ρήγμα εκτείνεται κατά μήκος μιας περιοχής η οποία είναι η ψηλότερη τοπογραφικά κατά μήκος του ρήγματος μετασχηματισμού (Ben-Avraham et al., 2008).

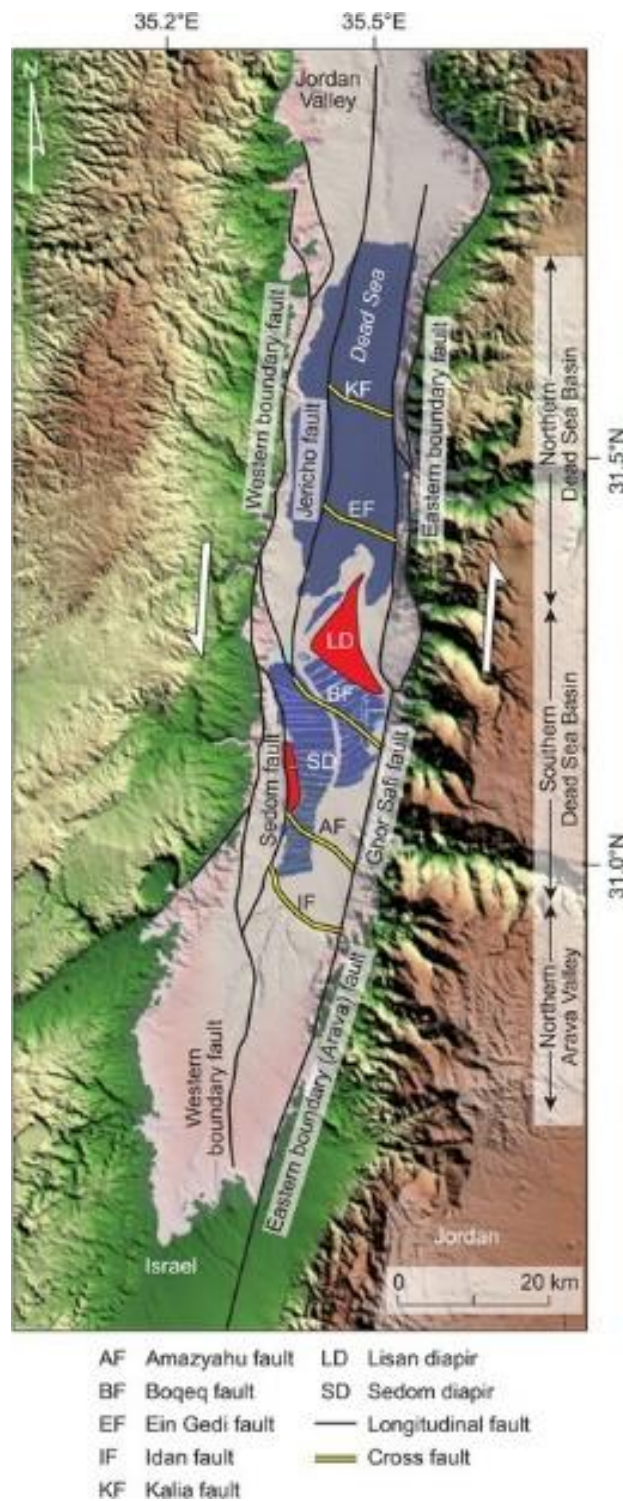
Το ρήγμα μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας είναι σεισμικά ενεργό, με πλευρική κίνηση 5-7 mm/έτος τα τελευταία 5 εκατομμύρια χρόνια, αποτελώντας την πηγή πολλών καταστροφικών σεισμών. Το γεγονός αυτό, τα ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά εξαιτίας του μετασχηματισμού και διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην τεκτονική τάφρο μαρτυρούν τη συνεχιζόμενη δραστηριότητά του (Reches & Hoexter 1981, Gardosh et al. 1990, Marco et al. 1997). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο βόρειο τμήμα της Νεκράς Θάλασσας σημειώθηκαν δύο από τους μεγαλύτερους σεισμούς στην περιοχή, το 1927 και το 2004 μεγέθους 6,25 ρίχτερ και 5,1 ρίχτερ αντίστοιχα (Shapira et al., 1993, Niemi and Ben-Avraham, 1994, Hofstetter et al., 2008).

1.3.2 Λεκάνη Νεκράς Θάλασσας

Όπως προαναφέρθηκε, η λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας χαρακτηρίζεται ως λεκάνη πλάγιας απομάκρυνσης (pull-apart basin) και βρίσκεται κατά μήκος του ρήγματος μετασχηματισμού (transform fault). Σχηματίστηκε 18-15 εκατομμύρια χρόνια πριν, μεταξύ του αριστερόστροφου ρήγματος της Αραβά στα νοτιοανατολικά και του ρήγματος της Ιεριχούς στα βορειοδυτικά, ενώ έχει μήκος περίπου 150 χιλιόμετρα και πλάτος 15 έως 17 χιλιόμετρα (Garfunkel & Ben-Avraham 1996, Garfunkel 1981).

Το ρήγμα Amazyahu, σηματοδοτεί τα νότια εγκάρσια περιθώρια της λεκάνης, τα οποία αποτελούνται από μια σειρά κανονικών ρηγμάτων, παραγόμενων υπο-λεκανών, τάφρων και τεκτονικών κεράτων (Neev and Hall, 1979, Ben-Avraham and ten Brink, 1989, Larsen et al., 2002). Το βαθύτερο τμήμα της λεκάνης βρίσκεται μεταξύ των ρηγμάτων Amazyahu και Boqeq, με εκτιμώμενο στρωματογραφικό διαχωρισμό άνω των 8 χλμ. Αυτό το βαθύ τμήμα οριοθετείται στα δυτικά από κανονικά ρήγματα και το διάπυρο άλατος (salt diapir) Sodom και στα βόρεια από ένα ανυψωμένο τέμαχος που περιλαμβάνει το διάπυρο άλατος Lisan. Τα ανατολικά περιθώρια της λεκάνης κυριαρχούνται από ρήγματα ολίσθησης κατά κλίση (dip-slip) και οριζόντιας ολίσθησης/ολίσθησης κατά παράταξη (strike-slip) που διαχωρίζουν την λεκάνη από την υπερυψωμένη αραβική πλάκα (Neev and Hall, 1979, Garfunkel and Ben-Avraham, 1996,

Garfunkel et al., 1981). Τα δυτικά όρια αποτελούνται από μια ζώνη πλάγιων – κανονικών ρηγμάτων (oblique-normal) και από κεκλιμένα τεμάχια (tilted blocks) (Sagy et al., 2003).



Εικόνα 9: Χάρτης με τα κύρια ρήγματα και τα διάπυρα άλατος Lisan & Sodom στη Νεκρά Θάλασσα (Πηγή: Jackson & Hudec, 2017).

Χωρίζεται σε δύο κύριες λεκάνες, μια βόρεια λεκάνη και μια νότια λεκάνη, οι οποίες χωρίζονται από τη χερσόνησο Lisan, ένα μεγάλο διάπυρο άλατος. Η βόρεια λεκάνη καταλαμβάνεται από το κύριο υδάτινο σώμα της Νεκράς Θάλασσας με βάθος που φτάνει τα 730 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η νότια λεκάνη καλύπτεται από μια ρηχή λίμνη (μέρος της Νεκράς Θάλασσας), με βάθος που κυμαίνεται στα 430 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, η οποία πλέον χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Dead Sea Works του Ισραήλ και Arab Potash Company από την Ιορδανία για εξόρυξη άλατος (Ben-Avraham et al., 2008). Οι δύο λεκάνες χαρακτηρίζονται από μεγάλους πάχους αποθέσεις, όπου στην βόρεια φτάνουν περίπου τα 6 χλμ και μειώνονται σε πάχος προς τη βόρεια όχθη της λίμνης, ενώ στη νότια ξεπερνούν τα 14 χλμ πάχους (Ginzburg & Ben-Avraham, 1997). Αυτό φανερώνει ότι η περιοχή εξακολουθεί να υποχωρεί.

Σύμφωνα με τη στρωματογραφία, η λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας βρισκόταν ήδη σε μια εντεινόμενη υποχώρηση κατά τη διάρκεια του πρώιμου και μέσου Μειόκαινου (Horowitz 1987, Garfunkel & Ben-Avraham 1996, 2001). Τα κλαστικά ιζήματα του Μειοκαινικού σχηματισμού Hazeva αποτέθηκαν από ένα ποτάμιο σύστημα που έρεε κατά μήκος της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας και υποδεικνύουν ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής (Υστερο Μειόκαινο), οι ρυθμοί ιζηματογένεσης και καθίζησης βρίσκονταν στο ίδιο επίπεδο και οι πλευρές της λεκάνης δεν αποτελούσαν τοπογραφικά εμπόδια (Garfunkel, 1997).

Κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου, αποθέσεις εβαπορίτη (evaporite), αποτελούμενες κυρίως από αλίτη (halite) (σχηματισμός Sedom), αποτέθηκαν στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης της Νεκράς Θάλασσας, ενώ το νότιο τμήμα σταμάτησε να υποχωρεί. Αυτοί οι εβαπορίτες αποτέθηκαν σε μια θαλάσσια εσοχή που εκτεινόταν από τη Μεσόγειο μέχρι την ρηξικοιλιάδα της περιοχής της Νεκράς Θάλασσας. Κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια του Πλειόκαινου, η σύνδεση με τη θάλασσα διακόπηκε και η κοιλάδα έγινε ένα βύθισμα που περικλειόταν από ξηρά, στο οποίο αναπτύχθηκαν λίμνες ποικίλων μεγεθών, ανάλογα με τις κλιματικές διακυμάνσεις. Από τότε, οι ρυθμοί της καθίζησης ξεπέρασαν τους ρυθμούς της ιζηματογένεσης, αφήνοντας μια μεγάλου βάθους τοπογραφική ταπείνωση που αποτελείται από ποτάμια και λιμναία κλαστικά ιζήματα καθώς και εβαπορίτες (Zak, 1967, Horowitz, 1987).

1.3.2.1 Νότια λεκάνη

Το υπέδαφος της νότιας λεκάνης χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός πυκνού στρώματος εβαποριτών και από την παρουσία διαπύρων άλατος (salt diapir). Η ρηγμάτωση και η αυξημένη ανοδική κίνηση άλατος κατά μήκος ενεργών ρηγμάτων οδήγησαν στο σχηματισμό των διαπύρων άλατος Lisan και Sodom. Η χερσόνησος Lisan έχει πάχος περίπου 8 km, μήκος έως 20 km και πλάτος περίπου 7 km και χωρίζει τη βόρεια και νότια λεκάνη, ενώ το όρος Sodom υψώνεται στα δυτικά της νότιας λεκάνης. (Choi et al. 2011). Ο σχηματισμός του διαπύρου άλατος Sodom σχετίζεται με την ρηγμάτωση και την αυξημένη ανοδική κίνηση άλατος κατά μήκος του ρήγματος Sodom (Zak 1967, ten-Brink & Ben-Avraham 1989, Larsen et al. 2002). Η αύξηση του πάχους των περισσότερων στρωμάτων απόθεσης στην κατερχόμενη πλευρά του ρήγματος Sodom υποδηλώνει συνεχή κίνηση άλατος και τεκτονική δραστηριότητα από το πρώιμο Πλειστόκαινο μέχρι το Ολόκαινο (ten Brink & Ben-Avraham 1989).

1.3.2.2 Βόρεια λεκάνη

Στη βόρεια λεκάνη οι ιζηματογενείς αποθέσεις είναι μικρότερου πάχους σε σχέση με αυτά της νότιας λεκάνης, 6-8 km στο βαθύτερο σημείο της σε αντίθεση με τα 14 km στη νότια (Ginzburg & Ben-Avraham 1997). Δομικά, η βόρεια λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας χωρίζεται σε μικρότερες υπολεκάνες στη βαθιά υποεπιφάνεια. Όπως και στη νότια λεκάνη, έτσι και εδώ αυτές οι υπολεκάνες χωρίζονται από δομικά διάσελα (saddles) και εγκάρσια ρήγματα (transverse faults), καθώς επίσης είναι ρηχότερες και στενότερες προς τα βόρεια (Ben-Avraham et al., 2008). Οι βαθύτερες από αυτές εντοπίζονται ανάμεσα στα ρήγματα Ein Gedi και Kalia, όπου το πρώτο βρίσκεται στα νότια και το δεύτερο στα βόρεια (Neev & Hall 1979).

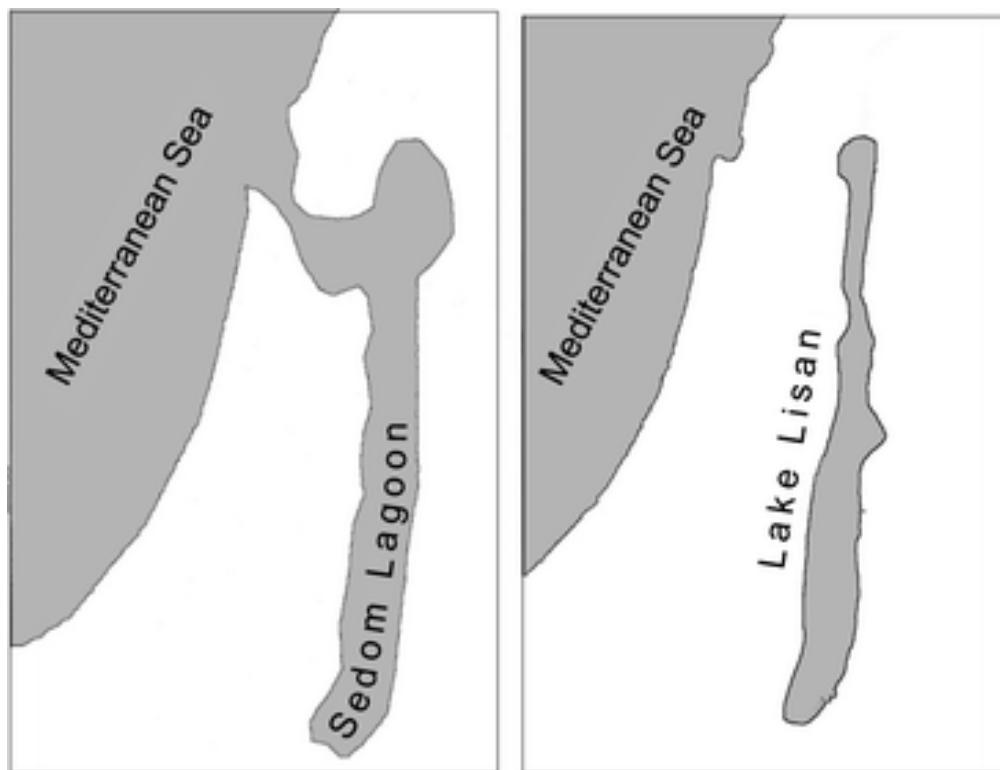
1.3.3 Παλαιότερα υδάτινα σώματα

Χρειάστηκαν αρκετά εκατομμύρια χρόνια, πριν σχηματιστεί και φτάσει στην σημερινή της κατάσταση η Νεκρά Θάλασσα. Ξεκίνησε εκατομμύρια χρόνια πριν όταν στο όριο μεταξύ της μικροπλάκας του Σινά και της Αραβικής πλάκας προκλήθηκαν μεγάλες ανακατατάξεις του βυθού της Μεσογείου, που κάλυψαν το μεγαλύτερο μέρος του σύγχρονου Ισραήλ.

Η ιστορία των θαλάσσιων υδάτινων σωμάτων στη λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας ξεκίνησε με τη λιμνοθάλασσα Sedom. Κατά τη διάρκεια του Ύστερου Νεογενούς, ύδατα της Μεσογείου Θάλασσας εισέβαλαν στην τεκτονική τάφρο της Νεκράς Θάλασσας και την τεκτονικά ενεργή κοιλάδα του Ιορδάνη μέσω της κοιλάδας Jezreel στο βόρειο Ισραήλ, διαμορφώνοντας την λιμνοθάλασσα Sedom (Zak, 1967). Μεγάλες συγκεντρώσεις άλατος, που παρεμβάλλονται από αλίτη, γύψο, ανυδρίτη, δολομίτη και μικρές ποσότητες από ιλύ, μάργα και άργιλο, κατατέθηκαν στη λιμνοθάλασσα (Σχηματισμός Sedom).

Η είσοδος του θαλάσσιου νερού στη λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας-Ιορδανίας έπαιξε σημαντικό ρόλο στην επικείμενη ιστορία των λιμνών της Νεκράς Θάλασσας (Starinsky, 1974). Η αλληλεπίδραση των εισερχομένων υδάτων με την άλμη (brine), η οποία παρέχει σημαντικά συστατικά για το σχηματισμό των εβαποριτικών ορυκτών (π.χ. αραγονίτης, γύψος), υπαγόρευσε τη γεωχημική και λιμναία ιστορία των λιμνών στη λεκάνη της Νεκράς Θάλασσας (Bartov et al., 2007).

Στη συνέχεια, η λιμνοθάλασσα Sedom αποκόπηκε από την ανοιχτή θάλασσα (Kafri and Ecker, 1964). Μετά την αποκοπή της λεκάνης από τη Μεσόγειο, τρία μεγάλα λιμναία σώματα αναπτύχθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του Πλειστόκαινου – Ολόκαινου (Katz et al., 1977, Torfstein et al., 2009). Η λίμνη Amora (συμπεριλαμβανομένης της τελευταίας μεσοπαγετώδους λίμνης Samra), η τελευταία παγετώδης λίμνη Lisan και η Ολοκαινική Νεκρά Θάλασσα. Η στάθμη των υδάτων αυτών των λιμνών παρουσίασε διακυμάνσεις λόγω των κλιματικών αλλαγών και της τεκτονικής καθίζησης της λεκάνης (Stein, 2001, Bartov, et al., 2006, Waldmann, et al., 2009).



Εικόνα 10: Χάρτης που δείχνει την έκταση της λιμνοθάλασσας Sedom και τη μέγιστη έκταση της λίμνης Lisan (Πηγή: Kafri & Yechieli, 2010).

Η λίμνη Amora υπήρξε μεταξύ 740 και 70 χιλιάδων χρόνων πριν, κατά την διάρκεια του Πρώιμου – Μέσου Πλειστόκαινου, καλύπτοντας 7 παγετώδεις-μεσοπαγετώδεις περιόδους, ενώ η λίμνη Samra υπήρξε μεταξύ 135 και 70 χιλιάδων χρόνων πριν, κατά την διάρκεια της τελευταίας μεσοπαγετώδους περιόδου, με επίπεδα νερού μεταξύ 320 και 380 m κάτω από την επιφάνεια της Μεσογείου (Stein, 2001, Torfstein, et al., 2009). Στο όρος Sedom, ο σχηματισμός αποτελείται από 450 m από ανθρακικά πετρώματα, μεταλλικά άλατα θειικού ασβεστίου, αλίτη και κλαστικά πετρώματα (Amora/Samra Formation).

Η λίμνη Lisan υπήρξε μεταξύ 70 και 15 χιλιάδων χρόνων πριν. Ο σχηματισμός Lisan, που αποτέθηκε από τη λίμνη Lisan, αποτελείται κυρίως από χημικό αραγονίτη και γύψο, που κατακρημνίστηκαν από το νερό της λίμνης, και από κλαστικό υλικό που μεταφέρθηκε από πλημμύρες. Πριν 27 – 23 χιλιάδες χρόνια, όταν έφτασε στη μέγιστη ανύψωσή της (180 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας), η λίμνη επεκτάθηκε από τη Θάλασσα της Γαλιλαίας στα

βόρεια μέχρι την περιοχή Hazeva στα νότια. Πριν 17 – 15 χιλιάδες χρόνια η λίμνη Lisan άρχισε να υποχωρεί και πριν 12 - 11 χιλιάδες χρόνια έφτασε στη χαμηλότερη ανύψωσή της. Αργότερα, κατά το μεγαλύτερο μέρος του Ολόκαινου, σταθεροποιήθηκε στα 400 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και στην πορεία την διαδέχθηκε η σημερινή Νεκρά Θάλασσα η οποία βρίσκεται πλέον 434 μ. κάτω από την στάθμη της θάλασσας (Stein, 2001).

1.4 Υδρογεωλογία

Το σύστημα υπόγειων υδάτων της Νεκράς Θάλασσας αποτελείται από δύο κύριους υδροφορείς (aquifers): έναν ανθρακικό υδροφορέα του Ανώτερου Κρητιδικού και έναν παράκτιο αλλουβιακό υδροφορέα του Τεταρτογενούς. Στην προκειμένη περίπτωση εξετάζεται ο παράκτιος αλλουβιακός υδροφορέας, ο οποίος βρίσκεται γειτονικά της Νεκράς Θάλασσας και σε άμεση υδραυλική επαφή με τη λίμνη κατά μήκος του μεγαλύτερου μέρους της ακτογραμμής της.

Ο αλλουβιακός υδροφορέας αποτελείται κυρίως από χονδρόκοκκα μέχρι λεπτόκοκκα κλαστικά υλικά δελταϊκών ριπιδίων που προέρχονται από τον υδροκρίτη της λίμνης, όπως χάλικες (gravel), άμμο (sand) και άργιλο (clay) καθώς και λιμναίες αποθέσεις όπως τρίμματα από χαλαζία (quartz) και ασβεστίτη (calcite) και πρωτογενή μέταλλα όπως αραγονίτη (aragonite), γύψο (gypsum) και αλίτη (halite) (Yechieli & Sivan, 2011). Η διαπερατότητα του υδροφόρου ορίζοντα εκτιμάται ότι είναι 1500 m²/ημέρα, ενώ η ανατροφοδότηση του υδροφορέα πραγματοποιείται κυρίως μέσω των κατακρημνίσεων στην ορεινή περιοχή περίπου 10-30 χλμ. στα δυτικά. Μερικά από τα νερά της βροχής φτάνουν ως πλημμύρες στην ρηξικοιλιάδα, όπου διεισδύουν απευθείας στον υδροφορέα.

Η πτώση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη θέση της διεπαφής γλυκού-αλμυρού νερού. Η αλλαγή στην υπόγεια ροή αποτελεί συνάρτηση της διαπερατότητας του υδροφορέα και της απόστασης από τη θάλασσα. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον Yechieli, η πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση

από την ακτή. Σε ορισμένες τοποθεσίες κοντά στην ακτή, η πτώση είναι αρκετά παρόμοια με εκείνη της Νεκράς Θάλασσας, ενώ σε άλλες περιοχές η πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη της Νεκράς Θάλασσας.

