

**התאמת תוכנות להדמיית צונאמי ויצירת מגוון
תרחישים לצורך התרעה מוקדמת מצונאמי בישראל**
**Tsunami models adaptation and various scenarios
simulations to aid early tsunami warning for Israel**

דו"ח סופי FINAL REPORT

ברק גלנטי¹, דב ס' רוזן¹, עמוס סלמון²

¹ חקר ימים ואגמים לישראל, חיפה

² המכון הגיאולוגי, ירושלים

PUBLICATION DOCUMENTATION PAGE

1. Publication No. ES-67A-2008	2.	3. Recipient Accession No.
4. Title and Subtitle Tsunami models adaptation and various scenarios simulations to aid early tsunami warning for Israel.	5. Publication Date 30 April 2009	
	6. Performing Organiz. Code IOLR Report H45/2009	
7. Author (s) Barak Galanti, Dov S. Rosen, Amos Salamon	8. Performing Organiz. Rep. No. GSI Report TR-GSI/23/2009	
9. Performing Organization Name and Address: Israel Oceanographic & Limnological Research, Tel Shikmona, POB 8030, Haifa 31080 Geological Survey of Israel, 30 Malkhe Israel St., Jerusalem 95501	10. Project/ Task / Work Unit No.	
	11. Contract No. 27-17-071	
12. Sponsoring Organization (s) Name and Address (a) The Ministry Of National Infrastructures P.O.B. Box 13106, 91130 Jerusalem	13. Type of report and period covered <p style="text-align: center;">Final Report</p>	
	14. Sponsoring Organiz. Code	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract (Limit 200 Words) This report presents the selection of a leading, state of the art, tsunami model (GeoClaw) among available models and its adaptation to study the impact of tsunami waves generation, propagation and inundation at the Mediterranean coast of Israel. The tsunami model was used to simulate several worst case tsunami scenarios resulting from both earthquakes and submarine landslides, based on high resolution digital bathymetric and topographic model. The study outcome presents novel results which are accompanied by digital visual animations. They show larger inundations and maximum tsunami runup heights than those presented in older studies using less accurate bathymetric/topographic data, but the scenarios simulated were not identical with those of the older studies. The computed high resolution tsunami scenarios, are considered as the first step in the preparation of a tsunami scenarios data bank for the Israeli coast, which will enable early tsunami warning using the tsunami alerts to be sent by the ICG/NEAMTWS regional alert centers of IOC/UNESCO.		
17. Keywords Tsunami, earthquake, submarine landslide, numerical models, tsunami propagation, tsunami runup, tsunami inundation, tsunami scenario, Boussinesq, GeoClaw, Israel		
18. Availability Statement Unrestricted	19. Security Class (This Report)	20. Security Class (This Page)
	21. No. of Pages 19	22. Price



התאמת תוכנות להדמיית צונאמי ויצירת מגוון
תרחישים לצורך התרעה מוקדמת מצונאמי בישראל

דו"ח סופי

ע"י ברק גלנטי, דב ס' רוזן, עמוס סלמון

דו"ח חיא"ל מס' H45/2009

אפריל 2009

תל שקמונה, חיפה

דו"חות חיא"ל

I O L R REPORTS





חקר ימים ואגמים לישראל

המכון הלאומי לאוקיאנוגרפיה

התאמת תוכנות להדמיית צונאמי ויצירת מגוון
תרחישים לצורך התרעה מוקדמת מצונאמי בישראל

דו"ח סופי

ברק גלנטי¹, דב ס' רוזן¹ ועמוס סלמון²

דו"ח חיא"ל מס' H45/2009

30 באפריל 2009

¹- חיא"ל, תל שקמונה, חיפה

²- המכון הגיאולוגי, ירושלים

GSI Report TR-GSI/23/2009

המכון הגיאולוגי



משרד התשתיות הלאומיות



תקציר מנהלים

1. רקע

המחקר הנוכחי נערך במסגרת הערכת הסיכון לצונאמי בישראל ובהתאם להחלטת העצרת הכללית של הוועדה הבינממשלתית לאוקיאנוגרפיה (IOC) של UNESCO, על הקמת מערכת התרעה מוקדמת לצונאמי בצפון-מזרח האוקיאנוס האטלנטי, בים התיכון ובימים המקושרים אליו (ICG/NEAMTWS). מערכת ההתרעה לצונאמי תתבסס על מערך ניטור רעידות אדמה ומערכת אימות להיווצרות גלי צונאמי שתתבסס בעיקר על ניטור מפלס הים בזמן אמת. אולם היכולת לצפות היכן יפגע הצונאמי ובאיזו עוצמה מוגבלת עדיין, מאחר וזמן הגעתו של הצונאמי לחופי ישראל קטן מהזמן הנדרש לחישוב מפורט של תרחיש נתון. על כן יש צורך בהכנה מוקדמת של בנק תרחישים מגוון, כך שבמקרה של אירוע אמת וקבלת התרעה מאת מרכזי ההתרעה האזוריים וואו מרכז ההתרעה הלאומי, ניתן יהיה 'לשלוף' באופן מיידי וממוחשב מתוך בנק התרחישים את אלה המתאימים ביותר לאירוע האמת תוך כדי התרחשותו.

מכאן הצורך לבנות יכולת מקומית בארץ לדימוי ממוחשב של תרחישי צונאמי. יתר על כן, חשוב שהדימוי יסתמך על מודל גובה של אזור החוף ומודל בתימטרי של קרקעית הים מפורטים ומדויקים ככל האפשר, ואולם מודלים אלה מוגבלים לשימוש ישראלי פנימי בלבד.

המחקר הנוכחי התבצע בשיתוף פעולה בין חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) לבין המכון הגיאולוגי (הסכם מספר 28-06-027 מרכבה 277062) במימון קרן המחקרים של משרד התשתיות הלאומיות (תש"ל) והשלמות שנדרשו ביוזמתה של חיא"ל.

2. תאור העבודה

בתחילה נסקר מגוון רחב של תוכנות עדכניות להדמיה של היווצרות והתפשטות גלי צונאמי, ונבחרה התוכנה המתאימה ביותר מבחינת יכולותיה, אמינותה ואפשרות קליטתה בישראל. בסופו של התהליך נבחרה התוכנה GeoClaw והיא הותאמה לצורך הרצת תרחישי צונאמי בחיא"ל, לרבות פיתוח כלים משלימים על פי הצורך, הצגה גרפית וניתוח של התוצאות. בוצעו מספר הרצות של דוגמאות המסופקות עם התוכנות ונבדקו יכולותיה, אמינותה, ורמת הדוקומנטציה הנלווית אליה. במקביל נאספו והוכנו נתוני בתימטריה וטופוגרפיה של מדרון היבשת והחוף של מדינת ישראל ברזולוציה גבוהה והוכנו סריגים משולבים (nested) לצורך הרצת התרחישים לפורמט הנדרש על ידי התוכנה שנבחרה, לרבות תפירת סריגים ברזולוציות שונות. בנוסף, הוגדרו המקורות העיקריים להיווצרות גלי צונאמי באזור האגן המזרחי של הים התיכון ועל פיהם הוגדרו התרחישים בעלי סבירות גבוהה ליצירת גלי צונאמי ואפיון כמותי של כל אחד מהם כבסיס להרצת התרחיש.

לאחר מכן, נערכו הרצות ניסיוניות של מספר תרחישי צונאמי ברזולוציה נמוכה, כולל הפקת מפות של האזורים המועדים להצפה, כדי ללמוד את התנהגות התוכנה, לבצע ניתוח ראשוני של התוצאות שהתקבלו, ולהעריך את טיב החישובים. בהמשך נערכו הרצות מלאות של כמה תרחישים מייצגים על גבי שריג העומקים והגבהים המפורט ונתקבל מידע מלא לגביהם. הממצאים מסוכמים בדו"ח הנוכחי.

3. ממצאים

3א. ממצאים לגבי צונאמי ע"י גלישות

- במחקר שבוצע נעשה ניסיון ראשוני לבחון השפעה פרמטרית על היווצרות הצונאמי מגלישות ולאפשר מתן יכולת התקדמות בכיווני חקירה מתאימים בהמשך.
- בשתי ההרצות של צונאמי מגלישה תת-ימית ליד תל אביב (LS-TLV1 ו-LS-TLV2), נבחנו מהירויות גלישה שונות כאשר כל שאר המאפיינים של גיאומטרית הגלישה (מיקום ומימדים) נותרו קבועים. במקרה השני (חיפה), השינוי התבטא בנפח הגלישה, בעוד שמיקום ומהירות הגלישה נותרו קבועים. כאשר משווים את שתי הגלישות ליד תל אביב (LS-TLV1,2) בהן מהירות הגלישה הממוצעת גדלה מ-25 מ'ש' ל-50 מ'ש', מוצאים ששטחי ההצפה, הנסיגה וגובה הגלים על קו החוף עבור הגלישה השנייה עולים במעט על אלו של הראשונה. מצד שני אין לשינוי זה השפעה על זמן המופע של הגל בחוף, מה שמצביע על כך שזמן המחזור של הגל הנוצר זהה כמעט בשני המקרים.
- אמנם בהשוואת הגלישות מול ת"א לעומת אלה מול חיפה לא הייתה זהות מוחלטת בפרמטרים הקובעים, אך עדיין אפשר לראות את שתי הגלישות מול חיפה כנגד אלה שמול ת"א כדי דומות,

כיוון שבכל המקרים מרחק הגלישה מהחוף הינו בסדר גודל של כ- 10 ק"מ ומרווח הגובה האנכי של התמוטטות הגלישה הוא כ- 700 מ' ובנוסף לכך, כפי שהראינו מקודם שטחי הביקורת דומים.

- השוואת שתי הגלישות באזור חיפה, LS-HAI1 ו-LS-HAI2, הראתה שהגדלת נפח החומר הגולש (מ- 0.625 ק"מ^3 ל- 1.6 ק"מ^3) גורמת להגדלה ניכרת בשטחי ההצפה והחשיפה של קרקעית הים בעת השפילה של הגל, במיוחד באזור חיפה, מול אזור הגלישה. בנוסף, זמן הופעת הגלים בחופי חיפה מתקצר במעט במקרה של LS-HAI2.
- תוצאה מעניינת התקבלה בהשוואת גובהי ההצפה המתקבלים באזורי ת"א וחיפה. ניתן היה לצפות כי בכל המקרים הגלים הגבוהים ביותר יתקבלו באזור הקרוב למיקום הגלישה, היות ופחות אנרגיה מתבזבזת בחיכוך עם הקרקעית ובתוך הזורם עצמו על מנת להגיע לחוף. אולם, הסתבר שהגלים המרביים שהתקבלו באזור תל אביב כתוצאה מהגלישה באזור חיפה, היו גדולים הרבה יותר מהגלים שהתקבלו באזור חיפה כתוצאה מגלישת באזור תל אביב (הדבר נכון לכל המקרים שנבדקו). יתכן שהשוני נובע מתצורת החוף והבתימטריה, כאשר הגלישה באזור חיפה מלווה באפקט הגברה ע"י גלי פיזור משניים הנוצרים ע"י ראש הכרמל, בשעה שהגלישה באזור תל אביב מלווה באפקט הקטנה של גובה הגלים בחיפה, בגלל אותה תופעת פיזור גלים מראש הכרמל.
- בנוסף, נצפתה גם היווצרות של גלי פיזור משניים וכן החזרות גלים מכיוון ראש עכו.
- עבור גלישות קורות בדרך כלל בקרבת קצה מדרון מדף היבשת, היווצרות הגלים נמשכה זמן רב (מספר דקות), בהתאם לזמן התנועה של החומר הגולש במדרון. נמצא כי עוצמת מקור הצונאמי תלויה בעיקר בנפח החומר הגולש ובקצב גלישתו אך גם בתלילות מדרון הגלישה, סוג החומר הגולש, מרחק התנועה של הגלישה במדרון, כמו גם בעומק המים בו מתחילה הגלישה.
- כיוון שהגוש הגולש בהידרדרותו יוצר גלים (בדומה לרעידת אדמה), ומשך הגלישה ארוך יחסית, נצפתה יצירת מערכת מרובת גלים (במספר הגדול ביותר מסדר גודל אחד בהשוואה למקרה של רעידת-אדמה). השילוב של תנועת המקור במורד המדרון יחד עם הופעת גלים בקצב מחזורי יוצר גל שצורתו דומה לספיראלה.
- חזית הגל הראשון הפוגע בחוף יכולה להיות מעל או מתחת לרום פני הים במנוחה. הדבר תלוי במספר גורמים הקשורים בתהליך הגלישה, כמו, מהירות הגלישה ומיקומה, צורת הבתימטריה באזור הגלישה ועומק המים בו מתחילה הגלישה. רק כאשר הגלישה מתרחשת בתנאים מיוחדים בהם מישור הגלישה אחיד ומהירות החבורה של הגלים הנוצרים נמוכה ממהירות הגוש הגולש, חזית הגל הפוגע ראשון תהיה בצידו המשתפל (מתחת לפני הים). ההסבר לכך הוא שמנגנון הגלישה יוצר תת-לחץ בצד של עקבת הגלישה וזה שגורם לחזית הגל להיות מתחת לפני המים.
- בשל העובדה שהמקור נע לעומק הים, גם מהירות הגלים גוברת בהתאם, ולכן גלים מאוחרים יכולים להשיג את אלו שנוצרו בתחילת האירוע. ואכן ניתן היה לראות התכנסות של גלים ליצירת גל חד אחד כמו בתופעה של גלי הים.
- יצוין שהגלישות קורות על שטח אדמה קטן, שהוא בד"כ קטן ביותר מסדר גודל אחד, מזה של רעידת אדמה. עובדה זו עושה את תופעת הצונאמי עקב גלישות יותר ממוקדת ומקומית בשלב הפגיעה בחוף.
- צונאמי עקב גלישה מתבטא בדיספרסיה רבה ואפשר היה לראות זאת בהדמיות שנעשו בשני המקרים באזור המרכז ובאזור חיפה. בשניהם (ת"א, חיפה) מורגשים הגלים המתפשטים באזור ה"נגדי". דהיינו במקרה של מקור מול ת"א, הגלים המגיעים לאזור חיפה בעלי פוטנציאל הצפה משמעותי ולהפך.

3 ב. ממצאים לגבי צונאמי הנוצרים ע"י רעידות אדמה חזקות

- ברעידות אדמה תת-ימיות, התפתחות הצונאמי הינה כגל המתפשט סביב מוקד היצירה. לגל יש מספר גלי משנה (רכבת גלים - wave train) וצורתו המרחבית מושפעת מממדי המקור (כלומר יחסי אורך/רוחב של הרעש). גובה הגל שנוצר מושפע מעוצמת המקור (מידת התרוממות הקרקע או פני הים) ועומק הים באזור היצירה. זמן המחזור של גל הצונאמי יהיה תלוי בגודל האנרגיה המועבר למסת המים במקור היצירה.
- בהדמיות נצפתה פגיעה של הגל העיקרי של הצונאמי במקרים השונים באזורי המדידה שלנו (ת"א, חיפה) ואחר כך נצפו במקרים מסוימים פגיעות משנה. בדרך כלל התמונה מורכבת למדי למרות שישנם מספר מאפיינים טהורים (הכוונה למקרים בהם הבתימטריה פשוטה ומאפשרת תאור אנליטי למשל).
- בכל המקרים נצפו הצפות באזורי שפכי הנחלים (ירקון או קישון) וההבדלים שנמצאו היו במשך ובנפח ההצפה. בשלבים שונים נצפתה גם שפילה של פני הים עקב נסיגת גל צונאמי, שפילה שחשפה את קרקעית חלק מתחום המים הרדודים הקרוב לחוף וגרמה זמנית להקטנת עומק המים במספר מטרים תוך מעגנות ונמלים.

4. מסקנות והמלצות

- א. בעבודה זו פותחה בחקר ימים ואגמים לישראל בשיתוף המכון הגיאולוגי (לעתיד), המינהל למדעי האדמה והים במשרד התשתיות הלאומיות), לראשונה בארץ, יכולת לבצע הדמיות ממוחשבות של מגוון תרחישי צונאמי באמצעות מודל מתקדם ביותר (GeoClaw) ומודל גובה ובתימטריה ברזולוציה גבוהה.
- ב. מספר התרחישים שבוצעו במחקר הנוכחי צומצם למקרים בעלי פוטנציאל ההרס הגבוה יותר בלבד באגן המזרחי של הים התיכון, וזאת כתוצאה מזמני חישוב ארוכים שנדרשו לדימוי תרחישים ברזולוציה גבוהה (עד 10 ימים למקרה). מפאת משך הזמן הרב שנדרש להרצות באמצעי המחשוב שעמדו לרשות המחקר, ההדמיות התמקדו במקרים של הדמיות צונאמי ע"י רעידות אדמה בהופעת גל הצונאמי הראשון בחופי הארץ ועוד כמחצית שעה לאחריו. על פי מידע מהספרות ידוע כי הגל הראשון אינו בהכרח ההרסני ביותר, ולכן בשלב זה יש לראות בממצאים שהתקבלו סף תחתון של הערכים המרביים המתקבלים בהדמיה מלאה (כ-5 מחזורי גל צונאמי) של האירוע.
- ג. התרומה הייחודית בעבודה הנוכחית, מעבר לקליטת תוכנת GeoClaw והתאמתה והבאתה למצב אופרטיבי, טמונה בשיפור משמעותי של האיכות והרזולוציה של מודל הבתימטריה והטופוגרפיה שבעזרתו מבצעים את התרחיש. גודל צלע הסריג הוקטן מ-450 מ' במחקר קודם אחד, או מ-35 מ' במחקר קודם אחר, לסריג בעל אורך צלע תא של 5 מ'. השיפור ניכר לאורך מרבית החוף הישראלי, במיוחד באזור המרכז ובאזור חיפה (כ-30 ק"מ אורך חוף בכל אזור), בטווח העומקים שבין 500- מ' ועד 8- מ' בים וכן ביבשה הסמוכה לחוף מפני הים בגובה 0 מ' ועד לגובה של +10 מעל פני הים.
- ד. הקטנה של תאי הסריג של מודל הגובה הממוחשב מתחת ל-5 מ' תאפשר הדמיות ממוקדות ברזולוציה גבוהה של מבנים חופיים תלת-ממדיים וקטנים יותר, הערכת שטחי הצפה ושפילה ביתר דיוק, כמו גם חישובי כוחות והסעת סחופת (חול) ושברי עצמים כתוצאה מגלי הצונאמי.
- ה. ההדמיות מראות שמבין ארבעת תרחישי רעידות האדמה שבוצעו, האירוע של כרתים הוא החמור ביותר מבחינת פוטנציאל ההרס. מאידך, זהו גם המקרה המרוחק ביותר מחופי ישראל שנבדק ולכן מאפשר זמן התרעה גדול יותר (כמעט שעה וחצי) והתארגנות להתגוננות אזרחית טובה יותר. מנגד, מקרי הגלישות שנבדקו במדרון החוף הישראלי, באופן טבעי מאפשרות זמן תגובה והתארגנות מוגבל בלבד של כ-10 דקות לאוכלוסייה הקרובה למוקד הגלישה. הגלים הנוצרים במקרים אלה יכולים להגיע לגובה של כ-10 מטרים, ולגרום להצפה ונסיגה בשטחים נרחבים.
- ו. ביחס לזמן המופע של הצונאמי בחוף הישראלי, הממצאים במחקר הנוכחי עולים בקנה אחד עם אלה שהתקבלו במחקרים קודמים. מאידך במחקר הנוכחי התקבלו תוצאות הצפה גבוהה יותר בחוף מאשר במחקר קודם בעל סריג גס יותר, אך ההשוואה לא אמינה מאחר והתרחישים הקיצוניים שסומלצו לא היו זהים.
- ז. יש לציין שהנזק של הצפה אינו רק בחדירת מים למקומות יבשתיים, אלא גם בהסעת סחופת וגריפתה כמו גם בפגיעה במבנים המצויים בקרבת החוף והסעה של שברי עצמים. העלייה של פני המים למשך זמן ניכר עקב אי יכולת התנקזות בזמן שעד הגעת גלים משניים או הגל הבא, צפויה לגרום להפרעה משמעותית (עד כדי השבתה) של פעילות תחנות הכוח החופיות, היות ולא ניתן יהיה להזרים את מי הקירור הימה בגלל הקטנת גרדיאנט הזרימה, שהיא גרביטציונית. מצב זה עלול גם להפריע למתקני השאיבה של מפעלי ההתפלה החופיים, שוב בגלל שינוי גרדיאנט זרימה, עד כדי גרימת הפסקת פעילות זמנית שלהם. הפרעה נוספת היא ייתכנות הפגיעה בנמלים ובמעגנות ובשברי הגלים שלכם, כמו גם באוניות וכלי השייט המצויים בהם והסחורות והציוד שעל רציפיהם.
- ח. גם השלב של נסיגת הגל עלול להיות הרסני היות ובמהלכו כמויות גדולות של סדימנטים יסחפו הימה וישאירו את רצועת החוף החולית, שעובי שכבת החול בה קטן מאוד יחסית, עירומה. גם בנמלים, שפילה של פני המים במספר מטרים עלולה לגרום נזקים כבדים לכלי השיט והאוניות, ובבריכות הקירור עלולה להיווצר סכנת של אי יכולת שאיבה של מי קירור (אדי הטורבינות) ואפילו שאיבת אוויר, דבר שגם הוא יכול לשתק את פעילות ייצור החשמל בתחנת הכוח החופיות. הנזק עלול להיות חמור עד כדי שיתוק חלקי של פעילות המשק לזמן של ימים רבים אם לא מעבר לכך.
- ט. יש לפעול בכל הרמות הממלכתיות והציבוריות להתארגנות לסיכון מגלי צונאמי ובכלל זה אמצעים לקבלת התרעה מוקדמת, השלמת בנק תרחישים ושליפה מיידית של המידע הרלוונטי על צפי היקף הפגיעה ותכניות המגירה להנצלה, לחינוך והדרכת הציבור להתנהגות נכונה במקרה כזה ולבחינת וביצוע אמצעי מיגון ו/או מזעור נזקים מבעוד מועד.

- י. כדי להשלים את בניית בנק התרחישים נדרש לאפיין ולדמות את מירב תרחישי הצונאמי הפוטנציאליים, ובאופן קרוב למציאות ככל האפשר.
- יא. יש לנצל מדידות מפלס הים בחופי הארץ וואו באגן מזרח הים התיכון בסמוך לרעידות אדמה חזקות (ממגניטודה 6 ומעלה) כדי לבצע הרצות אימות ולכייל את המערכת ההדמיה, לפחות בתחום הערכים הנמוכים של מקור הצונאמי.
- יב. יש צורך בהשלמת מיפוי מדף היבשת של ישראל במערכת רבת אלומות, כולל מיפוי משלים בקטעי החוף שבהם הנתונים הבתימטריים אינם אמינים, כמו למשל בקטע החוף שבין נחל פולג לגבעת אולגה, קטע חופי אשקלון מחוף הפארק הלאומי ועד המרינה הכחולה באשדוד, קטע חופי ראשון לציון, ומחופי עכו עד צפון נהריה. כמו כן, יש לאסוף נתונים טופוגרפיים ברזולוציה גבוהה (למשל, באמצעות מיפוי LIDAR) לאורך כל חופי הארץ ברוחב חוף של כ-1.5 ק"מ, ונתוני עומק וטופוגרפיה של מוצאי הנחלים בחופי הארץ למרחק של עד כ-5 ק"מ במעלה מהמוצא לים. המידע החדש יאפשר לשפר במידה ניכרת את מודל הגובה הקיים ובהתאם גם את אמינות התרחישים.
- יג. מומלץ לבצע הדמיות ממוקדות של תרחישי צונאמי לאתרי תשתיות עיקריים: נמלי חיפה, חדרה אשדוד ואשקלון, כולל בריכות הקירור בקרבתם (בחיפה, בחדרה, בתל אביב, באשדוד ואשקלון), וכן בקטעי נחלים שהשפכים שלהם עוברים באזורים צפופי אוכלוסין ובאתרי עתיקות מורשת עיקריים.
- יד. מומלץ להקדיש מאמץ מחקרי נוסף לשיפור ההדמיות של היווצרות גל הצונאמי הן עקב גלישות והן עקב רעידות אדמה, תוך התייחסות בחישובים לאינטראקציות שבין הנוזל (מי הים) לגוף היוצר את גלי הצונאמי. במקביל, מומלץ לשפר את מודול חישוב רום עליית גל הצונאמי בחוף הקיים ושל והתפשטותו בתחום היבשה תוך התחשבות בחספוס והפרעות זרימה של מבנים בחוף ובקרבתו וכן לבחון פרמטרים נוספים הקשורים לתנאי הגבול של המודל (לאיזה תנאי גבול אתה מתכוון?).
- טו. מומלץ לבחון גם את התלות הפרמטרית של המקרים השונים ולבחון את תוצאתם בהתייחס לחוף הישראלי. למשל, רצוי לבצע מבחן רגישות לפרמטרים השונים של המקור כדי להבין טוב יותר כיצד שינוי במגניטודה של רעידת האדמה או נפח הגלישה או מהירות הגלישה משפיעים על הצונאמי שנוצר.
- טז. רצוי לדמות את מהלך תרחישי הצונאמי למשך זמני הדמיה ארוכים יותר (כמחצית יממה) כדי לאמוד את השפעת גלי המשנה שמגיעים לאחר הגל הראשון, החזרות ועוד.

הכרת תודה

- עבודה זו התאפשרה הודות למימון קרן המחקרים של משרד התשתיות הלאומיות באמצעות המכון הגיאולוגי, ומימון נוסף של חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל). תיקצוב המחקר אפשר את המשך העסקתו של ד"ר ברק גלנטי בחיא"ל לצורך בניית היכולת לדימוי תרחישי צונאמי בארץ ופיתוח כלים מתקדמים לחקר גלי צונאמי והשפעותיהם האפשריות על חופי ישראל. המחברים מבקשים להודות הן לחברי ועדת הבדיקה של הצעות המחקר על אישור ביצוע המחקר וכן למנכ"ל חיא"ל שהכיר בחשיבות המחקר ואישר הקצבת מימון נוסף פנימי, להבאת המחקר ופיתוח כלי המחקר להתקדמות שהושגה עד כה.
- ביצוע המחקר לא היה מתאפשר כמובן ללא קבלת נתוני בטימטריה וטופוגרפיה באיכות גבוהה והמחברים מבקשים להודות כאן לגופים ולאישים שסיפקו או נתנו אישור להשתמש בנתונים כאלה שהיו ברשותם, והם: חקר ימים ואגמים לישראל, המכון הגיאולוגי והמרכז למיפוי ישראל, חברת נמלי ישראל פיתוח ונכסים בע"מ, חברת אופק צילומי אוויר, חברת אוקיאניה, ד"ר ג'ון ק. הול, מר דוד פרגמנט מנהל רשות נחל הירקון וחברת מדידות ושרותי ביצוע בע"מ, מר רוני שדה, ד"ר רן קלבו מהמכון הגיאולוגי ומר אריק גולן מחיא"ל. אנו מודים לכולם מקרב לב על תרומתם לקידום מחקר הצונאמי לקראת הערכות ישראל לתפעול מרכז לאומי להתרעה מצונאמי, כמולץ ע"י קבוצת התאום הבינממשלתית להקמת מערכת התרעה מצונאמי בצפון האוקיאנוס האטלנטי, בים התיכון ובימים המקשרים, שבחסות הועדה הבינממשלתית לאוקיאנוגרפיה של ארגון UNESCO, וכבר אושרה הקמתה בישראל.
- ביצוע המחקר התאפשר כמובן גם הודות למספר חוקרים בכירים בחו"ל שהעמידו לרשות חיא"ל את המודלים הספרתיים שלהם לבדיקה ושימוש בהם. בין אלה אנו מבקשים לציין את פרופ' Fumihiko Imamura, פרופסור להנדסת צונאמי באוניברסיטת TOHOKU ביפן, עבור עותק של תכנת TUNAMI N2, לפרופ' James T. Kirby, פרופסור להנדסה אזרחית וסביבתית וללימודים ימיים במרכז למחקר חופי יישומי של אוניברסיטת Delaware בארה"ב, עבור קבלת עותק מתוכנת FUNWAVE, לפרופ' Mauricio González מהאוניברסיטה של Cantabria בסנטאנדר בספרד, עבור גרסה של תוכנת COMCOT, לפרופ' Randall J. LeVeque מהמחלקה למתמטיקה שימושית באוניברסיטת Washington בארה"ב המפתח של ClawPack, ולפרופ' David L. George המפתח של תוכנת GeoClaw ועל מתן אפשרות להוריד עותק של חבילת התוכנה.

I. תוכן עניינים

<u>פרק</u> <u>מס'</u>	<u>נושא</u>	<u>עמוד</u> <u>מס'</u>
	תקציר מנהלים.....	I
	הכרת תודה.....	V
	תוכן עניינים.....	1
	רשימת טבלאות.....	3
	רשימת ציורים.....	3
	רשימת נספחים.....	6
.1	מבוא.....	7
.2	שלבי העבודה של המחקר.....	8
.3	סקר ספרות.....	9
.4	איסוף נתונים בתימטריים וטופוגרפיים ברזולוציה גבוהה והכנת סריגים.....	10
.5	לימוד ובחינת תוכנות להדמיית תרחישי צונאמי.....	14
5.1	שיטות נומריות לחישובי משוואות דיפרנציאליות חלקיות (PDE) בדיוק גבוה.....	14
5.2	סקר תוכנות פתוחות.....	15
5.2.1	.....FUNWAVE	20
5.2.2	.....COMCOT	20
5.2.3	.....pCOULWAVE	21
5.2.4	.....GeoClaw	22
5.3	השוואת התכונות והיכולות של התוכנות שנבחנו.....	23
5.4	הרצות ניסיוניות : השוואת תכונות ויכולות של התוכנות שנבחנו.....	26
5.5	GEOCLAW – סיכום על התוכנה שנמצאה המתאימה ביותר להדמיות לחופי ישראל.....	30
.6	המקורות ליצירת צונאמי בחוף המזרחי של הים התיכון.....	31

תוכן עניינים - המשך

<u>עמוד</u> <u>מס'</u>	<u>נושא</u>	<u>פרק</u> <u>מס'</u>
31	..... מאפיינים כמותיים של הסיכון מצונאמי	6.1
32	..... פרמטרים אופייניים של המקורות לצונאמי	6.2
32	..... מקורות אפשריים לצונאמי במזרח הים התיכון	6.3
33	תרחישים מייצגים לדימוי צונאמי בחוף הים התיכון של ישראל	7
35	..... ביצוע ההדמיות באמצעות תוכנת GeoClaw	8
35	..... שיקולים כלליים	8.1
35	..... הגדרת המקור בתוכנת GeoClaw	8.2
35	..... פיתוח היישום עבור רעידות אדמה	8.3
36	..... פיתוח היישום עבור גלישות	8.4
37	..... תיאור התוצאות שהתקבלו עבור ההדמיות השונות	9
37	..... עיבוד המידע	9.1
37	..... עיבוד בתר (Post-processing) של הפלטים הבסיסיים	9.2
40	..... גלישות	9.3
52	..... רעידות אדמה	9.4
63	..... ניתוח תוצאות הדמיות התרחישים שבוצעו	10
63	..... דיון לגבי הדמיות צונאמי הנוצרים כתוצאה מגלישות תת-ימיות	10.1
65	..... דיון לגבי הדמיות צונאמי הנוצרים כתוצאה מרעידות אדמה חזקות	10.2
65	..... מסקנות	11
68	..... המלצות	12
69	..... מקורות	13

רשימת טבלאות

<u>מס'</u>	<u>שם</u>	<u>עמוד</u>
1	תאור מתומצת של מודלים ספרתיים עיקריים להדמיית צונאמי – אפיונים כלליים	16-17
2	תאור מתומצת של מודלים ספרתיים עיקריים להדמיית צונאמי – יישומי תוכנה וחומרה	18-19
3	המאפיינים של גלישות הקרקע התת-ימיות בתרחישי הצונאמי	34
4	המאפיינים של רעידות האדמה בתרחישי הצונאמי	34
5	ערכים ממוצעים ומרביים שנתקבלו עבור התרחישים שבוצעו	63

רשימת ציורים

<u>מס'</u>	<u>כותרת</u>	<u>עמוד</u>
1	מפת בתימטריה/טופוגרפיה של אגן הים התיכון על פי נתוני SRTM30	12
2	מפת עומקים בחופי המרכז בסריג של 5 מ'	13
3	מפה טופוגראפית באזור הירקון בסריג של 5 מ'	13
4	תצלום בזק עבור הצונאמי בסומטרה 2004 לאחר כ-7,600 שניות כפי שהתקבל מהרצת התרחיש בתוכנת GeoClaw, על בסיס נתוני דוגמה שמגיעה עם התוכנה	24
5	תצלום בזק עבור חישוב צונאמי אפשרי המתרחש בים התיכון, כפי שהתקבל בהרצת תרחיש בתוכנת GeoClaw, על בסיס נתונים בתימטריים של מבסיס SRTM30	25
6	תמונת מצב התחלתי של אנימציה A1	27
7	תמונת מצב התחלתי של אנימציה A7	27
8	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AG	28
9	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ1	28
10	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ2	29
11	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ3	29
12	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ4	29
13	תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ5	30
14	גיאומטרית החומר הגולש – פרבולואיד אליפטי. מימין מבט מרחבי, משמאל חתך אורך	36
15א'	מפת מיקומי הגלישות שעבורן נעשו הסימולציות, רעידות האדמה	39

רשימת ציורים - המשך

מס'	כותרת	עמוד
15ב'	מפת מיקומי רעידות האדמה שעבורן נעשו ההדמיות	39
16	תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה של אזור הגלישה, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של הים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב	40
17	תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב - המשך. מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה	41
18	תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף. א' - לאורך כל החוף הישראלי, ב' - פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	42
19	תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - האגן המזרחי של הים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב	43
20	תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב -מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה	44
21	תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב - גובה הצפה מרבית בחוף. א' - לאורך כל החוף הישראלי, ב' - פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	45
22	תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - אזור אגן מזרח ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב	46
23	תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה -מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה	47
24	תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה - גובה הצפה מרבית בחוף. א' - לאורך כל החוף הישראלי, ב' - פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	48
25	תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - אזור אגן מזרח ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב	49
26	תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה -מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה	50
27	תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה - גובה הצפה מרבית בחוף. א' - לאורך כל החוף הישראלי, ב' - פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	51
28	תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים - תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב	52
29	תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה בים ליד כרתים. מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה	53

רשימת ציורים - המשך

<u>מס'</u>	<u>כותרת</u>	<u>עמוד</u>
30	תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה בים ליד כרתים. התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף. א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	54
31	תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין - תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' – מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' – אזור תל אביב	55
32	תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה בים ליד קפריסין - מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'-הצפה מרבית במפרץ חיפה	56
33	תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה בים ליד קפריסין, התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף. א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	57
34	תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין - תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' – מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' – אזור תל אביב	58
35	תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה בים ליד קפריסין - מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'-הצפה מרבית במפרץ חיפה	59
36	תרחיש EQ-CRETE-2, רעידת אדמה בים ליד קפריסין התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף. א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה	60
37	תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין - תצלומי בזק של שינוי רום פני הים. א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' – מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' – אזור תל אביב	61
38	תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה בים ליד קפריסין-מפות שפילה והצפה מרבית. א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'-הצפה מרבית במפרץ חיפה	62

רשימת נספחים

<u>עמוד</u>	<u>שם הנספח</u>	<u>מס'</u>
77	רשימה של המודלים השונים הקיימים להדמיית צונאמי על פי דו"ח פרויקט TRANSFER של התכנית האירופית ה-6.	1
80	תוצאות השוואתיות של מודלים ספרתיים כנגד מדידות בבריכת הדמיית צונאמי שהוצגו בסדנת ISEC ביולי 2009	2
95	תוצאות תרחיש גלישה מול תל אביב LS-TLV1	3
108	תוצאות תרחיש גלישה מול תל אביב LS-TLV2	4
121	תוצאות תרחיש גלישה מול חיפה LS-HAI1	5
134	תוצאות תרחיש גלישה מול חיפה LS-HAI2	6
147	תוצאות תרחיש רעידת אדמה מול כרתים EQ-CRETE-1 לאזור מפרץ חיפה, אזור המרכז ונחל הירקון	7
160	תוצאות תרחיש רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-1 לאזור מפרץ חיפה, אזור המרכז ונחל הירקון	8
173	תוצאות תרחיש רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-2 לאזור מפרץ חיפה	9
186	תוצאות תרחיש רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-2-HR לאזור מפרץ חיפה	10

1. מבוא

לאחר ההרס העצום שגרם הצונאמי בחופי האוקיאנוס ההודי בדצמבר 2004, עלתה המודעות לצונאמי בכל העולם. התברר כי הים התיכון הינו המקום השני בעולם מבחינת שכיחות גלי צונאמי עד היום. על כן, ביולי 2005 החליטה העצרת הכללית של הוועדה הבינ-ממשלתית לאוקיאנוגרפיה (IOC) של UNESCO, על הקמת מערכת התרעה מוקדמת מצונאמי בצפון-מזרח האוקיאנוס האטלנטי, בים התיכון ובימים המקושרים אליו (ICG/NEAMTWS) שתנוהל על ידי קבוצת תאום בינ-ממשלתית. קבוצת זו הכוללת בין השאר גם נציגים מישראל, החליטה על הקמת מערכת התרעה לצונאמי שחלקה החלוצי אמור היה להתחיל לפעול בסוף 2007.

מערכת ההתרעה לצונאמי תתבסס על מערך ניטור רעידות אדמה בעזרת חישנים סיסמיים ומערכת אימות להיווצרות גלי צונאמי (במקרה של רעידות אדמה או גלישות קרקע) שתתבסס בעיקר על מערכת ניטור מפלס הים בזמן אמת. המערכת תאפשר אימות או זיהוי היווצרות גלי צונאמי, אך כדי לדעת היכן ומתי יגיעו גלי הצונאמי יש צורך בהרצות מודלים נבחרים של היווצרות, התפשטות והצפה של החוף על ידי גלי צונאמי. יש לציין כי המודלים הספרתיים הקיימים מורכבים מאד ולמרות יעילותם והשימוש במחשבים חזקים בהם מבוצעות ההרצות, עדיין נדרש זמן רב יותר לחישוב התרחיש מזה הנדרש למתן התרעה ופינוי אוכלוסין. יודגש כי המודלים הללו מתאימים מבחינת משכי ביצוע ההרצות לתנאים של האוקיאנוס השקט, שם הגעת גלי הצונאמי מצידו האחד של האוקיאנוס לצידו השני לוקחת מספר שעות, מלבד בחופים הסמוכים למוקד היווצרות הצונאמי, ואז גם שם המודלים הקיימים אינם טובים להתרעה. מכיוון שמימדי הים התיכון קטנים והוא גם רדוד יותר מהאוקיאנוס השקט, גלי צונאמי הנעים בו צריכים לעבור מרחקים קצרים יותר עד הגעתם לחוף ולכן זמני ההתרעה קצרים יותר. על כן השימוש בהרצות בזמן אמת למתן התרעה לצונאמי בים התיכון, כולל עבור ישראל, הופך לבלתי אפשרי, ונדרשת גישה אחרת לשם קבלת התרעה מוקדמת בטווח זמן קצר יחסית של דקות ספורות עד כמה עשרות דקות.

הפתרון שנקבע להתמודדות עם בעיה זו על ידי ועדת התאום הבינ-ממשלתית הוא שכל מדינה תכין מראש עבור עצמה בנק תרחישים של מצבי היווצרות, התפשטות והצפה של גלי צונאמי, על בסיס המידע הקיים לגבי רעידות האדמה ואירועי צונאמי היסטוריים בשטחה, ועל רקע הפעילות הסייסמו-טקטונית במזרח הים התיכון. במקרה של אירוע אמת וקבלת התרעה מאת מרכזי ההתרעה האזוריים ו/או מרכז ההתרעה הלאומי, ניתן יהיה 'לשלוף' באופן מיידי וממוחשב מתוך בנק התרחישים את אלה המתאימים ביותר לאירוע האמת תוך כדי התרחשותו.

בהתאם לכך נקבעו עקרונות הפעולה בעבודת המחקר הנוכחית. שיטת העבודה כוללת מיפוי מפורט של כל המקורות האפשריים להיווצרות גלי צונאמי באזור האגן המזרחי של הים התיכון. לכל מקור אפשרי יוכן תרחיש של יצירת צונאמי באמצעות תוכנה להדמיית היווצרות והתפשטות גלי צונאמי ומימדי הפגיעה באזור החוף הישראלי. התוצאות עבור הדמיות אלה, במיוחד מפות גובה פני הים כתלות במרחב ובזמן, נרשמות כל אחת כלפי המקור שלה. הנתונים הללו נאספים וממוינים כך שניתן יהיה להפיק מהם את המידע המשמעותי באופן מיידי. במקרה אמת, כמו למשל מיד לאחר רעידת אדמה חזקה במזרח הים התיכון או במקרה של קבלת התרעה לצונאמי ממרכזי חיזוי אזוריים אחרים בים התיכון או מהמרכז ההתרעה הישראלי לכשיוקם, תוכל המערכת לאתר את המקרה הדומה ביותר לאירוע המתרחש בזמן

אמת מתוך בסיס המידע של תוצאות התרחישים שהוכנו מראש, ותאפשר קבלת החלטה מהירה בדבר הצורך במתן התרעה מוקדמת לרשויות ולציבור.

הדו"ח הנוכחי מציג את התקדמות המחקר בנושא אשר מתבצע בשיתוף פעולה בין חקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) לבין המכון הגיאולוגי (הסכם מספר 28-06-027 מרכבה 277062) במימון קרן המחקרים של משרד התשתיות הלאומיות (תש"ל). במסגרת הנוכחית נסקר מגוון רחב של תוכנות עדכניות להדמיה של היווצרות והתפשטות גלי צונאמי, נבחרה התוכנה המתאימה ביותר מבחינת יכולותיה ואמינותה, והיא הותאמה לציוד המחשוב שניתן היה לגייס ונקלטה לעבודה שוטפת בחיא"ל. יצוין כי היקף העבודה שבוצעה הוכתב בפועל מהיקף המימון שהוענק. במקביל, הוגדרו במכון הגיאולוגי המקורות האפשריים לצונאמי משמעותי שעלול לפגוע בחוף הישראלי. על בסיס אפיונים אלה בוצעו הרצות של כמה מהתרחישים תוך שימוש בבסיס הנתונים הבתימטריים והטופוגרפיים המפורטים ביותר הזמינים לאזור החוף בישראל.

במהלך המחקר התברר כי המימון אינו מספיק ולאור חשיבות הנושא החליט חיא"ל להגדיל את תקציב המחקר עוד ב- 50% מהמימון שהוענק ע"י משרד התש"ל עבור כוח האדם ורכישת תחנת עבודה משופרת.

2. שלבי העבודה של המחקר

העבודה בוצעה על פי השלבים הבאים:

1. סקר ספרות ואתרים אינטרנטיים לצורך איתור התוכנות העדכניות ביותר לדימוי תרחישי צונאמי ובחירת התוכנה המתאימה ביותר לסביבת העבודה בארץ.
2. איסוף והכנת נתוני בתימטריה וטופוגרפיה של מדרון היבשת והחוף של מדינת ישראל ברזולוציה גבוהה.
3. הכנת סריגים בתימטריים משולבים (nested) כולל תפירת סריגים ברזולוציות שונות לצורך הרצת התרחישים.
4. קליטת מספר תוכנות שניתן היה להשיג ואשר הוערכו כמבטיחות ביותר, לימודן וביצוע מספר הרצות של דוגמאות המסופקות עם התוכנות לבחירת התוכנה המתאימה ביותר מבחינת יכולות, אמינות, זמינות ורמת הדוקומנטציה הנלווית.
5. קליטת התוכנה שנבחרה, התאמתה להרצת תרחישי צונאמי בישראל לרבות פיתוח כלים משלימים על פי הצורך, הצגה גרפית וניתוח של התוצאות.
6. התאמת נתוני הסריג ותנאי גבול וההתחלה (מקור ליצירת גלים) לפורמט הנדרש על ידי התוכנה שנבחרה.
7. הגדרת מגוון התרחישים בעלי סבירות גבוהה ליצירת גלי צונאמי ואפיון כמותי של כל אחד מהם כבסיס להרצת התרחיש.
8. הרצה ניסיונית של מספר תרחישי צונאמי ברזולוציה נמוכה, כולל הפקת מפות של האזורים המועדים להצפה, באמצעות התוכנה שתמצא כמתאימה ביותר.

9. ניתוח התוצאות שהתקבלו, והערכת טיב החישובים.
10. הרצה מלאה ברזולוציה גבוהה של שבע תרחישים מייצגים על גבי סריג העומקים והגבהים המפורט והרצת תרחיש אחד ברזולוציה המרבית של הסריג שהוכן וקבלת מידע מלא לגביהם.
11. הכנת דו"ח מסכם המתאר את כל שלבי העבודה, והצגת הממצאים, המפות והכלים לשימוש בתוצרים.

3. סקר ספרות

תוכנות להדמיית תרחישי צונאמי נמצאות בשימוש רחב לצורך לימוד מקרים היסטוריים ואירועים מודרניים. חשיבותן של תוכנות אלה רבה במיוחד במחקר וחיזוי אירועים עתידיים (Liu, Yeh and Synolakis 2008), מהסיבה הפשוטה שקיימים מעט מאד נתוני אמת מאירועי צונאמי, מלבד אולי במקרה של הצונאמי הגדול שאירע בסומטרה בדצמבר, 2004 (Iwan 2006, Murty et. al. 2007, Synolakis et. al. 2006). באופן כללי, התוכנות להרצת תרחישי צונאמי פותרות את משוואות נבייר-סטוקס (Navier-Stokes) הבלתי-ליניאריות לזורמים בלתי-דחיסים בהנחת קרוב של תנאי מים רדודים (Gisler, 2008, Idelsohn 2004). המהירויות האופקיות הן תוצאה של מיצוע של הרכיבים של שדה המהירות במימד העומק, כך שרכיב המהירות האנכי מתבטל ופותרים מערכת זרימה דו-ממדית. יש במודלים הללו התייחסות מסוימת לחיכוך קרקעית, כוח קוריוליס, ותנאי השפה לאורך החוף ורחוק במים העמוקים. שימוש בקירוב בוסניסק (Boussinesq) בדרגות שונות של תחכום, מאפשר ביטוי לתהליכי דיספרסיה אשר מורגשים במבנה הגלים וספקטרום של חזית הגל.

מרכיב חשוב ביצירת תרחישי צונאמי הוא דימוי המקור של הצונאמי. הנושא נדון במסגרת הוועדה האירופאית למחקר שהתכנסה בפברואר ומרס 2005 ובמסקנותיה העיקריות צוין הצורך במידול משופר של תהליכי יצירת הצונאמי (<http://labtinti4.df.unibo.it/transfer/?q=tews>), כולל פיתוח מודלים דו-תלת-ממדיים לסוגים שונים של העתקה ושל גלישות כגון זרימות בוך, מפולות, גלישת סלעים, וכדומה. ככלל קיימות מספר גישות: מודלים הכוללים מספר סוגים של תהליכים טקטוניים כמו תזוזת קרקעית הים או גלישה, ומנגד מודלים שמקבלים כקלט את שינוי פני קרקעית הים כפונקציה של הזמן. בקבוצה הראשונה קובע כמובן טיב המודול שמדמה את יצירת הצונאמי וכמו כן מגוון המנגנונים שניתן לתאר באמצעותו. בקבוצה השנייה על המשתמש להכין קלט מתאים שמתאר את התהליך הטקטוני שמהווה את המקור ליצירת הצונאמי.

מקור הצונאמי כתהליך טקטוני בים זכה לתשומת לב מיוחדת במסגרת המחקר של רעידות אדמה ופעילות טקטונית לסוגיה השונים (Locat et. al. 2000, Lynett et. al. 2002, Sue 2007). המחקר נחלק לעבודות העוסקות בחקר היסטורי של אירועי צונאמי המתבסס על נתונים גיאולוגיים, ולעבודות איסוף וניתוח של אירועים שקרו בתקופתנו. פעילות נוספת בשטח זה היא הבנה מעמיקה של התהליכים הטקטוניים בכלים מתמטיים-פיסיקליים ומאמץ לתאר את התופעות במודלים מתמטיים סגורים (Okada 1985, 1992, Panizzo 2006). בהקשר לזה נעשות עבודות שונות בתחום של ההדמיה וניסויים בקנה מידה מוקטן.

רוב המודלים בשימוש נבדלים זה מזה ביכולתם לדמות בהצלחה את השלב האחרון בהתפתחות של אירוע הצונאמי, דהיינו, השלב בו הגל מגיע למים רדודים ואז אפקטים בלתי-ליניאריים נעשים חשובים. יתר על כן, הזרימה בתחום הרדוד הופכת להיות תלת-ממדית בעיקרה. גורמים כמו שינוי חריף של הבתימטריה (לאורך החוף ו/או בניצב אליו), תהודה בנמלים, מפרצים וכניסות של תעלות (או נחלים) ומבנים חופיים אחרים, מהווים קושי חישובי מהותי. כמו כן יש צורך להתמודד עם המורכבות של מבנים יבשתיים כאשר מדובר בהצפה, התרוממות פני המים על האזורים היבשתיים, נסיגת המים ושוב חזרה של מים על אזורים שכבר נרטבו קודם לכן (ויתכן שצורתם ואופיים השתנו). בתהליכים אלה יש לטפל באינטראקציה של הזורם עם מבנים וצמחיה (fluid-solid interaction) וכן בנושא של הסעת סדימנטים, שינוי צורה והתגבבות.

בנושא השיטות הנומריות ישנה פעילות ענפה כמו בכל תחום הנדסי/מחקרי דומה (Computational Fluid Dynamics (CFD), מכאניקת-המוצקים, ועוד). ענף זה נהנה מעבודות בשטחים דומים וזה בא לידי ביטוי בתוכנות פתוחות וכן מסחריות, ביניהן גם כאלה שנבנו במיוחד לדימוי בעיית הצונאמי.

אספקט נוסף שקשור בפיתוח תוכנה לחישוב תהליך זרימה כמו צונאמי, קשור ביכולת לעבוד על מחשב מקבילי, ובמיוחד על מערכת מסוג cluster בה הזיכרון מבוזר (ולכן מדובר בפרדיגמת מקבול מסוג Multiple Instruction Multiple Data (MIMD), כדי לקצר את משך זמן החישוב, או לחלופין לאפשר עבודה בעזרת סריגים ברזולוציה גבוהה ויצירת תרחיש מפורט ומדויק יותר.

רוב התוכנות המצויות בשטח זה מבוססות על סכמות הפרשים או נפחים סופיים (Burwell et. al. 2007). אלה נחשבות השיטות הקלאסיות שישומו גם בתחומים קרובים (CFD או בעיות פיסיקליות בעלות צורה דומה). בשלב מאוחר יותר, כאשר התעניינו בתהליכים הכוללים גם זרימה באזורים החופיים, פותחו שיטות בעלי סדר דיוק גבוה יותר (Pranowo et. al. 2008). הרחבה נוספת נעשתה במעבר לקואורדינאטות עקומות המאפשרות התאמה טובה יותר של הגיאומטריה של הבעיה ובצורה זו משיגים יעילות נומרית גבוהה יותר. התקדמות נוספת בחישובי זרימה הושגה בפיתוח שיטות של אלמנטים סופיים מבוססים על שיטת גלרקין (Galerkin). שיטות אלו (וגם קודמותיהן) נעשות קשות ליישום כאשר דנים באזורים הרדודים, ועוד יותר מסובכות באזורי ההצפה. הזרימה היא רב פאזית, טורבולנטית, תלת-ממדית ותלויה בזמן. נוסף לזה, הזרימה נעה בתחום שגבולותיו אינם קבועים בזמן, כלומר מדובר בתנאי שפה תלויי זמן. שיטה נוספת אשר פותחה במקור עבור בעיות פלזמה ויצירת מבנים אסטרופיסיקליים - Smooth Particle (SPH) Method נוסתה בתחומים שונים של זרימות (או בצורה כללית יותר - Partial Differential Equations (PDE) ובהמשך קיבלה את ההכרה בקרב הקהילה החישובית הרחבה יותר (Idelsohn et. al. 2004, Zhang et. al. 2008).

בשנים האחרונות יש פעילות מחקרית בנושא צונאמי בים התיכון. חלק מהעבודות מתמקדות בתיעוד היסטורי של האירועים לפי מידע גיאולוגי. מחקרים אלו קשורים באיסוף נתונים מתמשך של הפעילות הטקטונית באזור הים התיכון (Salamon et. al. 2003). עבודות אחרות נעשו בגישה החישובית והדמיה בניסיון לשחזר אירועים מהעבר הרחוק (וגם בתקופתנו) ובמגמה לחיזוי ואומדן של צונאמי ונזקיו בחופים נבחרים (Kit et. al. 2007, Salamon et. al. 2007, Salamon et. al. 2008, Theilen-Willige 2006).

4. איסוף נתונים בתימטריים וטופוגרפיים ברזולוציה גבוהה והכנת סריגים

עבודה קודמת שעסקה בדימוי תרחישי צונאמי בישראל (Salamon et. al., 2007) התבססה על בתימטריה ברזולוציה נמוכה של ETOPO2 ושל Hall (1981) אשר בקרבת החוף הייתה בקירוב 50 מ'. במחקר הנוכחי, לצורך הכנת סריגים של קרקעית הים והחוף באגן המזרחי של הים התיכון ובחוף הישראלי, נאספו נתוני עומק ממספר מקורות בעלי רזולוציה הולכת וגדלה כדלקמן:

א. בתימטריה של הים התיכון תוך שימוש בבסיס הנתונים של SRTM30 (U.S. Geological Survey Shuttle Radar Topography Mission שבוצע בפברואר 2000, וכן נתונים נוספים מבסיס הנתונים GTOPO30 של המכון הגיאולוגי האמריקאי (USGS)). בסיס הנתונים כולל נתוני עומק בכל העולם בסריג של 0.5' ברשת הגיאוגרפית העולמית. הבתימטריה של האגן המזרחי של הים התיכון כפי שהתקבלה מהנתונים הללו, מוצגת בציור 1.

ב. נתונים בתימטריים ברזולוציה גבוהה (מספר מטרים) במדף היבשת הישראלי, על פי סקר באמצעות מערכת מולטי-ביים שנערך לאורך חופי ישראל, מקו עומק 500- מ' בקרוב עד קו עומק של 6- מ' בקרוב. הנתונים מאפשרים יצירת סריגים בעלי רזולוציה הולכת ועולה ככל שנכנסים למים רדודים יותר. מאחר וטרם הושלם כיסוי מלא של החוף הישראלי, נעשו השלמות באזורים החסרים על בסיס נתונים בתימטריים שנאספו על ידי חברת אוקיאנה לצורך פרויקט צינור הגז בעומקים שבין כ- 50 מ' ועד כ- 8 מ'.

ג. נתונים בתימטריים שנאספו ע"י חיא"ל וקבלני משנה שלה במים רדודים ובחוף הים ברזולוציה גבוהה, באזור חיפה, באזור המרכז בין חוף נחל פולג עד חוף גבול בת-ים רש"צ. חלק מנתונים אלה נאספו במסגרת מחקר בחינת הייתכנות של הקמת איים מלאכותיים וחלקם במסגרת פרויקט המיפוי הלאומי של מדף היבשת. חלק אחר נאסף במסגרת מחקרים אחרים בהם עוסקת חיא"ל. יצוין כי חלק מנתונים אלה שימשו גם למודל הגלים ולמודל הסדימנטולוגי שהופעלו ע"י חיא"ל במסגרת הכנת מסמך המדיניות להתמודדות עם התמוטטות המצוק החופי.

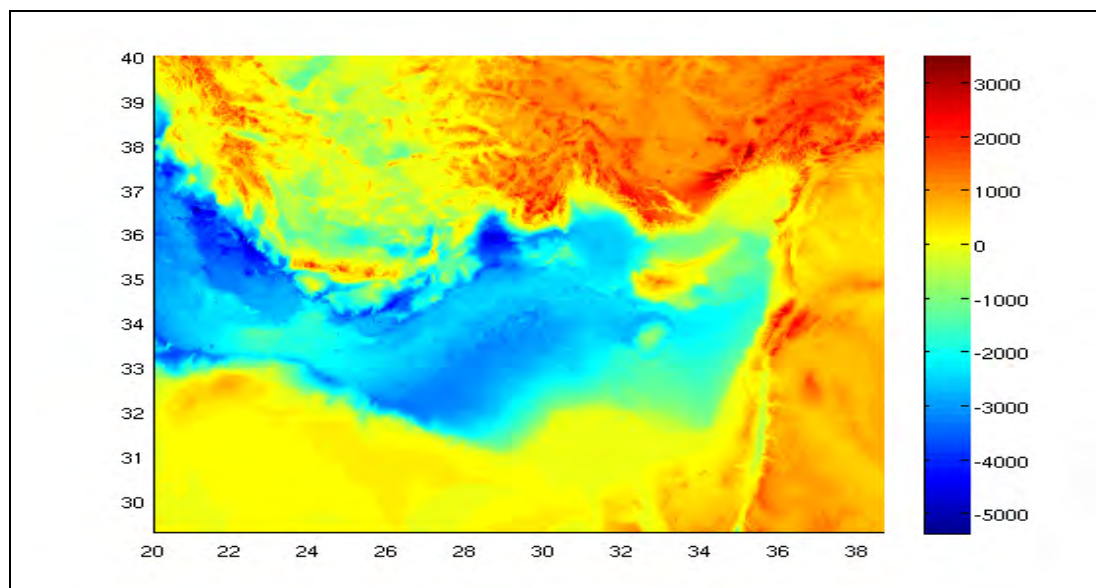
ד. מדידות שנעשו לאורך שפך נהר הירקון עבור רשות נחל הירקון ע"י חברת מדידות ושרותי ביצוע בע"מ (מש"ב), מרביתם בשנת 2008, מלבד הגדה הצפונית אשר נמדדה בשנת 2000.

ה. נתוני בתימטריים וטופוגרפיים של החוף הישראלי ברזולוציה של 6" משנות ה-80 של המאה שעברה שהוכנו ע"י ד"ר ג'ון הול ממג"ל ואשר הועברו לנו ע"י ד"ר רני קלבו ממג"ל.

ו. נתונים טופוגרפיים עדכניים באזור חיפה ממיפוי LIDAR שבוצע ע"י חברת אופק.

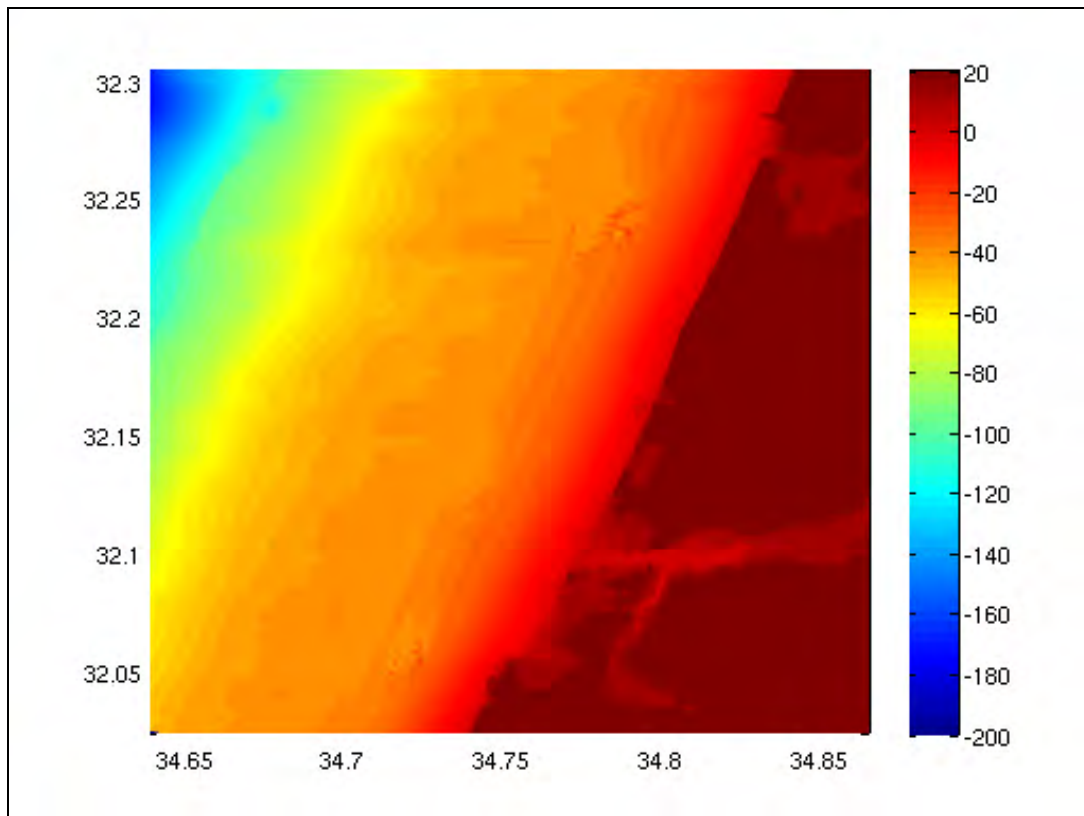
ז. נתונים בתימטריים באזור אשדוד שנאספו ע"י חיא"ל ואוקיאנה.

ח. נתונים בחוף ובמצוק מחיפה ודרומה עד קצא"א על פי סריג טופוגרפי שהוכן במפ"י.

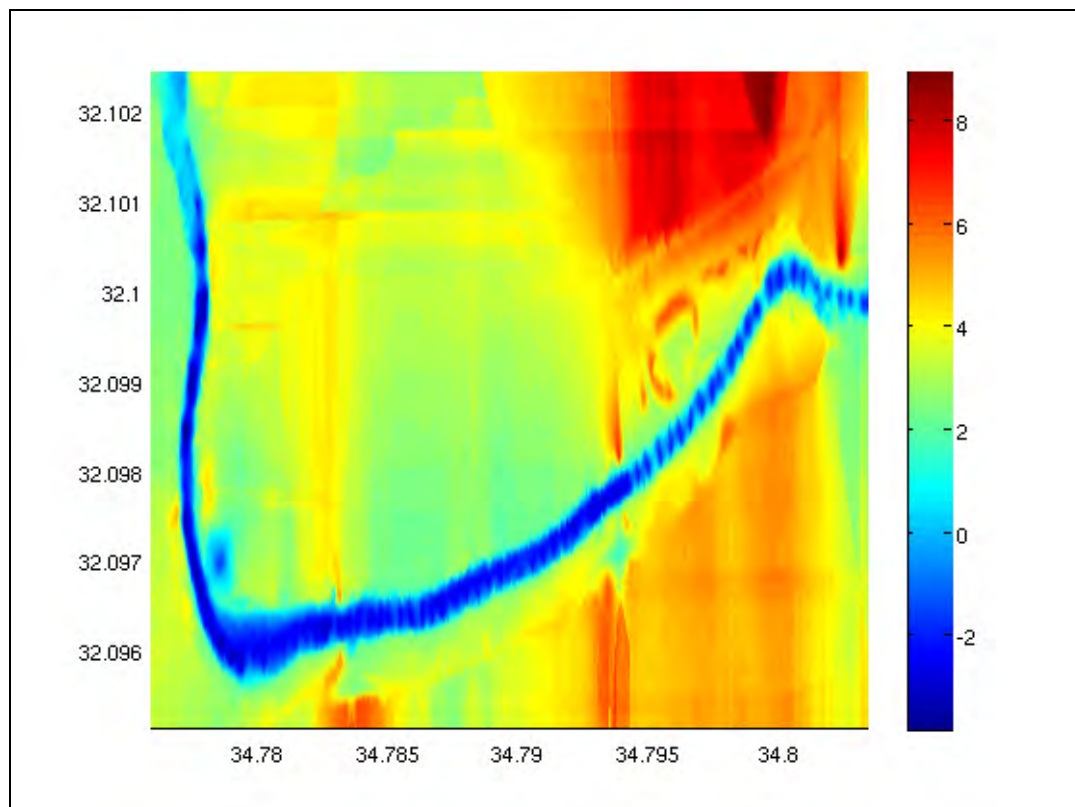


ציור מס' 1 - מפת בתימטריה וטופוגרפיה של אגן הים התיכון על פי נתוני SRTM30.

יצוין כי כל הנתונים הבתימטריים בסעיפים ב' עד ה' היו ברשת ישראל (ישנה או חדשה) והיה צורך להמירם לרשת הגיאוגרפית WGS84. למרות כל המידע לעיל, עדיין נותרו מקטעי חוף במים רדודים עבורם חסרים נתונים בתימטריים ו\או טופוגרפיים, או שהנתונים הקיימים הם ברמת פרוט ואמינות נמוכה אך מספקת לאומדן ראשוני. לכן הוחלט כי עד אשר יושגו הנתונים החסרים (ממיפויים שמתבצעים כיום או יתבצעו בעתיד הנראה לעין), תיבדק התפשטות גלי הצונאמי לכל אורך החוף בסריג ברזולוציה נמוכה יותר קיימת, ואילו הבדיקה המפורטת תתרכז בעיקר בחופי חיפה (מעטלית עד עכו), ובחופי המרכז (משפך נחל פולג עד גבול בת-ים ראשון לציון), עבורם קיימים סריגים ברזולוציה של 5 מ' בתחום הרדוד מ-50 מ' בים ובגובה של עד +10 מ' לפחות ביבשה הקרובה לחוף. המחשה של הבתימטריה והטופוגרפיה ברזולוציה הגבוהה עבור האזור הרדוד בחופי המרכז שבין גבול בת-ים ראשון לציון לשפך נחל פולג וכן בתחום 4 ק"מ מהשפך בנחל הירקון, מוצגת בציורים 2 ו-3, בהתאמה.



ציור מס' 2 - מפת עומקים בחופי המרכז בסריג של 5 מ'.



ציור מס' 3 - מפה טופוגראפית באזור הירקון בסריג של 5 מ'.

5. לימוד ובחינת תוכנות לחישובי צונאמי

5.1 שיטות נומריות לחישובי משוואות דיפרנציאליות חלקיות (PDE) בדיוק גבוה

כאשר מעוניינים לדמות מערכת דיפרנציאלית חלקית, נתקלים בדרך כלל בבעיית רזולוציה מרחבית ו/או זמנית. במקרה של זרימות תלת-ממדיות, טורבולנטיות ותלויות בזמן, הקושי גדל. דרך אחת להתמודד עם קושי זה הוא במידול הסקאלות הקטנות (מרחביות ו/או זמניות) וקבלת מערכת משוואות פשוטה יותר הדורשת מאמץ נומרי מופחת. דרך אחרת מקובלת היא במציאת שיטות נומריות משוכללות יותר המשפרות בצורה משמעותית את היקף החישוב.

המקרה של הפיסיקה של גלי צונאמי הוא דוגמה קלאסית של בעיה מסוג זה. התהליך נוצר בדרך כלל במעמקי האוקיאנוס ורוכש סקאלות מרחביות של מאות קילומטרים (או זמניות של שעות), ועם התקדמותו אל עבר היבשה, הוא משנה את צורתו הדו ממדית לגל נשבר תלת מימדי. בשלב זה הסקאלות האופייניות הן של מטרים (או פחות). כלומר מדובר בספקטרום שרוחבו באופן כללי יותר מ-5 דקאדות (5 סדרי גודל בסקלה לוגריתמית). אם מעוניינים לתאר את כל הסקאלות הללו (במה שנקרא Direct Numerical Simulation (DNS)) אזי מדובר בבעיה בעלת לכל הפחות 10^{10} נקודות רשת, וזה עדיין בלתי אפשרי לביצוע גם בעזרת מחשבי העל הקיימים.

כדי שפתרון בעיית חישוב הצונאמי יהפוך לריאלי, ממדלים בדרך כלל את משוואות נביר-סטוקס לקרוב משוואות מים רדודים או בוסינסק הבלתי-ליניארי. בשניהם המערכת הופכת לדו-ממדית, עובדה שמקטינה באופן משמעותי את גודל החישוב. בנוסף, במים עמוקים רחוק מיבשה, ניתן להסתפק בסריג ברזולוציה נמוכה. רק כאשר מתקרבים לחוף, השפעת מתאר הבתימטריה וקו החוף נעשים דומיננטיים ואפקטים כמו דיספרסיה נעשים חשובים, יש צורך בעידון הרשת, או לחלופין, שימוש בסכימה נומרית מסדר גבוה יותר.

בנושא חישובי PDE בדיוק גבוה קיימות שתי גישות מקובלות:

א. שיטות חישוב אויילריניות (Eulerian) בשימוש בסכמות חישוביות מסדר גבוה - שיטת עידון

הרשת האדפטיבית (Adaptive Mesh Refinement (AMR)).

שיטות מקובלות המצויות בשימוש הן שיטות ספקטראליות, אלמנטים סופיים בדרגות שונות של סדר דיוק או הפרשים סופיים מסדר גבוה. גישה אחרת לפתרון PDE היא בשימוש בשיטת ה-AMR. שיטה זו אשר יש לה דמיון מסוים לשיטת המולטי גריד (MultiGrid (MG)), מקרבת את הפיתרון על גבי רשתות חישוב המתעדנות בהתאם להתנהגות הבעיה (הקרוב הראשון) ופותרת עבור רשת מעודנת אדפטיבית לקרוב מסדר גבוה יותר עד להשגת פתרון העונה על קריטריון התכנסות נתון.

השוואה שנעשתה בין גישת AMR לבין שיטות אחרות מסדר גבוה בעבודה של Jameson (Jameson, 2003), הראתה שאפילו AMR מסדר שני אינה יכולה להתחרות בסכמות מסדר 8. מצד שני, כאשר AMR היא מסדר רביעי היא עדיפה על פני כל סכימה מסדר גבוה שאינה אדפטיבית.

ב. שיטות חישוביות לגראנג'יאניות:

בניגוד לשיטות החישוב האויילירניות בהן החישוב של התהליך נעשה בנקודות מרחב קבועות, בשיטת לגראנג' (Lagrange) החישוב צמוד לחלקיק דמיוני הנע יחד עם הזורם. אומנם, שיטה זו דורשת משאבי מחשוב גדולים יותר, אולם היא אינה כבולה לרשת חישוב (קבועה או משתנה בזמן) והגדרת תנאי גבול, פיסיקה-מרובה (מס' פאזות), סקאלרים פאסיביים וכו', ולכן היא הרבה יותר פשוטה למימוש.

שיטת ה-Smooth Particle Method (SPH) הוצעה לראשונה על ידי Gingold ו-Monaghan (1977) בנושא של כוכבים לא כדוריים, ובנפרד על ידי Lucy (1977) בהקשר של פיסיקת פלזמה. שיטת ה-SPH הורחבה ושוכללה ונעשתה פופולארית בקרב קהילת ה-CFD לצורך וויזואליזציה למטרות בידור, קולנוע ופרסום. כאמור, היתרון בשיטה זו הוא הנוחות בשימוש לבעיות מורכבות מבחינה פיסיקאלית וגיאומטרית. זהו בדיוק המקרה של הצונאמי, במיוחד בשלביו הסופיים: הזרימה בטבעה תלת-מרחבית, טורבולנטית, מרובת פאזות, בעלת גיאומטריה מסובכת (של מבנה החוף לפני היבשה), תנאי שפה משתנים (סחף, שברים והרס) ואפקטים של מורכבות נוספים.

אחת התוכנות הפתוחות, SPHYSICS המתוארת בהמשך, נראית כמתאימה לחישובים מעין אלה. תוכנה פתוחה אחרת שניתן להשתמש בה היא FLUIDS, כתובה ב-C++ ומתאימה לחישובים בזמן אמת ובעיות תלת-ממדיות.

5.2 סקר תוכנות פתוחות

בשטח חישובי זרימות הנדסיות ופיסיקאליות מצויות תוכנות רבות ומגוונות. ניתן לחלקן לשתי קבוצות עיקריות: תוכנות מסחריות ותוכנות פתוחות. בין התוכנות מהקבוצה הראשונה נציין את ה-MIKE 21, FLUENT, DELF3D ואחרות. תוכנות אלו מקצועיות וניחנות במגוון תכונות מעבר ליכולות הייעודיות שלהן (דהיינו פתרון מערכת הזרימה) כגון, יעילות חישובית גבוהה (מקבול), ממשק גראפי להפעלה, כלי הכנת נתונים לפני העיבוד וכלי ניתוח תוצאות. תוכנות אלו גם מלוות בתמיכה מקצועית רצופה ועדכונים מחזוריים. החיסרון העיקרי בעלותן הגבוהה, סדר גודל של כמה עשרות אלפי דולרים. התוכנות הפתוחות לעומתן, עלותן אפסית, אך הן דורשות מהמשתמש ידע רב מקצועי, הן בנושא החישובי גרידא (המתמטי פיסיקאלי), והן בנושאים נלווים כמו ידע בתכנות ופיתוח בשפות מחשב שונות, ידע במיקבול וויזואליזציה.

במסגרת עבודה זו התמקדנו באיתור תוכנות פתוחות בעלות התכונות הדרושות לממש את מטרות הפרויקט בכלים ובתקציב שעמדו לרשותנו. טבלאות 1, 2 להלן מסכמות את החיפוש שבוצע. יצוין כי רשימה מקיפה יותר של מודלים קיימים, אף כי בחלקם אינם זמינים, פורסמה במהלך המחקר בדו"ח התקדמות של פרויקט המחקר האירופי TRANSFER שתוצריו אמורים להיתרם גם לטובת תוכנית ICG/NEAMTWS. רשימה זאת מוצגת בנספח מס' 1.

טבלה 1. תאור מתומצת של מודלים ספרתיים עקריים להדמייני צונאמי – איפיוניים כלליים

כינוי המודל	סוג המשוואות	טכניות נומריות	סוג רשת	מודל יצירה	הרטבה ויבוש	תכונות
ANUGA Hydrodynamics modeling (Australia)	Shallow water wave equations	<ul style="list-style-type: none"> Finite volume method Central upwind scheme for calculating the fluxes across each volume boundary Explicit Euler method with variable time stepping dynamically adapted to the observed CFL condition 	<ul style="list-style-type: none"> Triangular cells 	<ul style="list-style-type: none"> MOST and URS models 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Very Robust and flexible Capable of capturing hydraulic shocks No breaking included The surface is assumed open All spatial coordinates are assumed to be UTM Finite volume method is not very fast
Tsunami (Germany)	Shallow water wave equations	<ul style="list-style-type: none"> Finite element method Explicit leap-frog time stepping Conforming/non-conforming linear finite element spatial discretization 	<ul style="list-style-type: none"> Unstructured triangular Delaunay triangulation with possibility for local mesh refinement according to bathymetry & topography gradient and local discretization 	<ul style="list-style-type: none"> Okada parameter based generation Initial wave height as sea surface height deviation Others 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Local mesh refinement Efficient numerical integration Seamless inundation Seamless source integration
Tsunami (Japan)	Shallow water wave equations	<ul style="list-style-type: none"> Finite difference method Leap-frog scheme method 	<ul style="list-style-type: none"> Nested grids 	<ul style="list-style-type: none"> Fault dislocation model based on Okada, Manshinha and Smylie 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Main features: propagation and run-up
NAMI DANCE (Turkey-Russia)	Shallow water wave equations	<ul style="list-style-type: none"> Finite difference method Leap-frog scheme method 	<ul style="list-style-type: none"> Rectangular constant grid domain 	<ul style="list-style-type: none"> Okada 1985 for Co-seismic Tsunamis Arbitrary shape and location of initial wave 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Creates the initial wave from different sources Generates the sea state at specific time intervals of tsunami during simulation Simulates, animates and visualizes inundation of tsunami given arbitrary shaped bathymetry

טבלה 1. תאור מתומצת של מודלים ספרתיים עקריים להזמייית צונאמי – איפיונים כלליים - המשך

תמונות	הרעבה ויבוש	מודל יצירה	סוג רשת	טכניות נומריות	סוג המשוואות	כינוי המודל
<ul style="list-style-type: none"> Creates the initial wave from different sources Generates the sea state at specific time intervals of tsunami during simulation 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Okada 1985 for Co-seismic T sunamis Arbitrary shape and location of initial wave 	<ul style="list-style-type: none"> Rectangular constant grid domain 	<ul style="list-style-type: none"> Finite difference method Leap-frog scheme method 	Shallow water wave equations	TU/NAMI N2 (Japan-Turkey)
<ul style="list-style-type: none"> Explicit finite difference scheme: fast -Nested grids, flexible grid setup, balance between efficiency and accuracy Multiple generation mechanism: fault model, input profile, submarine landslide, incident wave maker 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Submarine landslide Elastic fault model Any surface deformation 	<ul style="list-style-type: none"> Arakawa C grid Cartesian or spherical coordinates system Staggered, nested grids 	<ul style="list-style-type: none"> Finite difference method Leap-frog scheme method 	Shallow water wave equations	COMCOT (USA)
<ul style="list-style-type: none"> Fast algorithm Gives quite accurate results 	Moving mesh technique, by Titov and Synolakis (1995)	<ul style="list-style-type: none"> Based on elastic deformation theory of Gusiakov (1978) and Okada (1985) 	<ul style="list-style-type: none"> Non-uniform Nested grids 	<ul style="list-style-type: none"> Finite difference method combined with splitting ADI and characteristics technique 	Nonlinear Shallow water wave equations	MOST (USA)
<ul style="list-style-type: none"> Adaptive mesh refinement User defined nested levels Robust in presence of Bores and steep gradients 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Multi segment fault model Any surface deformation in space and time 	<ul style="list-style-type: none"> 2D+1 rectangular mesh with adaptive refinement 	<ul style="list-style-type: none"> Finite volume Riemann solvers 	Nonlinear Shallow water wave equations	GeoClaw (USA)
<ul style="list-style-type: none"> Wave breaking 	Yes	<ul style="list-style-type: none"> Wave generator or slides 	<ul style="list-style-type: none"> Cartesian, structured 	<ul style="list-style-type: none"> Finite volumes, fourth order, implicit, domain decomposition, MPI 	Various types of Boussinesq	pcOLLWAVE (USA)

טבלה 2. תאור מתווננות של מודלים ספורטיים עקריים להדמיית צונאמי – יישומי תוכנה ותמורה

תחומי היישומים ואפליקציות של המודל	URL	ממשק למשתמש	פלטפורמה	שפות תוכנה	מערכת הפעלה	כינוי המודל
<ul style="list-style-type: none"> -Tsunami inundation modeling, Dam break modeling, Storm-surge inundation modeling, research, hydrodynamic validation work. 	https://datamining.anu.edu.au/anuga	<ul style="list-style-type: none"> - Scripting API 	<ul style="list-style-type: none"> - PC - Clusters 	<ul style="list-style-type: none"> - Python - C 	<ul style="list-style-type: none"> - Linux - Windows 	ANUGA Hydrodynamics modeling (Australia)
<ul style="list-style-type: none"> - Indian Ocean - Pacific Ocean: Chile 	www.gitews.de http://atforge.awi.de/gf/project/tsunami/	<ul style="list-style-type: none"> - Command line - Automation and Web services are planned 	<ul style="list-style-type: none"> - Workstation - PC - Compute server 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 90 - Tools in Matlab and C/C++ 	<ul style="list-style-type: none"> - Unix - Linux - Windows - Mac 	Tsunami Sumatra (Bengkulu) Tsunami 1883 Krakatau 1935 North Sumatra 1992 Flores 1994 East Java 2000 Banggai 2004 Aceh 2006 South Java
<ul style="list-style-type: none"> - Indian Ocean, Andaman sea, Mekakka Strait, Java - Indonesia, Sumatra, Maldives, India, Macran Case, Madagascar, Kenya, Tanzania, South China Sea, Malaysia, Singapore, Mediterranean Sea, Black Sea, Pacific Ocean: Chile 	http://www.iode.go.jp/1nfo/ioc_doc/Manual/12_2367eb.pdf http://namida.nce.ce.mtu.edu/tr	<ul style="list-style-type: none"> - N/A - User Interface Available 	<ul style="list-style-type: none"> - Any 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran - C++ 	<ul style="list-style-type: none"> - Dos - Windows - Unix - Windows 	Tsunami Sumatra (Japan) NAMIDANCE (Turkey-Russia)

טבלה 2. תאור מתומצת של מודלים ספיריטניים עקריים להזמנית צונאמי – "ישומי תוכנה ותומרה - המעמד

תחומי השימוש ואפליקציות של המודל	URL	ממשק למשתמש	פלטפורמה	שפות תוכנה	מערכת הפעלה	כינוי המודל
<ul style="list-style-type: none"> -Indian Ocean, Andaman sea, Mekakka Strait, Java -Indonesia, Sumatra, Maldives, India, Macran Case, Madagascar, Kenya, Tanzania, South China Sea, Malaysia, Singapore, Mediterranean Sea, Black Sea, Pacific Ocean 	http://yalciner.cdmu.edu.tr/h2/h2-manual.pdf	<ul style="list-style-type: none"> - Command Line 	<ul style="list-style-type: none"> - PC 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 	<ul style="list-style-type: none"> - Windows 	<p>TUNAMI N2 (Japan-Turkey)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Tsunami propagation - Run-up and inundation - Tsunami mitigation 	http://ceeserver.cce.nell.edu/pill-group/comcat.htm	<ul style="list-style-type: none"> - Input parameter file 	<ul style="list-style-type: none"> - IBM PC compatible (x86_x64) 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 90 	<ul style="list-style-type: none"> - Windows (32-bits) - Linux (x86_x64) 	<p>COMCOT (USA)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Indian Ocean, Pacific Ocean, Mediterranean Sea, Aegean Sea 	http://nctr.pmel.noaa.gov/model.html	<ul style="list-style-type: none"> - ComMIT user interface used by NOAA - At FORTH command driven. 	<ul style="list-style-type: none"> - PC 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 77 	<ul style="list-style-type: none"> - Linux 	<p>MOST (USA)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Sumatra - Tsunami Propagation - Tsunami run-up and inundation 	http://www.amath.washington.edu/~claw	<ul style="list-style-type: none"> - Input parameter file 	<ul style="list-style-type: none"> - IBM PC compatible 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 77 	<ul style="list-style-type: none"> - Unix - Linux 	<p>GeoClaw (USA)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Various 	http://isec.nacse.org/moodels	<ul style="list-style-type: none"> - Command driven/batch run 	<ul style="list-style-type: none"> - various with MPI libraries installed 	<ul style="list-style-type: none"> - Fortran 90, MPI libraries 	<ul style="list-style-type: none"> - Linux - Windows 	<p>PCOLLWAVE (USA)</p>

עבור מספר תוכנות שניתן היה להתקינן על תחנת העבודה שברשותנו (DELL PRECISION T7400 בעלת 8GB RAM) בוצעו גם בדיקות מפורטות יותר המתוארות להלן. חבילות התוכנה החופשיות שעמדו לרשותנו הן:

- FUNWAVE
- COMCOT
- pCOULWAVE
- GeoClaw

5.2.1 FUNWAVE (Fully Non-Linear Boussinesq Wave Model) (Kirby, Wei, Chen, 1998) (Kennedy, Dalrymple)

תוכנה זו מבוססת על פתרון מלא של המשוואות הבלתי-ליניאריות של בוסנסק בקואורדינטות עקומות. הגישה הייחודית במודל זה היא השימוש בקירובים מסדר גבוה, וזה על מנת להתגבר על שגיאות הקיצוץ אשר יש להן פוטנציאל לגדול לרמה של איברים המתארים אפקטים של דיספרסיה חלשה. באופן ספציפי, הקידום בזמן נעשה בשיטת Adams-Bashforth-Moulton מסדר רביעי. איברים המכילים נגזרות מרחביות מסדר ראשון מקורבים בשיטת הפרשים סופיים מסדר רביעי. איברי דיספרסיה מסדר גבוה יותר מקורבים באמצעות הפרשים מסדר שני (Wei et al. 1995).

גרסה ממוקבלת נמצאת בפיתוח וניתן יהיה להשתמש בה בקרוב. קיימת חבילה הנקראת GEOWAVE שהיא אינטגרציה של FUNWAVE ושל תוכנה נוספת TOPICS אשר יעודה יצירת תנאי ההתחלה של הצונאמי. הגרסה שברשותנו אינה כוללת מודל יצירת הצונאמי ויש לספק את הנתונים ממקור חיצוני.

Falk Feddersen (<http://ccs.ucsd.edu/~falk/models.html>) פיתח גרסה המבוססת על הקוד הזה אך כתובה בשפת C ויש בה מספר שיפורים נומריים (FUNWAVE -C).

5.2.2 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) (Liu 1994)

תוכנה זו פותחה באוניברסיטת קורנל והיא מבוססת על שיטת מולטי-גריד אשר משלבת עד ארבע רשתות חישוביות משולבות (Liu et al. 1988). ההתקדמות בזמן נעשית בשיטת הפרשים סופיים (leap-frog) לפתרון משוואות מים רדודים. הטכניקה של רשתות משולבות זו בזו (הרמה הנמוכה מכילה את הרשתות ברמות היותר גבוהות) מאפשרת יחד עם שיטת המולטי-גריד לדמות בעיות בעלות טווח סקאלות (מרחביות) בסדר גודל האופייני לתופעת הצונאמי. בכל אזור רשת ניתן להגדיר את סוג הרשת (קרטיזיאנית או גיאופיסית) ומערכת המשוואות המחושבות (ליניארית או בלתי-ליניארית). החבילה מצוידת גם במספר מודלים ליצירת גל הצונאמי (סוליטון או גלישה).

את התוכנה ניתן להתקיין על פלטפורמת PC בעלת מערכת הפעלה Windows-XP או Linux. הקוד הקיים בידינו אינו ממוקבל, ולא ידוע על פעילות בנושא זה בקבוצת הפיתוח. ניתן לבצע מקבול באמצעים

אוטומטיים (בקומפיילר של Intel) או ידנית (MPI). החבילה הותקנה גם במערכת UNIX של SGI (Origin2000) וקומפלה בעזרת אופציות מקבול אוטומטי. נראה לפי הביצועים שיש לבצע מקבול ידני על מנת לשפר את היעילות ולהאיץ את החישוב המקבילי.

על פי המדווח בספרות, התוכנה נוסתה על מספר מקרים פשוטים כמו גם על מספר אירועי צונאמי מפורסמים שאירעו בתקופה האחרונה. בפרט, הקוד בגרסתו המוקדמת נבדק עבור הצונאמי של צילה 1960 והצונאמי של טיוואן הואה-ליאן ב-1986, והראה התאמה יפה לנתונים שנמצאו בשטח. בגרסתה המתקדמת יותר נבדקה תוכנה זו שוב עבור אירועי הצונאמי הבאים:

- הואה-ליאן 1986 (Liu et. al.1998)

- אלגיריה 2003 (Wang et. al. 2005)

- האוקיאנוס ההודי 2004, כולל runup והצפה.

- האוקיאנוס ההודי 2005 (Wang et. al. 2006)

לחבילה מצורף מדריך קצר להפעלה וכן מספר דוגמאות בסיסיות, כולל הצונאמי בפרו, אוגוסט 2007.

5.2.3 pCOULWAVE (Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package) (Lynett, Liu 2002)

תוכנה המבוססת על מודל מלא בלתי-ליניארי יחד עם גלי דיספרסיה (Kim et. al. 2008, Lynett et. al.) (Lynett et. al. 2002, Lynett et. al. 2002, Lynett et. al. 2004). התוכנה מכילה בשלב זה של הפיתוח מודול המאפשר יצירת גלי ים. מודול זה אינו כולל יצירה הנובעת מגלישה תת-ימית, אך ניתן להיעזר בקבוצת הפיתוח במקרה וכן מעוניינים לחשב אירוע כזה.

המודל מתבסס על שתי סכמות נומריות אפשריות: שיטת הפרשים סופיים מסדר גבוה (Finite Differences (FD)) ושיטת נפחים סופיים מסדר גבוה (Finite Volume (FV)). השיטה הראשונה הנחשבת "מסורתית" מדויקת מאד ונותנת פתרונות מהירים אך מנגד, היא סובלת מאד מאזורים בהם יש גרדיאנטים חזקים בפתרון ונוטה להתפוצץ במקרים מעין אלה. השיטה השנייה, FV, המבוססת על סכימת נפחים סופיים מסדר גבוה ומקרבת פותרן של Reimann, בעלת יכולת לתפוס הלמים, הינה מאוד יציבה ומדויקת. שיטה זו תוסיף שיכוך ספרתי (numerical dissipation) עבור מצבים בהם גרדיאנטים חזקים אינם מתוארים ברזולוציה מספקת. מסיבות אלו, שיטת ה-FV דורשת כ- 150% - 200% יותר עבודה חישובית ממקבילה, ה-FD. מהניסיון של המפתחים, שיטת ה-FV מומלצת לשימוש על פני שיטת FD.

השיטה הנומריית של pCOULWAVE מתבססת על סכימת חיזוי-תיקון (predictor-corrector) מסדר רביעי להתקדמות בזמן. נגזרות מרחביות מסדר מוביל במשוואות הזרימה מקורבות בדיוק מסדר רביעי בעוד שאברים דיספרסיים הינם מדויקים מסדר שני. באופן פורמאלי, המודל מדויק בזמן כמו Δt^4 ובמרחב כמו Δx^4 ו- $\mu^2 \Delta x^2$.

לתוכנה קיימת גרסת MPI ממוקבלת הניתן להתקנה על מערכת אשכול (cluster) מרובת מעבדים. הפעלת התוכנה נעשית באמצעות סקריפט שבו מוגדרים המשוואות, הפרמטרים השונים של הבעיה ותנאי שפה והתחלה. לחבילת התוכנה מצורפים תיעוד מפורט, דוגמאות בסיסיות ללימוד ובדיקת ההתקנה.

5.2.4 GeoClaw (LeVeque 2006, George D. 2007)

זוהי הרחבה של חבילות התוכנה CLAWPACK (Conservation Laws Package) ו-AMRCLAW (Adaptive Mesh Refinement) לבעיות שמקיימות חוקי שימור והיא מבוססת על פתרון משוואות מים רדודים בצורתם הפיסיקלית המשמרת. השימוש בחוקי שימור משפר את הקרוב הנומרי וכתוצאה מכך היעילות הנומרית עולה וניתן לקבל פתרונות לבעיות מסובכות פיסיקלית גיאומטרית במחיר נמוך יותר. שיטת ה-AMR מאפשרת עידון אוטומאטי לפי התנהגות הבעיה ותנאי השפה ובכך מעלה בצורה זו את היעילות הנומרית (LeVeque 2006, LeVeque 2002, George 2008, George 2006, Berger et. al.) (1998).

התוכנה הינה בתהליך הרחבה ועדיין לא קיימת גרסה ממוקבלת. תנאי יצירת הצונאמי ניתנים על ידי נתוני פרופיל קרקעית הים והשתנותה כפונקציה של הזמן. בחינה ראשונית של תוכנה זו מעלה את המסקנות הבאות:

התוכנה כתובה בעיקרה ב-FORTRAN90 וניתנת להתקנה במערכת הפעלה Linux (UNIX) באמצעות קומפילרים של gfortran או ifort (Intel) וכן ניתנת להתקנה על WINDOWS. היא נוסתה גם בהצלחה על UNIX של SGI בשימוש בקומפילר של החברה f90. שימוש בו מאפשר מקבול אוטומטי (בגישת Shared memory). מניסיונות ספורים נראה שביצועי המקבול עבור מספר לא רב של מעבדים נראים סבירים.

השימוש בקומפילר ifort של אינטל נראה מבטיח הן ברמת הביצועים על מעבד אחד, והן בשימוש באופציית מקבול אוטומטי. כאן חלק מהקוד יכול לרוץ על מספר ליבות בו זמנית ולקבל האצה של החישובים. נראה שיש צורך לבצע עבודת מקבול מסודרת על מנת לנצל בצורה מיטבית ארכיטקטורת מחשב מרובת מעבדים וליבות (ואולי גם גריד).

בעיה משמעותית נוספת הדורשת התייחסות קשורה לזיכרון ה-HEAP בזמן הריצה. כאשר פותרים בעיות ברזולוציה גבוהה, יש צורך בהקצאה של כ-50 מיליוני מילים. הזיכרון בשלב הנוכחי של הפיתוח אינו מבוזר וזה מהווה חסם עליון לגודל/רזולוציה של בעיות הניתנות לפתרון.

התיעוד להפעלת התוכנה הינו ברמה סבירה ויש אפשרות להתייעץ ברמה מסוימת עם המפתח של ההרחבה (ל-Claw). קיימות גם מספר דוגמאות סינטטיות וכן של מקרים אמיתיים (הצונאמי של אינדונזיה).

התוכנה מופעלת ע"י סקריפט ומספר נוסף של קבצי קלט פשוטים בהם יש פרוט קצר לגבי המשמעות של כל פרמטר. יש צורך להכין מראש קבצי בתימטריה/טופוגרפיה לפי הפורמט ומבנה הנתונים הנדרשים ע"י התוכנה.

נתונים אלה מגדירים את רשת החישוב (שיכולה להיות nested) ועבור כל רשת נקבעת רמת הרזולוציה המזערית והמרבית. כמו כן יש לקבוע גם צעד זמן מרבי ומידת עידון הצעד כתוצאה מהעידון במרחב ובהתחשב בתנאי CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) המתנה את היציבות הנומרית.

התוצאות ניתנות בפורמט ASCII והן כוללות עומק המים, רכיבי התנע בכיוון קווי האורך והרוחב וגובה פני המים. בנוסף לזה התוכנה יוצרת קובץ אתחול המאפשר המשך ריצה לזמן חישוב ארוך יותר.

חבילת התוכנה כוללת גם מספר קבצי MATLAB שיעודם ביצוע post-processing. החבילה מאפשרת לייצר תצלומי בזק (snapshots) בזמנים נתונים של הריצה, ועל בסיס נתונים אלה פותחה במסגרת הנוכחית תוכנה תחת MATLAB ליצירת אנימציה של כל התרחיש וכן תצוגות גרפיות נוספות.

5.3 השוואת התכונות והיכולות של התוכנות שנבחנו

כל התוכנות שבידנו לוקות בתיאור מעמיק של מקור הצונאמי. לחלקן, כדוגמת FUNWAVE, לא קיים מודל של יצירה ויש לספק את המקור בדרך עקיפה. עבור ה-pCOULWAVE לא קיים מודל יצירה המבוסס על גלישה. מבחינה הגדרת המקור, החבילה COMCOT היא המקיפה ביותר.

הממשק למשתמש בתוכנות GeoClaw ו- COMCOT נראה נוח, בשעה ששאר התוכנות קשות יותר להפעלה ודורשות זמן רב יותר ללימוד. לדוגמה, התוכנה TUNAMI-N2 שברשותנו בשלב זה אינה מתאימה לביצוע החישובים מהסיבה שהתיעוד הטכני שלה לוקה וחסר. יתר על כן, יש בעיות קשות בבניית התוכנה ולצערנו לא ניתן היה להשיג את התמיכה הנדרשת מהמפתחים.

שיטות החישוב בכל החבילות שבידנו מבוססות על סכמות מסדר גבוה, פרט לזו של GeoClaw אשר מבוססת על AMR (בעל אפשרות לסדר גבוה) וקיום חוקי שימור (של מסה, תנע, וכו'), ולכן היא מצטיינת ברמת הדיוק הנומרי שלה על פני החבילות האחרות (עבור מס' נתון של נקודות סריג) והיעילות הנומרית שלה גבוהה.

הממשק למשתמש התוכנה GeoClaw נמצא מאוד ברור ונוח ובמקרה של COMCOT מעט פחות, ולעומת זאת שאר התוכנות נראו קשות יותר מבחינת זמן לימוד, קליטה והפעלה.

מבחינת התאמה לשימוש על מערכת מרובת מעבדים: עבור pCOULWAVE קיימת גרסת MPI ועבור ה-FUNWAVE עומדת לצאת גרסה ממוקבלת. שאר התוכנות אינן ממוקבלות ויש לבצע פעילות פיתוח מקומית בנושא זה. לכל התוכנות מצורפות מספר תוכניות (MATLAB בד"כ) לעיבוד התוצאות. לחבילת GeoClaw נמצאו כלים יותר מסודרים.

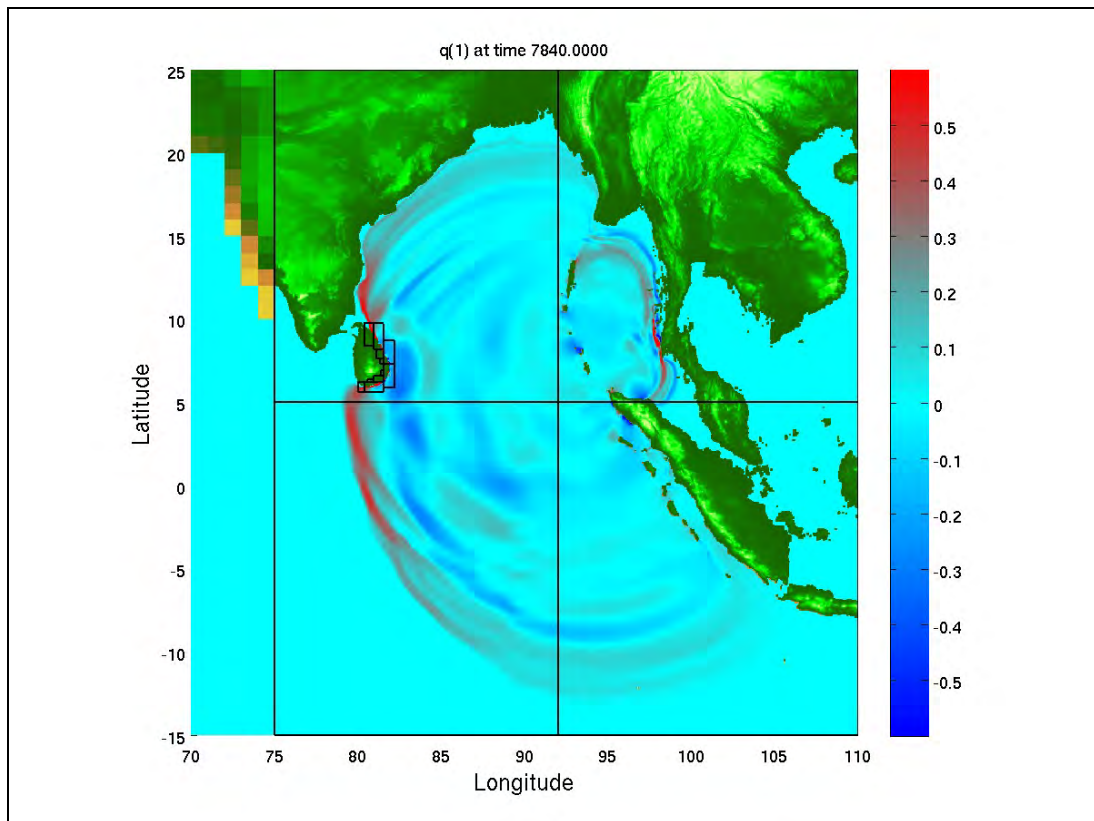
תוכנת COMCOT נבדקה ביתר פרוט עבור מספר מקרים (Benchmarks), והתוצאות נבדקו ונמצאו מתאימות לאלו שמדווחות בספרות. לצורך הבחינה, נבנו מספר כלים לעיבוד התוצאות, בין השאר ויזואליזציה של פני הים כפונקציה של הזמן. מתוך תוצאות אלה ניתן היה ליצור סרט אנימציה שמאפשר המחשה של האירוע מתחילתו ועד סופו. כלי זה מסייע לאתר בעיות נומריות שונות, כמו תת-רזולוציה או צעד בזמן גדול מידי וכו'.

תוכנת GeoClaw הותקנה על פלטפורמת לינוקס ובוצעו מספר בדיקות בסיסיות כמפורט להלן:

1. חישוב הצונאמי של סומטרה (26/12/04) – מתבסס על בתימטריה בעלת תאים ריבועיים אחידים בעלי צלע בגודל דקה. קבצי הנתונים, בתימטריה ותנועת קרקעית הים כתלות בזמן, הפרמטרים הנומריים והפיזיקאליים מצורפים לחבילת התוכנה. התוצאות שהתקבלו תואמות את אלו שפורסמו ע"י המפתחים ובספרות הכללית (ציור 4).

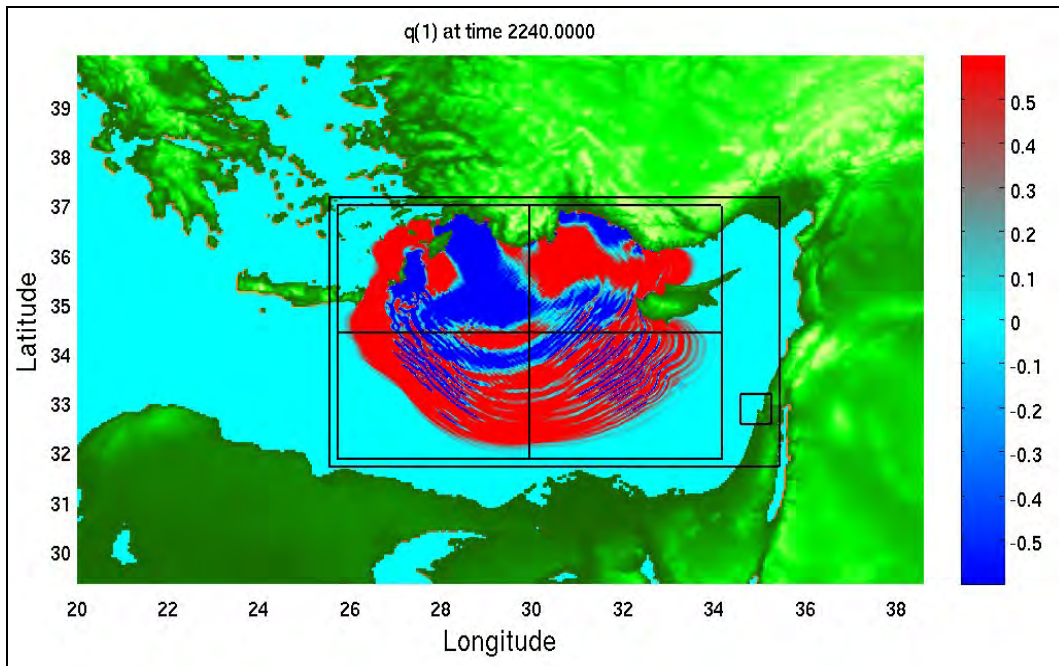
2. חישוב צונאמי המתבסס על נתוני הבתימטריה שנאספו עבור החישובים בפרויקט (ציור 5). נתוני פרופיל קרקעית הים בעת התרחיש לצורך הגדרת תנאי ההתחלה נבחרים בצורה שרירותית ומטרתם היא לכייל את מערכת החישוב וכל הנדרש לעיבוד התוצאות.

מתוך הלימוד לעיל והניסיון שהצטבר בחרנו לבצע את הסימולציות בשימוש בתוכנת GeoClaw ובחינה ואישוש חלק מהמקרים באמצעות תוכנת COMCOT.



ציור מס' 4: תצלום בזק עבור הצונאמי בסומטרה 2004 לאחר כ-7,600 שניות כפי שהתקבל מהרצת התרחיש בתוכנת GeoClaw, על בסיס נתוני דוגמה שמגיעה עם התוכנה.

השוואות נוספות בין התוכנות להרצת תרחישי צונאמי נעשו במסגרת סדנת ISEC Community Workshop: Simulation & Large-Scale Testing of Nearshore Wave Dynamics (July 8-10, Corvallis, Oregon) – (2009). בסדנה זו אשר הוקדשה למחקר בנושא תופעת הצונאמי והשפעותיה על הסביבה, נדונו בן השאר מספר תוכנות הנמצאות בחזית המחקר בתחום הזרימות הגיאופיזיקאליות, כדלהלן: Delft3D, CLAWPACK, Bouss2D, FUNWAVE, MOST, NEOWAVE, SELFE.



ציור מס' 5 : תצלום בזק עבור חישוב צונאמי אפשרי המתרחש בים התיכון, כפי שהתקבל בהרצת תרחיש בתוכנת GeoClaw, על בסיס נתונים בתימטריים של מבסיס SRTM30.

ההשוואות נעשו בין התוצאות החישוביות לתוצאות מדודות בבריכת הדמיה של גלי צונאמי, ע"י מספר חוקרים. השוואות בין תוכנות מובילות, כולל GeoClaw, הוצגו ע"י Lynett (http://isec.nacse.org/workshop/isec_workshop_2009/pres_thurs/1_lynnett_bmark) על המודלים הללו וכנגד מדידות שנעשו על מערכת ניסויית המדמה פגיעה של גלי צונאמי במבנה חופי. מערכת ניסוי זו שייכת ל- NEES Tsunami Research Facility באורגון, ארה"ב, ונבנתה במיוחד לחקר והדמיית יצירת והתפשטות גלי צונאמי וכדי לאפשר מדידה אמינה ומבוקרת של הגלים, הלחצים, והכוחות, כמו גם מאפיינים נוספים של התופעה. השוואות נוספות לגבי מודל MOST (אשר לצערנו לא נמסר לרשותנו למרות בקשתנו מהמפתחים), הנחשב כאחד המודלים המובילים בעולם ונמצא בשימוש NOAA, הוצגו באותה סדנה ע"י Tolkova והתברר כי בביצועיו יש בעיות שונות, במיוחד בהדמיות שלב ההצפה (http://isec.nacse.org/workshop/isec_workshop_2009/pres_thurs/7_tolkova_bmark).

ההשוואות שנעשו על ידי Lynett (ראה נספח 2), אשר מציגות שינויים של רום פני המים ושל שני הרכיבים האופקיים של המהירות בזמן ובמרחב על פי המודלים השונים כנגד מדידות בבריכת הניסוי, מלמדות כי התוצאות החישוביות של GeoClaw דומות מאוד לתוצאות החישוביות של מרבית התוכנות האחרות שנבחנו, ובמיוחד מאוד קרובות לתוצאות מודל DELFT3D שהינו מודל מסחרי, והיו בין התואמות ביותר למדידות בבריכת הניסויים.

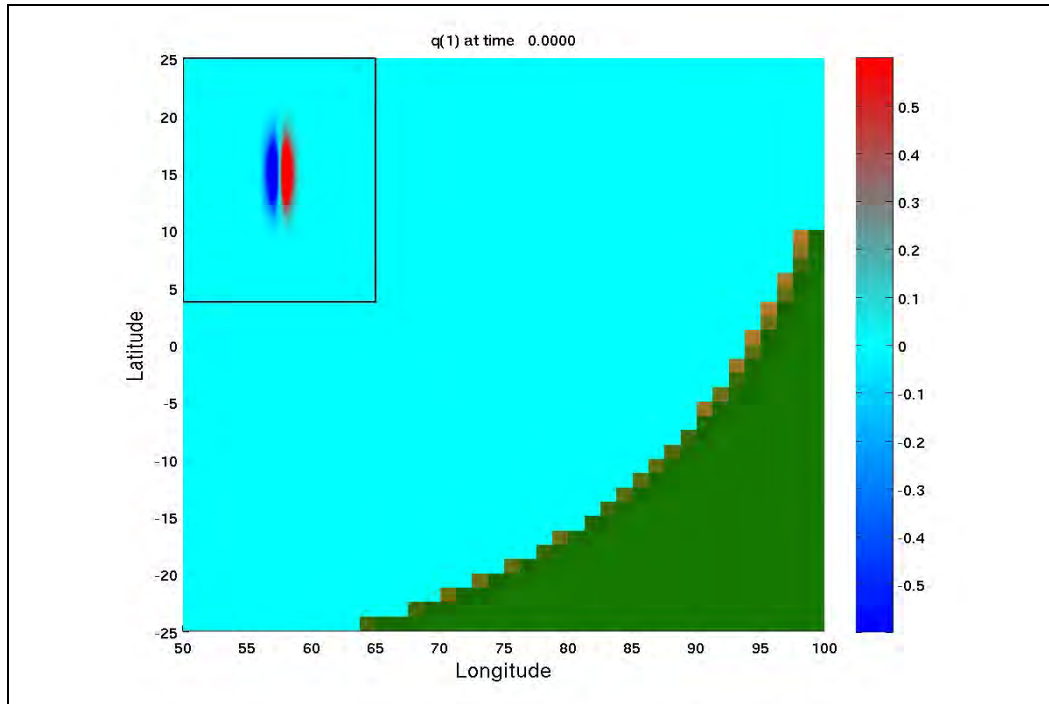
5.4 הרצות ניסיוניות: השוואת תכונות ויכולות של התוכנות שנבחנו

מבין התוכנות שנסקרו נבחרו כאמור שתיים שהיוו בסיס לסימולציית התרחישים השונים. ביתר פרוט, התוכנה GeoClaw שימשה ככלי העיקרי בבדיקת התרחישים השונים בעוד שבעזרת ה-COMCOT נעשו אימותים למקרים שחושבו. הסיבה לכך נבעה ממספר מאפייני תוכנה בעייתיים שהקשו והאטו מאוד את ההתקדמות בעבודה עם ה-COMCOT. לקראת סיום העבודה הנוכחית שוחררה גרסה 1.7 חדשה עבור ה-COMCOT הטוענת כי פתרה את הבעיות הנ"ל (http://ceeserver.cee.cornell.edu/pll-group/comcot_upd.htm), לרבות ריכוז כל נתוני הקלט בקובץ הפעלה יחיד הנקרא comcot.cml; גמישות בניהול קבצי הסריגים (בתימטריה) ללא צורך בתפירה ידנית מורכבת על מנת ליצר רשת אחידה וקונסיסטנטית; הוספת מנגנונים ליצירת גלים, בין השאר לגלישה; שליטה טובה יותר בפלט; מקדמי חספוס משתנים של Manning; ואתחול קר/חם של הריצה. אולם במסגרת הזמן שנותר לסיום העבודה לא ניתן היה לבחון שיפורים אלה. כל השיפורים האלה, אם אכן עובדים, מהווים קפיצת מדרגה ביכולות ה-COMCOT, ויהיה מעניין לבודקם לעומק מול ביצועי GeoClaw במסגרת עבודת המשך.

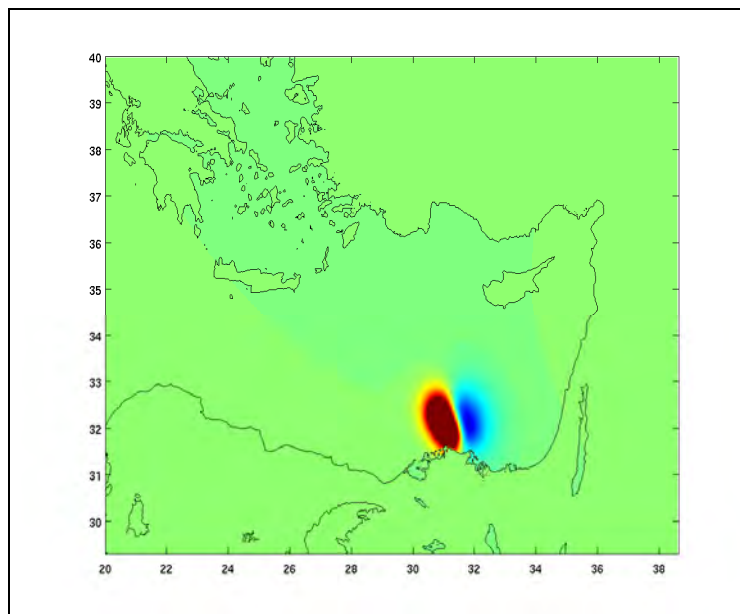
שתי התוכנות נבדקו עבור מספר אירועי צונאמי מוכרים (benchmark) וסייעו בכך לבדוק את התקנת התוכנות, בחירת פרמטרים נכונה (פיזיקאליים ונומריים) וכן פיתוח יכולות שליטה והתאמתן למקרים המיועדים לבדיקה. בנוסף לכך, נעשו מספר התאמות של התוכנות לארכיטקטורת המחשב שעליו בוצעו החישובים – XEON 8 cores. בפרט, נעשו מאמצים למקבול התוכנות שהוכתרו בהצלחה במקרה של ה-GeoClaw באמצעות כלי המקבול של Intel עבור openMP. עוד התאמות באותה תוכנה היו בפרמטרים הקשורים בהקצאת זיכרון עבור הגדלים הנומריים הספציפיים של הבעיה, כמו מספר מרבי של רמות עידון, מס' מרבי של מפות בתימטריה וזיכרון מזערי דרוש לחישוב. בתוכנת ה-COMCOT חלק מהבעיות האלו אינו רלוונטי כיוון שהגדלים הנומריים מוגדרים באופן דינאמי בשימוש בפורטרן 90. בעיות אחרות קיימות עבור תוכנת ה-COMCOT ועיקרן הוא ביצירת רשתות (nested) ובהגדרת המקור במקרה הגנרי (גלישה או שבר).

במסגרת ההכנות עבור ההרצות השונות פותחו מספר כלים להכנת הנתונים וקליטתם וכן כלי עיבוד תוצאות וניתוחם. כלים אלו כתובים בשפת פורטרן, MATLAB וסקריפט (unix). בין שאר התוצאות, גובה פני הים (מוחלט) ועומקם מוצגים בתור תמונות תצלום בזק וכן כאנימציות הממחישות את הדינאמיקה המיוחדת לתהליך הזה.

ההרצות הניסיוניות כללו מקרה סינטטי הבודק את התנהגות הקוד GeoClaw עבור תנאי התחלה המבוסס על הפרעת פני הים (ראה אנימציה A1 ע"י הפעלת קישור בציר מס' 6). הדוגמה ממחישה את יכולות הקוד בטיפול באזורים של רפלקציה ודיפרקציה משמעותיות (התנהגות בלתי ליניארית). דוגמה נוספת מציגה מקרה היפותטי הבודק את התנהגות הקוד COMCOT עבור מקור רעידת אדמה באזור הדלתא של הנילוס. (ראה אנימציה A2 ע"י הפעלת קישור בציר מס' 7).

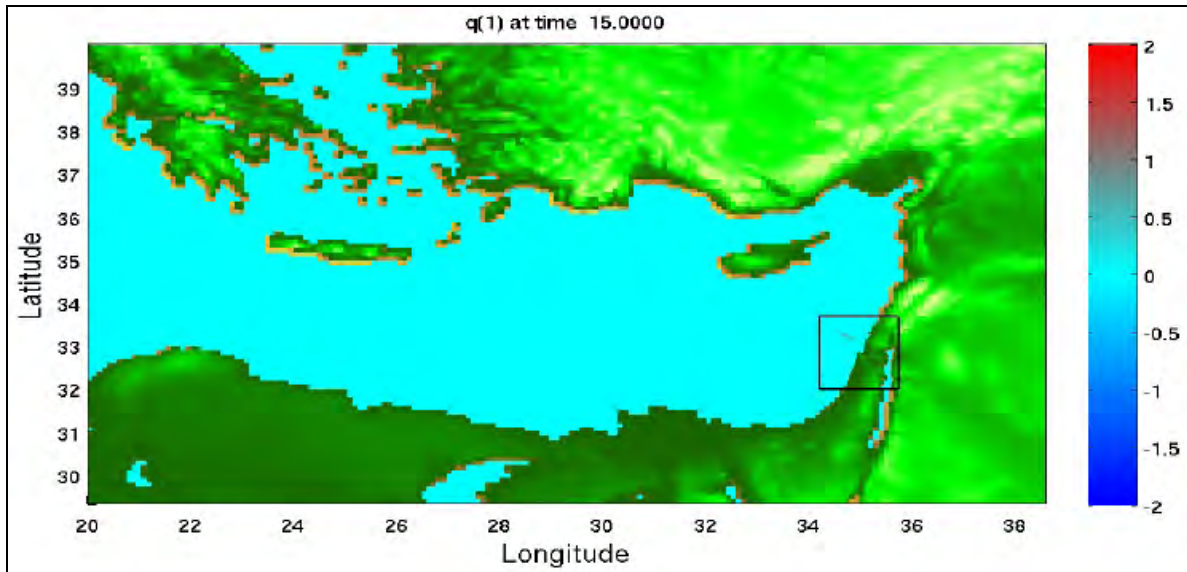


ציור מס' 6 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה A1, (להפעלת האנימציה [הקש CTRL](#) בקובץ PDF).
הסקאלה מראה את רום פני המים ביחס להתחלה בעוד האזורים בעלי גוון ירוק מסמלים יבשה.

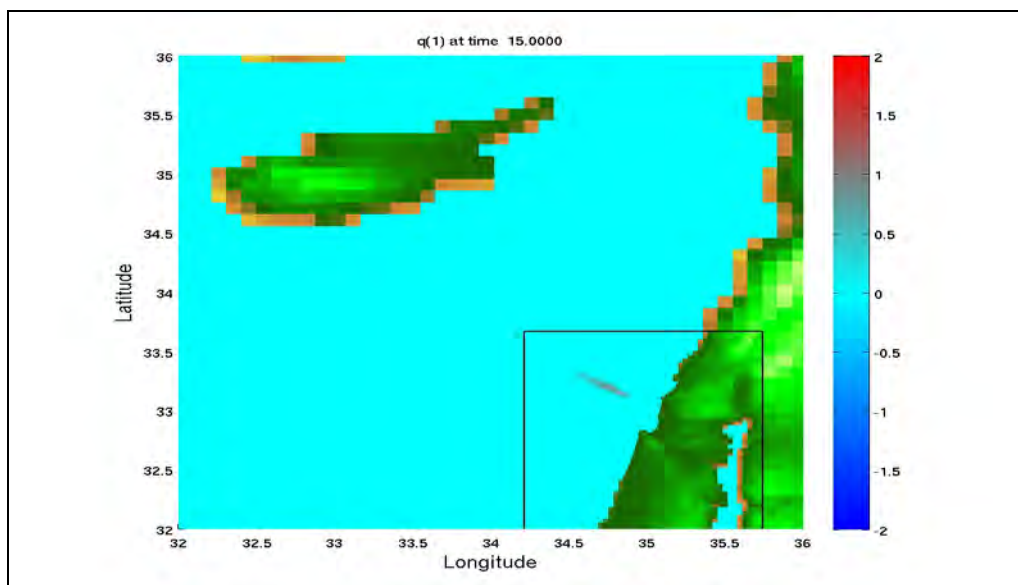


ציור מס' 7 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה A2 (להפעלת האנימציה [הקש CTRL](#) בקובץ PDF).

הרצה נוספת (אנימציה AG) דימתה צונאמי כתוצאה מרעש אדמה בקרבת החוף הצפוני של ישראל. ההרצה נעשתה באמצעות תוכנת GeoClaw ומוצגת בציורים 8 – 13, כאשר ציור 8 מציג תמונה מרחבית במזרח הים התיכון; ציור 9 (אנימציה AGZ1) מראה תקריב באזור שבין ישראל לקפריסין; ציור 10 (אנימציה AGZ2) מול חוף הכרמל המערבי; ציור 11 (אנימציה AGZ3) צפון ישראל ודרום לבנון; ציור 12 (אנימציה AGZ4) מתמקד בדרום מפרץ חיפה; ואילו ציור 13 (אנימציה AGZ5) מראה את נמל חיפה. הסקאלות מימין למפות מתארות את הגובה המוחלט של הגל ביחס לפני המים.

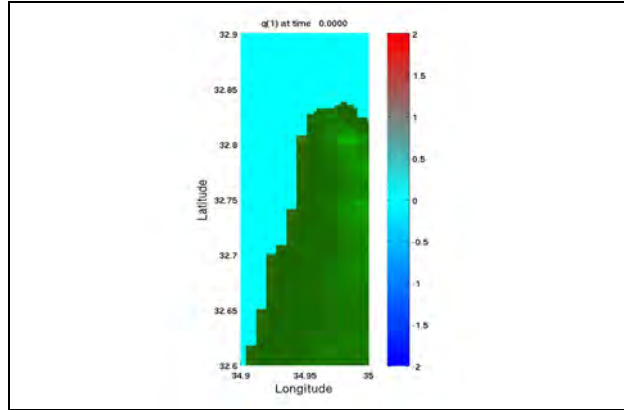


ציור מס' 8 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AG, מזרח הים התיכון. (הקש CTRL בקובץ PDF).

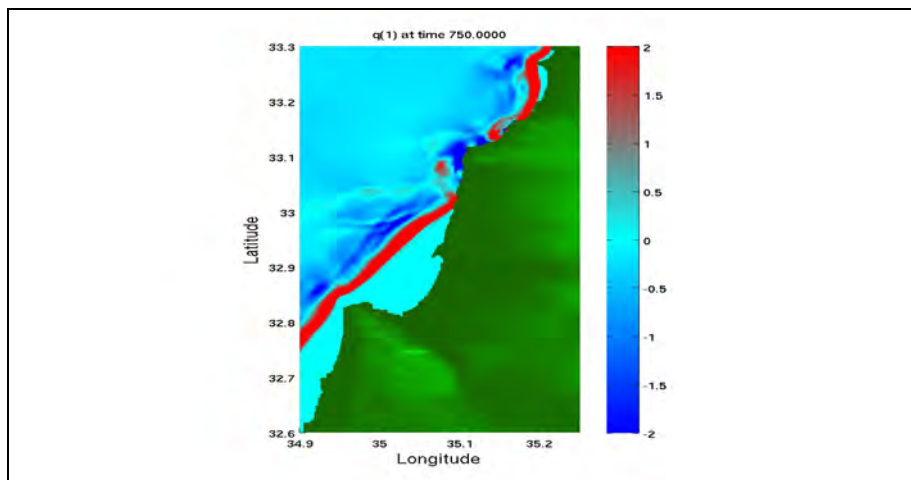


ציור מס' 9 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ1, האזור שבין ישראל וקפריסין. ראה אנימציה

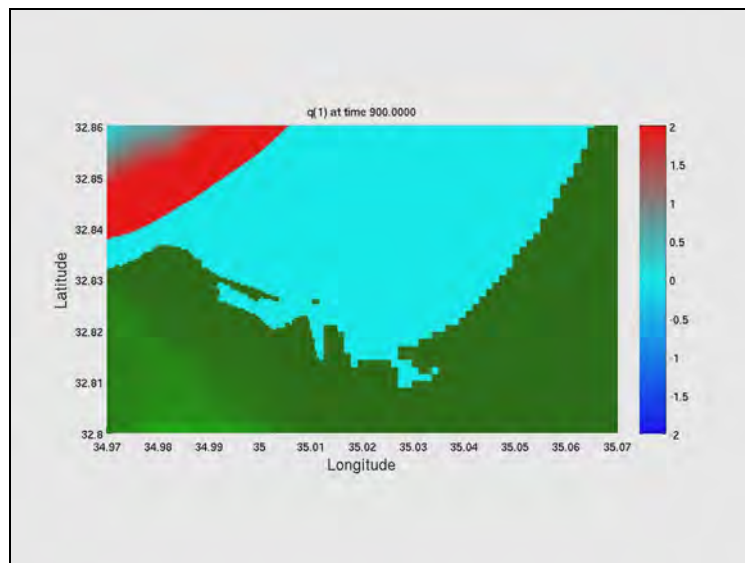
AGZ1, מהווה תקריב 1 של ההדמיה המתוארת ב-AG. [הקש CTRL](#) בקובץ PDF.



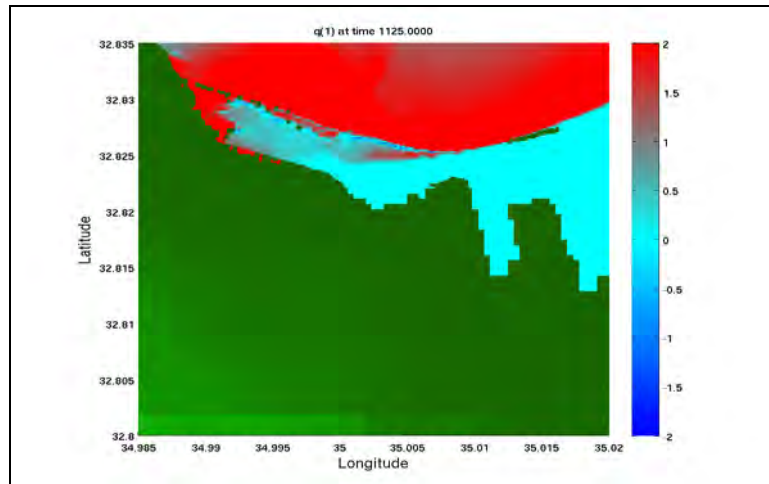
ציור מס' 10 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ2, אזור חוף הכרמל המערבי. ראה אנימציה AGZ2, תקריב 2 של ההדמיה המתוארת ב-AG. [הקש CTRL](#) בקובץ PDF.



ציור מס' 11 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ3, חופי צפון ישראל ודרום לבנון. ראה אנימציה AGZ3, תקריב 3 של ההדמיה המתוארת ב-AG. [הקש CTRL](#) בקובץ PDF.



ציור מס' 12 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ4, בדרום מפרץ חיפה. ראה אנימציה AGZ4, תקריב 4 של ההדמיה המתוארת ב-AG. [הקש CTRL](#) בקובץ PDF.



ציור מס' 13 – תמונת מצב התחלתי של אנימציה AGZ5, נמל חיפה. ראה אנימציה AGZ5, תקריב 5 של ההדמיה המתוארת ב-AG. [הקש CTRL](#) בקובץ PDF.

5.5 GeoClaw - התוכנה שנמצאה המתאימה ביותר להדמיות צונאמי בחופי ישראל

מכלל התוכנות הפתוחות ובעלות היכולות המיטביות לממש את המחקר הנדון, התוכנה GeoClaw נמצאה כמתאימה ביותר. ברמה הבסיסית, התוכנה פותרת את משוואות הזרימה עבור קירוב בלתי-ליניארי של מים רדודים תוך קיום חוקי השימור של הזרימה. השיטה הנומרית מבוססת על הפרשים סופיים משולבת עם הטכניקה של עידון אדפטיבי של רשת החישוב. הקוד כתוב בשפת פורטרן סטנדרטית ונמצא עדיין בפיתוח והתקדמות.

התוכנה מאפשרת הגדרה כללית של המקור בצורת תנועת פני הקרקע או באמצעות שינוי פני הים בזמן נתון. הגדרת המקור והבתימטריה ניתנים בקבצי נתונים פשוטים והתוכנה מבצעת באופן אוטומטי איחוד בין הרשתות השונות לרשת חישובית כוללת. השליטה על הקוד נעשית באמצעות קובץ עיקרי אשר מגדיר את מידת הדיוק שבו יבוצע הפתרון על כל רשת ורשת בנפרד, הן מבחינה מרחבית והן מבחינת צעד הזמן, תוך קביעה דינאמית של ערכיהם. כמו כן, ישנם פרמטרים אחרים הקשורים במשך זמן ההדמיה או בקביעת אתחול קר או חם. התוכנה מלווה בדוקומנטציה סבירה ובמספר דוגמאות.

נזכיר שהתוכנה הינה הרחבה של חבילה כללית (ClawPack) לפתרון בעיות זרימה מורכבות, המאופיינות בטווח סקאלות מרחבי גדול ומקיימות גם חוקי שימור. לאחרונה הוצגה התוכנה בסדנה שהוקדשה לחקר הצונאמי והשוותה לתוכנות פופולאריות אחרות ולניסויים שנעשו במערכת המדמה צונאמי. התוכנה הראתה ביצועים אטרקטיביים מבחינה התאמתה למדידות שבניסוי ובדרך כלל לא נפלה מיתר התוכנות שהוצגו.

יתרון נוסף משמעותי לעבודה נמצא בעובדה שאפשר היה למקבל את הקוד ולהשיג האצה משמעותית של החישובים. הדבר הוא קריטי כאשר מדובר בסימולציות ארוכות ביותר שכל אחת יכולה להמשך מספר ימים רצופים.

6. המקורות ליצירת צונאמי בחוף המזרחי של הים התיכון

רוב העדויות לצונאמי שפגע בחופי הים התיכון של ישראל מוכרות מדיווחים היסטוריים באלפיים השנים האחרונות (שלם, 1956; Salamon et al., 2007). לעומת אלה, קיים רישום מכשירי אחד משנת 1956 לאחר רעידת אדמה חזקה שהתרחשה בים האגאי (גולדשמיט וגלבו, 1986). בחינת הקשר של האירועים ההיסטוריים עם קטלוג רעידות האדמה שאירעו באזור, מעלה שמרבית אירועי הצונאמי קרו בעקבות רעידות אדמה במזרח הים התיכון ובסביבה הסיסמוטקטונית של מערכת טרנספורם ים המלח. מקרים אלה מייצגים את מסגרת אירועי הצונאמי שזמן החזרה שלהם קצר, מאות עד אלפי שנים, ונראה שאלה הם מרכיבי הסיכון העיקרי ביחס לחוף הים התיכון בישראל (Salamon et al., 2007). אולם, חשוב לציין שהמסגרת הסיסמוטקטונית והבתימטריה של מזרח הים התיכון מלמדים שקיימים מקורות נוספים שעלולים ליצור צונאמי משמעותי, אם כי בזמני חזרה ארוכים יותר, עשרות ומאות אלפי שנה

מחקר נוסף אשר התמקד באירועי צונאמי במזרח הים התיכון הציג זמני חזרה קצרים יחסית של 30, 120, ו-375 שנה לאירועי צונאמי בינוניים, חזקים וחזקים מאוד, בהתאמה, עבור אזור קפריסין ומזרח הים התיכון (Fokaefs and Papadopoulos, 2007). אולם, בחינת האירועים עליהם מתבססת הערכה זו ביחס לניתוח ההיסטורי שערכו Salamon et al. (2007), מעלה שחלק משמעותי מהאירועים בטעות יסודם, ועל כן הערכת הסיכון שמציגים Fokaefs and Papadopoulos (2007) מוגזמת ולא ניתן להסתמך עליה. הערכת סיכון נוספת על ידי Papadopoulos et al. (2007) עבור מזרח הים התיכון מציינת זמן חזרה של כ-140 שנה לאירועי צונאמי חזקים, אולם היא ממוקדת למזרח הקשת ההלנית ואזור רודוס בלבד.

מאחר ורובו ככולו של המידע הקיים על צונאמי בישראל הינו איכותי, ניתן לקבל הערכה כמותית של הסיכון רק בעזרת הרצת תרחישים במודל ממוחשב. לכן חשוב שהתרחישים יתבססו על פרמטרים ריאליים של הגורמים המחוללים צונאמי. שכן, הגזמה בעוצמתן של רעידות האדמה והפרזה בגודלן של הגלישות התת-ימיות תגרום להחמרה בהערכת הסיכון. יחד עם זאת, אי הוודאות הרבה שקיימת באומדן הגודל וזמני החזרה של הגורמים לצונאמי במזרח הים התיכון, והניסיון המר מרעידת האדמה בסומטרה 2004 והצונאמי באוקיאנוס ההודי שבא בעקבותיה, מנחים אותנו בשלב זה, להריץ תרחישי צונאמי של מצבי קיצון (worst case scenarios). בהמשך ניתן יהיה לברר את ההשפעה של צונאמי כתוצאה מגוון רחב יותר של מקורות, כולל תרחישים מאירועים בינוניים וקטנים.

6.1 מאפיינים כמותיים של הסיכון מצונאמי

כדי לאפיין את הסיכון מצונאמי מעוניינים לדעת בעיקר מהו גובה הגל המרבי הצפוי לאורך החוף ומהו השטח המועד להצפה כתוצאה מכל אחד מהתרחישים בנפרד. במקביל, גם גובה ירידת הגל ועומק נסיגת הים חשובים, בפרט לגבי ההשפעה הצפויה על מתקנים ותשתיות הממוקמים בים הרדוד סמוך לחוף. כמו כן, סדרת הזמן של גובה הגל, רום פני המים ומהירות הזרימה המקומית יכולים ללמד על השפעת הזרימה של המים (תנע למשל), מידע חשוב לצרכים הנדסיים (חישוב לחצים, כוחות ומומנטים) או סביבתיים (גריעת והסעת סדימנטים).

6.2 פרמטרים אופייניים של המקורות לצונאמי

לצורך דימוי תרחישים נדרש להגדיר את הפרמטרים של הגורם לצונאמי. לגבי רעידות אדמה, נדרש לדעת את מימדי אורך ורוחב ההעתק, כמות ההסטה האופקית והאנכית עליו ומיקומו במרחב. מימדים אלה קובעים למעשה את מגניטודת המומנט (Mw) של רעידת האדמה. מניחים שההעתק רדוד מאד כך שרכיב ההסטה האנכית ברעידת האדמה משקף את מידת ההסטה האנכית של קרקעית הים. מידע מסוג זה ניתן להסיק בעיקר מתוך הגיאולוגיה והסיסמוטקטוניקה של האזור הנדון. שילוב מידע היסטורי וגיאודטי יכול ללמד גם על זמני החזרה האופייניים של גורם רעידת האדמה הנדון.

לגבי גלישות תת-ימיות המידע מוגבל עוד יותר, מקורו בעיקר ממיפוי בתימטרי של קרקעית הים וחתכים סיסמיים. לצורך הרצת המודל מבקשים לדעת מהו שטח האזור הגולש ועובי החתך המתמוטט, ואלה מגדירים למעשה את נפח הגלישה. על פי המפה הבתימטרית קובעים גם את הגובה בו נוצרת הגלישה והגובה בו היא נעצרת. ישנם פרמטרים חשובים נוספים כגון צפיפות החומר הגולש, ומהירות הגלישה, אך המידע לגביהם מועט יחסית.

6.3 מקורות אפשריים לצונאמי במזרח הים התיכון

רעידות אדמה

המקור העיקרי לצונאמי הרסני כתוצאה מרעידות אדמה באגן המזרחי של הים התיכון היא הקשת ההלנית. מסקנה זו מסתמכת על מידע היסטורי וגיאולוגי משתי רעידות אדמה מהשנים 365 ו-1303 לספירה, אשר גרמו לצונאמי אשר פגע בין השאר גם באלכסנדריה ובעכו, שתיהן היו ככל הנראה במגניטודה מעל 8 (Guidoboni et al, 1994; Guidoboni and Comastri, 2005). גם הקשת הקפריסאית מייצרת רעידות אדמה חזקות וצונאמי, אם כי לא ידוע על מקרה של צונאמי שהגיע משם לישראל. אף על פי כן לא יהיה נכון להפחית מחשיבותו של גורם זה.

מחקרים אחרונים מציעים שרעידת אדמה על העתק הלחיצה של לבנון (Lebanon Thrust) בשנת 551 לספירה, יצרו צונאמי הרסני שפגע בבירות ובערים סמוכות בלבנון (Elias et al., 2007). התוואי של העתק זה עובר כמה קילומטרים בים אל מול חופי לבנון. קיים רישום מודרני של רעידות אדמה גם אל מול חופי מצריים, אולם הן חלשות יותר והסכנה מהן אינה דווקא בשינוי טקטוני של תבליט קרקעית הים כמו באפשרות שהן תגרומנה לכשל וגלישה תת-ימית גדולה בדלתה של הנילוס.

גלישות תת-ימיות

מפתיע לגלות שמרבית אירועי הצונאמי שדווח עליהם בישראל קרו לאחר רעידת אדמה שארעה ביבשה (Salamon et al., 2007), כפי שקרה למשל בשנת 1202 לספירה לאחר רעידת אדמה שמוקדה היה בדרום לבנון וצפון ישראל. בחינה של מדרון היבשת של ישראל על סמך מיפוי בתימטרי, חתכים סיסמיים וקידוחים, מחזקת הערכה זו: מדרום לאזור בו עובר תוואי העתק הכרמל בים המדרון רציף ומופיעות עליו צלקות גדולות רבות שצורתן מרמזת על כי נוצרו כתוצאה מגלישות קרקע. פני השטח למרגלות המדרון מעידים על הצטברות רבה של חומר שגלש (Almagor and Hall, 1984). מצפון לתוואי העתק הכרמל מדרון היבשת תלול מאד ומצוקי, וישנן עדויות להצטברות חומר גלש למרגלותיו ולאורך תוואי הערוצים של הקניונים התת-קרקעיים (Almagor, 1993).

מקור משמעותי נוסף לגלישות קרקע כפי שמתברר לאחרונה הוא הדלתא של הנילוס. אומנם לא ידוע בוודאות על צונאמי ממקור זה, אולם הממצאים מעידים על גלישות קרקע בנפחים גדולים מאד ולא ניתן להתעלם מהשפעתו האפשרית של גורם זה (Garziglia et al., 2008).

גלי צונאמי שנוצרו בים האגאי לאחר רעידת אדמה שאירע בשנת 1956 שהייתה בעוצמה של 7.5, הגיעו לישראל בגובה נמוך יחסית, ונודע עליהם רק בעקבות הרישום האנלוגי על ניר של מד המפלס שהיה מוצב בנמל יפו (גולדשמיט וגלבוט, 1986). מחקרים מציעים שרעידת האדמה הזו יצרה גלישת תת-ימית גדולה והיא אשר יצרה את הצונאמי (Perissoratis and Papadopoulos, 1999). מנגנון דומה לכך הוצע גם לגבי הרעידה משנת 1908 שהתרחשה במייצרי מסינה בין איטליה לסיציליה (Billi et al., 2008), והצונאמי שנוצר אז דווח מהחוף המערבי של מצרים.

לאחרונה הוצע מקור מעניין נוסף לצונאמי כתוצאה מגלישה של צלע הר האטנה בסיציליה. על סמך עדויות בנות כ- 8,000 שנה מקרקעית הים, הוצע שצלע ההר התמוטטה מהיבשה לתוך הים. מודל ממוחשב הראה שצונאמי זה פגע בחוף הישראלי והוצע שהכפר הניאוליטי בעתלית ים הושמד כתוצאה מכך (Pareschi et al., 2007). העדויות הארכיאולוגיות מעתלית ים אינן תומכות בסברה זו (Galili et al., 2008), אולם עצם האפשרות שצונאמי כזה אכן קרה היא ממשית.

התפרצות וולקנית

קיימת סברה שצונאמי הרסני הגיע לישראל לאחר התפרצות הר הגעש בסנטוריני לפני כ- 3,600 שנה. המידע הגיאולוגי על כך אינו וודאי (Dominey-Howes, 2002), ואולם אין לפסול על הסף אפשרות זו.

7. תרחישים מייצגים לדימוי צונאמי בחוף הים התיכון של ישראל

כדי להעריך באופן ריאלי ושמרני את הסיכון מצונאמי, נבחרו תרחישים שמייצגים אירועים גדולים בעלי זמן חזרה קצר יחסית, בהתאם לניסיון ההיסטורי, לסיסמוטקטוניקה ולבתימטריה של מזרח הים התיכון. הורצו שני תרחישים כתוצאה מרעידת אדמה חזקה בקשת הקפריסאית (EQ-CYPRUS-1,2) ותרחיש נוסף שמקורו בקשת ההלנית (EQ-CRETE-1). אחד מהאירועים בקשת הקפריסאית הורץ פעם נוספת ברזולוציה המרבית האפשרית (EQ-CYPRUS-2-HR). לגבי גלישות, נעשו ארבע סימולציות, שתיים אל מול חופי תל אביב (LS-TLV1,2) ושתיים אל מול מפרץ חיפה (LS-HAI1,2) (ראה טבלאות 3, 4, וציורים 14' ו-14'ב').

בחירת זמן הריצה המרבי עבור כל מקרה התבססה על הרצה מוקדמת ברזולוציה נמוכה אשר נותנת את מהלך התפתחות האירוע וכמובן את המיקום של הגלים העיקריים לפי הזמן. מפאת משך הזמן הארוך הנדרש להדמיה ברזולוציה גבוהה (כ-10 יממות), הוגבל זמן ההרצה לתיאור הפגיעה של הגל הראשון בלבד לאורך כל החוף הישראלי (כידוע לעיתים הגל הגדול ביותר איננו דווקא הגל הראשון מתוך חבורה של כ-3 עד 5 גלים הנוצרים באירוע צונאמי). באזור הקרוב לחוף ועל החוף נעשה שימוש בסריגים בעלי רזולוציה גבוהה מאוד. אלה מבוססים על מיפוי בתימטרי בעזרת מערכת מרובת אלומות קול במרווחים של עשרות סנטימטרים עד מטרים ספורים, ובעומק רדוד מ-5 מ' במערכת בעלת אלומות קול יחידה, בחתכים ניצבים

לחוף במרווחים של 25 מ' ובצפיפות דיגום נקודות של מספר מטרים. הנתונים בחוף נתקבלו ממיפוי פוטוגרמטרי בקני"מ 1:500 או מיפוי LIDAR בסריג של 4 מ'. כל התרחישים נבחנו עבור מפרץ חיפה וחלקם גם עבור אזור גוש דן ושפך הירקון. הזמן הפיסיקאלי המרבי להרצת תרחישי רעידות האדמה נקבע ל-4,000 שניות ומספר תצלומי הבזק ליצירת האנימציה של התרחיש נקבע ל-400. בדימוי של צונאמי מגלישות תת ימיות, זמן הריצה המרבי נקבע ל 3,000 שניות ובמהלכה נרשמו 300 תצלומי בזק. הפרמטרים ששימשו לכל אחד מהתרחישים מוצגים בטבלאות מס' 3 ו- 4.

טבלה מס' 3. המאפיינים של גלישות הקרקע התת-ימיות בתרחישי הצונאמי

קואורדינאטות מיקום		מהירות סופית (מ"/שני)	מימדי הגלישה				שם הריצה
קו אורך (מעלות)	קו רוחב (מעלות)		נפח (ק"מ ³)	גובה (מ')	רוחב (ק"מ)	אורך (ק"מ)	
34.41E	32.17N	25	0.625	50	2.5	5	LS-TLV1 מול תל אביב
34.41E	32.17N	50	0.625	50	2.5	5	LS-TLV2 מול תל אביב
34.87E	32.96N	25	0.625	50	2.5	5	LS-HAI1 מול חיפה
34.87E	32.96N	25	1.6	50	4	8	LS-HAI2 מול חיפה

טבלה מס' 4: המאפיינים של רעידות האדמה בתרחישי הצונאמי

שם ההדמיה	מגניטודה (Mw)	עומק המוקד (ק"מ)	מיקור רוחב/אורך (ק"מ/ק"מ)	כיוון ההעתק Strike direction (מעלות)	מגמת התנועה על ההעתק Dip/Rake angle (מעלות)	מידת התנועה על ההעתק (מ')	מידת ההסטה האנכית (מ')	מיקום המוקד רוחב/אורך (פינה דרום מערבית של ההעתק)
EQ-CRETE-1	8.4	45	140/60	225	30/90	20	10	26°10'/34°54'
EQ-CYPRUS-1	7.6	45	70/40	235	30/90	5	2.5	33°15'/34°33'
EQ-CYPRUS-2	7.7	45	80/40	230	30/90	5	2.5	34°06'/34°51'
EQ-CYPRUS-2-HR	7.7	45	80/40	230	30/90	5	2.5	34°06'/34°51'



ציור 14א': מפת מיקומי הגלישות שעבורן נעשו ההדמיות



ציור 14ב': מפת מיקומי רעידות האדמה שעבורן נעשו ההדמיות

8. ביצוע ההדמיות באמצעות תוכנת GeoClaw

8.1 שיקולים כלליים

כיוון שסכימת ההתקדמות בזמן הינה מפורשת, והיות שיש לקיים את תנאי CFL בפתרון של משוואות דיפרנציאליות חלקיות, במיוחד היפרבוליות) בכל נקודת זמן-מרחב, ההתקדמות באינטגרציה הנומריית תלויה בקרוב במספר נקודות החישוב הכולל. דהינו, אם למשל השטח הכולל של התחומים בעלי הרשת העדינה ביותר גדול יותר, אזי ההתקדמות לזמן החדש נקבעת לפי צעד הזמן המתאים לאזורים אלו (שהינו קטן מאוד בהתאם לתנאי CFL), ולכן ההתקדמות בזמן הינה איטית ביותר. בסימולציות שביצענו נעשה מאמץ למזער את השימוש ברשתות ברזולוציה גבוהה, על מנת לאפשר קבלת תוצאות בזמן סביר, בהתחשב בלוח הזמנים ובתקציב שהוקצבו למחקר. בעיה נוספת שיש להתמודד איתה היא דרישת זיכרון גבוהה RAM בזמן הריצה בעיקר כתוצאה מהצורך להכיל בזיכרון את רשתות הבתימטריה/טופוגרפיה הנדרשות לביצוע החישובים. בדרך כלל נדרשו 6GB עבור הריצות ברזולוציה גבוהה וזמן החישוב נע מ-3 ימים עבור סימולציות כמו EQ-CYPRUS-1 או EQ-CRETE-1, ועד כ-10 ימים עבור ההדמיה EQ-CYPRUS-2-HR. יש לציין שהתבצעה עבודת מקבול מסוג זיכרון משותף אשר אפשרה עבודה מקבילית ביעילות הקרובה ל-100% בתקופות ארוכות למדי במהלך ההדמיה.

8.2 הגדרת המקור בתוכנת GeoClaw

תוכנת GeoClaw מקבלת בתור קלט שתי אפשרויות ליצירת המקור לצונאמי. האחת היא בהגדרת פני המים ברגע התחלת החישוב, כלומר הגדרת השינוי ביחס למישור פני המים. בשיטה זו, אין צורך לתאר את הדינאמיקה שמובילה להפרעה זו, והיא מתאימה במיוחד למקרים בהם צורת ההפרעה ידועה מראש (למשל, במקרה של פגיעת אסטרואיד עדיפה הגישה של הגדרת פני המים). השיטה השנייה לאפיון המקור היא בתיאור השינוי המרחבי-זמני של הבתימטריה באזור האירוע. שיטה זו מאפשרת לדמות התפתחות גלים מאינטראקציה של נוזל-גוף מוצק ומאפשרת בחינה של פרמטרים רבים הקשורים בתהליך טקטוני כגון שינויים גיאומטריים (של רעידת האדמה) וספקטראליים.

8.3 פיתוח היישום עבור רעידות אדמה

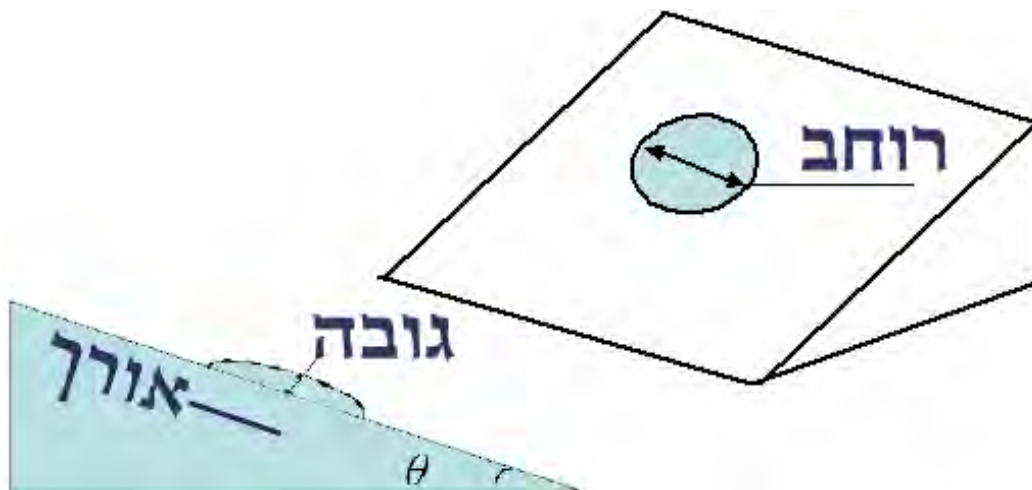
לצורך יצירת פרופיל שינוי פני הקרקע במהלך רעידת אדמה, נכתב קוד בשפת פורטרן אשר מקבל את נתוני רעידת האדמה, דהינו, מיקום, כיוון, התרוממות אנכית של פני הקרקעית (השקול לעוצמת הרעש) ומשך האירוע. גיאומטרית תזוזת הקרקע נבחרה בצורת פריזמה משולשת אופקית אשר הצלע האחת שלה קבועה בקרקע (משמשת כציר) והצלע הנגדית מתרוממת באופן אחיד לגובה של מספר מטרים, בהתאם למגניטודה שנקבעה. רצוי לציין שמבחינה חישובית עדיפה תזוזה רציפה של פני קרקע מאשר שינוי מדרגה (באפס זמן) אשר בדרך כלל תורם תדירויות גבוהות שלמערכת יש קושי לדכא אותן ולהתקדם הלאה עם פתרונות רגולאריים. בסימולציות הנוכחיות נבחר זמן התנועה של הקרקע בתור 5 שניות, פחות או יותר בהתאמה למהירות המשוערת של תזוזת הקרקע במשך רעידת האדמה (סדר גודל של מספר מטרים בשנייה). לצורך פשטות החישוב נקבע שהפריזמה המשולשת מתרוממת במהירות אחידה לכל אורכה, אם

כי בפועל נראה שההתרוממות מתרחשת בהדרגתיות מקצה אחד של הפריזמה לקצה השני במשך כמה עשרות שנית.

על הגובה המקומי מתוסף רעש לבן על מנת לשוות לגיאומטרית השבר מאפיינים סטוכסטיים. ניתן להניח שהקרקע המתרוממת עולה באופן מונוטוני וכיוון שהתהליך בעל התנהגות מעריכית בתלות בזמן ($h(t) = h_{\max} (1 - e^{-c(t-t_0)^2})$), כאשר h_{\max} הינו הגובה המרבי של ההתרוממות בסוף האירוע, c קבוע קצב ההתרוממות (נבחר בתור 0.36) ו- t_0 הוא זמן תחילת האירוע. הקבוע נבחר באופן כזה שהקרקעית עולה בפרק הזמן שנבחר.

8.4 פיתוח היישום עבור גלישות

גם במקרה של גלישות, המקור מתואר באמצעות שינוי פני הקרקע. לצורך כך נכתב קוד בשפת פורטרן המקבל נתוני נקודת מוצא, מימדי הגלישה, מסלול הגלישה ומהירותה הסופית. הגלישה מתוארת בצורת פרבולואיד אליפטי "הפוך", אשר שיאו בגובה הנבחר עבור הגלישה (ציור 15). על המבנה האנליטי הזה מתווסף רעש לבן (כפונקציה של המרחב והזמן) על מנת לשוות לגוש המסה צורה יותר ריאלית. גודל הרעש נבחר בקרוב כעשירית מהגובה המקומי של הגלישה, והממוצע המרחבי של המרכיב הרנדומאלי נשמר לאורך כל זמן הגלישה. מרכז הפרבולואיד נע לאורך קו המסלול הנבחר (x,y,z) באמצעות תוכנת Global 9 Mapper במדרון ובמהירות הגלישה הנבחרת. בקטעי ההתחלה והסיום המהירות משתנה ברציפות. תנועת המסה שצורתה ידועה מגדירה פרופיל שינוי פני הקרקע כפונקציה של הזמן.



ציור 15 : גיאומטרית החומר הגולש – פרבולואיד אליפטי. מימין מבט מרחבי, משמאל חתך אורך.

9. תיאור התוצאות שהתקבלו עבור ההדמיות השונות

9.1 עיבוד המידע

את קבצי הפלט השונים ניתן לסווג לשתי קבוצות הבאות:

- סדרות זמניות

- חתכי זמן או צילומי בזק

בשתי קבוצות אלה רשומים המאפיינים הבאים של פני הים:

- עומק המים (מפני הים במנוחה)

- רכיב התנע בכיוון קואורדינטת קו האורך (צפון-דרום)

- רכיב התנע בכיוון קואורדינטת קו הרוחב (מזרח-מערב)

- רום פני המים הרגעי (בזמן ההדמיה) מעל פני הים במצב מנוחה (עבור הנתונים שלנו מעל אפס האיזון הארצי)

הפלט עבור צילומי הבזק אם כן הוא מצב פני הים ברגע נתון כפי שהוא מתקבל בפתרון על רשת החישוב האדפטיבית. במילים אחרות, כל נקודת פתרון (בזמן נתון) מוגדרת בקואורדינטות משלה ועבורה רשומים הגדלים של מצב פני הים. הפלט נרשם בקובץ ASCII (או לחילופין בקובץ hdf) בשם fort.qxxxx כאשר הסימן "q" מציין שהקובץ מכיל את הגדלים הנמדדים ו-xxxx מסמל את האינדקס של תצלום הבזק.

כל תרחיש הוגדר בזמן ריצה פיסיקאלי המתחיל מאפס (או זמן האתחול מריצה קודמת) והסתיים בזמן המרבי שנקבע. עבור אינטרוול הזמן הזה נכתבו nout קבצים מהצורה שתוארה לעיל. כל אחד מקבצי fort.qxxxx לווה בקובץ מידע על תצלומי הבזק הכולל בין השאר את הזמן הפיסיקאלי של התצלום ופרטים נוספים הקשורים למבנה קובץ ה-fort.

כיוון שהשיטה הנומרית מבוססת על סריג אדפטיבי, באופן כללי כל תצלום בזק יהיה מורכב ממידע הנתון במספר של תת-רשתות (כל אחת מלבנית) אשר משתלבות זו בזו כמו פאזל ליצור את תחום החישוב הכולל (מספר הרשתות לריצות שלנו מגיע לכמה מאות כאשר המספר המרבי שנבחר הוא 1000). יש לציין שכיוון שהסריג אדפטיבי, מבנהו וארגון תת-הרשתות הינו פועל יוצא של דינאמיקת הבעיה ותנאי השפה המיוחדים לה.

הפלט עבור הסדרות הזמניות מתקבל עבור רשימה נתונה מראש של נקודות (x,y) בתוך תחום החישוב הנקראות GAUGES ובהן מתקבל הפתרון (הגדלים שלמעלה) בכל צעד בזמן. נתונים אלו מופעים בקובץ בשם fort.gauges.

במקרה זה אלו סדרות זמן ברזולוציה גבוהה (בזמן) ולכן יש להן ערך במדידת גדלים אויילריניים וביצוע אנליזות ספקטראליות. בהדמיות שנעשו מיקום הנקודות נבחר לאורך קו החוף המקורי במרווחים של כ-300 מטר. באזורים נבחרים (ת"א, חיפה) הצפיפות הגיע ל-50 מטר

9.2 עיבוד בתר (Post-processing) של הפלטים הבסיסיים

לאחר החישוב בוצעו מספר עיבודים כמפורט להלן:

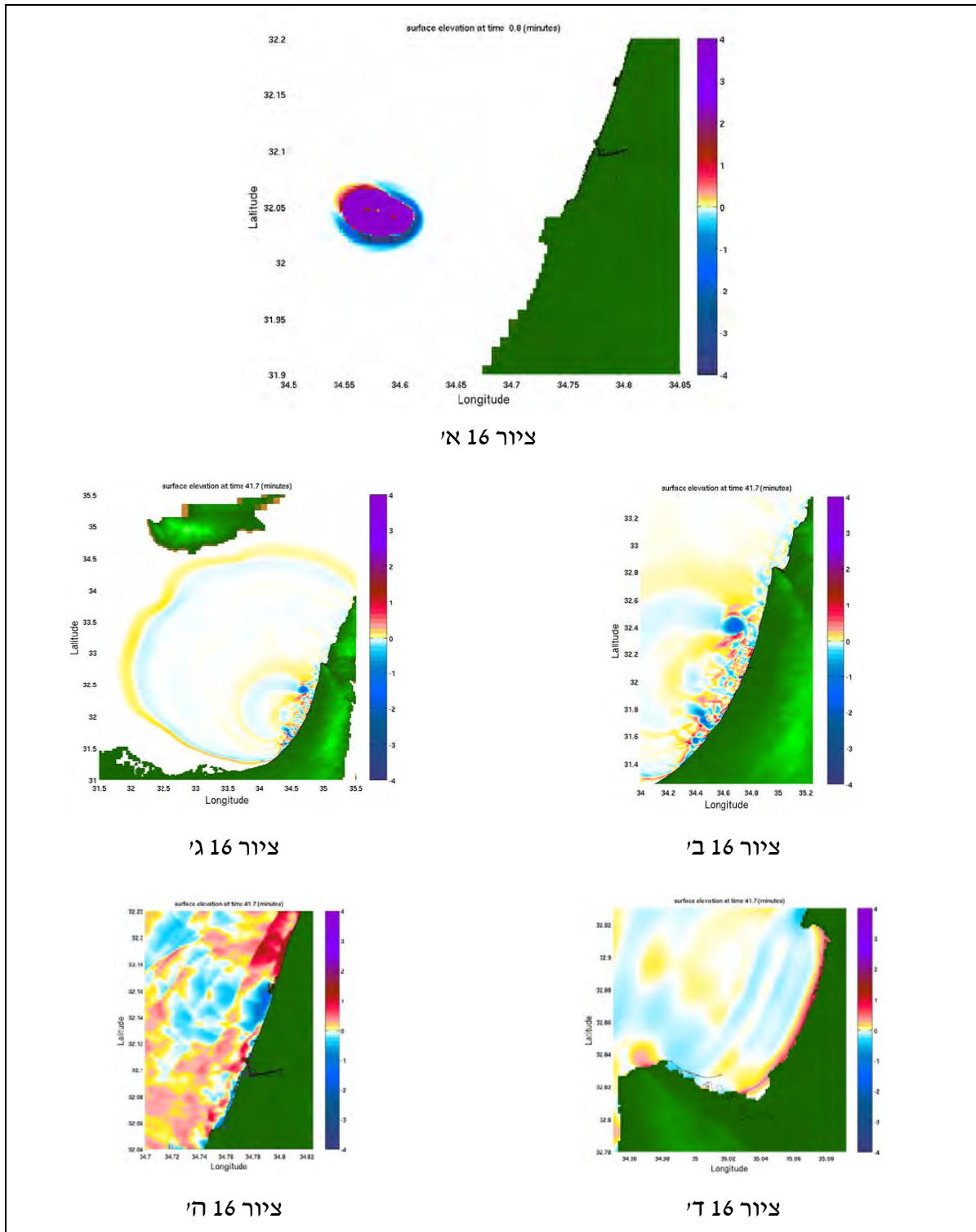
- מפות הצפה ונסיגה באזורים הנבחרים (מרכז הארץ, אזור הצפון).
 - מפות גובה גלים מרבי/מזערי לאורך נקודות הסריג בקו המים (מיקום קו אפס איזון ארצי).
 - תמונות של תצלומי בזק בזמנים נבחרים.
 - אנימציות של אירועים שלמים ותקריבים באזורים נבחרים.
- כיוון שהאינפורמציה הנדרשת (ערכים מרביים) מפוזרת ברשתות בצפיפויות שונות (רשתות אדפטיביות), במיקום ובזמן אקראיים, בהתאם להתפתחות התהליך הפיסיקלי, לא ניתן היה למצוא באופן ישיר מקסימום (x,y,t) ולקבל מפה של גובה הגל המרבי של הצונאמי באזור נתון, או מפת מקסימום הצפה או שפילה (היחשפות תחום מימי החופין הרדוד). הפתרון לכך התאפשר ע"י שימוש באלגוריתם הבא:

1. קביעת תחום עניין (x,y) .
 2. רישום כל נקודות הסריג בתחום שבסעיף 1 והשייכות לסריג מדרגה הגבוהה ממעלת סף מסוימת. התהליך בוצע לכל אחד מתצלומי הבזק.
 3. ביצוע אינטרפולציה לסריג אחיד, בעל צפיפות הקרובה לצפיפות המרבית בהדמיה לכל תצלום בזק.
 4. מציאת המקסימום על פני כל אחד מתצלומי הבזק שלאחר האינטרפולציה.
- לצורך ביצוע עיבוד זה נכתבו קודים בפורטרן וב-MATLAB. החישוב נערך על תחנת העבודה שבעזרתה נעשו ההדמיות דבר שצרך שטח דיסק גדול, כ- 70 GB לריצה. עבור אזור המרכז, החישוב נמשך כשעתיים (על תחנת העבודה שבעזרתה נעשו הסימולציות), וכ-13 שעות עבור אזור הצפון (במקרה של ההדמיה ברזולוציה הגבוהה ביותר).
- לצורך רישום סדרות הזמן בנקודות המדידה (gauges) נדרש היה לבצע סינון על מנת לנקות את קטעי הזמן (בדרך כלל בתחילת התהליך) בהם הרשתות הינו גסות והאירוע טרם הגיע אליהן. הסינון בוצע ע"י הסרת כל הנגזרות (בזמן) הגדולות מערך סף כלשהו, כאשר ערך הסף נבחר בצורה איטרטיבית עד קבלת כל האינפורמציה הרלוונטית מהסינגל.
- האנימציה נבנתה מחיבור כל תצלומי הבזק של הדמיה נתונה. בדרך כלל בוצע רישום של תצלום בזק אחד בכל 10 שניות לערך, כלומר כמה מאות מסגרות (פריימים) לכל הדמיה. המסגרות חוברו באמצעות סקריפט perl לסרט מסוג MPEG דחוס (מס' מגה בייט עבור כל אחד).