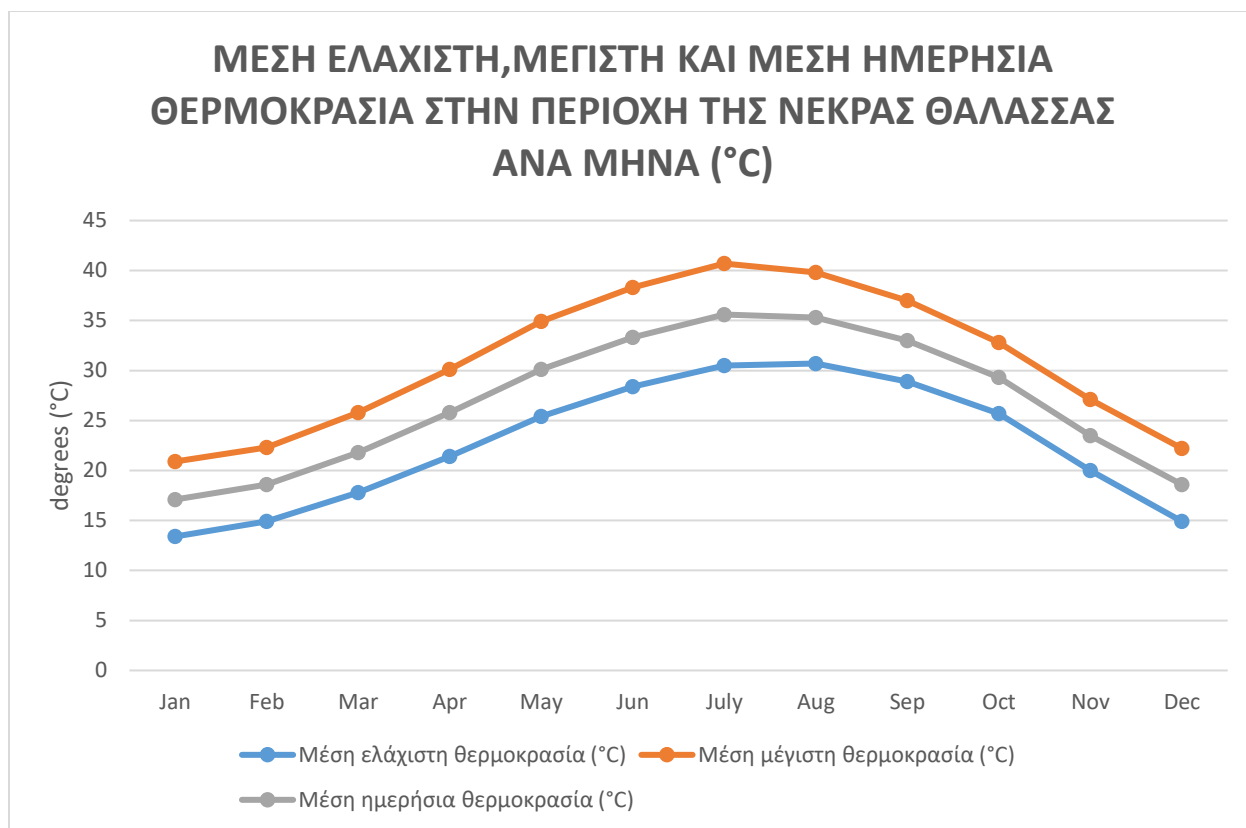
1.5 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά

Το κλίμα της Νεκράς Θάλασσας είναι πολύ ζεστό και ξηρό. Είναι μια άνυδρη ζώνη που έχει μεγάλες διαφορές στους ημερήσιους κύκλους θερμοκρασίας και υγρασίας, ενώ η αύρα της λίμνης μετριάζει ελαφρώς το ζεστό και ξηρό κλίμα (Alpert et al., 1997).

Οι θερμοκρασίες του αέρα ποικίλλουν σε καθημερινή και ετήσια βάση. Σε ετήσια βάση ο Ιούλιος είναι ο θερμότερος μήνας με μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα 35,6 °C, ενώ ο ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση ημερήσια θερμοκρασία 17,1°C. Κανονικά, η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία εμφανίζεται περίπου δύο ώρες μετά την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία (Hecht & Gertman, 2003). Η χαμηλότερη θερμοκρασία που έχει παρατηρηθεί στη Νεκρά Θάλασσα είναι 5,4 °C και η υψηλότερη θερμοκρασία είναι 47 °C τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο αντίστοιχα.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	13,4	14,9	17,8	21,4	25,4	28,4	30,5	30,7	28,9	25,7	20	14,9
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	20,9	22,3	25,8	30,1	34,9	38,3	40,7	39,8	37	32,8	27,1	22,2
Μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C)	17,1	18,6	21,8	25,8	30,1	33,3	35,6	35,3	33	29,3	23,5	18,6

Πίνακας 4: Πίνακας μέσης ελάχιστης, μέσης μέγιστης και μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας για την χρονική περίοδο 1995-2009.
(Πηγή: Israel Meteorological Service)



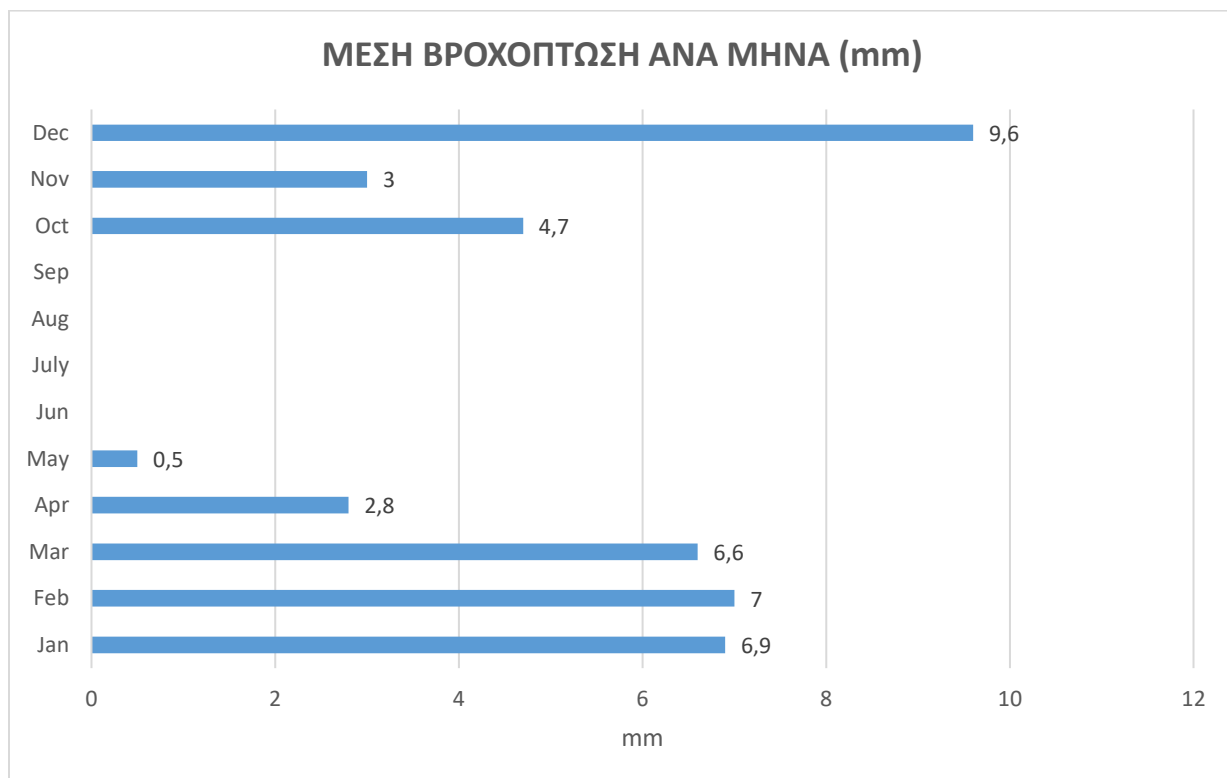
Η ατμόσφαιρα πάνω από την επιφάνεια της λίμνης διαφέρει από εκείνη στην ξηρά. Πάνω από τη Νεκρά Θάλασσα, οι αλλαγές της θερμοκρασίας του αέρα συνδέονται στενά με την άφιξη της αύρας που προέρχεται από την Μεσόγειο. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, η θερμοκρασία πάνω από τη λίμνη είναι χαμηλότερη κατά περίπου 0,5 °C - 1 °C και θερμότερη κατά περίπου 1 °C - 2 °C κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Hecht & Gertman, 2003).

Οι βροχοπτώσεις στην περιοχή είναι λιγοστές και ακανόνιστες. Εκτιμάται ότι ο ετήσιος μέσος όρος βροχής που πέφτει πάνω από τη λίμνη είναι γύρω στα 50 mm. Ειδικότερα, στη χερσόνησο Lisan κατακρημνίζονται 65 mm βροχής ετησίως, ενώ στην βιομηχανική περιοχή του Sedom κατακρημνίζονται 50 mm βροχής. Σύμφωνα με τον πίνακα (5) η μέγιστη βροχόπτωση σημειώνεται τον Δεκέμβριο με 9,6 mm βροχής, ενώ η ελάχιστη βροχόπτωση λαμβάνει χώρα τον Μάιο με 0,5 mm βροχής. Όσον αφορά τις ημέρες βροχής ο Ιανουάριος είναι ο μήνας με τις περισσότερες ημέρες βροχής, ενώ ο Μάιος είναι ο μήνας με τις λιγότερες. Έχοντας την εκτιμώμενη επιφάνεια της Νεκράς Θάλασσας και τον μέσο όρο βροχόπτωσης στη λίμνη, η

συμβολή των βροχοπτώσεων στο ισοζύγιο υδάτων της Νεκράς Θάλασσας είναι περίπου 49 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (MCM) ως ετήσιος μέσος όρος.

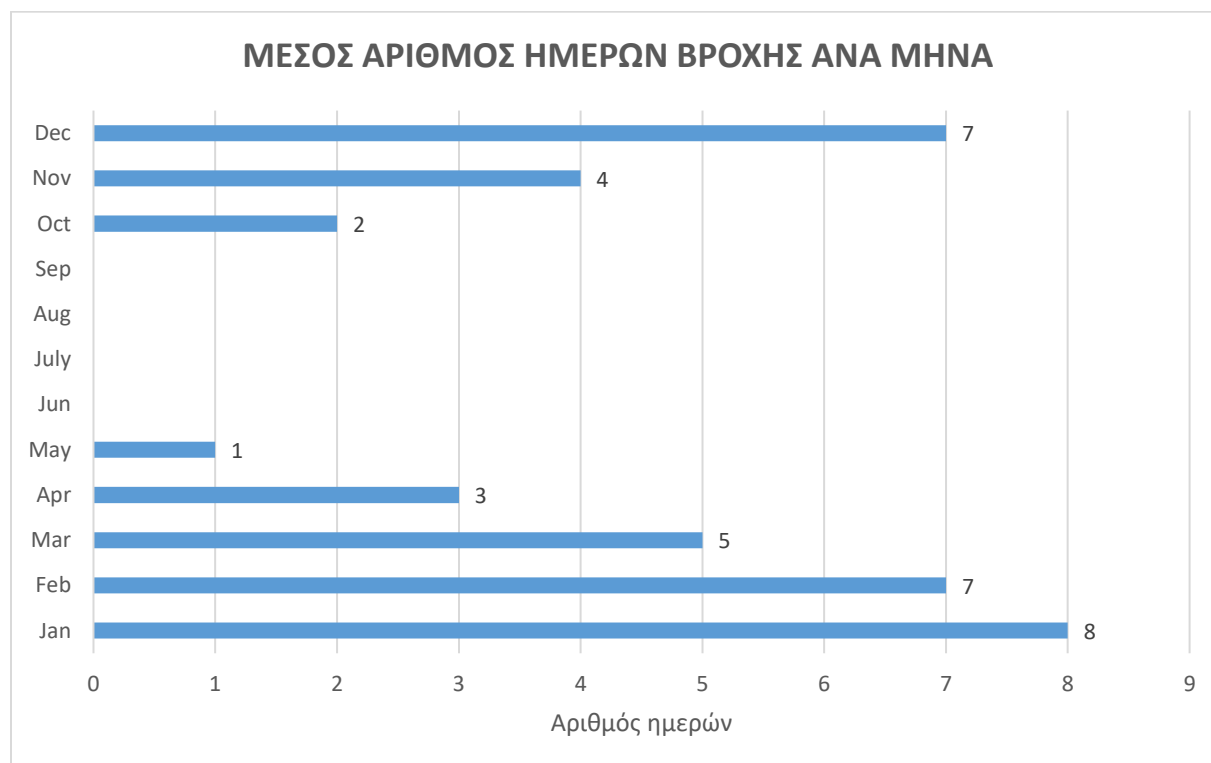
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Μέση βροχόπτωση (mm)	6,9	7	6,6	2,8	0,5	-	-	-	-	4,7	3	9,6

Πίνακας 5: Μέση μηνιαία βροχόπτωση στην Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1981-2010. (Πηγή: Israel Meteorological Service)



	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Μέσος αριθμός ημερών βροχής	8	7	5	3	1	-	-	-	-	2	4	7

Πίνακας 6: Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής στην Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1981-2010. (Πηγή: Israel Meteorological Service)



Η σχετική υγρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τον προσδιορισμό της εξάτμισης από τη Νεκρή Θάλασσα (Steinhorn, 1997). Γενικά, η σχετική υγρασία στη θάλασσα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που μετράται στην ακτή κατά περίπου 4 - 5%. Η σχετική υγρασία πάνω από τη Νεκρά Θάλασσα κυμαίνεται μεταξύ 33% και 52%. Σύμφωνα με τον πίνακα (7), η χαμηλότερη μηνιαία μέση υγρασία παρατηρείται τον Ιούνιο (23%) και η υψηλότερη μηνιαία μέση υγρασία παρατηρείται τον Δεκέμβριο και Ιανουάριο (41%), ενώ ημερησίως, η σχετική υγρασία είναι υψηλή το πρωί και χαμηλή αργά το απόγευμα (Hecht & Gertman, 2003).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Μέση σχετική υγρασία (%)	41	38	33	27	24	23	24	27	31	33	36	41

Πίνακας 7: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία στη Νεκρά Θάλασσα για την χρονική περίοδο 1992-2011. (Πηγή: Israel Meteorological Service)



1.6 Χημική σύσταση του νερού - Αλατότητα

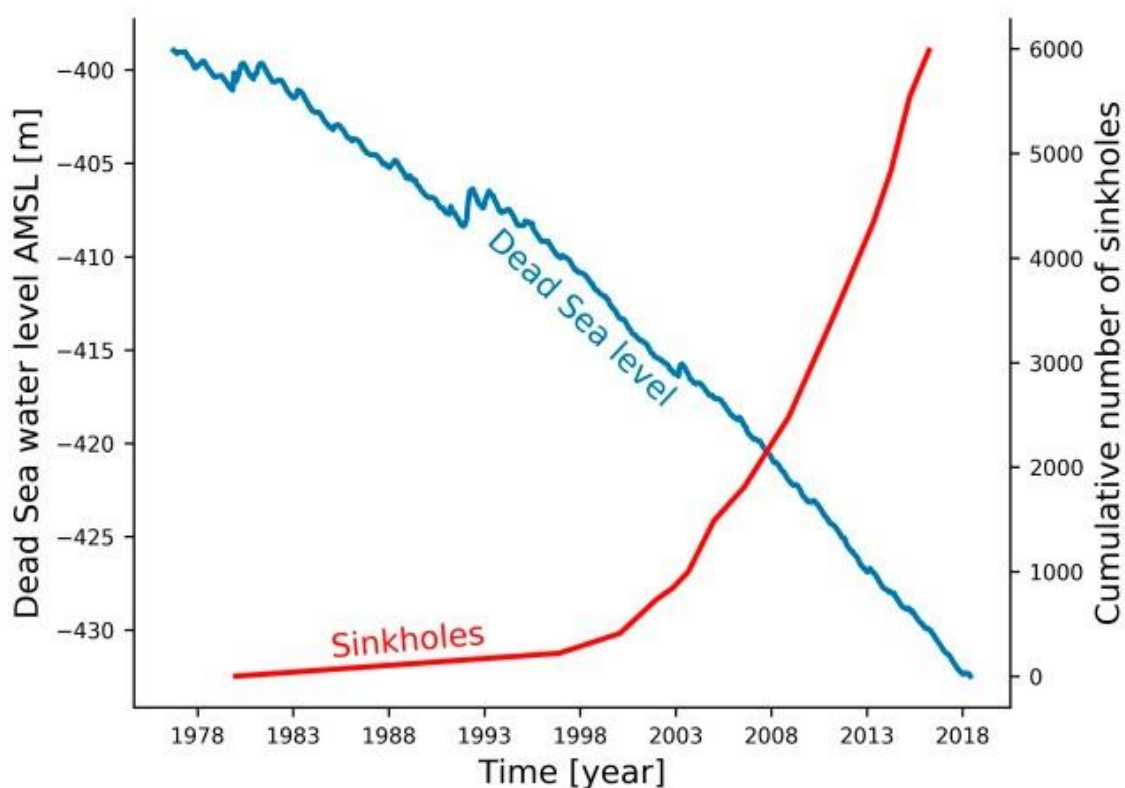
Η αλατότητα του νερού της Νεκράς Θάλασσας είναι περίπου οκτώ φορές μεγαλύτερη από εκείνη του ωκεάνιου νερού. Το αδιάλυτο νερό της Νεκράς Θάλασσας περιέχει περίπου 342 g/l διαλυμένων αλάτων και έχει πυκνότητα 1,24 kg/l, ενώ το pH της είναι περίπου 5,9. Το νερό της Νεκράς Θάλασσας έχει μια ιδιαίτερη ιοντική σύνθεση, η οποία κυριαρχείται από το χλωριούχο μαγνήσιο, σε αντίθεση με το ωκεάνιο νερό που κυριαρχείται από το χλωριούχο νάτριο (Gertman, 2012). Τα δισθενή κατιόντα μαγνησίου (Mg^{2+}) και ασβεστίου (Ca^{2+}) υπερσχύουν των μονοσθενών κατιόντων νατρίου (Na^+) και καλίου (K^+), ενώ τα κυρίαρχα ανιόντα είναι αυτά του χλωρίου (Cl^-) και του βρωμίου (Br^-) και οι συγκεντρώσεις θειικών ανιόντων (SO_4^{2-}) και διττανθρακικών (HCO_3^-) είναι πολύ χαμηλές (Ben-Yaakov and Sass, 1977).

	Na	K	Ca	Mg	Cl	Br	HCO ₃	SO ₄
Σύσταση Νεκράς Θάλασσας	36,3	7,8	18	46,4	227,6	5,5	0,3	0,2
Τυπική σύσταση	3,4	3,6	36,3	86,6	324,7	10,3	0,5	0,1

Πίνακας 8: Η χημική σύσταση της Νεκράς Θάλασσας σε σύγκριση με την σύσταση μιας τυπικής λεκάνης εξάτμισης (g/l). (Πηγή: TAHAL Group, 2011)

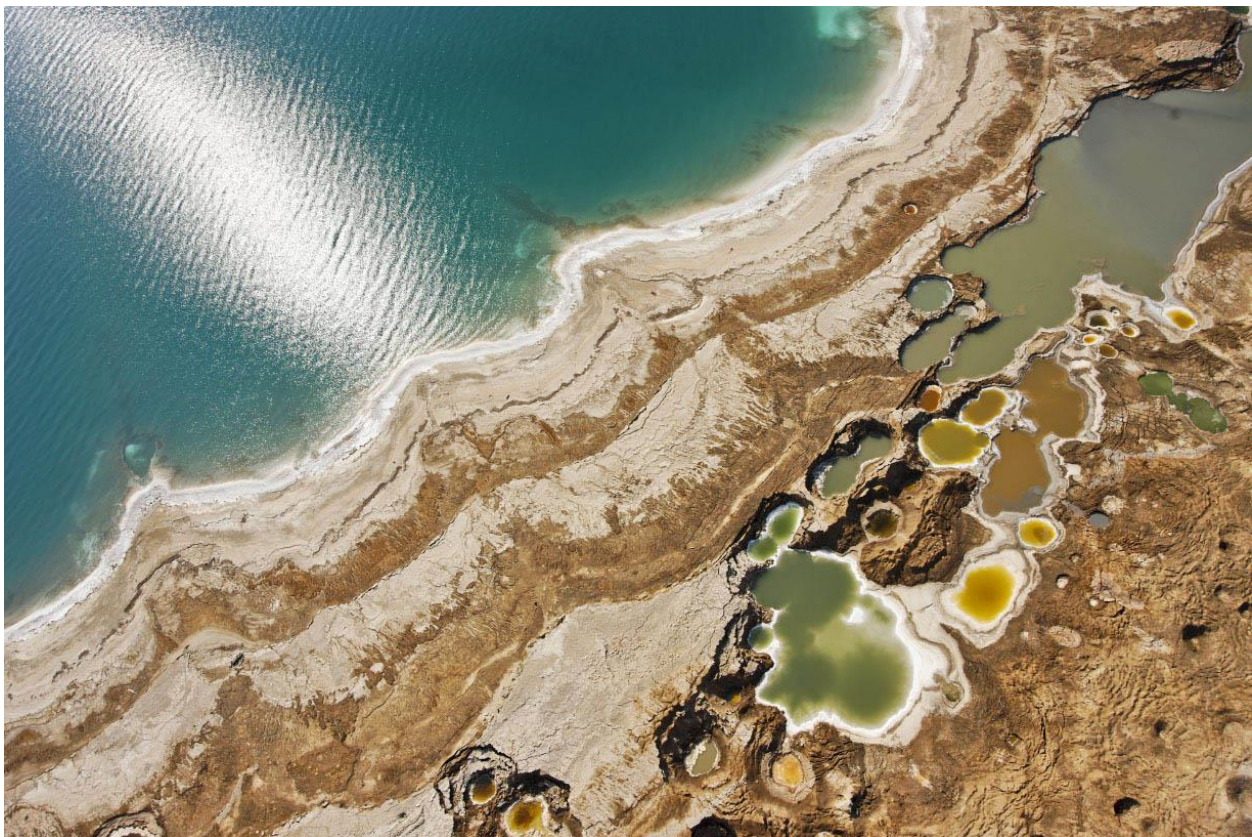
1.7 Καταβόθρες

Η Νεκρά Θάλασσα είναι μια από τις πιο ενεργές περιοχές ανάπτυξης καταβοθρών (sinkholes) στον κόσμο. Αυτός ο τύπος φυσικού κινδύνου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τοπική γεωργία, τη βιομηχανία, τον τουρισμό, τις υποδομές και την καθημερινή ζωή στην περιοχή. Τα τελευταία 40 χρόνια, περισσότερες από 6.000 καταβόθρες έχουν χαρτογραφηθεί κατά μήκος των ακτών της Νεκράς Θάλασσας, τόσο στο Ισραήλ όσο και στην Ιορδανία, από τότε που ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1980, με έναν συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό σχηματισμού που έφτασε τις 700 καταβόθρες το 2015 και τις 500 καταβόθρες το 2017 (Frumkin & Raz, 2001, Abelson et al., 2017). Ο σχηματισμός καταβοθρών ξεκίνησε στο νότιο τμήμα της ακτής και εξαπλώθηκε βόρεια κατά μήκος της δυτικής ακτής. Η απόκρημνη ανατολική ακτή έχει επηρεαστεί λιγότερο, και οι περισσότερες από τις καταβόθρες που βρίσκονται εκεί, συγκεντρώνονται στην επίπεδη περιοχή κοντά στη χερσόνησο Lisan (Ronen et al., 2019).