סיכום

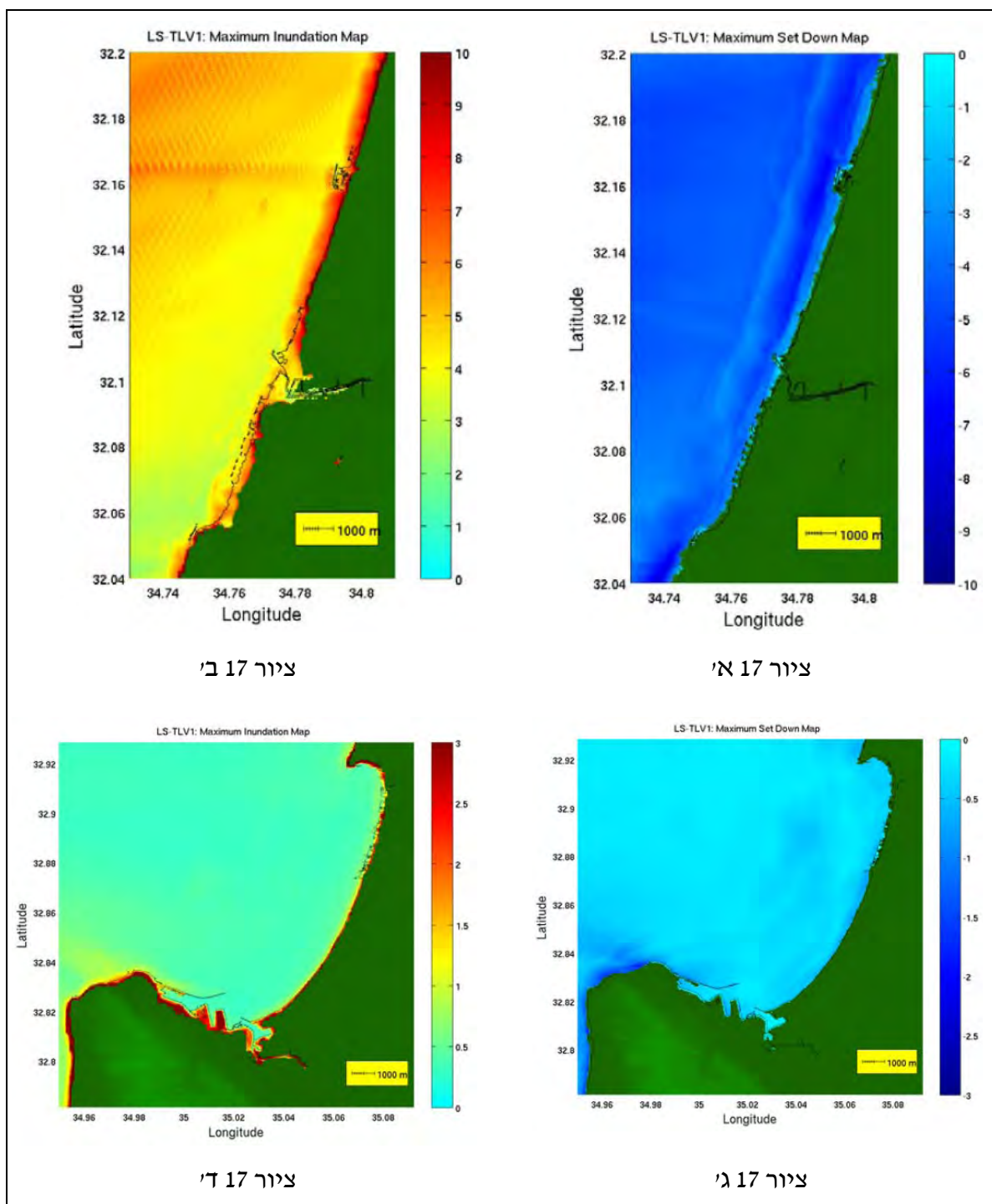
- המידע עבור כל אחד מהתרחישים שבוצעו (טבלאות 3, 4) מוצג להלן בציורים 16 – 38, גובה הגלים מוצג בסקלת צבעים מימין למפה, במטרים. גרסה מוגדלת של הציורים מופיעה בנספחים 3 – 10 עבור כל אחד מהתרחישים. המידע כולל:
- מספר תצלומי בזק מייצגים מרגע תחילת האירוע ועד לסיום ההדמיה.
 - מפות הצפה/שפילה מרבית באזור המרכז והצפון.
 - פילוג רום ההצפה המרבי לאורך קו המים של החוף הישראלי (קו האפס ביחס לאפס האיזון הארצי) באזורים נבחרים.
 - אנימציה להמחשת התרחיש בזמן, במבט כללי ובתקריב באזורים נבחרים.

תרחיש LS-TLV1 – גלישה מול תל אביב



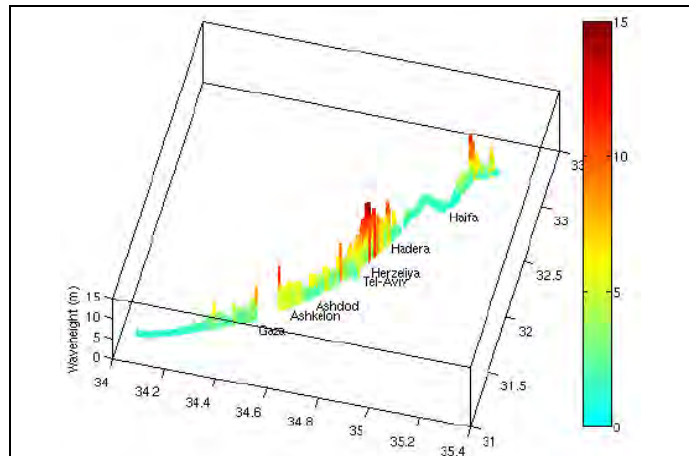
ציור מס' 16 - תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה של אזור הגלישה, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של הים
 התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש LS-TLV1 – גלישה מול תל אביב - המשך

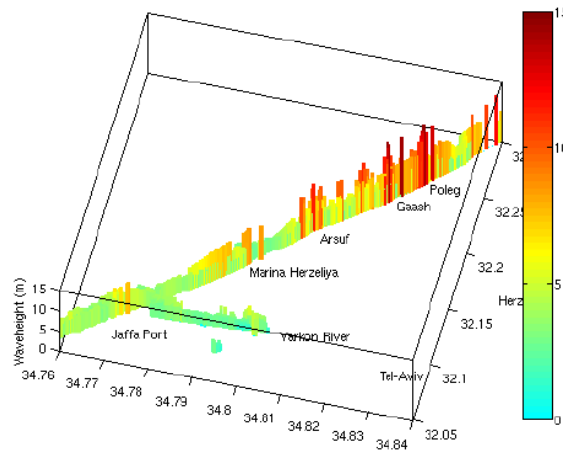


ציור מס' 17 - תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. מפות שפילה והצפה מרבית א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה

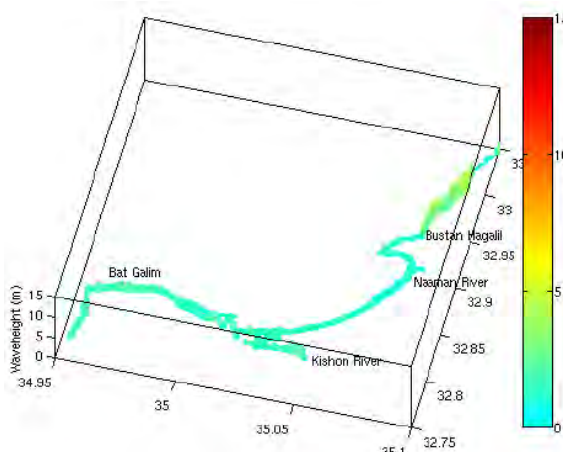
תרחיש LS-TLV1 – גלישה מול תל אביב - המשך



ציור 18 א'



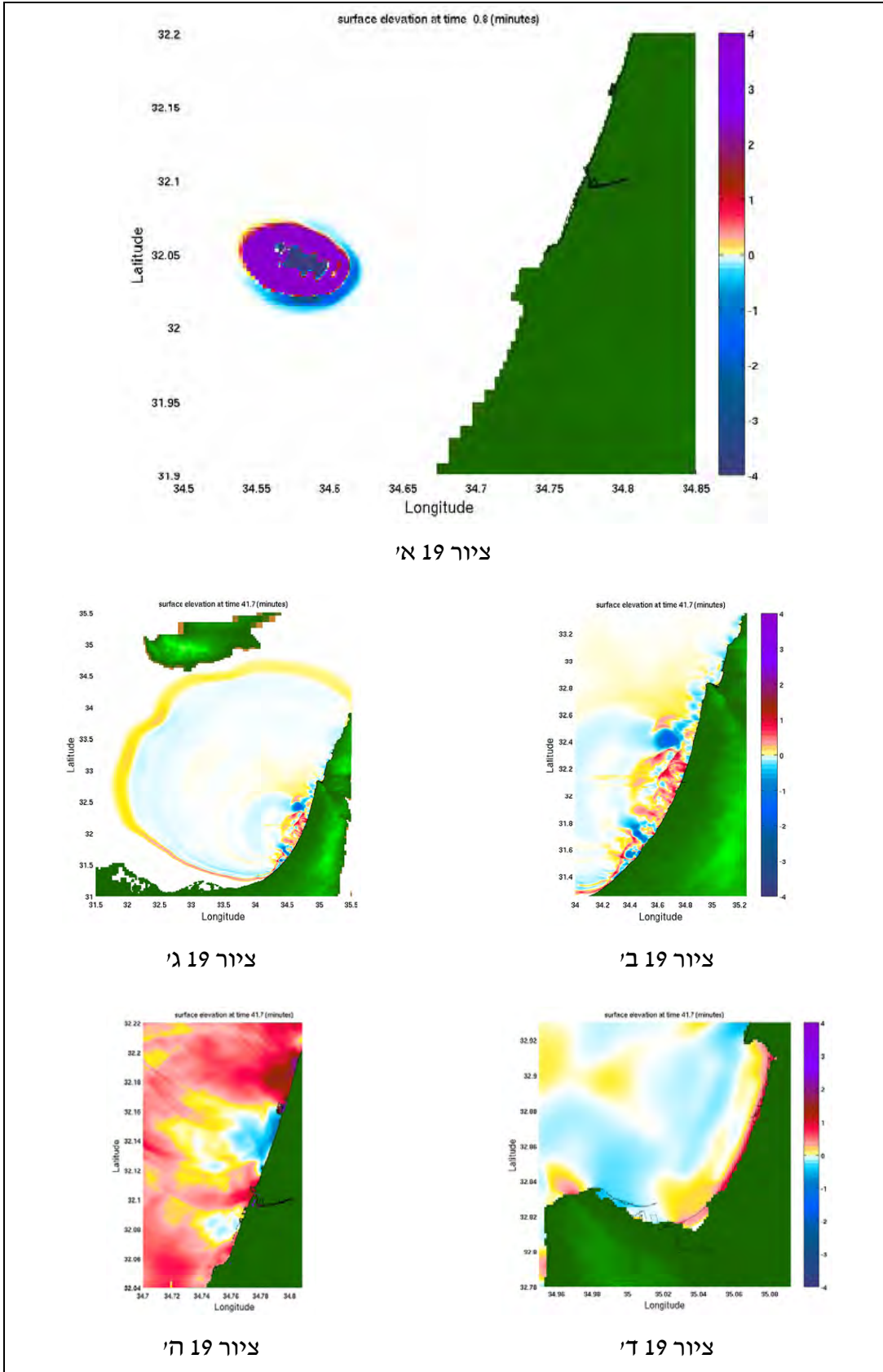
ציור 18 ב'



ציור 18 ג'

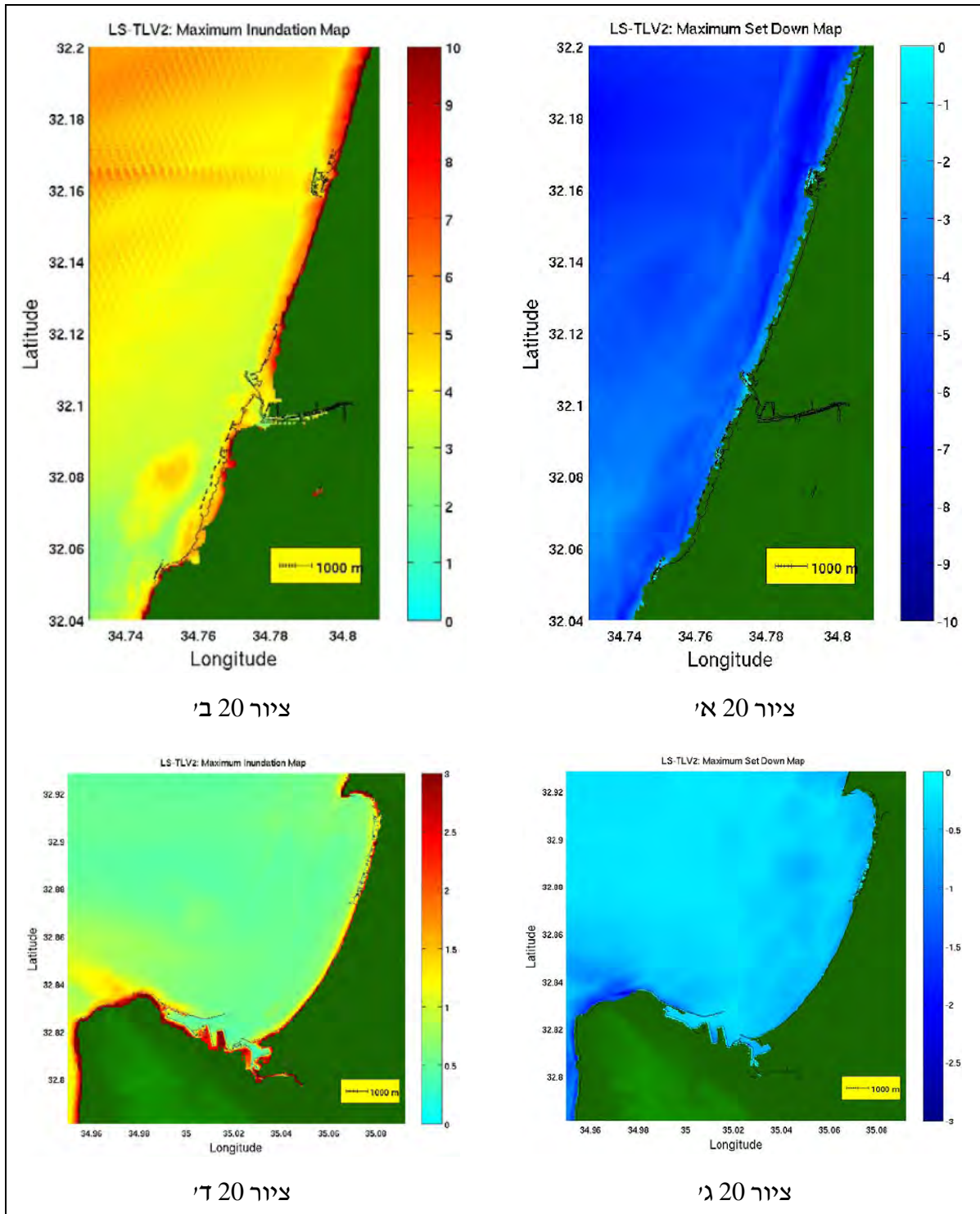
ציור מס' 18 - תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף. א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה

תרחיש LS-TLV2 – גלישה מול תל אביב



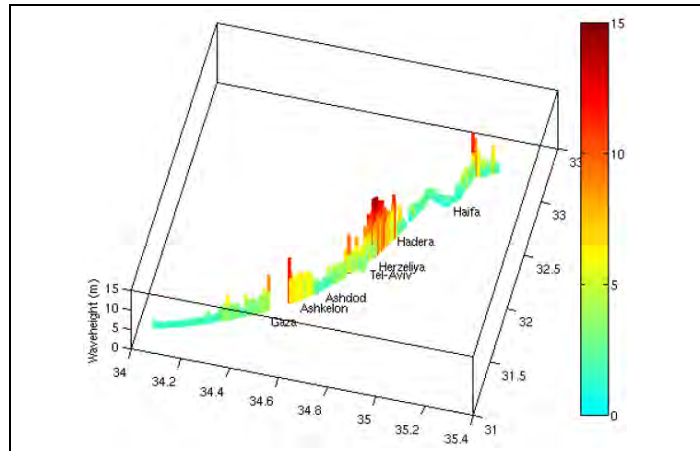
ציור מס' 19 - תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב תצלומי בזק של שינוי רום פני הים
 א' - אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - האגן המזרחי של הים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש LS-TLV2 – גלישה מול תל אביב - המשך

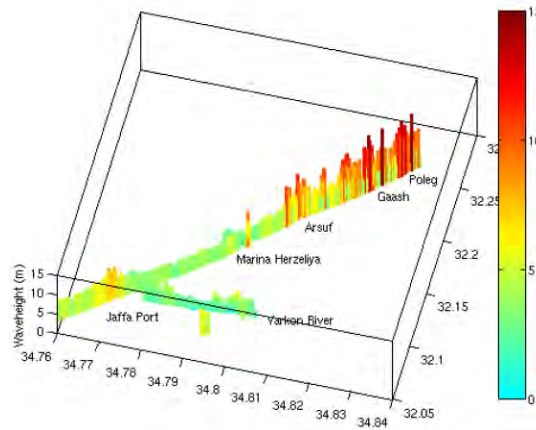


ציור מס' 20 - תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. מפות שפילה והצפה מרבית. אי-שפילה מרבית באזור תל אביב, בי-הצפה מרבית באזור תל אביב, גי-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה

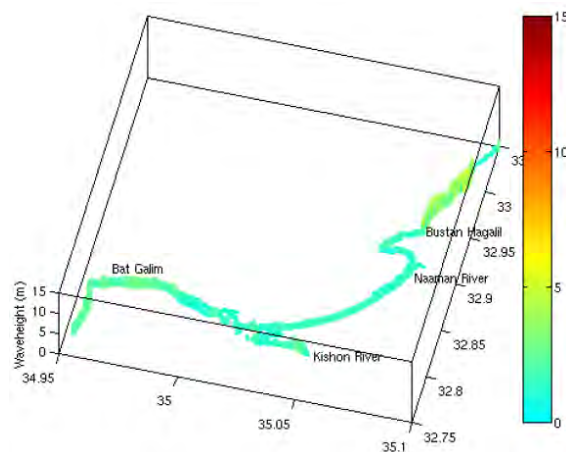
תרחיש LS-TLV2 – גלישה מול תל אביב - המשך



ציור 21 א'י



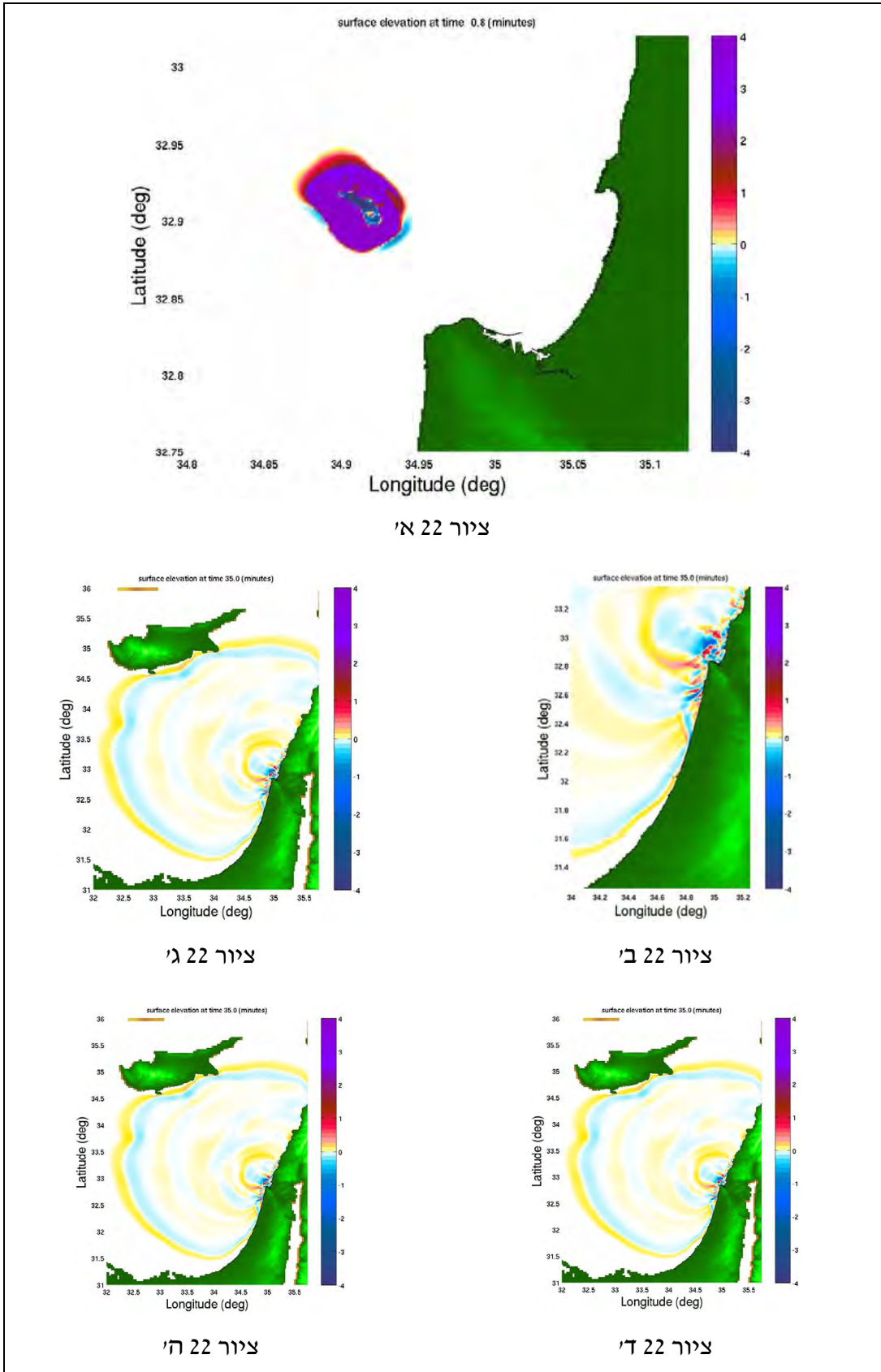
ציור 21 ב'י



ציור 21 ג'י

ציור מס' 21 - תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. גובה הצפה מרבית בחוף א' - לאורך כל החוף הישראלי, ב' - פרט באזור המרכז, ג' - פרט באזור מפרץ חיפה

תרחיש LS-HAI1 – גלישה מול חיפה



ציור 22 א'

ציור 22 ג'

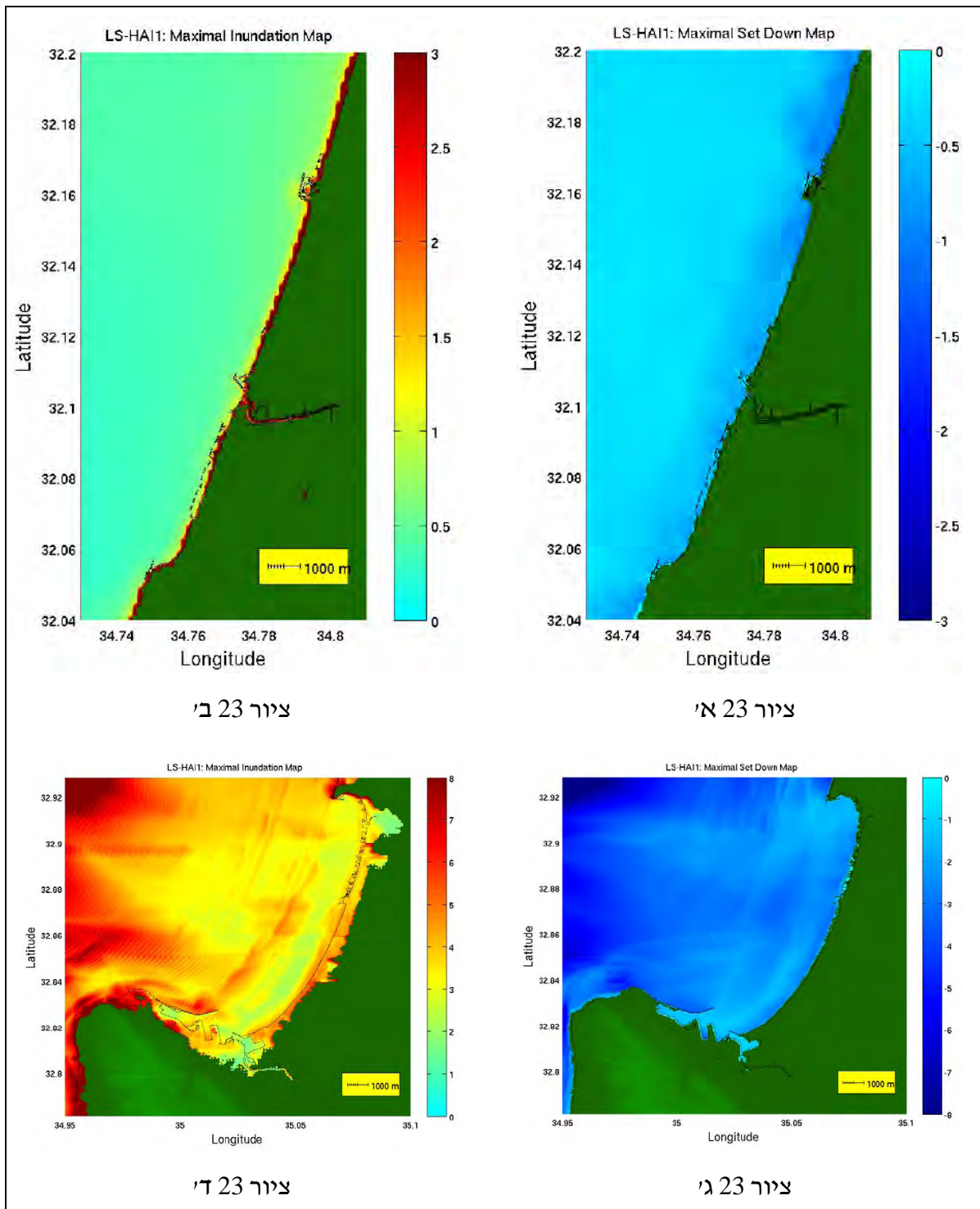
ציור 22 ב'

ציור 22 ה'

ציור 22 ד'

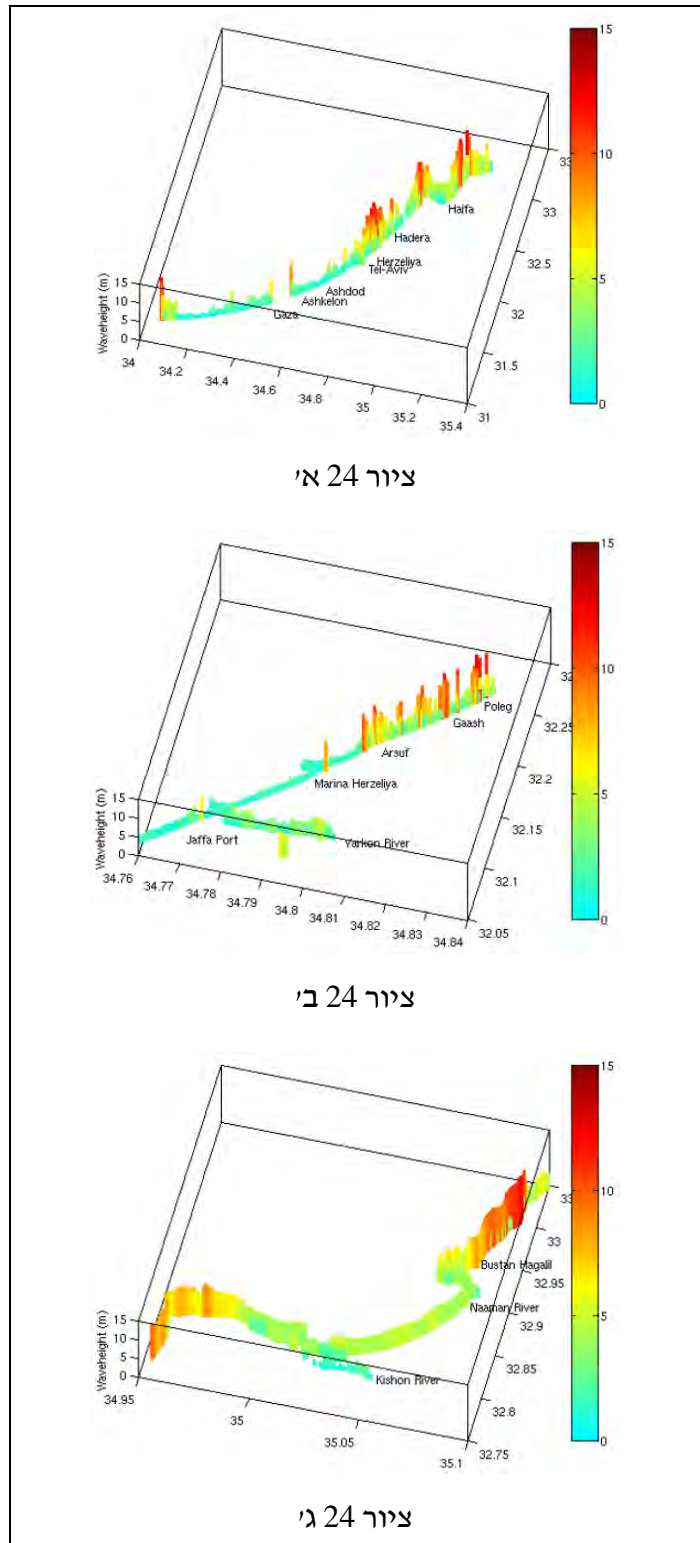
ציור מס' 22 - תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - אזור אגן מזרח ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש LS-HAI1 – גלישה מול חיפה - המשך



צויר מס' 23 - תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. מפות שפילה והצפה מרבית א' - שפילה מרבית באזור תל אביב, ב' - הצפה מרבית באזור תל אביב, ג' - שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד' - הצפה מרבית במפרץ חיפה

תרחיש LS-HAI1 – גלישה מול חיפה - המשך



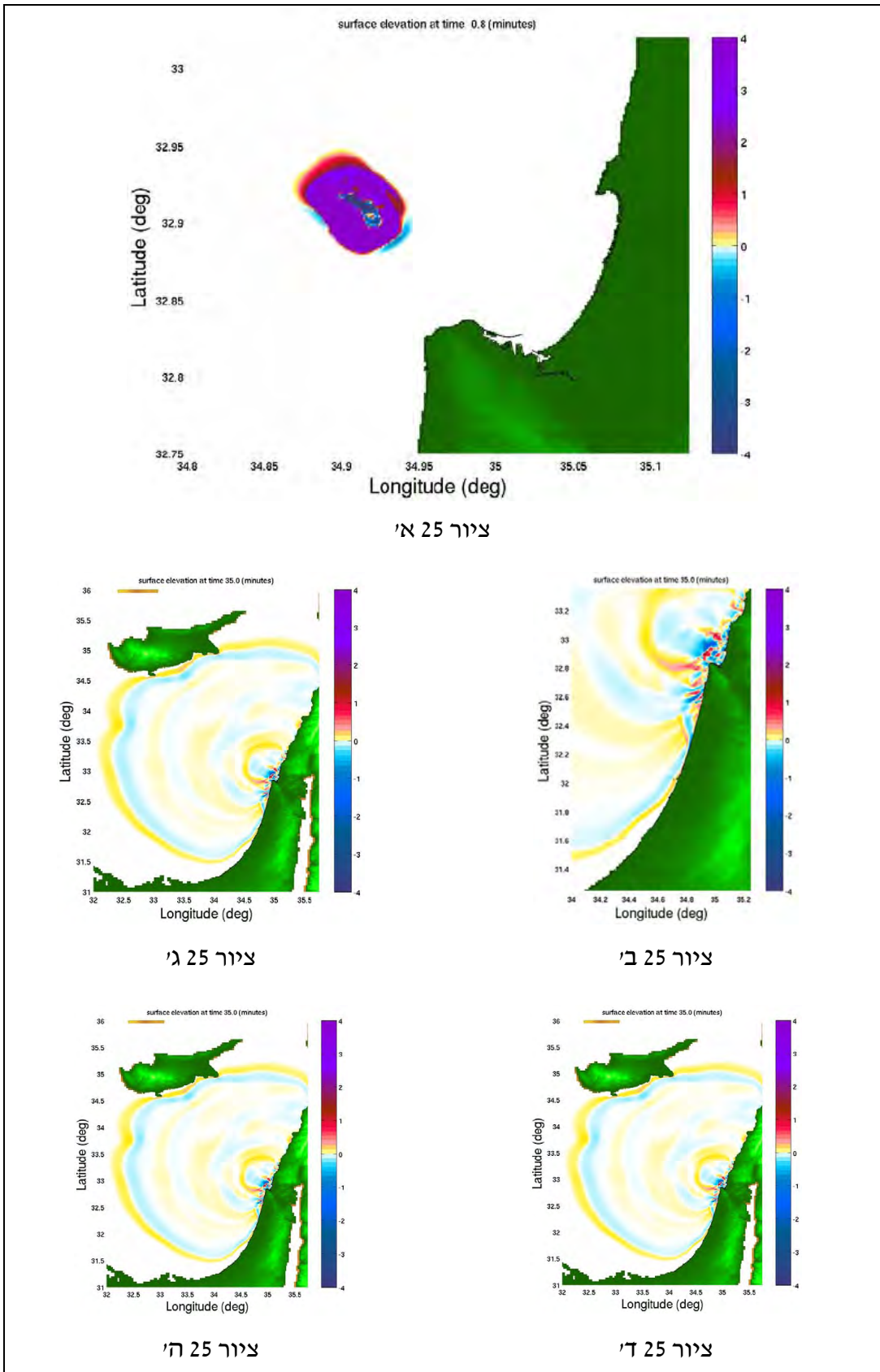
ציור 24 א'

ציור 24 ב'

ציור 24 ג'

ציור מס' 24 - תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. גובה הצפה מרבית בחוף א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרט באזור המרכז, ג' - פרט באזור מפרץ חיפה

תרחיש LS-HAI2 – גלישה מול חיפה



צור 25 א'

צור 25 ג'

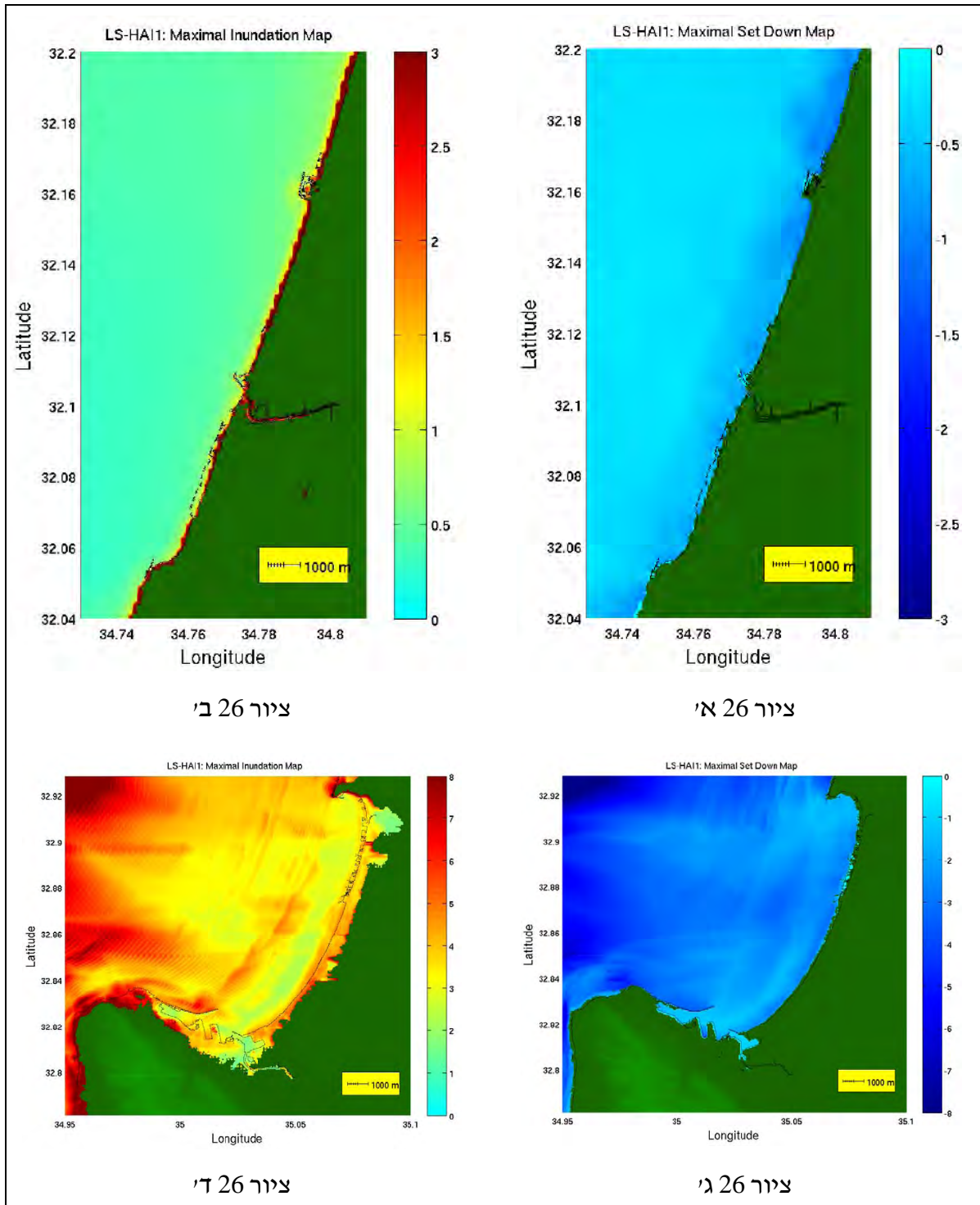
צור 25 ב'

צור 25 ה'

צור 25 ד'

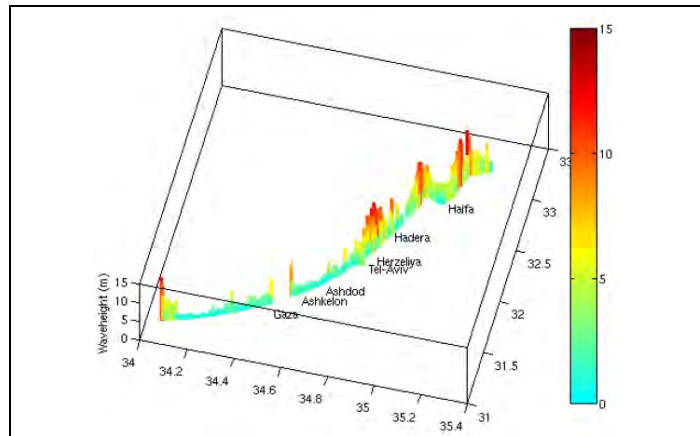
צור מס' 25 - תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלומי בוק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה אזור הגלישה, ב' - אזור החוף הישראלי, ג' - אזור אגן מזרח ים התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש LS-HAI2 – גלישה מול חיפה - המשך

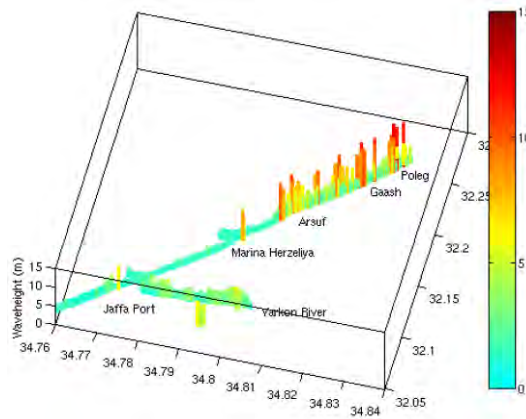


ציור מס' 26 - תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. מפות שפילה והצפה מרבית א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה

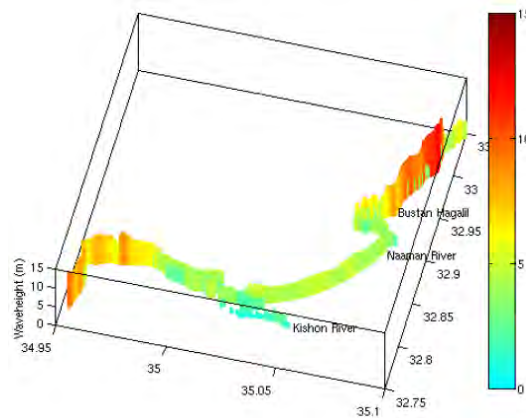
תרחיש LS-HAI2 – גלישה מול חיפה - המשך



ציור 27 א'י



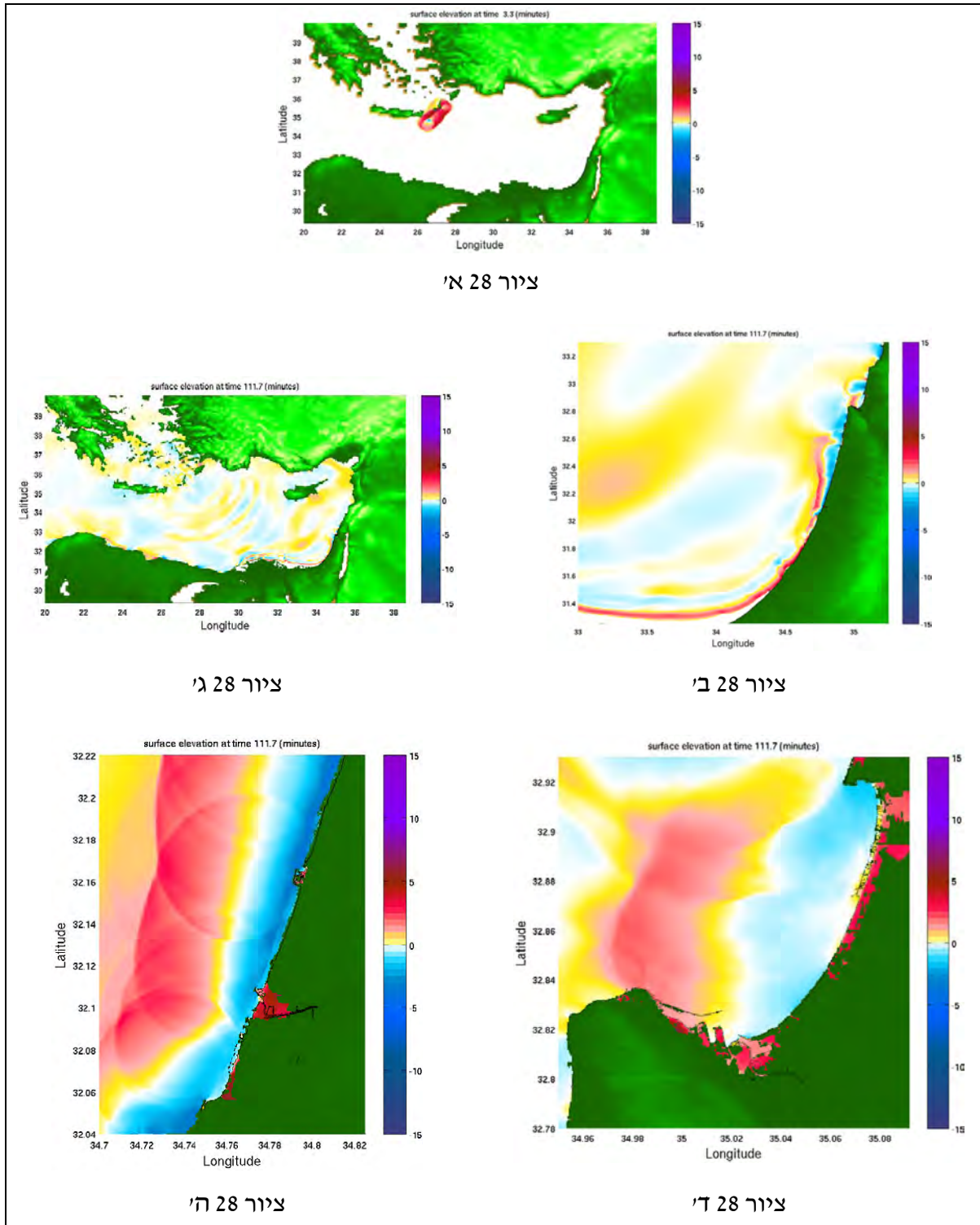
ציור 27 ב'י



ציור 27 ג'י

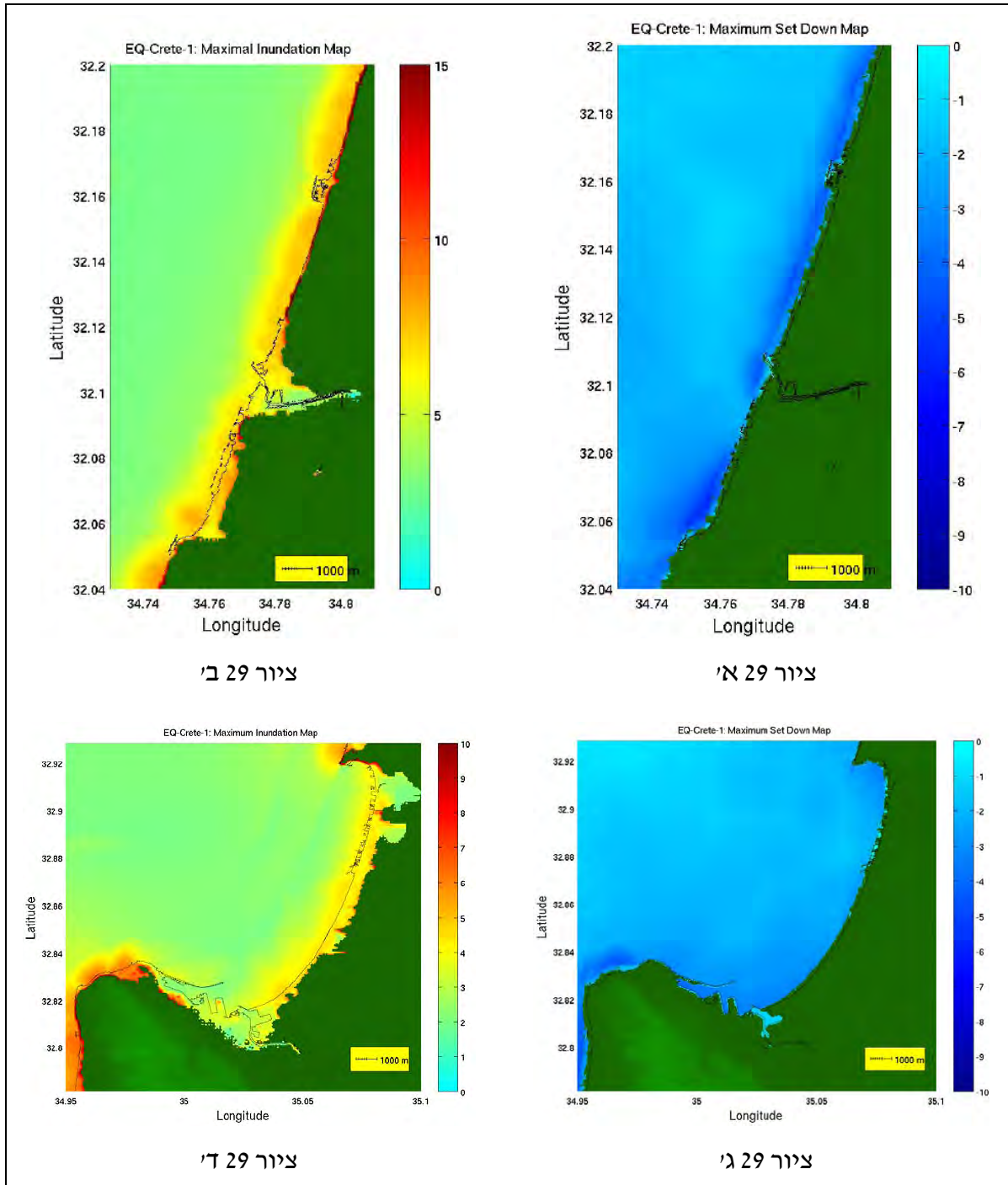
ציור מס' 27 - תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. גובה הצפה מרבית בחוף
א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרט באזור המרכז, ג' - פרט באזור מפרץ חיפה

תרחיש EQ-CRETE-1 – רעידת אדמה בים ליד כרתים



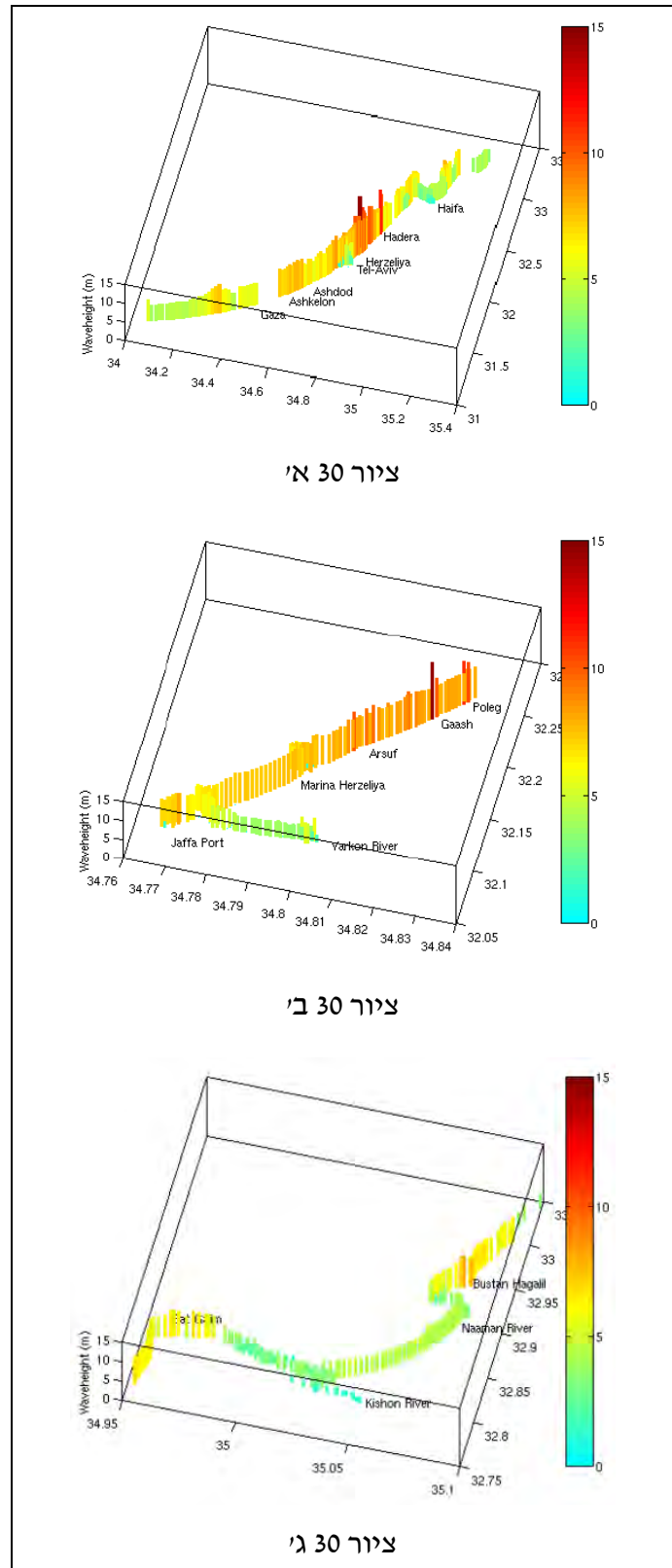
ציור מס' 28 - תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' – מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים
 התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' – אזור תל אביב

תרחיש EQ-CRETE-1 – רעידת אדמה בים ליד כרתים - המשך



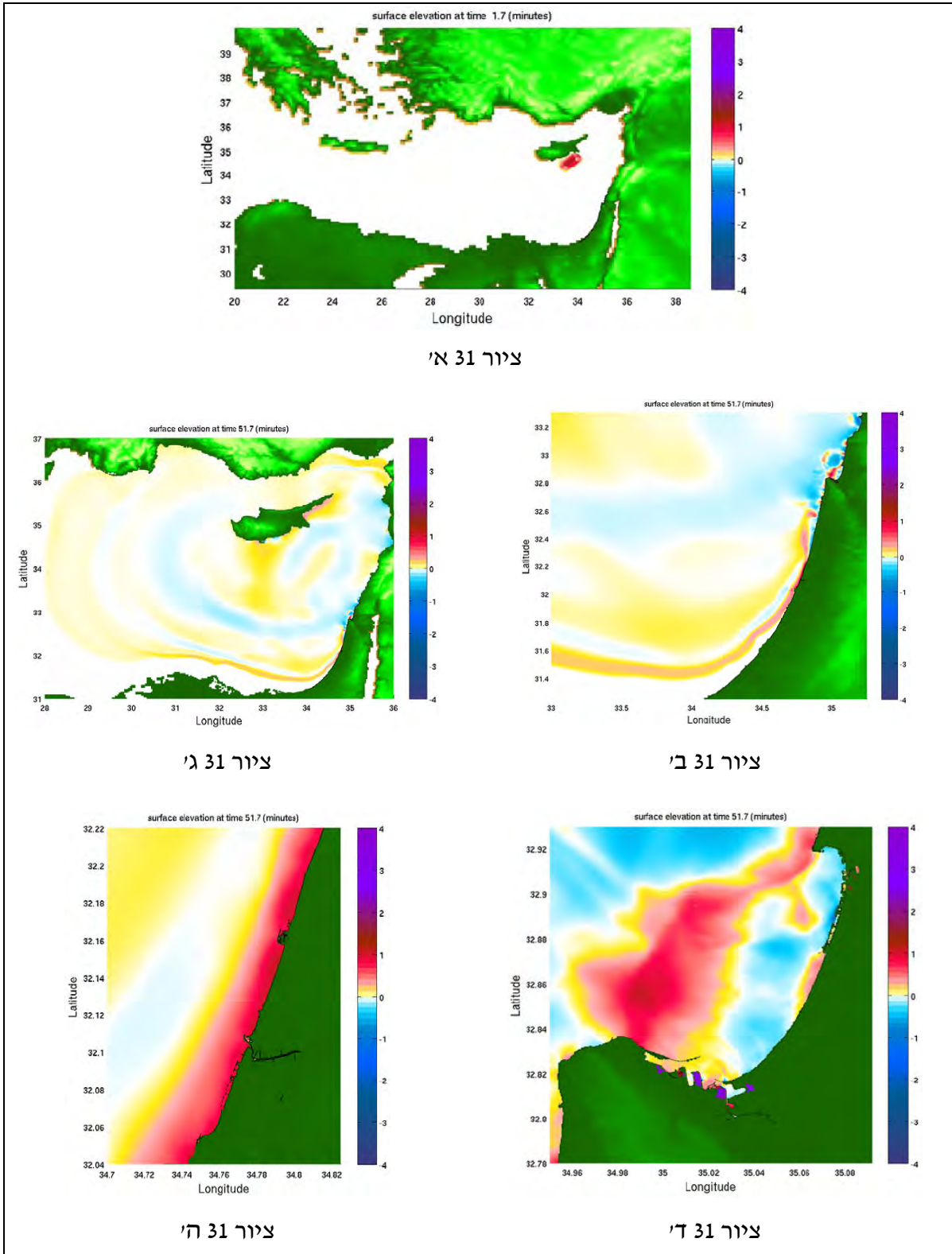
צור מס' 29 - תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה בים ליד כרתים. מפות שפילה והצפה מרבית אי-שפילה מרבית באזור תל אביב, בי-הצפה מרבית באזור תל אביב, גי-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'- הצפה מרבית במפרץ חיפה

תרחיש EQ-CRETE-1 – רעידת אדמה בים ליד כרתים - המשך



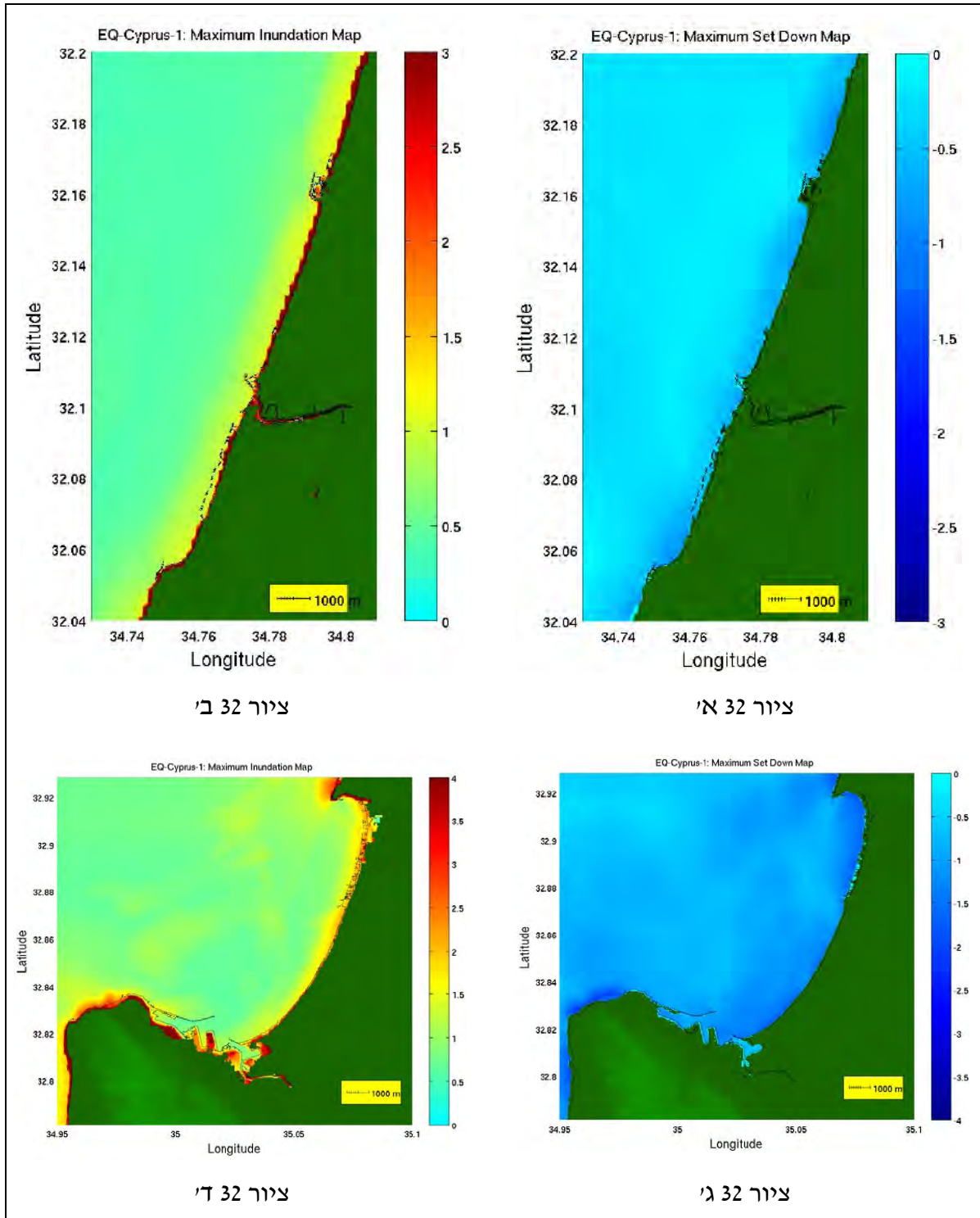
ציור מס' 30 - תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה בים ליד כרתים. התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה

תרחיש EQ-CYPRUS-1 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין



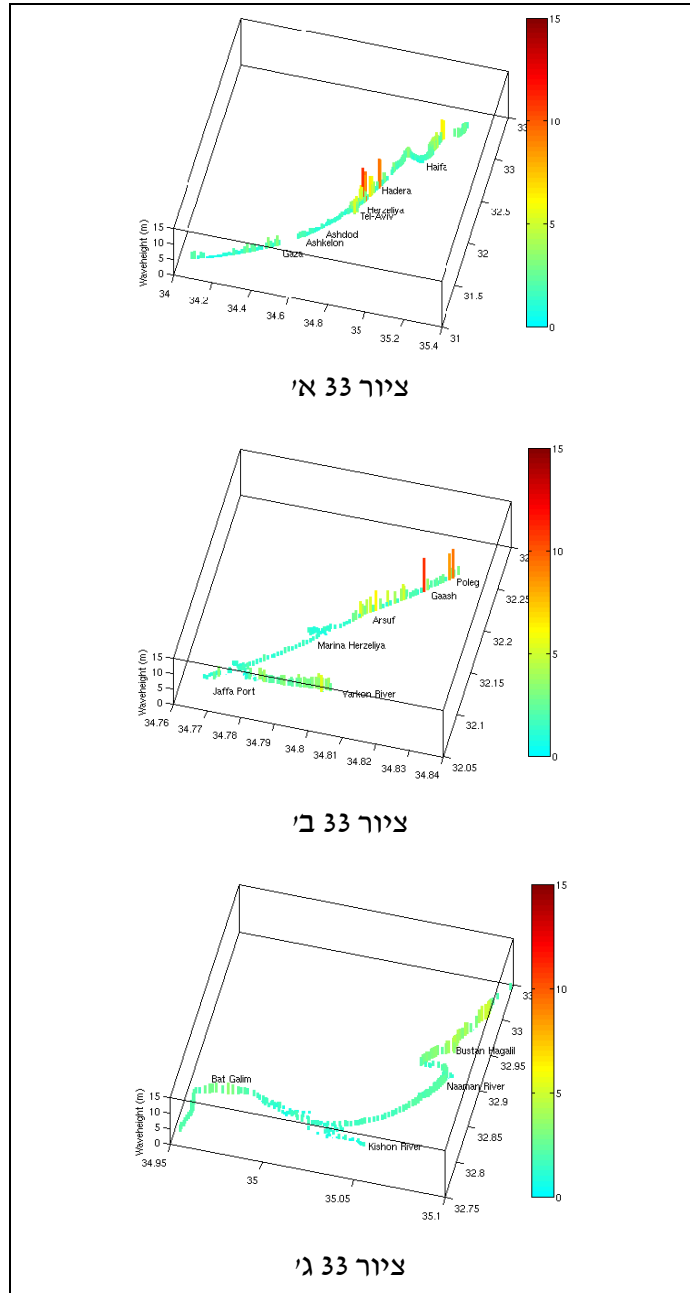
ציור מס' 31 - תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלומי בוק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים
 התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש EQ-CRETE-1 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין - המשך



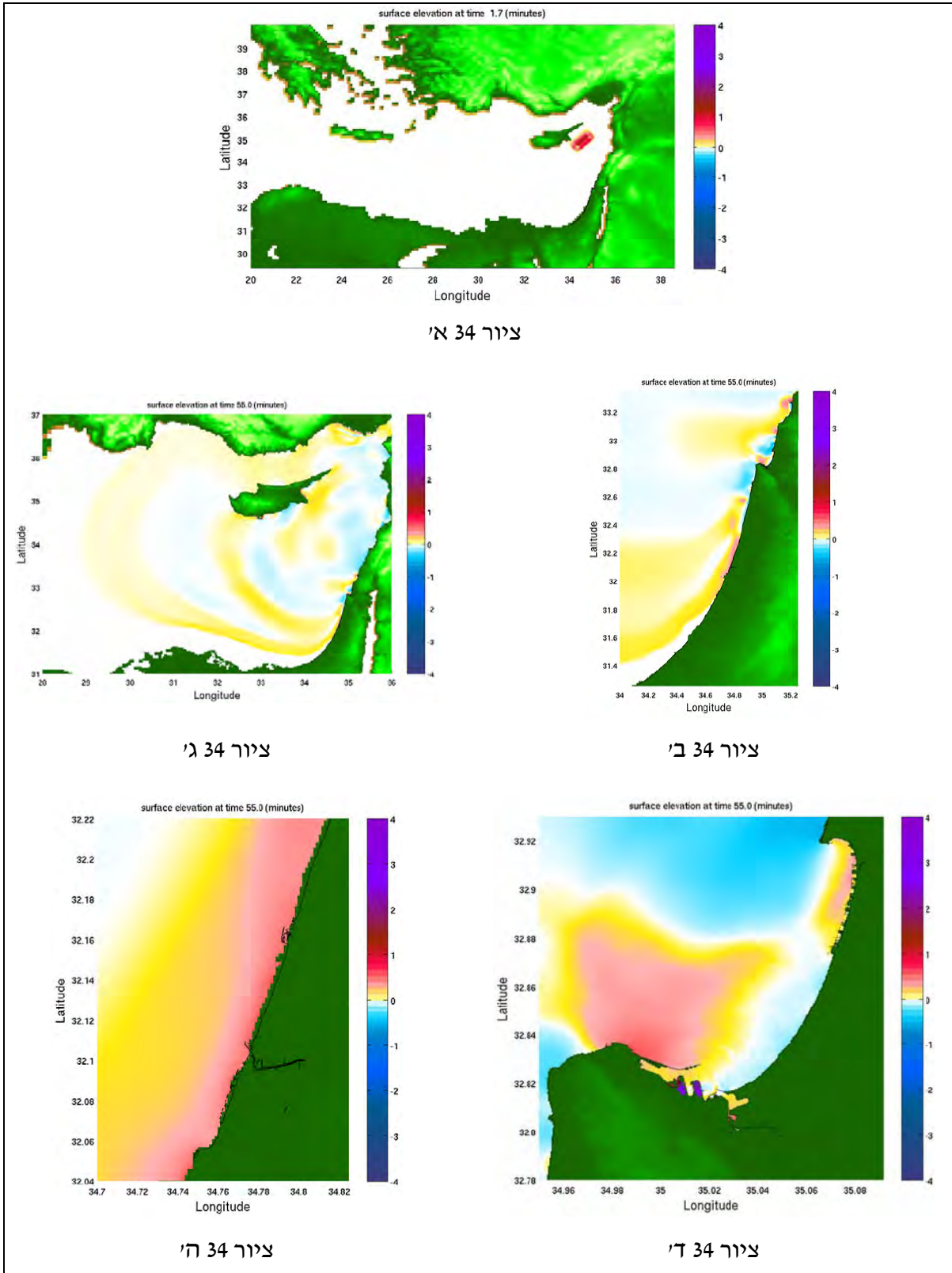
ציור מס' 32 - תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה בים ליד קפריסין. מפות שפילה והצפה מרבית אי-שפילה מרבית באזור תל אביב, בי-הצפה מרבית באזור תל אביב, גי-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד-הצפה מרבית במפרץ חיפה

תרחיש EQ-CYPRUS-1 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין - המשך



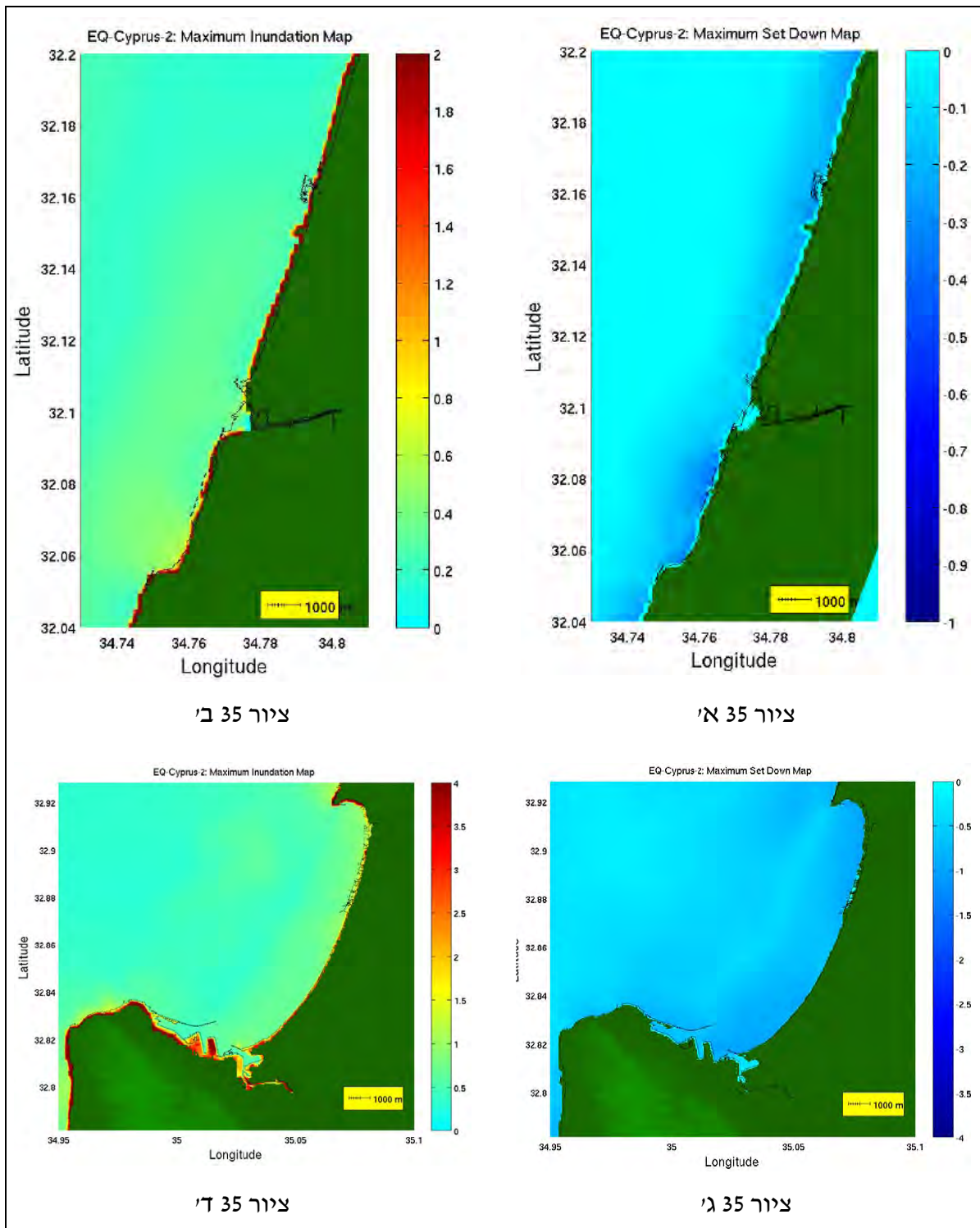
ציור מס' 33 - תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה בים ליד קפריסין, התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה

תרחיש EQ-CYPRUS-2 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין



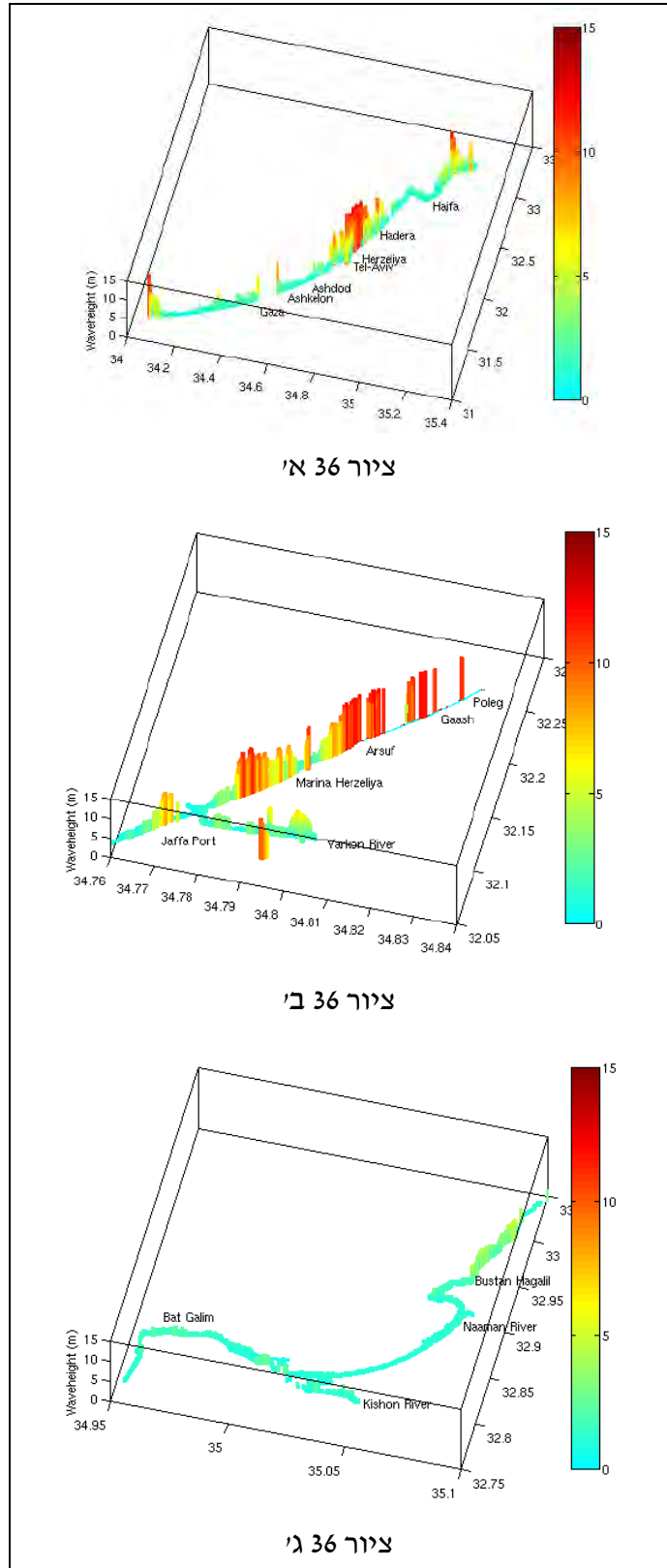
ציור מס' 34 - תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלומי בוק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים
 התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש EQ-CRETE-2 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין - המשך



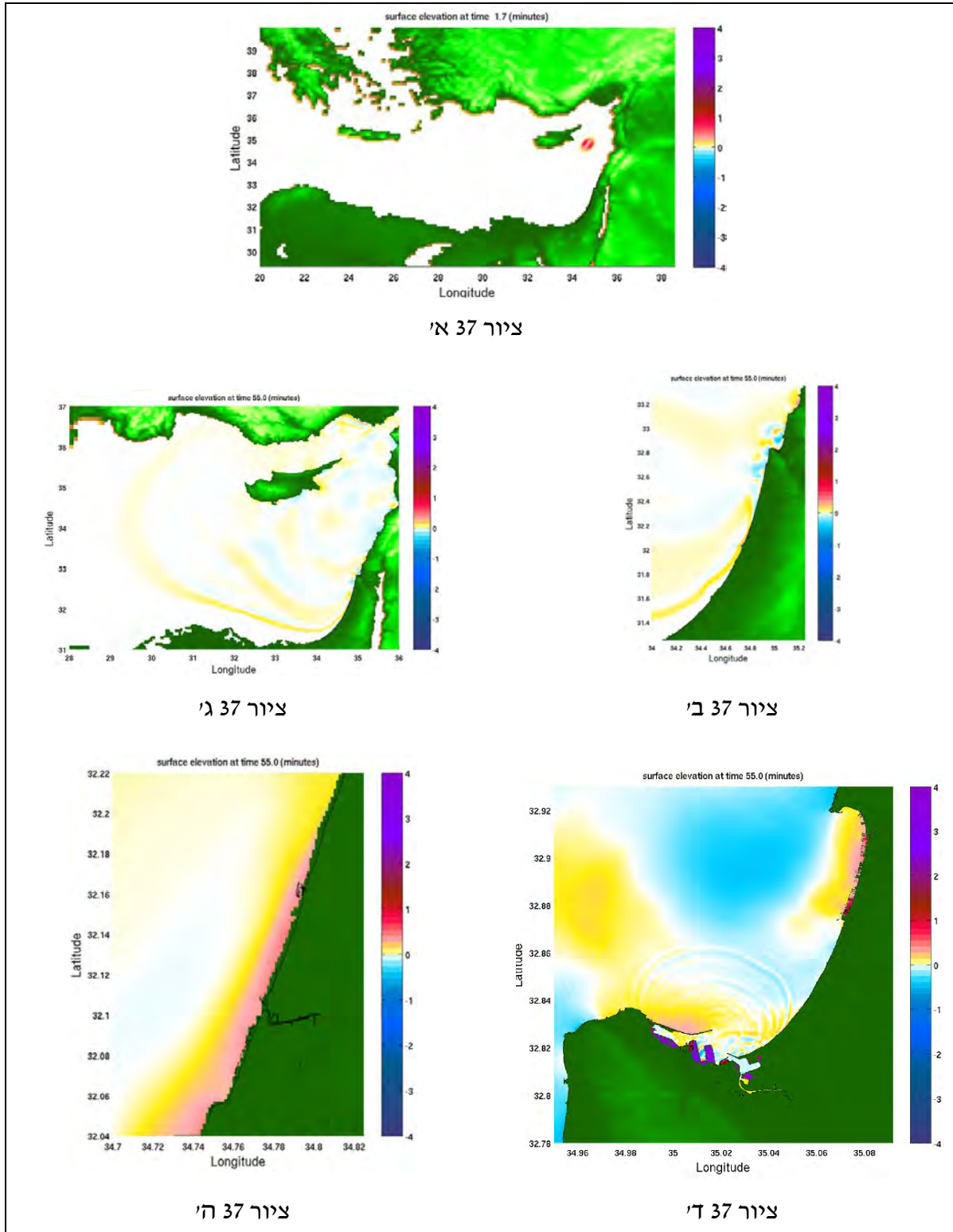
ציור מס' 35 - תרחיש EQ-CYPRUS-2 - רעידת אדמה בים ליד קפריסין. מפות שפילה והצפה מרבית א'-שפילה מרבית באזור תל אביב, ב'-הצפה מרבית באזור תל אביב, ג'-שפילה מרבית במפרץ חיפה, ד'-הצפה מרבית במפרץ חיפה

תרחיש EQ-CYPRUS-2 – רעידת אדמה בים ליד קפריסין - המשך



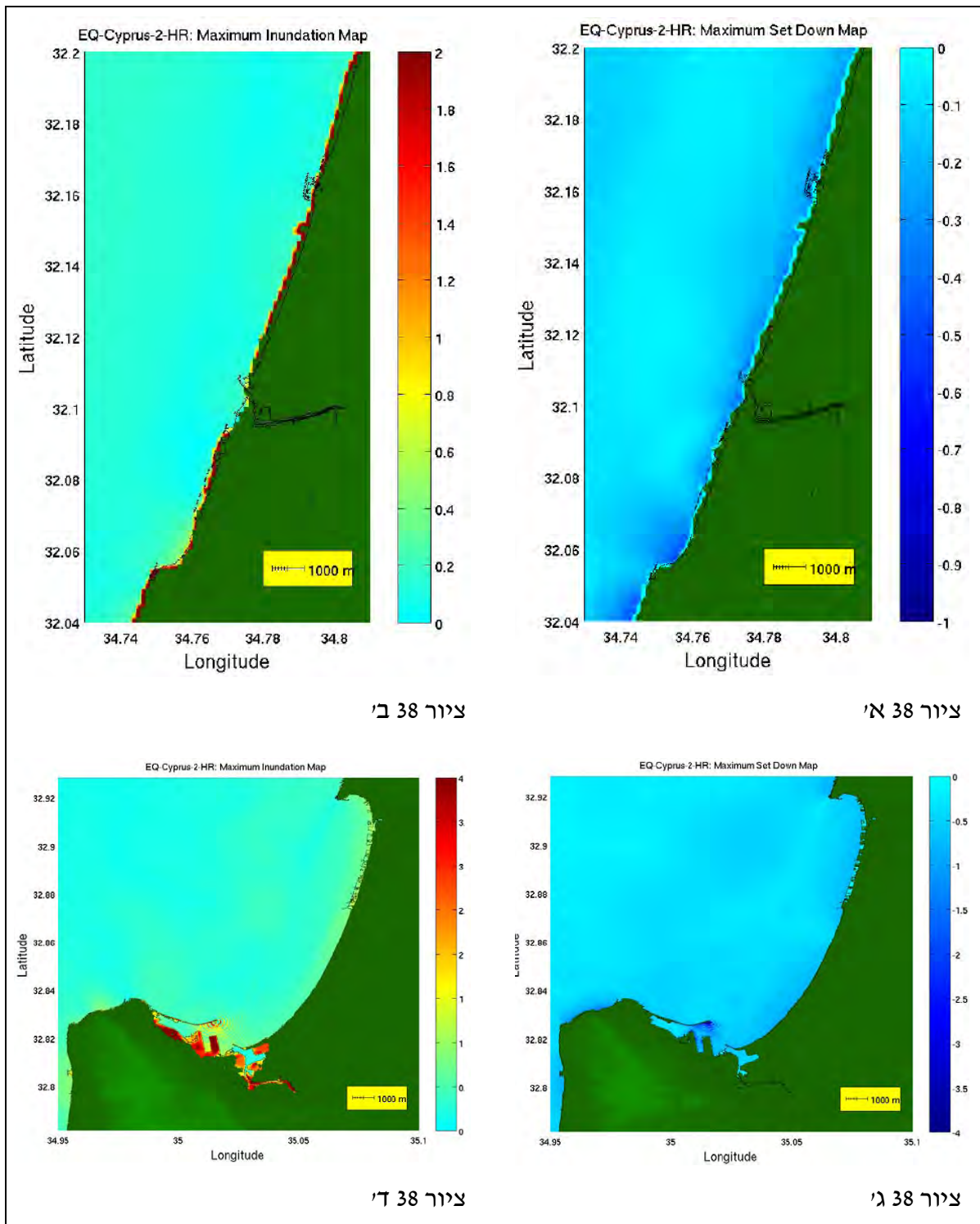
ציור מס' 36 - תרחיש EQ-CRETE-2, רעידת אדמה בים ליד קפריסין. התפלגות גובה הצפה מרבית בחוף א' – לאורך כל החוף הישראלי, ב' – פרוט באזור המרכז, ג' - פרוט באזור מפרץ חיפה

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR – רעידת אדמה בים ליד קפריסין (תוצאות ברזולוציה גבוהה)



ציור מס' 37 - תרחיש CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלומי בזק של שינוי רום פני הים
 א' - תצוגה של אזור האירוע, ב' - מבט על אזור החוף הישראלי, ג' - מבט על אזור האגן המזרחי של ים
 התיכון, ד' - אזור מפרץ חיפה, ה' - אזור תל אביב

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR – רעידת אדמה בים ליד קפריסין - המשך



צוור מס' 38 - תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה בים ליד קפריסין. מפות שפילה והצפה מרבית אי-שפילה מרבית באזור תל אביב, בי-הצפה מרבית באזור תל אביב, גי-שפילה מרבית במפרץ חיפה, די-הצפה מרבית במפרץ חיפה

10. ניתוח תוצאות הדמיות התרחישים שבוצעו

כדי לבחון את מידת הפגיעות (vulnerability) של קטעי החוף הישראלי (במיוחד בקטע המרכז ובקטע חיפה בהם היו נתונים בתימטריים וטופוגרפיים ברזולוציה גבוהה) לתרחישי הצונאמי שבוצעו ולדרג את מידת הפגיעות של קטעי החוף לתרחישים השונים, רוכזו בטבלה 5 ערכים של מספר מאפיינים מייצגים, הכוללים את:

א. **זמן ההגעה**, אשר מציין משך הזמן בין התרחשות האירוע שגרם לצונאמי ועד הגעת גל הצונאמי הראשון למרכז קטע חוף מסוים. נתון זה מיצג את זמן ההתרעה המרבי האפשרי מרגע תחילת האירוע;

ב. **רום גובה הגל** בקו המים (ביחס לאפס האיזון הארצי) בהתעלם מתרומת שינוי במפלס הים ע"י מועדי ים, נד רוח וואו הערמות מפלס בהשפעת גלי רוח (למשל בזמן סערות) וואו עליה כללית ברום פני הים בהשפעת שינוי האקלים. יצוין כי כל ההדמיות בוצעו בתנאי רום מפלס ים אפס ביחס לרום אפס האיזון הארצי; בטבלה 5 מוצגים ערכים של הגובה הממוצע Hav בקו המים, של הערך המרבי Hmx שנרשם באותו תחום של קו המים (חיפה או ת"א) וערך הגובה הסיגניפיקנטי שנמדד בקו המים, שחושב כממוצע שליש העליון של הגבהים המרביים שנרשמו לאורך כל נקודות הסריג של תחום קו המים.