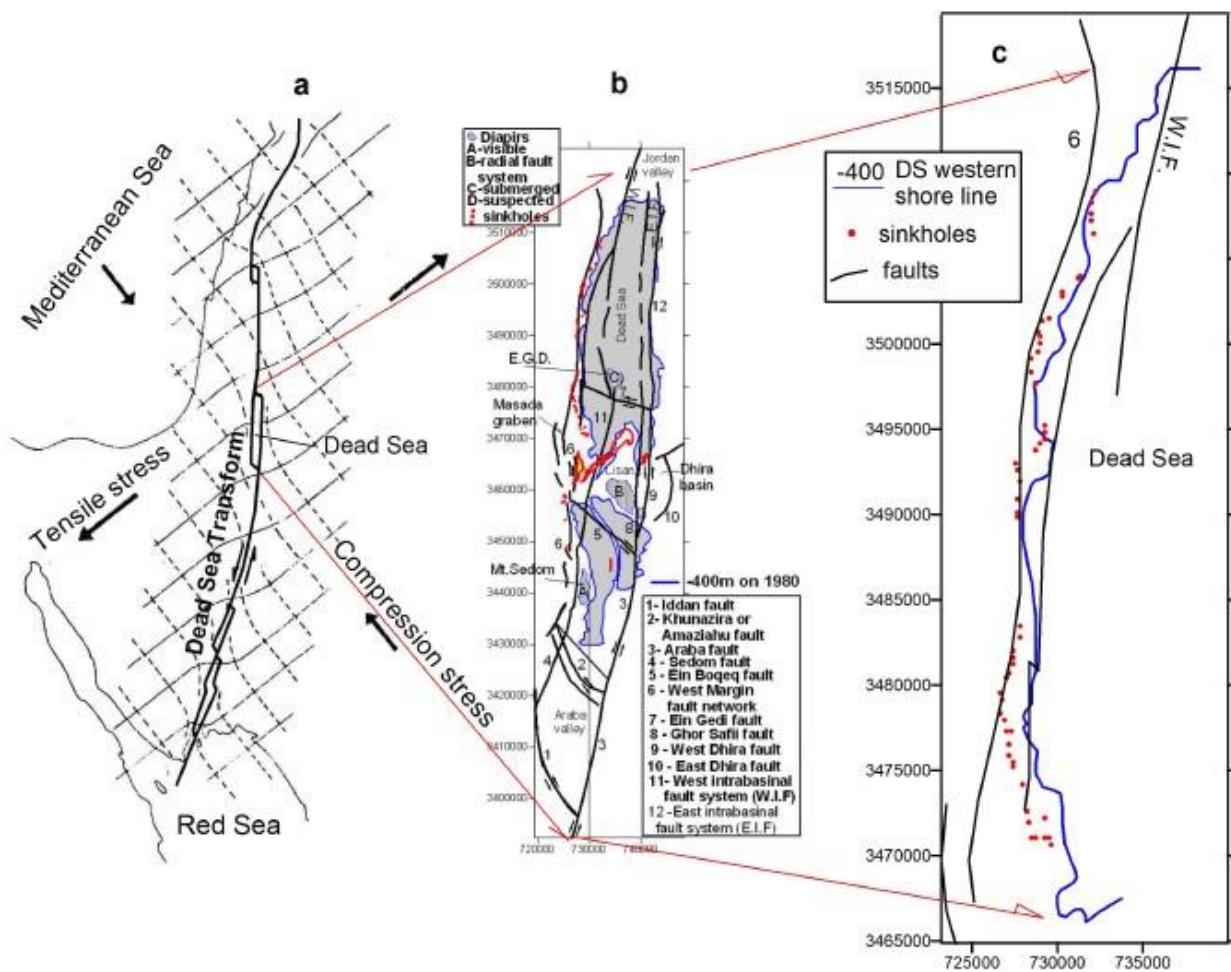
Εικόνα 11: Αριθμός καταβοθρών από το 1980 έως το 2016 (κόκκινη γραμμή) και επίπεδα της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1976 έως το 2018 (μπλε γραμμή). (Πηγή: Nof et al., 2019)

Οι καταβόθρες είναι, εξ ορισμού, κυκλικές κοιλότητες στο έδαφος που συμβαίνουν σε καρστικές περιοχές. Μπορεί να αναπτυχθούν τόσο αργά ώστε να μην γίνουν αντιληπτές, αλλά μπορεί και να καταρρεύσουν ακαριαία προκαλώντας μεγάλες καταστροφές. Τα κοιλάματα στο υπέδαφος σχηματίζονται από τη διάλυση ενός στρώματος άλατος καθώς το γλυκό νερό ρέει μέσω της υπόγειας επαφής. Το στρώμα άλατος αυτό, είναι ηλικίας περίπου 10.000 ετών, έχει πάχος συνήθως 5-20 μέτρα, και βρίσκεται σε βάθη μεταξύ 5 και 65 μέτρων κατά μήκος των ακτών της Νεκράς Θάλασσας (Yechieli et al., 2006). Όπως έχει προαναφερθεί, η στάθμη του νερού της Νεκράς Θάλασσας μειώνεται επί του παρόντος με ρυθμό μεγαλύτερο του 1 m/έτος λόγω της αρνητικής ισορροπίας μεταξύ εισροής και εκροής του νερού και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση του στρώματος άλατος σε ακόρεστο νερό, την διάλυσή του και τον σχηματισμό κοιλοτήτων που τελικά καταρρέουν ως καταβόθρες (Yechieli, 2000).



Εικόνα 12: Καταβόθρες κατά μήκος της ακτής της Νεκράς Θάλασσας κοντά στο Ein Gedi. Η έκπλυση των μετάλλων δίνει χρώματα στις πισίνες των καταβοθρών. (Photo by: George Steinmetz)

Οι καταβόθρες συνήθως σχηματίζονται κατά μήκος διαπερατών ρηγμάτων που χρησιμεύουν ως αγωγοί για την ροή ακόρεστων υπόγειων υδάτων ή στα περιθώρια στρωμάτων άλατος κάτω από την επιφάνεια, ενώ οι διάμετροί τους κυμαίνονται από αρκετά εκατοστά έως 40 μέτρα (Abelson et al., 2003, Ezersky, 2006). Οι καταβόθρες εμφανίζονται σε δύο κύρια ιζηματογενή περιβάλλοντα της ακτής της Νεκράς Θάλασσας: σε πεδία πηλού (mudflats) που αποτελούνται από λεπτόκοκκα λιμναία ιζήματα, και σε αλλουβιακά ριπίδια (alluvial fans) που αποτελούνται από χονδρόκοκκα ποτάμια ιζήματα (Arkin & Gilat, 2000). Το βάθος μέχρι την κορυφή του στρώματος άλατος είναι μεταξύ 25 και 65 μέτρων στα αλλουβιακά ριπίδια και συνήθως λιγότερο από 20 μέτρα στα πεδία πηλού (Yechieli et al., 2006, Avni et al., 2016). Τα ιζήματα αυτών των δύο περιβαλλόντων διαφέρουν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες: τα ιζήματα των αλλουβιακών ριπιδίων παραμορφώνονται κυρίως ως εύθραυστο υλικό, όπου επιβεβαιώνεται από τα απόκρημνα τοιχώματα των καταβοθρών, ενώ τα λεπτόκοκκα ιζήματα στα πεδία πηλού παραμορφώνονται με μια πιο ιξώδη συμπεριφορά (Baer et al., 2018, Shalev & Lyakhovsky, 2012). Η διαφορά στο βάθος του στρώματος άλατος και στη ρεολογία των ιζημάτων επηρεάζει την κατάρρευση των καταβοθρών με δύο τρόπους. Πρώτον, οι καταβόθρες στα αλλουβιακά ριπίδια τείνουν να είναι βαθύτερες (το βαθύτερο είναι περίπου 27 m) και στενότερες από αυτές των πεδίων πηλού. Δεύτερον, παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο καθώς και μηχανικά μοντέλα δείχνουν ότι η μεγάλη υπερφόρτωση υλικού στα αλλουβιακά ριπίδια εμποδίζει την κατάρρευση στην κοιλότητα του στρώματος άλατος. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μια αρκετών ετών καθυστέρηση του σχηματισμού καταβοθρών στα αλλουβιακά ριπίδια απ' ότι στα πεδία πηλού (Baer et al., 2018, Shalev & Lyakhovsky, 2012, Abelson et al., 2018).



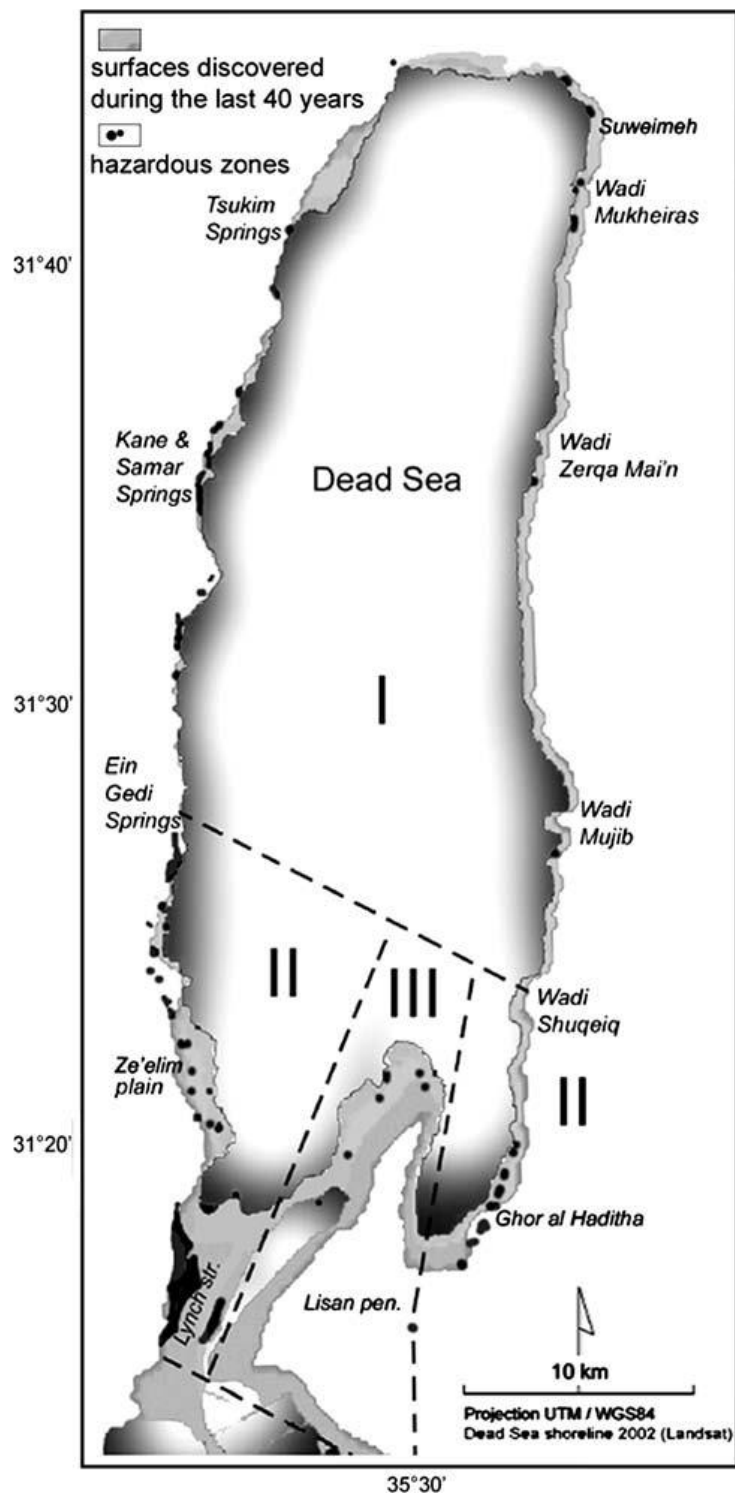
Εικόνα 13: Α) Το ρήγμα μετασχηματισμού και η λεκάνη πλάγιας απομάκρυνσης (*pull-apart basin*) της Νεκράς Θάλασσας, Β) Ρήγματα (μάυρες γραμμές) και καταβόθρες (κόκκινα σημεία) στην περιοχή της Νεκράς Θάλασσας, Γ) Ρήγματα και περιοχές καταβοθρών στη δυτική ακτή. (Πηγή: Ezersky et al., 2017)



Εικόνα 14: Καταβόθρες σε πεδία πηλού (mudflats) ανατολικά του αλλουβιακού ριπιδίου (alluvial fan) του Wadi Zeelim. Το μήκος αυτής της τοποθεσίας είναι περίπου 500 μέτρα. (Πηγή: Yechieli et al., 2016)

Οι Closson & Abou Karaki (2009) πρότειναν μια διαίρεση των παράκτιων ζωνών της Νεκράς Θάλασσας σε τρεις κατηγορίες με βάση τον βαθμό επικινδυνότητας ή/και τον τρόπο πρόκλησης των εδαφικών υποχωρήσεων. Αρχικά, η «Περιοχή Ι» καλύπτει τα βόρεια και κεντρικά μέρη της Νεκράς Θάλασσας. Από την αρχή της πτώσης στάθμης της Νεκράς Θάλασσας, αυτή η ζώνη επηρεάζεται λιγότερο από καταβόθρες και εδαφικές υποχωρήσεις. Όπως διακρίνεται και από την εικόνα (15) υπάρχει μια σαφής αντίθεση μεταξύ της ανατολικής και της δυτικής ακτής. Όσον αφορά τον αριθμό των καταβοθρών, η δυτική ακτή επηρεάζεται περισσότερο από την ανατολική. Επιπλέον, η δυτική ακτή είχε ήδη επηρεαστεί από καταβόθρες τη δεκαετία του 1990, ενώ η ανατολική ακτή δεν υπέστη ζημιές πριν από το 2003/2004. Ωστόσο, μία κατολίσθηση (landslide) κατέστρεψε μια περιοχή στο Suweimeh στις ακτές της Ιορδανίας το 1999. Δύο τμήματα των «Περιοχών ΙΙ» καταλαμβάνουν τη νότια Νεκρά Θάλασσα, τα οποία χωρίζονται από τη χερσόνησο Lisan («Περιοχή ΙΙΙ»). Διαπιστώνεται ότι η ένταση και η συχνότητα των γεωλογικών κινδύνων στην «Περιοχή ΙΙ» είναι μεγαλύτερες από ότι στην «Περιοχή Ι». Πράγματι, περισσότερο από το 80% όλων των καταβοθρών της Νεκράς Θάλασσας βρίσκονται στις «Περιοχές ΙΙ». Οι

περισσότερες από τις περιοχές που υπέστησαν καταστροφές συνδέονται ξεκάθαρα με κρυμμένα ρήγματα, κάτι που ισχύει για όλους τους γεωλογικούς κινδύνους της ανατολικής πλευράς. Η «Περιοχή III» αντιστοιχεί σε τεκτονικό τέμαχος που οριοθετείται από ρήγματα και ανυψώνεται από το διάπυρο άλατος Lisan, ενώ υπόκειται σε ένα πολύ συγκεκριμένο υδρογεωλογικό καθεστώς. Τα τεκτονικά χαρακτηριστικά έχουν ανιχνευθεί είτε με γεωφυσικές μεθόδους είτε έχουν αναγνωριστεί από γεωλογικές παρατηρήσεις πεδίου (Closson & Abou Karaki, 2009).



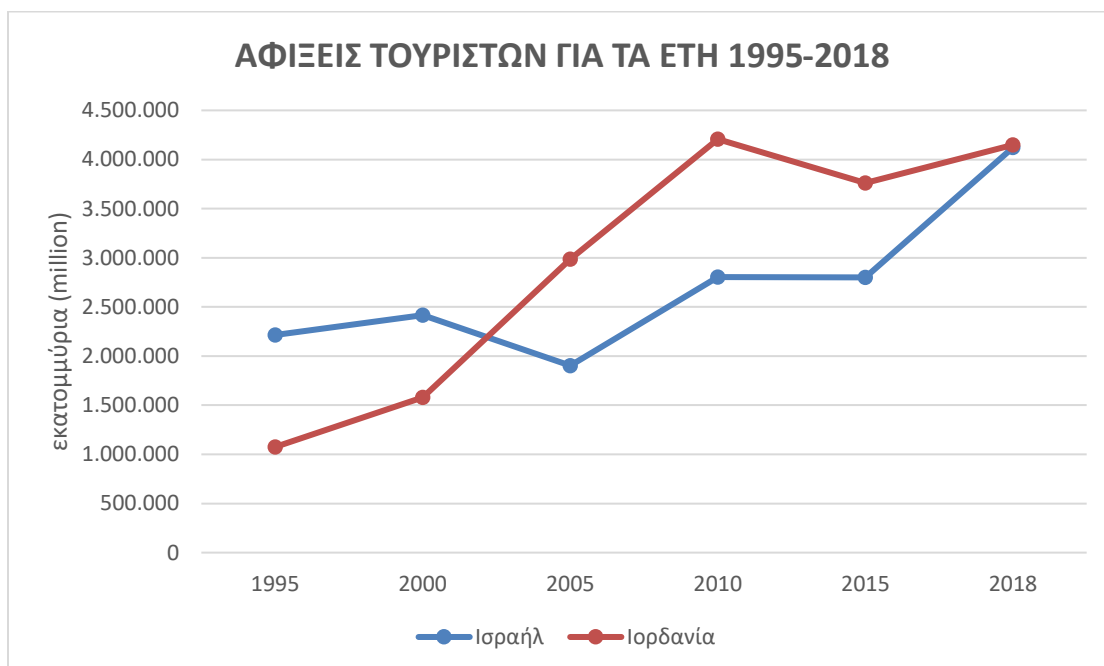
Εικόνα 15: Χάρτης των ζωνών επικινδυνότητας που σχετίζονται με την πτώση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας. Οι μαύρες κουκίδες/επιφάνειες είναι οι θέσεις καταβοθρών και εδαφικών υποχωρήσεων. Οι Περιοχές I, II και III υποδηλώνουν τον βαθμό επικινδυνότητας ή/και τον τρόπο πρόκλησης των εδαφικών υποχωρήσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε μεγάλα ρήγματα. (Πηγή: Closson & Abou Karaki, 2009)

1.8 Τουρισμός και επιπτώσεις από την πτώση της στάθμης

Η Νεκρά Θάλασσα είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς του Ισραήλ και της Ιορδανίας. Ορισμένοι παράγοντες, όπως το επίπεδο των υδάτων της που βρίσκεται σε βάθος 434 μέτρα κάτω από την στάθμη της θάλασσας, η υψηλή αλατότητά της, οι θερμές πηγές και τα πολλά θεραπευτικά άλατα που βρίσκονται εκεί, την καθιστούν έναν μοναδικό τουριστικό προορισμό. Τα τελευταία 23 χρόνια, ο συνολικός αριθμός των τουριστών στο Ισραήλ αυξήθηκε κατά 86%, από 2,2 εκατομμύρια το 1995 σε 4,1 εκατομμύρια το 2018. Την ίδια περίοδο, ο αριθμός των τουριστών στην Ιορδανία αυξήθηκε κατά 286%, από 1,1 εκατομμύρια το 1995 σε 4,1 εκατομμύρια το 2018. Σχεδόν οι μισοί τουρίστες και εκδρομείς που επισκέπτονται το Ισραήλ αποφασίζουν να μείνουν στη Νεκρά Θάλασσα, ειδικά στις ισραηλινές ακτές της (WBG, 2020).

	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Ισραήλ	2.215.000	2.417.000	1.903.000	2.803.000	2.799.000	4.121.000
Ιορδανία	1.075.000	1.580.000	2.987.000	4.207.000	3.761.000	4.150.000

Πίνακας 9: Αριθμός τουριστών στο Ισραήλ και την Ιορδανία από το 1995-2018. (Πηγή: World Bank Group)



Η συνεχιζόμενη πτώση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας έχει αρνητικό αντίκτυπο όχι μόνο στο περιβάλλον αλλά και στην ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία είναι σαφώς ορατή στην περίπτωση της τουριστικής ανάπτυξης. Τα τουριστικά θέρετρα χτίζονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις ακτές για ευκολότερη και γρηγορότερη πρόσβαση των τουριστών σε αυτές, και λόγω της πτώσης της στάθμης των υδάτων απομακρύνονται όλο και περισσότερο από την ακτή. Αυτό είναι ήδη ορατό σε θέρετρα όπως το Ein Gedi που βρίσκεται στην βόρεια λεκάνη. Στο Ein Gedi και στη βόρεια Νεκρά Θάλασσα λόγω της ακτογραμμής που υποχωρεί πιο μακριά από τα ξενοδοχεία, οι υποδομές αναψυχής συχνά καταλήγουν στη μέση της παραλίας, ενώ οι χώροι στάθμευσης που βρίσκονταν προηγουμένως δίπλα στην παραλία, πλέον βρίσκονται μερικές εκατοντάδες μέτρα από τη Νεκρά Θάλασσα (Wendt, 2016).

Παράλληλα, οι ποτάμιες αναβαθμίδες (fluvial terraces), όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά μήκος των ρεμάτων Al-Shaqq, Ma`een και Mujib, από την πλευρά της Ιορδανίας, αναδύονται λόγω της πτώσης της στάθμης της λίμνης και καθιστούν δύσκολο για τους τουρίστες να φτάσουν στην ακτή ενώ δυσχεραίνουν την κατασκευή νέων μεταφορών και ξενοδοχειακών υποδομών (Ghazleh et al. 2009). Κάθε τρία με πέντε χρόνια είναι απαραίτητο να λαμβάνονται ορισμένα μέτρα, όπως να επεκτείνονται τα δρόμοι που οδηγούν στην ακτή και να επεκτείνονται οι υπάρχοντες διάδρομοι για τους τουρίστες.



Εικόνα 16: Οι περιοχές των ποτάμιων αναβαθμίδων (fluvial terraces) στα ρέματα Al-Shaqq, Ma'een και Mujib στην ανατολική ακτή της Νεκράς Θάλασσας. (Πηγή: Ghazleh et al., 2010)

Είναι γνωστό ότι η πτώση της στάθμης του νερού οδηγεί στη δημιουργία καταβοθρών. Μικρές καταβόθρες μπορεί να προκαλέσουν ατυχήματα, ενώ μεγαλύτερες είναι ικανές να καταστρέψουν τις υπάρχουσες υποδομές, δρόμους και κτίρια. Αν εξετασθεί το μέγεθος της τουριστικής κινητικότητας, φαίνεται ότι έχει αυξηθεί η επισκεψιμότητα σε πολλές εύκολα προσβάσιμες παραλίες, όπως αυτές του Ein Gedi και του Ein Bokek (Wendt, 2016). Η ανάγκη επέκτασης της τουριστικής υποδομής προς τη ακτή δημιουργεί πρόσθετο κόστος για τις επιχειρήσεις που ασχολούνται με τον τουριστικό τομέα. Επομένως, κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί

υπόψη το γεγονός ότι η προοδευτική μείωση της στάθμης θα οδηγήσει σε υποχρεωτικές επεκτάσεις και περαιτέρω τροποποιήσεις των διαθέσιμων υποδομών για τους παραθεριστές, μείωση της προσβασιμότητας στις ακτές και αύξηση του συνολικού κόστους σε βάρος των τουριστών.

1.9 Πολιτικές για την διάσωση της Νεκράς Θάλασσας

Σήμερα, η Νεκρά Θάλασσα απειλείται κυρίως από τις μη βιώσιμες πολιτικές διαχείρισης των υδάτων που ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του '60, επιτρέποντας την εκτροπή των υδάτων από τη λεκάνη του ποταμού Ιορδάνη, τον κύριο τροφοδότη της λίμνης. Παράλληλα, η ραγδαία δημογραφική ανάπτυξη στη λεκάνη του Ιορδάνη έχει αναμφισβήτητα αυξήσει τις βασικές ανάγκες σε νερό, το οποίο παρέχεται κυρίως από τον ίδιο τον ποταμό. Ωστόσο, ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην μείωση της στάθμης και στις συνακόλουθες οικολογικές και πολιτιστικές καταστροφές στη λεκάνη, οφείλεται στην εκτροπή των υδάτων για γεωργική χρήση (Saab, 2010).

Οι προτεινόμενες λύσεις για την αποκατάσταση της στάθμης των υδάτων συχνά βασίζονταν στη διαχείριση της παροχής και στην αναζήτηση νέων υδάτινων πόρων. Στόχος είναι η θέσπιση κατάλληλων αναπτυξιακών και εδαφικών σχεδίων που θα σέβονται τη βιωσιμότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων και θα διασφαλίζεται ο οικονομικός ορθολογισμός στις διάφορες παραγωγικές χρήσεις του νερού, λαμβάνοντας υπόψη τους βιώσιμους περιορισμούς των υδροφορέων και των οικοσυστημάτων των λιμνών της λεκάνης, όπως η Θάλασσα της Γαλιλαίας και η Νεκρά Θάλασσα (Saab, 2010).

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχουν προταθεί και απορριφθεί πολλές ιδέες για την ανάκτηση της φυσικής στάθμης των υδάτων της Νεκράς Θάλασσας. Σε αυτές περιλαμβάνονται η μεταφορά νερού από διάφορα σημεία της Μεσογείου στη Νεκρά Θάλασσα, η άντληση υδάτων από τον ποταμό Ευφράτη στο Ιράκ (με το οποίο το Ισραήλ δεν έχει διπλωματικές σχέσεις) ή από την Τουρκία (με την οποία οι σχέσεις τα τελευταία χρόνια έχουν μειωθεί σημαντικά), η αποκατάσταση του ποταμού Ιορδάνη, του κύριου τροφοδότη της Νεκράς

Θάλασσας, προσθέτοντας αφαλατωμένο νερό στη θάλασσα της Γαλιλαίας για την παροχή πόσιμου νερού στο βόρειο Ισραήλ και την Ιορδανία και επεξεργασμένα λύματα στα κατάντη του ποταμού για να χρησιμοποιηθούν για άρδευση (Surkes, 2019). Ωστόσο, τέτοιες μεταφορές πάντα προκαλούσαν ανησυχίες για την οικονομική σκοπιμότητα και τις οικολογικές επιπτώσεις, κυρίως επειδή η ανάμειξη θαλάσσιων υδάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε αρνητικές αλλαγές στη σύνθεση του άλατος της Νεκρής Θάλασσας (Saab, 2010).

Αυτό που συμφωνήθηκε τελικά από το Ισραήλ, την Ιορδανία και την Παλαιστίνη είναι το σχέδιο μεταφοράς νερού από την Ερυθρά Θάλασσα στην Νεκρά Θάλασσα (Red Sea – Dead Sea Water Conveyance Project) (Surkes, 2019). Το 2002 στην Παγκόσμια Διάσκεψη Κορυφής για την Αειφόρο Ανάπτυξη που πραγματοποιήθηκε στο Γιοχάνεσμπουργκ της Νότιας Αφρικής, οι κυβερνήσεις του Ισραήλ, της Ιορδανίας και της Παλαιστίνης προώθησαν την ιδέα της οικοδόμησης ενός αγωγού που θα μεταφέρει νερό από την Ερυθρά Θάλασσα στην Νεκρά Θάλασσα (<https://ecopeaceme.org/projects/dead-sea/red-dead-canal/>, 13/4/2020). Ο αγωγός αυτός, ο οποίος θα βρίσκεται στην πλευρά της Ιορδανίας, προορίζεται να μεταφέρει 2 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (BCM) νερού ετησίως, από τον Κόλπο της Άκαμπα στην Ερυθρά Θάλασσα μέχρι τη Νεκρά Θάλασσα. Το ήμισυ αυτού του νερού θα αφαλατωθεί και θα παρασχεθεί στο Ισραήλ, την Ιορδανία και την Παλαιστίνη, και το υπόλοιπο θα διοχετευθεί στη Νεκρή Θάλασσα καθώς επίσης, θα παράγει υδροηλεκτρική ενέργεια και θα απορρίπτει τα βαριά υπολείμματα αλατιού στη Νεκρά Θάλασσα, αυξάνοντας το επίπεδό της. Ωστόσο, οι διπλωματικές σχέσεις μεταξύ Ισραήλ και Ιορδανίας είναι τεταμένες και επί του παρόντος, η υλοποίηση του έργου αυτού δεν προχωράει κυρίως από την πλευρά του Ισραήλ. (Sztankeler et al., 2012, Surkes, 2019).



Εικόνα 17: Χάρτης του έργου μεταφοράς νερού από την Ερυθρά Θάλασσα στην Νεκρά Θάλασσα. (Πηγή: <https://www.hydroreview.com/2016/12/07/red-dead-project-in-the-middle-east-will-include-hydropower/>, 12/4/2020)

Από την άλλη πλευρά, περιβαλλοντικές ομάδες προειδοποιούν ότι η διοχέτευση οποιουδήποτε είδους μεικτού θαλασσινού νερού και άλμης από εργοστάσια αφαλάτωσης στη Νεκρά Θάλασσα, πάνω από 400 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, θα μπορούσε να προκαλέσει το

σχηματισμό ανεπιθύμητης λευκής γύψου ή/και πολύχρωμων φυκών, ενώ παράλληλα θα μπορούσε να έχει πιθανές επιπτώσεις στους κοραλλιογενείς υφάλους της Ερυθράς Θάλασσας, που είναι από τους μοναδικούς στον κόσμο που εξακολουθούν να είναι ανθεκτικοί ενόψει της κλιματικής αλλαγής (Surkes, 2019). Παρόλα αυτά είναι η μόνη εναλλακτική λύση που αξιολογείται και θεωρείται περισσότερο πραγματοποιήσιμη (Sztankeler et al., 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Δεδομένα

Για να πραγματοποιηθεί η διαχρονική παρατήρηση των μεταβολών της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας κατά την περίοδο 1972-2019 χρειάστηκε μία σειρά δεδομένων. Καταρχάς, χρειάστηκαν δορυφορικά δεδομένα, τα οποία ανήκουν στο Δορυφορικό Τηλεπισκοπικό Προγράμμα Landsat της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration - NASA). Πιο συγκεκριμένα, έγινε λήψη από την πλατφόρμα Earth Explorer της Αμερικανικής Γεωλογικής Εταιρείας (USGS), έξι δορυφορικών εικόνων Landsat που περιλαμβάνουν την περιοχή μελέτης. Η μία εικόνα είναι από τις 15/9/1972 και ανήκει στον Landsat 1 Multispectral Scanner (MSS), η δεύτερη είναι από τις 19/12/1978 και ανήκει στον Landsat 3 MSS, η τρίτη είναι από τις 21/7/1990 και ανήκει στον Landsat 5 Thematic Mapper (TM), η τέταρτη είναι από τις 17/8/2000 και ανήκει στον Landsat 5 TM, η πέμπτη είναι από τις 29/8/2010 και ανήκει στον Landsat 5 TM και η έκτη είναι από τις 22/8/2019 και ανήκει στον Landsat 8 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) (Πίνακας 10). Όσον αφορά την χωρική διακριτική ικανότητα των δορυφόρων, του Landsat 1 και 3 ήταν 80 μέτρα, του Landsat 5 ήταν 30 μέτρα εκτός από το θερμικό που ήταν 120 μέτρα και του Landsat 8 είναι 30 μέτρα εκτός από το παγχρωματικό (Band 8) και τα δύο θερμικά που είναι 15 και 100 μέτρα αντίστοιχα (https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products, 19/5/2020). Οι εικόνες αυτές έχουν επιλεγεί με κριτήρια την χαμηλή ή καθόλου ύπαρξη νεφοκάλυψης πάνω από την περιοχή μελέτης καθώς και με την προϋπόθεση η λήψη τους να είναι κατά την διάρκεια της μέρας. Στον Πίνακα (11) παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων.

Ημερομηνία Λήψης Εικόνας	Δορυφόρος
15/9/1972	Landsat 1 MSS
19/12/1978	Landsat 3 MSS
21/7/1990	Landsat 5 TM
17/8/2000	Landsat 5 TM
29/8/2010	Landsat 5 TM
22/8/2019	Landsat 8 OLI/TIRS

Πίνακας 10: Πίνακας με τις ημερομηνίες λήψης των εικόνων και τους αντίστοιχους δορυφόρους. (Πηγή: USGS)

	Εκτόξευση	Τέλος Λειτουργίας	Γωνία (°)	Ύψος Πτήσης (km)	Τροχιακός Κύκλος (ημέρες)	Τηλεπισκοπικ οί Δέκτες
Landsat 1	23/07/1973	6/01/1978	99.2	917	18	RBV, MSS
Landsat 3	5/03/1978	31/03/1983	99.2	917	18	RBV, MSS
Landsat 5	1/03/1984	5/06/2013	98.2	705	16	MSS, TM
Landsat 8	11/02/2013	Μέχρι σήμερα	98.2	705	16	OLI, TIRS

Πίνακας 11: Πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων. (Πηγή: USGS)

Η επιφάνεια της Γης παρουσιάζει πολλά διαφορετικά σχήματα και μορφές, όπως βουνά, πεδιάδες, λόφους, κ.α., τα οποία διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και εκφράζουν στο σύνολό τους το ανάγλυφο. Συνεπώς, για την δυνατότητα μελέτης των παραπάνω γεωμορφών, η παρουσίαση του σχήματος ή της μορφής της επιφάνειας είναι εξέχουσας σημασίας, οπότε γίνεται αντιληπτό ότι η διαχείριση και επεξεργασία του ανάγλυφου καταλαμβάνει μία σημαντική θέση στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) και ειδικότερα στη χαρτογράφηση της γήινης επιφάνειας.

Ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model - DEM) αποτελεί μια ψηφιακή αναπαράσταση του γήινου ανάγλυφου, η οποία περιγράφει την γεωμετρία της επιφάνειας της Γης και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, την τοπογραφία, τις μορφομετρικές παραμέτρους κλπ.

Η αποστολή Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) της NASA, η οποία ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2000, προσφέρει τοπογραφικά δεδομένα παγκόσμιας κάλυψης και υψηλής ανάλυσης για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, 5/3/2020). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Από τον δικτυακό τόπο της Αμερικανικής Γεωλογικής Εταιρείας (USGS) έγινε λήψη των απαραίτητων αρχείων SRTM που καλύπτουν την περιοχή μελέτης, τα οποία έχουν ανάλυση 30 μέτρα (1 δευτερόλεπτο της μοίρας). Συγκεκριμένα, λήφθηκαν 14 αρχεία SRTM που καλύπτουν την λεκάνη απορροής της λίμνης, όπου στην συνέχεια τα αρχεία αυτά εισήχθησαν στο πρόγραμμα ArcMap και επεξεργάστηκαν για την εξαγωγή του τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Σχετικά με τις καλύψεις γης, τα δεδομένα για την περιοχή μελέτης προέρχονται από το πρόγραμμα Global Land Cover της υπηρεσίας Copernicus Global Land Service (CGLS) για το έτος 2015. Η λήψη τους έγινε από την βάση δεδομένων Copernicus Global Land Service. Τα δεδομένα αυτά έχουν ανάλυση 100 μέτρα, έχουν ακρίβεια 80% και προδιαγραφές ίδιες για όλες τις χώρες που έχουν παραχθεί. Η κατηγοριοποίηση των καλύψεων γης γίνεται σε τρία επίπεδα θεματικής λεπτομέρειας δημιουργώντας από 12 κατηγορίες στο πρώτο επίπεδο μέχρι 23 στο τρίτο επίπεδο.

Όσον αφορά την Γεωλογία, τα δεδομένα προέρχονται από την Αμερικανική Γεωλογική Εταιρεία (USGS). Ειδικότερα, από τον δικτυακό τόπο της USGS, έγινε λήψη του shapefile που περιέχει ολόκληρη την γεωλογία της Αραβικής Χερσονήσου. Το shapefile αυτό στη συνέχεια επεξεργάστηκε στο πρόγραμμα ArcMap, ώστε να εξαχθούν μόνο τα απαραίτητα δεδομένα για την περιοχή μελέτης.

Τα δεδομένα που αφορούν την λεκάνη απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης προέρχονται από το Hydrosheds.org της WWF (World Wide Fund for Nature). Συγκεκριμένα, τα πολυγωνικά σύνολα δεδομένων που αφορούν την λεκάνη απορροής

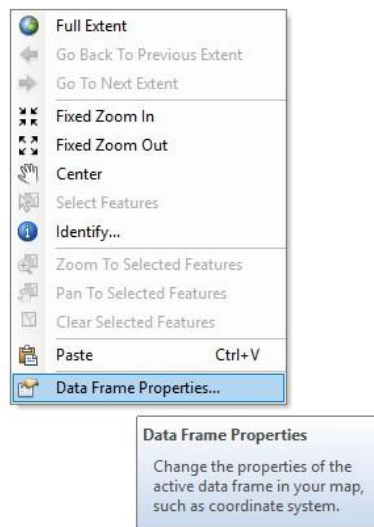
ονομάζονται Hydrobasins και διανέμονται σε μορφή shapefile, όπου κάθε shapefile αποτελείται από πέντε κύρια αρχεία (.dbf, .sbn, .sbx, .shp, .shx). Όλα τα δεδομένα έχουν προβολικό σύστημα WGS 84.

2.2 Μεθοδολογία

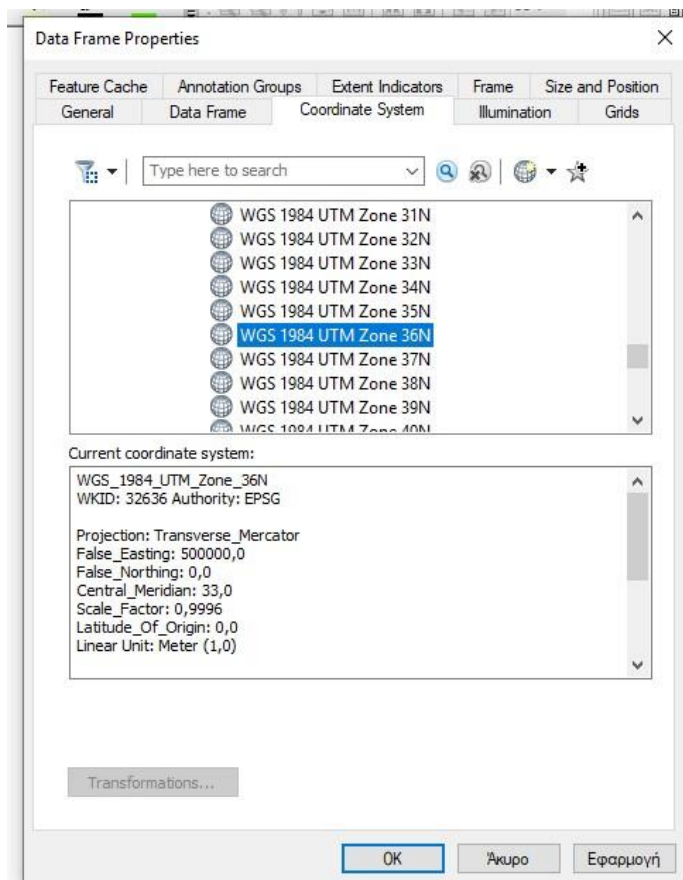
Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) είναι πληροφοριακά συστήματα που παρέχουν την δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης των δεδομένων σε ψηφιακό περιβάλλον και αποτελούν πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διεξαγωγή γεωγραφικών μελετών όπως είναι και η παρούσα εργασία (Burrough, 1986).

Για την επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS, της εταιρίας ESRI, το οποίο είναι ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επεξεργασία χαρτών και γεωγραφικών πληροφοριών. Παρέχει στο χρήστη την δυνατότητα να οπτικοποιεί, να αναλύει και να εξαγει πληροφορίες ενώ παράλληλα μπορεί να δημιουργεί χάρτες και τρισδιάστατες οπτικοποιήσεις (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>, 7/4/2020).

Ξεκινώντας με την επεξεργασία των δεδομένων, είναι απαραίτητο να εξαχθεί το πολύγωνο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης από το αρχείο HydroBasins, το οποίο περιέχει τα πολύγωνα όλων των λεκανών της Μέσης Ανατολής και της Ευρώπης. Αρχικά, με την έναρξη του προγράμματος ArcMap, δημιουργείται νέος χάρτης και καθορίζεται το κατάλληλο σύστημα αναφοράς, πατώντας δεξί κλικ και επιλέγοντας Data Frame Properties.

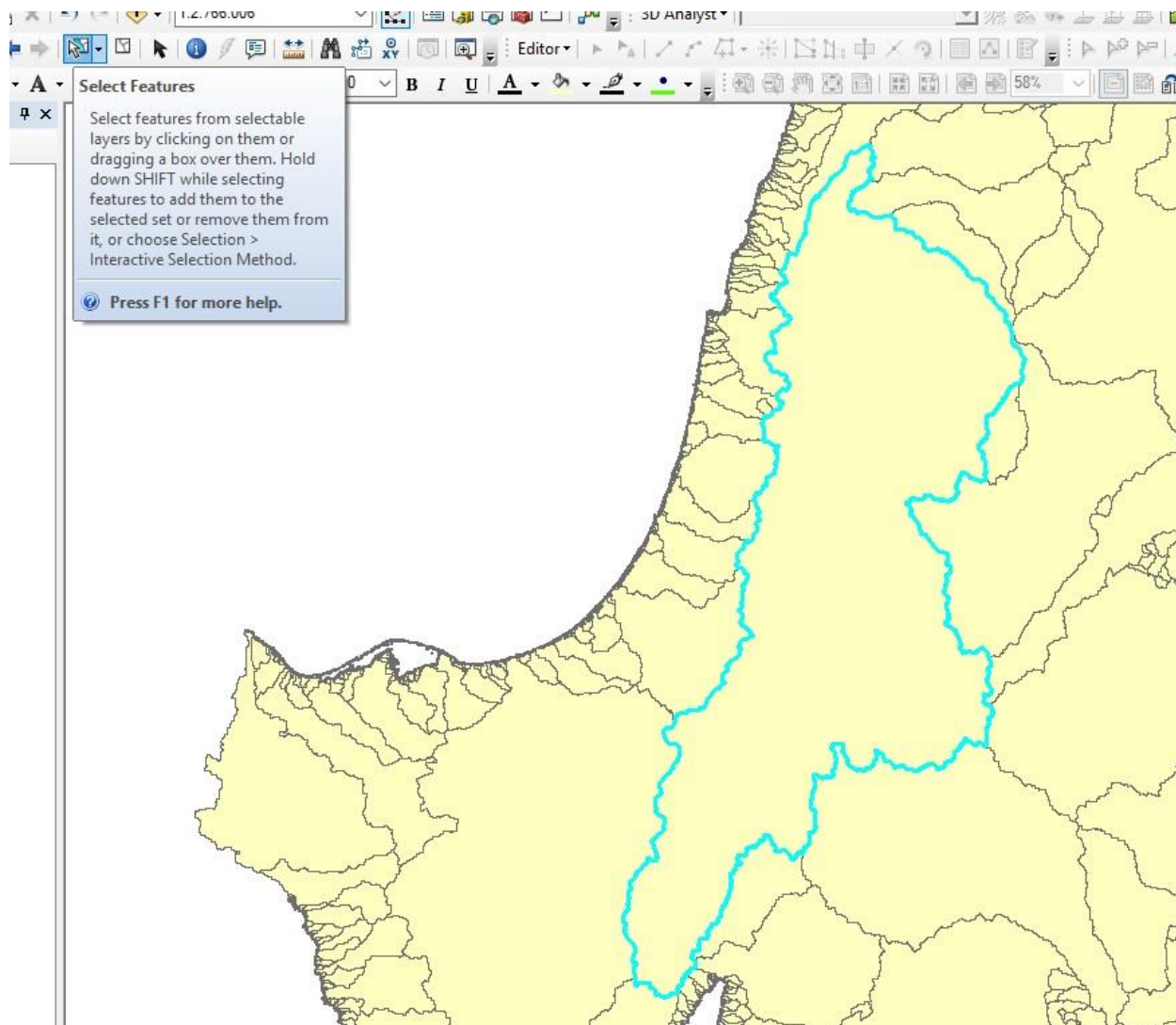


Εικόνα 18: Επιλογή Data Frame Properties.