ג. **שטחי ההצפה והשפילה** אשר למעשה משקפים את המרחק (מדוד מקו המים במצב ים שקט) אליו יגיע הצונאמי ואת מרחק חשיפת קרקעית הים עקב הנסיגה הזמנית של גל הצונאמי. שטח ההצפה (או שפילה) מחושב מתוך בחינה של האזור היבש המזערי או המרבי שהתקבל בכל תרחיש (הצפה או שפילה בהתאמה).

כאזורי בדיקה להצפה וגובה ההצפה (גובהי גלים) נבחר עבור חופי 'ת"א' קטע קו החוף שבין קווי רוחב $32.04^{\circ}\text{N} - 32.2^{\circ}\text{N}$ ועבור חופי 'חיפה' קטע קו החוף שבין קווי רוחב $32.78^{\circ}\text{N} - 32.925^{\circ}\text{N}$. מבחינה נומינלית יש פער במימד זה (בתחום 'ת"א' הוא גדול יותר), אך הוא "מתקזז" כאשר מביאים בחשבון שקו החוף 'חיפה' מפותל (עקום) יותר ולכן ארוך יותר (וגם תחום קווי האורך עבור 'חיפה' גדול יותר).

הגודל הממוצע עבור גבהי ההצפה מתקבל ממיצוע הערכים בתחום הנתון, והגודל המרבי מתקבל ממצאת המקסימום התחום הנתון.

בחינת הממצאים שהתקבלו מעלה כי מבין התרחישים שבוצעו, המקרה של צונאמי שנגרם ע"י רעידת אדמה באזור כרתים (EQ-CRETE-1) היה החמור ביותר מבחינת גובה ההצפה ושטחי ההצפה והשפילה. תוצאה חשובה נוספת היא, כמובן, זמן הגעת הגל הראשון לחוף הישראלי. במקרה זה, זמן הגעתו של תרחיש כרתים לחוף הישראלי ארוך יותר מהאחרים מכיוון שהצונאמי נוצר במרחק רב יותר.

טבלה מס' 5 – ערכים ממוצעים ומרביים שנתקבלו עבור התרחישים שבוצעו

שטח נסיגה (קמ"ר)		שטח הצפה (קמ"ר)		גובה ההצפה בקו החוף (מ')						זמן הופעה (דקות, שניות)		תרחיש
חיפה	ת"א	חיפה	ת"א	חיפה			ת"א			חיפה	ת"א	
				Hmx	Hs	Hav	Hmx	Hs	Hav			
0.96	1.50	5.37	11.50	4.8	1.8	1	14.8	5.7	3.5	33'20"	11'10"	LS-TLV1
1.10	2.07	5.43	11.59	5.1	2.2	1.3	14.8	6	3.5	33'10"	11'20"	LS-TLV2
2.10	0.09	17.74	15.40	12.4	6.7	4.1	12.7	3.4	1.7	8'10"	33'20"	LS-HAI1
2.26	1.20	28.90	10.40	14.8	9.7	5.6	13.3	3.9	2.2	6'24"	33'20"	LS-HAI2
3.17	2.26	18.05	13.26	8	5.7	3.8	14.7	8.2	5.7	95'00"	103'40"	EQ-CRETE-1
1.61	~0.00	6.54	10.42	4.9	2.7	1.8	11	3.2	1.8	36'48"	48'18"	EQ-CYPRUS-1
1.03	*	5.40	*	5	1.6	1	12	11.4	1.9	37'18"	51'18"	EQ-CYPRUS-2

כאשר: Hav הוא גובה ההצפה הממוצע בקו אפס ביחס לאפס האיזון הארצי, Hs הוא ממוצע השליש העליון של ערכי גובה ההצפה המרבי בקו האפס הנ"ל, ו-Hmx הוא הערך המרבי שגרשם בקו האפס הנ"ל. * : בהדמיית EQ-CYPRUS-2, באזור ת"א בלבד, נעשה שימוש בבתימטריה ברזולוציה נמוכה יותר של 30 מ' צלע התא ולכך הושמטו התוצאות מטבלה זו.

חישוב זמן מחזור גל הצונאמי עבור תרחישי רעידות האדמה

אורך הגל L בעומק מים כלשהוא h טרם שבירה נתון על פי הנוסחה (1) דלהלן:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right) \quad (1)$$

כאשר T הוא זמן המחזור בשניות של הגל, ו- g

מסמל את תאוצת הכובד בחופי הארץ ($9.796m/s$). הקשר בין חפזות (מהירות) הגל המסומן ב- c , זמן המחזור שלו T ואורך הגל הנתון ע"י $L = c \cdot T$, ולכן כאשר עומק המים קטן בלפחות שני סדרי גודל מאורך הגל המקומי, ערך הטנגס ההיפרבולי שואף לערך 1.0 ואז ניתן להשתמש בקרוב המתאים למים רדודים עבור חפזות הגל הנתון ע"י משוואה (2) דלהלן

$$c = \sqrt{gh} \quad (2)$$

יצוין כי במצב כזה, מהירות החבורה של הגלים c_g שווה לחפזות הגל,

לעומת המצב במים עמוקים שם ערכה כפולה מהחפזות.

מכיוון שאורך הגל של הצונאמי במים עמוקים הוא בסדר גודל של אלפי ק"מ (בקרוב במערכת MKS שווה ל- $1.56T^2$) וזמן המחזור כידוע נע בין 5' לכ-60' (כלומר בין כ-140 ק"מ עד כ-20,000 ק"מ בהתאמה) לעומת עומק המים באגן הלבנט של כ-3 ק"מ, ניתן להשתמש בקרוב (2) לחשב את זמן המחזור של גלי הצונאמי שהתקבלו בהדמיות של רעידות האדמה. אורך הגל L מתקבל מבחינה של תצלומי בזק עבור ריצה נתונה בה מודדים את המרחק שבין שני שיאים עוקבים של הצונאמי בשלב התפשטותו. בטבלה 6 מוצגים זמני המחזור ואורכי הגל המתקבלים עבור מקרי רעידות האדמה.

טבלה מס' 6 - זמני המחזור ואורכי הגל המתקבלים עבור תרחישי רעידות האדמה

תרחיש	עומק המים מטר	חפזות קמ"ש	זמן מחזור דקות	אורך גל ק"מ
EQ-CRETE-1	2200	530	23	200
EQ-CYPRUS1	1250	400	15	100
EQ-CYPRUS2	1500	437	14	100

על פי הממצאים הנ"ל נראה כי זמני המחזור שהתקבלו הם בהחלט תואמים לערכים המקובלים בספרות (למשל Favalli et al. (2009) מציינים זמני מחזור אופייניים לצונאמי של רעידות אדמה של "1500 ולצונאמי עקב גלישות של בין "150 ל- "200).

10.1 דיון לגבי הדמיות צונאמי הנוצרים כתוצאה מגלישות תת-ימיות

רב הנעלם על הידוע בנושא של היווצרות צונאמי מגלישות תת-ימיות. הידע לגבי מימדי הגלישה וצורתה, התכונות המכאניות של החומר הגולש, ומהירות תנועתה במדרון (בתלות בזמן הגלישה), הינו מוגבל, ורוב התיאורים מבוססים על מודלים ניסויים קטנים יותר, מודלים מתמטיים והשערות כלליות. בעבודה הנוכחית נעשה ניסיון ראשוני לבחון השפעה פרמטרית על היווצרות הצונאמי מגלישות ולאפשר מתן יכולת התקדמות בכיווני חקירה מתאימים בהמשך

מנגד קיימת הגישה של הדמיה ישירה (DNS), בה נלקחים לחישוב כל המשוואות הבסיסיות הרלוונטיות לתהליך הפיסיקאלי יחד עם, בדרך כלל, שימוש ברזולוציה מרבית אפשרית. כמובן שגישה זו היא מאוד בזבזנית ועלולה להחמיץ את המקרים החשובים בבעיה הנלמדת, במיוחד שמדובר בבעיה עבודה מרחב הפרמטרים גדול או בעלת מספר רב של ממדים אשר כל אחד לכשעצמו דורש מאמץ חישובי ניכר.

בעבודה זו, שמהווה שלב ראשוני בהתמודדות עם נושאים אלו בחרנו בגישה המבוססת על מודלים פשטניים המתארים את תהליך הגלישה. כדי למצוא גדלים מתאימים ממרחב הפרמטרים המאפיינים את הגלישה אנו מבצעים סדרה של ניסויים בצורת של ניסוי וטעייה אשר יאפשרו לנו למקד את החיפוש אחר המקרים המעניינים בהמשך. ניתן למצוא מספר בלתי מבוטל של מחקרים בנושא זה שנעשו בגישה זו. ניתן לציין העבודה של Grilli et. al., (2002).

בשתי ההרצות של צונאמי מגלישה תת-ימית ליד תל אביב (LS-TLV1 ו-LS-TLV2), נבחנו מהירויות גלישה שונות כאשר כל שאר המאפיינים של גיאומטרית הגלישה (מיקום ומימדים) נותרו קבועים. במקרה השני (חיפה), השינוי התבטא בנפח הגלישה, בעוד שמיקום ומהירות הגלישה נותרו קבועים. כאשר משווים את שתי הגלישות ליד תל אביב (LS-TLV1,2) בהן מהירות הגלישה הממוצעת גדלה מ-25 מ/ש' ל-50 מ/ש', מוצאים ששטחי ההצפה, נסיגה וגובה הגלים על קו החוף עבור הגלישה השנייה עולים במעט על אלו של הראשונה. כלומר, הגדלת מהירות הגלישה מגדילה את האנרגיה המועברת ליצירת גלים גבוהים יותר,

דבר סביר מאחר והתנע של המצב השני גדול מהמקרה הראשון. מצד שני אין לשינוי זה השפעה על זמן המופע של הגל בחוף, מה שמצביע על כך שזמן המחזור של הגל הנוצר זהה כמעט בשני המקרים, היות וחפזות הגל תלויה רק בעומק המים ובזמן המחזור של הגל.

אמנם בהשוואת הגלישות מול ת"א לעומת אלה מול חיפה לא הייתה זהות מוחלטת בפרמטרים הקובעים, אך עדיין אפשר לראות את שתי הגלישות מול חיפה כנגד אלה שמול ת"א כדי דומות, כיוון שבכל המקרים מרחק הגלישה הינו בסדר גודל של 10 ק"מ וגובה האנכי של הגלישה בסביבות 700 מ' ובנוסף לכך, כפי שהראינו מקודם שטחי הביקורת דומים.

השוואת שתי הגלישות באזור חיפה, LS-HAI1 ו-LS-HAI2, מעלה שהגדלת נפח החומר הגולש (מ-0.625 ק"מ³ ל-1.6 ק"מ³) גורמת להגדלה ניכרת בשטחי ההצפה ונסיגה, במיוחד באזור חיפה, מול אזור הגלישה. בנוסף, זמן הופעת הגלים בחופי חיפה מתקצר במעט במקרה של LS-HAI2.

תוצאה מעניינת מתקבלת כאשר משווים את גובהי ההצפה המתקבלים באזורי ת"א וחיפה. ניתן היה לצפות כי בכל המקרים הגלים הגבוהים ביותר יתקבלו באזור הקרוב למיקום הגלישה, היות ופחות אנרגיה מתבזבזת בחיכוך עם הקרקעית ובתוך הזורם עצמו על מנת להגיע לחוף. אולם, מסתבר שהגלים המרביים שהתקבלו באזור תל אביב כתוצאה מהגלישה באזור חיפה, היו גדולים הרבה יותר מהגלים שהתקבלו באזור חיפה כתוצאה מגלישת באזור תל אביב (הדבר נכון לכל המקרים שנבדקו). יתכן שהשוני נובע מתצורת החוף והבתימטריה, כאשר הגלישה באזור חיפה מלווה באפקט הגברה ע"י גלי פיזור משניים הנוצרים ע"י ראש הכרמל, בשעה שהגלישה באזור תל אביב מלווה באפקט הקטנה של גובה הגלים בחיפה, בגלל אותה תופעת פיזור גלים מראש הכרמל.

בנוסף, נצפתה גם היווצרות של גלי פיזור משניים וכן החזרות גלים מכיוון ראש עכו. עבור גלישות הקורות בדרך כלל בקרבת קצה מדרון מדף היבשת, היווצרות הגלים נמשכה זמן רב (מספר דקות), בהתאם לזמן התנועה של החומר הגולש במדרון. נמצא כי עוצמת מקור הצונאמי תלויה בעיקר בנפח החומר הגולש ובקצב גלישתו אך גם בתלילות מדרון הגלישה, סוג החומר הגולש, מרחק התנועה של הגלישה במדרון, כמו גם בעומק המים בו מתחילה הגלישה. כיוון שהגוש הגולש בהידרדרותו יוצר גלים (בדומה לרעידת אדמה), ומשך הגלישה ארוך יחסית, נצפתה יצירת מערכת מרובת גלים (במספר הגדול ביותר מסדר גודל אחד בהשוואה למקרה של רעידת-אדמה). השילוב של תנועת המקור במורד המדרון יחד עם הופעת גלים בקצב מחזורי יוצר גל שצורתו דומה לספיראלה.

חזית הגל הראשון הפוגע בחוף יכולה להיות מעל או מתחת לרום פני הים במנוחה. הדבר תלוי במספר גורמים הקשורים בתהליך הגלישה, כמו, מהירות הגלישה ומיקומה, צורת הבתימטריה באזור הגלישה ועומק המים בו מתחילה הגלישה. רק כאשר הגלישה מתרחשת בתנאים מיוחדים בהם מישור הגלישה אחיד ומהירות החבורה של הגלים הנוצרים נמוכה ממהירות הגוש הגולש, חזית הגל הפוגע ראשון תהיה בצידו המשתפל (מתחת לפני הים). ההסבר לכך הוא שמנגנון הגלישה יוצר תת-לחץ בצד של עקבת הגלישה וזה שגורם לחזית הגל להיות מתחת לפני המים.

בשל העובדה שהמקור נע לעומק הים, גם מהירות הגלים גוברת בהתאם, ולכן גלים מאוחרים יכולים להשיג את אלו שנוצרו בתחילת האירוע. ואכן ניתן היה לראות התכנסות של גלים ליצירת גל חד אחד כמו בתופעה של גלי הלם.

יצוין שהגלישות קורות על שטח אדמה קטן, שהוא בד"כ קטן ביותר מסדר גודל אחד, מזה של רעידת אדמה. עובדה זו עושה את תופעת הצונאמי עקב גלישות יותר ממוקדת ומקומית בשלב הפגיעה בחוף. צונאמי עקב גלישה מתבטא בדיספרסיה רבה ואפשר היה לראות זאת בהדמיות שנעשו בשני המקרים באזור המרכז ובאזור חיפה. בשניהם (ת"א, חיפה) מורגשים הגלים המתפשטים באזור ה"נגדי". דהיינו במקרה של מקור מול ת"א, הגלים המגיעים לאזור חיפה בעלי פוטנציאל הצפה משמעותי ולהפך.

10.2 דיון לגבי הדמיות צונאמי הנוצרים כתוצאה מרעידות אדמה חזקות

ברעידות אדמה תת-ימיות, התפתחות הצונאמי הינה כגל המתפשט סביב מוקד היצירה. לגל יש מספר גלי משנה (רכבת גלים - wave train) וצורתו המרחבית מושפעת מממדי המקור (כלומר יחסי אורך/רוחב של הרעש). גובה הגל שנוצר מושפע מעוצמת המקור (מידת התרוממות הקרקע או פני הים) ועומק הים באזור היצירה. זמן המחזור של גל הצונאמי יהיה תלוי בגודל האנרגיה המועבר למסת המים במקור היצירה. בהדמיות נצפתה פגיעה של הגל העיקרי של הצונאמי במקרים השונים באזורי המדידה שלנו (ת"א, חיפה) ואחר כך נצפו במקרים מסוימים פגיעות משנה. בדרך כלל התמונה מורכבת למדי למרות שישנם מספר מאפיינים טהורים (הכוונה למקרים בהם הבתימטריה פשוטה ומאפשרת תאור אנליטי למשל). בכל המקרים נצפו הצפות באזורי שפכי הנחלים (ירקון או קישון) וההבדלים שנמצאו היו במשך ובנפח ההצפה. בשלבים שונים נצפתה גם שפילה של פני הים עקב נסיגת גל צונאמי, שפילה שחשפה את קרקעית חלק מתחום המים הרדודים הקרוב לחוף וגרמה זמנית להקטנת עומק המים במספר מטרים תוך מעגנות ונמלים.

11. מסקנות

- א. בעבודה זו פותחה בחקר ימים ואגמים לישראל בשיתוף המכון הגיאולוגי (לעתיד), המינהל למדעי האדמה והים במשרד התשתיות הלאומיות), לראשונה בארץ, יכולת לבצע הדמיות ממוחשבות של מגוון תרחישי צונאמי באמצעות מודל מתקדם ביותר ומודל גובה ובתימטריה ברזולוציה גבוהה.
- ב. במסגרת העבודה נסקרו תוכנות רבות להדמיית תרחישי צונאמי הקיימות בשוק המסחרי והחופשי. כמה מתוכנות אלה נבחנו ונוסו ביתר פרוט ונמצא שתוכנת GeoClaw היא המתאימה ביותר לקליטה בארץ. תוכנה זו הראתה ביצועים נומריים מרשימים ביותר, הן מבחינת מידול (מודל דו-מימדי בלתי-ליניארי ושימור גדלים בסיסיים של הזרימה), והן מבחינת סכימת ההפרשים האדפטיבית, המאפשרת קבלת פתרונות בעלי גרדיאנטים גדולים.
- ג. כיוון שתופעת הצונאמי מתפרשת על סדרי גודל בתחום רחב מאוד (מסקאלה אוקיאנית של אלפי ק"מ ועד סקאלה של מבנים חופיים של מטרים ספורים) ובנוסף לכך הינה דו-ממדית בשלבים הראשונים של הסימולציה ועד תלת-ממדית בשלבים הסופיים של אינטראקציה עם מבנים חופיים, הצורך בשיטה נומרית יעילה הוא אקוטי. יתר על כן, לצורך הטיפול בבעיות גדולות מסוג זה נדרשת בנוסף לתוכנה גם חומרה מתקדמת (כמו למשל מעבדים מהירים, זיכרון גדול ורוחב פס גדול בין הזיכרון/ות למעבד/ים), והקוד צריך להיות ממוקבל או ניתן למיקבול יעיל. תכונות אלו נמצאו בתוכנת GeoClaw ונראה שיש בה הפוטנציאל להרחבת החישובים בהמשך למגמה של העבודה שבוצעה עד כה.
- ד. מספר התרחישים שבוצעו במחקר הנוכחי צומצם למקרים בעלי פוטנציאל ההרס הגבוה יותר בלבד באגן המזרחי של הים התיכון, וזאת כתוצאה מזמני חישוב ארוכים שנדרשו לדימוי תרחישים ברזולוציה גבוהה (עד 10 ימים למקרה).
- ה. מפאת משך הזמן הרב שנדרש להרצות באמצעי המחשוב שעמדו לרשות המחקר, ההדמיות התמקדו במקרים של הדמיות צונאמי ע"י רעידות אדמה בהופעת גל הצונאמי הראשון בחופי הארץ ועוד כמחצית שעה לאחריו. על פי מידע מהספרות ידוע כי הגל הראשון אינו בהכרח ההרסני ביותר, ולכן בשלב זה יש לראות בממצאים שהתקבלו סף תחתון של הערכים המרביים המתקבלים בהדמיה מלאה (כ-5 מחזורי גל צונאמי) של האירוע.
- ו. התרומה הייחודית בעבודה הנוכחית, מעבר לקליטת התוכנה להדמיית צונאמי (GeoClaw) והתאמתה והבאתה למצב אופרטיבי מיידי, טמונה בשיפור משמעותי של האיכות והרזולוציה של מודל הבתימטריה והטופוגרפיה (בין היתר בגלל מגבלות ביטחון למסירת הנתונים לגורמי חוץ) שבעזרתו מבצעים את התרחיש. גודל צלע הסריג הוקטן מ-450 מ' אצל Kit et al. (2007), וקטן מ-35 מ' אצל Thio (2009) לסריג בגודל אורך צלע תא של 5 מ'. השיפור ניכר לאורך מרבית החוף הישראלי, במיוחד באזור המרכז ובאזור חיפה (כ-30 ק"מ אורך חוף בכל אזור), בטווח העומקים שבין 500- מ' ועד 8- מ' בים וכן ביבשה הסמוכה לחוף מפני הים בגובה 0 מ' ועד לגובה של 10+ מעל פני הים.
- ז. היכולת שנבנתה במחקר הנוכחי לשימוש במודל נומרי מתקדם והשיפור באמינות וברזולוציה של המודל הממוחשב של הבתימטריה בים והטופוגרפיה בחוף, יאפשרו בעתיד פיתרון ויישום מעשי של

בעיות בנושא דימוי תרחישי צונאמי. בהתאם, אפשר יהיה לקבל אומדנים מדויקים הרבה יותר מאלה שהוצגו במחקרים הקודמים, בפרט לגבי חישוב גובה גל הצונאמי בקרבת החוף ומידת ההצפה שלו בחוף.

ח. יצירת כלי מחקר זמין ואמין בארץ תביא גם להעמקת ההבנה והידע בנוגע לתהליכים הלא-ליניאריים המתפתחים בתחום המים הרדודים עד מי אפסיים באינטראקציה עם מבנים חופיים (שוברי גלים, פיזור במעגנות ונמלים, השפעות על ראשי יניקה, כמו גם להצפה הצפויה בחוף כתוצאה מהתפשטות ועליית הצונאמי (runup) בשלביו המתקדמים (כמו דיספרסיה באופן כללי, יצירת גלי משנה ע"י פיזור, החזרה, ושבירה). במקביל, פותחה היכולת ליצירת אנימציות ברזולוציה גבוהה שמאפשרת לבחון את הדינאמיקה של התהליך מתחילתו ועד סופו, ולקבל תובנות חדשות.

ט. הקטנה של תאי הסריג של מודל הגובה הממוחשב מתחת ל-5 מ' תאפשר הדמיות ממוקדות ברזולוציה גבוהה של מבנים חופיים תלת-ממדיים וקטנים יותר, הערכת שטחי הצפה ושפילה ביתר דיוק, כמו גם חישובי כוחות והסעת סחופת (חול) ושברי עצמים כתוצאה מגלי הצונאמי.

י. ההדמיות מראות שמבין ארבעת תרחישי רעידות האדמה, האירוע של כרתים הוא החמור ביותר מבחינת פוטנציאל ההרס. מאידך, זהו גם המקרה המרוחק ביותר מחופי ישראל ולכן מאפשר זמן התרעה גדול יותר (כמעט שעה וחצי) והתארגנות להתגוננות אזרחית טובה יותר. מנגד, מקרי הגלישות שנבדקו במדרון החוף הישראלי, באופן טבעי מאפשרות זמן תגובה והתארגנות מוגבל בלבד של כ-10 דקות לאוכלוסיה הקרובה למוקד הגלישה. הגלים הנוצרים במקרים אלה יכולים להגיע לגובה של כ-10 מטרים, ולגרום להצפה ונסיגה בשטחים נרחבים.

יא. ביחס לזמן המופע של הצונאמי בחוף הישראלי, הממצאים במחקר הנוכחי עולים בקנה אחד עם אלה שהתקבלו אצל Thio et al. (2007), אצל Kit et al. (2007) ואצל Beisel et al. (2007) ואצל Thio (2009). (2009) Thio, הציג גם תוצאות של הצפה בחוף, שהצביעו על ערכי הצפה קטנים יותר מאשר במחקר של גלנטי, רוזן וסלמון (2009) אך התרחישים הקיצוניים שסומלצו לא היו זהים.

יב. מפאת היקף אמצעי המימון ולוח הזמנים שעמדו לרשותנו ביחס להיקף העבודה שנדרש מסגרת עבודת המחקר הנוכחית. לשם יצירת בנק תרחישים מלא ומחשוב שלילת המידע ממנו, שלא ניתן היה לבצעם.

יג. יש לציין שהנזק של הצפה אינו רק בחדירת מים למקומות יבשתיים, אלא גם בהסעת סחופת וגריפתה כמו גם בפגיעה במבנים המצויים בקרבת החוף והסעה של שברי עצמים. העלייה של פני המים למשך זמן ניכר עקב אי יכולת התנקזות בזמן שעד הגעת גלים משניים או הגל הבא, צפויה לגרום להפרעה משמעותית (עד כדי השבתה) של פעילות תחנות הכוח החופיות, היות ולא ניתן יהיה להזרים את מי הקירור הימה בגלל הקטנת גרדיאנט הזרימה, שהיא גרביטציונית. מצב זה עלול גם להפריע למתקני השאיבה של מפעלי ההתפלה החופיים, שוב בגלל שינוי גרדיאנט זרימה, עד כדי גרימת הפסקת פעילות זמנית שלהם. הפרעה נוספת היא ייתכנות הפגיעה בנמלים ובמעגנות ובשוברי הגלים שלכם, כמו גם באוניות וכלי השייט המצויים בהם והסחורות והציוד שעל רציפיהם.

יד. גם השלב של נסיגת הגל עלול להיות הרסני היות ובמהלכו כמויות גדולות של סדימנטים יסחפו הימה וישאירו את רצועת החוף החולית, שעובי שכבת החול בה קטן מאוד יחסית, עירומה. גם בנמלים,

שפילה של פני המים במספר מטרים עלולה לגרום נזקים כבדים לכלי השיט והאוניות, ובבריכות הקירור עלולה להיווצר סכנת של אי יכולת שאיבה של מי קירור (אדי הטורבינות) ואפילו שאיבת אוויר, דבר שגם הוא יכול לשתק את פעילות ייצור החשמל בתחנת הכוח החופיות. הנזק עלול להיות חמור עד כדי שיתוק חלקי של פעילות המשק לזמן של ימים רבים אם לא מעבר לכך.

12. המלצות

- א. יש לפעול בכל הרמות הממלכתיות והציבוריות להתארגנות לסיכון מגלי צונאמי ובכלל זה אמצעים לקבלת התרעה מוקדמת, השלמת בנק תרחישים ושליפה מיידית של המידע הרלוונטי על צפי היקף הפגיעה ותכניות המגירה להנצלה, לחינוך והדרכת הציבור להתנהגות נכונה במקרה כזה ולבחינת וביצוע אמצעי מיגון וואו מזעור נזקים מבעוד מועד.
- ב. כדי להשלים את בניית בנק התרחישים נדרשת לאפיין ולדמות את מירב תרחישי הצונאמי הפוטנציאליים, ובאופן קרוב למציאות ככל האפשר.
- ג. יש לנצל מדידות מפלס הים בחופי הארץ וואו באגן מזרח הים התיכון בסמוך לרעידות אדמה חזקות (ממגניטודה 6 ומעלה) כדי לבצע הרצות אימות ולכייל את המערכת ההדמיה, לפחות בתחום הערכים הנמוכים של מקור הצונאמי.
- ד. יש צורך בהשלמת מיפוי מדף היבשת של ישראל במערכת רבת אלומות, כולל מיפוי משלים בקטעי החוף שבהם הנתונים הבתימטריים אינם אמינים, כמו למשל בקטע החוף שבין נחל פולג לגבעת אולגה, קטע חופי אשקלון מחוף הפארק הלאומי ועד המרינה הכחולה באשדוד, קטע חופי ראשון לציון, ומחופי עכו עד צפון נהריה. כמו כן, יש לאסוף נתונים טופוגרפיים ברזולוציה גבוהה (למשל, באמצעות מיפוי LIDAR) לאורך כל חופי הארץ ברוחב חוף של כ-1.5 ק"מ, ונתוני עומק וטופוגרפיה של מוצאי הנחלים בחופי הארץ למרחק של עד כ-5 ק"מ במעלה מהמוצא לים. המידע החדש יאפשר לשפר במידה ניכרת את מודל הגובה הקיים ובהתאם גם את אמינות התרחישים.
- ה. מוצע לבצע הדמיות ממוקדות של תרחישי צונאמי לאתרי תשתיות עיקריים: נמלי חיפה, חדרה אשדוד ואשקלון, כולל בריכות הקירור בקרבתם (בחיפה, בחדרה, בתל אביב, באשדוד ואשקלון), לשפכי הנחלים לרבות אלה שעבורם לא היו נתונים בנמצא (מוצא הגעתון, נעמן, חדרה, אלכסנדר, סורק, לכיש), לחוף פלמחים באזור מפעל ההתפלה, וכן באתרי עתיקות מורשת עיקריים כמו למשל עכו וקיסריה.
- ו. לקיצור משך ביצוע התרחישים ברזולוציה גבוהה (כיום כ-10 יממות) יש צורך בקבלת גישה וזמן מחשב למערכת מחשב-על, או לחילופין לדאוג לשיפור יכולות מערכת המחשב הנוכחית.
- ז. מומלץ להקדיש מאמץ מחקרי נוסף לשיפור ההדמיות של היווצרות גל הצונאמי הן עקב גלישות והן עקב רעידות אדמה, תוך התייחסות בחישובים לאינטראקציות שבין הנוזל (מי הים) לגוף היוצר את גלי הצונאמי. במקביל, מומלץ לשפר את מודול חישוב רום טיפוס גל הצונאמי בחוף הקיים ושל והתפשטות בתחום היבשה תוך התחשבות בחספוס והפרעות זרימה של מבנים בחוף

ובקרבתו וכן לבחון פרמטרים נוספים הקשורים לתנאי הגבול של המודל (לאיזה תנאי גבול אתה מתכוון?).

ח. כמו כן מומלץ לבחון גם את התלות הפרמטרית של המקרים השונים ולבחון את תוצאתם בהתייחס לחוף הישראלי. למשל, רצוי לבצע מבחן רגישות לפרמטרים השונים של המקור כדי להבין טוב יותר כיצד שינוי במגניטודה של רעידת האדמה או נפח הגלישה או מהירות הגלישה משפיעים על הצונאמי שנוצר.

ט. יש צורך לדמות את מהלך תרחישי הצונאמי למשך זמן ארוך יותר (לפחות 6 מחזורים או עד 12 שעות) כדי לאמוד את השפעת גלי המשנה שמגיעים לאחר הגל הראשון, החזרות ועוד.

י. ביצוע סימולציות ברזולוציה גבוהה יותר בזמן ובמרחב, כמו גם רישום מפורט יותר של סדרת הזמן בנקודות מדידה צפופות ככל האפשר, יאפשרו לדמות תנאים קרובים יותר למציאות ולקבל מושג מדויק יותר על הצפוי מהצונאמי. ממצאים מסוג זה יעזרו בתכנון הנדסי יעיל להגנה או מזעור הסיכון מצונאמי, עריכת תקני בנייה מוגנת מצונאמי בקרבת החוף וכדומה.

יא. מומלץ לחקור בהמשך את מידת עמידות המצוק החופי לפגיעת גלי צונאמי, עבור קטע חוף בו המצוק נמוך יחסית וצפוי להיות מוצף ועבור קטע חוף עם מצוק גבוהה, שבולם את מכת גלי הצונאמי ללא הצפתו.

13. מקורות

1. גלנטי, ב., רוזן, ד.ס., סלמון, ע., 2008. התאמת תוכנות להדמיית צונאמי ויצירת מגוון תרחישים לצורך התרעה מוקדמת לצונאמי בישראל, דו"ח חיא"ל מס' H64/2008, דו"ח התקדמות, דו"ח מג"ל מס' TR-GSI/15/2008, דו"ח למינהל המחקר למדעי האדמה, משרד התשתיות הלאומיות
2. גולדשמיט, ו. וגלבו, מ., 1986. גאות ושפל בישראל. אופקים בגיאוגרפיה, כרך 15, החוג לגיאוגרפיה, אוניברסיטת חיפה, עמ' 46-21.
3. מרט י., גודמן ב., 2008, פגיעת צונאמי בתחנת הכח בחדרה, דו"ח מינהל המחקר למדעי האדמה, משרד התשתיות מס' ES-29-2008.
4. שלם, נ., 1956. על נחשולי ים סיסמיים (צונאמים) במזרח הים התיכון. ידיעות החברה לחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה, תשט"ז, שנה כ', 170-159.
5. Almagor, G. (1993). *Continental slope processes off northern Israel and southernmost Lebanon and their relation to onshore tectonics*, Mar. Geol. 112, 151-169.
6. Almagor, G., and J. K. Hall (1984). *Morphology of the Mediterranean continental margin of Israel*, Geol. Surv. Isr. Bull. 77, 1-31.

7. Beisel, S.A, Chubarov, L.B., Kit, E., Levin, A., Shokin, Yu.I., and Sladkevich, M., (2008). *Tsunami near the Israeli coast: Preliminary results of numerical modeling*, In: Proceedings of the IX All-Russian Conference “Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics”. St. Petersburg: Nauka, 2008, 750 pp. P. 432-436.
8. Berger, M.J. and LeVeque., 1998. R.J., *Adaptive mesh refinement using wave-propagation algorithms for hyperbolic systems*, SIAM J. Numer. Anal., 35:346–365, 1998.
9. Billi, A., R. Funiciello, L. Minelli, C. Faccenna, G. Neri, B. Orecchio, and D. Presti (2008), *On the cause of the 1908 Messina tsunami, southern Italy*, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L06301, doi:10.1029/2008GL033251.
10. Burwell, D., Tolkova, E. and Chawla, A., 2007. *Diffusion and Dispersion Characterization of a Numerical Tsunami Model*, *Ocean Modeling* 19 (2007) 10-30.
11. Chaytor, Jason D., ten Brink, Uri S., Solow, Andrew R., Andrews, Brian D., (2008). *Size Distribution of Submarine Landslides along the U.S. Atlantic Margin*, *Marine Geology* (2008), doi: [10.1016/j.margeo.2008.08.007](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.08.007).
12. Dominey-Howes, D. (2002). *Documentary and geological records of tsunami in the Aegean Sea region of Greece and their potential value to risk assessment and disaster management*, *Natural Hazards* 25, 195-224.
13. Elias A, Tapponnier P, Singh SC, King GCP, Briais A, Daëron M, Carton H, Surssock A, Jacques E, Jomaa R, Klinger Y (2007) *Active thrusting offshore Mount Lebanon: Source of the tsunamigenic A.D. 551 Beirut-Tripoli earthquake*. *Geology* 35 (8):755-758, DOI: 10.1130/G23631A.1
14. Favalli M., Boschi E., Mazzarini F., and Pareschi M. T., 2009, *Seismic and landslide source of the 1908 Straits of Messina tsunami (Sicily, Italy)*, *Geophysical Research Letters*, VOL. 36, L16304, doi:10.1029/2009GL039135, 2009
15. Fokaefs, A. and G.A. Papadopoulos, 2007. *Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea*, *Nat. Hazards*, 40, p. 503-526, doi: 10.1007/s11069-006-9011-3.
16. Galili, E., Horwitz, L. K., Hershkovitz, I., Eshed, V., Salamon, A., Zviely, D., Weinstein-Evron, M., and Greenfield, H. (2008). *Comment on “Holocene tsunamis from Mount Etna and the fate of Israeli Neolithic communities” by Maria Teresa Pareschi, Enzo Boschi, and Massimiliano Favalli*. *Geophysical Research Letters*, 35, L08311, doi:10.1029/2008GL033445.
17. Garziglia, S., Migeon, S., Ducassou, E., Loncke, L., Mascle, J., 2008. *Mass-transport deposits on the Rosetta province (NW Nile deep-sea turbidite system, Egyptian margin): Characteristics, distribution, and potential causal processes*. *Marine Geology* 250: 180–198.
18. George, D. L., 2006. *Finite Volume Methods and Adaptive Refinement for Tsunami Propagation and Inundation*, PhD thesis, University of Washington.

19. George, D. L., 2008. *Augmented Riemann solvers for the shallow water equations over variable topography with steady states and inundation*, J. Comput. Phys., 227(6):3089–3113, March 2008.
20. Gisler, G. R., (2008). *Physics of Geological Processes*, Ann. Rev. Fluid Mech. 2008, pp. 71-90.
21. González, M., and Behrens, J., (2008), *Deliverable WP5.3, Various Numerical Models for Various Problems of Tsunami Waves, WP 5: Improvement of Numerical Models*, Project no. 037058 (GOCE) TRANSFER Tsunami Risk ANd Strategies For the European Region. METU, UCA, UIBO, FORTH, CEA/DASE, ICG, CNRS, UPPA, NERC, INGV
22. Guidoboni, E., A. Comastri, and G. Traina (1994). *Catalogue of Ancient Earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th Century*, Istituto Nazionale di Geofisica—Storia Geofisica Ambiente (INGSGA), Bologna, Italy.
23. Guidoboni, E., and A. Comastri (2005). *Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean Area from the 11th to the 15th Century*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia—Storia Geofisica Ambiente (INGV-SGA), Italy.
24. Idelsohn, S.R., Oñate, E. and Del Pin, F., 2004. *The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves*, Int. J. Numer. Meth. Engng. 2004; 61:964–989.
25. Iwan, W.D., editor, 2006. *Summary report of the Great Sumatra Earthquakes and Indian Ocean tsunamis of December 26, 2004 and March 28, 2005*: Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication #2006-06, 11 chapters, 100 page summary, plus CD-ROM with complete text and supplementary photographs, EERI Report 2006-06. [www.eeri.org] [ISBN 1-932884-19-X](https://www.eeri.org/publications/summary-report-of-the-great-sumatra-earthquakes-and-indian-ocean-tsunamis-of-december-26-2004-and-march-28-2005)
26. Jameson, L., 2003. *AMR vs High Order Schemes*”, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 18, No.1, 2003.
27. Kim, D.-H., Lynett, P. and Socolofosky, S., 2008. "A *Depth-Integrated Model for Weakly Dispersive, Turbulent, and Rotational Fluid Flows*." *Ocean Modeling*.
28. Kit, E., Sladkevich, M., and Levin, A., (2007). *Investigation of the Specific Features of Disastrous Tsunami Waves along the Israeli Mediterranean Coast by Applying the Methods of Mathematical Modeling*, Interim Report for December 2006 - October 2007 to Ministry of Science & Technology, Project No. 3573-3, Oct. 2007, Department of Fluid Mech., Faculty of Eng. Tel-Aviv Univ., Tel Aviv, Israel.
29. Konstantinou I. K., Kalogeras, I. S., Melis, N. S., Kourouzidis, M. C., and Stavrakakis, G. N., (2006). *The 8 January 2006 Earthquake (Mw 6.7)Offshore Kythira Island, Southern Greece:Seismological, Strong-motion, and Macroseismic Observations of an Intermediate-depth Event*, Seismological Research Letters Volume 77, Number 5 September/October 2006, pp. 544-553.
30. LeVeque, R. J., (2002). *Finite Volume Methods For Hyperbolic Problems*, Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

31. LeVeque, R. J., (2006). *Clawpack software*, <http://www.clawpack.org>.
32. Liu, P. L.-F., Woo, S.-B. and Cho, Y.-S., (1988). *Computer programs for tsunami propagation and inundation*, Cornell University.
33. Liu, P. L.-F., Yeh, H. and Synolakis. C., (2008). *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 10. World Scientific, 2008.
34. Locat, J. and Lee, H. J., (2000). *Submarine Landslides: Advances and Challenges*, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslide.
35. Lucy, L. B., (1977). *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*, *AJ*, **82**, 1013-1024.
36. Lynett, P. and Liu, P. L.-F., (2004). *A Two-Layer Approach to Water Wave Modeling*, Proc. Royal Society of London A. v. 460, p. 2637-2669.
37. Lynett, P. and Liu, P. L.-F., (2002). *A Numerical Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-up*, The Royal Society, v. 458, p 2885-2910.
38. Lynett, P., Wu, T.-R., and Liu, P. L.-F., (2002). *Modeling Wave Runup with Depth-Integrated Equations*, Coastal Engineering, v. 46(2), p. 89-107.
39. Lynett, P., (2009), ISEC workshop 2009, ISEC Community Workshop: Simulation & Large-Scale Testing of Nearshore Wave Dynamics, July 8-10, 2009, Corvallis, Oregon, USA, http://isec.nacse.org/workshop/isec_workshop_2009/pres_thurs/1_lynnett_bmark.
40. Gingold, R.A. and Monaghan, J.J. (1977). *Smoothed particle hydrodynamics* , *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 181, 375.
41. Murty, T. S., U. Aswathanarayana, U. and Nirupama, N., editors, (2007). *The Indian Ocean tsunami*, London: Taylor & Francis.
42. Official Journal of the European Union, (2007), DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, L 288/27-34, 6.11.2007.
43. Okada, Y. (1985). *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*, Bulletin of the Seismological Society of America, **75**, 1135-1154, 1985.
44. Okada, Y., (1992). *Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, No. 2, pp. 1018-1040, 1992.
45. Panizzo, A., Cuomo, G. and Dalrymple, T., (2006). *3D-SPH Simulation of Landslide Generated Waves*, p1503, Coastal Engineering.
46. Papadopoulos, G. A., Daskalaki, E., Fokaefs, A. and Giraleas, N., 2007. *Tsunami hazards in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in the East Hellenic Arc and Trench system*. Natural Hazards, 7, 57–64.

47. Pareschi, M. T., E. Boschi, and M. Favalli (2007), *Holocene tsunamis from Mount Etna and the fate of Israeli Neolithic communities*, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16317, doi:10.1029/2007GL030717.
48. Perissoratis, C., and G. A. Papadopoulos (1999). *Sediment instability and slumping in the southern Aegean Sea and the case history of the 1956 tsunami*, *Mar. Geol.* 161, 287–305.
49. Pranowo, W.S., Behrens, J., Schlicht, J. and Ziemer, C., (2008). *Adaptive Mesh Refinement Applied to Tsunami Modeling: TsunaFLASH*, Int. Conf. on Tsunami Warning (ICTW), Bali, Indonesia, November 12-14, 2008.
50. Riggs, H. R., (2007). Special Issue: Tsunami Engineering, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 6, November/December 2007, pp. 381-483.
51. Salamon, A., Hofstetter, A., Garfunkel, Z. and Ron, H., (2003). *Seismotectonics of the Sinai subplate – the eastern Mediterranean region*, *Geophys. J. Int.*, No. 155, p. 149-173.
52. Salamon, A., Rockwell, T., Ward, S.N., Guidoboni, E. and Comastri, A., (2007). *Tsunami Hazard Evaluation of the Eastern Mediterranean: Historical Analysis and Selected Modeling*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 3, p. 705-724, doi: 10.1785/0120060147.
53. Sue, L.P., (2007). *Modeling of Tsunami Generated by Submarine Landslide*, PhD. Thesis, Univ. of Canterbury, New Zealand, 2007.
54. Synolakis, C. E., Borrero, J.C., Fritz, H., Titov, V., Okal M., (2006), *Inundation during the 26 December 2004 tsunami*, *Proc. Intl. Conf. Coastal Eng.*, San Diego, Sep. 2006, Vol. 2, pp. 1625-1637.
55. Theilen-Willige, B., (2006). *Emergency Planning in Northern Algeria Based on Remote Sensing Data in Respect to Tsunami Hazard Preparedness*, Vo. 25, No. 1, 2006.
56. Thio, H. K., (2008). *Tsunami Hazard in Israel*, URS Corporation, Prepared for Geological Survey of Israel.
57. U.S. Geological Survey, (2004). SRTM30 PLUS, Data Fusion of SRTM Land Topography with Measured and Estimated Seafloor Topography, V1.0 November 11, 2004. <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/srtm30>
58. Wang, X. and Liu, P. L.-F. (2005). *A Numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) Earthquake and Tsunami*, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 10(2): 171-184.
59. Wang, X. and Liu, P. L.-F. (2006). *An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami*, *J. Hydraulic Res.*, 44(2): 147-154.

60. Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, J. T., Fryer, G. J., and Tappin, D. R., (2003). *Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model*, Natural Hazards and Earth System Sciences (2003) 3: 391–402.
61. Waythomas C. F. , Watts, P., Shi F. , Kirby J.T., (2008). *Pacific Basin tsunami hazards associated with mass flows in the Aleutian arc of Alaska*, Quaternary Science Reviews xxx (2009) pp. 1–14, Elsevier. (<http://www.elsevier.com/locate/quascirev/>).
62. Wei, G. and Kirby, J. T., (1995). *A time-dependent numerical code for the extended Boussinesq equations*, J. Waterway, Port. Coastal and Ocean Engineering, Vol. 121, No. 5, 251-261.
63. Whitmore, P.M., (2003). *Tsunami amplitude prediction during events: A test based on previous tsunamis*, [The International Journal of The Tsunami Society, Vol. 21, No 2, 2003](#), pp. 135-143.
64. Yalciner, A.C., editor, (2003). *Submarine landslides and tsunamis*, NATO Advanced Research Workshop on Underwater Ground Failures on Tsunami Generation, Modeling, Risk, and Mitigation (2001 : Istanbul, Turkey)
65. Yamashita, T., and Sato R., (1974). *Generation of Tsunami by a Fault Model*, J. Phys. Earth, 22(4): 415-440.
66. Yolsal, S., Taymaz, T. and Yalciner, A.C., (2008). *Understanding Tsunamis, Potential Source Regions and Tsunami-Prone Mechanisms in the Eastern Mediterranean*, Geological Society, London, Special Publications, 2008.
67. Zhang, H., Shi, Y., Yuen, D.A., Yan, Z., Yuan, X. and Zhang, Ch., (2008). *Modeling and Visualization of Tsunamis*, Pure appl. Geophys. 165, 2008, 475-496.
68. Zhu, Y, Liu S., Wen, Y., and Xue, Y., (2009), *A New Method to Analyze the Tsunami Incitement Process and Site-selection for Tsunami Observations in China's Eastern Sea*, Science of Tsunami Hazards, Vol. 28, No. 2, pp. 129-141.

נספח 1

רשימה של המודלים השונים הקיימים להדמיית צונאמי

על פי דו"ח פרויקט TRANSFER של התכנית האירופית ה-6.

**Tsunami Risk and Strategies For the European Region
Deliverable WP5.3**

Various Numerical Models for Various Problems of Tsunami Waves

TSUNAMI PROPAGATION MODELS – NUMERICAL DESCRIPTION

MODEL NAME	EQUATION TYPE	NUMERICAL SCHEMES	MESH/GRID TYPE	GENERATION MODEL	WETTING AND DRYING	OBSERVATIONS
ANUGA-Hydrodynamic modeling (Australia)	-Shallow water wave equations.	- Finite volume method. - Central upwind scheme for calculating the fluxes across each volume boundary. - Explicit Euler method with variable time stepping dynamically adapted to the observed CFL condition.	- Triangular cells. The size of the triangles may be varied within the mesh to allow greater resolution in regions of particular interest.	- MOST and URS models	- Yes	- Very robust and flexible. - Capable of capturing hydraulic shocks. - No breaking included. - The surface is assumed to be opened (cannot model flow under ceiling or in pipes). - All spatial coordinates are assumed to be UTM. Not suitable for modeling flows in areas larger than one UTM zone (5 degrees wide) - Finite volume method is not very fast.
TSUNAMI1 (Australia)	-Shallow water wave equations.	- Finite difference method. - Semi-implicit, finite-difference time stepping.	- Cartesian or spherical coordinates.	- Okada 1985	- No	- It accounts for Coriolis, non linear advection, bottom friction and horizontal eddy viscosity.
MJKE 21 (Denmark)	- St Venant equations.	- Two versions available: 1. FD: Finite difference, ADI semi-implicit time integration. 2. FM: Flexible Mesh: Finite volume, Time explicit	- Two versions available: 1. FD: Arakawa C grid (Cartesian coordinate system) 2. FM: Unstructured-delaunay triangulated	- Initial water level displacement from Fault model such as the Harvard model	- Yes	- Very flexible and user friendly. - Links to near shore topographic data via C-Map navigation charts. - Extensive pre and post processing tools. - Operational operations supported. - Can be linked with decision support systems if needed.
AQUILON (France)	- Navier- Stokes equations for multiphase flows.	- Finite volume methods. - Center, upwind, hybrid, quick. - VOF method.	- MAC, 2D/3D orthogonal curvilinear meshes	- Analytical solitary wave solutions - Exact solitary wave solution (Tanaka) - Landslides generations	- No	- It can simulate multiphase- flows. - It simulates wave breaking. - Able to calculate complex flows in complex geometries.
TSUNAMI CEA/DASE (France)	-Nonlinear Shallow water wave equations.	- Finite difference method.	- Arakawa C grid. - Imbricate grids.	- Okada elastic dislocation - Any surface deformation	- Yes	- It can include as many subfaults as necessary.
BOWAM2 (Germany)	- Enhanced Boussinesq equations (dispersion and shoaling optimized equations)	- Finite difference.	- Cartesian coordinate system	- Internal wave maker	- Yes, three different methods	- Wave breaking included (eddy viscosity model). - Dispersive effects are included. - Bottom friction with a Chezy law.
TSUNAWI (Germany)	-Shallow water wave equations	- Finite element method. - Explicit leap- frog time stepping. - Conforming/ non-conforming linear finite element spatial discretization.	- Unstructured triangular delaunay triangulation with possibility for local mesh refinement according to bathymetry, bathymetry/topography gradient and local discretization. - Local mesh refinement.	-Okada- parameter based generation. - Initial wave height as ssh deviation. - Others.	- Yes	- Local mesh refinement - Efficient numerical integration. - Seamless inundation. - Seamless source integration.
Full Frequency Dispersive Small Amplitude Tsunami Model (Italy)	- Fully dispersive wave equation model	- Finite element method.	- Triangular.			- Limited to small amplitude waves. - It takes into account the full dispersivity of waves.
UBO- TSUFD and UBO- TSUFD-VB (Italy)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method. - Leap- frog scheme method.	- Rectangular constant grid domain. - Cartesian and geographical coordinates.	- Multi- fault vertical co-seismic displacements computed through Okada's formulas and corrected for bathymetric effects.	- Yes	
UBO- TSUFE (Italy)	-Shallow water wave equations	- Finite element method - Two step time integration method	- Triangular elements. - Cartesian coordinate system on a fixed boundary grid.	- Multi- fault vertical co-seismic displacements computed through Okada's formulas and corrected for bathymetric effects in the case of an earthquake source. - Impulses computed through UBO- TSUIMP in case of moving body.	- No	- Loss of energy due to the interaction with the boundaries and with the sea bottom can be accounted for. - Coriolis force can be included.
TUNAMI-N3 (Japan)	-Shallow water wave equations.	- Finite difference method. - Leap- frog scheme.	- Nested grids.	- Fault dislocation model based on Okada, Manshinha & Smylie.	- Yes	- Main features: tsunami propagation and tsunami run- up.
TUNA (Malaysia)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method	- Staggered.	- Gaussian hump	- Yes	- Tuna comprises of 2D tsunami propagation model and 1D run up model. - Can simulate up to 2500*2500 nodes. - Output may be displayed by any plotting software. - Output of other tsunami generation model may be imported into TUNA for simulating the propagation component.
SKREDP (Norway)	-Shallow water wave equations.	- Finite difference, second order, explicit.	- Arakawa C grid (Cartesian coordinate system).	- Prescribed source functions for slides and earthquakes or input from files. - Slide parameters from bingham or dc models. - earthquake parameters from analytical Okada model.	- No	- Simple, fast and robust.
GloBouss (Norway)	- Boussinesq equations with Coriolis terms	- Finite differences, implicit method. ADI Iteration for implicit equations	- Arakawa C grid. Geographical and Cartesian coordinates	- Input from files	- No - Interface to MOST	- Higher order dispersion, non- linearity and rotational effects, correction terms - Suitable code for dispersive transoceanic propagation
IHD (Norway)	- Various Boussinesq formulations and full potential theory	- Finite difference and element method. - Boundary integral method. - Eulerian and Lagrangian coordinates.	- Adaptive mesh.	- Prescribed source functions for slides and earthquakes - Input from files	- Yes	- It includes the dispersive effects and non- linear effects in tsunami generation and propagation. - Assessment of grid resolution requirements.
H2D (Spain)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method - Implicit alter direction, Leendertse (1970) - Upwind for the advective terms	- Rectangular o quadratic cells. - Cartesian coordinate system. - Not refinement included.	- Gaussian hump - Input from files	- Yes	- It accounts for Coriolis, non linear advection, bottom friction, horizontal eddy viscosity and wetting and drying.
NAMI DANCE (Turkey-Russia)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method - Leap- frog scheme method	- Rectangular constant grid domain.	- Okada 1985 for Co-seismic Tsunamis - Arbitrary shape of initial wave (determined by user) - User controlled dynamic input of wave at arbitrary location and shape.	- Yes	- Creates The initial wave from different sources. - Generates the sea state at specific time intervals of tsunami during simulation. - NAMI DANCE simulates, animates and visualizes generation, propagation, coastal amplification and inundation of tsunami given arbitrary shaped bathymetry under the input wave and current conditions.
TUNAMI N2 (Japan-Turkey)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method - Leap- frog scheme method	- Rectangular constant grid domain	- Okada 1985 for Co-seismic Tsunamis - Arbitrary shape of initial wave (determined by user) - User controlled dynamic input of wave at arbitrary location and shape.	- Yes	- Creates The initial wave from different source mechanisms. - Generates the sea state at specific time intervals of tsunami during simulation.
COMCOT (United States of America)	-Shallow water wave equations	- Finite difference method. - Leap- frog scheme method	- Arakawa C grid - Cartesian or spherical coordinate system. - Staggered, nested grids.	- Submarine landslide - Elastic fault model (Mansinha and Smylie, 1971) - Any surface deformation.	- Yes	- Explicit finite difference scheme: fast - Nested grids, flexible grid setup, balance between efficiency and accuracy - Multiple generation mechanisms: fault model, input profile, submarine landslide, incident wave maker...
MOST (United States of America)	- Nonlinear Shallow Water wave equations	- Finite Difference Method combined with splitting ADI and characteristics technique	- Non-uniform Nested grids	- Based on elastic deformation theory of Gusiakov (1978) and Okada (1985)	- Moving mesh technique, cf. Titov - Synolakis (1995)	- Fast algorithm - Gives quite accurate results
C3 (Spain)	-Shallow water wave equations	Hybrid scheme: - Finite difference method with leap- frog scheme method (FD) applied in marine areas far from the coast - Finite Volumes (VOF) applied in flooding areas (near coast).	- Cartesian or spherical coordinate system. - Embedded grids	- Okada 1985 for Co-seismic Tsunamis - Arbitrary shape of initial wave (determined by user) - User controlled dynamic input of wave at arbitrary location and shape. - Solitary waves	- Yes	- C3 model takes advantages of the best capabilities of COMCOT model and TSUNAMICLAW model. C3 is a hybrid finite difference-finite volume method which balances between efficiency and accuracy. - For offshore domain: in deep waters apply an explicit finite difference scheme (FD), which is computationally fast and accurate in large grids. The model permits multiple generation mechanism: fault model, input profile, submarine landslide, incident wave maker. - For near coast domain: in coastal areas apply a finite volume scheme (VOF). It solves correctly the bore formation and the bore propagation. It is very effective solving the runup and the run down. It is applied in smaller grids due to computational cost.
TSUNAMICLAW	- Nonlinear shallow water equations	- Finite volume Riemann solvers	- 2D+1 rectangular mesh with adaptive refinement	- Multi segment fault model - Any surface deformation in space and in time	- Yes	- Adaptive mesh refinement - Up to six nested levels - Robust in presence of bores and steep gradients
BOL/ BGS	-Shallow water wave equations.	- Finite difference method.	- Arakawa C grid.	- Okada elastic dislocation - Any surface deformation	- Yes	
DPWAVES	- Mild slope Boussinesq, potential formulation	- Finite elements, second order, implicit.	- Regular or irregular Finite elements - Adaptive mesh	- Prescribed source functions for slides and earthquakes or input from files.	- No	- Flexible with respect to type of elements - Different types of adaptive mesh generation
pCOULWAVE	Various types of Boussinesq	-Finite volumes, fourth order, implicit, domain decomposition, MP	- Cartesian, structured	-Wave generator or slides	- Yes	-Wave breaking

TSUNAMI GENERATION MODELS – NUMERICAL DESCRIPTION

MODEL NAME	Equation type	Numerical schemes	Mesh/Grid Type	Generation model	Observations
UBO- BLOCK1 and UBO- BLOCK2 (Italy)	- Equations of motion for a set of contiguous blocks interacting each other and interacting with the bottom topography	- Lagrangian model	- Finite deformable blocks	THIS IS THE GENERATION MODEL	- Numerical model for the calculation of the dynamical evolution of a body sliding down topography.
CFXSMS (Norway)	- 2D Navier-Stokes equations	- Finite volume method	- Body fitted	THIS IS THE GENERATION MODEL	- Numerical model for simulation of landslides based on multiphase flow approach with "history" strain dependent plastic flow rheology.
BINGHAM (Norway)	- Nonlinear depth-averaged 1D equations for lubricate layer, mud shear layer and mud plug layer	- Finite difference method	- Lagrangian	THIS IS THE GENERATION MODEL	- Bingham, Herschel- Bulkley, and bi- viscous rheologies; including hydroplaning, interstitial rigid blocks, viscous drag.
TWO LAYER (Japan-Turkey)	-Shallow water wave equations in Two Layer	- Finite difference method - Leap- frog scheme method	- Rectangular constant grid domain	- Arbitrary shape of mud slide topography	- Creates The initial wave from the mud slide (bottom layer) to water (upper layer) - Generates the sea state and currents at specific time intervals of tsunami during generation.

נספח 2

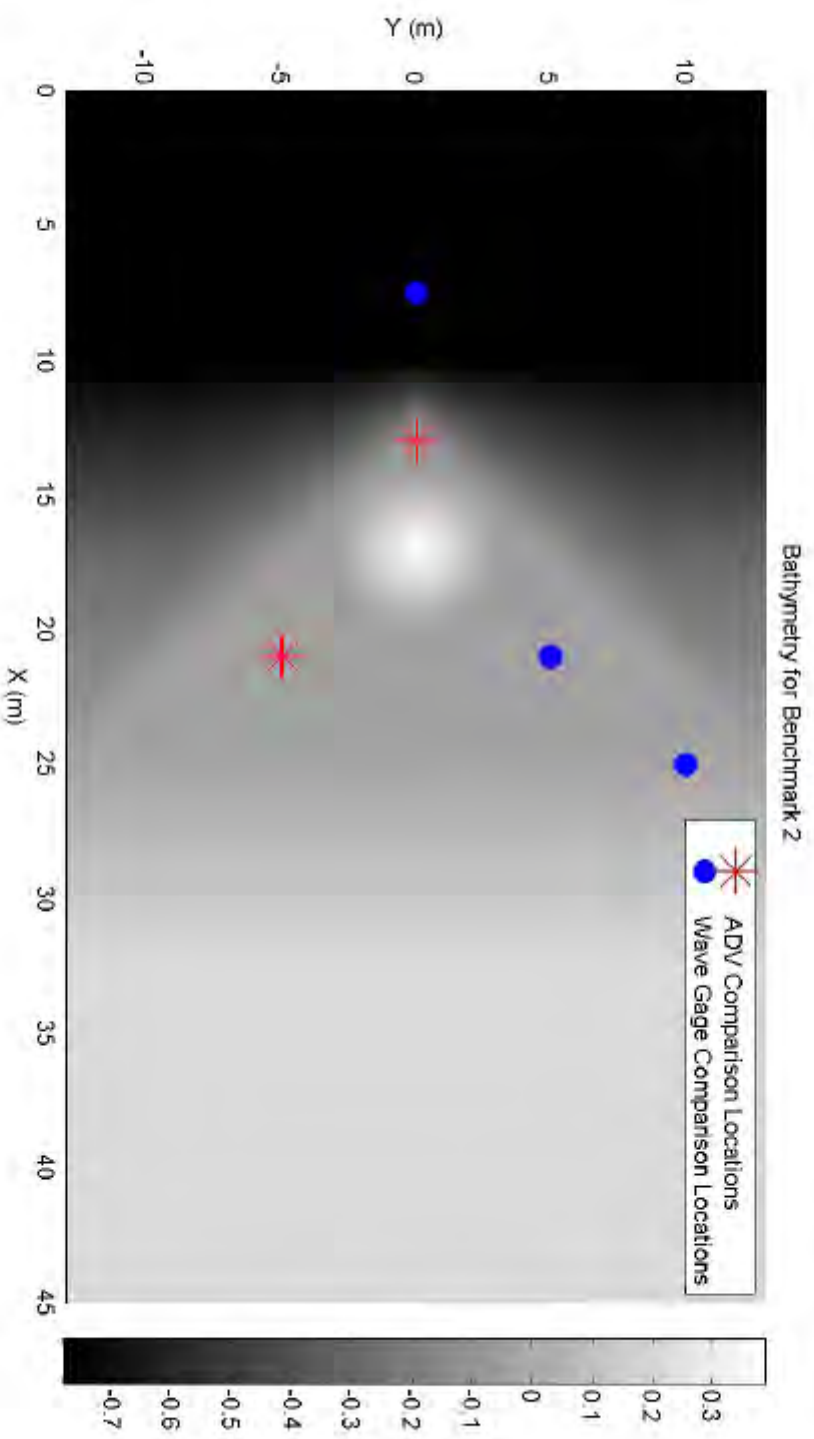
תוצאות השוואת מודלים שונים הקיימים להדמיית צונאמי מול תוצאות בריכת ניסויים בסדנה ביולי 2009, כפי שהוצגו ע"י פרופ' P. Lynett

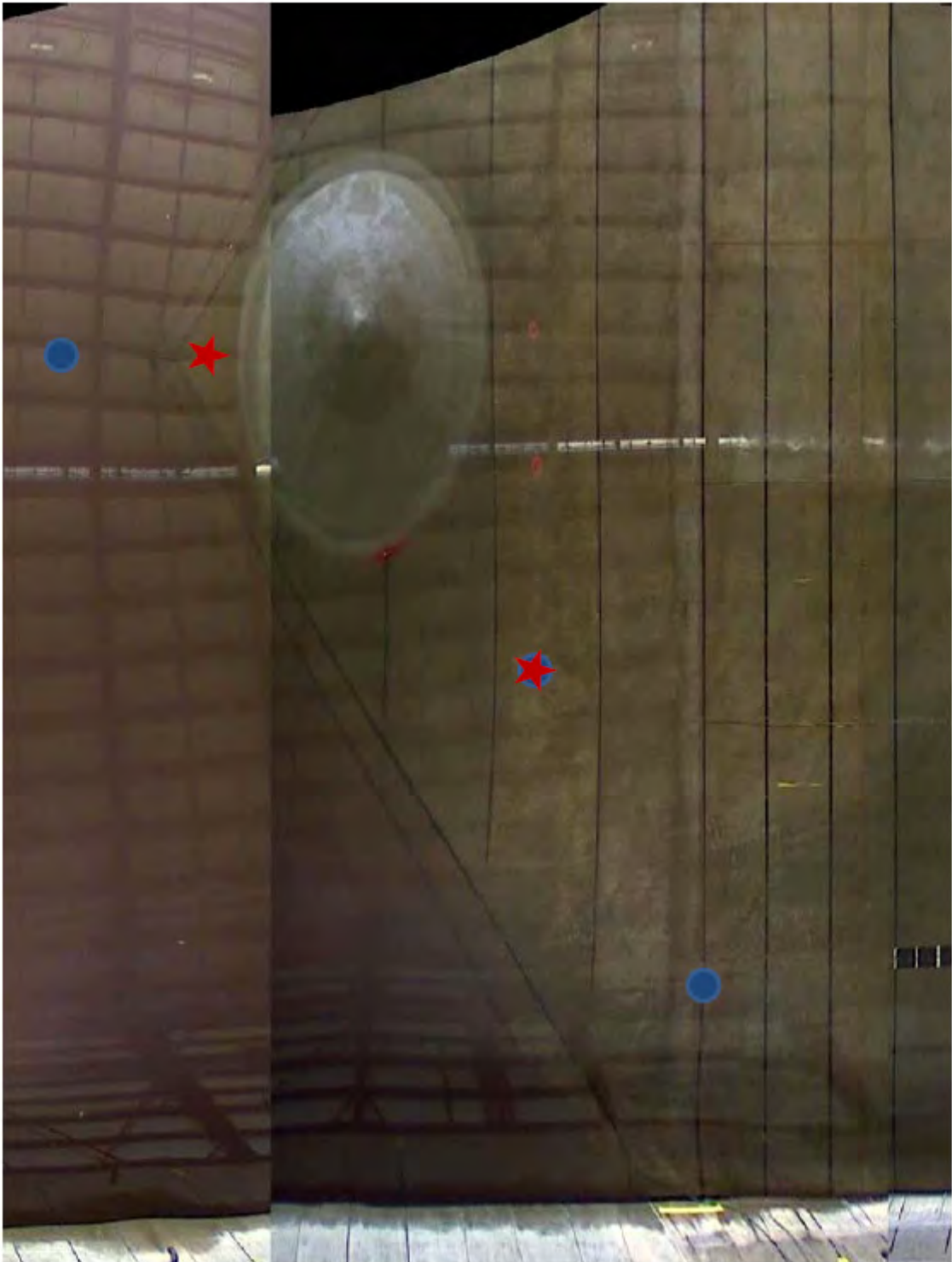
בציורים המוקדמים מוצגת בריכת הניסויים ותצורת המכשול בקרקעית הים, ומיקום נקודות המדידה של המפלס ושל רכיבי מהירות הזרימה, כאשר הנקודות הכחולות מציין תחנות מדידת מפלס, וכוכביות אדומות את תחנות מדידת רכיבי מהירות הזרימה

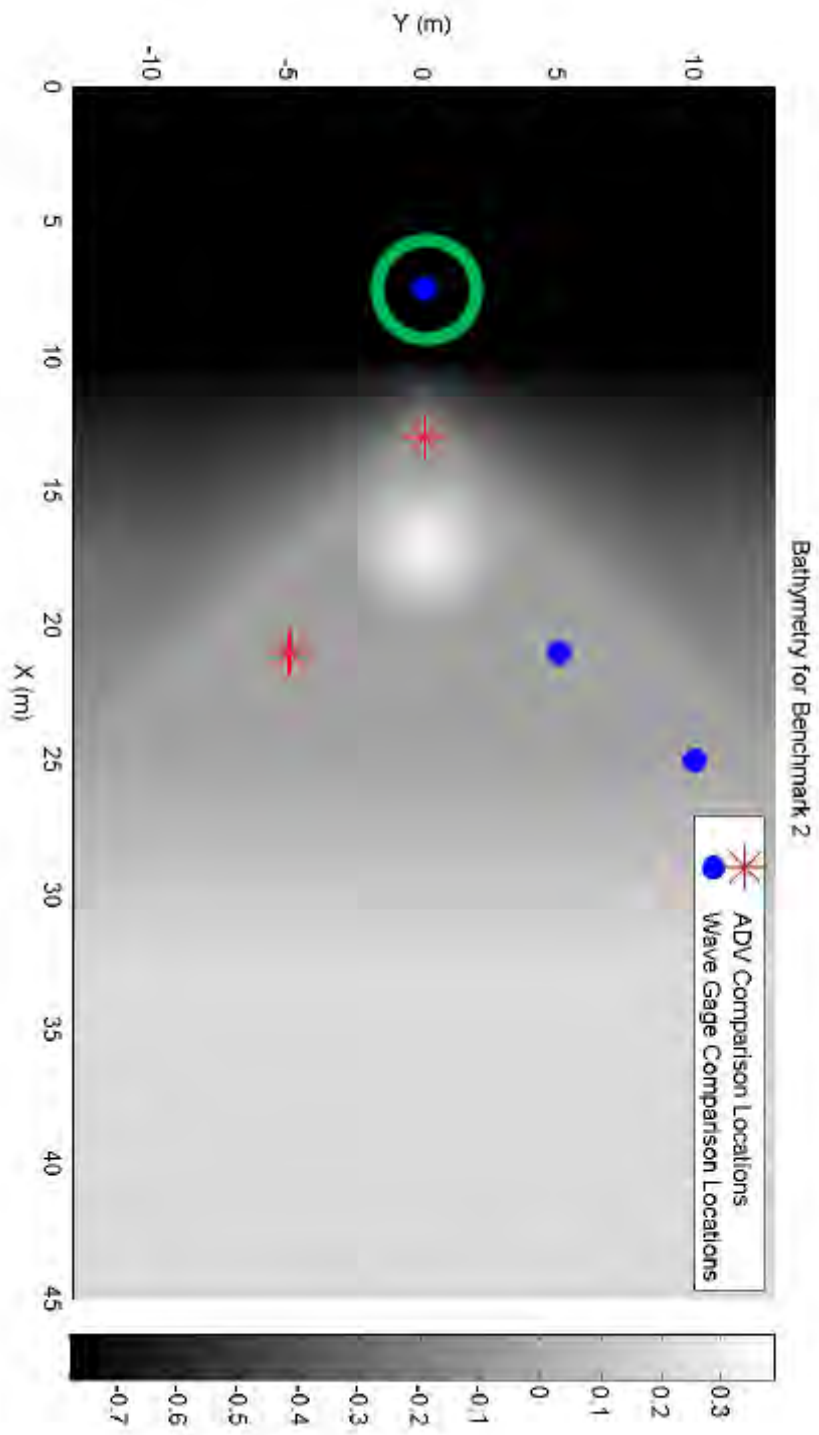
Comparisons with Benchmark 2

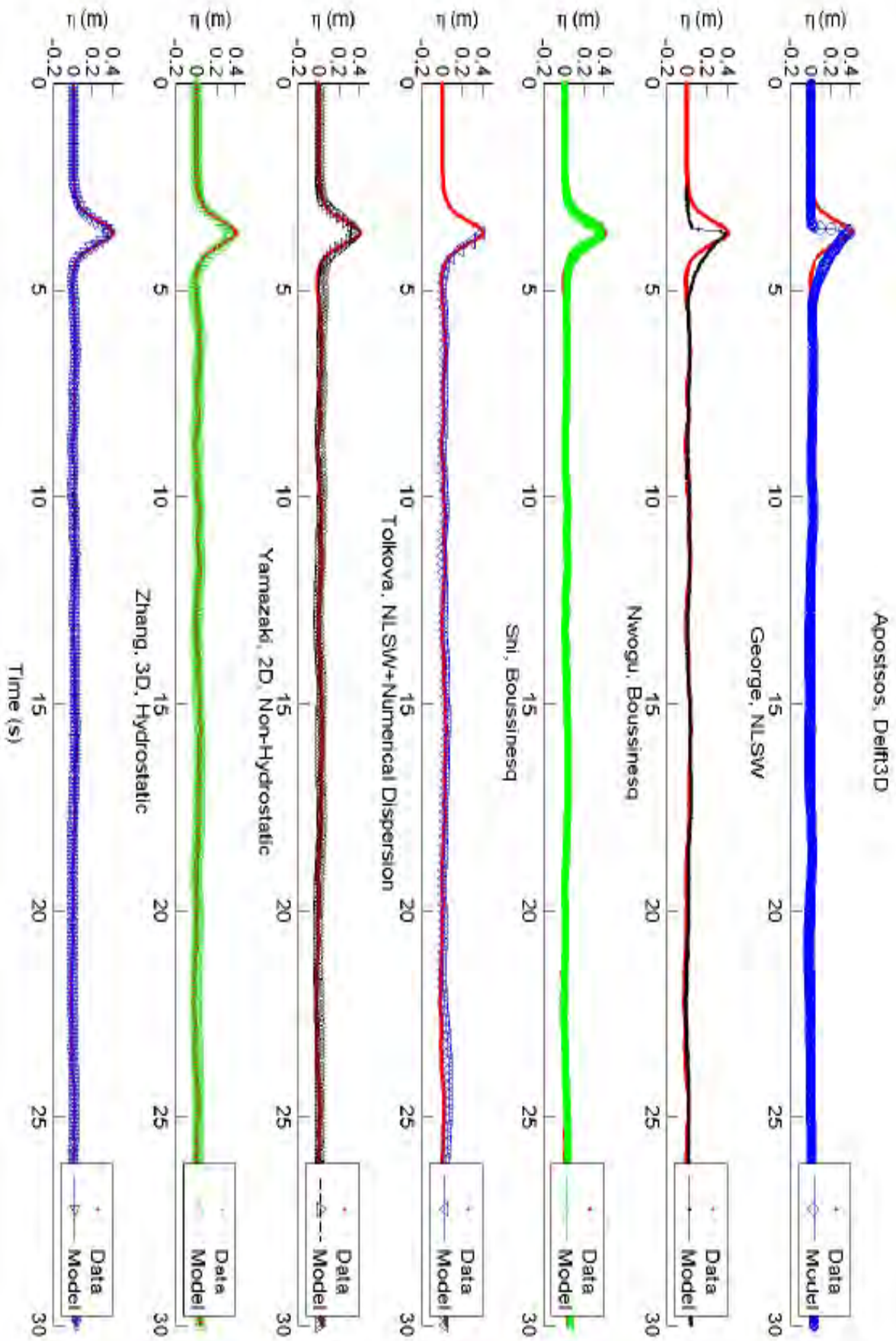
- Apostsos
 - 2D Hydrostatic, Delft3D
- George
 - 2D NLSW, CLAWPACK
- Nwogu
 - 2D Boussinesq, Bouss2D
- Shi
 - 2D Boussinesq, FUNNWAVE
- Tolikova
 - 2D NLSW+Numerical Dispersion, MOST
- Yamazaki
 - 2D, Non-Hydrostatic, NEOWAVE
- Zhang
 - 3D, Hydrostatic, SELFE