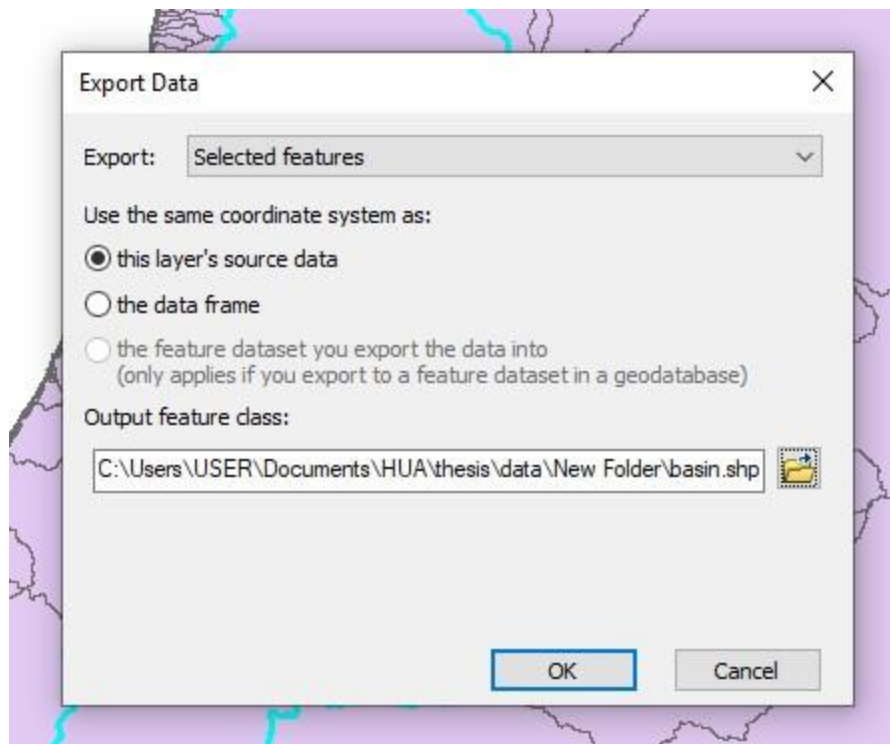
Εικόνα 19: Επιλογή του συστήματος αναφοράς.

Στη συνέχεια, από το ArcCatalog εισάγεται το shapefile και μόλις εντοπιστεί η ζητούμενη λεκάνη απορροής, με την λειτουργία Select Features από την μπάρα εργαλείων Tools, επιλέγεται το πολύγωνο της λεκάνης.



Εικόνα 20: Λειτουργία Select Features και επιλογή της λεκάνης.

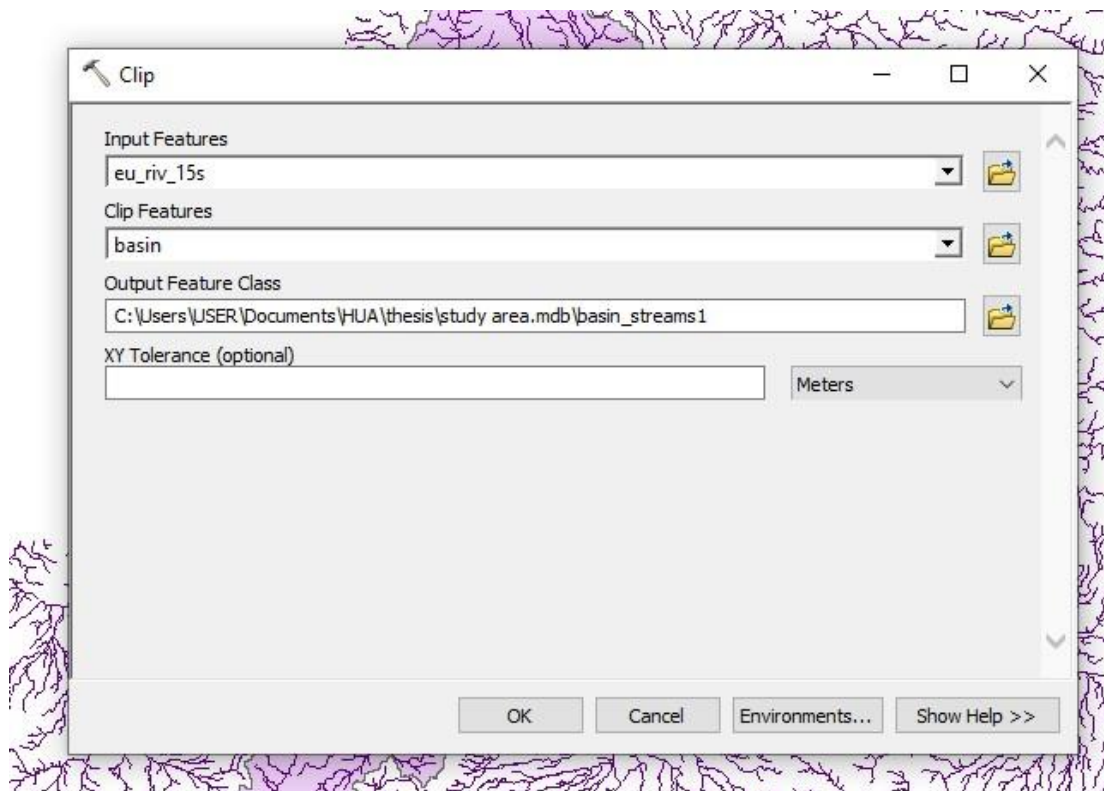
Κατόπιν, κάνοντας δεξί κλικ στο shapefile που βρίσκεται στον πίνακα περιεχομένων, γίνεται εξαγωγή των δεδομένων με την επιλογή Data > Export Data, αφού πρώτα έχει οριστεί ο τόπος αποθήκευσης του αρχείου.



Εικόνα 21: Εξαγωγή δεδομένων με την επιλογή Export Data.

Με αυτόν τον τρόπο το αρχείο με την λεκάνη απορροής είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί και για την εξαγωγή των υπολοίπων δεδομένων.

Ύστερα από την εξαγωγή του πολυγώνου της λεκάνης απορροής, χρειάζεται να γίνει εξαγωγή και του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής από το αρχείο που λήφθηκε από τον ιστότοπο HydroSheds και περιέχει το υδρογραφικό δίκτυο όλων των χωρών της Μέσης Ανατολής και της Ευρώπης. Από το ArcCatalog εισάγεται το shapefile των υδρογραφικών δικτύων, ενώ είναι ήδη εισαγμένο το αρχείο της λεκάνης απορροής. Από την εργαλειοθήκη ArcToolbox, επιλέγω Analysis Tools > Extract > Clip, ώστε να εξάγω το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, αφού έχει καθοριστεί ο τόπος αποθήκευσης του εξαγόμενου αρχείου.



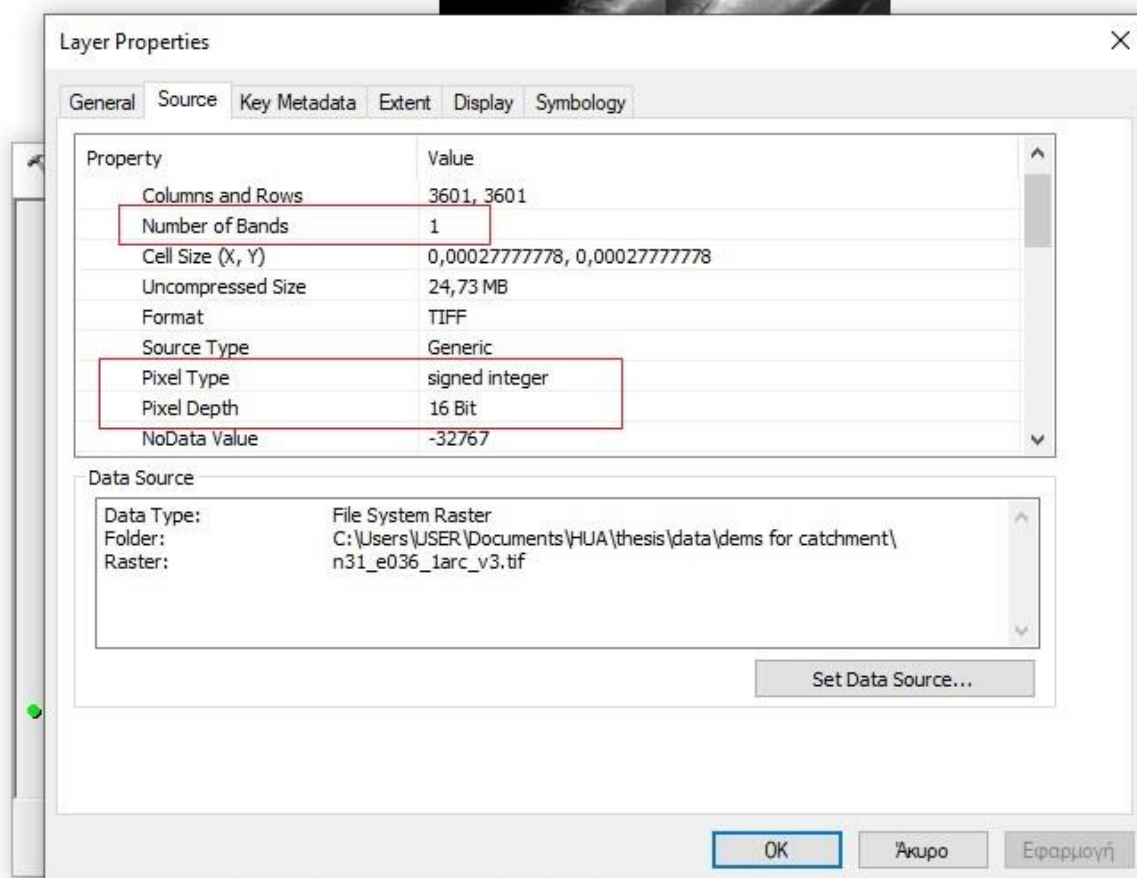
Εικόνα 22: Λειτουργία Clip.

Εν συνεχεία, θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία για να γίνει η εξαγωγή των γεωλογικών σχηματισμών από το shapefile που περιέχει την γεωλογία της Αραβικής Χερσονήσου, στο shapefile της λεκάνης απορροής.

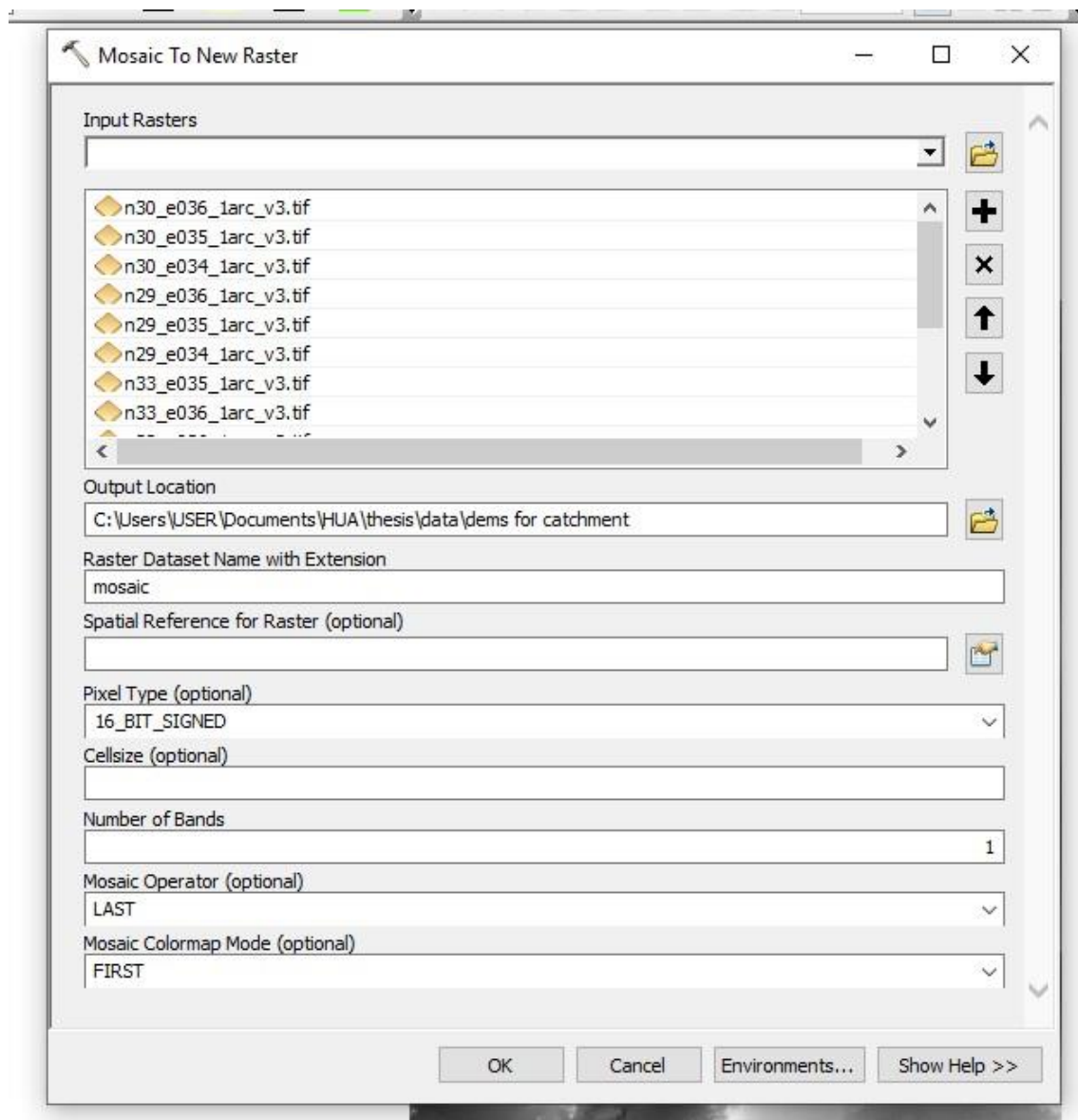
Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται για την εξαγωγή δεδομένων των καλύψεων γης, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση, επειδή πρόκειται για raster (ψηφιδωτά) δεδομένα, χρησιμοποιείται η εντολή Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip.

Μία ακόμα σημαντική επεξεργασία για την ανάλυση της περιοχής μελέτης, κρίνεται η εξαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της λεκάνης απορροής. Ωστόσο, πριν την εξαγωγή του DEM της λεκάνης, επειδή κάθε ένα από τα υψηλής ανάλυσης αρχεία SRTM που καλύπτουν την περιοχή, έχουν ληφθεί ξεχωριστά, χρειάζεται να προηγηθεί η διαδικασία του Mosaicing, εφόσον τα αρχεία SRTM έχουν την ίδια ανάλυση και το ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Με την διαδικασία αυτή, επιτυγχάνεται η συγχώνευση των αρχείων SRTM σε ένα ενιαίο αρχείο. Για να ξεκινήσει το

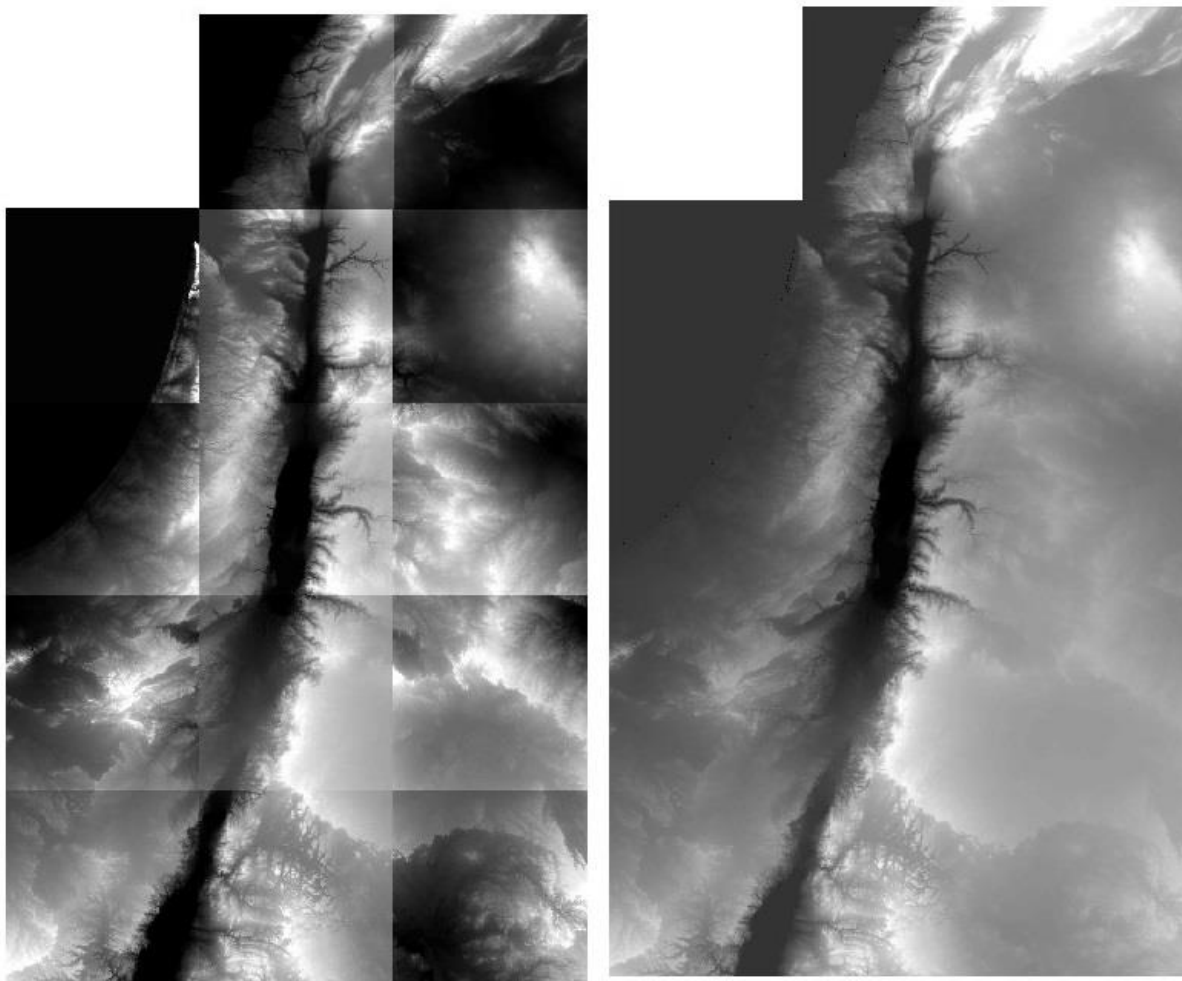
Mosaicing, εισάγονται από το ArcCatalog στο ArcMap τα 14 αρχεία SRTM και από το ArcToolbox επιλέγω Data Management > Raster > Raster Dataset > Mosaic to New Raster. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, εισάγονται όλα τα αρχεία SRTM, επιλέγεται ο φάκελος όπου θα αποθηκευτεί το εξαγόμενο αρχείο, εισάγεται το επιθυμητό όνομα, ο τύπος pixel (Pixel Type) και το πλήθος των μπαντών (Number of Bands). Οι πληροφορίες των δύο τελευταίων μπορούν να ελεγχθούν πατώντας διπλό κλικ πάνω σε ένα SRTM αρχείο στον πίνακα περιεχομένων και στην συνέχεια στην μπάρα Source.



Εικόνα 23: Επιθυμητές πληροφορίες για το SRTM αρχείο.



Εικόνα 24: Λειτουργία Mosaic to New Raster.



Εικόνα 25: SRTM αρχεία πριν και μετά την διαδικασία του Mosaicing.

Έπειτα, για την εξαγωγή του DEM ακολουθείται η ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε στην εξαγωγή δεδομένων των καλύψεων γης.

Όμως, η πιο σημαντική διαδικασία, πάνω στην οποία βασίζεται η εργασία, είναι η εξαγωγή της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το έτος 1972 μέχρι το 2019. Η εξαγωγή αυτή θα υλοποιηθεί στο ArcMap με την διαδικασία της ψηφιοποίησης.

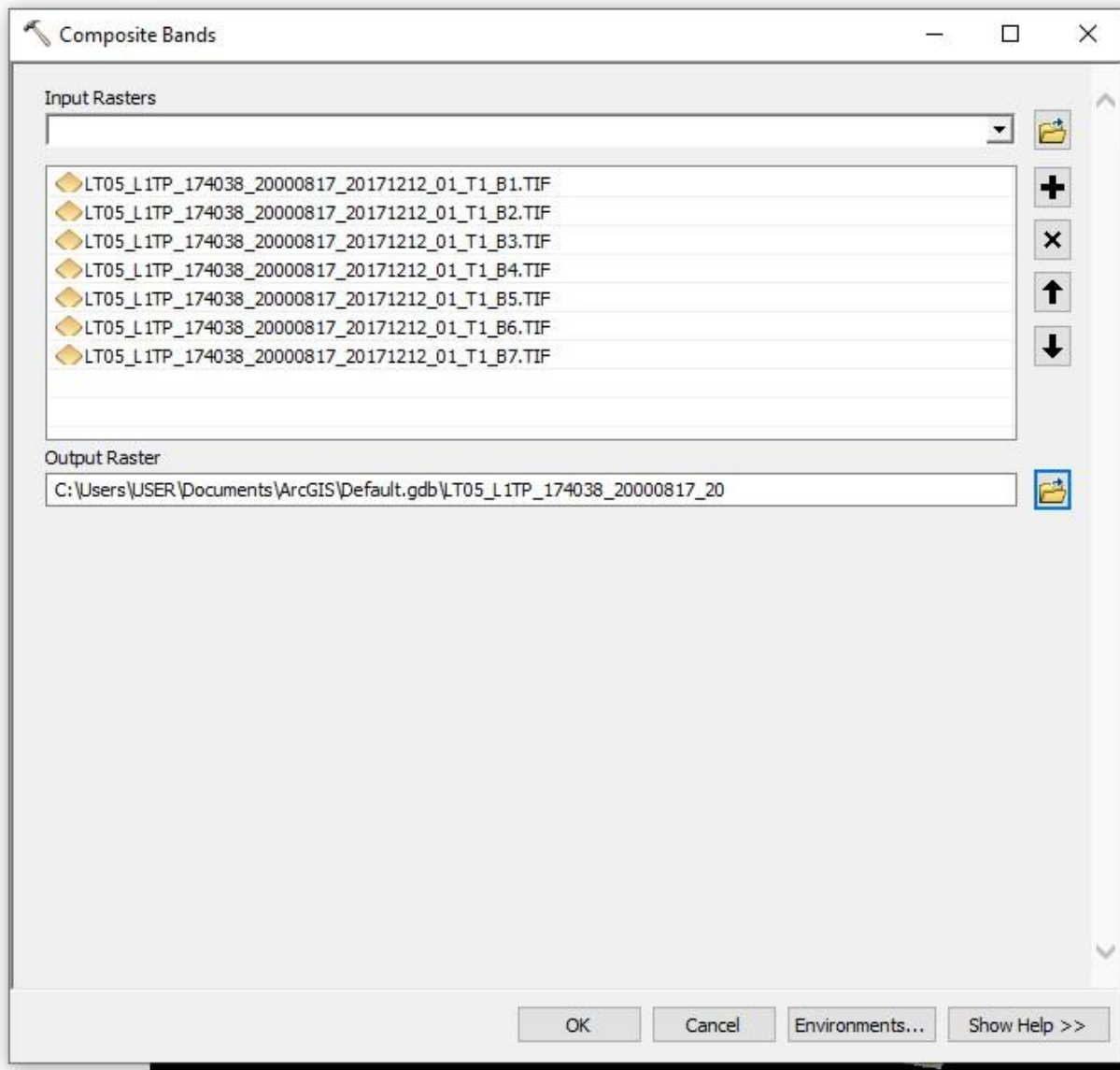
Η ψηφιοποίηση, αναφέρεται στην αποτύπωση των χαρακτηριστικών ενός χάρτη, ο οποίος τίθεται πάνω σε ένα πίνακα ψηφιοποίησης. Ουσιαστικά, η ψηφιοποίηση μετατρέπει τα χωρικά χαρακτηριστικά ενός χάρτη (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) σε ψηφιακή μορφή. Έτσι, η

ψηφιοποίηση είναι μια διαδικασία εισαγωγής μιας σειράς σημείων και γραμμών τα οποία αποθηκεύονται σε συγκεκριμένα αρχεία σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης είναι η δημιουργία ψηφιακού χάρτη σε διανυσματική μορφή (Κουτσόπουλος, 2002, Χαλκιάς, 2006).