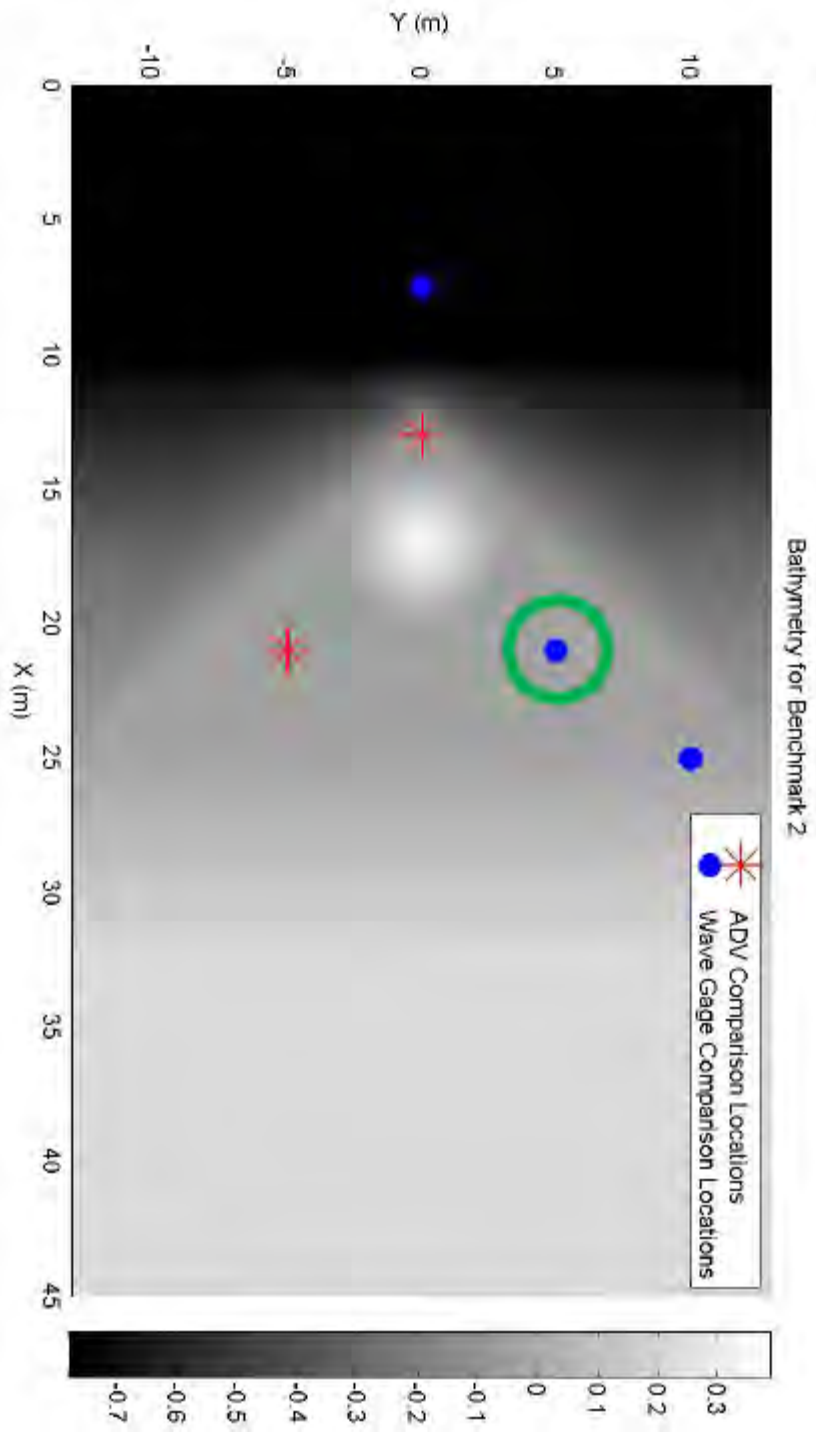
Comparisons with Benchmark 2

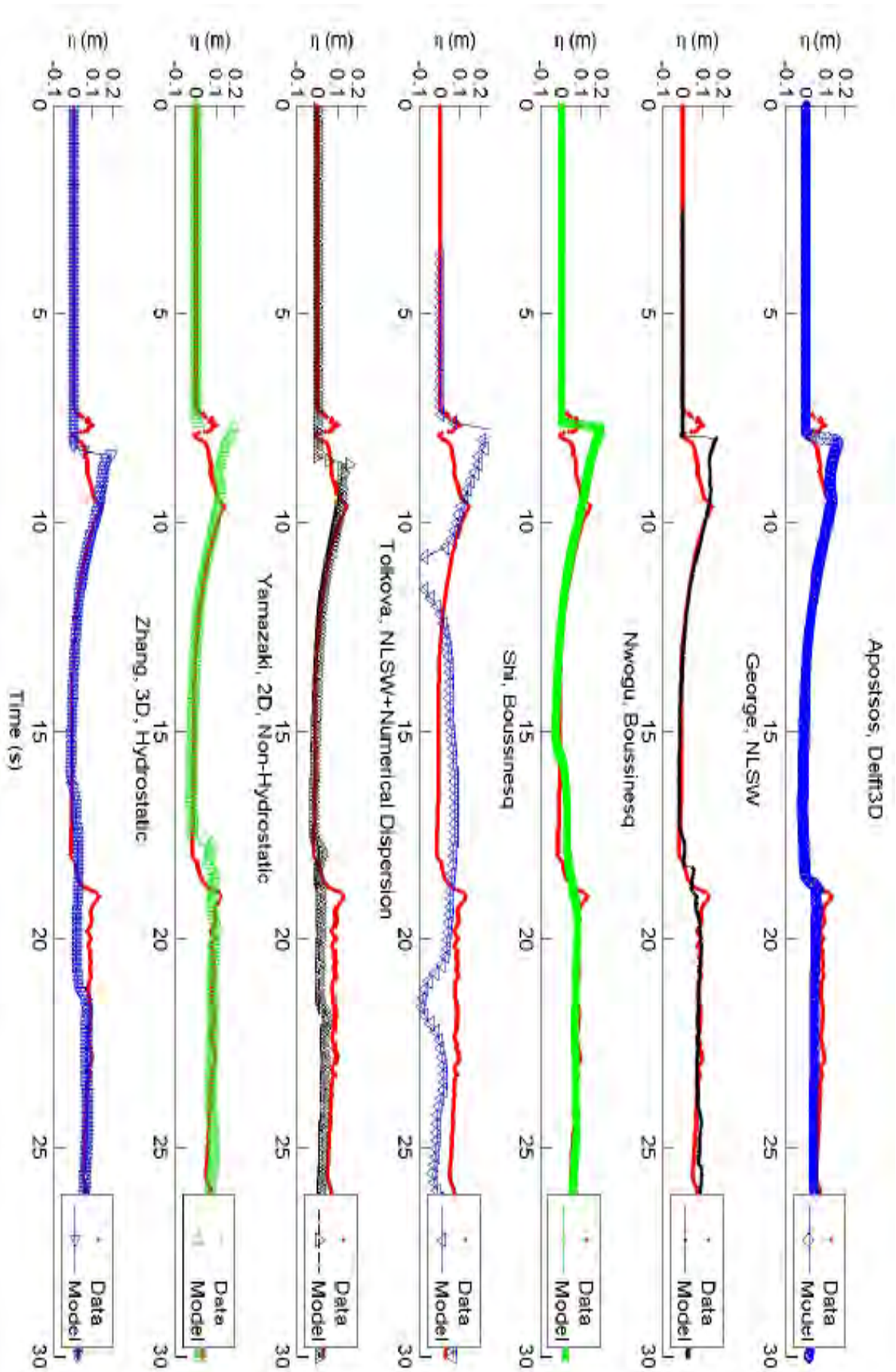


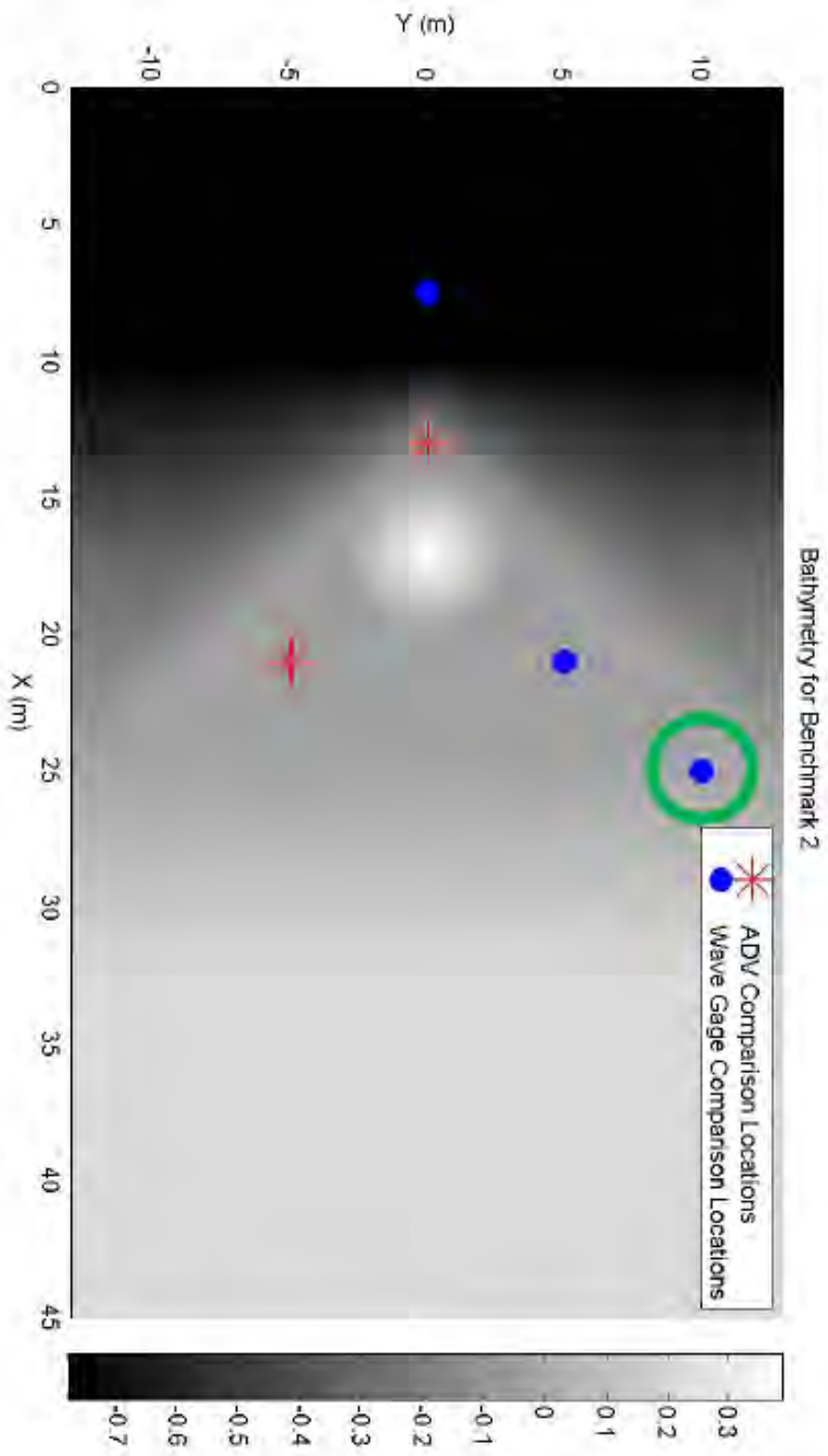


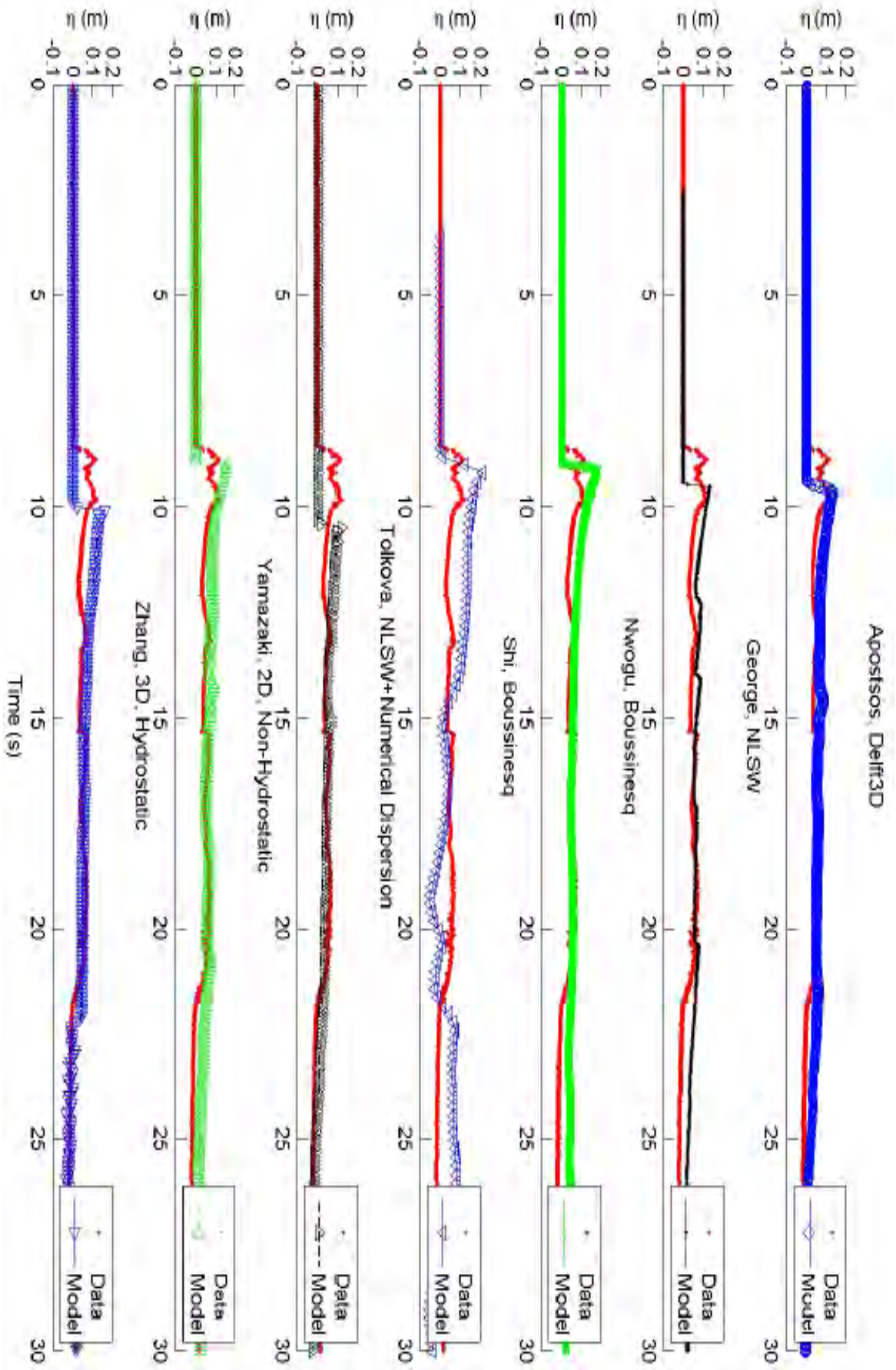


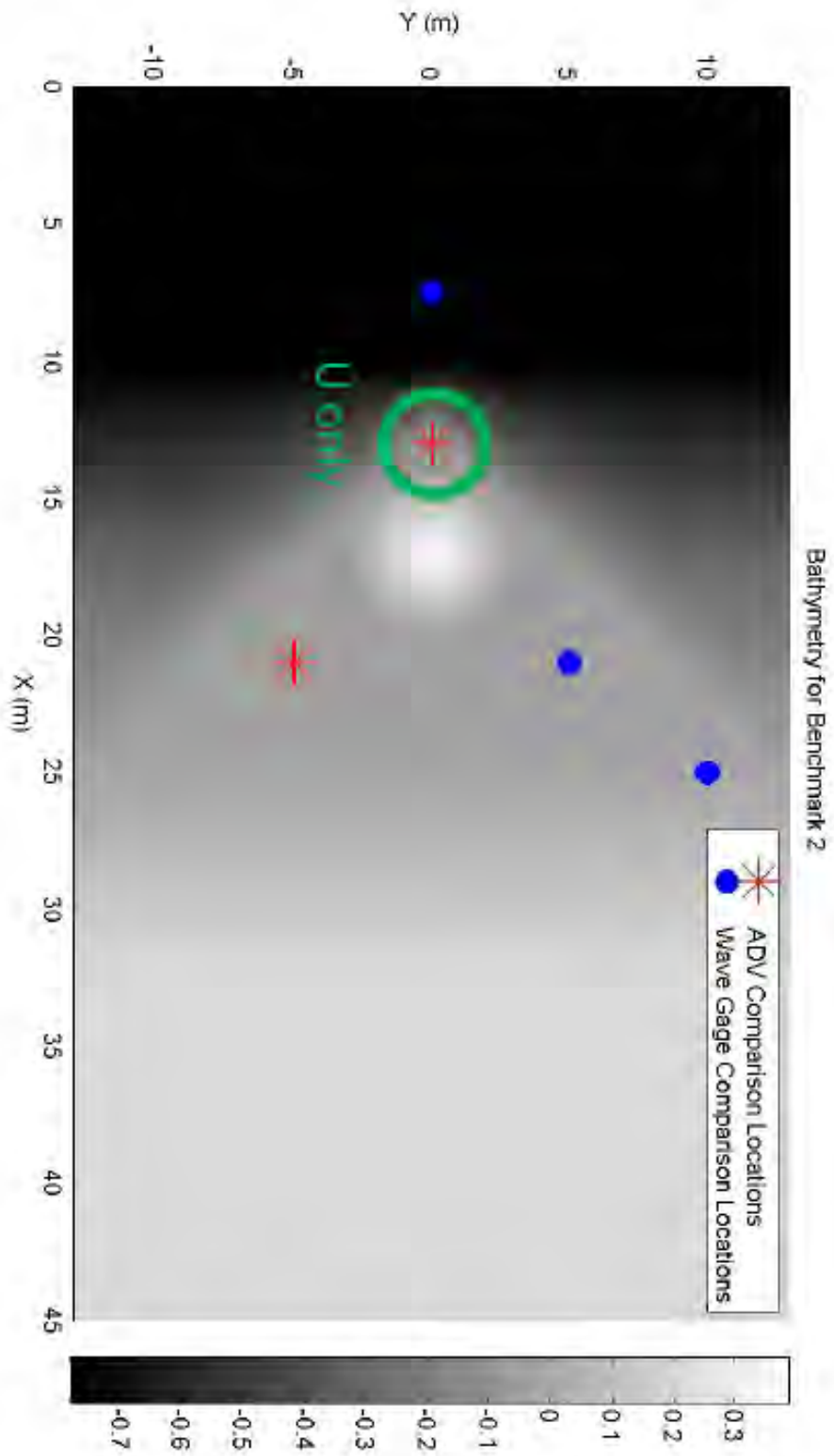


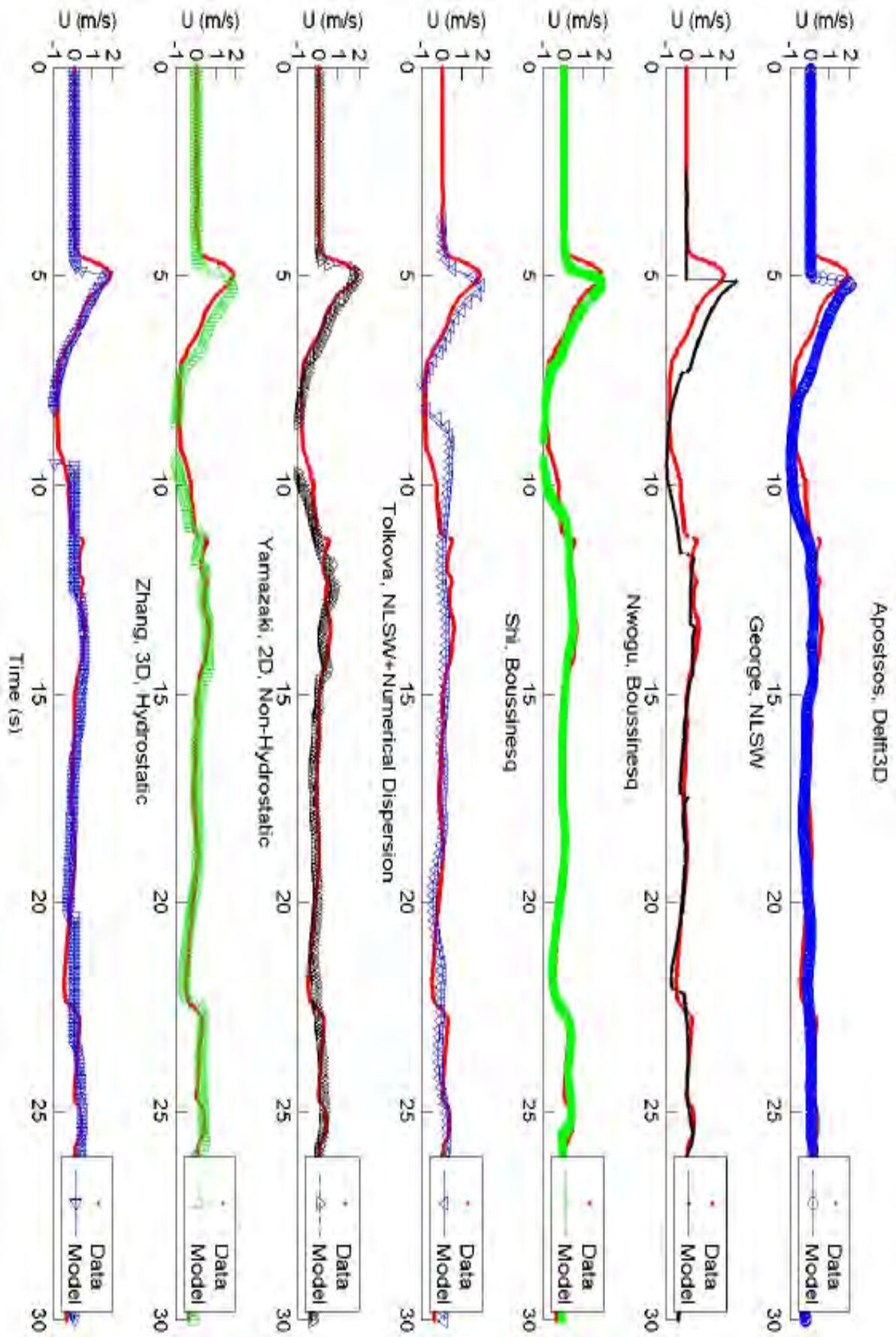


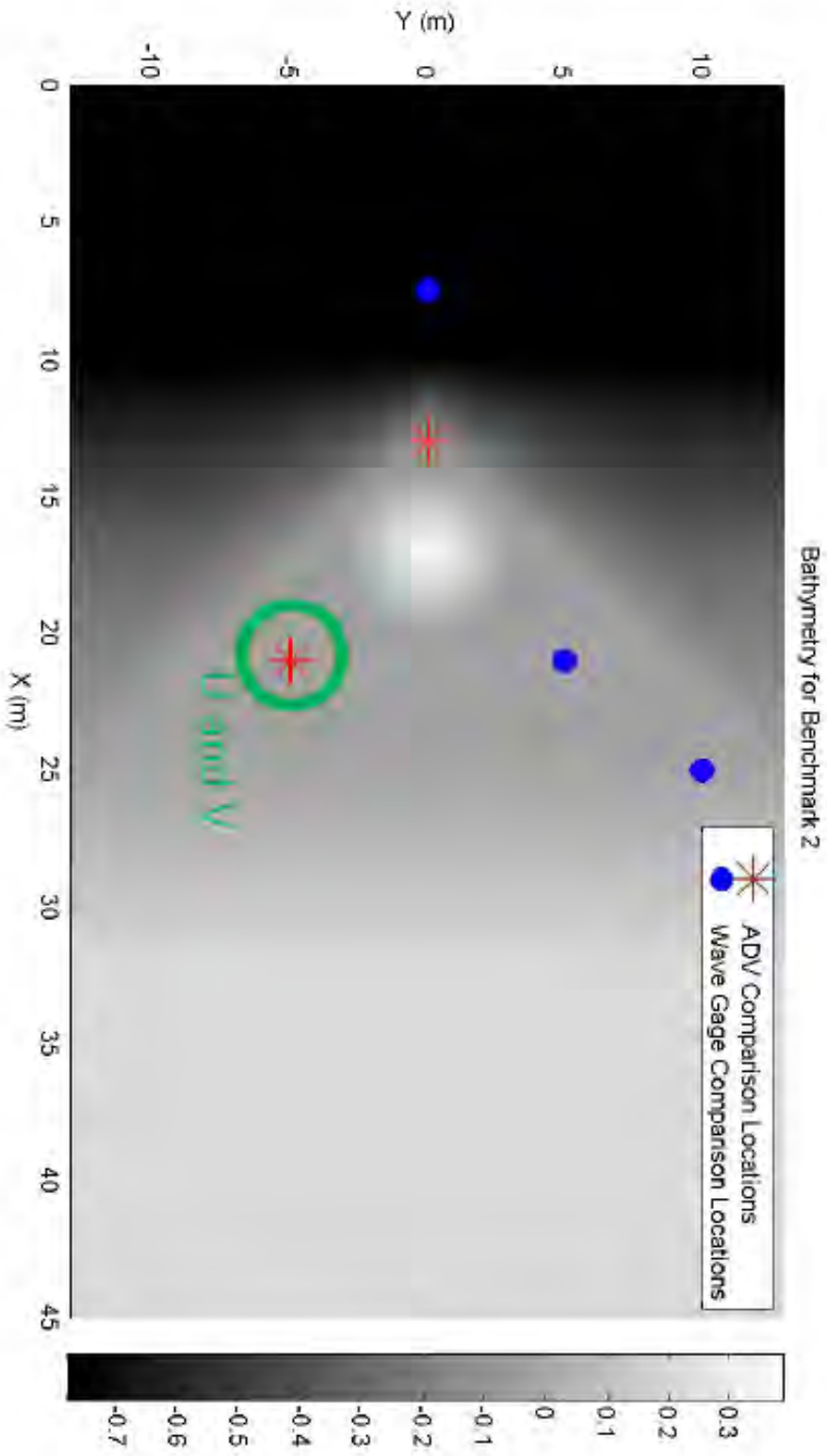


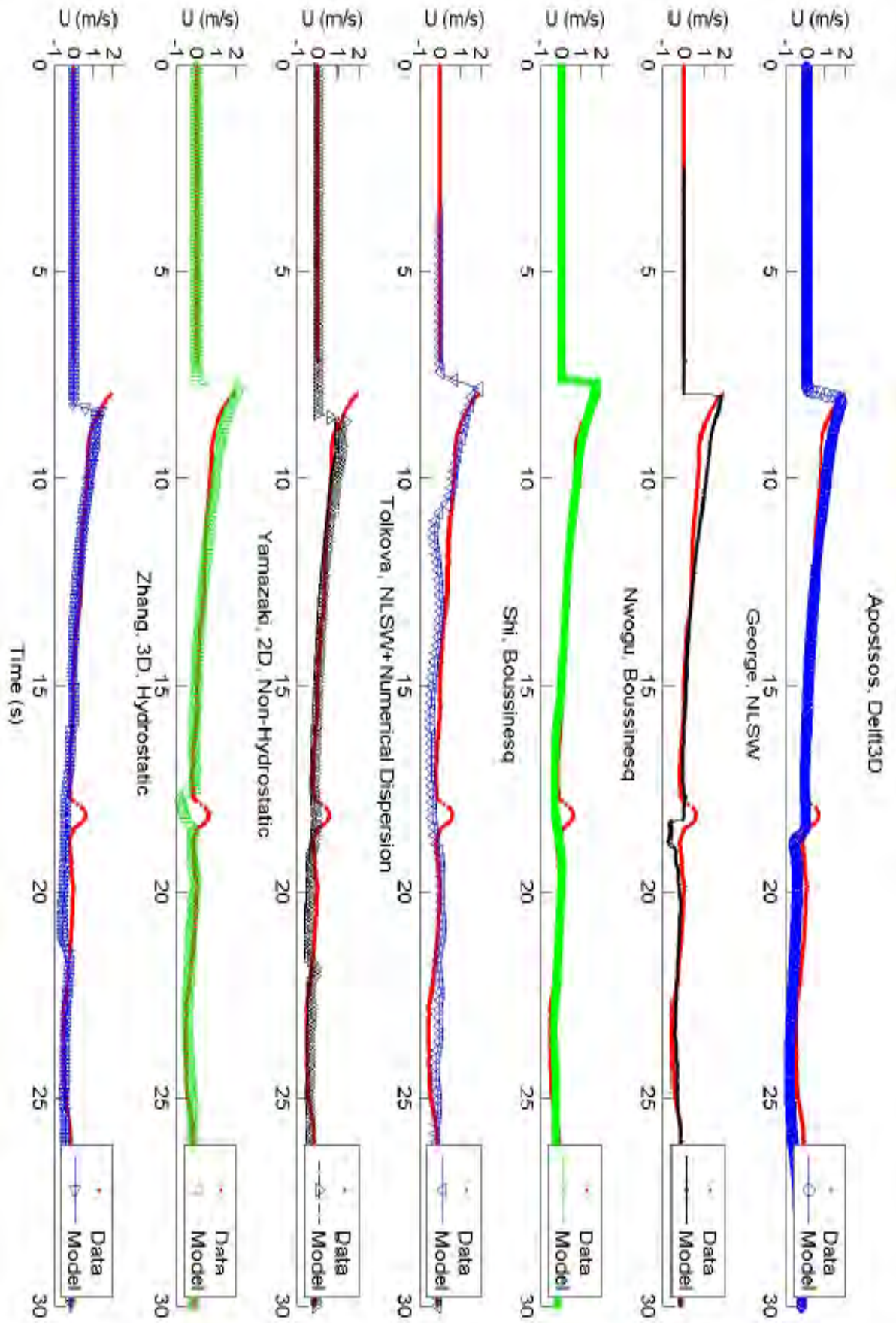


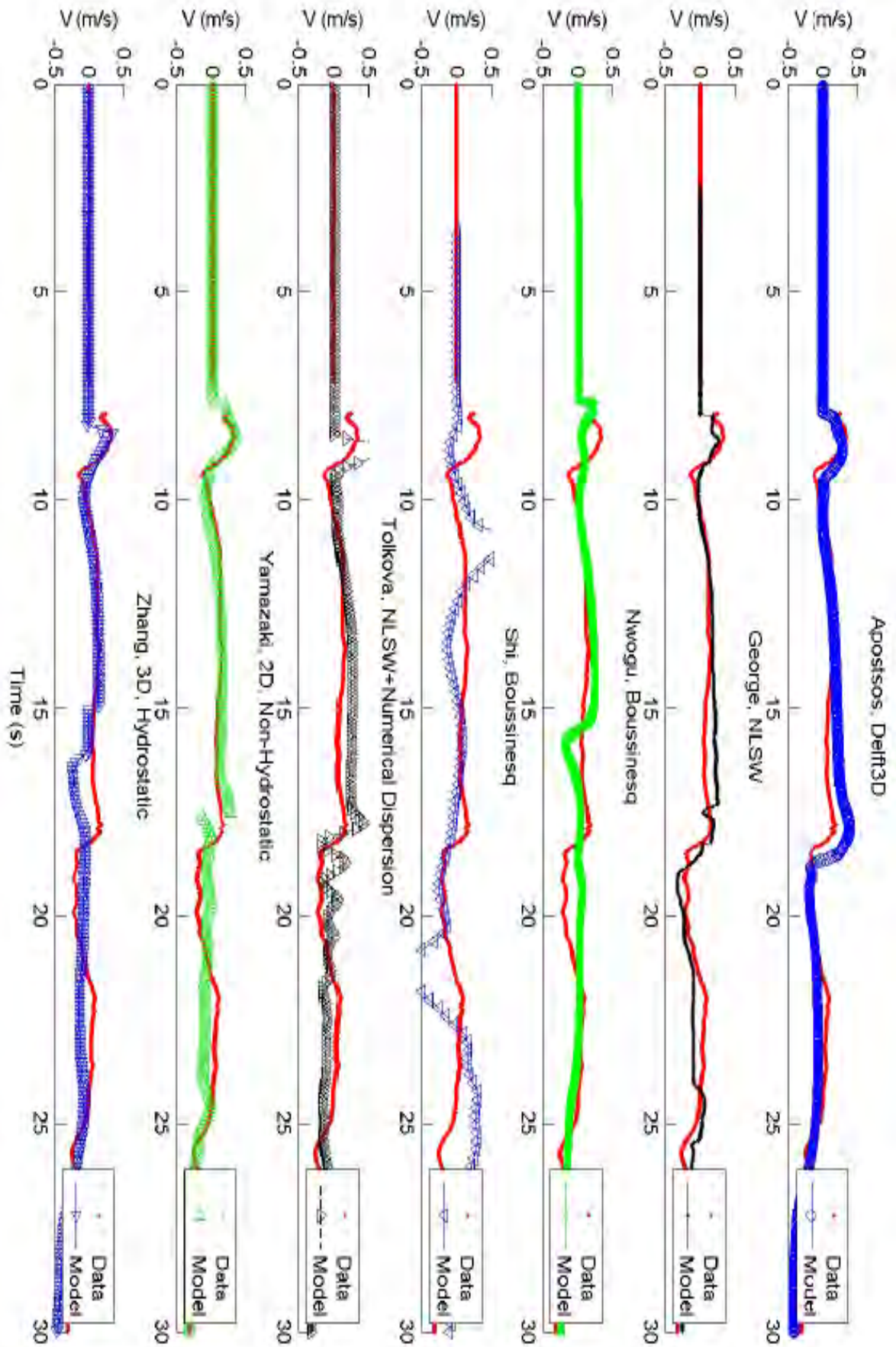






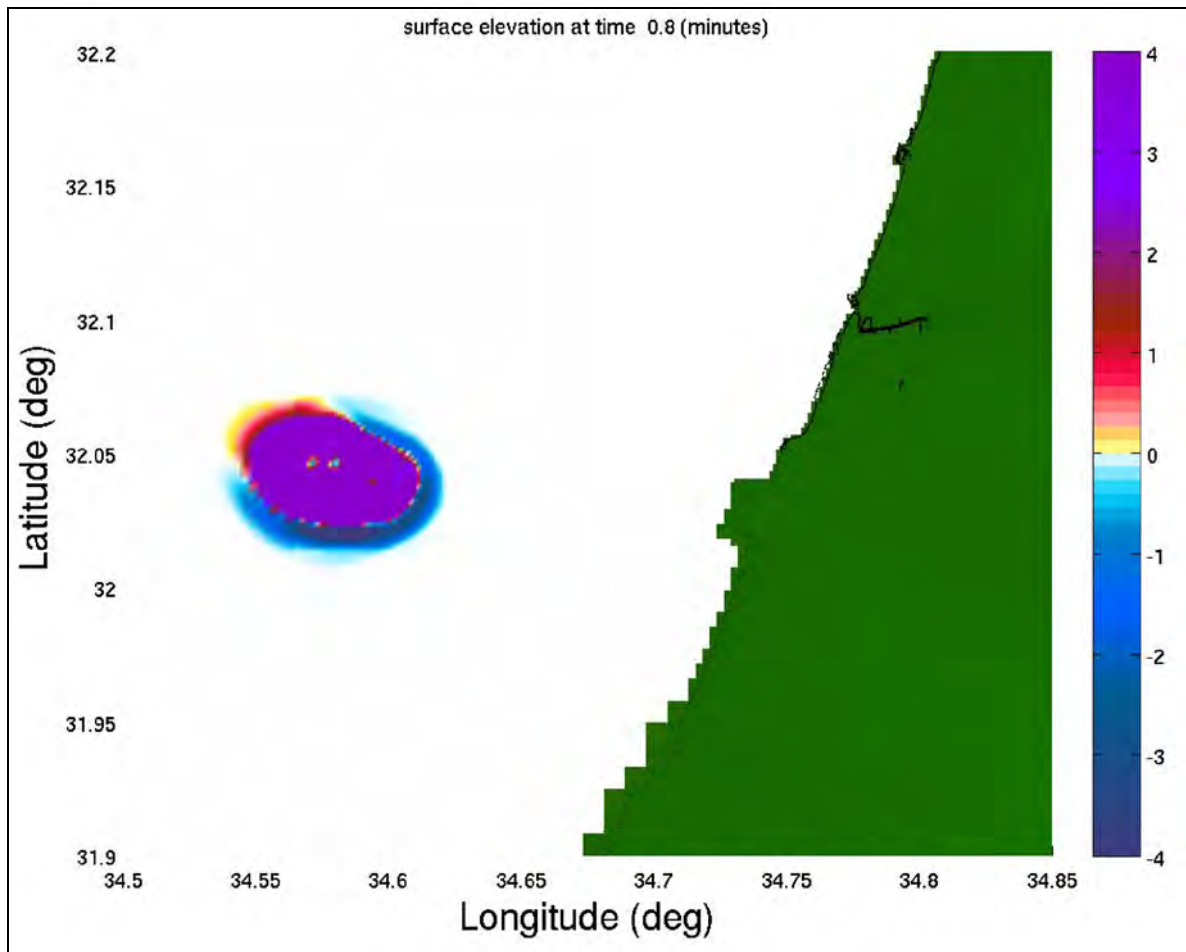






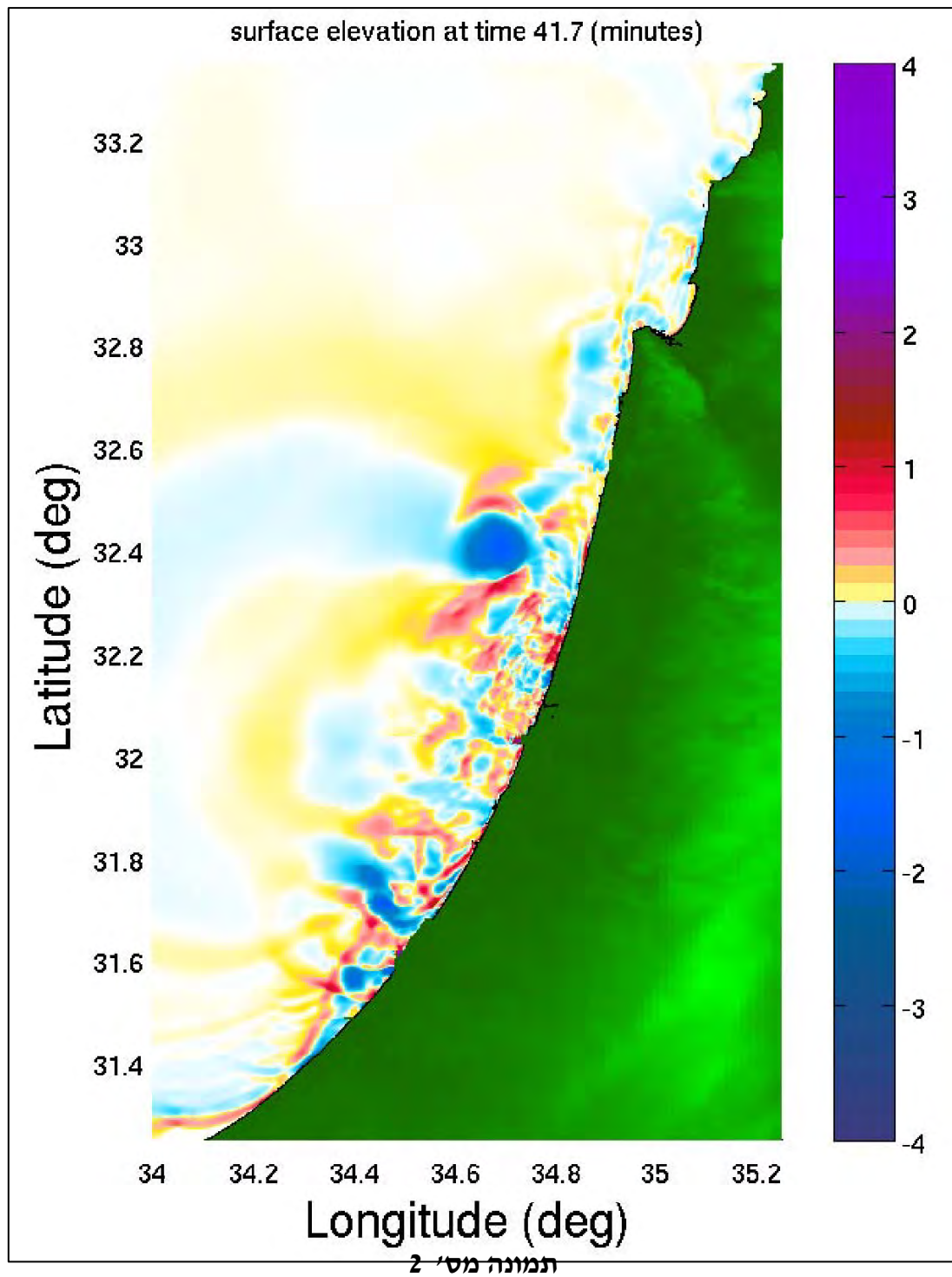
נספח 3

תוצאות תרחיש גלישה מול תל אביב LS-TLV1

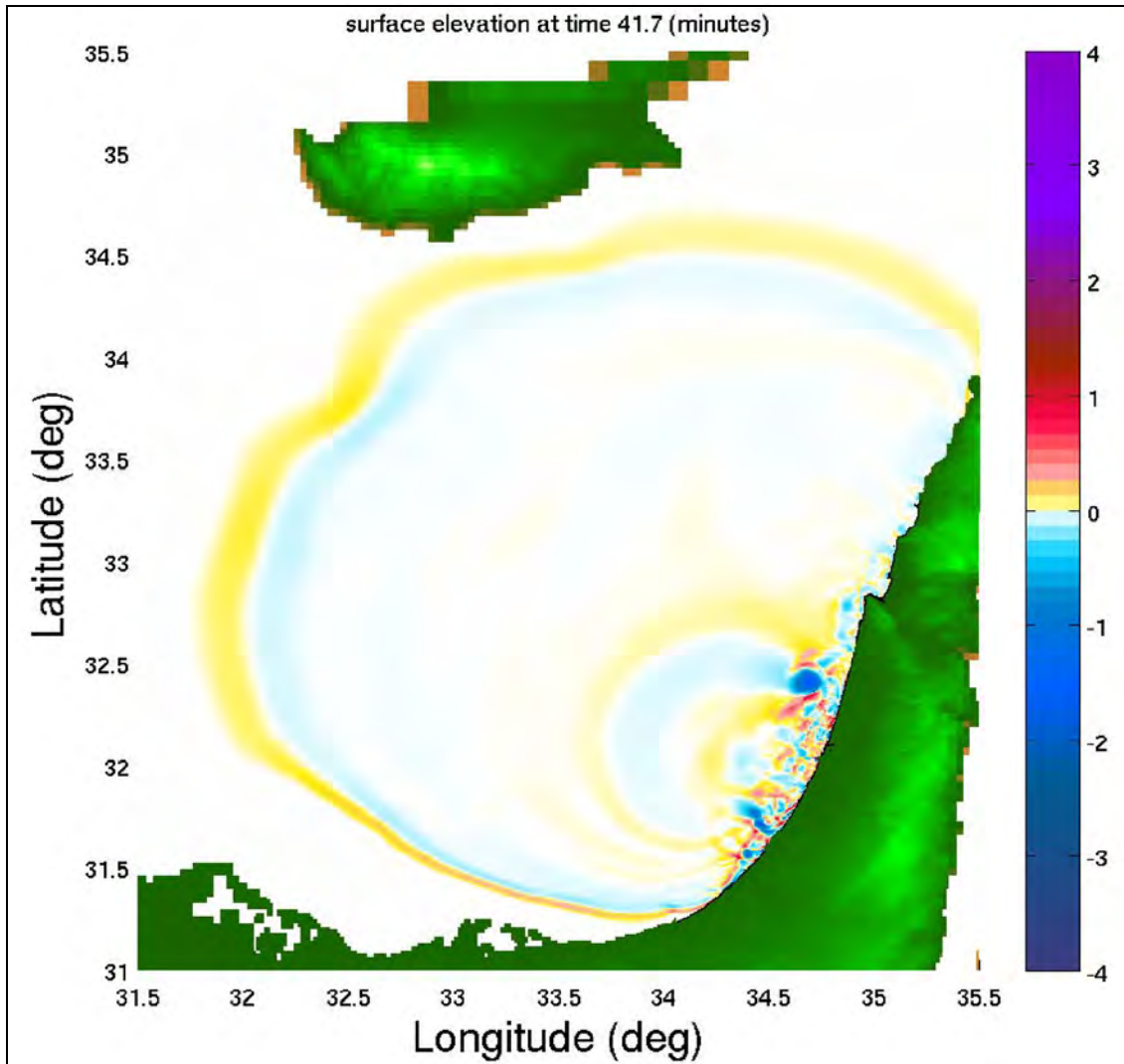


תמונה מס' 1

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור הגלישה

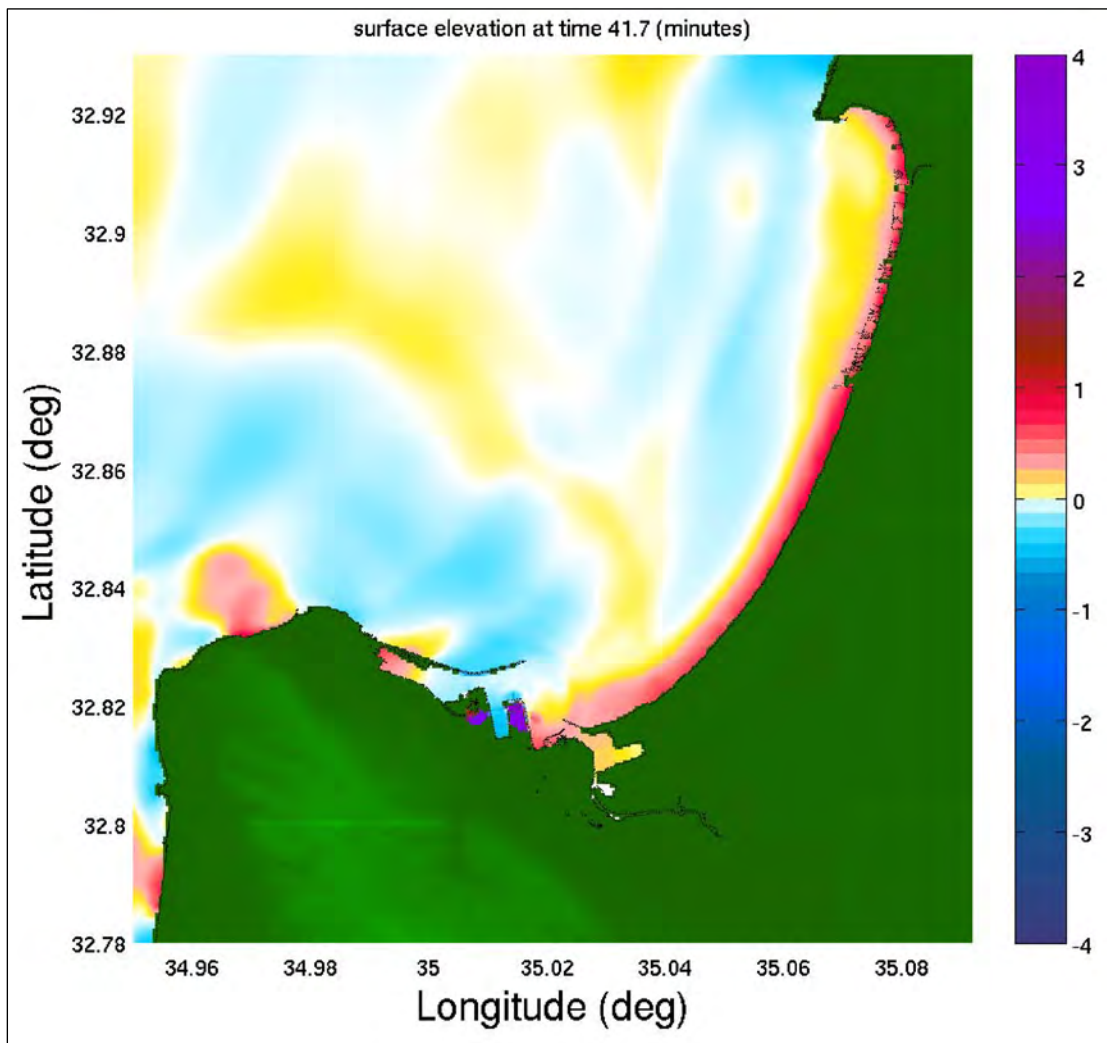


תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלום בוק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור החוף הישראלי



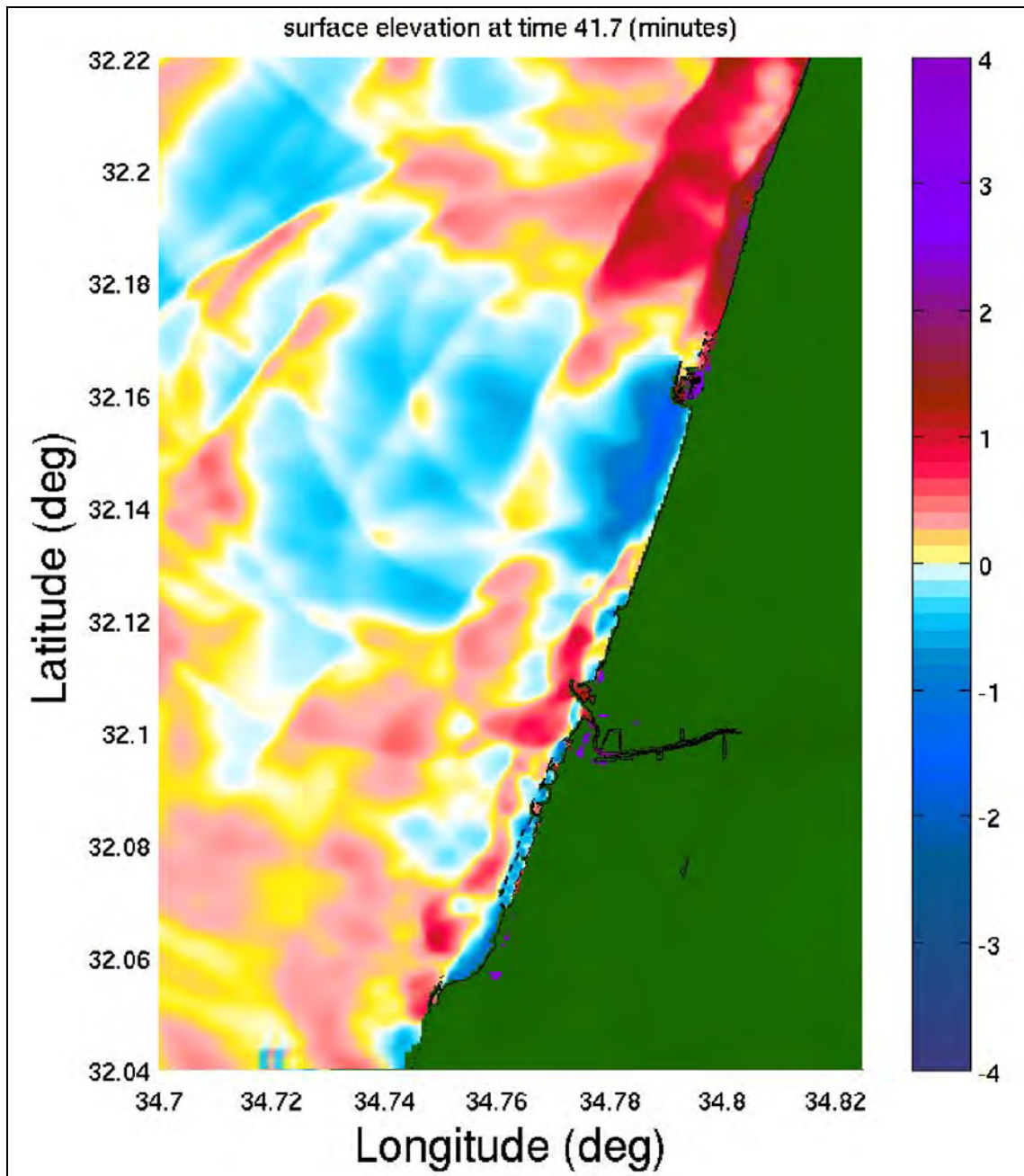
תמונה מס' 3

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור האגן המזרחי של הים התיכון



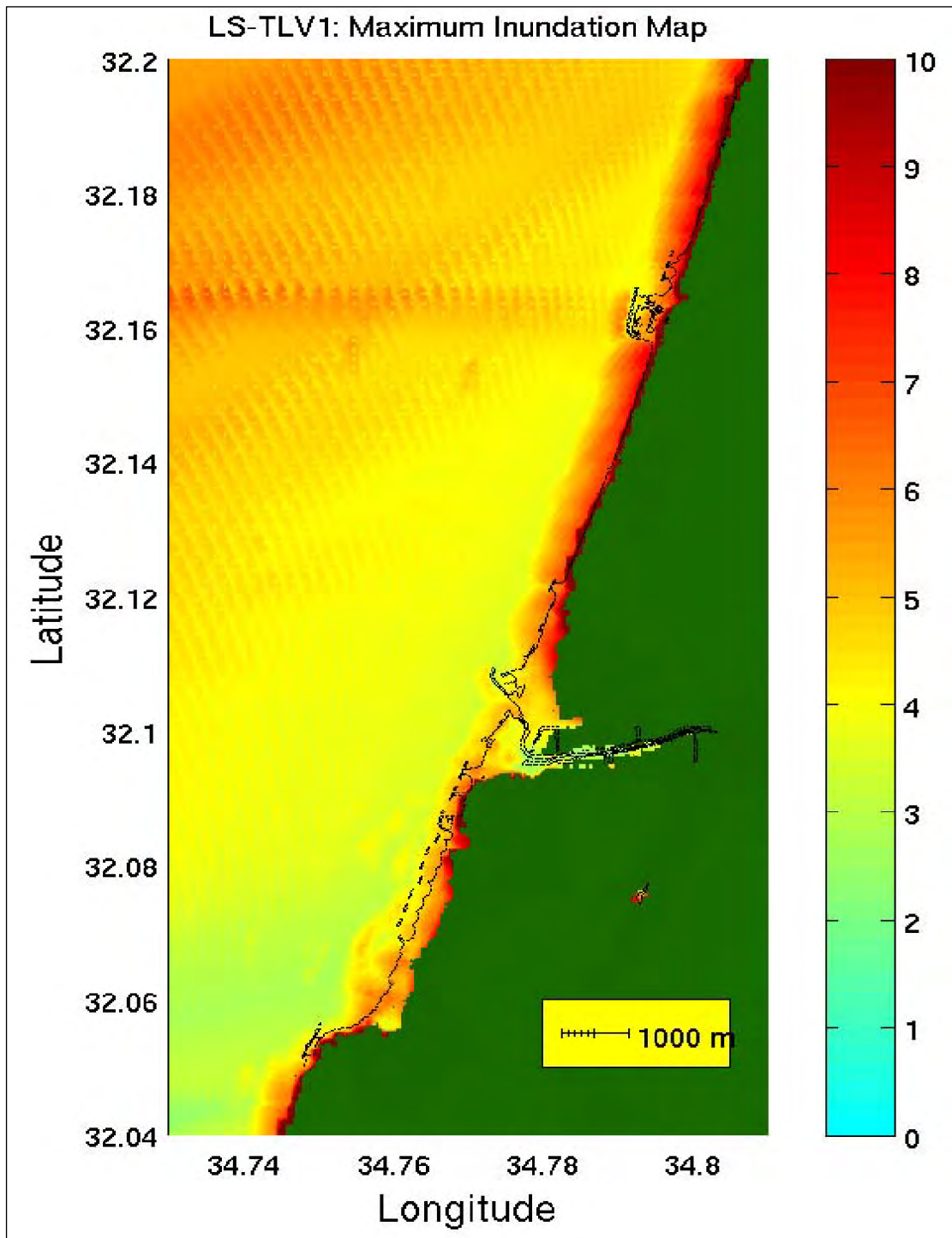
תמונה מס' 4

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, אזור מפרץ חיפה



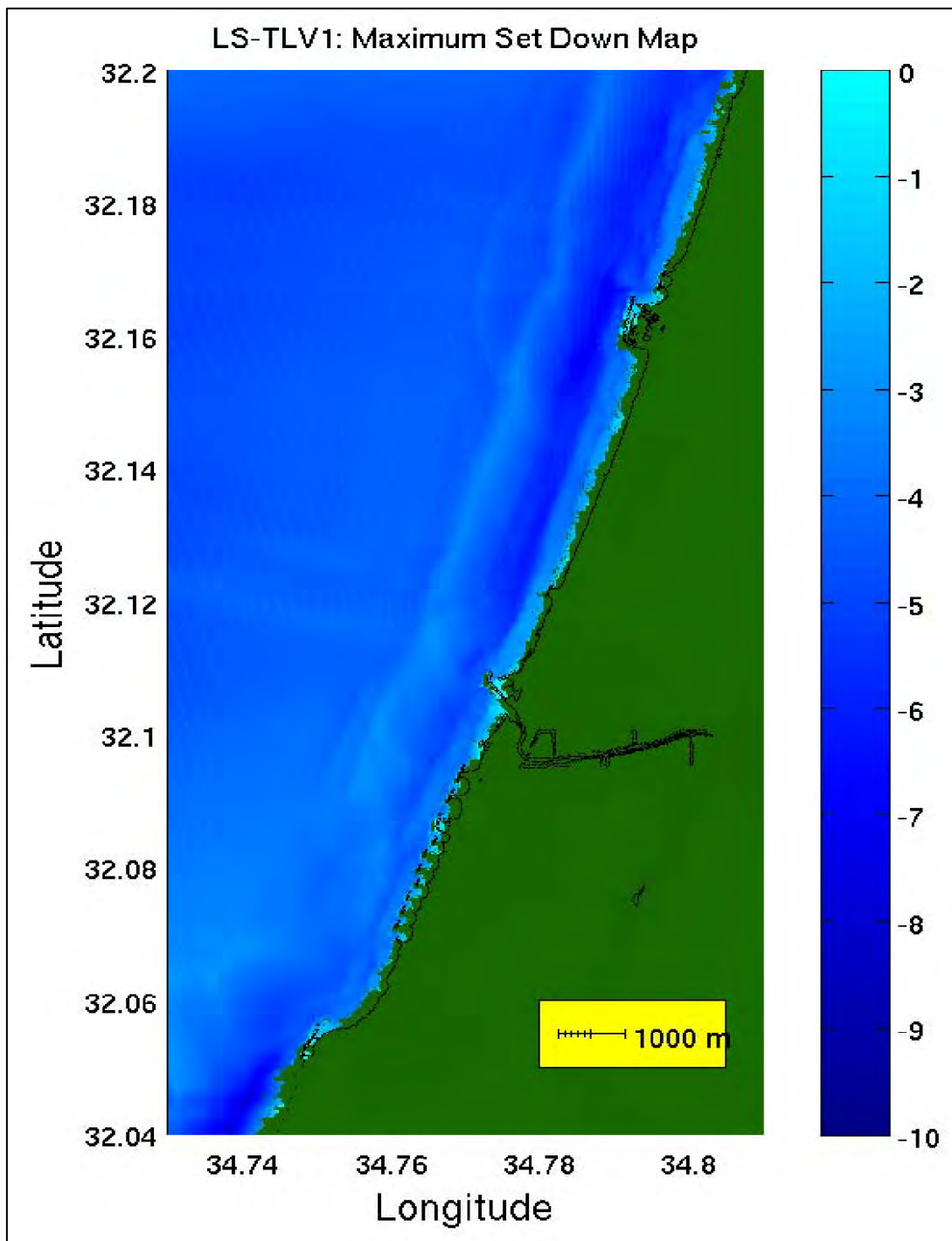
תמונה מס' 5

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. תצלום בוק של שינוי רום פני הים, אזור תל אביב



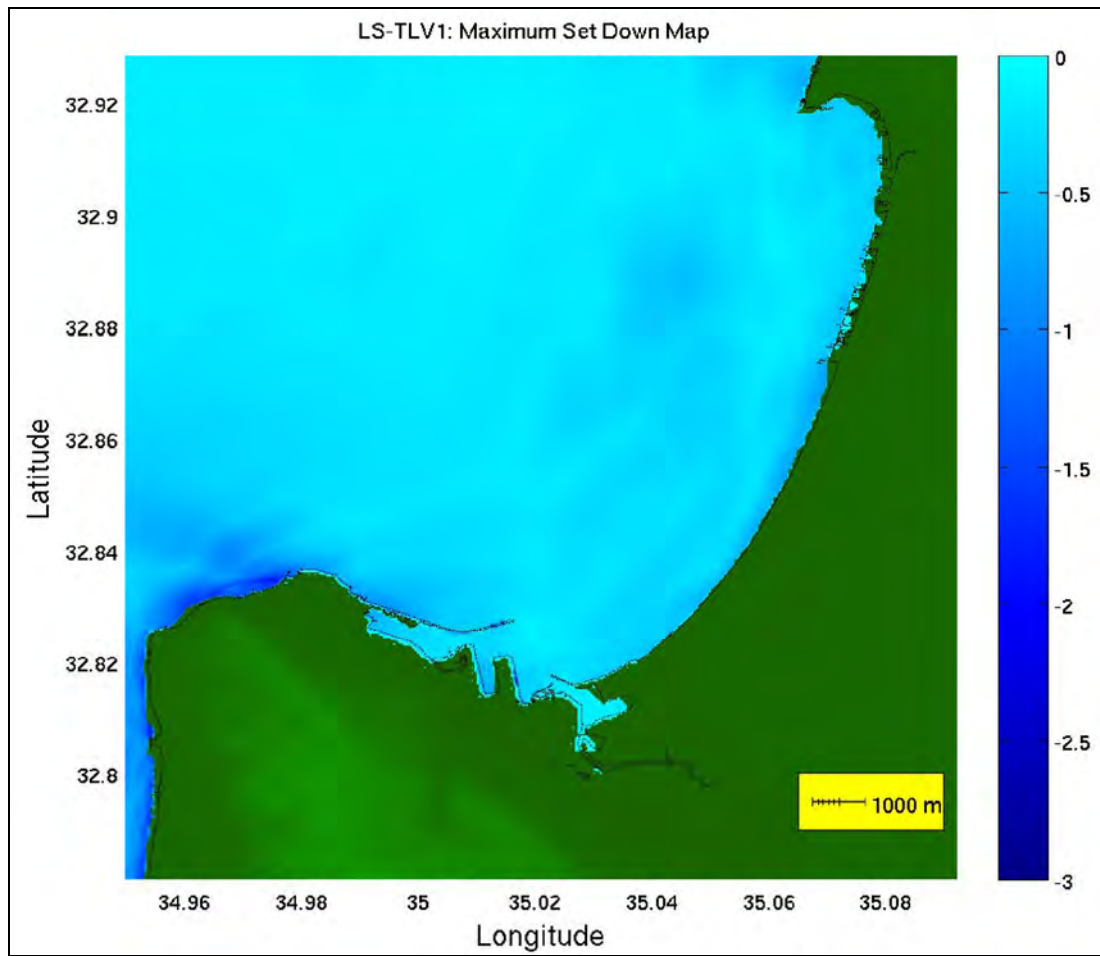
תמונה מס' 6

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



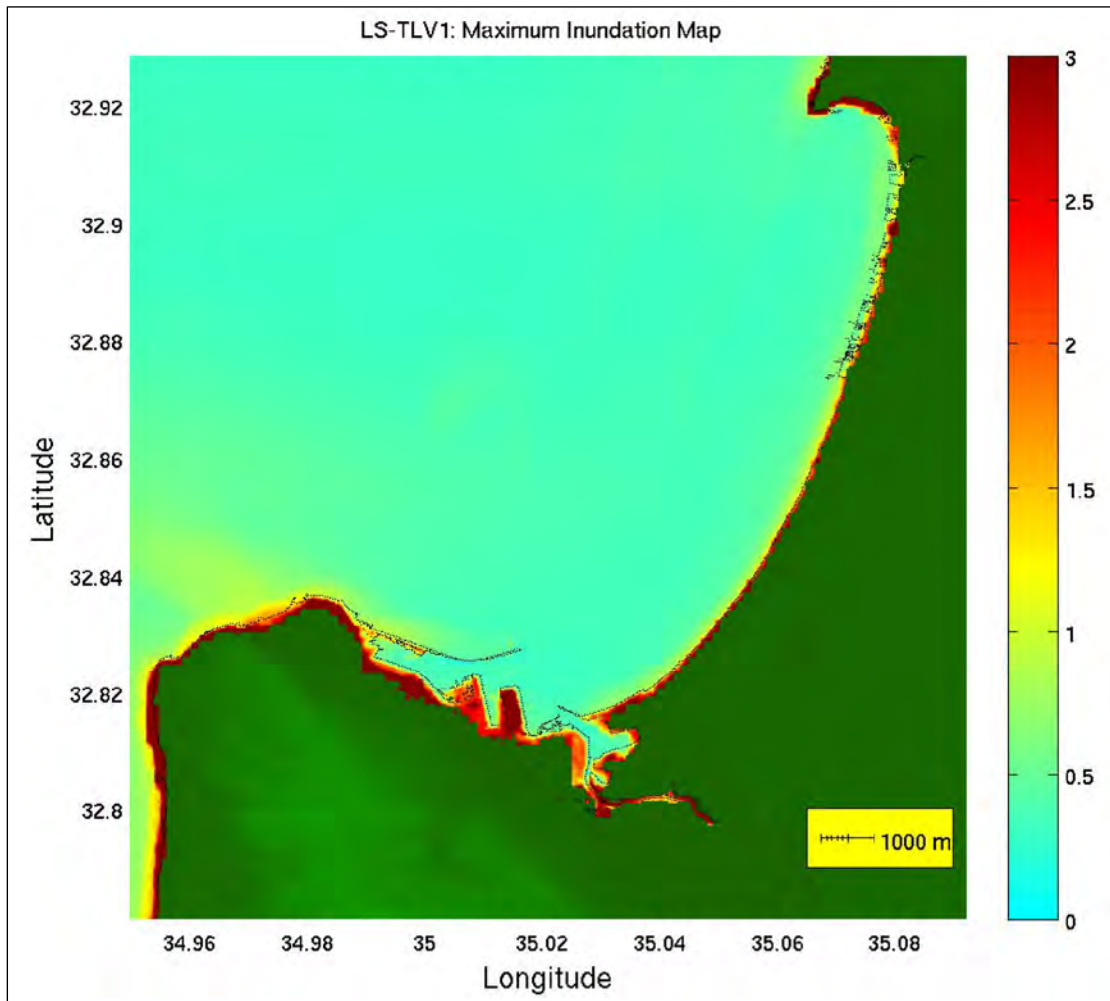
תמונה מס' 7

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



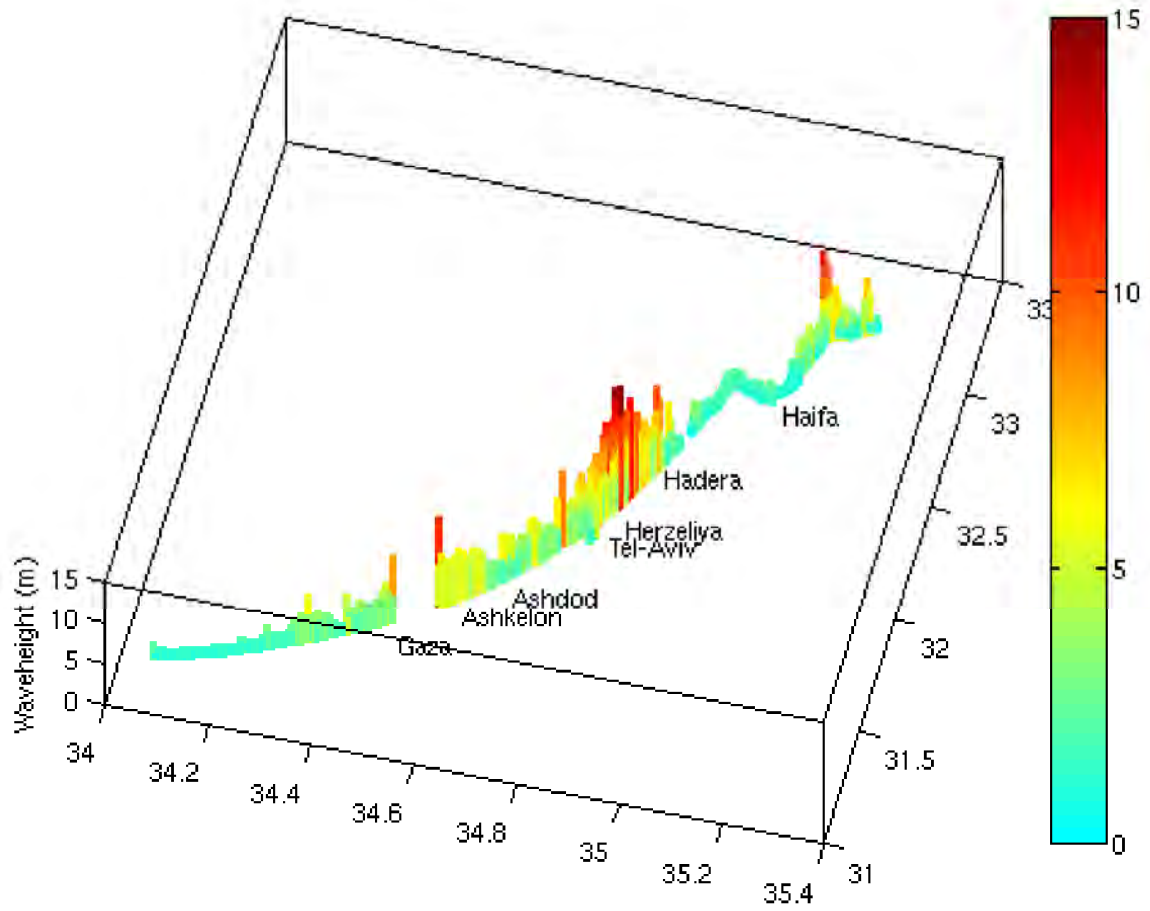
תמונה מס' 8

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



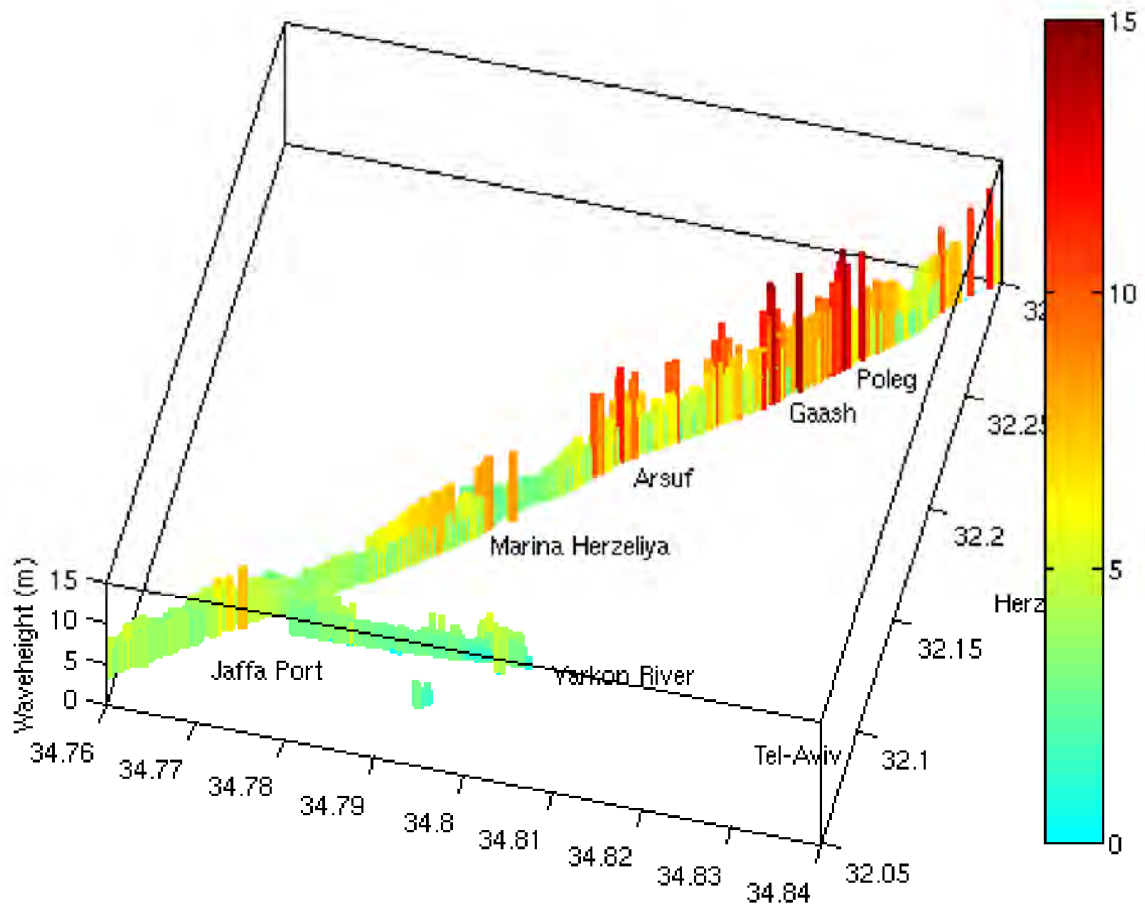
תמונה מס' 9

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



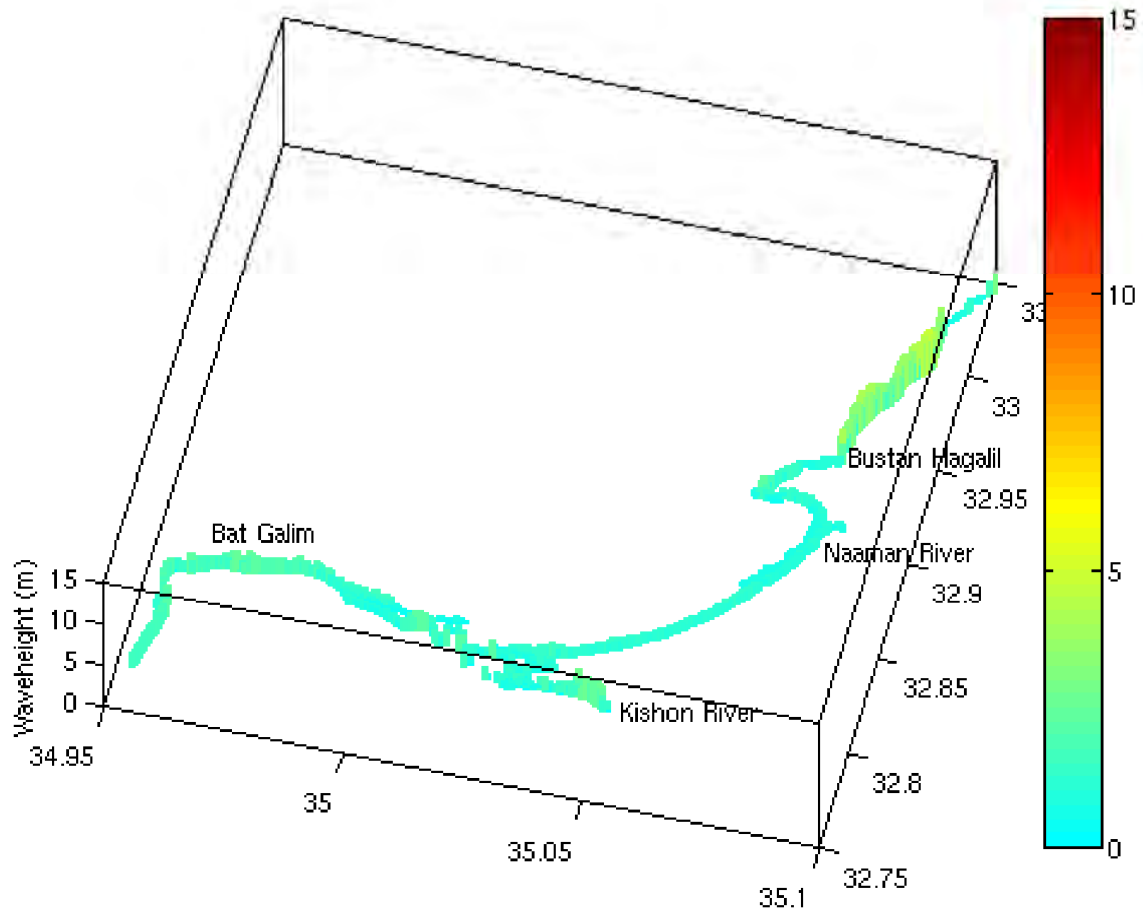
תמונה מס' 10

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז

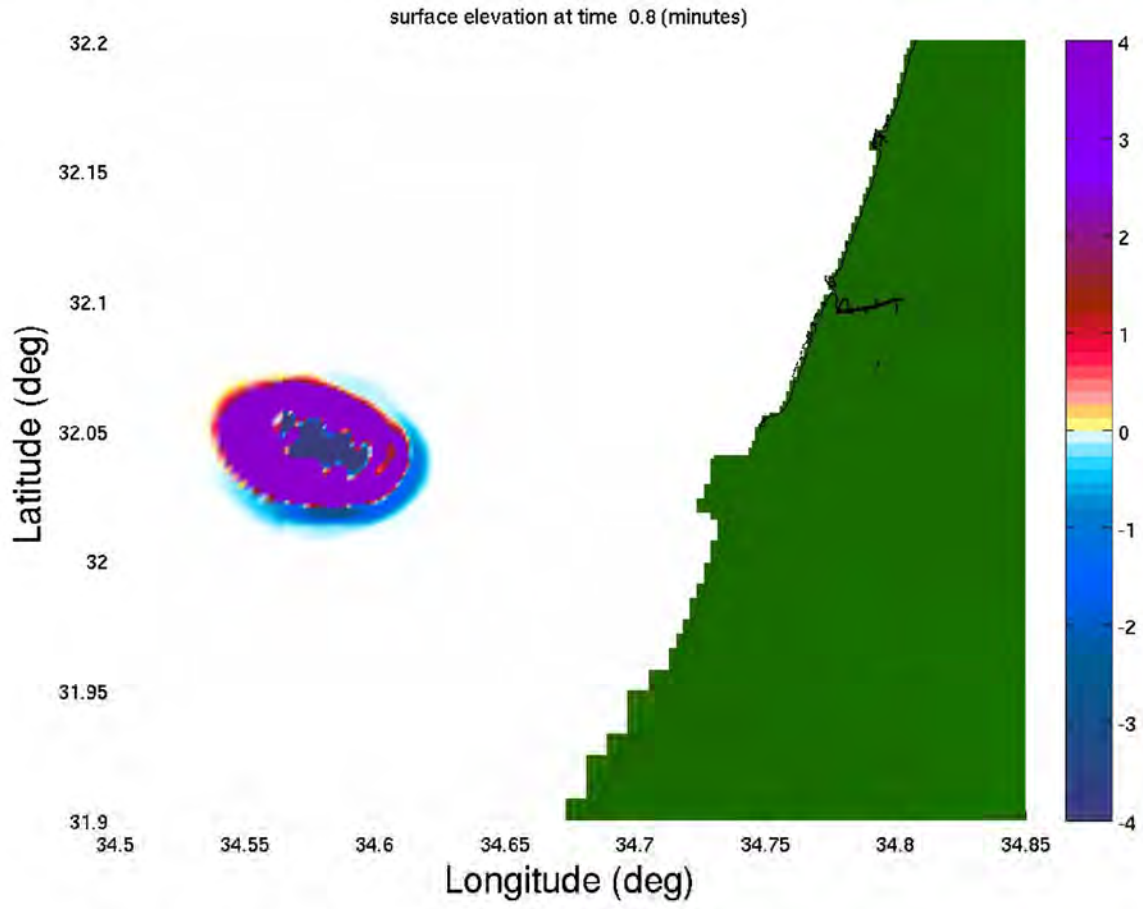


תמונה מס' 12

תרחיש LS-TLV1, גלישה מול תל אביב. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

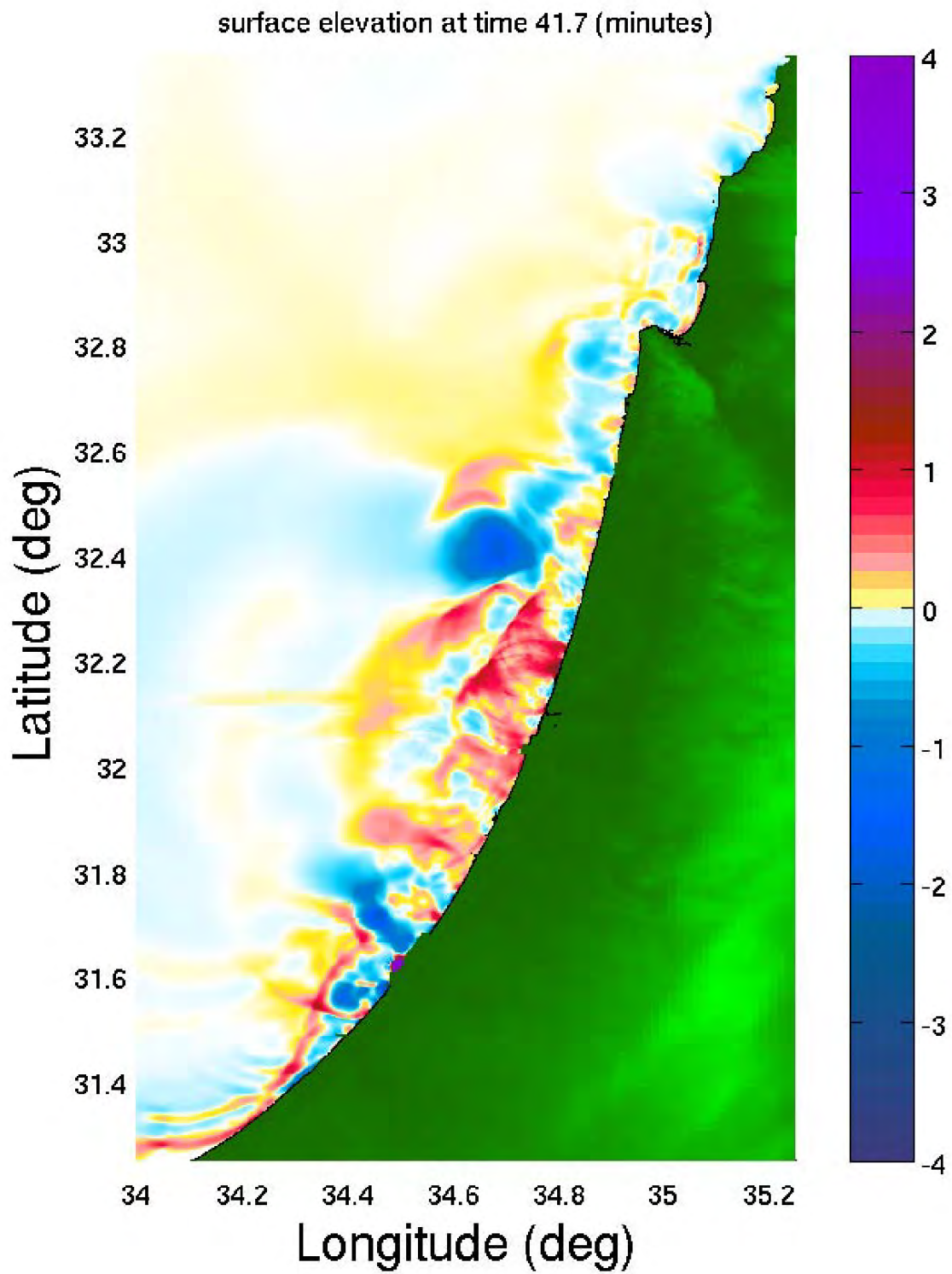
נספח 4

תוצאות תרחיש גלישה מול תל אביב LS-TLV2



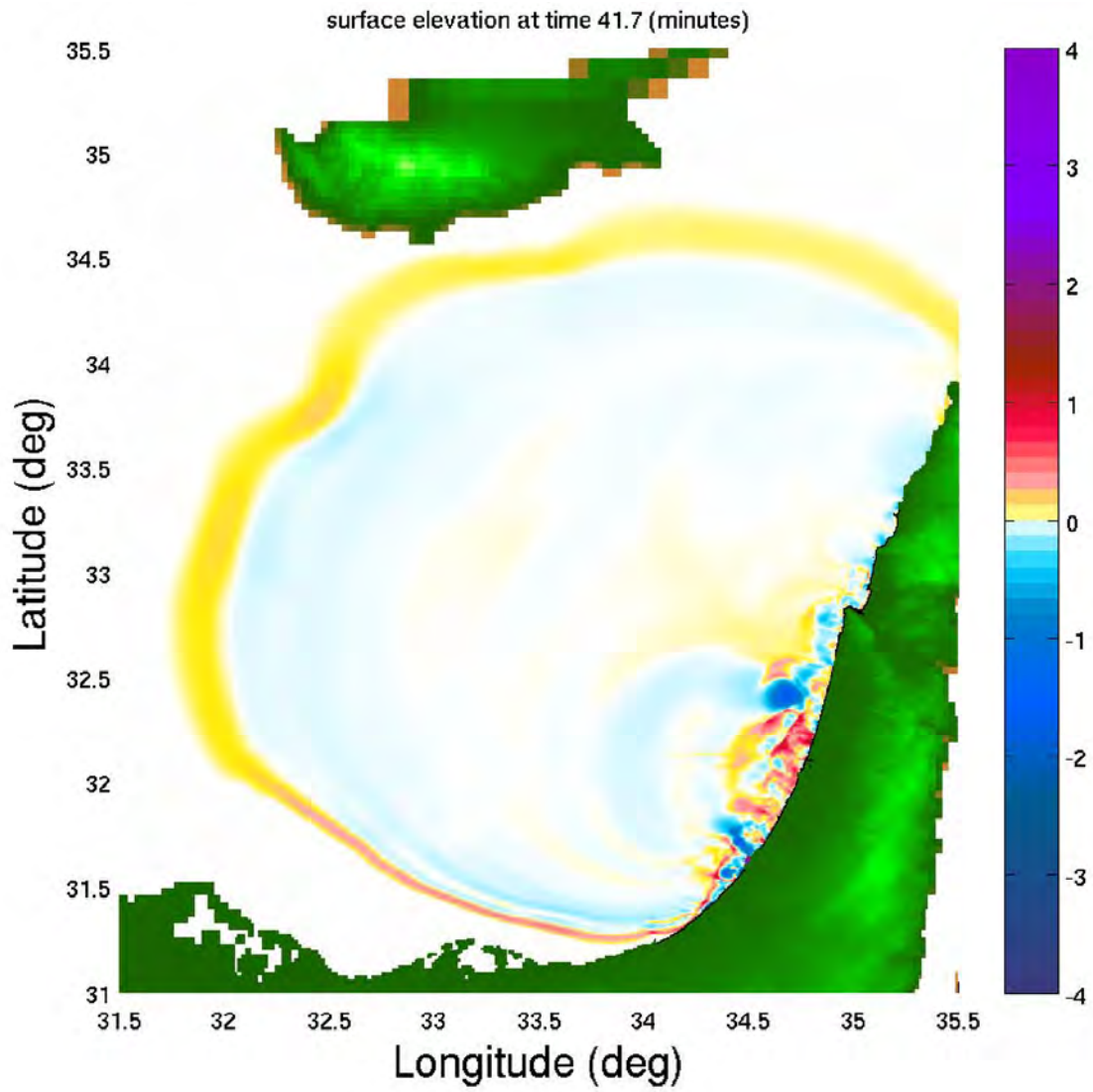
תמונה מס' 1

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור הגלישה



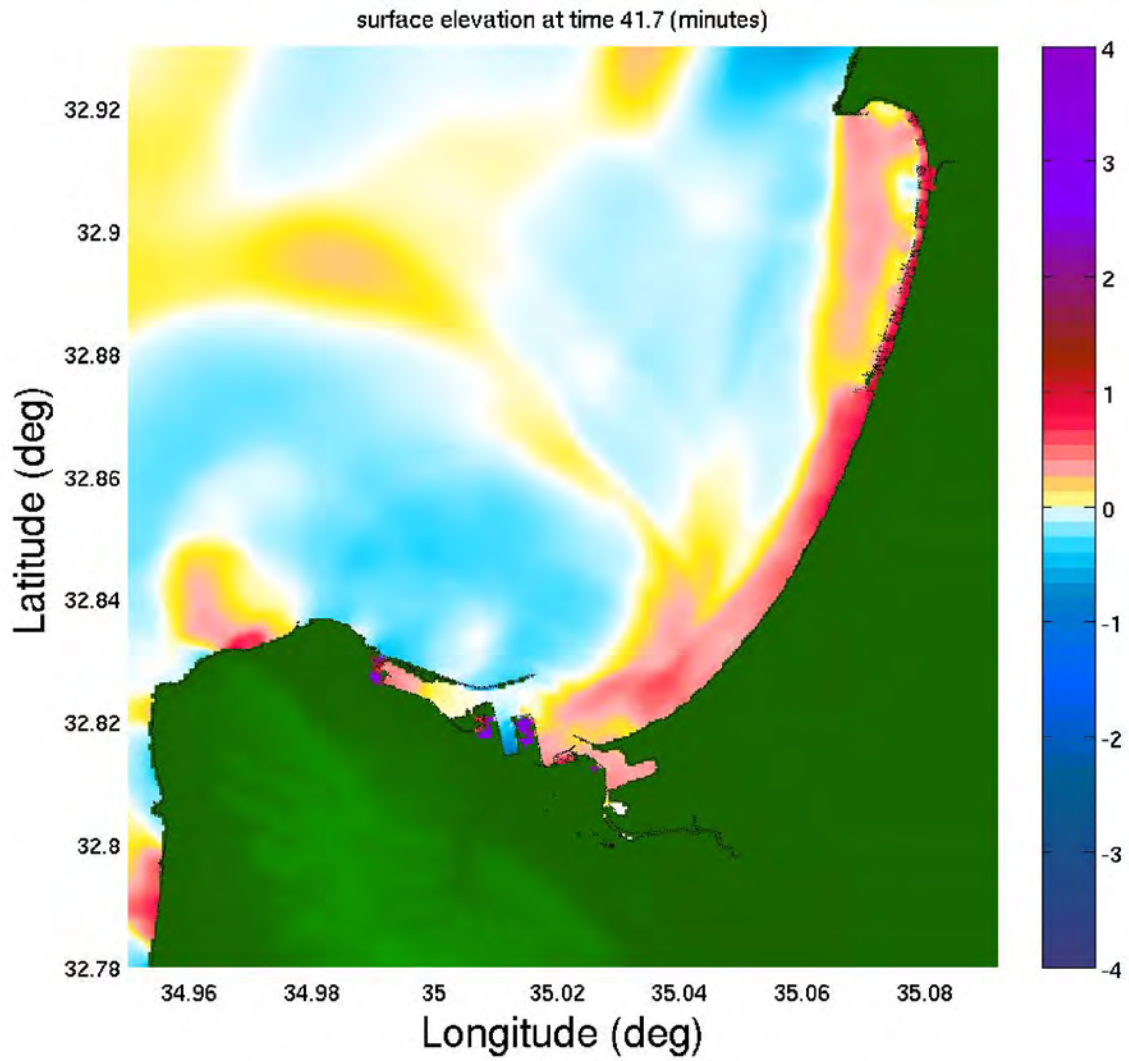
תמונה מס' 2

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור החוף הישראלי



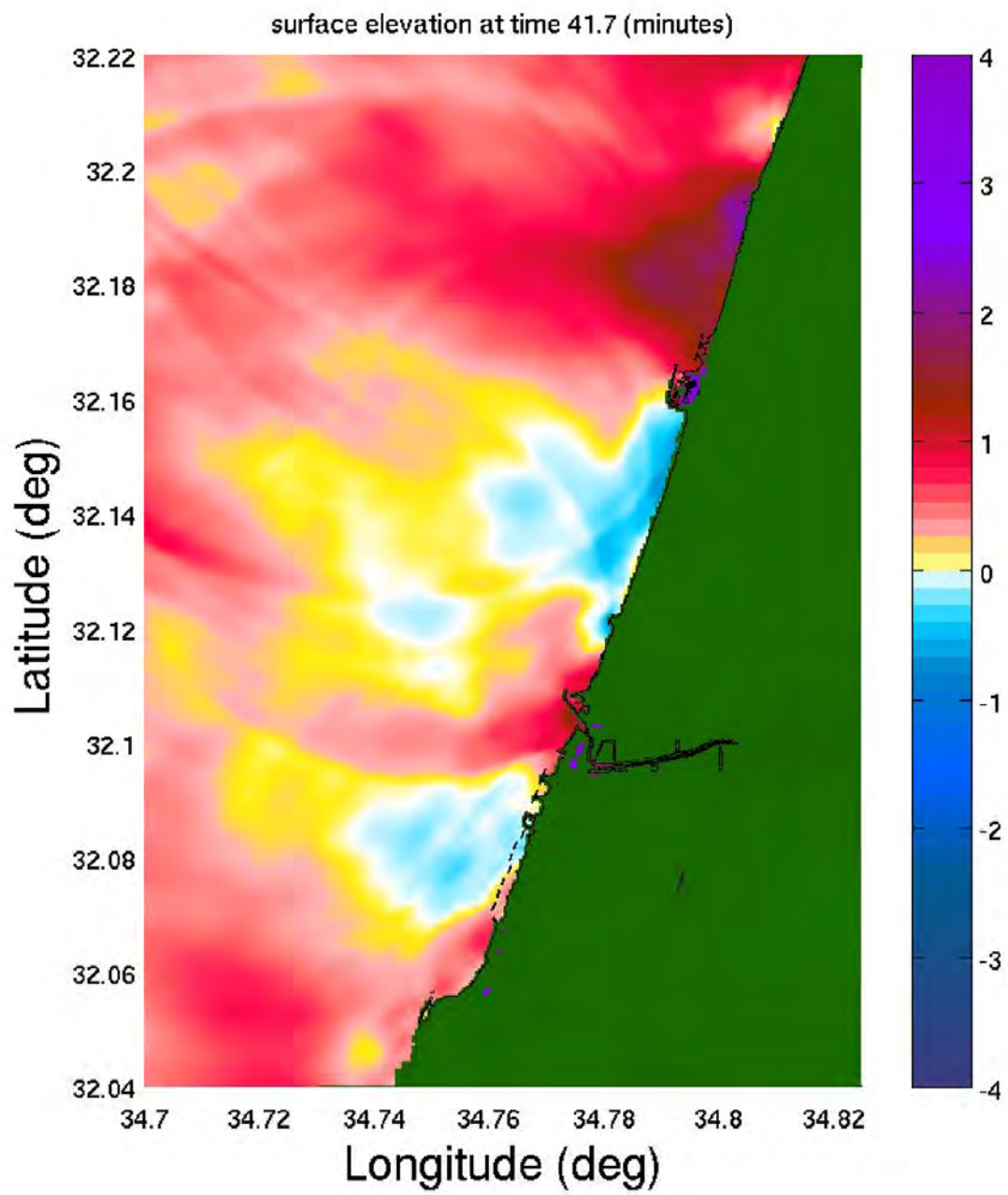
תמונה מס' 3

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור האגן המזרחי של הים התיכון



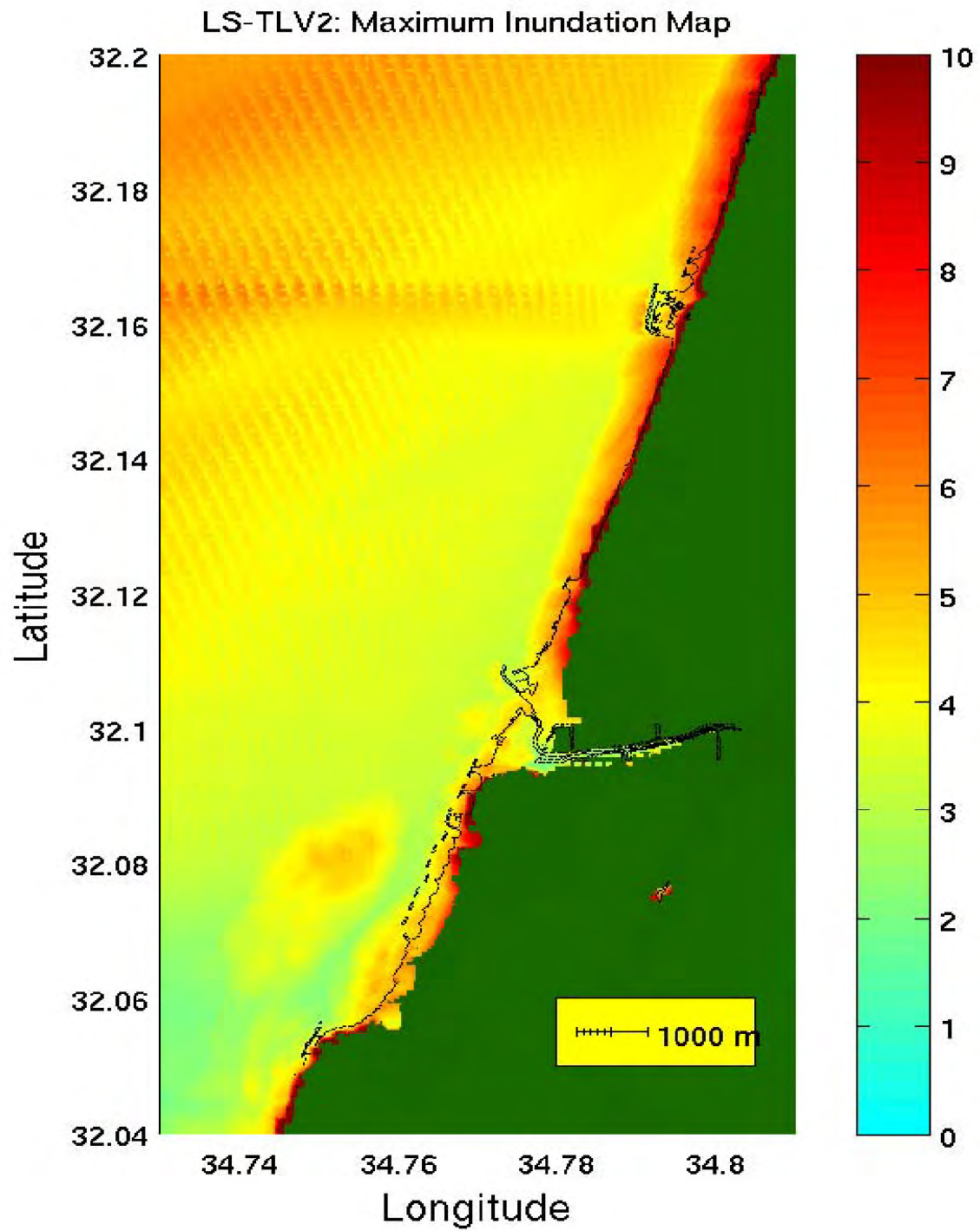
תמונה מס' 4

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, אזור מפרץ חיפה



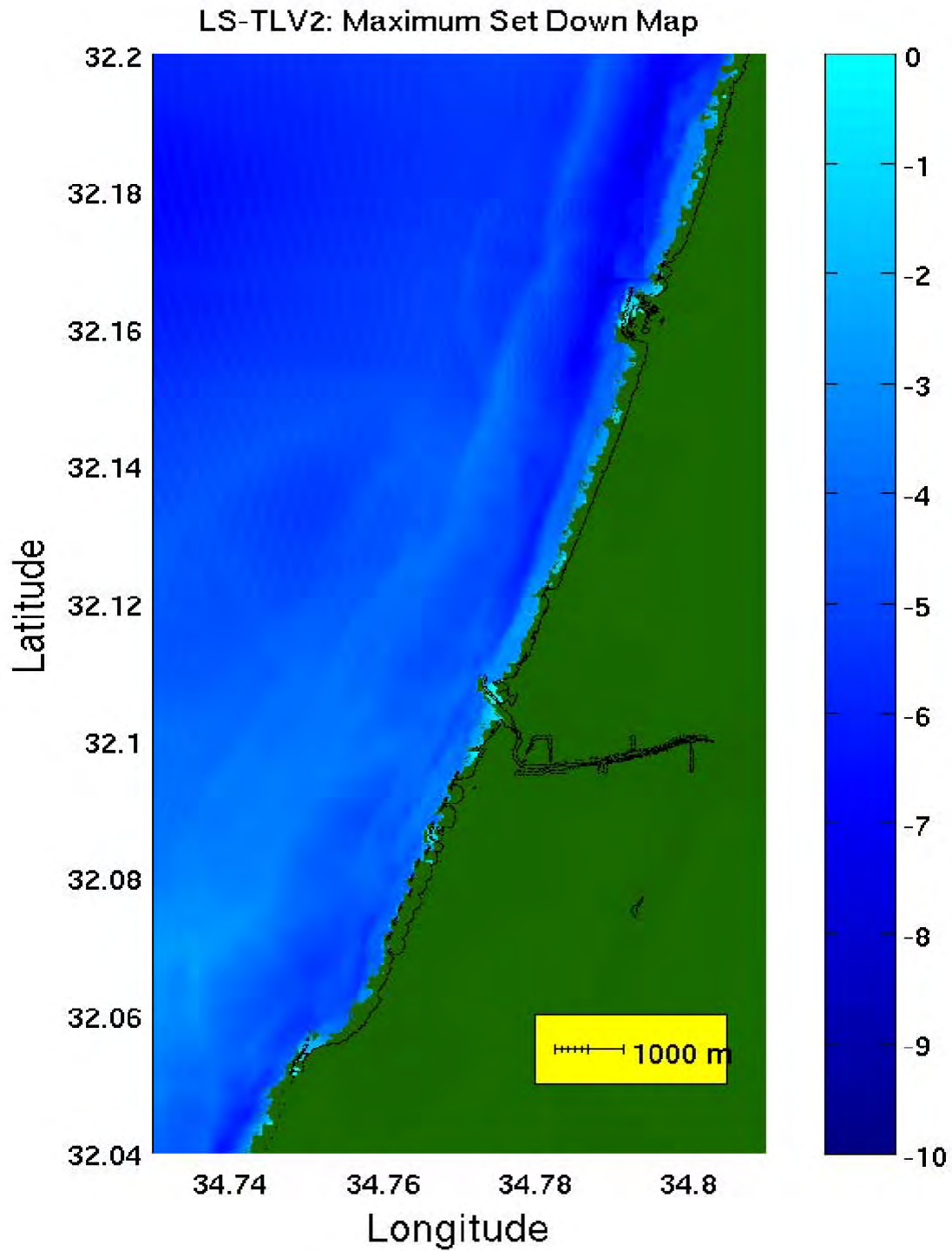
תמונה מס' 5

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. תצלום בוק של שינוי רום פני הים, אזור תל אביב



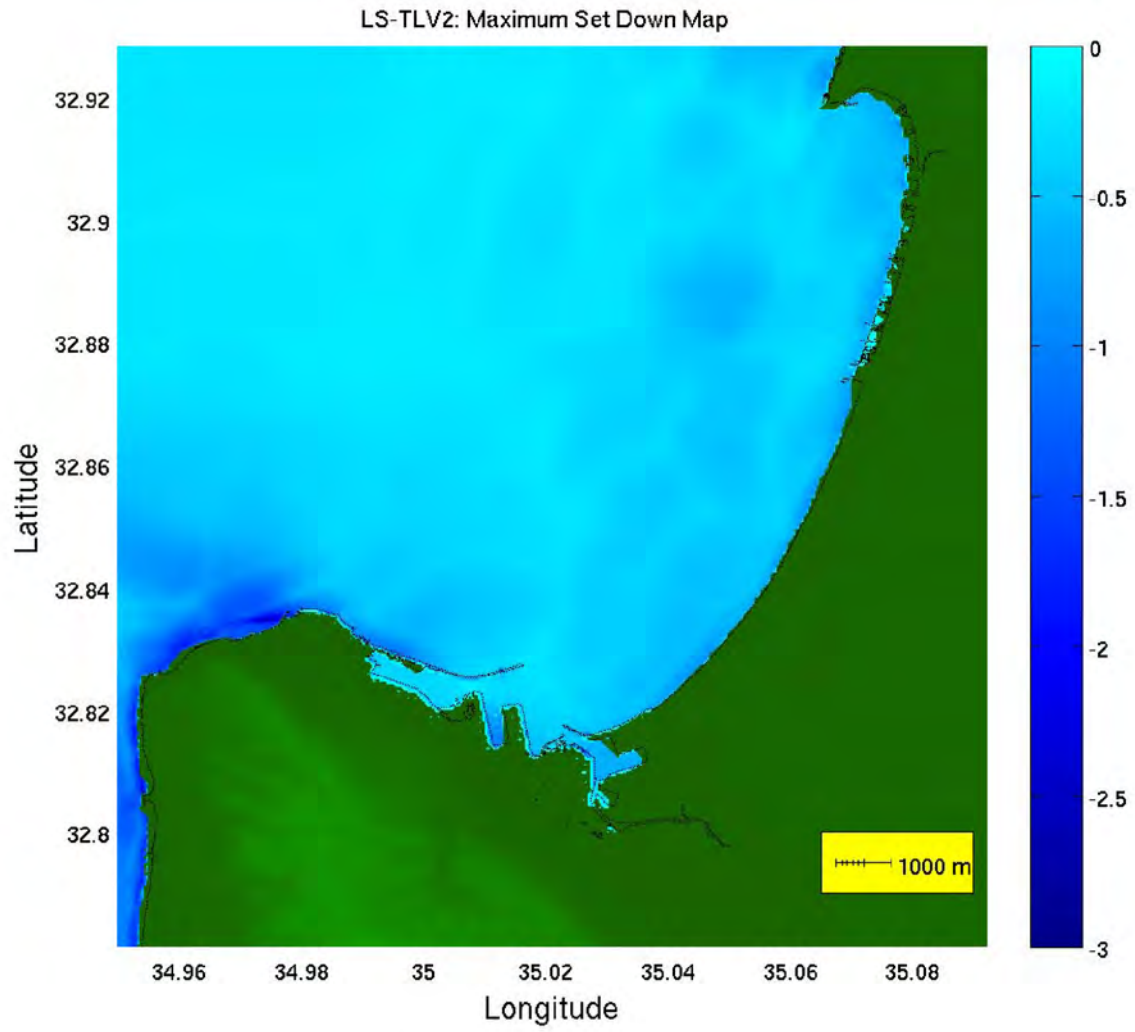
תמונה מס' 6

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



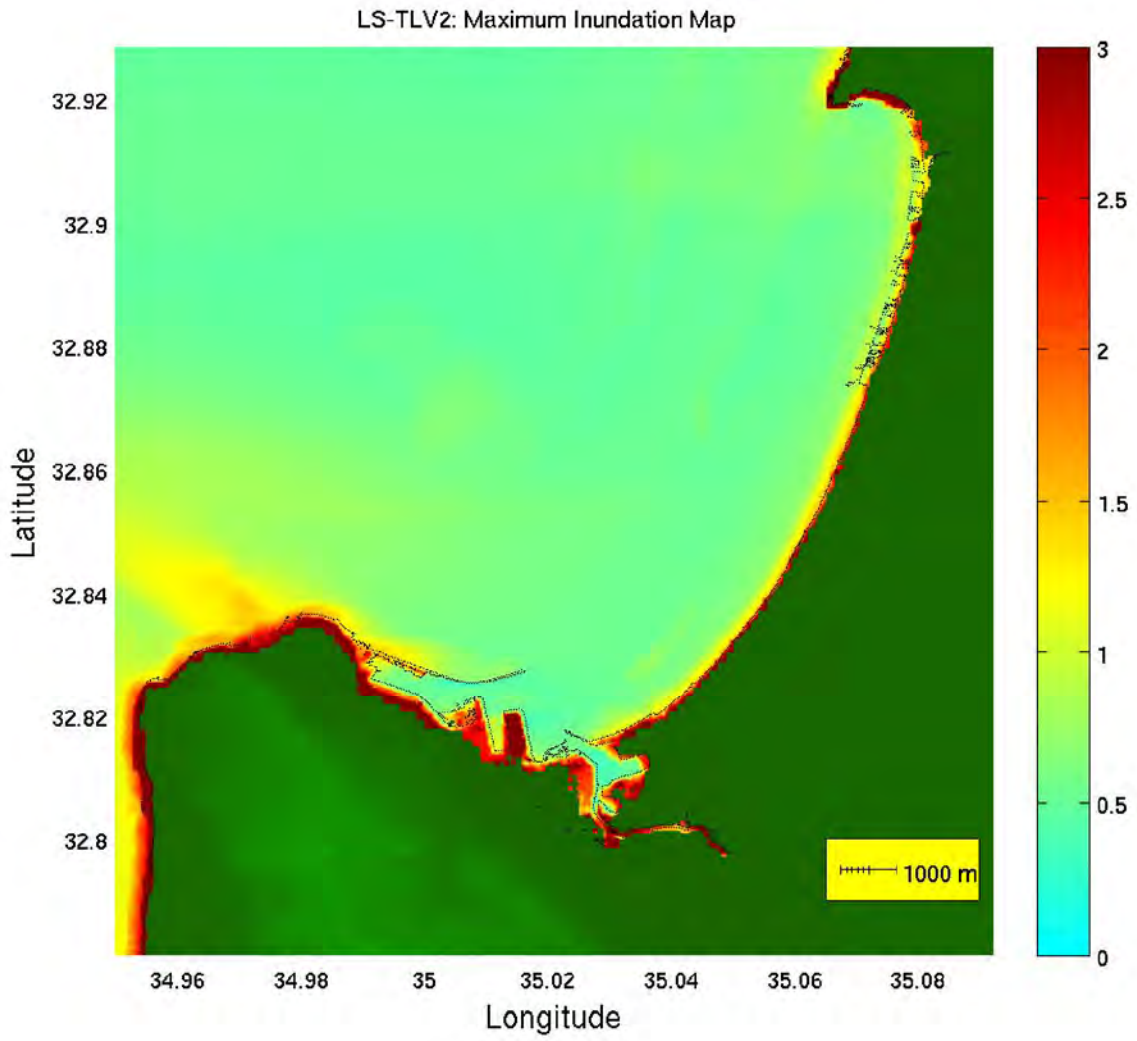
תמונה מס' 7

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



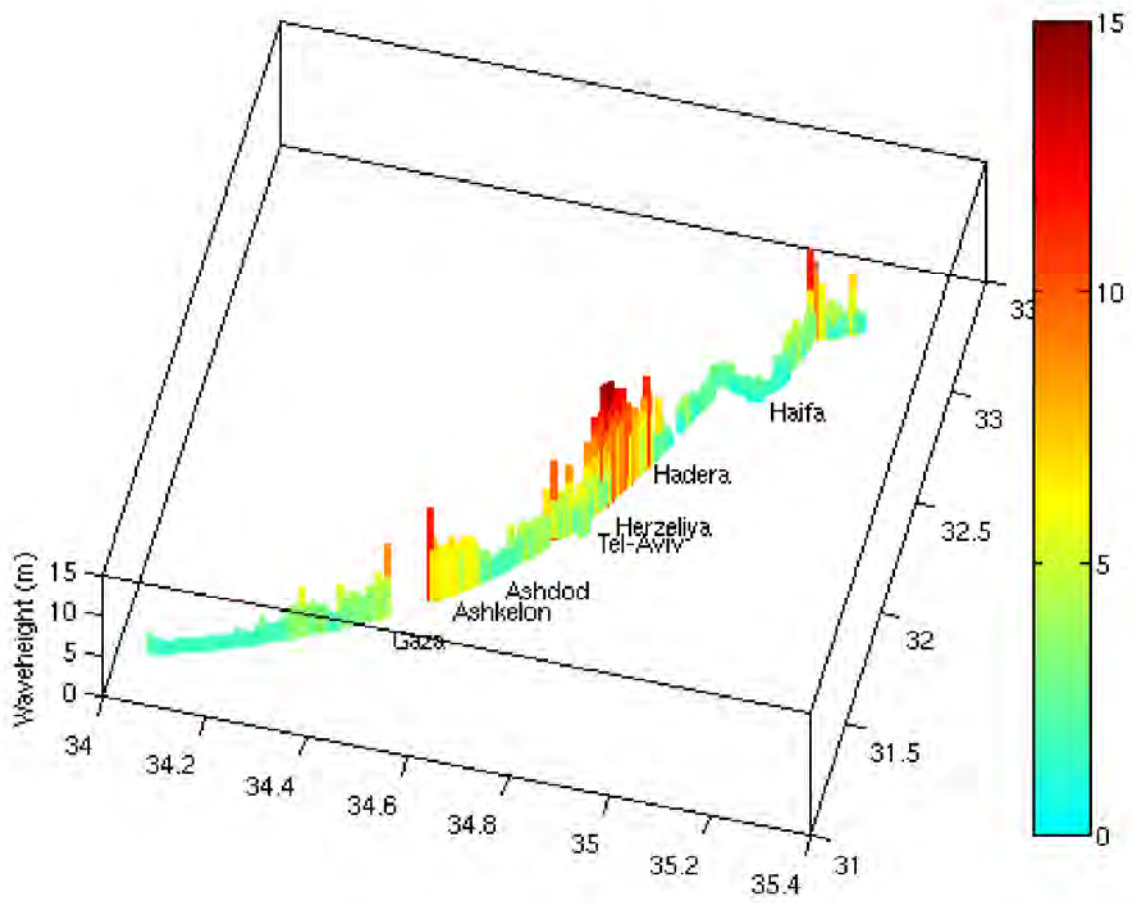
תמונה מס' 8

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



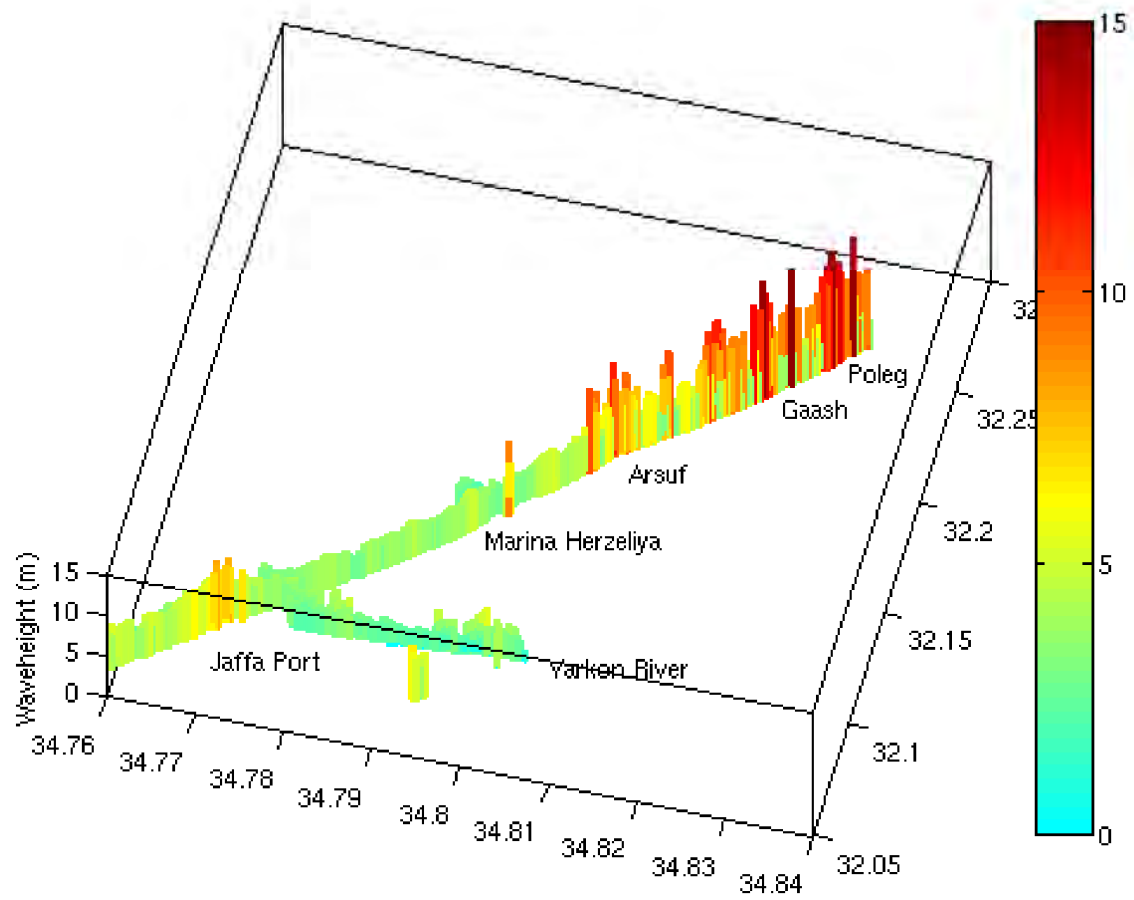
תמונה מס' 9

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



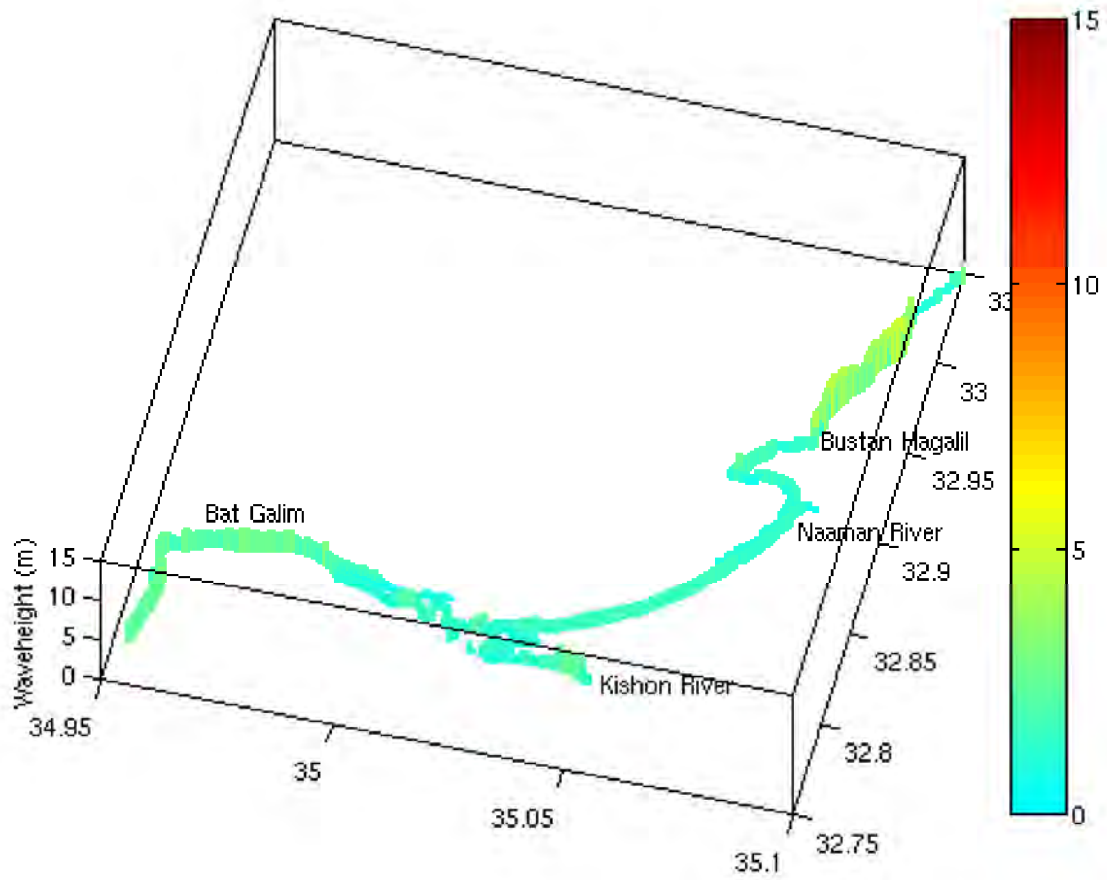
תמונה מס' 10

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז

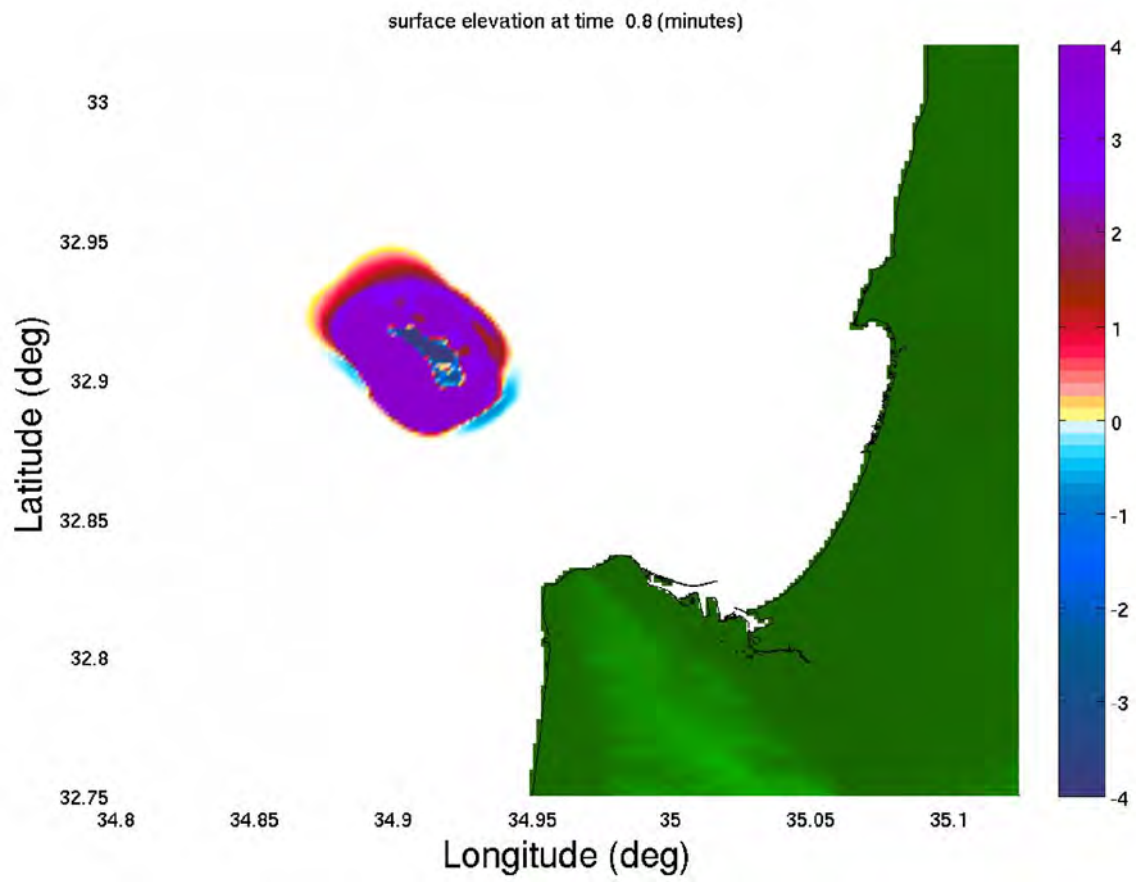


תמונה מס' 12

תרחיש LS-TLV2, גלישה מול תל אביב. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

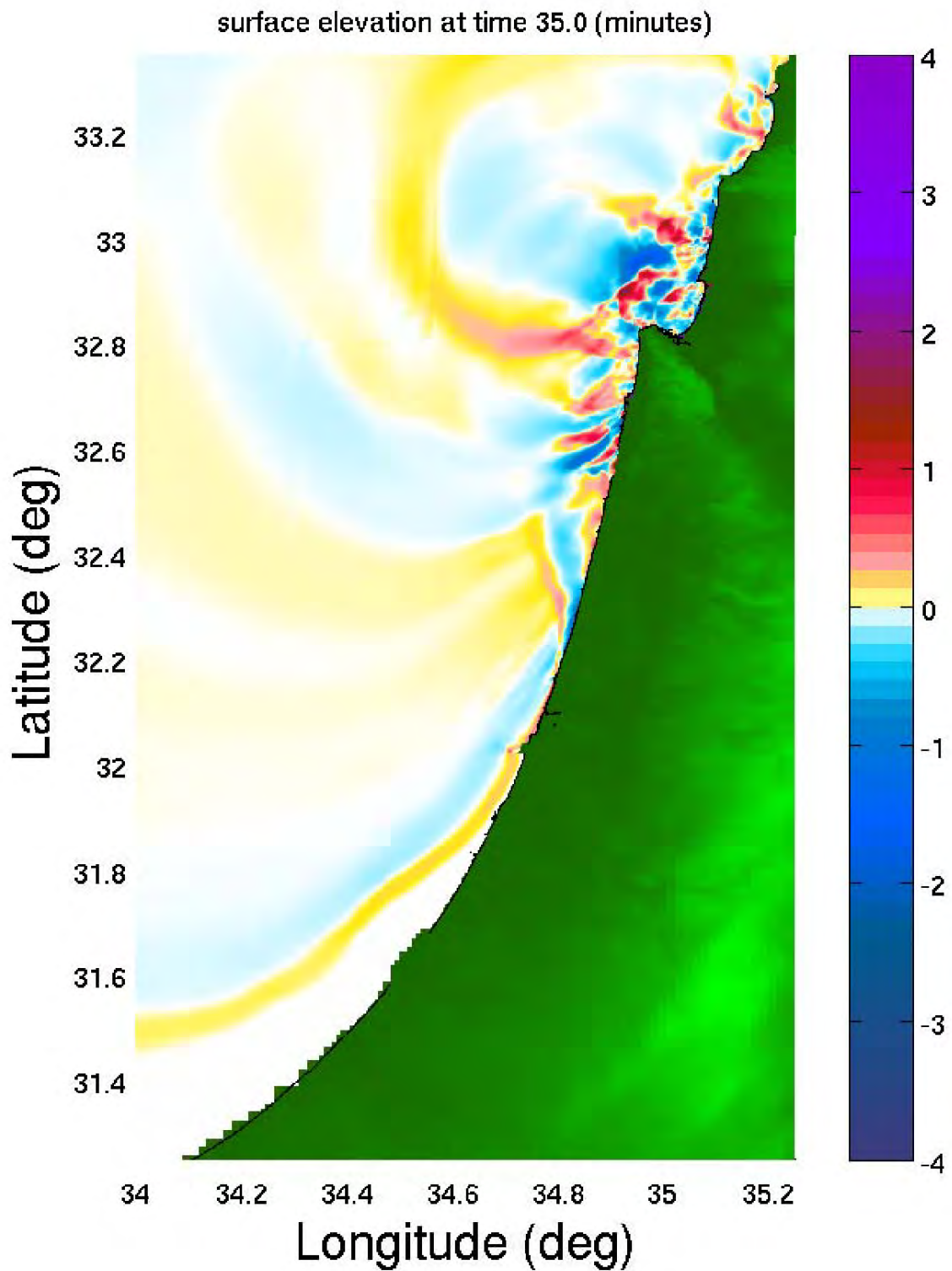
נספח 5

תוצאות תרחיש גלישה מול חיפה LS-HAI1



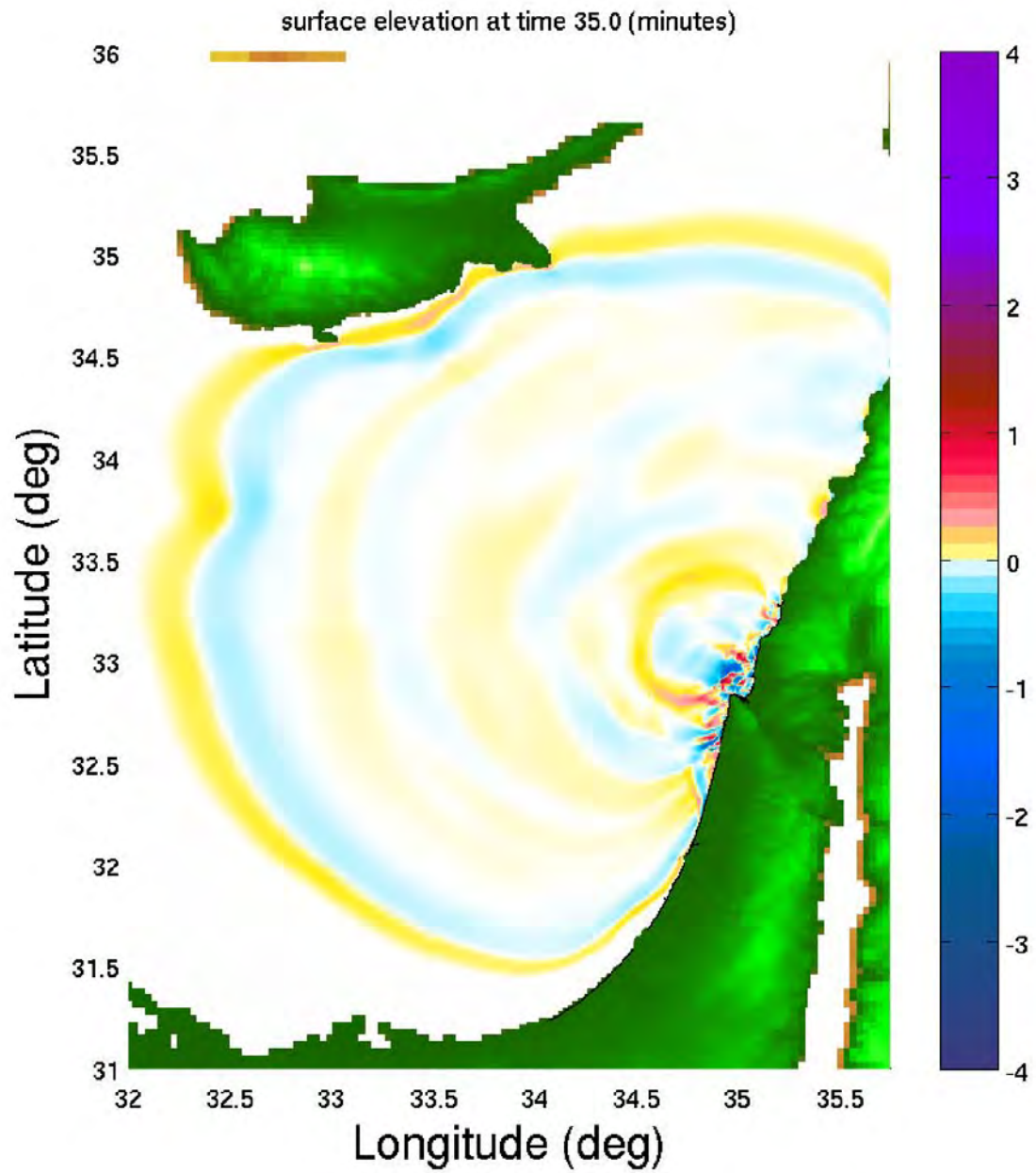
תמונה מס' 1

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור הגלישה



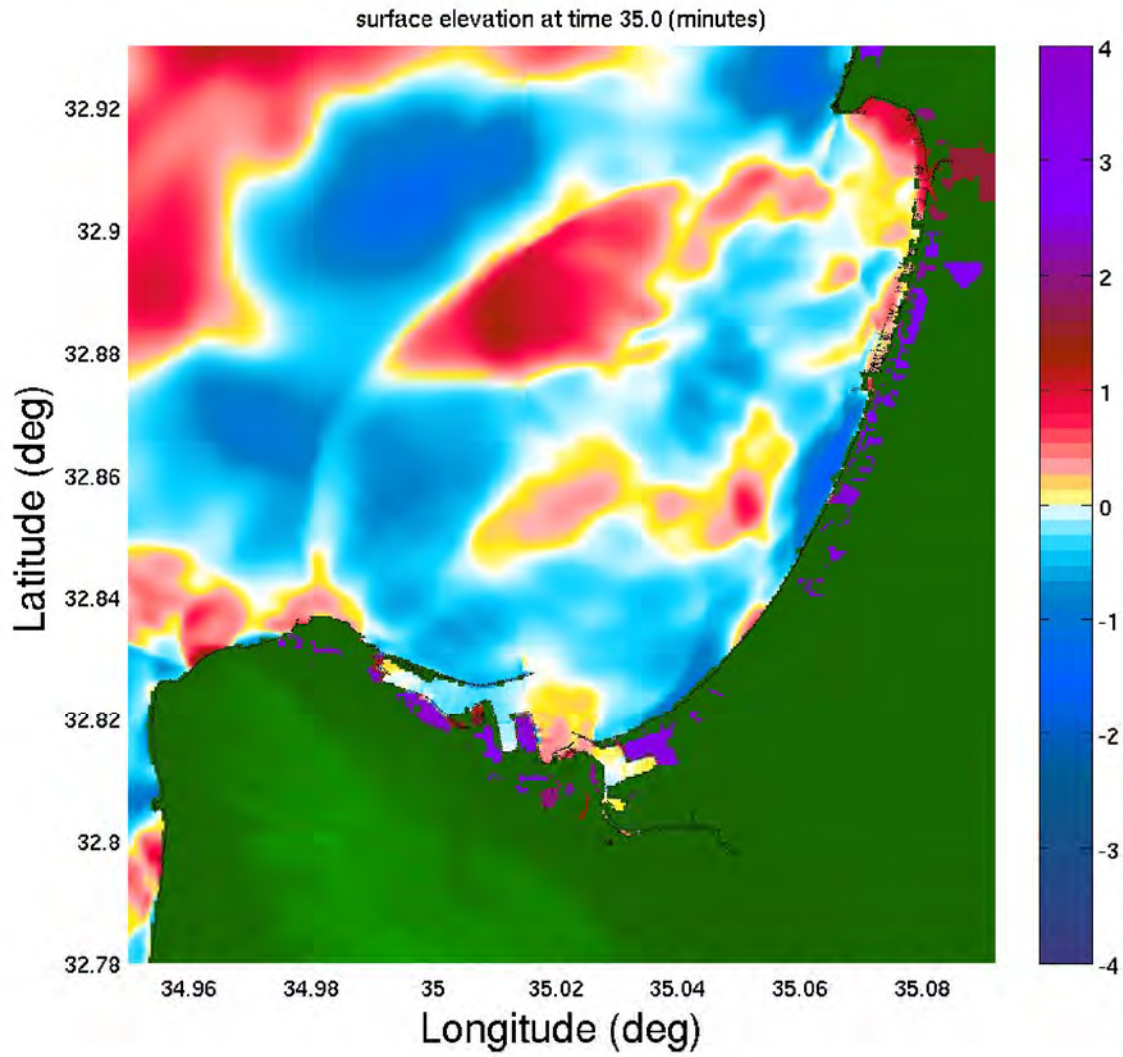
תמונה מס' 2

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור החוף הישראלי



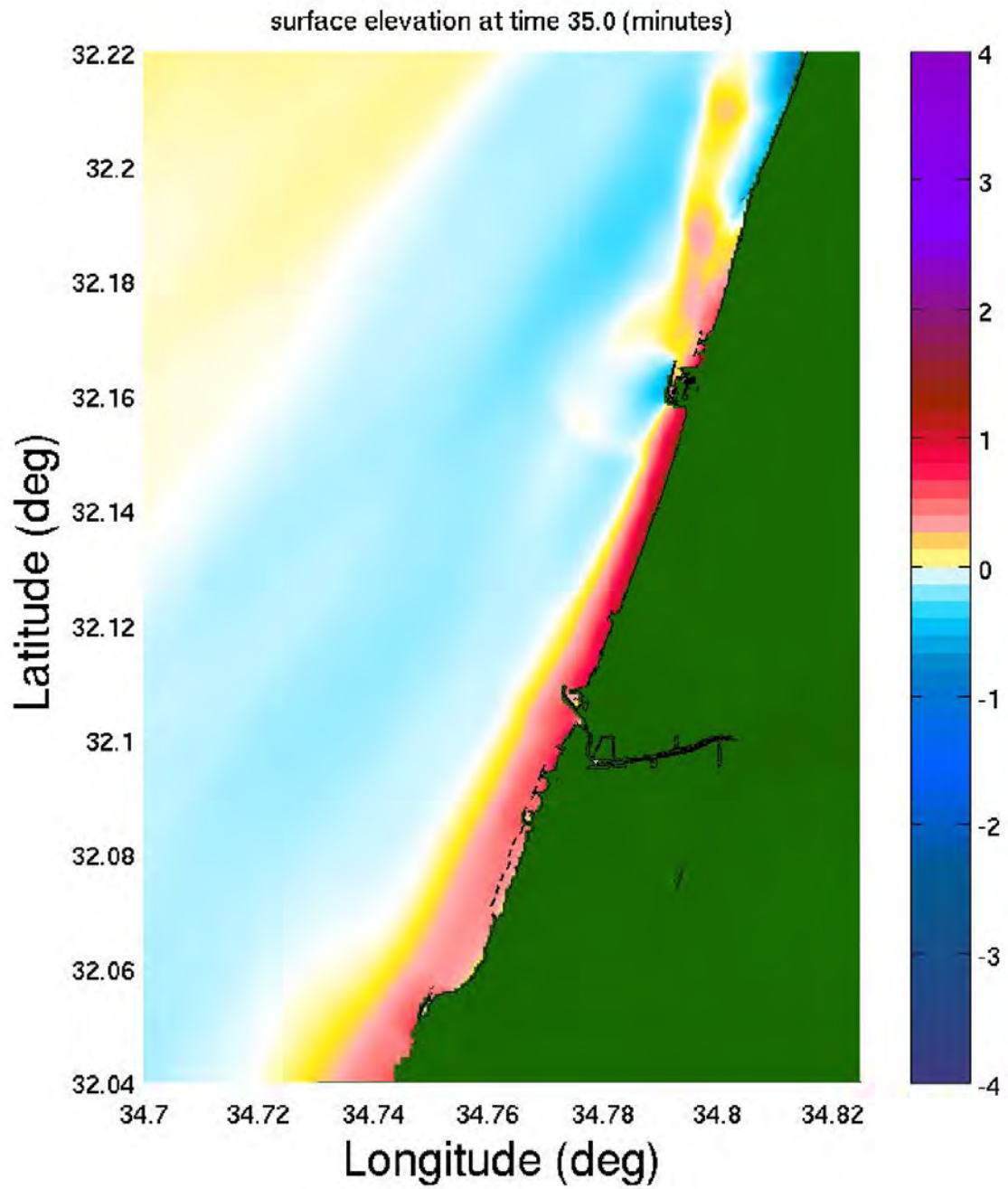
תמונה מס' 3

תרחיש LS-HA11, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, מבט על אזור האגן המזרחי של הים התיכון



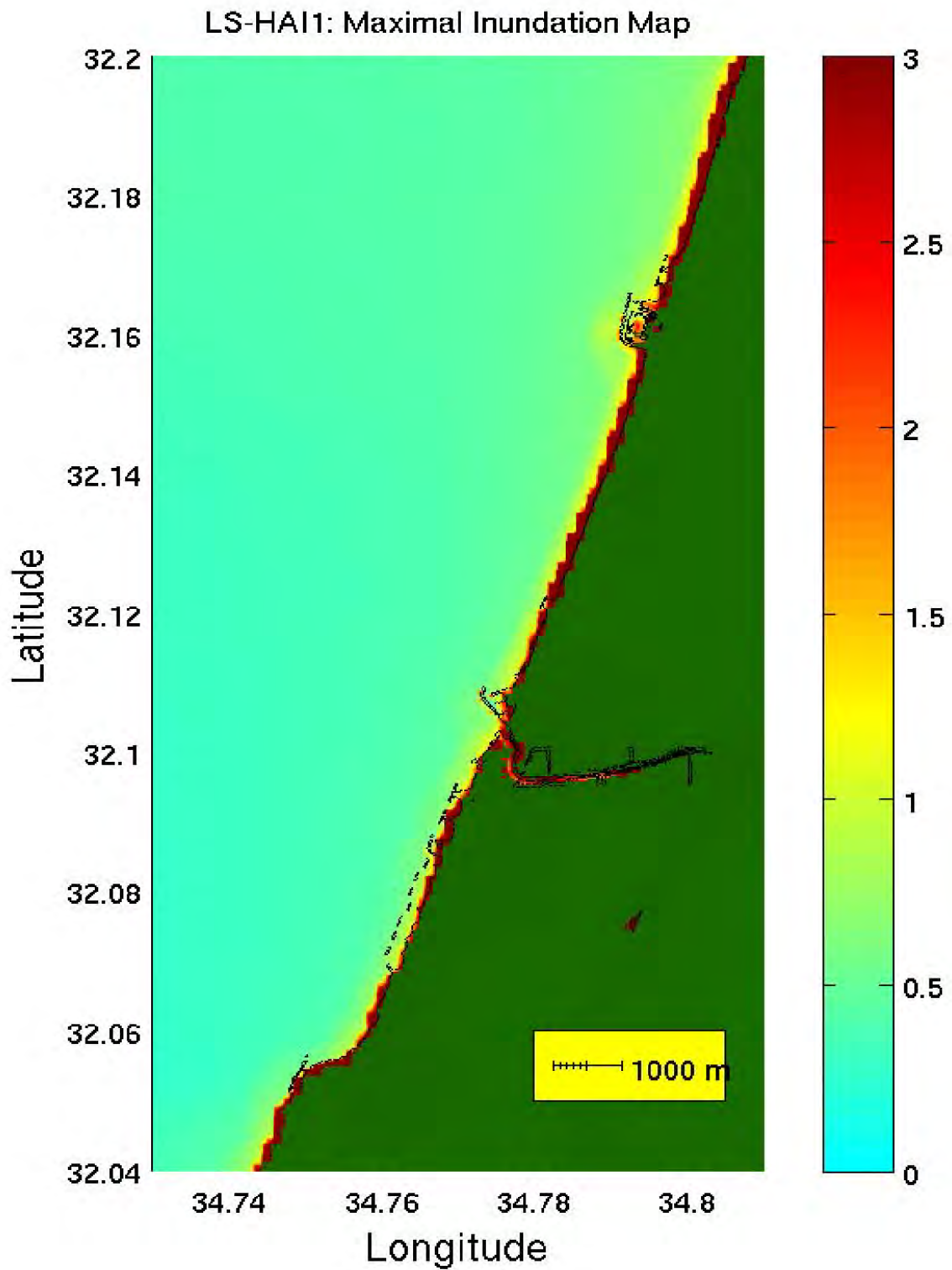
תמונה מס' 4

תרחיש LS-HAII, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, אזור מפרץ חיפה



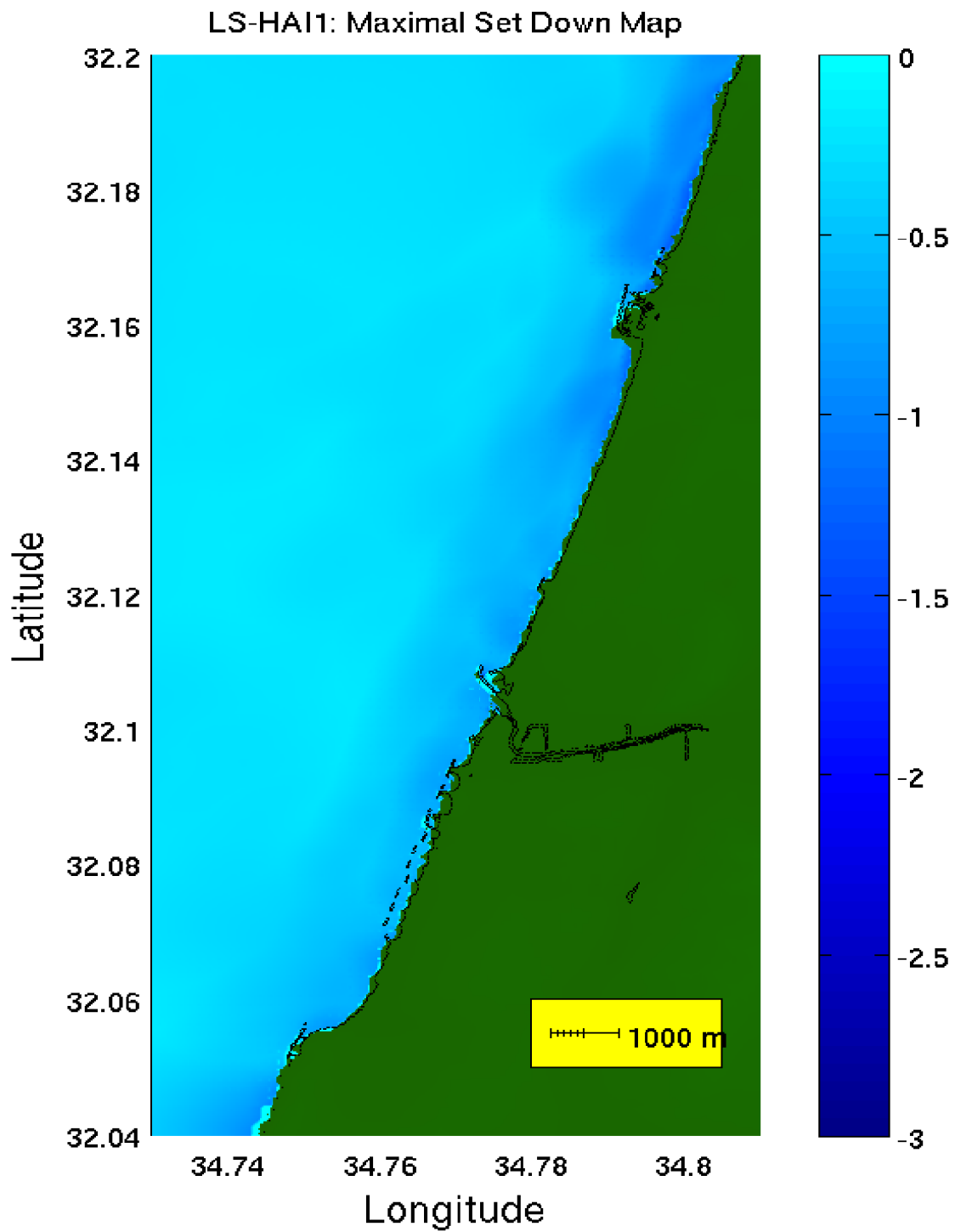
תמונה מס' 5

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני היסבאזור תל אביב



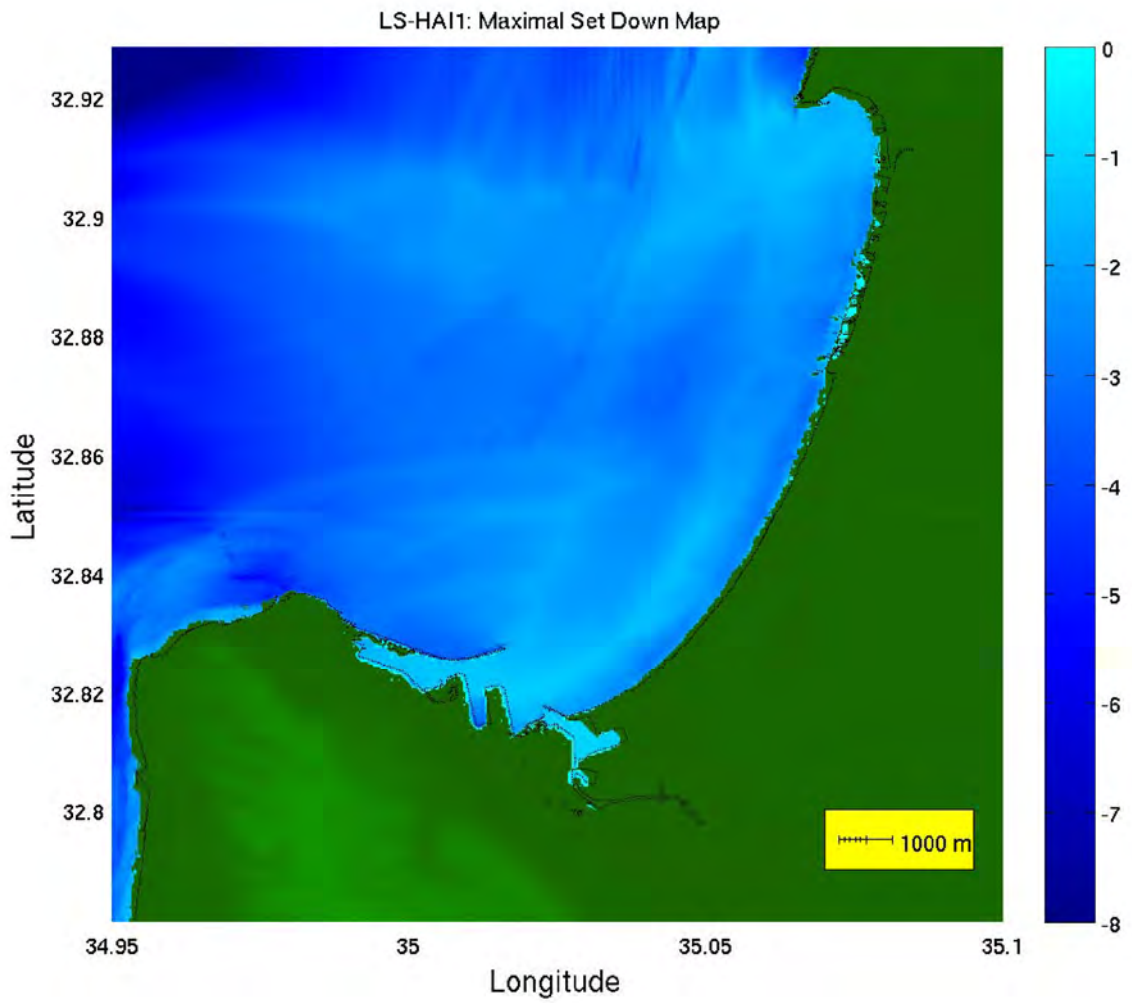
תמונה מס' 6

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



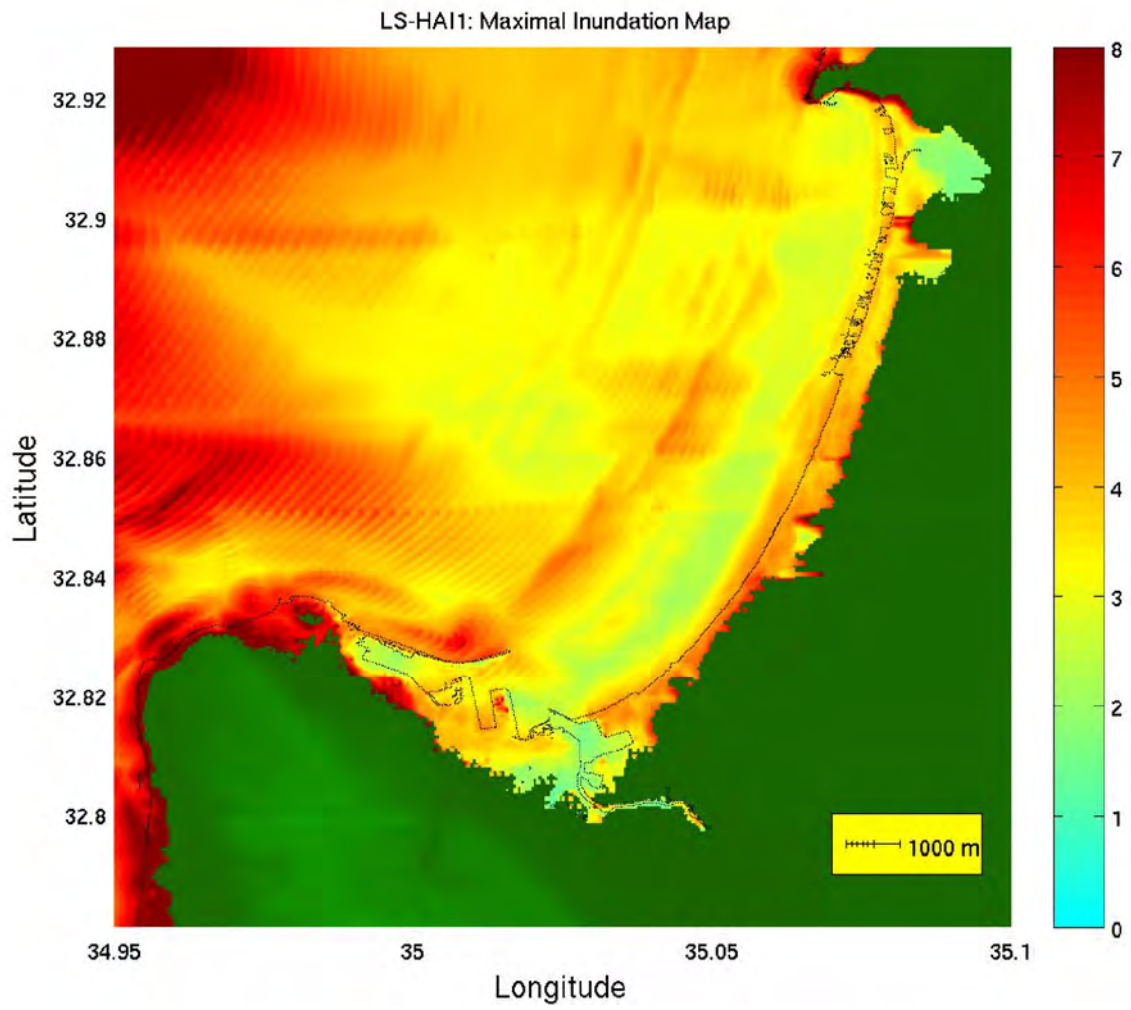
תמונה מס' 7

תרחיש LS-HA11, גלישה מול חיפה. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



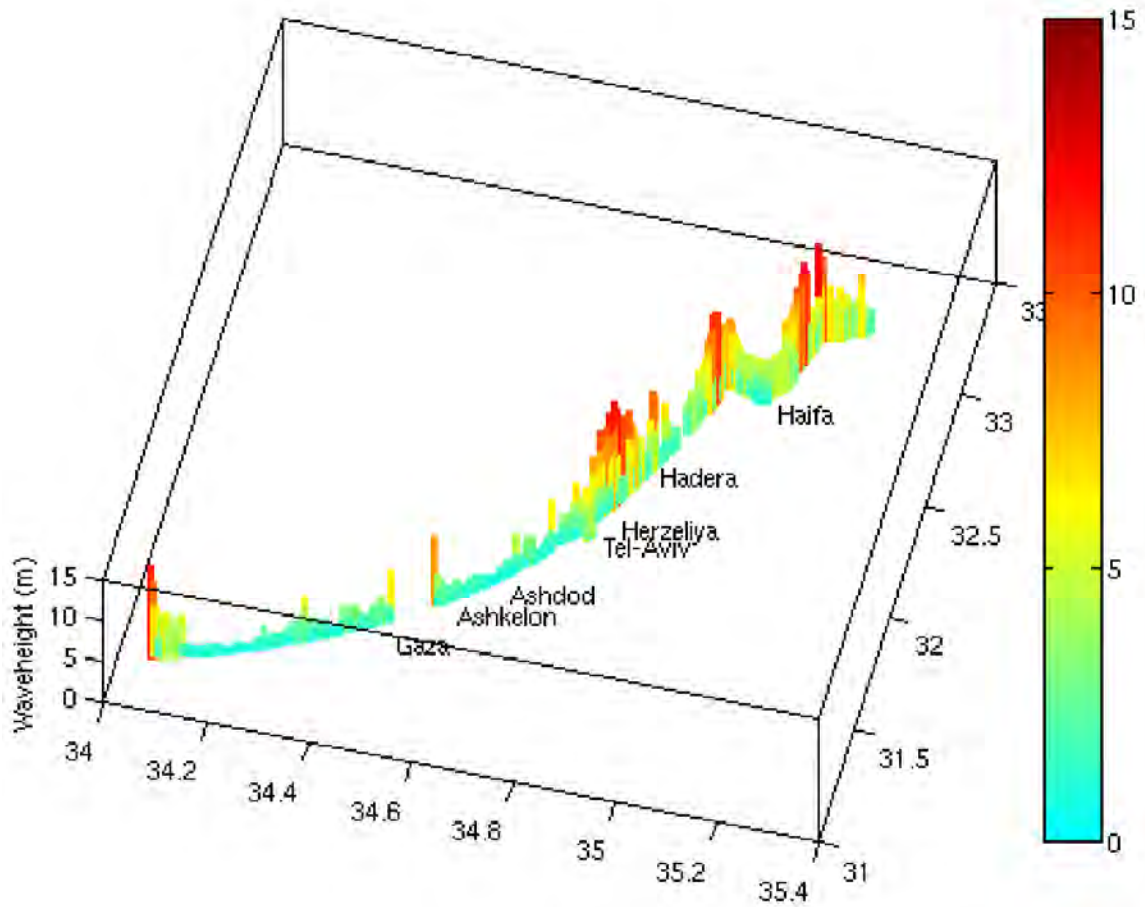
תמונה מס' 8

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



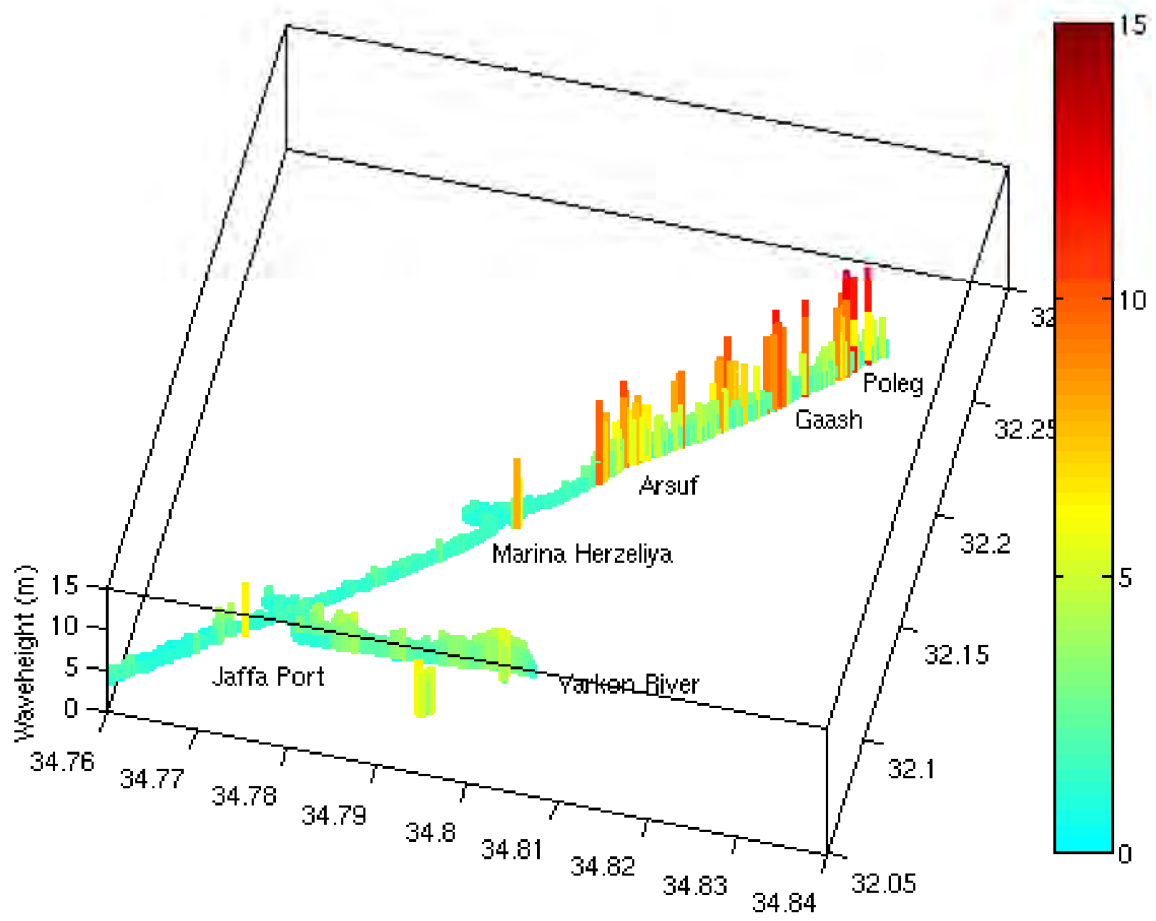
תמונה מס' 9

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



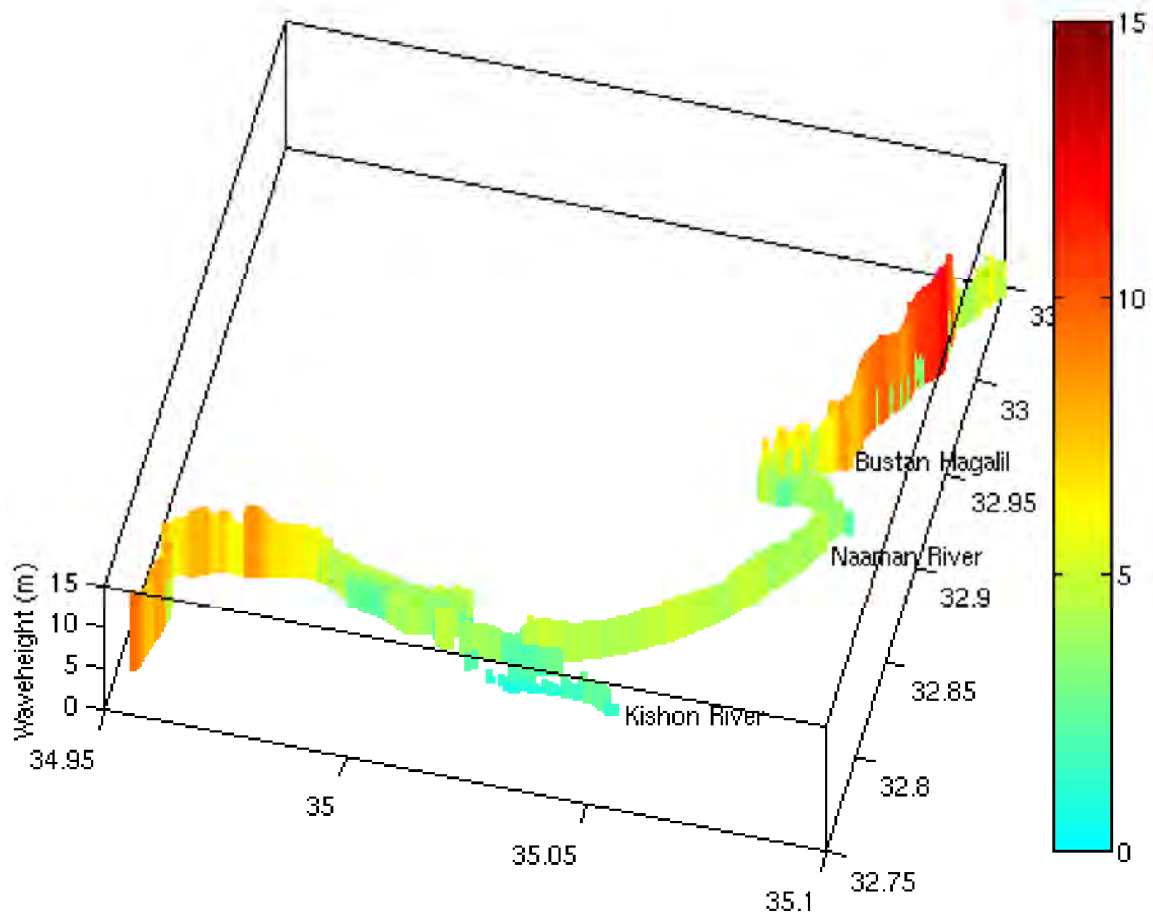
תמונה מס' 10

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז

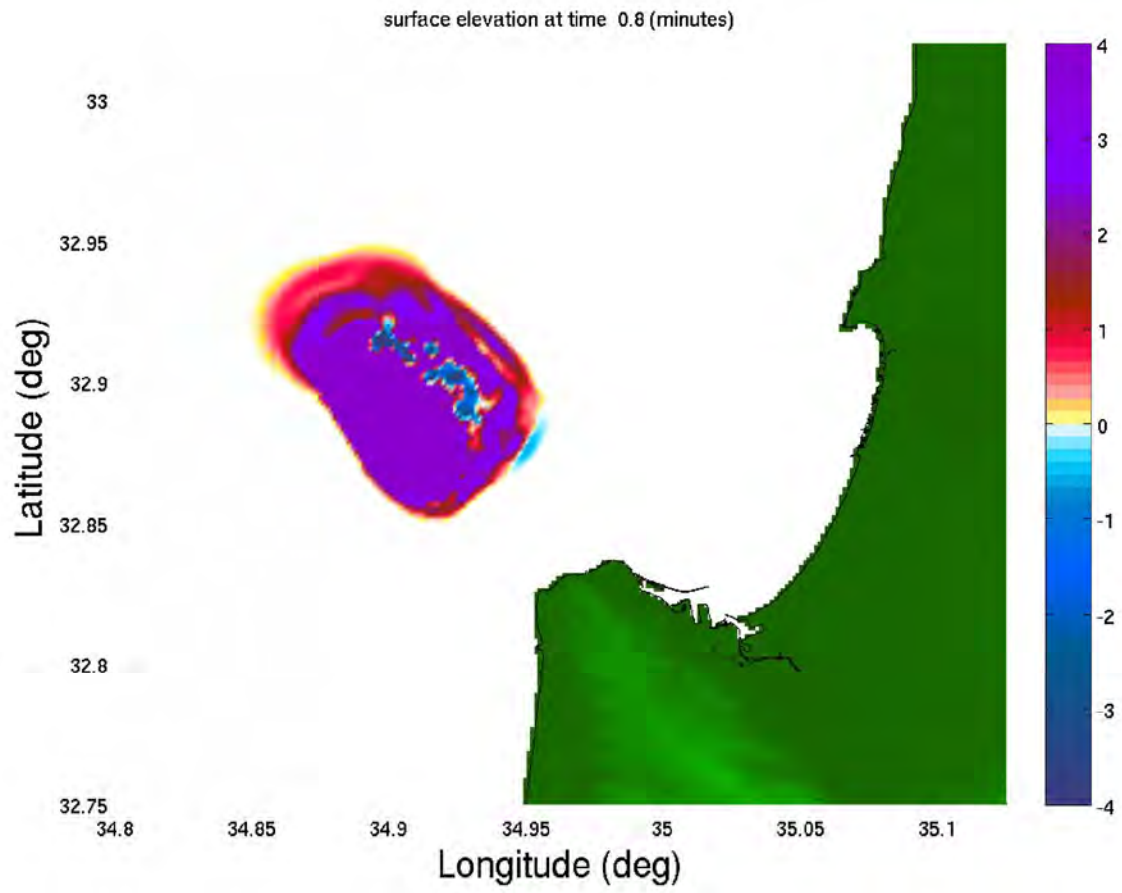


תמונה מס' 12

תרחיש LS-HAI1, גלישה מול חיפה. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