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της ψηφιοποίησης απαιτείται η δημιουργία αρχείων shapefile που περιέχουν κάθε μια από τις οντότητες που θα ψηφιοποιηθούν. Αρχικά, δημιουργείται ένα shapefile που θα περιέχει το υδάτινο σώμα του πρώτου έτους μελέτης, το οποίο θα ψηφιοποιηθεί από την εικόνα Landsat του αντίστοιχου έτους. Ανοίγεται το πρόγραμμα ArcCatalog, το οποίο δείχνει τα περιεχόμενα του φακέλου όπου είναι αποθηκευμένα όλα τα αρχεία της εργασίας, ενώ εκεί θα αποθηκευτούν και τα shapefiles. Επιλέγεται η εντολή New > Shapefile και ορίζεται το όνομα του αρχείου και ο τύπος του ως “polygon”. Ο τύπος του αρχείου επιλέχθηκε ως polygon καθώς θα περιέχει κλειστή επιφάνεια. Πριν ολοκληρωθεί η δημιουργία του νέου shapefile, με την επιλογή Edit > Select > Projected Coordinate Systems > UTM > WGS 84 > Northern Hemisphere > WGS 84 UTM Zone 36N, μπορεί να οριστεί το κατάλληλο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το σύστημα αυτό είναι το κατάλληλο, διότι καλύπτει τις περιοχές που βρίσκονται 30°E μέχρι 36°E και στο βόρειο ημισφαίριο, μεταξύ του Ισημερινού και 84°N, δηλαδή εκεί όπου βρίσκεται η περιοχή μελέτης (https://georepository.com/crs_32636/WGS-84-UTM-zone-36N.html, 30/5/2020).

Ως υπόβαθρο της ψηφιοποίησης χρησιμοποιήθηκαν ψευδέγχρωμες εικόνες Landsat που φορτώθηκαν στο ArcMap με την εντολή Composite Bands ακολουθώντας την διαδρομή ArcToolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Composite Bands και επιλέγοντας, ύστερα, τα φασματικά κανάλια της εκάστοτε εικόνας. Στην περίπτωση του Landsat 1 και 3 MSS χρησιμοποιήθηκε ψευδέγχρωμη εικόνα με συνδυασμό των καναλιών 5, 6 και 7 (Red, Near Infrared, Near Infrared). Για την ψηφιοποίηση με τις εικόνες Landsat 5 TM, χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός των καναλιών 4, 5 και 7 (Near Infrared, Short-wave Infrared 1, Short-wave Infrared 2), ενώ για την ψηφιοποίηση με την εικόνα Landsat 8 χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός των καναλιών 5, 6 και 7 (Near Infrared, Short-wave Infrared 1, Short-wave Infrared 2). Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιήθηκαν διότι τα υδάτινα σώματα απορροφούν την ακτινοβολία

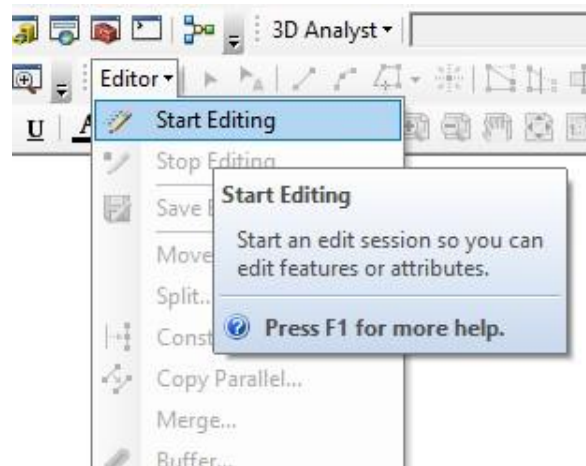
του υπέρυθρου, επομένως το όριο μεταξύ της ξηράς και των υδάτων είναι περισσότερο εμφανές, γεγονός που θα βοηθήσει στην ψηφιοποίηση.



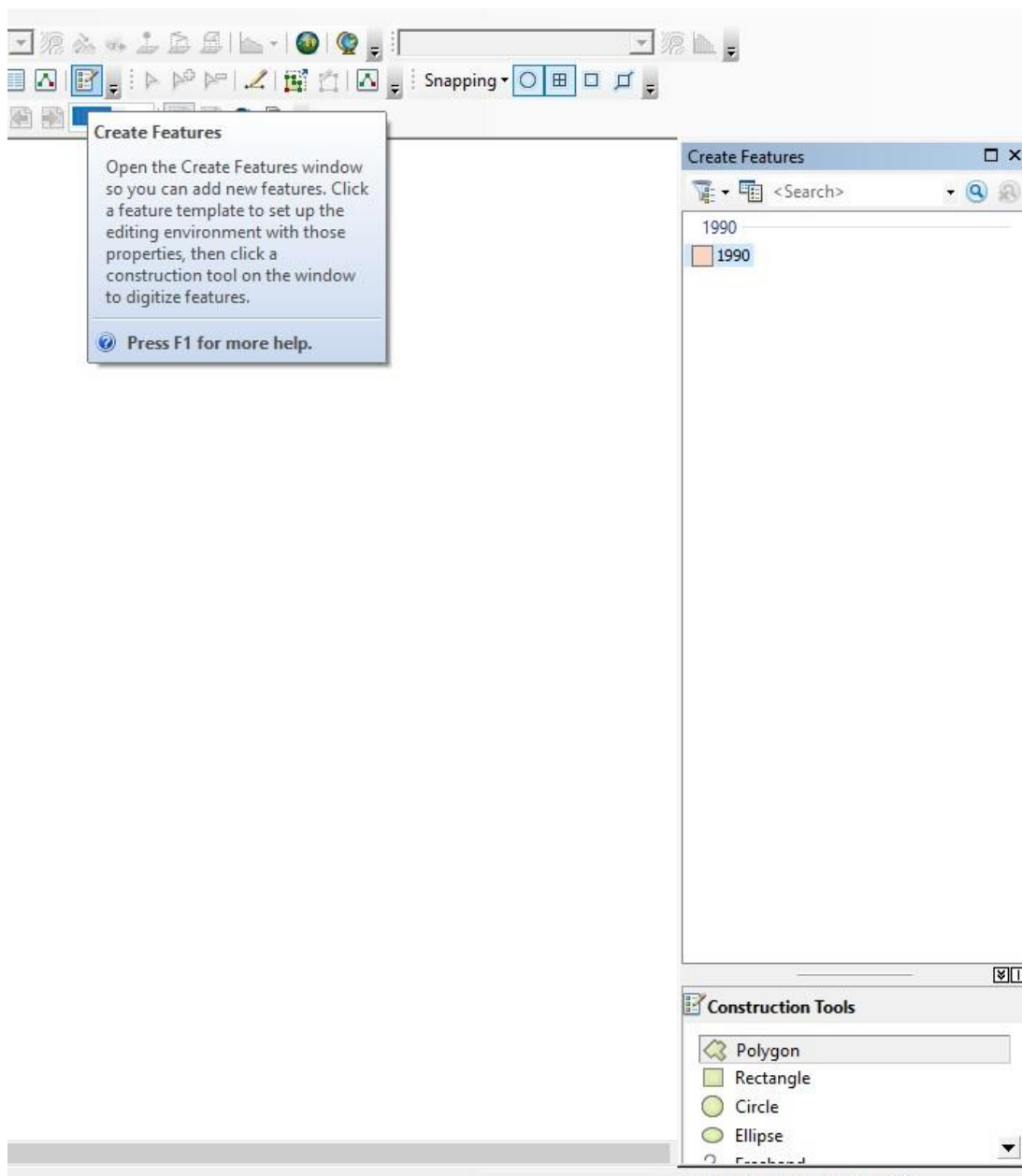
Εικόνα 26: Λειτουργία Composite Bands.

Η διαχείριση του νέου θεματικού επιπέδου που δημιουργήθηκε και η προσθήκη γεωγραφικών οντοτήτων σε αυτό, υλοποιείται με τη χρήση του προγράμματος ArcMap. Πρώτα, πραγματοποιείται έναρξη του ArcMap με τη δημιουργία νέου χάρτη και κατόπιν δημιουργία νέου πλαισίου δεδομένων (Data Frame) και καθορισμός του συστήματος αναφοράς του.

Ύστερα, στο πλαίσιο αυτό προστίθεται η ψευδέγχρωμη εικόνα του εκάστοτε έτους και το θεματικό επίπεδο που δημιουργήθηκε στον ArcCatalog, ορίζεται η κλίμακα της ψηφιοποίησης, η οποία ήταν 1:500, και ενεργοποιείται η γραμμή εργαλείων διαμόρφωσης (Editor Toolbar Button). Από το μενού επιλογών Editor, γίνεται επιλογή του Start Editing και καθορισμός ενέργειας (Task: Create New Feature), και θεματικό επίπεδο εργασίας (Target: το shapefile που δημιουργήθηκε).



Εικόνα 27: Επιλογή Start Editing.



Εικόνα 28: Επιλογή Create Features.

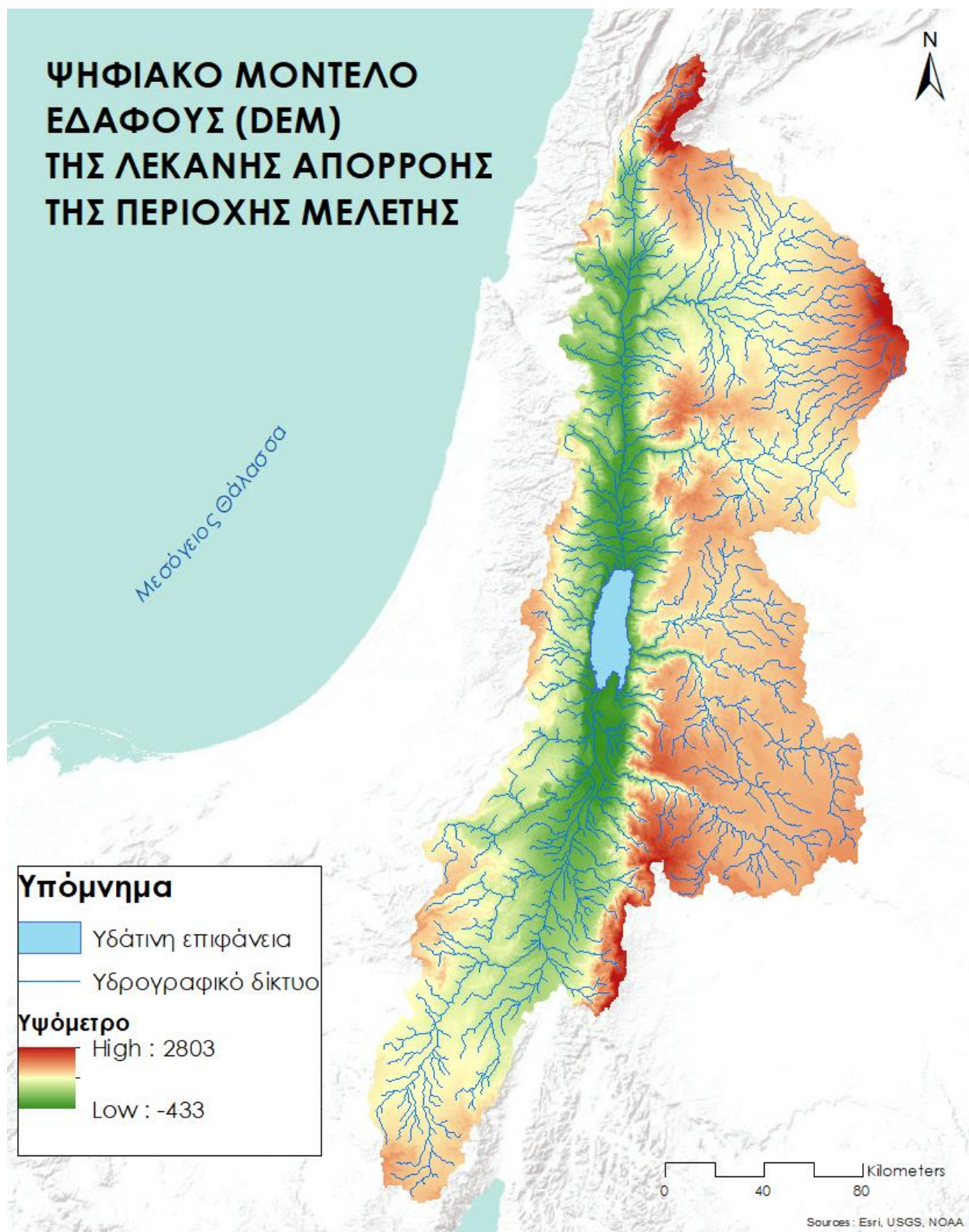
Έπειτα, εφαρμόζεται η ψηφιοποίηση οντοτήτων με τη χρήση του εργαλείου σχεδίασης (Sketch Tool), εισάγοντας τα σημεία που ορίζουν τη γεωμετρία αυτών των οντοτήτων, με διαδοχικά κλικ στο πολύγωνο που θέλουμε να ψηφιοποιήσουμε. Τέλος, η ψηφιοποίηση ολοκληρώνεται με διπλό κλικ και τα δεδομένα αποθηκεύονται από την εργαλειοθήκη του Editor επιλέγοντας Save

Edits και στη συνέχεια Stop Editing. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις υπόλοιπες εικόνες των ετών μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων στο πρόγραμμα ArcMap παρουσιάζονται στους ακόλουθους χάρτες:

1. Χάρτης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) και του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής της Νεκράς Θάλασσας,
2. Γεωλογικός Χάρτης της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης,
3. Χάρτης καλύψεων γης της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης,
4. Χάρτες που παρουσιάζουν την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας σε διάστημα 47 ετών,
5. Χάρτης που παρουσιάζει το επίπεδο της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1972-2019 ανά δεκαετία.



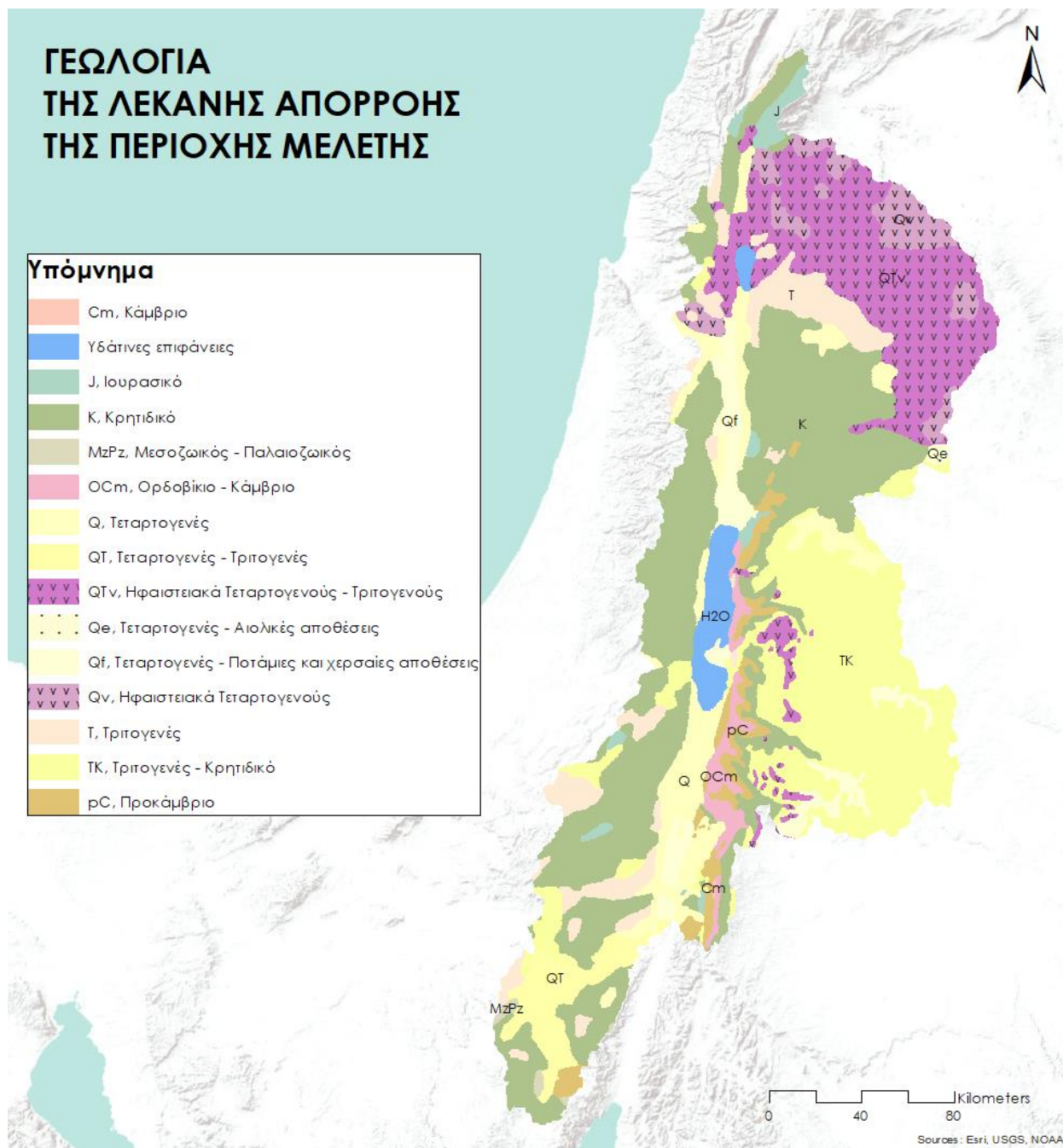
Χάρτης 2: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Σύμφωνα με τον χάρτη του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, οι περιοχές με το χαμηλότερο υψόμετρο βρίσκονται στην κοιλάδα του Ιορδάνη που βρίσκεται βόρεια της Νεκράς Θάλασσας και στην κοιλάδα της Αραβά που βρίσκεται νότια της Νεκράς Θάλασσας, εκατέρωθεν των οποίων βρίσκεται το ρήγμα μετασχηματισμού της Νεκράς Θάλασσας, γεγονός που διαπιστώνεται από την απότομη αλλαγή του υψομέτρου κυρίως ανατολικά της λίμνης.

ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Υπόμνημα

	Cm, Κάμβριο
	Υδάτινες επιφάνειες
	J, Ιουρασικό
	K, Κρητιδικό
	MzPz, Μεσοζωικός - Παλαιοζωικός
	OCm, Ορδοβίκιο - Κάμβριο
	Q, Τεταρτογενές
	QT, Τεταρτογενές - Τριτογενές
	QTn, Ηφαιστειακά Τεταρτογενούς - Τριτογενούς
	Qe, Τεταρτογενές - Αιολικές αποθέσεις
	Qf, Τεταρτογενές - Ποτάμιες και χερσαίες αποθέσεις
	Qn, Ηφαιστειακά Τεταρτογενούς
	T, Τριτογενές
	TK, Τριτογενές - Κρητιδικό
	pC, Προκάμβριο



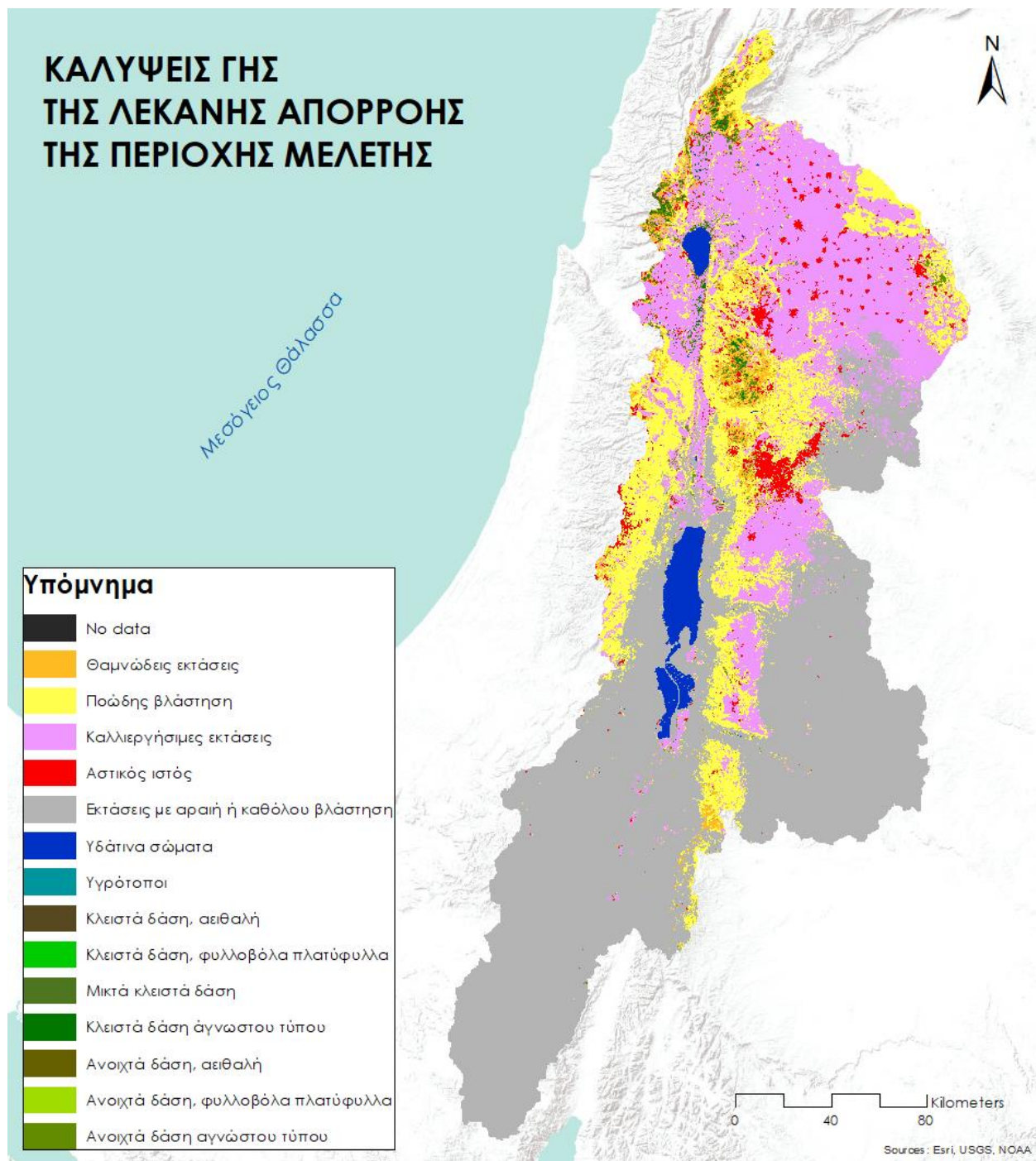
Χάρτης 3: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Γεωλογία	Ποσοστό (%)
Qv, Ηφαιστειακά Τεταρτογενούς	3,860%
QTv, Ηφαιστειακά Τεταρτογενούς - Τριτογενούς	15,165%
T, Τριτογενές	6,338%
Q, Τεταρτογενές	7,368%
Qf, Τεταρτογενές - Ποτάμιες και χερσαίες αποθέσεις	3,939%
K, Κρητιδικό	31,205%
J, Ιουρασικό	1,372%
TK, Τριτογενές - Κρητιδικό	19,995%
Υδάτινες επιφάνειες	2,425%
pC, Προκάμβριο	2,743%
Qe, Τεταρτογενές - Αιολικές αποθέσεις	0,269%
OCm, Ορδοβίκιο - Κάμβριο	1,745%
Cm, Κάμβριο	0,024%
QT, Τεταρτογενές - Τριτογενές	3,279%
MzPz, Μεσοζωικός - Παλαιοζωικός	0,273%

Πίνακας 12: Πίνακας με τα ποσοστά των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρατηρώντας τον παραπάνω γεωλογικό χάρτη και τον Πίνακα 12 , συμπεραίνεται ότι στην περιοχή μελέτης κυριαρχούν με 31% περίπου, οι γεωλογικοί σχηματισμοί ηλικίας Κρητιδικού που βρίσκονται κυρίως βορειοανατολικά, δυτικά και νοτιοδυτικά της λίμνης. Πιο συγκεκριμένα, συναντώνται κυρίως ιζηματογενή πετρώματα όπως θαλάσσιοι ασβεστόλιθοι (marine limestones), ψαμμίτες (sandstones), φωσφορίτες (phosphorites), μάργες (marls), δολομίτες (dolomites), σχιστάργιλοι (shales), γύψοι (gypsum) και κρητίδες (chalks). Ύστερα ακολουθούν οι σχηματισμοί του Τριτογενούς – Κρητιδικού με ποσοστό γύρω στο 20%, στους οποίους περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι, οι μάργες, οι σχιστάργιλοι, οι δολομίτες και οι κερατόλιθοι (cherts), ενώ συγκεντρώνονται κυρίως στα ανατολικά της λίμνης. Σημαντικά ποσοστά καταλαμβάνουν και τα ηφαιστειακά πετρώματα του Τεταρτογενούς – Τριτογενούς στα βόρεια

και βορειοανατολικά της λίμνης, με ποσοστό 15%, που περιλαμβάνουν αλκαλικό βασάλτη (basalt) κατά κύριο λόγο. Κατά μήκος της λίμνης συγκεντρώνονται ως επί το πλείστον ποτάμιες και χερσαίες αποθέσεις του Τεταρτογενούς καθώς και μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή (conglomerates), γύψοι, τραβερτίνες (travertines) και χάλικες (gravel). Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στα νοτιοανατολικά της λίμνης, όπου παρατηρούνται μεγάλα υψόμετρα, συγκεντρώνονται σχηματισμοί του Προκάμβριου, του Κάμβριου και του Ορδοβίκιου – Κάμβριου, που αποτελούνται από ψαμμίτες, βασικά κροκαλοπαγή, χαλαζιακούς ψαμμίτες (quartzose sandstones), γρανιτικά και μεταμορφωμένα πετρώματα. Από την άλλη, στα χαμηλά υψόμετρα, δηλαδή στις λεκάνες βόρεια και νότια της λίμνης, βρίσκονται κυριότερα σχηματισμοί του Τεταρτογενούς.



Χάρτης 4: Χάρτης καλύψεων γης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Καλύψεις γης	Ποσοστό (%)
Καλλιεργήσιμες εκτάσεις	24,1112%
Θαμνώδεις εκτάσεις	2,7467%
Ποώδης βλάστηση	16,6782%
Αστικός ιστός	2,5087%
Ανοιχτά δάση αγνώστου τύπου	1,2555%
Κλειστά δάση άγνωστου τύπου	0,2233%
Κλειστά δάση, αειθαλή	0,0552%
Ανοιχτά δάση, αειθαλή	0,0026%
Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση	49,9610%
Μικτά κλειστά δάση	0,0078%
Υδάτινα σώματα	2,4442%
Υγρότοποι	0,0040%
Κλειστά δάση, φυλλοβόλα πλατύφυλλα	0,0002%
Ανοιχτά δάση, φυλλοβόλα πλατύφυλλα	0,0011%

Πίνακας 13: Ποσοστά καλύψεων γης της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Σύμφωνα με τον χάρτη καλύψεων γης και τον Πίνακα (13), διαπιστώνεται ότι στην περιοχή μελέτης σχεδόν οι μισές αφορούν εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση και αυτό συμβαίνει εξαιτίας του εξαιρετικά ξηρού κλίματος που επικρατεί στην περιοχή. Ακολουθούν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις με ποσοστό 24%, οι οποίες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλά υψόμετρα, και η ποώδης βλάστηση με ποσοστό 17% περίπου, η οποία αποτελείται από χαμηλά φυτά και χερσότοπους. Από την άλλη, τα ανοικτά και κλειστά δάση, καθώς και οι θαμνώδεις εκτάσεις, βρίσκονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα.

Όσον αφορά το επίπεδο της στάθμης της λίμνης, η εξαγωγή του υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS με τις έξι εικόνες Landsat για τα έτη 1972 έως 2019. Το προβολικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το WGS 84 UTM 36N. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την αξιολόγηση της συρρίκνωσης της στάθμης της λίμνης κατά την περίοδο μελέτης με την μέθοδο της ψηφιοποίησης. Στους Χάρτες (5) και (6) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης για το πρώτο και το τελευταίο έτος μελέτης.

Έτος	Επίπεδο νερού (m)
1970	-396,35
1975	-398,21
1976	-398,95
1977	-399,66
1978	-400,19
1979	-400,99
1980	-400,31
1981	-400,34
1982	-401,2
1983	-401,75
1984	-402,86
1985	-403,45
1986	-404,41
1987	-405,02
1988	-405,55
1989	-406,59

1990	-407,39
1991	-408,28
1992	-407,28
1993	-407,48
1994	-408,32
1995	-408,94
1996	-409,96
1997	-410,73
1998	-411,79
1999	-412,87
2000	-414,13
2001	-415,17
2002	-416,07
2003	-416,54
2004	-417,4
2005	-418,24
2006	-419,37
2007	-420,47
2008	-421,86
2009	-423
2010	-423,83
2011	-425,08
2012	-426,58
2013	-427,57
2014	-428,6
2015	-429,54
2016	-430,79
2017	-432,08

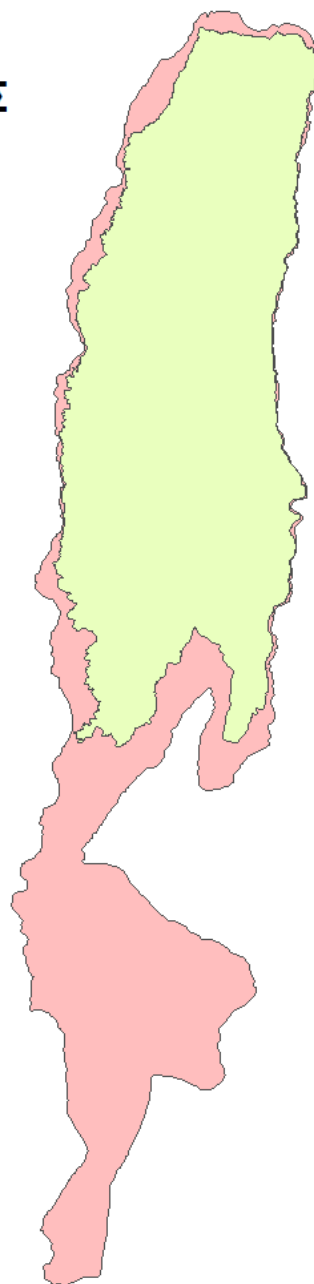
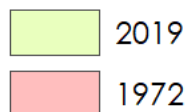
2018	-433,04
2019	-434,17

Πίνακας 14: Επίπεδα της στάθμης από το 1970-2019. (Πηγή: Israel Water Authority)

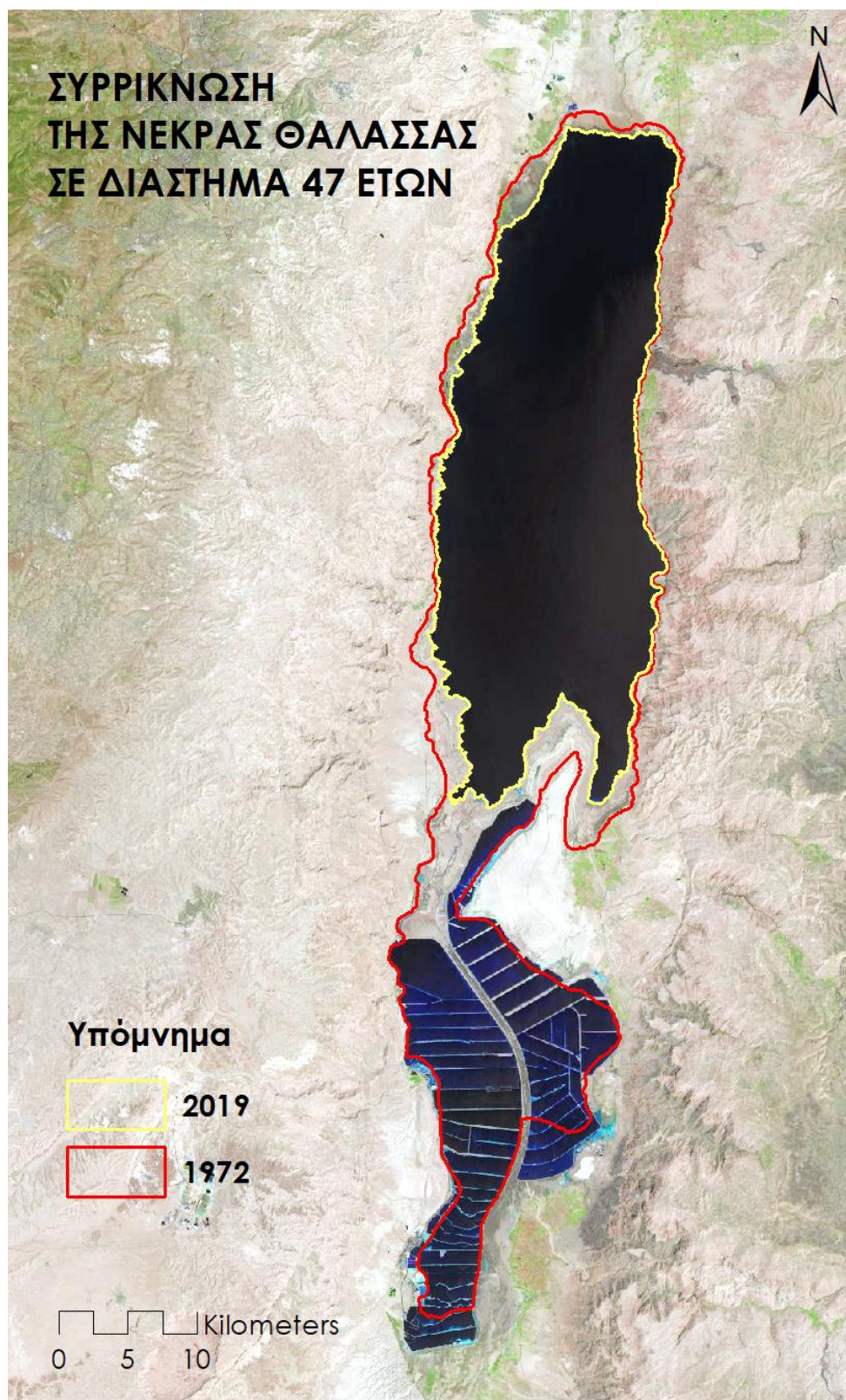
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ ΤΗΣ ΝΕΚΡΑΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 47 ΕΤΩΝ



Υπόμνημα



Χάρτης 5: Χάρτης που παρουσιάζει την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας σε διάστημα 47 ετών. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)



Χάρτης 6: Χάρτης που παρουσιάζει την συρρίκνωση της Νεκράς Θάλασσας σε διάστημα 47 ετών με υπόβαθρο έγχρωμη true color εικόνα του 2019. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

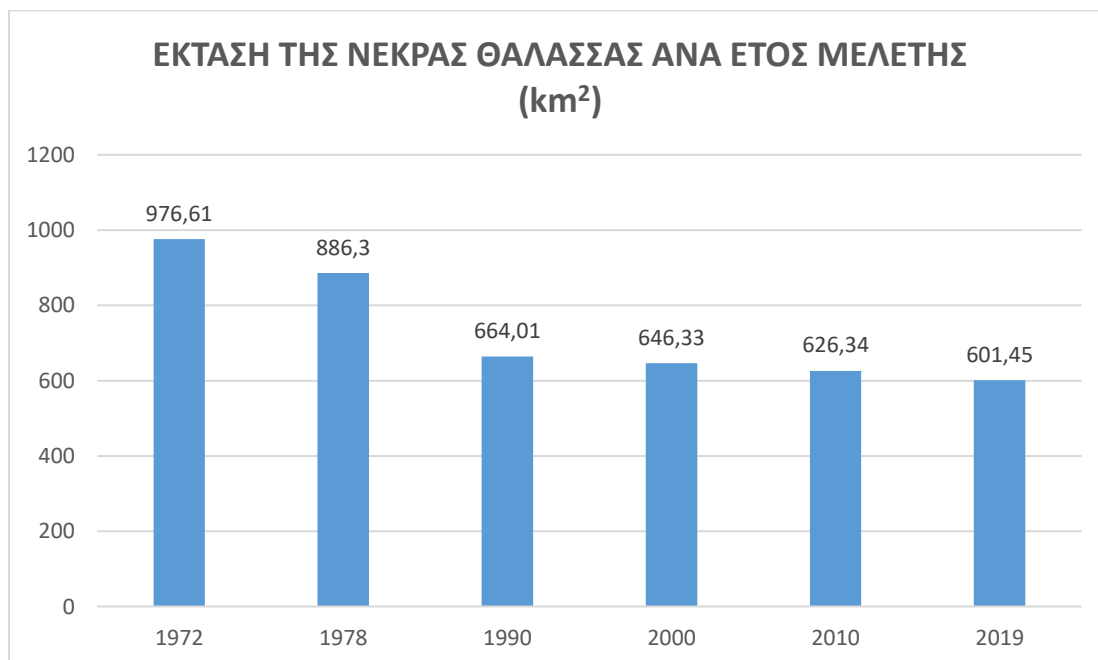
	1972	2019
Έκταση (km ²)	976,61	601,45

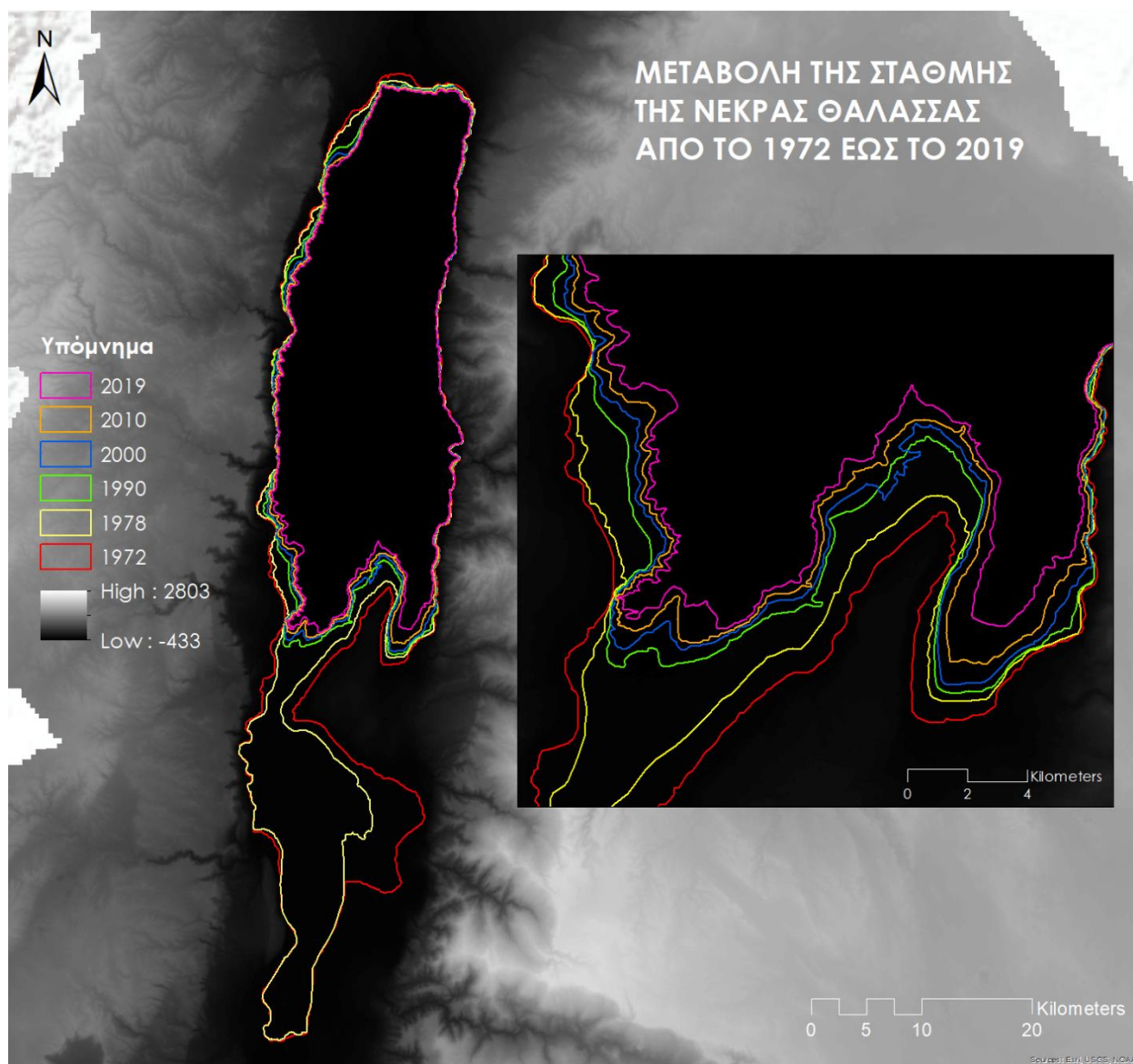
Πίνακας 15: Μεταβολή της έκτασης από το 1972-2019. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η έκταση κάθε πολυγώνου αντικατοπτρίζει την επιφάνεια της Νεκράς Θάλασσας το 1972 και το 2019, η οποία υπολογίστηκε στο πρόγραμμα ArcMap (Πίνακας 15). Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί το ποσοστό συρρίκνωσης της περιοχής μελέτης για τα δύο προαναφερθέντα έτη, το οποίο ανέρχεται στο 38,42% με μείωση της έκτασης κατά 375,16 km². Πιο συγκεκριμένα, μελετώντας μόνο τα έτη από το 1972 μέχρι το 1990 υπολογίζεται ότι η έκταση μειώθηκε κατά 312,6 km², δηλαδή 32% σε 18 χρόνια.

	1972	1978	1990	2000	2010	2019
Έκταση (km ²)	976,61	886,3	664,01	646,33	626,34	601,45

Πίνακας 16: Μεταβολή της έκτασης ανά έτος μελέτης. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)





Χάρτης 7: Χάρτης που παρουσιάζει το επίπεδο της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας από το 1972-2019 ανά δεκαετία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Αυτή η σημαντική συρρίκνωση σχετίζεται με τη μείωση των υδάτινων πόρων λόγω της εγκατάστασης πολλών φραγμάτων, της υπερεκμετάλλευσης των υδάτων της Νεκράς Θάλασσας και των κλιματικών αλλαγών. Βέβαια, για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα 29 χρόνων, δηλαδή από το 1990 μέχρι το 2019, παρατηρείται ότι η έκταση μειώθηκε κατά 62,56 km², που σε

ποσοστό αντιστοιχεί σε 9,42% συρρίκνωσης. Εάν εξεταστούν ξεχωριστά οι δεκαετίες, παρατηρώντας τον Πίνακα (17) μπορεί να διαπιστωθεί ότι η μεγαλύτερη μείωση της έκτασης σημειώθηκε την χρονική περίοδο από τα τέλη της δεκαετίας του 1978 μέχρι την δεκαετία του 1990, με συρρίκνωση 222,29 km², που ως ποσοστό ορίζεται γύρω στο 25%. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει κυρίως με την εκτοπή του ποταμού Yarmouk από τη Συρία και την Ιορδανία στο κανάλι King Abdullah.