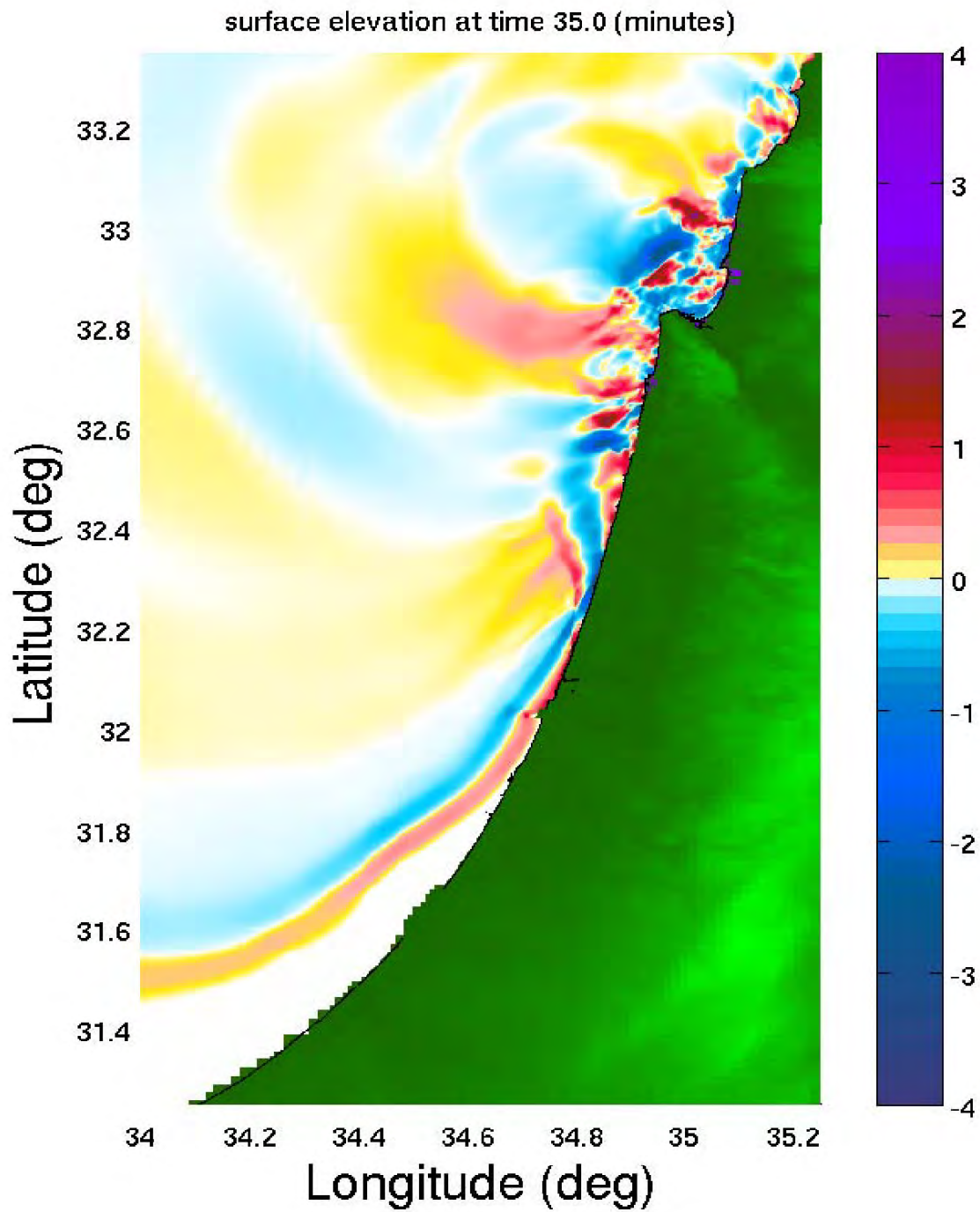
נספח 6

תוצאות תרחיש גלישה מול חיפה LS-HAI2



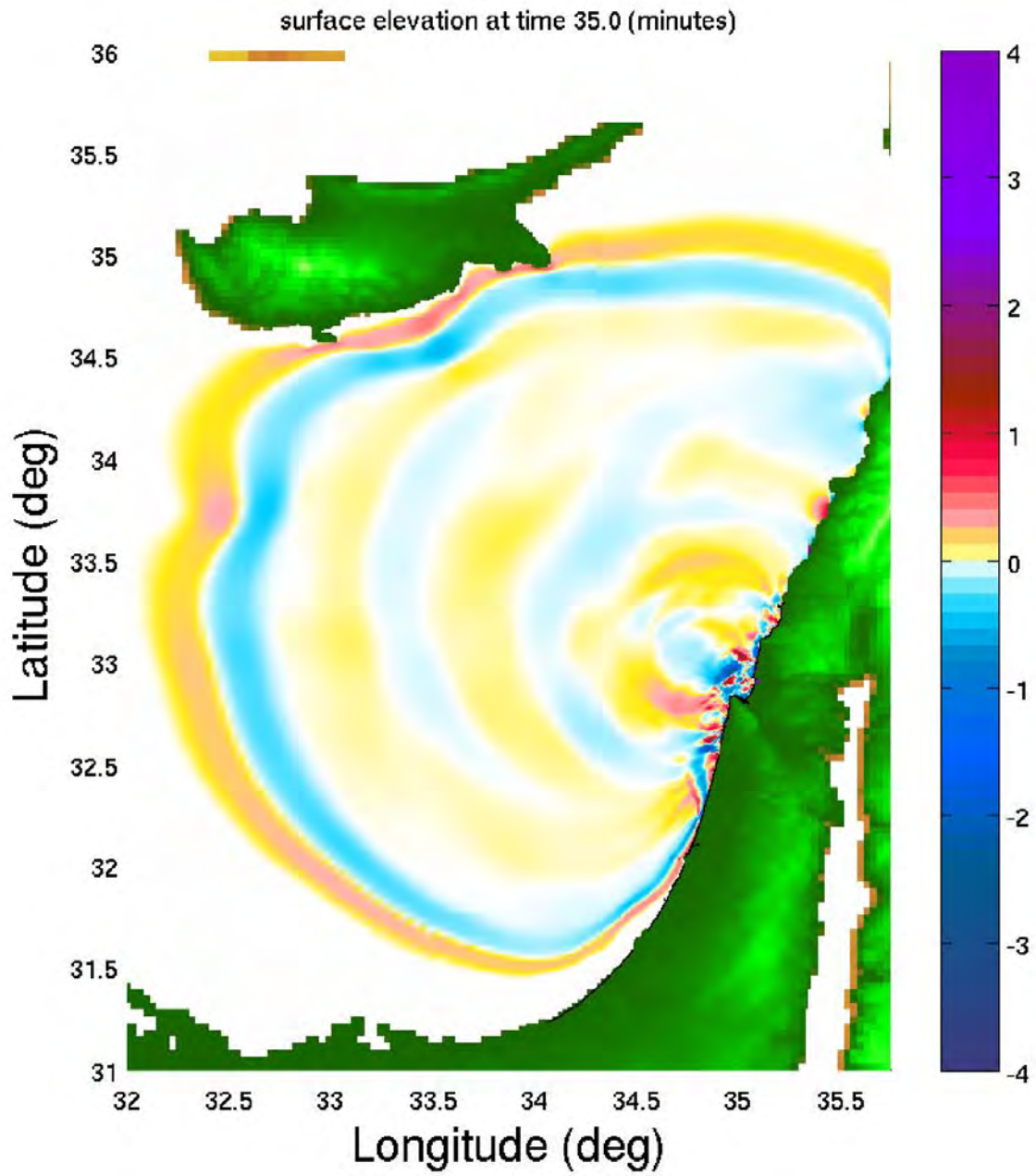
תמונה מס' 1

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור הגלישה



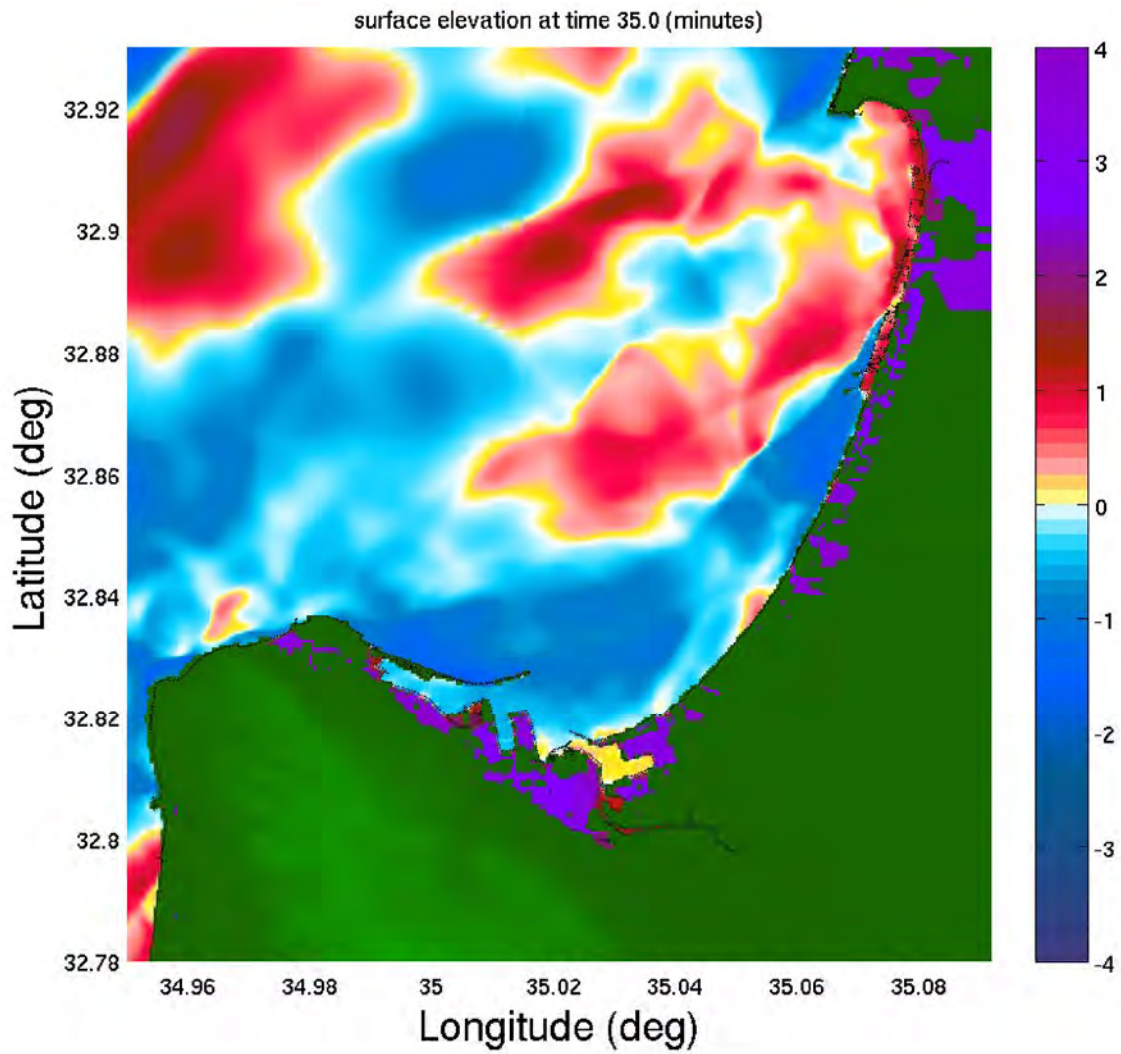
תמונה מס' 2

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלום בוק של שינוי רום פני הים
מבט על אזור החוף הישראלי



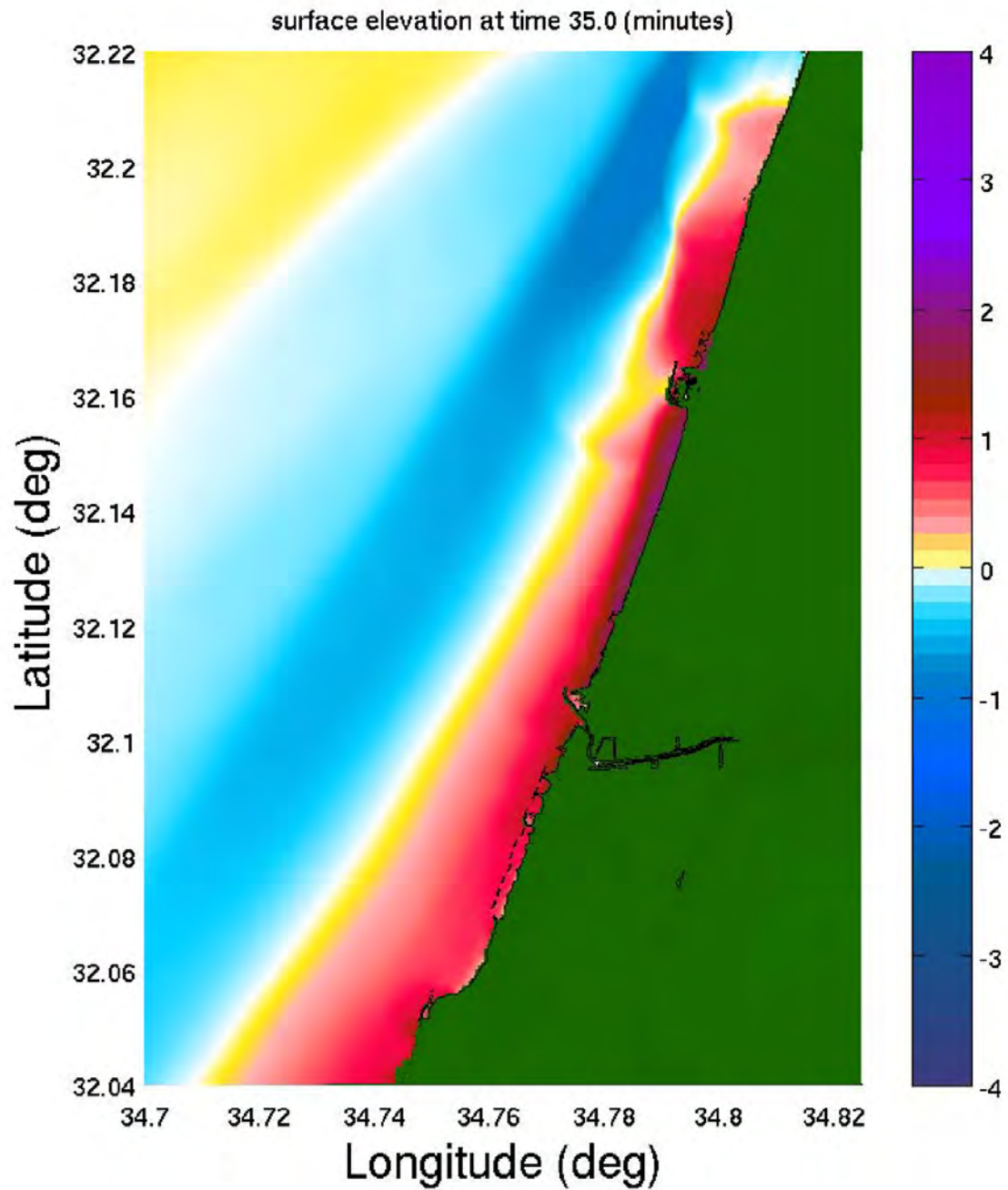
תמונה מס' 3

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלום בוק של שינוי רום פני הים מבט על אזור האגן המזרחי של הים התיכון



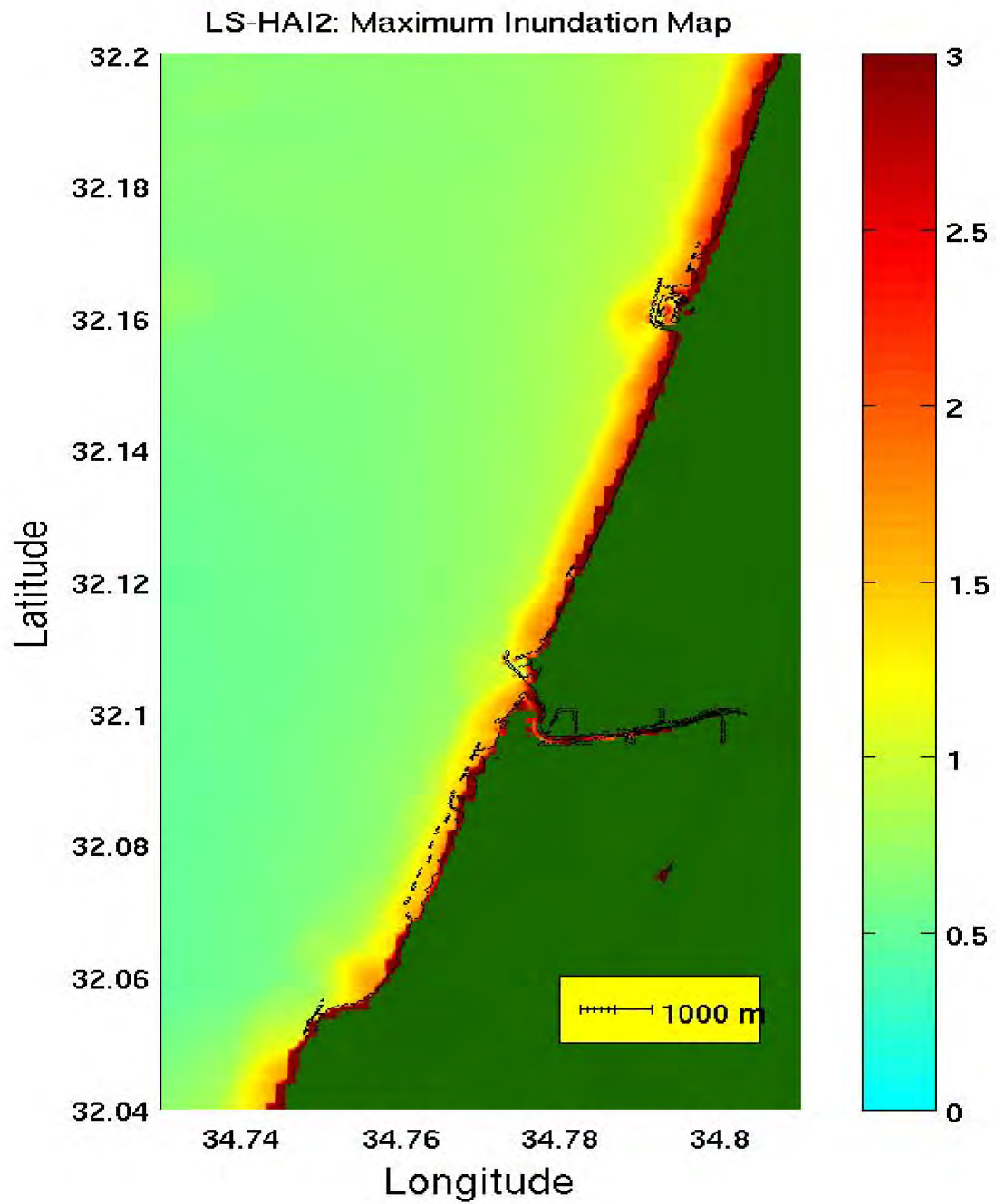
תמונה מס' 4

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים, אזור מפרץ חיפה



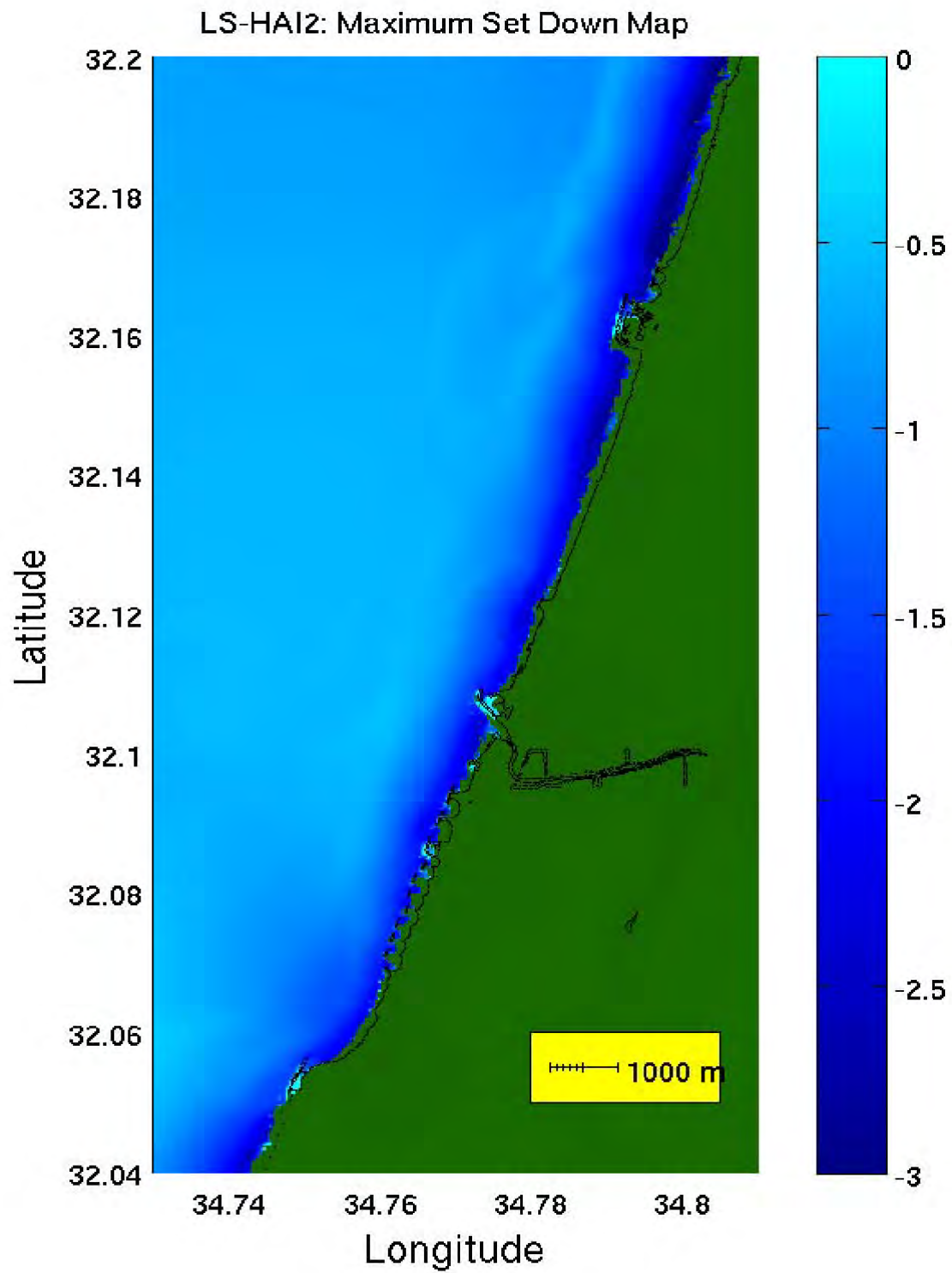
תמונה מס' 5

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור תל אביב



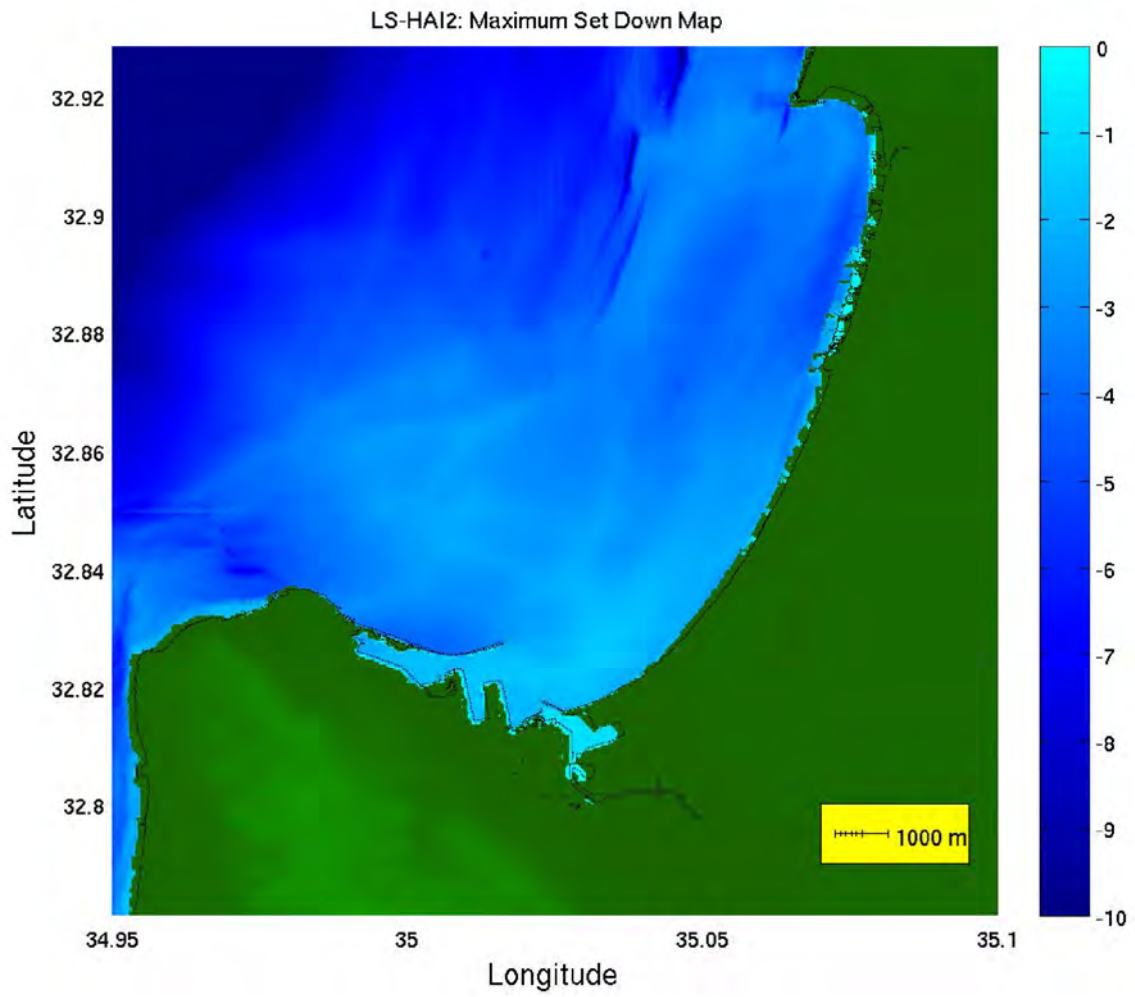
תמונה מס' 6

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



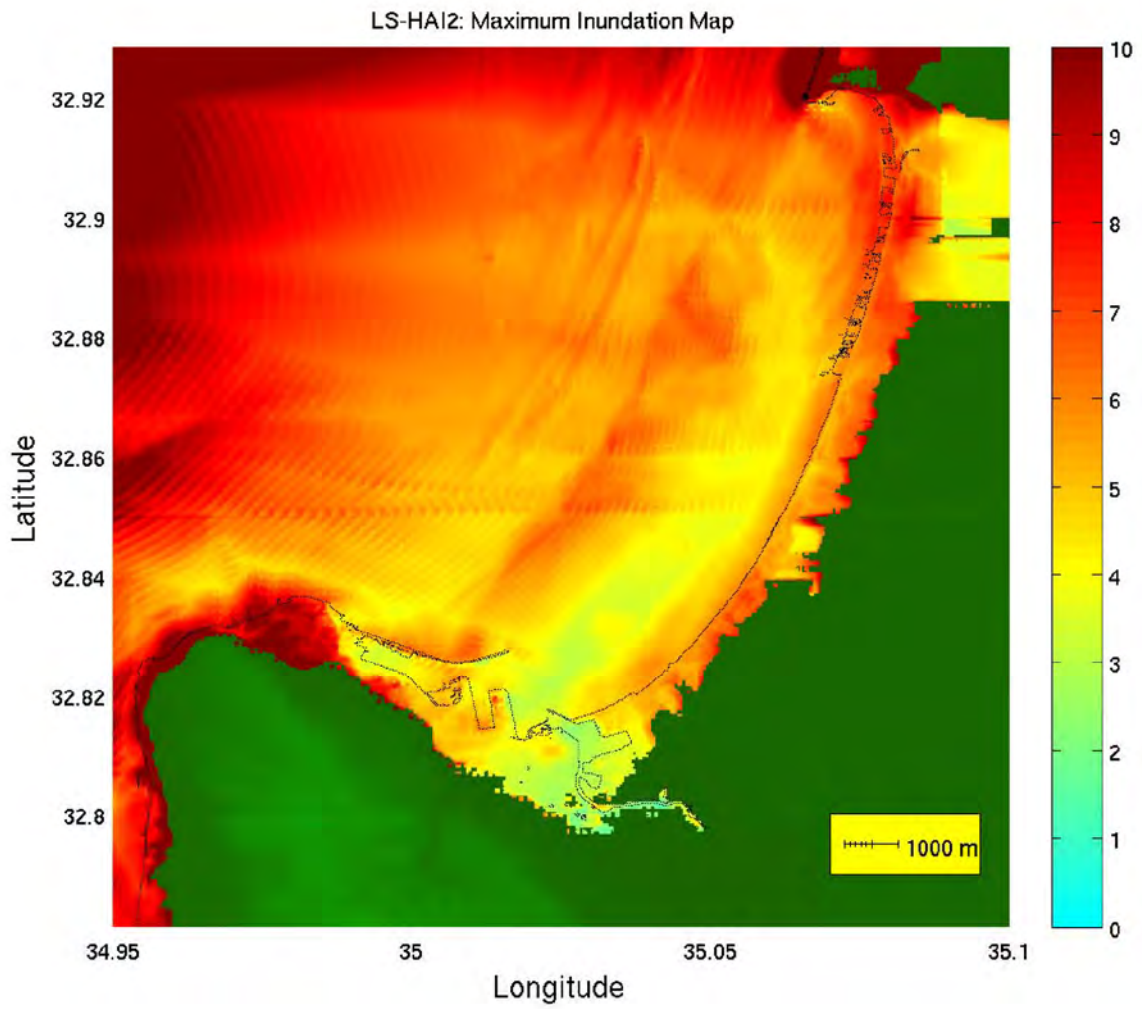
תמונה מס' 7

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



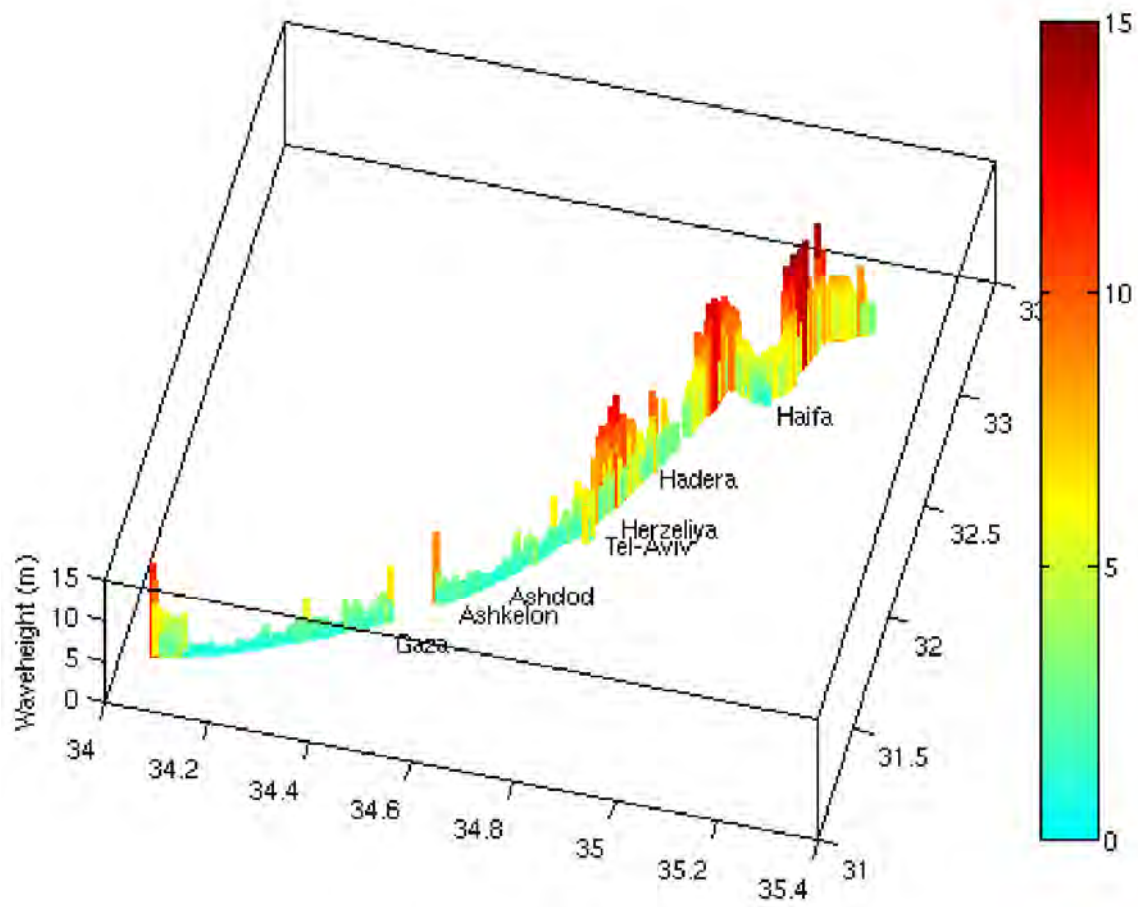
תמונה מס' 8

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



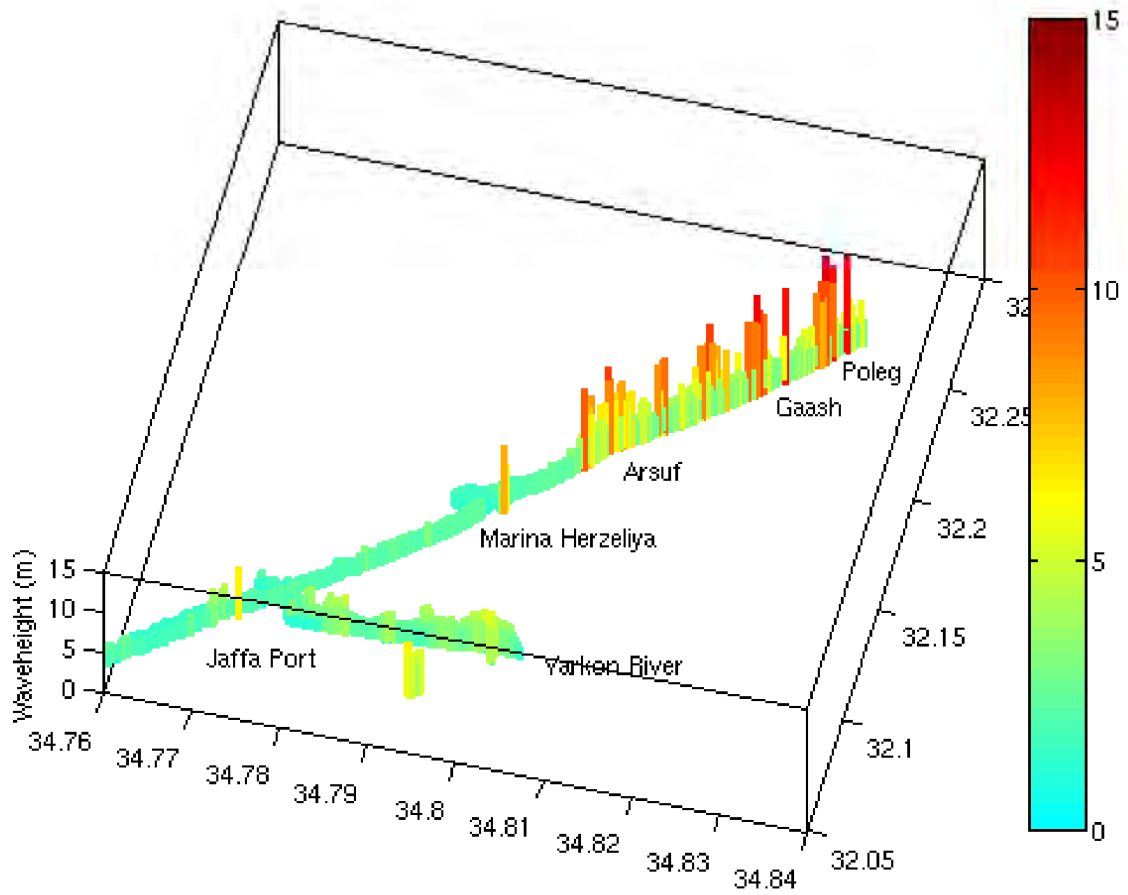
תמונה מס' 9

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



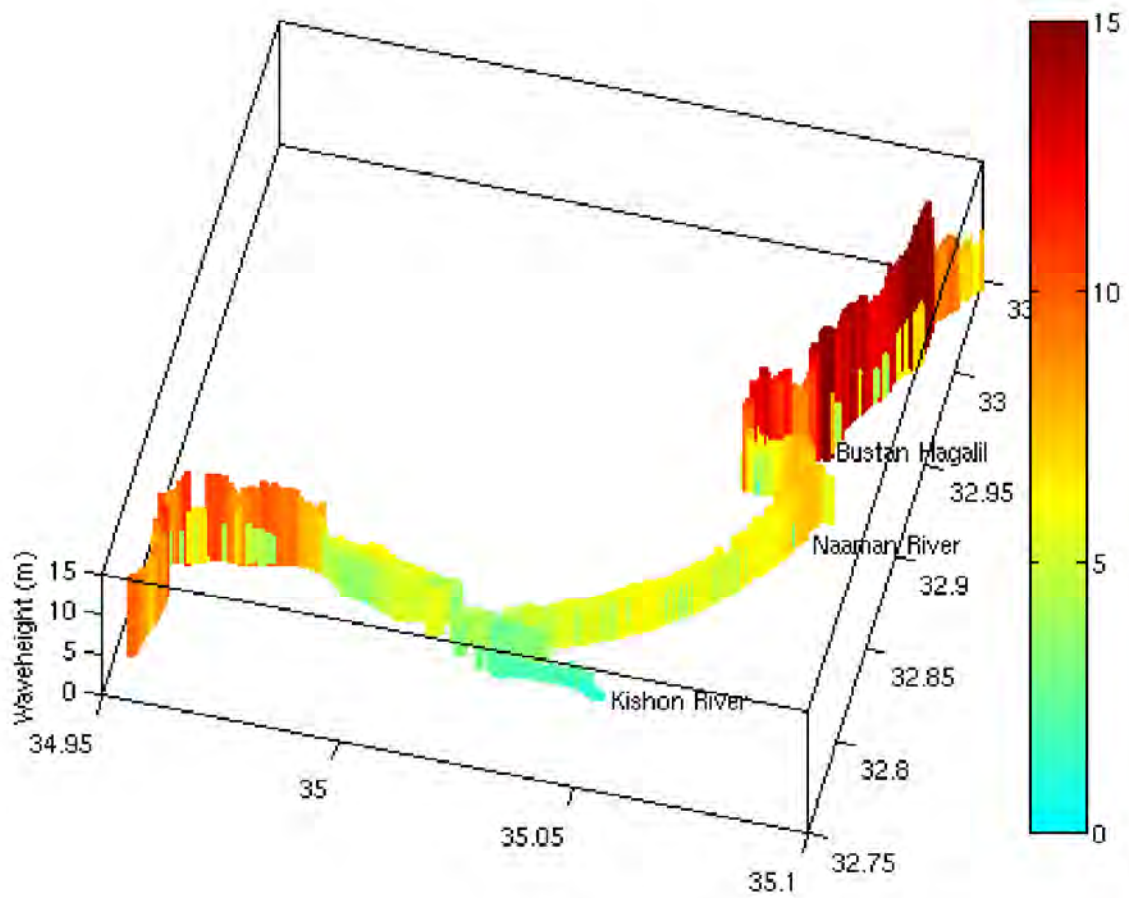
תמונה מס' 10

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז



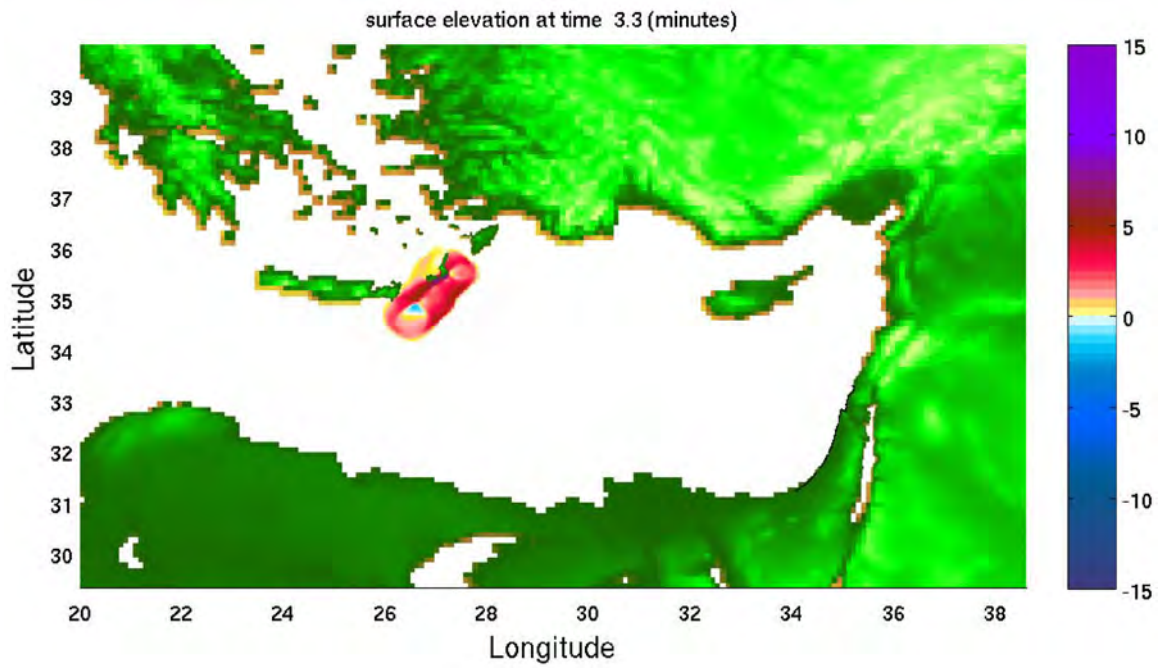
תמונה מס' 12

תרחיש LS-HAI2, גלישה מול חיפה. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

נספח 7

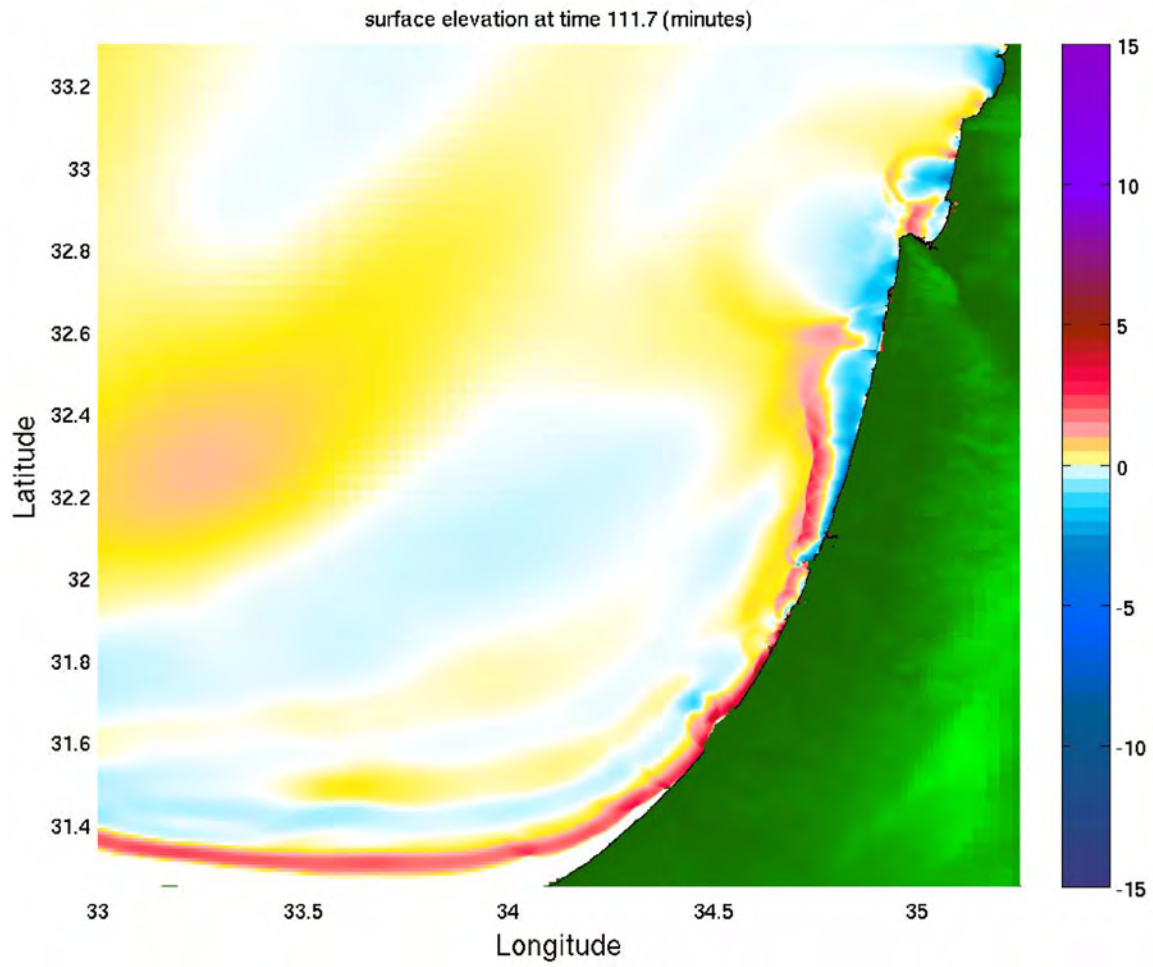
תוצאות רעידת אדמה מול כרתים EQ-CRETE-1

לאזור מפרץ חיפה, אזור המרכז ונחל הירקון



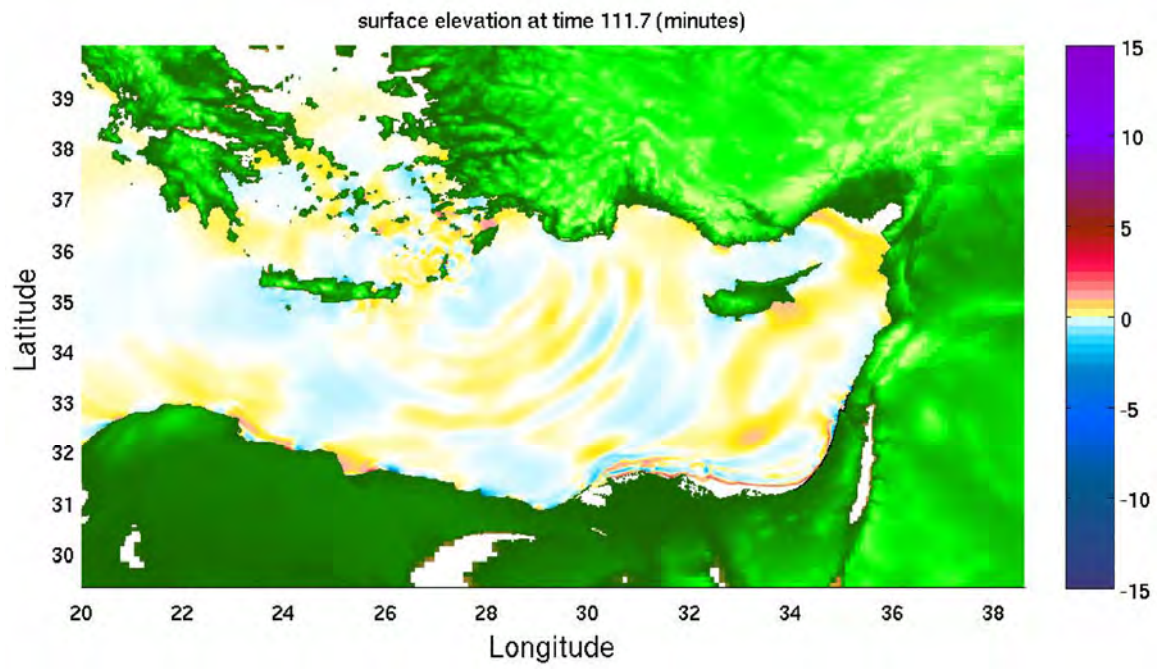
תמונה מס' 1

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור האירוע



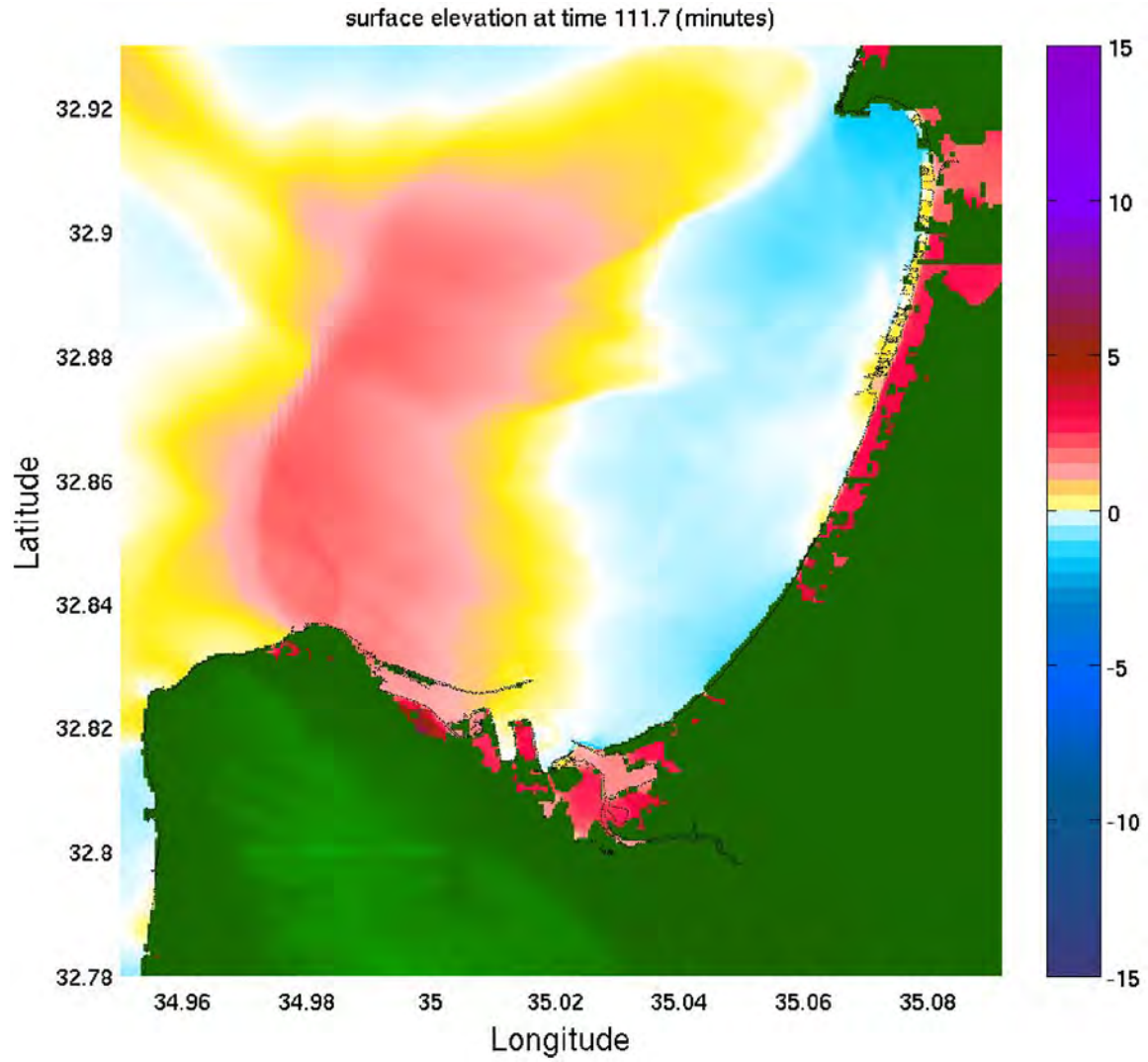
תמונה מס' 2

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור החוף הישראלי



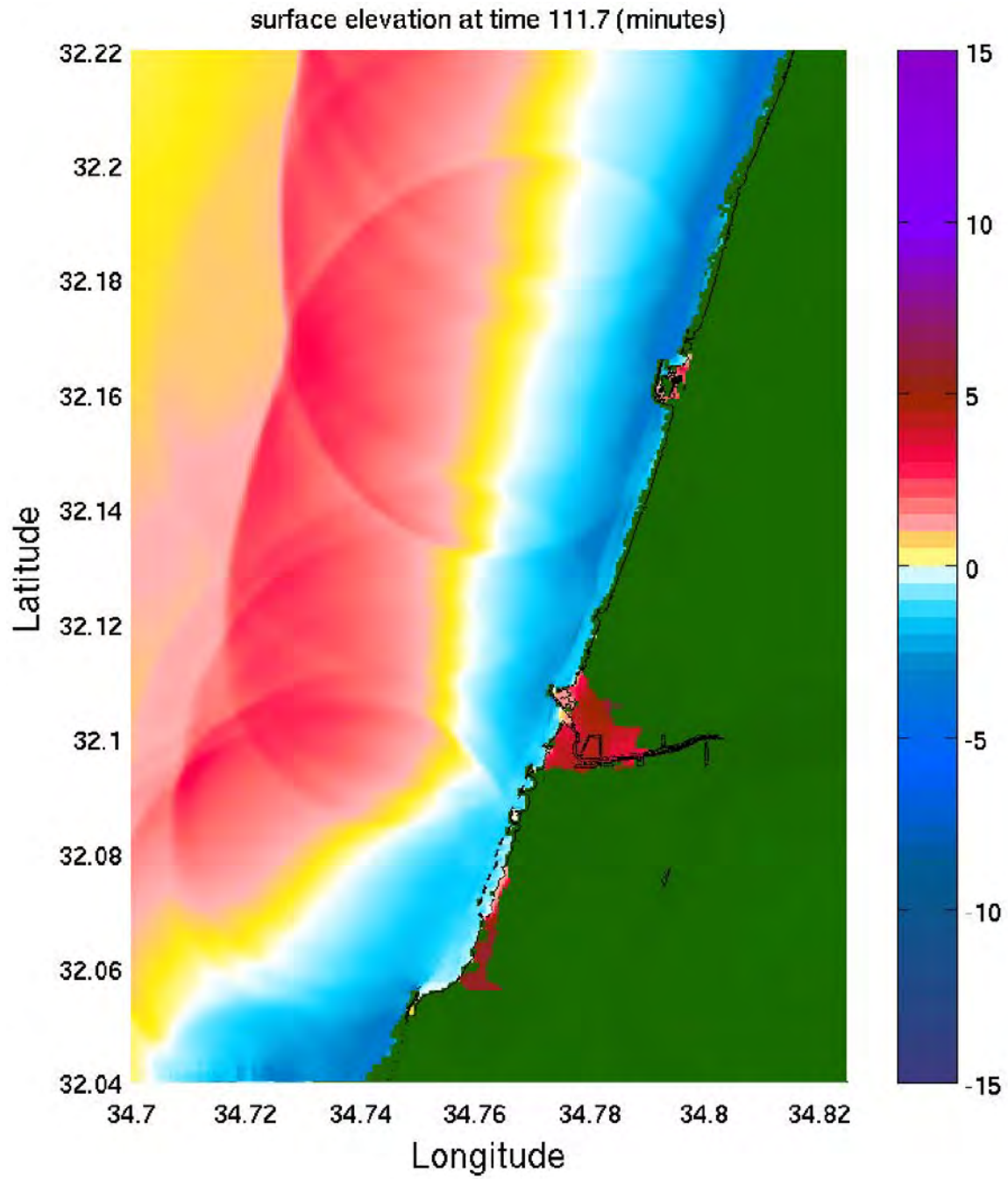
תמונה מס' 3

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור האגן המזרחי של ים התיכון



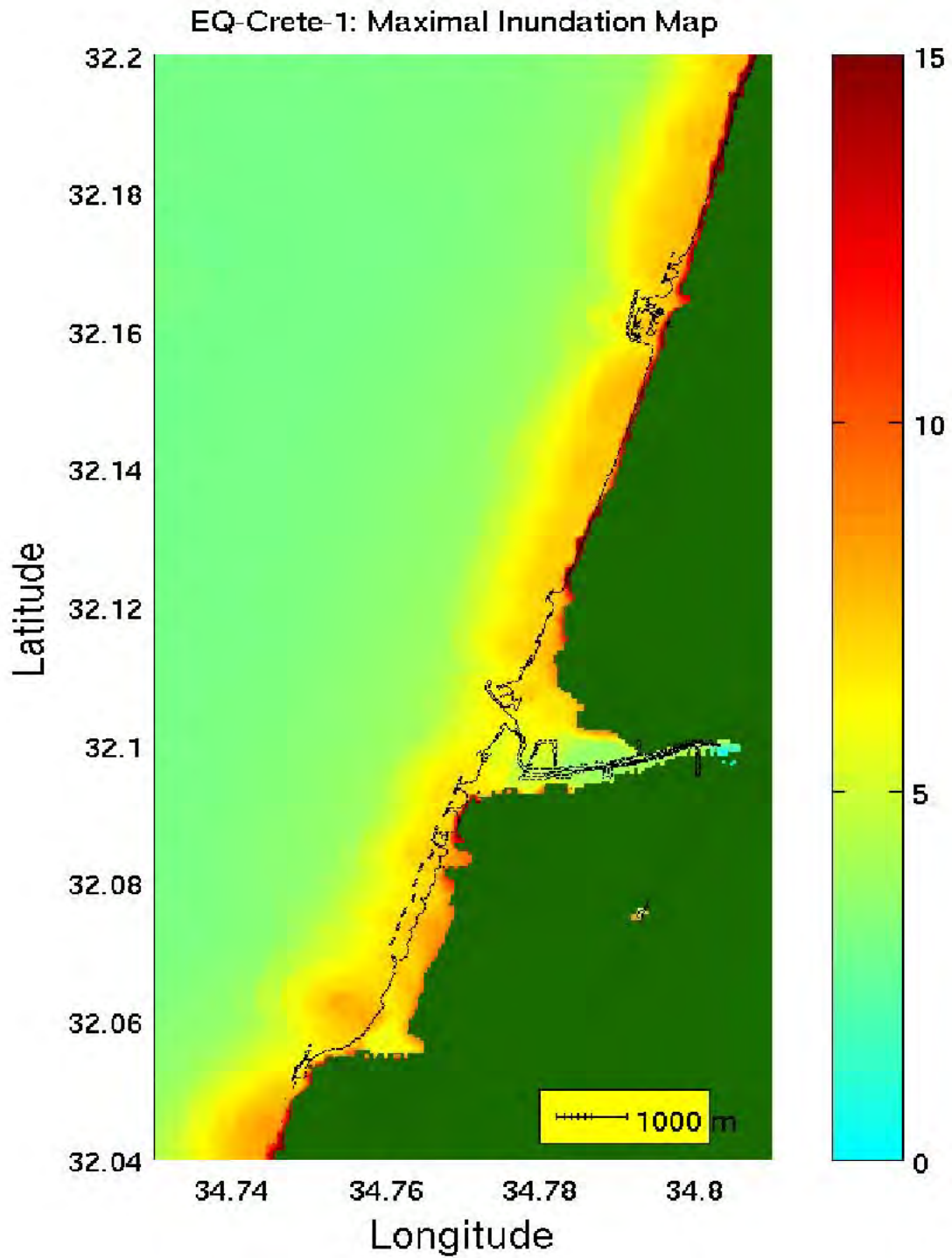
תמונה מס' 4

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור מפרץ חיפה



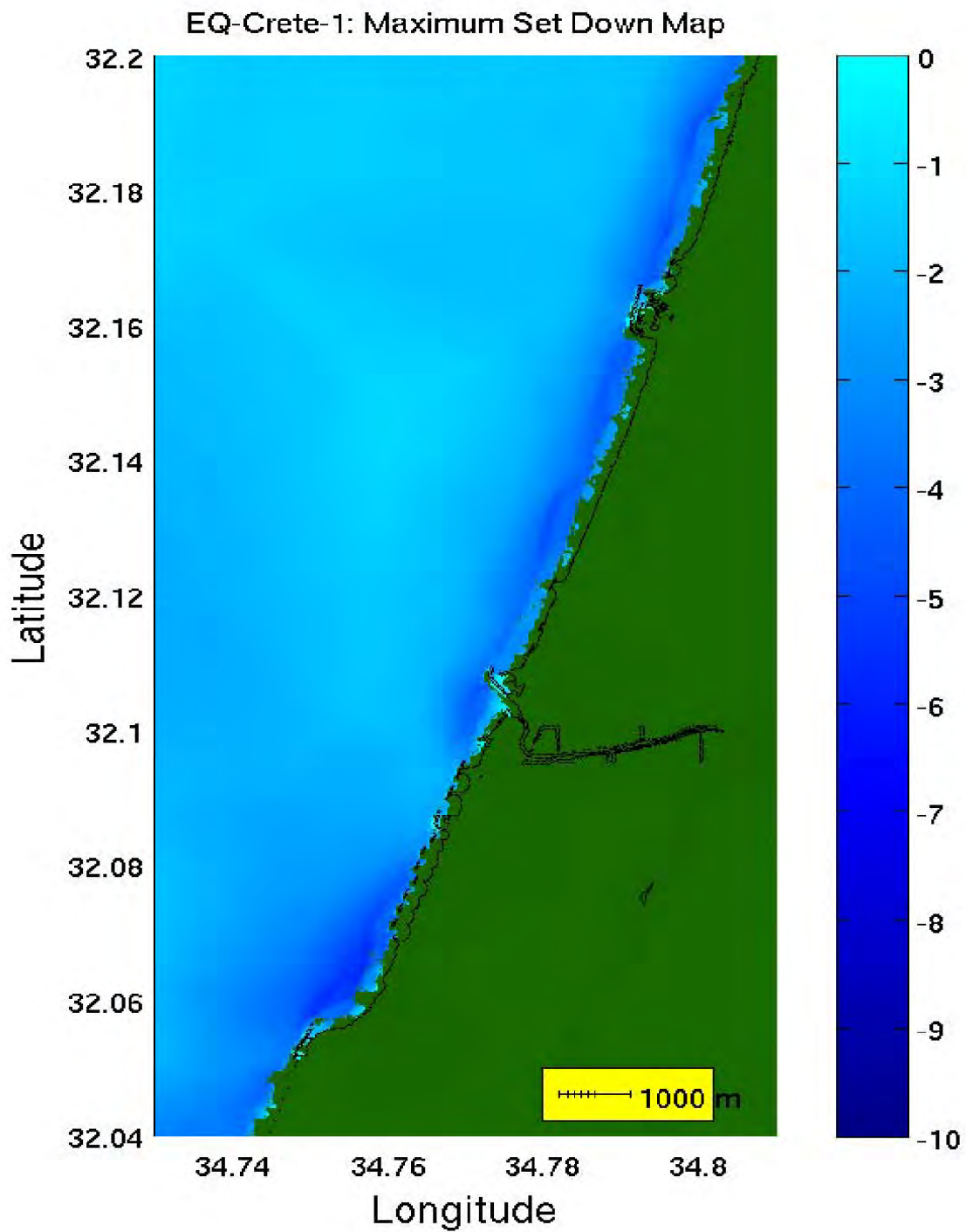
תמונה מס' 5

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור תל אביב



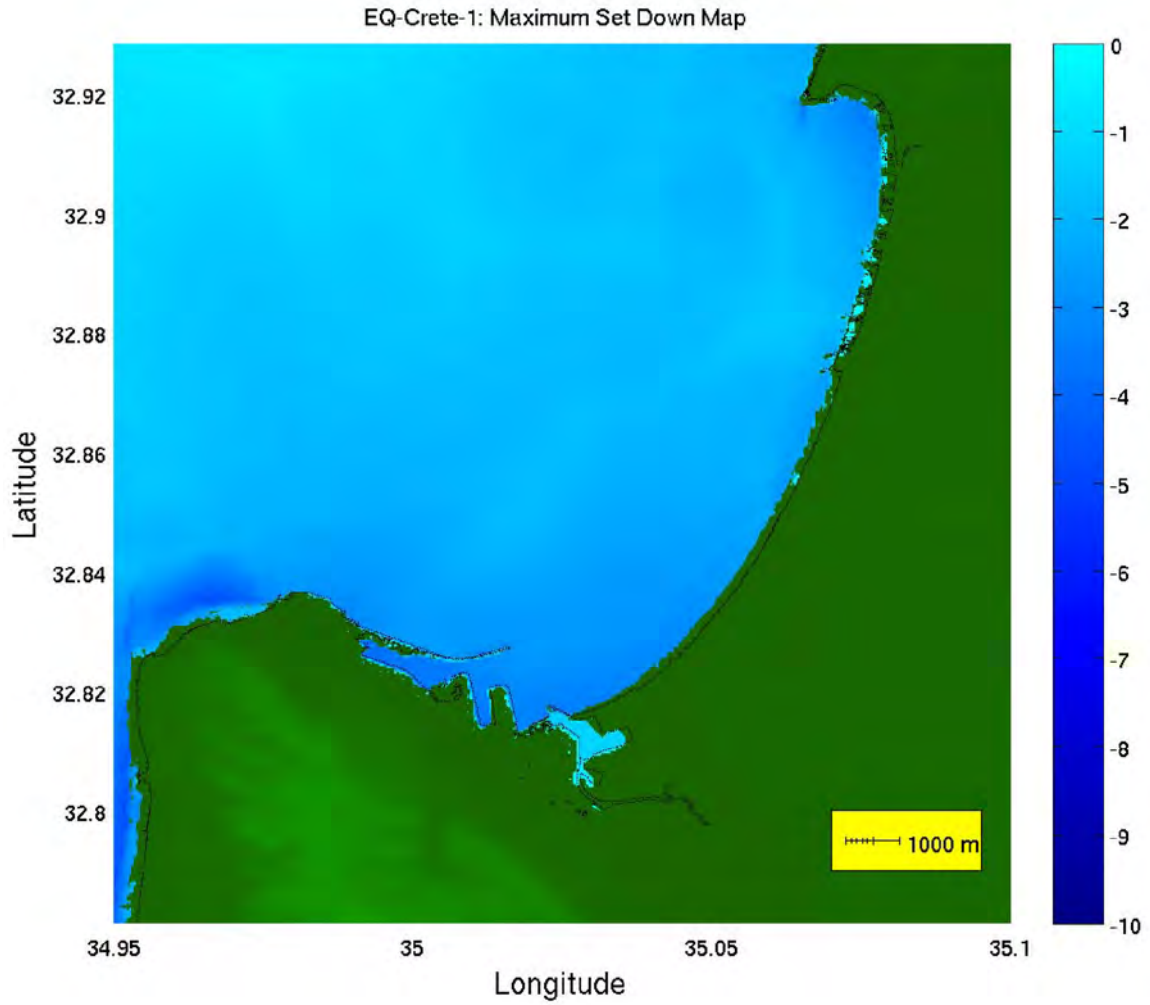
תמונה מס' 6

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



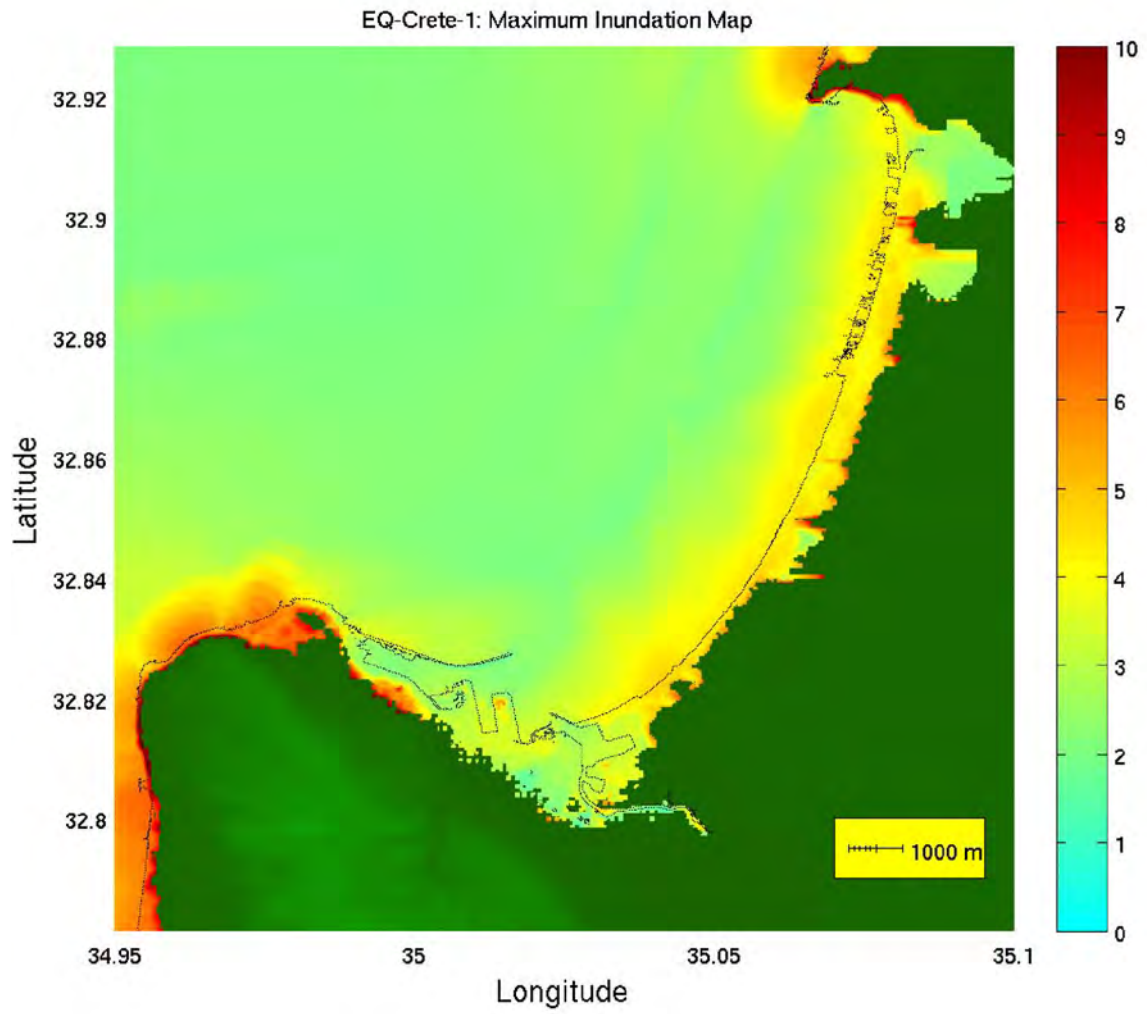
תמונה מס' 7

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



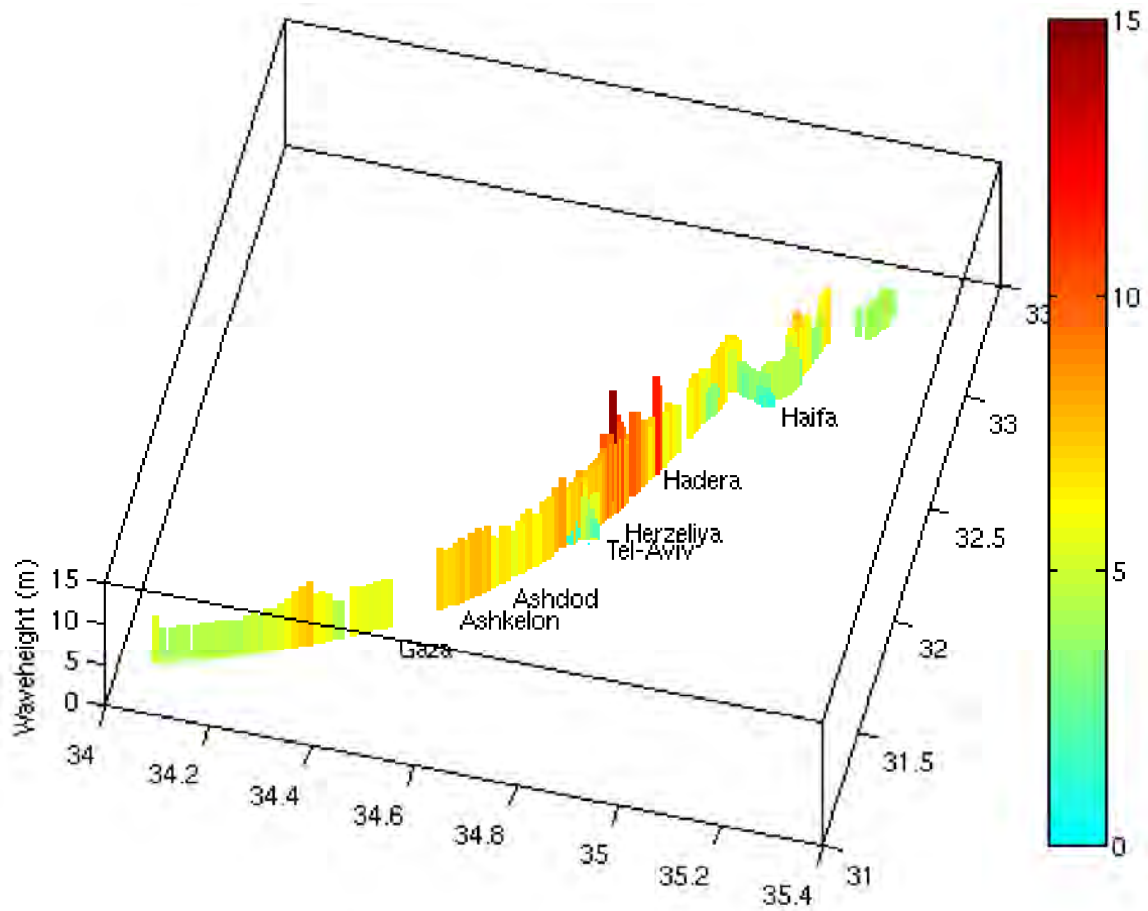
תמונה מס' 8

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



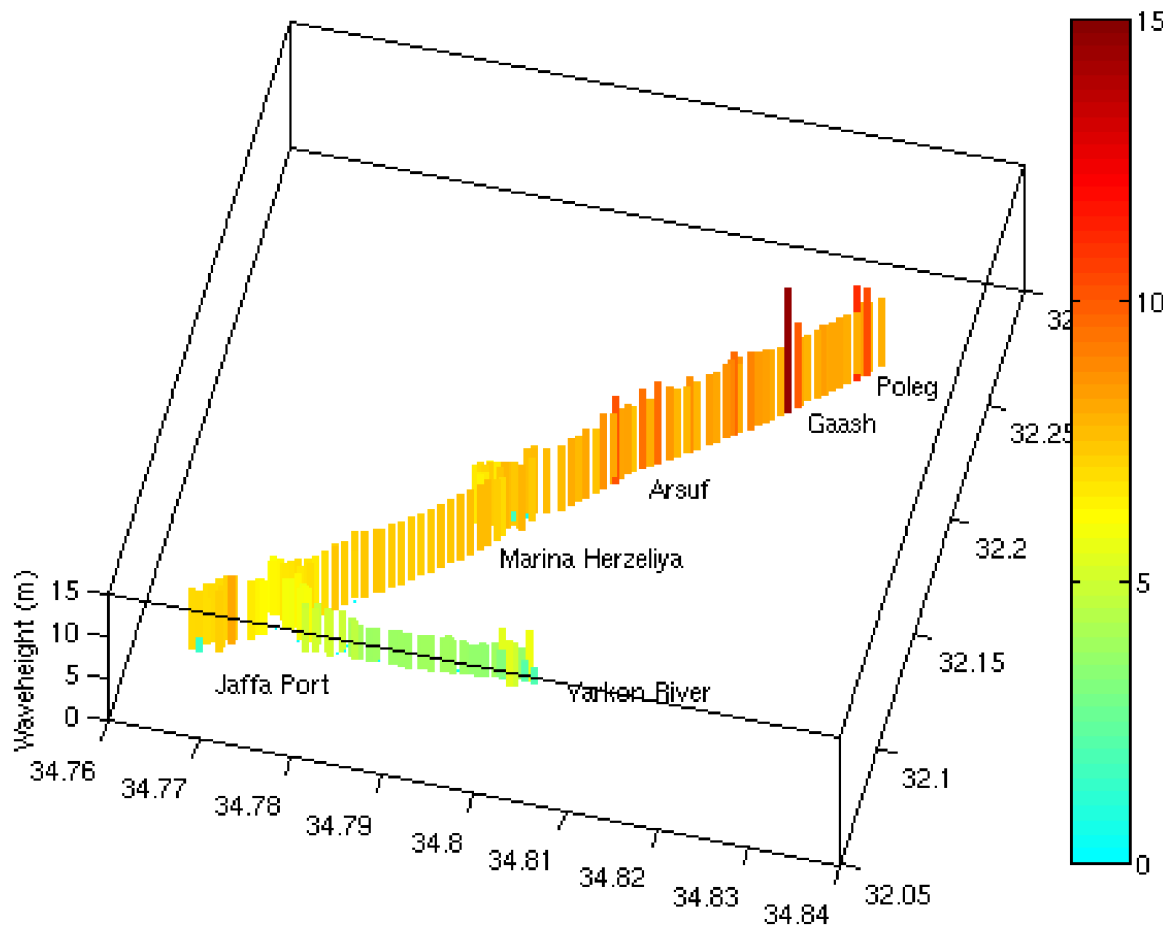
תמונה מס' 9

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



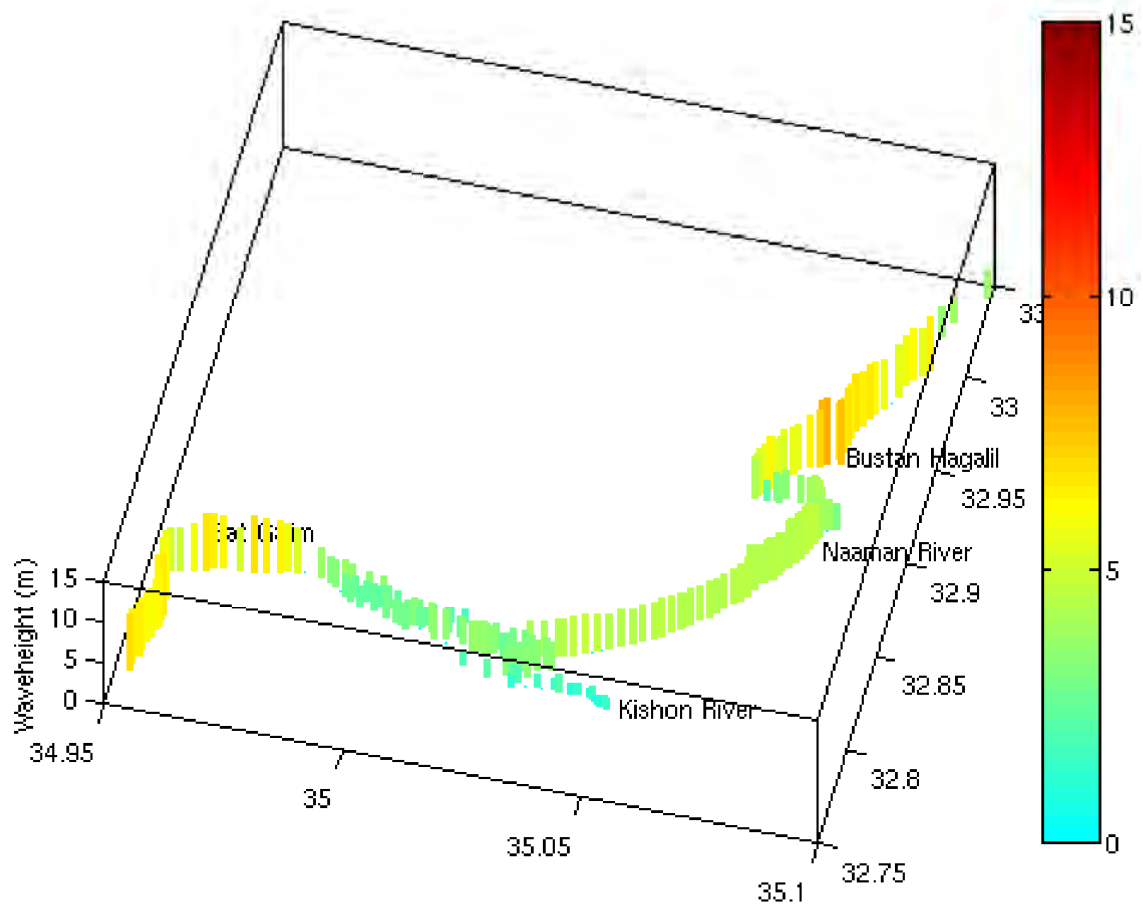
תמונה מס' 10

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז

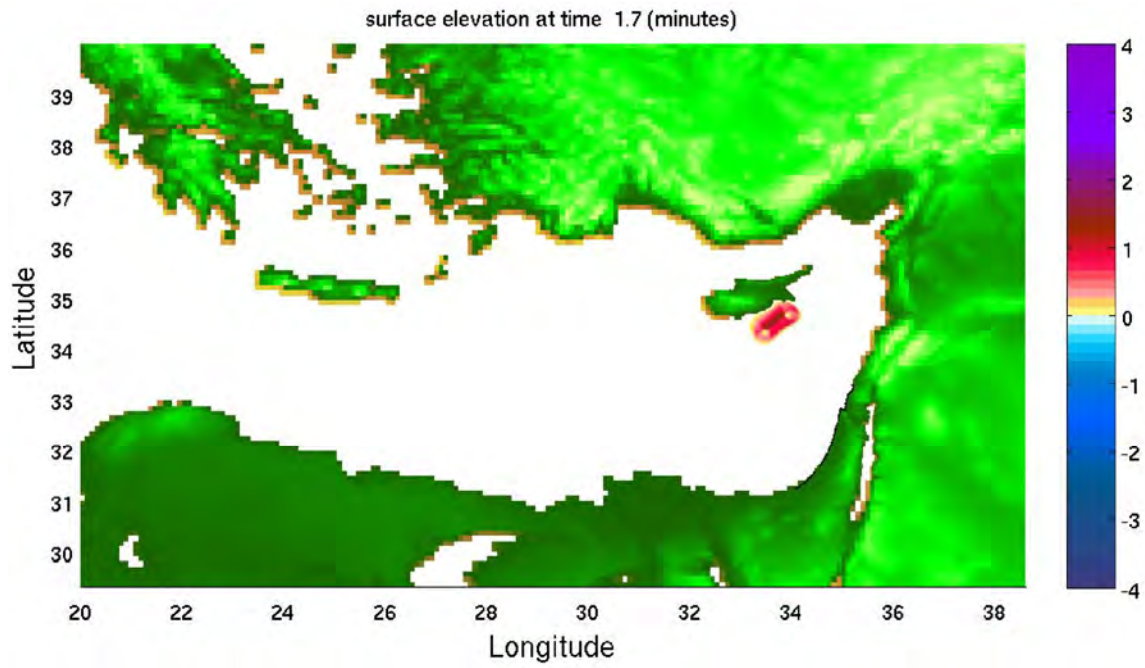


תמונה מס' 12

תרחיש EQ-CRETE-1, רעידת אדמה ליד כרתים. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