Έτη	Απώλεια (km ²)	Απώλεια (%)
1972 - 1978	90,31	9,25
1978 - 1990	222,29	25,08
1990 - 2000	17,68	2,66
2000 - 2010	20	3,09
2010 - 2019	24,89	3,97

Πίνακας 17: Απώλειες εκτάσεων ανά δεκαετία. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Παρόλα αυτά φαίνεται ότι η στάθμη της λίμνης συνεχίζει να μειώνεται σταθερά κατά 1 m/έτος περίπου. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην υποχώρηση αυτή, είναι οι εξής:

- Η περιοχή της Νεκράς Θάλασσας βρίσκεται σε άνυδρο περιβάλλον, λαμβάνοντας μόνο 50 mm βροχής ανά έτος,
- Μείωση των υδάτινων πόρων που οφείλεται στην εγκατάσταση πολλών ταμιευτήρων που παρεμποδίζουν τα ύδατα να φτάσουν στην λεκάνη απορροής της λίμνης,
- Αύξηση του ποσοστού εκμετάλλευσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων για την κάλυψη των αυξανόμενων βιομηχανικών και γεωργικών αναγκών,
- Βιομηχανική εκμετάλλευση του νερού της Νεκρής Θάλασσας κυρίως για την παραγωγή ποτάσας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση της συρρίκνωσης της Νεκράς Θάλασσας και τη μείωση του επιπέδου της κατά την περίοδο 1972–2019 με την χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και άλλων βοηθητικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν τη μείωση της στάθμης της Νεκράς Θάλασσας και τη συρρίκνωσή της με την πάροδο του χρόνου. Μέσα σε 47 χρόνια, από το 1972 μέχρι το 2019, η στάθμη Νεκράς Θάλασσας έχει μειωθεί κατά 38 μέτρα και η έκτασή της κατά 375 km², που αντιστοιχεί σε 38% μείωσης από την αρχική έκταση. Την δεκαετία του 1970, εξαιτίας της εκτροπής του ποταμού Yarmouk, η έκταση μειώθηκε ραγδαία κατά 312 km² μέχρι την δεκαετία του 1990. Από το 1978, το θαλάσσιο σώμα μετατράπηκε σε δύο λεκάνες, την κύρια βόρεια που ήταν περίπου 886 km² με στάθμη νερού -400 m, και την ρηχή νότια όπου το μεγαλύτερο μέρος της χρησιμοποιείται για εξόρυξη άλατος. Μέχρι σήμερα, η στάθμη της Νεκράς Θάλασσας συνεχίζει να μειώνεται με ρυθμό 1 m/έτος και προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω στο μέλλον. Αυτή η μείωση της στάθμης του νερού οφείλεται στην υπερβολική εκμετάλλευση των υδάτων από τους κύριους παραποτάμους της για την κάλυψη βιομηχανικών και γεωργικών αναγκών, στο υπερβολικά ξηρό και άνυδρο περιβάλλον καθώς και στην εγκατάσταση πολλών ταμιευτήρων που παρεμποδίζουν τα ύδατα τα φτάσουν στην λεκάνη απορροής της λίμνης. Ως αποτέλεσμα, το νερό που εισρέει στη Νεκρά Θάλασσα είναι πλέον ελάχιστο και αδυνατεί να καλύψει τις απώλειες από την υψηλή εξάτμιση, που συνεχίζεται και είναι πολύ πιθανό να ενταθεί στο μέλλον, λόγω της αλλαγής του κλίματος. Μια πιθανή λύση για το πρόβλημα παρουσιάστηκε με ένα σχέδιο οικοδόμησης ενός αγωγού που θα μεταφέρει νερό από την Ερυθρά Θάλασσα στην Νεκρά Θάλασσα. Το Ισραήλ, η Ιορδανία και η Παλαιστίνη προχώρησαν σε μια συμφωνία για την εφαρμογή αυτού του σχεδίου, που συμπεριλαμβάνει και ένα σταθμό αφαλάτωσης στον κόλπο της Ακάμπα στην Ερυθρά Θάλασσα, ο οποίος μπορεί να μεταφέρει νερό ώστε να χρησιμοποιηθεί για τη γεωργία, ενώ η άλμη που απομένει από την επεξεργασία θα μεταφέρεται προς την Νεκρά Θάλασσα για να την εμπλουτίσει. Το σχέδιο αυτό, εισηγήθηκε το 2002, συμφωνήθηκε το 2013, αλλά φαίνεται ότι μέχρι και σήμερα η υλοποίηση του έργου δεν προχωράει, κυρίως από την πλευρά του Ισραήλ. Όμως, εάν δεν ληφθούν μέτρα και από τις δύο

πλευρές, το επίπεδο της Νεκράς Θάλασσας θα εξακολουθεί να μειώνεται, ο σχηματισμός καταβοθρών θα συνεχιστεί, γεγονότα που θα προκαλέσουν μια περιβαλλοντική καταστροφή στο οικοσύστημα και το περιβάλλον της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Abelson, M., Aksinenko, T., Kurzon, I., Pinsky, V., Baer, G., Nof, R., & Yechieli, Y. (2018). Nanoseismicity forecasts sinkhole collapse in the Dead Sea coast years in advance. *Geology*, 46(1), 83-86.

Abelson, M., Baer, G., Shtivelman, V., Wachs, D., Raz, E., Crouvi, O., Kurzon, I. & Yechieli, Y. (2003). Collapse-sinkholes and radar interferometry reveal neotectonics concealed within the Dead Sea basin. *Geophysical Research Letters*, 30(10).

Abelson, M., Baer, G., Yechieli, Y. (2017). *Susceptibility Assessment for Development of Sinkholes along the Western Coast of the Dead Sea—2017 Update*, Geological Survey of Israel: Jerusalem, Israel.

Alhusban, Y., & Almanasyeh, N. (2017). Accounting for Level Decline in the Dead Sea: Land Use and Land Cover Changes, 1984–2015. *The Arab World Geographer*, 20(4), 317-329.

Allan, J. A., Malkawi, A. I. H., & Tsur, Y. (2012). Red Sea–Dead Sea water conveyance study program. Study of alternatives. Preliminary draft report.

Al-Mashagbah, A. F. (2015). Assessment of surface water quality of king abdullah canal, using physico-chemical characteristics and water quality index, Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(04), 339.

Alpert, P., Shafir, H., & Issahary, D. (1997). Recent changes in the climate of the Dead Sea Valley. *Climatic Change*, 7, 1-25.

Arkin, Y., & Gilat, A. (2000). Dead Sea sinkholes—an ever-developing hazard. *Environmental Geology*, 39(7), 711-722.

Asmar, B. N. (2003). The science and politics of the Dead Sea: Red Sea canal or pipeline. *The Journal of Environment & Development*, 12(3), 325-339.

Asmar, B. N., & Ergenzinger, P. (2002). Long-term prediction of the water level and salinity in the Dead Sea. *Hydrological processes*, 16(14), 2819-2831.

Avni, Y., Lensky, N., Dente, E., Shviro, M., Arav, R., Gavrieli, I., Yechieli, Y., Abelson, M., Lutzky, H., Filin, S., Baer, G., & Haviv, I. (2016). Self-accelerated development of salt karst during flash floods along the Dead Sea Coast, Israel. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(1), 17-38.

Baer, G., Magen, Y., Nof, R. N., Raz, E., Lyakhovsky, V., & Shalev, E. (2018). InSAR measurements and viscoelastic modeling of sinkhole precursory subsidence: Implications for sinkhole formation, early warning, and sediment properties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 678-693.

Bartov, Y., Agnon, A., Enzel, Y., & Stein, M. (2006). Late Quaternary faulting and subsidence in the central Dead Sea basin. *Israel Journal of Earth Sciences*, 55(1).

Bartov, Y., Enzel, Y., Porat, N., & Stein, M. (2007). Evolution of the Late Pleistocene–Holocene Dead Sea basin from sequence stratigraphy of fan deltas and lake-level reconstruction. *Journal of Sedimentary Research*, 77(9), 680-692.

Ben-Avraham, Z., & Ten Brink, U. (1989). Transverse faults and segmentation of basins within the Dead Sea Rift. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 8(2-4), 603-616.

Ben-Avraham, Z., Garfunkel, Z., & Lazar, M. (2008). Geology and evolution of the southern Dead Sea fault with emphasis on subsurface structure. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 36, 357-387.

Ben-Yaakov, S., & Sass, E. (1977). Independent estimate of the pH of Dead Sea brine. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 374-376.

Beyth, M., Gavrieli, I., Anati, D., & Katz, O. (1993). Effects of the December 1911-May 1992 floods on the Dead Sea vertical structure. *Israel Journal of Earth-Sciences*, 42(1), 45-48.

Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., Lesiv, M., Tsendbazar, N. E., Herold, M., & Fritz, S. (2019). Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Epoch 2015: Globe. *Version V2. 0.2*.

Burrouh, P. A. (1986). Principles of geographical information systems for land resource assessment. Oxford: Claredon Press.

- Choi, S., Götze, H. J., Meyer, U., & DESIRE Group. (2011). 3-D density modelling of underground structures and spatial distribution of salt diapirism in the Dead Sea Basin. *Geophysical Journal International*, 184(3), 1131-1146.
- Closson, D., & Abou Karaki, N. (2009). Human-induced geological hazards along the Dead Sea coast. *Environmental Geology*, 58(2), 371-380.
- Enzel, Y., Agnon, A., & Stein, M. (2004). Late Holocene lake levels of the Dead Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5-6), 555-571.
- Ezersky, M. (2005). The seismic velocities of Dead Sea salt applied to the sinkhole problem. *Journal of Applied Geophysics*, 58(1), 45-58.
- Ezersky, M. G., Legchenko, A., Eppelbaum, L., & Al-Zoubi, A. (2017). Overview of the geophysical studies in the Dead Sea coastal area related to evaporite karst and recent sinkhole development. *International Journal of Speleology*, 46(2), 12.
- Frumkin, A., & Raz, E. (2001). Collapse and subsidence associated with salt karstification along the Dead Sea. *Carbonates and Evaporites*, 16(2), 117-130.
- Gardosh, M., Reches, Z. E., & Garfunkel, Z. (1990). Holocene tectonic deformation along the western margins of the Dead Sea. *Tectonophysics*, 180(1), 123-137.
- Garfunkel, Z. (1981). Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics*, 80(1-4), 81-108.
- Garfunkel, Z. (1989). Tectonic setting of phanerozoic magmatism in Israel. *Israel journal of earth-sciences*, 38(2-4), 51-74.
- Garfunkel, Z. (1996). The history and formation of the Dead Sea basin. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 36(1), 36-56.
- Garfunkel, Z., & Ben-Avraham, Z. (1996). The structure of the Dead Sea basin. *Tectonophysics*, 266(1-4), 155-176.

- Garfunkel, Z., & Ben-Avraham, Z. (2001). Basins along the Dead Sea transform. *Mémoires du Muséum national d'histoire naturelle (1993)*, 186, 607-627.
- Gertman I. (2012) Dead Sea. In: Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge R.W. (eds) Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht
- Gertman, I., & Hecht, A. (2002). The Dead Sea hydrography from 1992 to 2000. *Journal of marine systems*, 35(3-4), 169-181.
- Ghazleh, S. A., Abed, A. M., & Kempe, S. (2010). The dramatic drop of the Dead Sea: Background, rates, impacts and solutions. In *Macro-engineering Seawater in Unique Environments*. 77-105. Berlin: Springer.
- Ghazleh, S. A., Hartmann, J., Jansen, N., & Kempe, S. (2009). Water input requirements of the rapidly shrinking Dead Sea. *Naturwissenschaften*, 96(5), 637-643.
- Ginzburg, A., & Ben-Avraham, Z. (1997). A seismic refraction study of the north basin of the Dead Sea, Israel. *Geophysical Research Letters*, 24(16), 2063-2066.
- Greenbaum, N., Ben-Zvi, A., Haviv, I., & Enzel, Y. (2006). The hydrology and paleohydrology of the Dead Sea tributaries. *Special Papers-Geological Society of America*, 401, 63.
- Hecht, A., & Gertman, I. (2003). Dead Sea meteorological climate. *Fungal life in the Dead Sea*, 68-114.
- Hofstetter, R., Gitterman, Y., Pinsky, V., Kraeva, N., & Feldman, L. (2008). Seismological observations of the northern Dead Sea basin earthquake on 11 February 2004 and its associated activity. *Isr. J. Earth Sci*, 57, 101-124.
- Horowitz, A. (1987). Palynological evidence for the age and rate of sedimentation along the Dead Sea Rift, and structural implications. *Tectonophysics*, 141(1-3), 107-115.
- Ilani, S., Harlavan, Y., Tarawneh, K., Rabba, I., Weinberger, R., Ibrahim, K., Peltz, S., & Steinitz, G. (2001). New K-Ar ages of basalts from the Harrat Ash Shaam volcanic field in Jordan: Implications for the span and duration of the upper-mantle upwelling beneath the western Arabian plate. *Geology*, 29(2), 171-174.

- Jackson, M., & Hudec, M. (2017). Strike-Slip Salt-Tectonic Systems. In *Salt Tectonics: Principles and Practice*. 336-362. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kafri, U., & Ecker, A. (1964). *Neogene and Quaternary subsurface geology and hydrogeology of the Zevulun Plain*. Ministry of Development, Geological Survey.
- Kafri, U., & Yechieli, Y. (2010). Current continental base-levels below sea level, located close to the sea. In *Groundwater Base Level Changes and Adjoining Hydrological Systems*. 119-165. Berlin: Springer.
- Katz, A., Kolodny, Y., & Nissenbaum, A. (1977). The geochemical evolution of the Pleistocene Lake Lisan-Dead sea system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(11), 1609-1626.
- Keller, E., & Pinter, N. (1996). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Princeton Hall.
- Larsen, B. D., Ben-Avraham, Z., & Shulman, H. (2002). Fault and salt tectonics in the southern Dead Sea basin. *Tectonophysics*, 346(1-2), 71-90.
- Larsen, B. D., Ben-Avraham, Z., & Shulman, H. (2002). Fault and salt tectonics in the southern Dead Sea basin. *Tectonophysics*, 346(1-2), 71-90.
- Lensky, N. G., Dvorkin, Y., Lyakhovsky, V., Gertman, I., & Gavrieli, I. (2005). Water, salt, and energy balances of the Dead Sea. *Water Resources Research*, 41(12).
- Lensky, N., & Dente, E. (2015). *The causes for the accelerated dead sea level decline in the last decades* (p. 25). Report GSI/16/2015. Geological Survey of Israel, Jerusalem.
- Marco, S., Agnon, A., Ellenblum, R., Eidelman, A., Basson, U., & Boas, A. (1997). 817-year-old walls offset sinistrally 2.1 m by the Dead Sea Transform, Israel. *Journal of Geodynamics*, 24(1-4), 11-20.
- Mouty, M., Delaloye, M., Fontignie, D., Piskin, O., & Wagner, J. J. (1992). The volcanic activity in Syria and Lebanon between Jurassic and Actual. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 72(1), 91-105.

- Neev, D., & Hall, J. K. (1979). Geophysical investigations in the Dead Sea. *Sedimentary Geology*, 23(1-4), 209-238.
- Niemi, T. M., & Ben-Avraham, Z. (1994). Evidence for Jericho earthquakes from slumped sediments of the Jordan River delta in the Dead Sea. *Geology*, 22(5), 395-398.
- Nof, R. N., Abelson, M., Raz, E., Magen, Y., Atzori, S., Salvi, S., & Baer, G. (2019). SAR interferometry for sinkhole early warning and susceptibility assessment along the Dead Sea, Israel. *Remote Sensing*, 11(1), 89.
- Quennell, A.M., (1958). The structure and geomorphic evolution of the Dead Sea Rift. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 114, 2-24.
- Reches, Z. E., & Hoexter, D. F. (1981). Holocene seismic and tectonic activity in the Dead Sea area. *Tectonophysics*, 80(1-4), 235-254.
- Ronen, A., Ezersky, M., Beck, A., Gatenio, B., & Simhayov, R. B. (2019). Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*, 328, 28-43.
- Saab, M. A. (2010). Environmental impacts on the Dead Sea, sustainability cost estimates. *Environmental economics*, (1, Iss. 1), 113-124.
- Sagy, A., Reches, Z. E., & Agnon, A. (2003). Hierarchic three-dimensional structure and slip partitioning in the western Dead Sea pull-apart. *Tectonics*, 22(1).
- Salem, H. S. (2009). The Red Sea-Dead Sea Conveyance (RSDSC) Project: A solution for some problems or a cause for many problems?, *Messerschmid, Clemens; El-Jazairi, Lara, Khatib, Imad*, 3, 300-366.
- Salem, H. S. (2020). Multi-and inter-disciplinary approaches towards understanding the sinkholes' phenomenon in the Dead Sea Basin. *SN Applied Sciences*, 2(4), 1-26.
- Sawarieh, A., Al Adas, A., Al Bashish, A., & Al Seba'i, E. (2000). Sinkholes Phenomena At Ghor Al Haditha Area—Internal Report No. 12. *Amman, Jordan*.

- Shalev, E., & Lyakhovsky, V. (2012). Viscoelastic damage modeling of sinkhole formation. *Journal of Structural Geology*, 42, 163-170.
- Shapira, A., Avni, R., & Nur, A. (1993). A new estimate for the epicenter of the Jericho earthquake of 11 July 1927. *Isr. J. Earth Sci*, 42(2), 93-96.
- Smit, J., Brun, J. P., Fort, X., Cloetingh, S., & Ben-Avraham, Z. (2008). Salt tectonics in pull-apart basins with application to the Dead Sea Basin. *Tectonophysics*, 449(1-4), 1-16.
- Starinsky, A. (1974). *Relationship between Ca-chloride brines and sedimentary rocks in Israel*, Ph.D. Thesis, Hebrew University.
- Stein, M. (2001). The sedimentary and geochemical record of Neogene-Quaternary water bodies in the Dead Sea Basin-inferences for the regional paleoclimatic history. *Journal of Paleolimnology*, 26(3), 271-282.
- Stein, M. (2003). The limnological history of late Pleistocene–Holocene water bodies in the Dead Sea basin.
- Steinhorn, I. L. A. N. A. (1997). Evaporation estimate for the Dead Sea: Essential considerations for saline lakes. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 36, 122-132.
- Steinitz, G., & Bartov, Y. (1992). The Miocene-Pleistocene history of the Dead Sea segment of the Rift in light of K-Ar ages of basalts. *Israel Journal of Earth-Sciences*, 38(2-4), 199-208.
- Sztankeler, V., Meir, I. A., & Schwartz, M. (2012). Physical Development in an Ecologically Sensitive Area: The Planning of the Dead Sea Region. In *Geography Research Forum* (Vol. 32, pp. 119-145).
- TAHAL Group. (2011). Red Sea-Dead Sea Water Conveyance Study Program. *Dead Sea Study, Final Report, GSI Report Number: GSI/10*.
- ten Brink, U. S., & Ben-Avraham, Z. (1989). The anatomy of a pull-apart basin: Seismic reflection observations of the Dead Sea Basin. *Tectonics*, 8(2), 333-350.

- Torfstein, A., Haase-Schramm, A., Waldmann, N., Kolodny, Y., & Stein, M. (2009). U-series and oxygen isotope chronology of the mid-Pleistocene Lake Amora (Dead Sea basin). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(9), 2603-2630.
- Waldmann, N., Stein, M., Ariztegui, D., & Starinsky, A. (2009). Stratigraphy, depositional environments and level reconstruction of the last interglacial Lake Samra in the Dead Sea basin. *Quaternary Research*, 72(1), 1-15.
- Wendt, J. A. (2016). Tourism development challenges on the Dead Sea shore. *Limnological Review*, 16(2), 105-112.
- Yechieli, Y. (2000). Fresh-saline ground water interface in the western Dead Sea area. *Ground water*, 38(4), 615.
- Yechieli, Y., Abelson, M., & Baer, G. (2016). Sinkhole formation and subsidence along the Dead Sea coast, Israel. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 601-612.
- Yechieli, Y., Abelson, M., Bein, A., Crouvi, O., & Shtivelman, V. (2006). Sinkhole “swarms” along the Dead Sea coast: reflection of disturbance of lake and adjacent groundwater systems. *Geological Society of America Bulletin*, 118(9-10), 1075-1087.
- Yechieli, Y., Gavrieli, I., Berkowitz, B., & Ronen, D. (1998). Will the Dead Sea die?. *Geology*, 26(8), 755-758.
- Zak, I. (1967). *The geology of Mount Sedom*, Ph.D. Thesis, Hebrew University.

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Κουτσόπουλος, Κ. (2002). *Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Λέκκας, Σ. Π., Λόζιος, Σ. Γ., & Σκούρτσος, Ε. Ν. (2006). *Εισαγωγή στη Γεωδυναμική*. Τομέας Δυναμικής-Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Περιβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Χαλκιάς, Χ. (2006). *Όροι & έννοιες Επιστήμης Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

EcoPeece Middle East, Red Dead Canal, στον δικτυακό τόπο:

<https://ecopeaceme.org/projects/dead-sea/red-dead-canal/>, [πρόσβαση 13/4/2020].

GeoHack - Dead Sea, στον δικτυακό τόπο:

https://tools.wmflabs.org/geohack/geohack.php?pagename=Dead_Sea¶ms=31_30_N_35_30_E_type:waterbody, [πρόσβαση 13/2/2020].

Poindexter, G. (2016), “Red-Dead project in the Middle East will include hydropower”, στον

δικτυακό τόπο: <https://www.hydroreview.com/2016/12/07/red-dead-project-in-the-middle-east-will-include-hydropower/>, [πρόσβαση 12/4/2020].

Projected CRS used in World - N hemisphere - 30°E to 36°E - by country, στον δικτυακό τόπο:

https://georepository.com/crs_32636/WGS-84-UTM-zone-36N.html, [πρόσβαση 30/5/2020].

Surkes, S. (2019), “Sinking Israel-Jordan relations leave Dead Sea, a natural wonder, low and dry”,

στον δικτυακό τόπο: <https://www.timesofisrael.com/sinking-israel-jordan-relations-leave-dead-sea-a-natural-wonder-low-and-dry/>, [πρόσβαση 12/4/2020].

The Dead River? How the waters of the Jordan run foul, στον δικτυακό τόπο:

<https://www.middleeasteye.net/opinion/dead-river-how-waters-jordan-run-foul>, [πρόσβαση 10/7/2020].

U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data, στον δικτυακό τόπο:

<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, [πρόσβαση 5/3/2020].

USGS, Landsat Missions, στον δικτυακό τόπο: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>,

[πρόσβαση 15/2/2020].

USGS, What are the band designations for the Landsat satellites?, στον δικτυακό τόπο: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products, [πρόσβαση 19/5/2020].

ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Global Corine Land Cover, στον δικτυακό τόπο: <https://land.copernicus.eu/global/products/lc>

HydroSHEDS, στον δικτυακό τόπο: <https://www.hydrosheds.org/downloads>

The World Bank Group, 2020, International tourism, number of arrivals 1995–2018: Jordan, στον δικτυακό τόπο:

<https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=ST.INT.ARVL#>

The World Bank Group, International tourism, number of arrivals 1995–2018: Israel, στον δικτυακό τόπο: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=ST.INT.ARVL#>

USGS EarthExplorer, στον δικτυακό τόπο: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

World Geologic Maps, στον δικτυακό τόπο: <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-maps/>