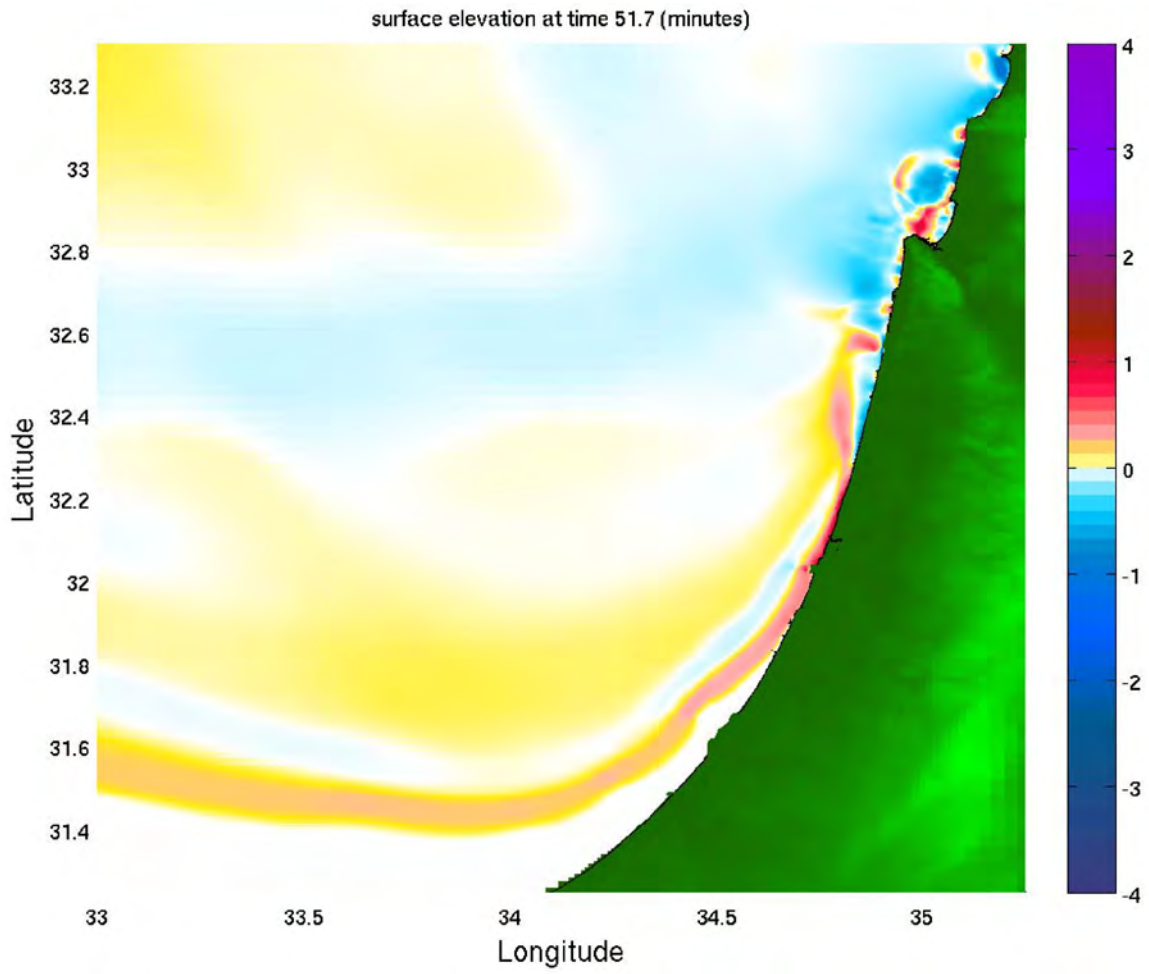
נספח 8

**תוצאות רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-1
לאזור מפרץ חיפה, אזור המרכז ונחל הירקון**



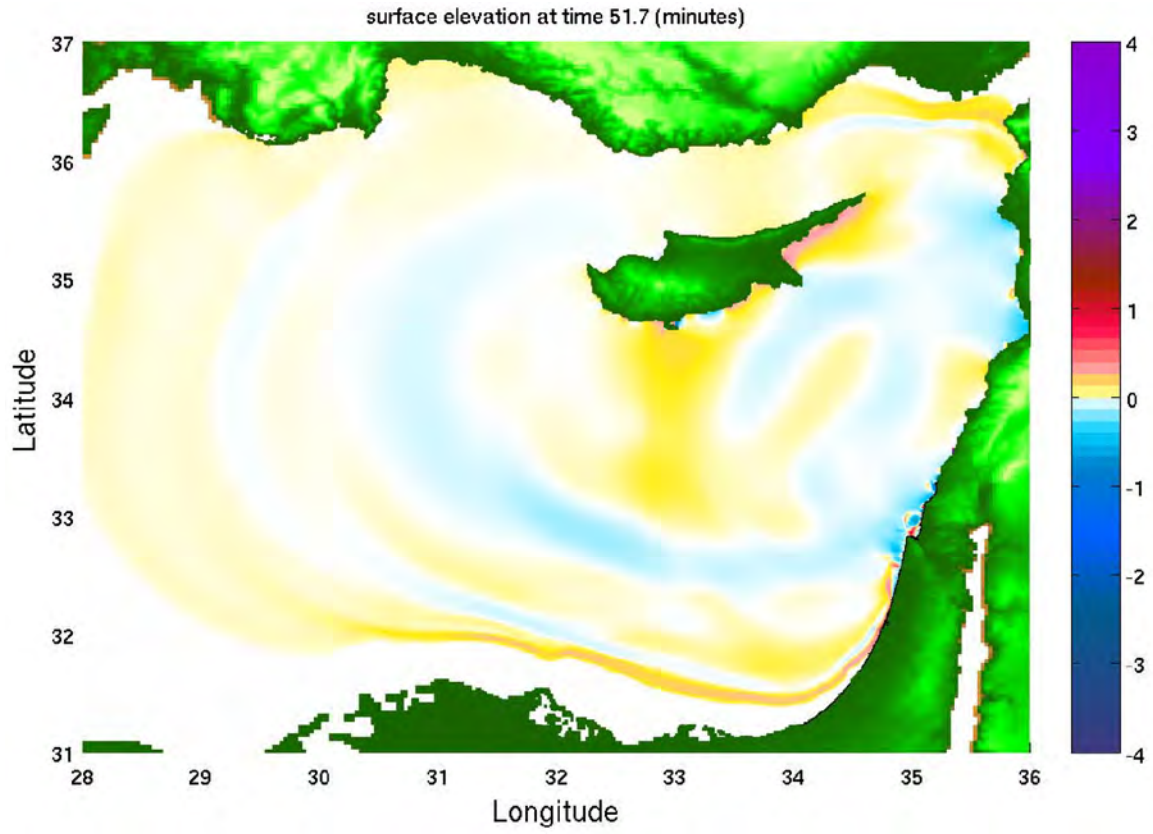
תמונה מס' 1

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בוק של שינוי רום פני הים באזור האירוע



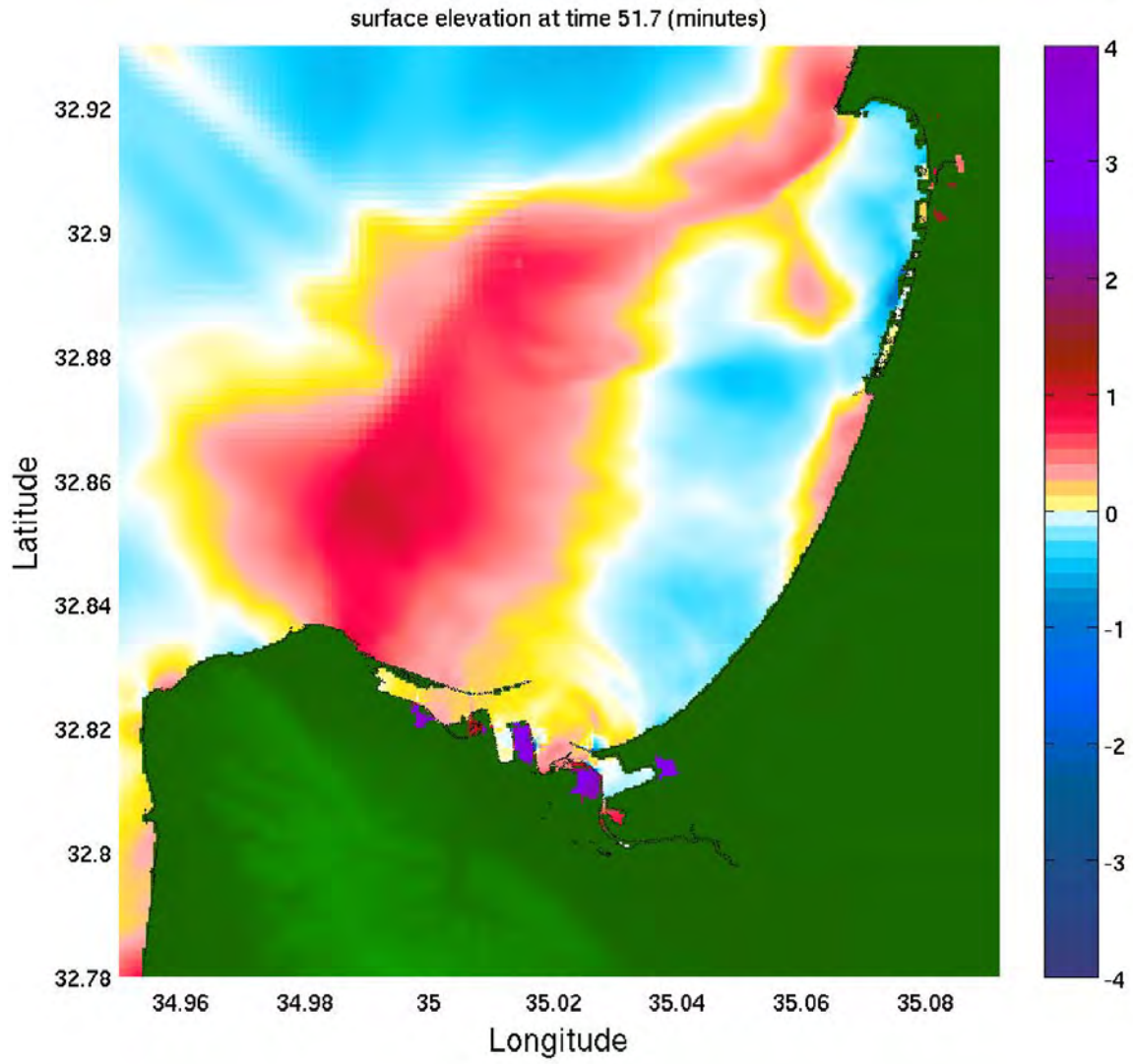
תמונה מס' 2

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור החוף הישראלי



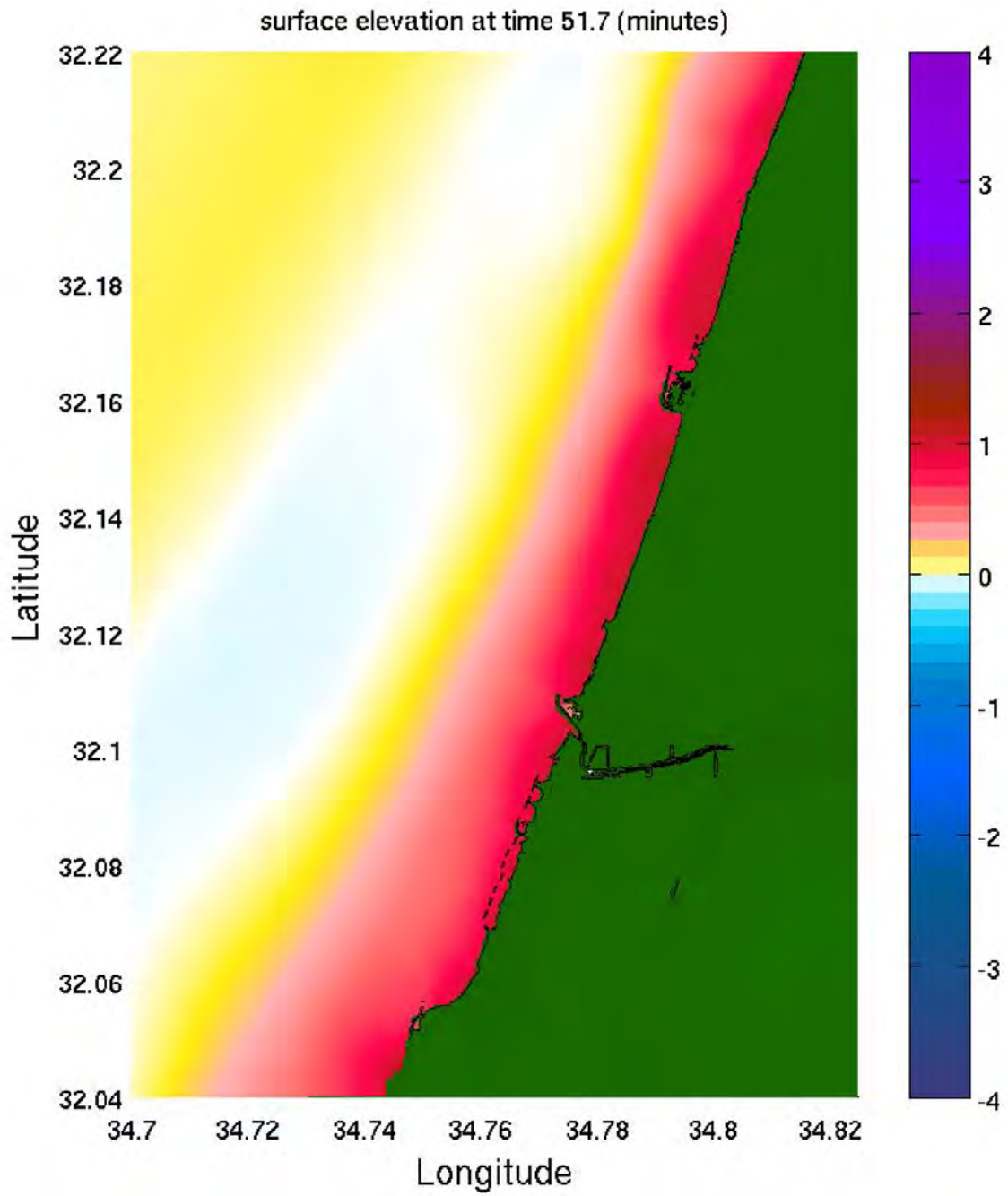
תמונה מס' 3

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור האגן המזרחי של ים התיכון



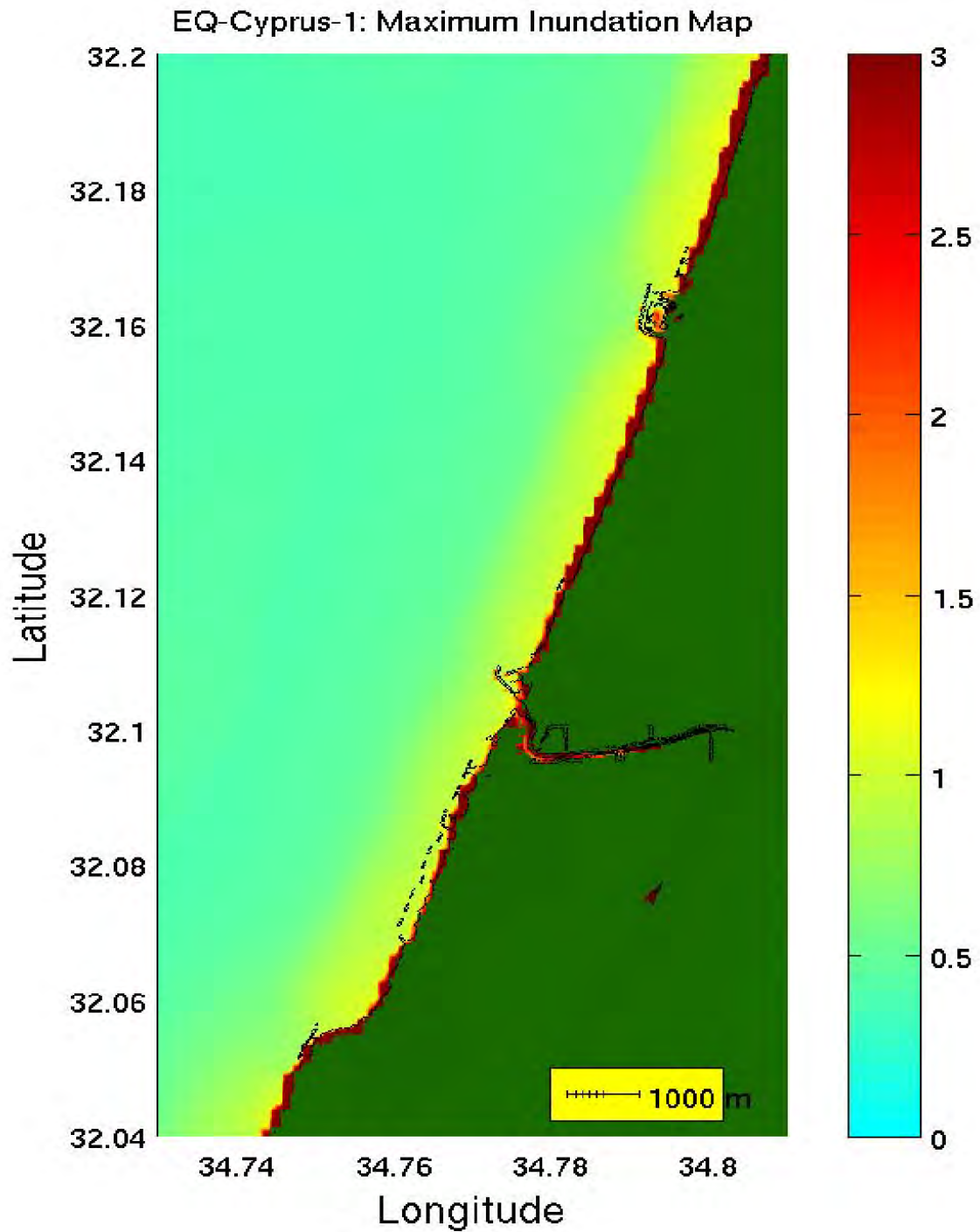
תמונה מס' 4

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור מפרץ חיפה



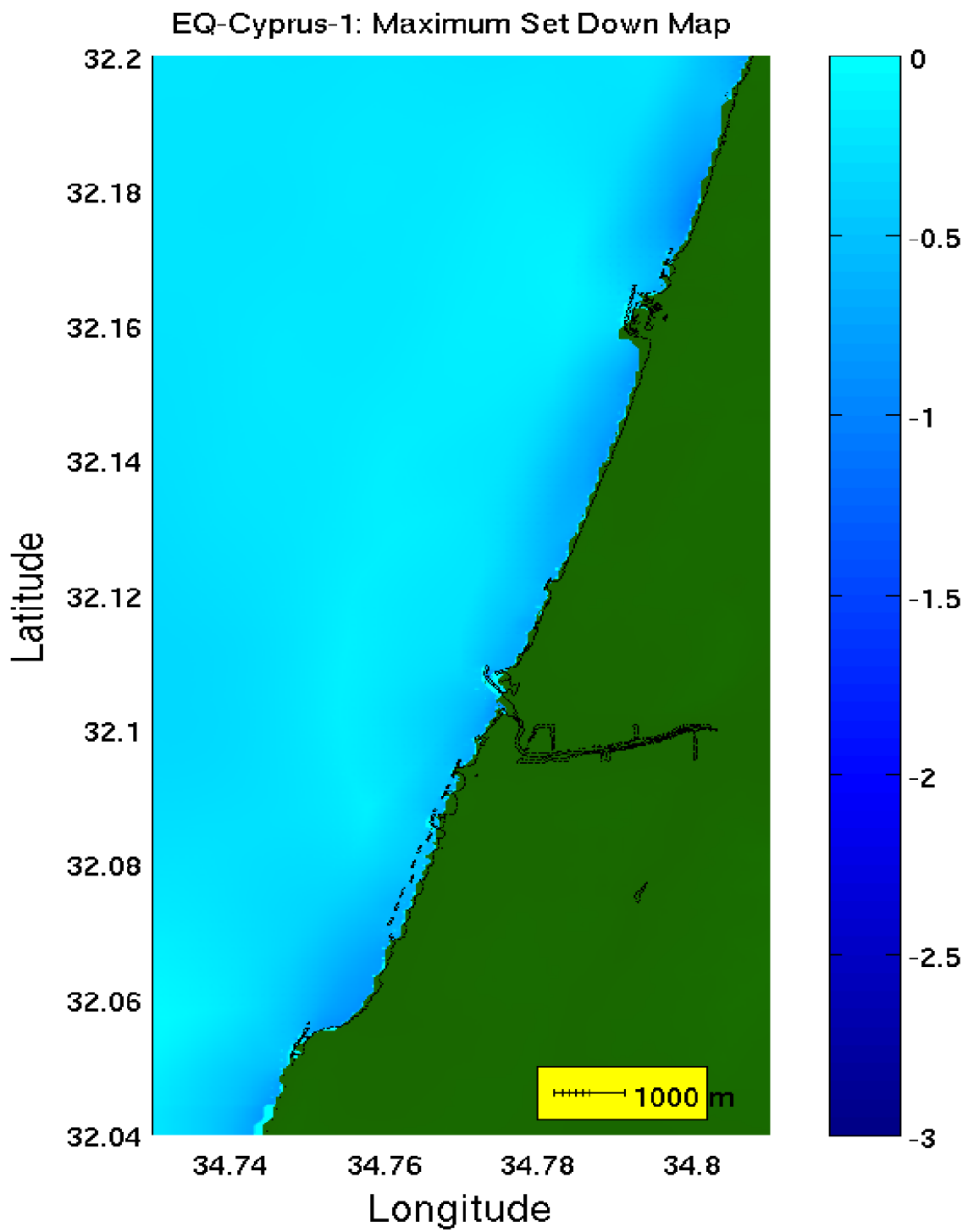
תמונה מס' 5

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור תל אביב



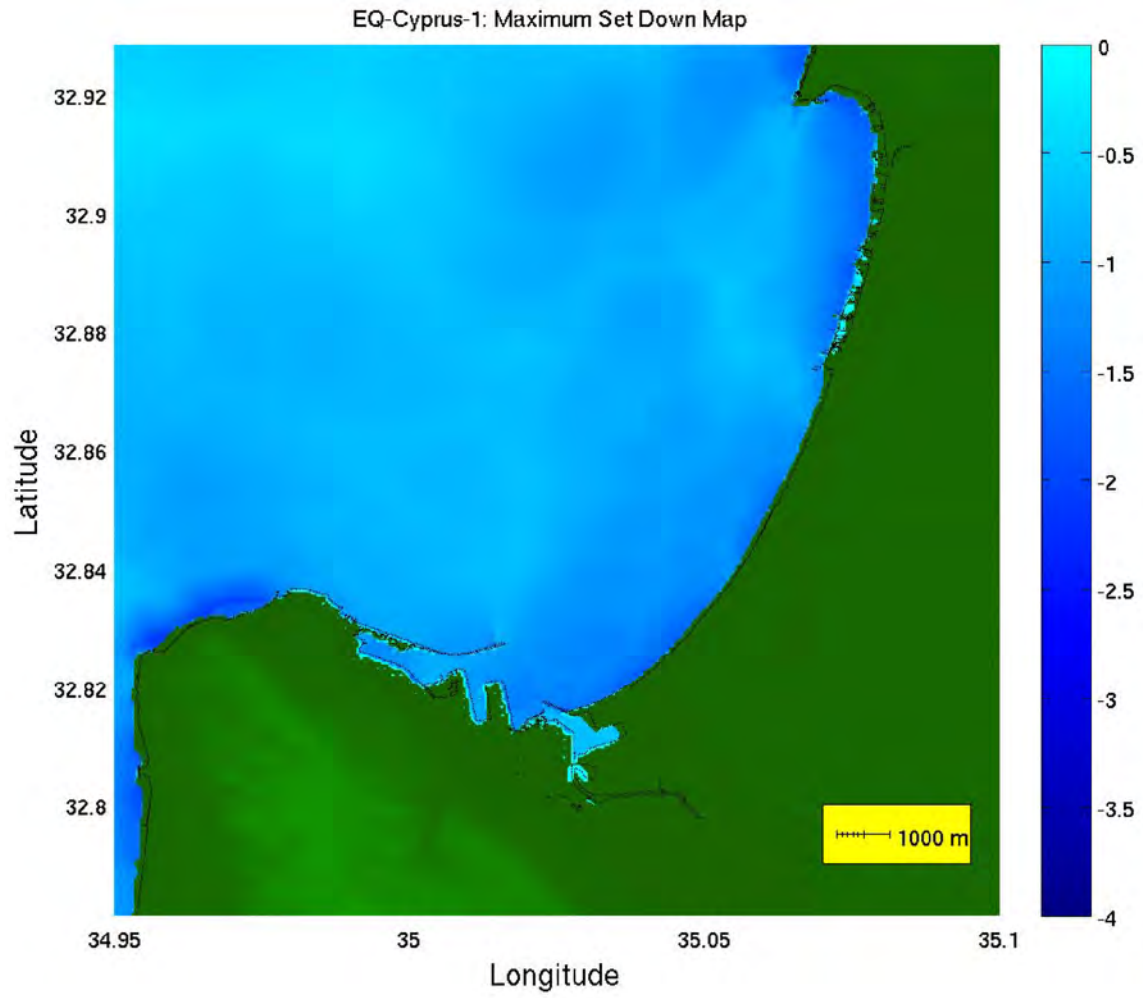
תמונה מס' 6

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



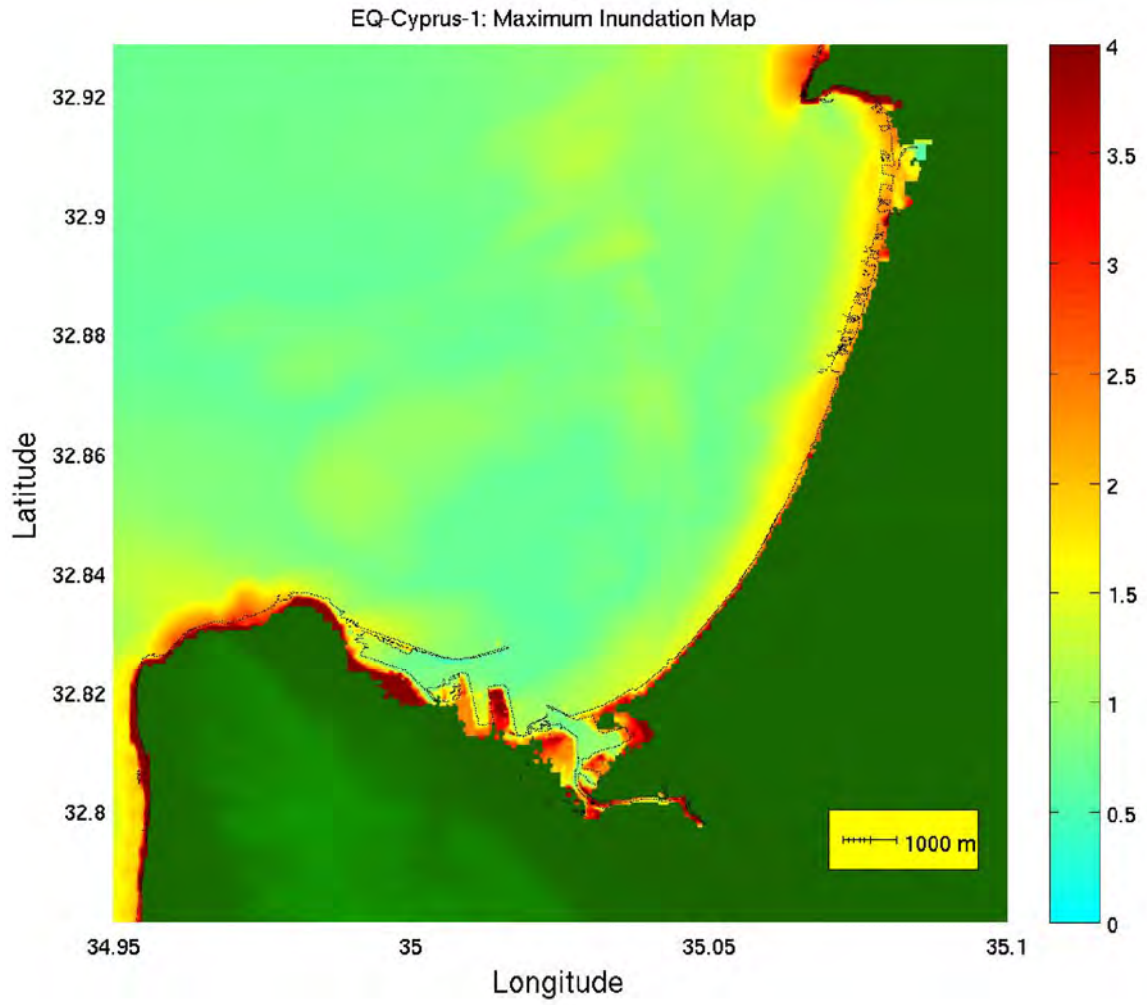
תמונה מס' 7

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



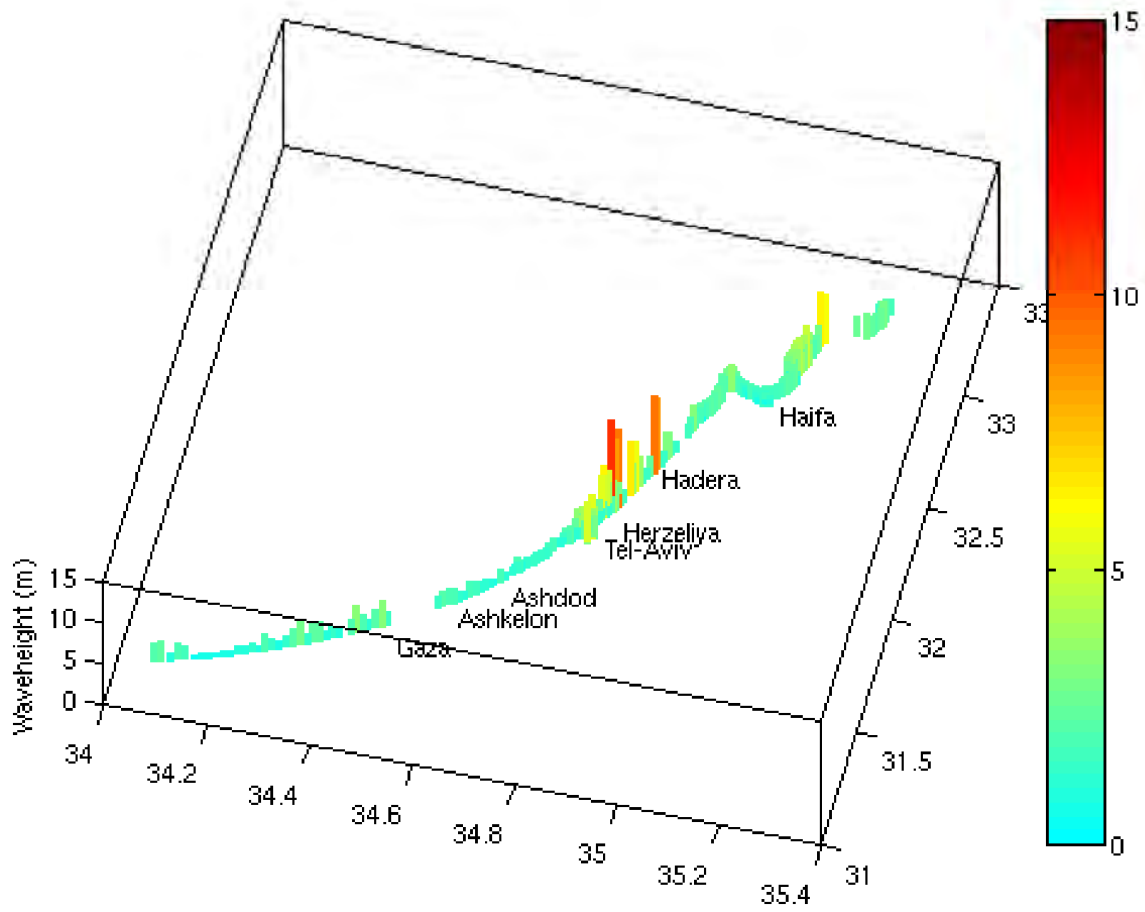
תמונה מס' 8

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



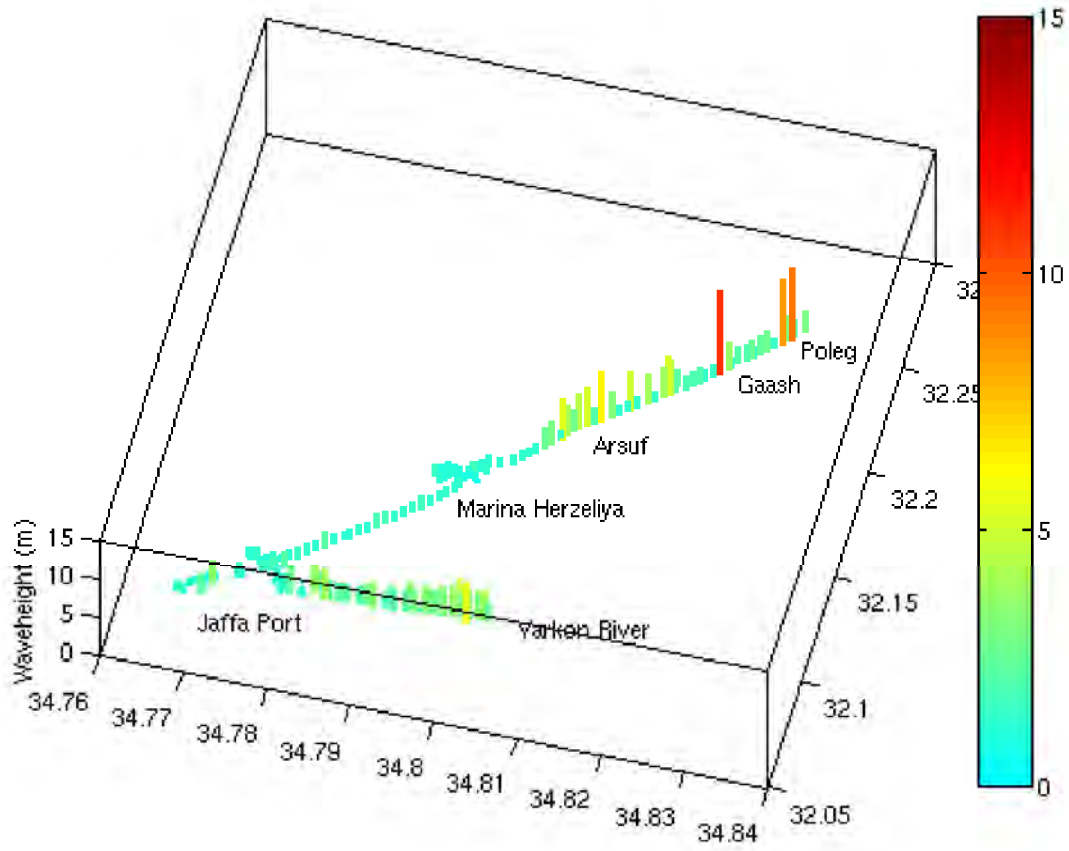
תמונה מס' 9

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



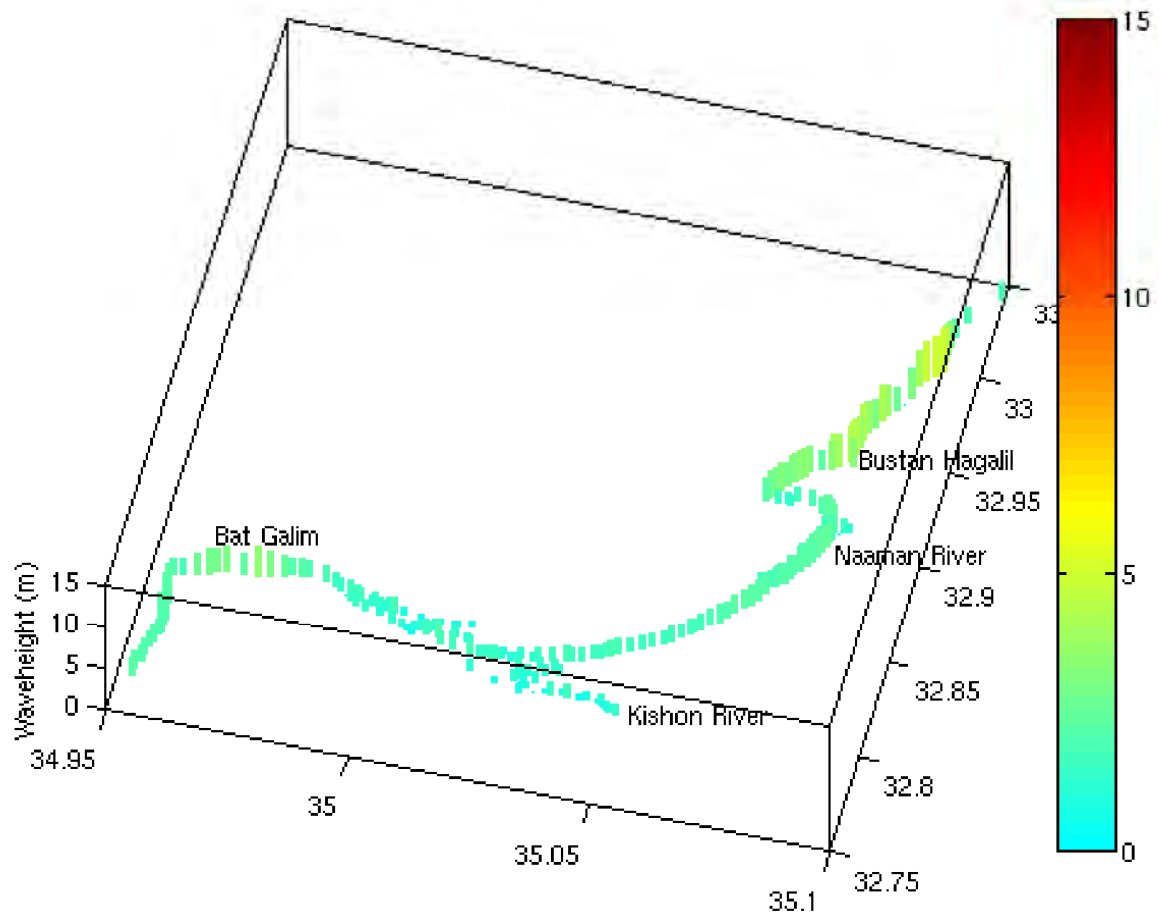
תמונה מס' 10

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז



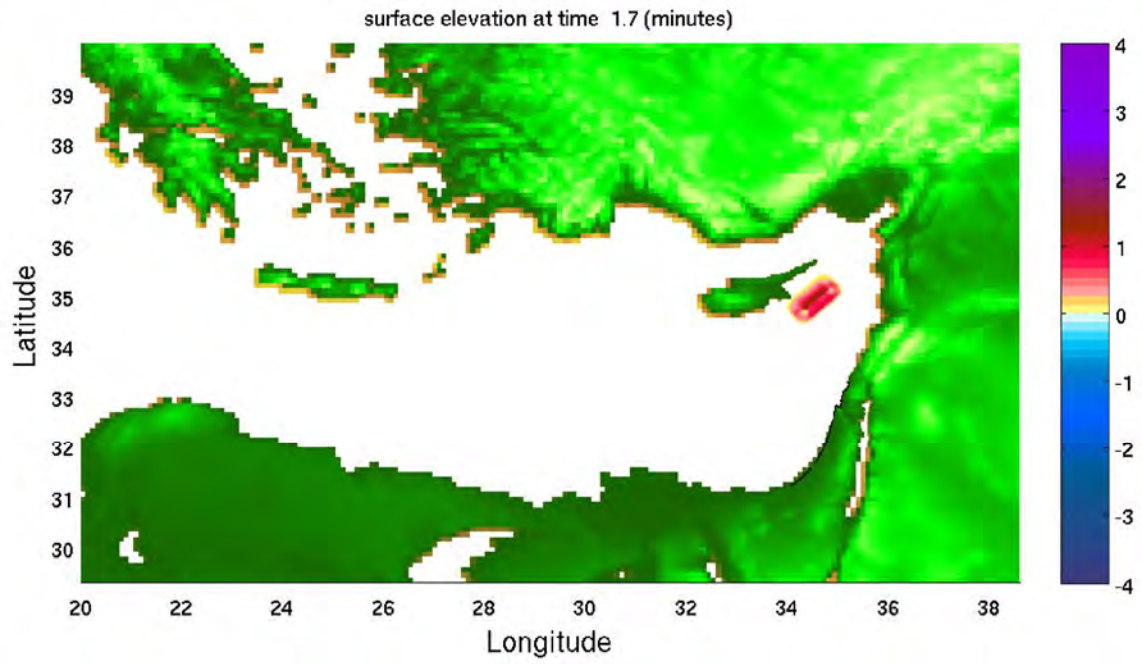
תמונה מס' 12

תרחיש EQ-CYPRUS-1, רעידת אדמה ליד קפריסין. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

נספח 9

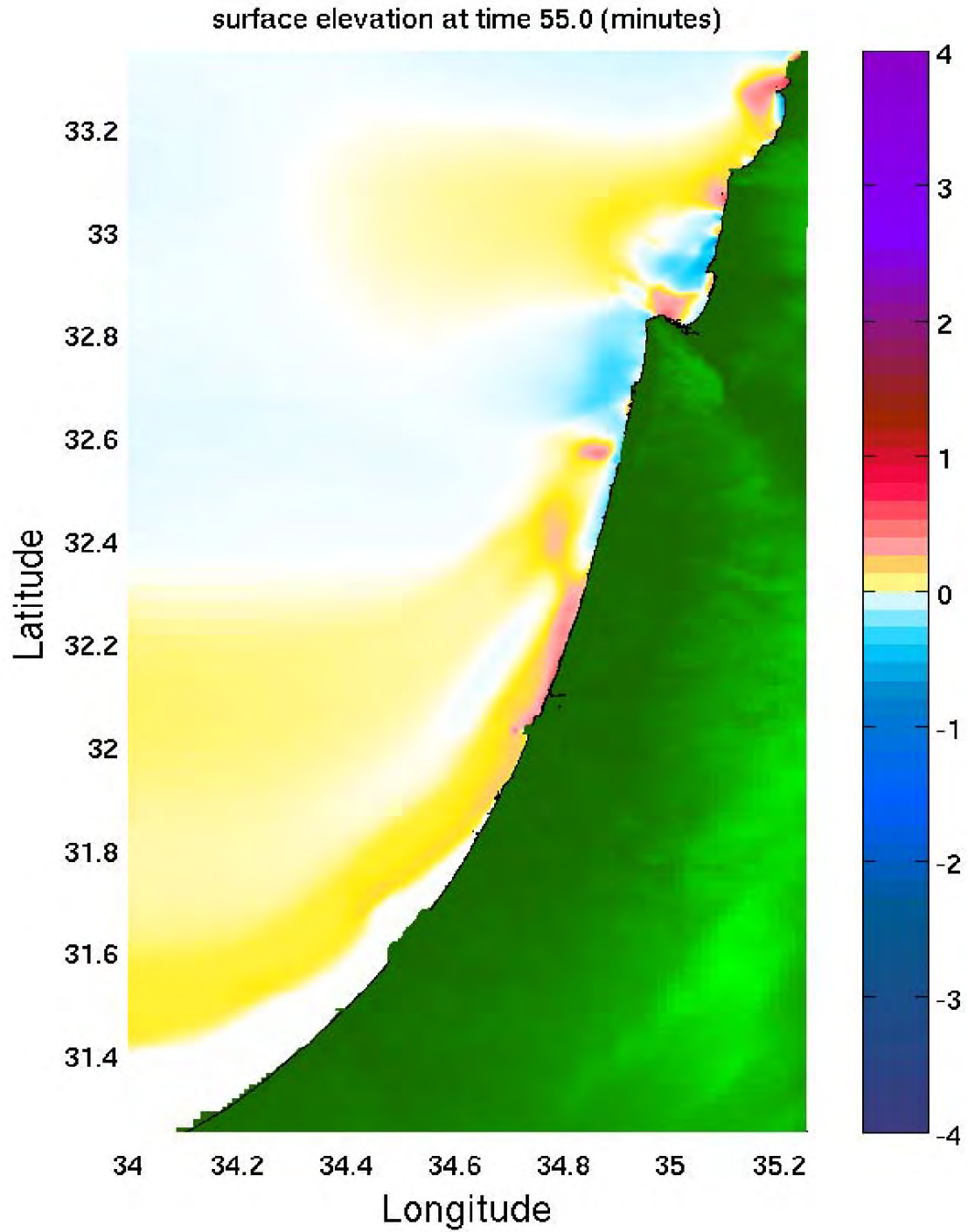
תוצאות רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-2

לאזור מפרץ חיפה, אזור המרכז ונחל הירקון



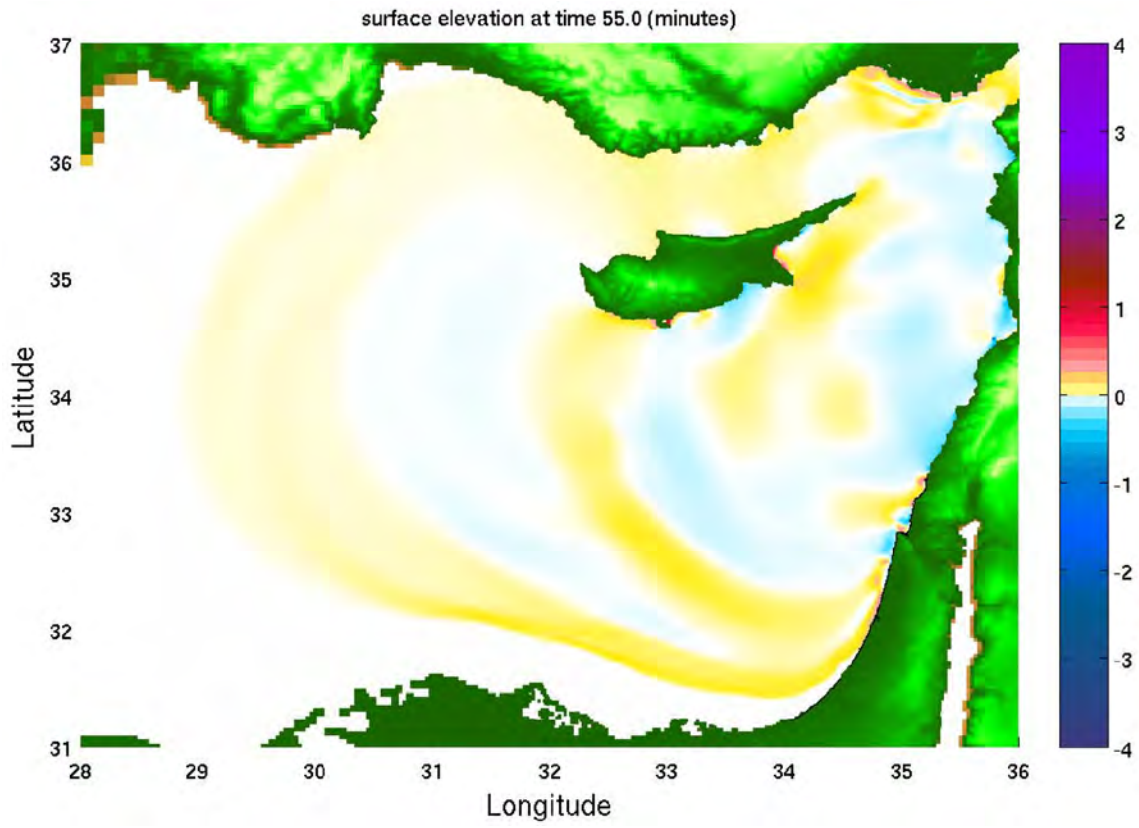
תמונה מס' 1

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור האירוע



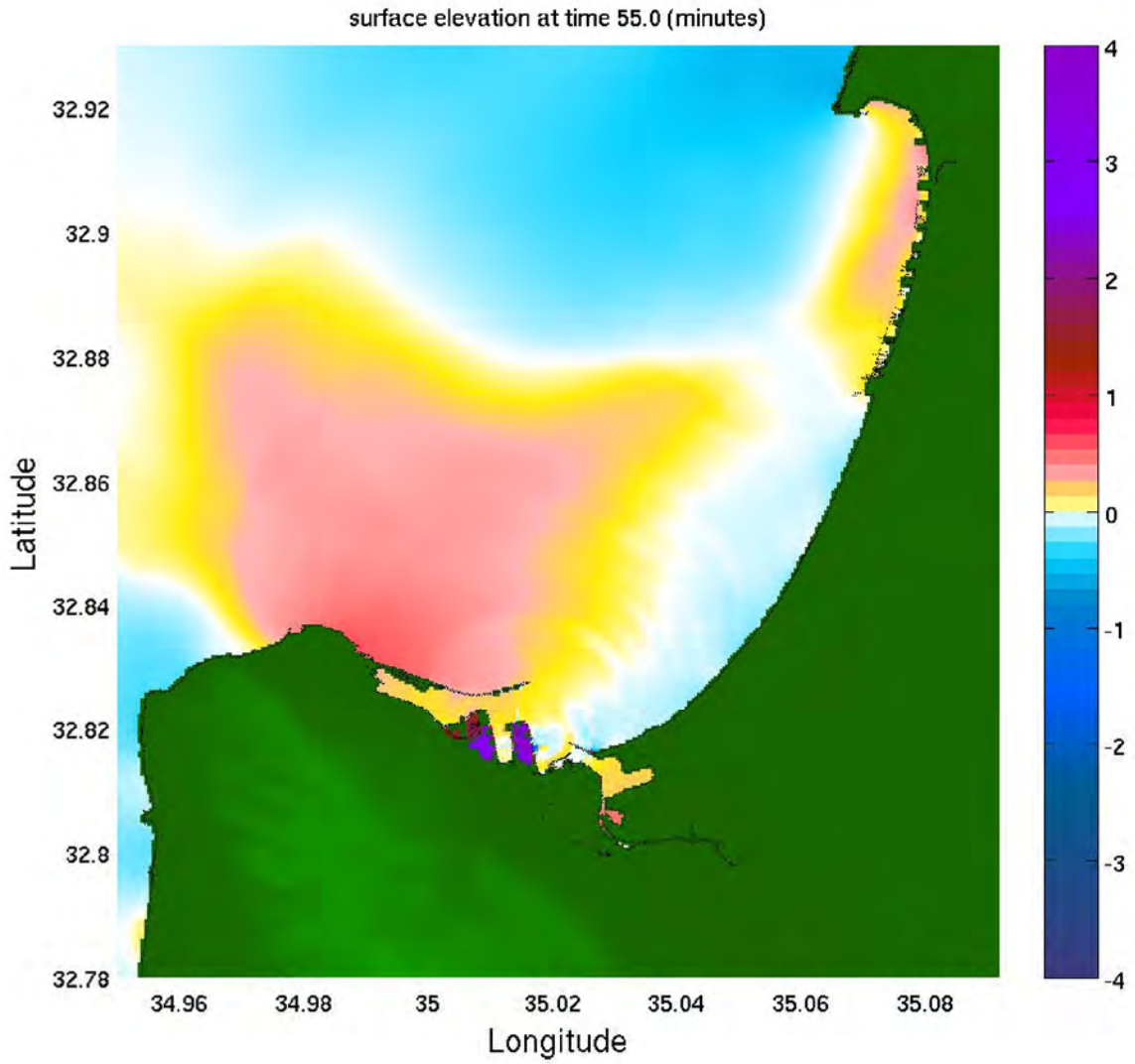
תמונה מס' 2

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור החוף הישראלי



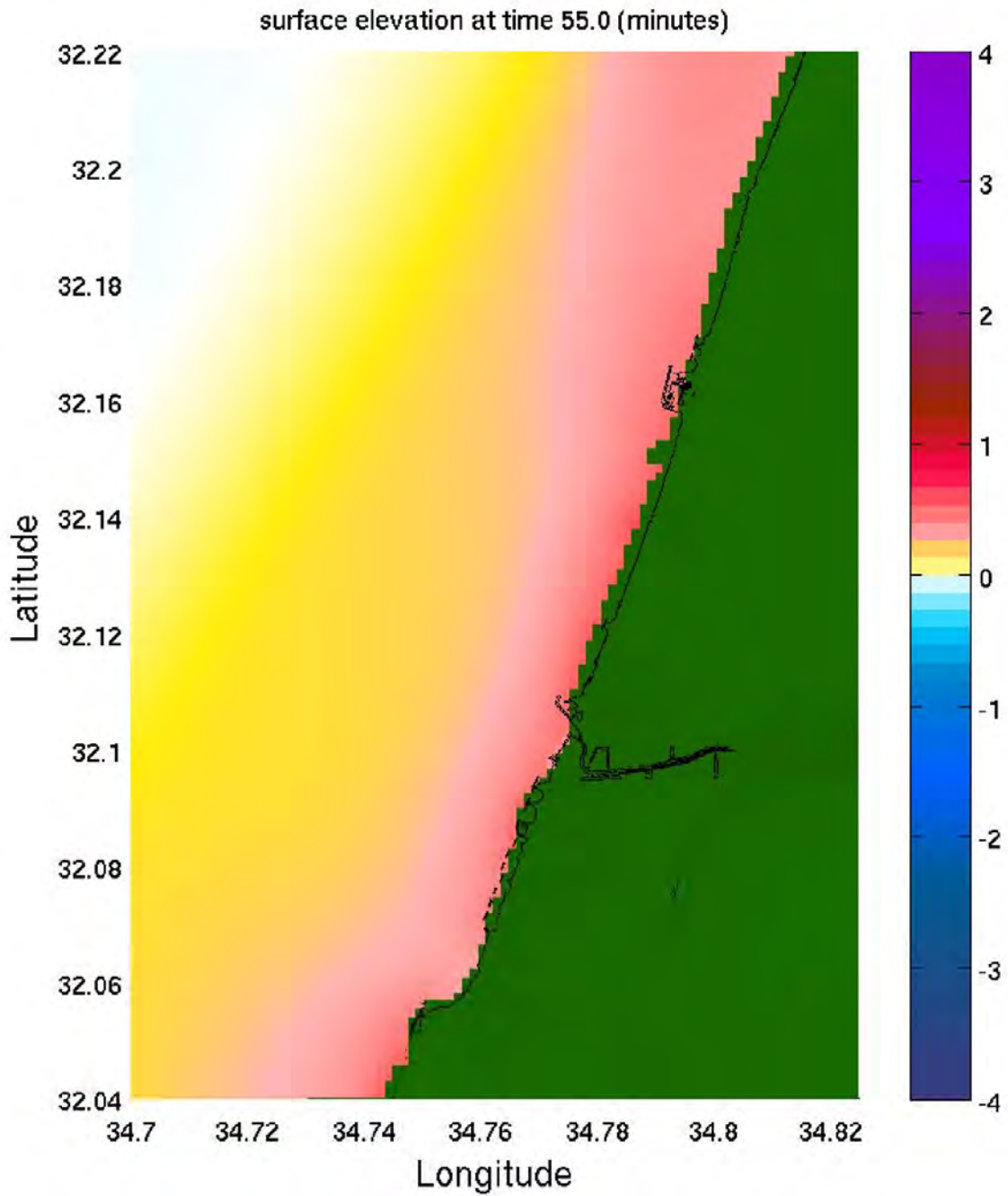
תמונה מס' 3

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור האגן המזרחי של ים התיכון



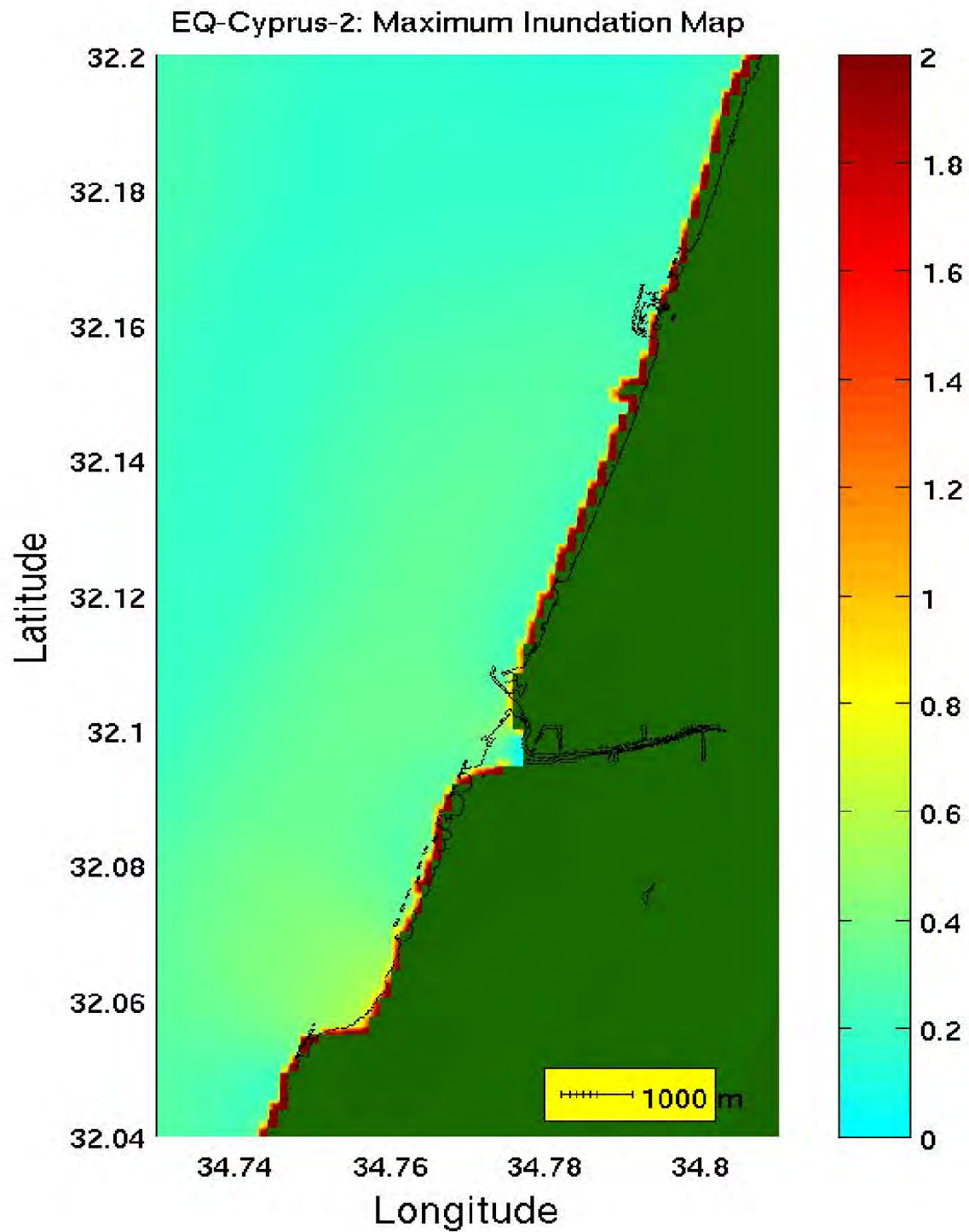
תמונה מס' 4

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור מפרץ חיפה



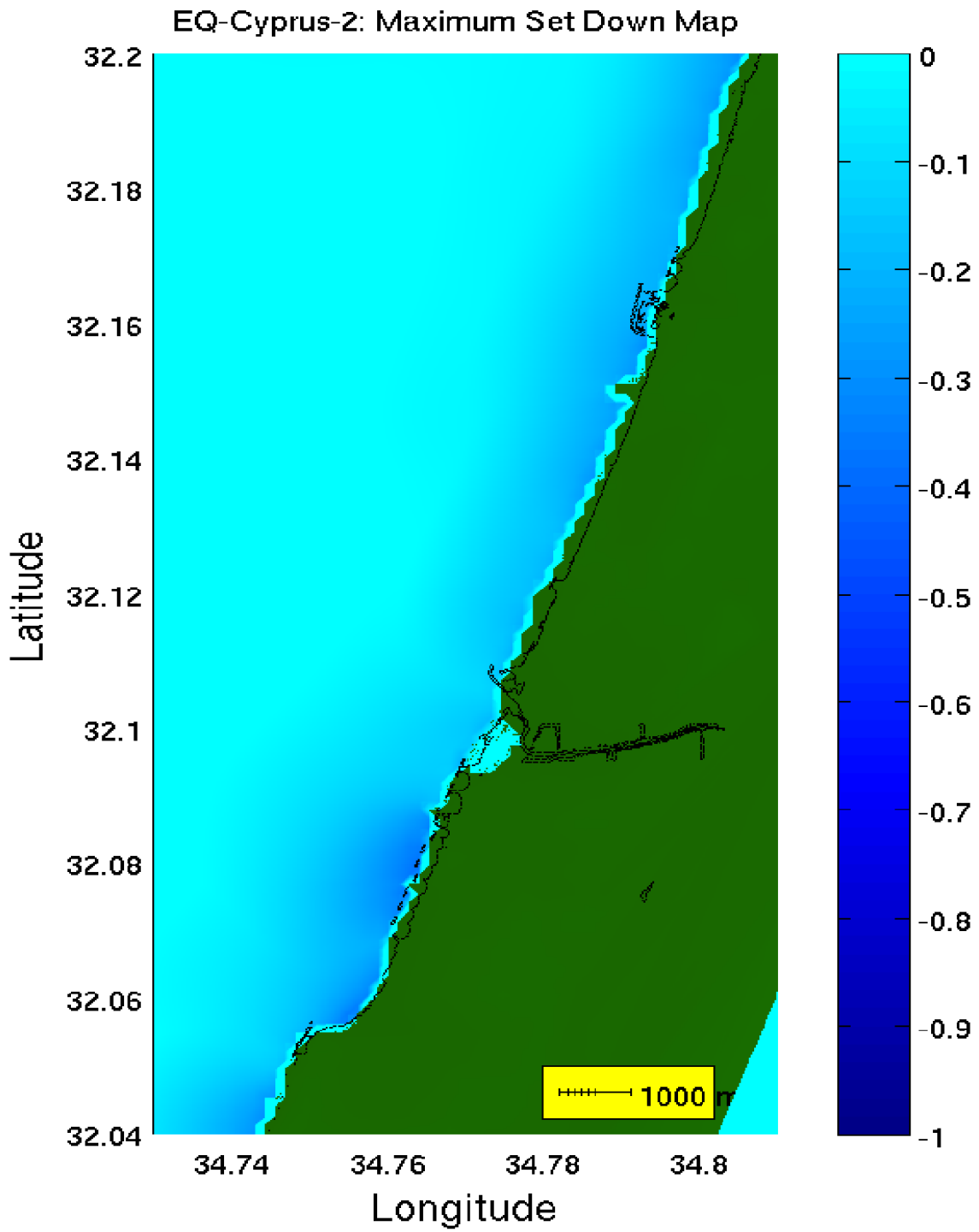
תמונה מס' 5

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור תל אביב



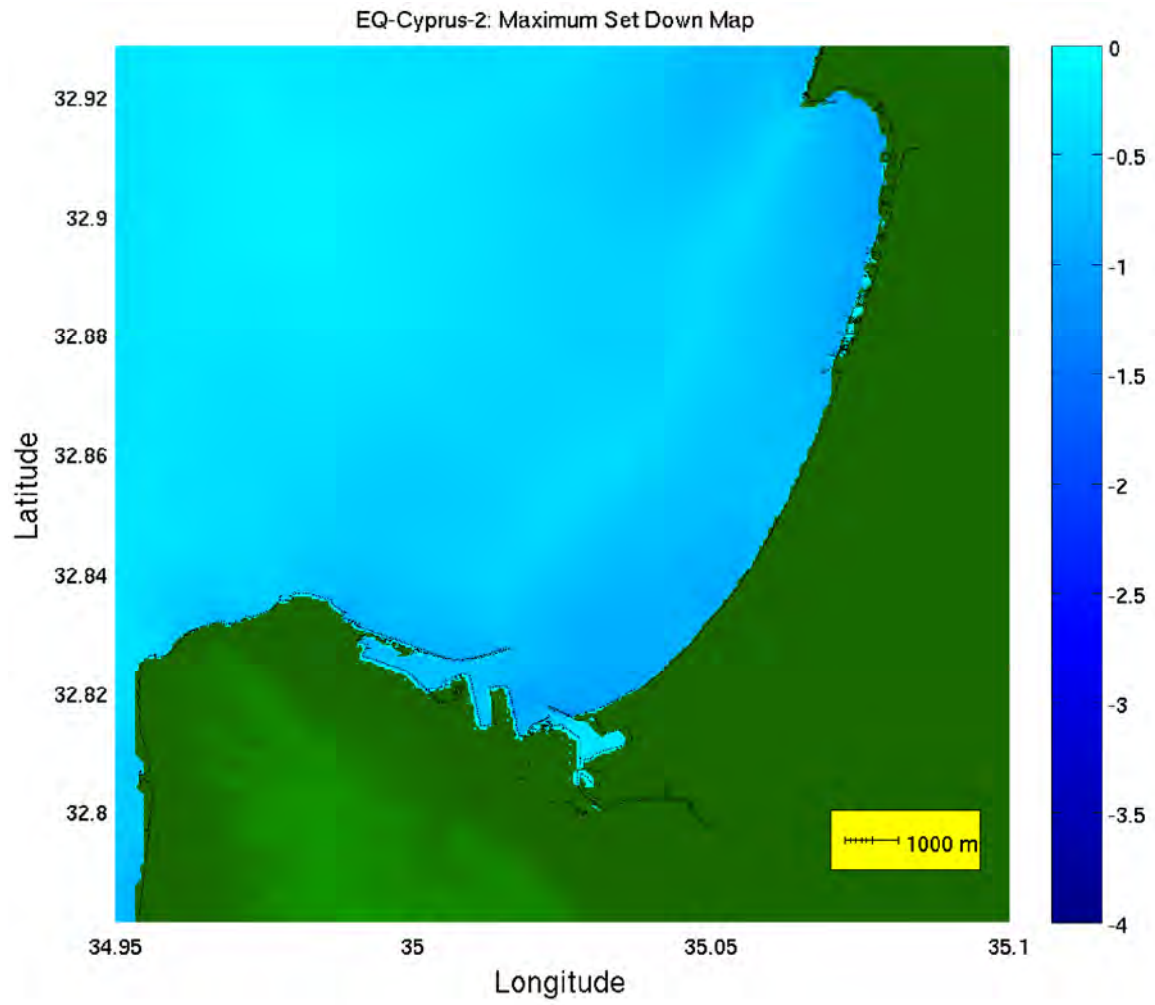
תמונה מס' 6

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



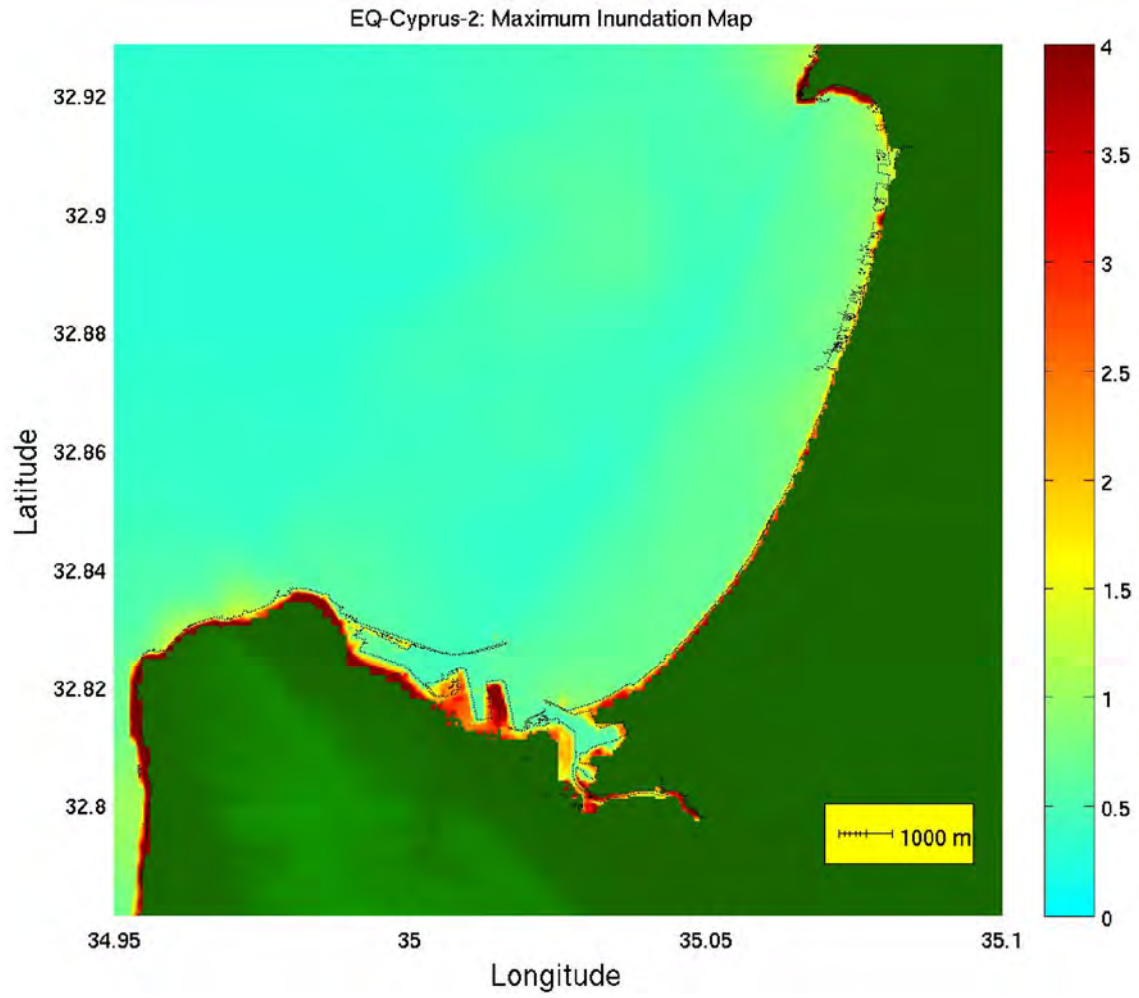
תמונה מס' 7

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



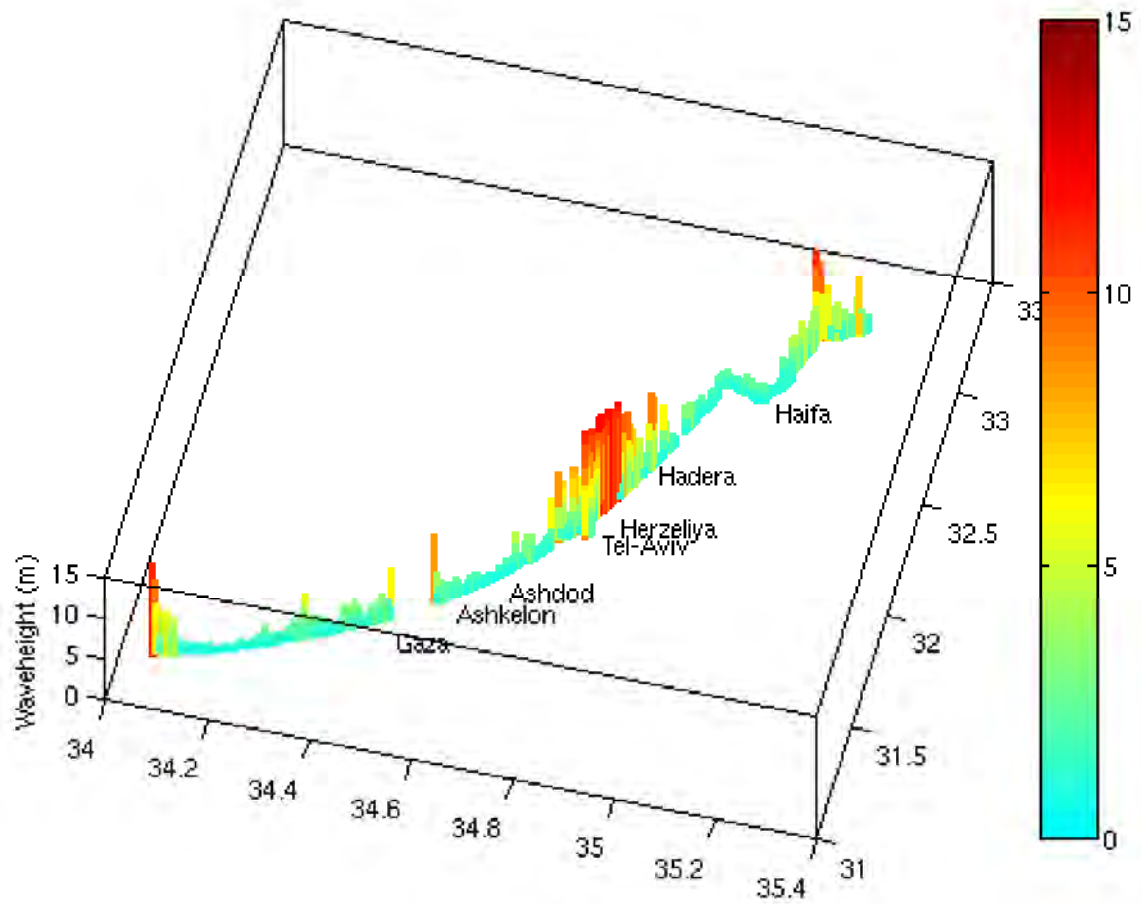
תמונה מס' 8

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



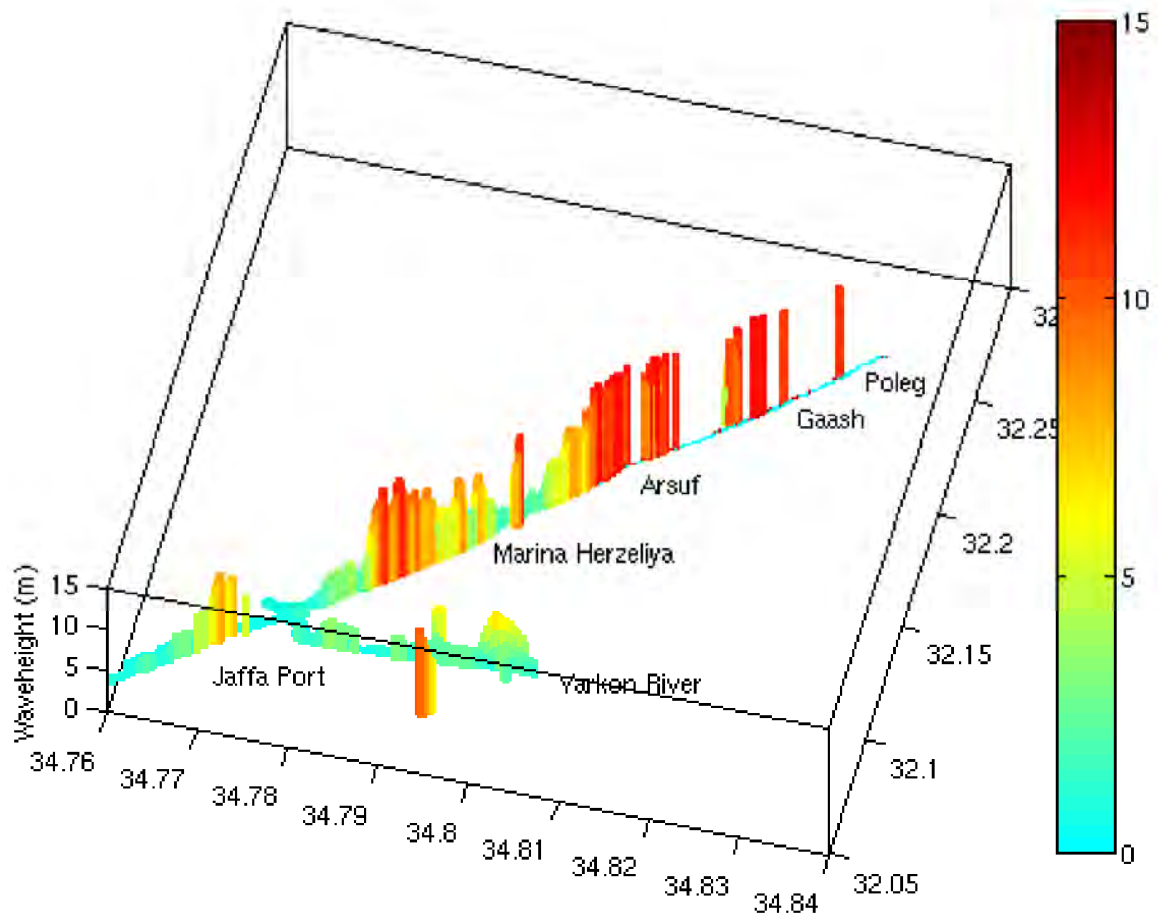
תמונה מס' 9

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה



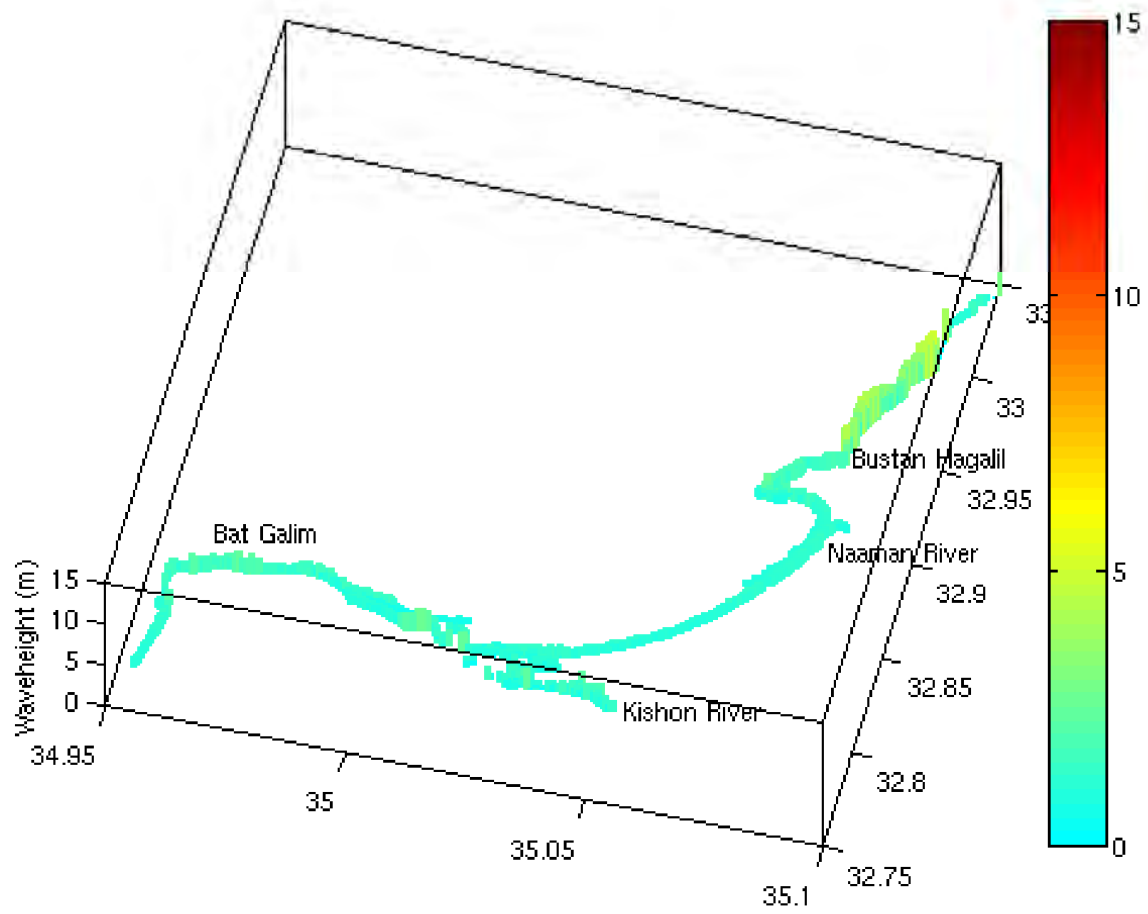
תמונה מס' 10

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. התפלגות גובה הצפה מרבית לאורך כל החוף הישראלי



תמונה מס' 11

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור המרכז



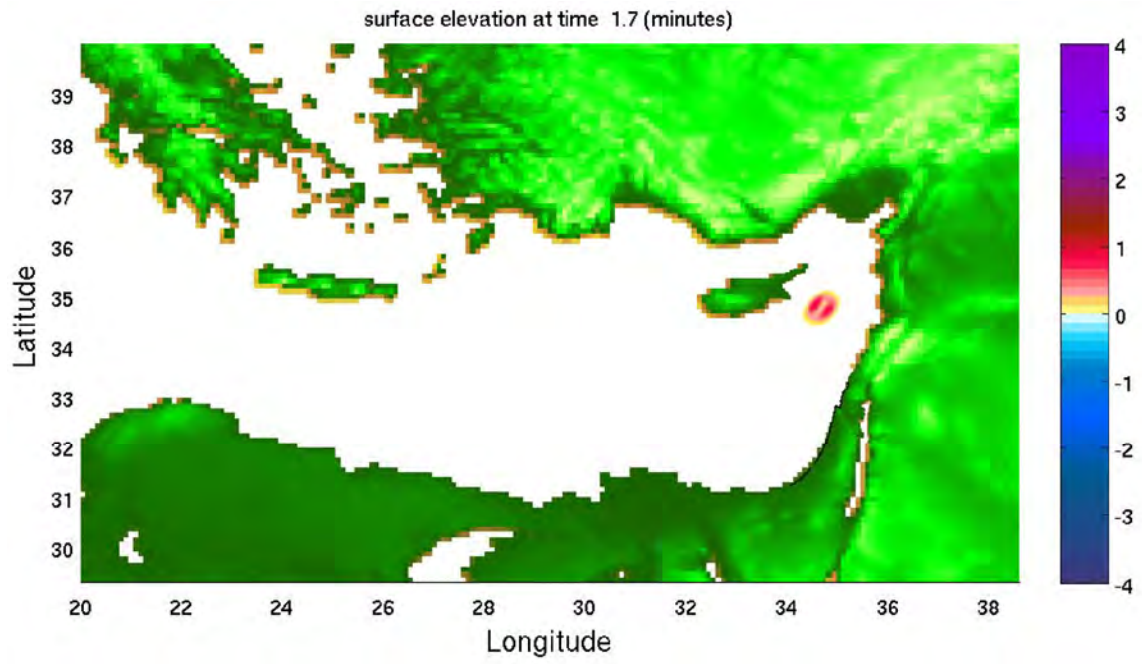
תמונה מס' 12

תרחיש EQ-CYPRUS-2, רעידת אדמה ליד קפריסין. פרוט התפלגות גובה הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה

נספח 10

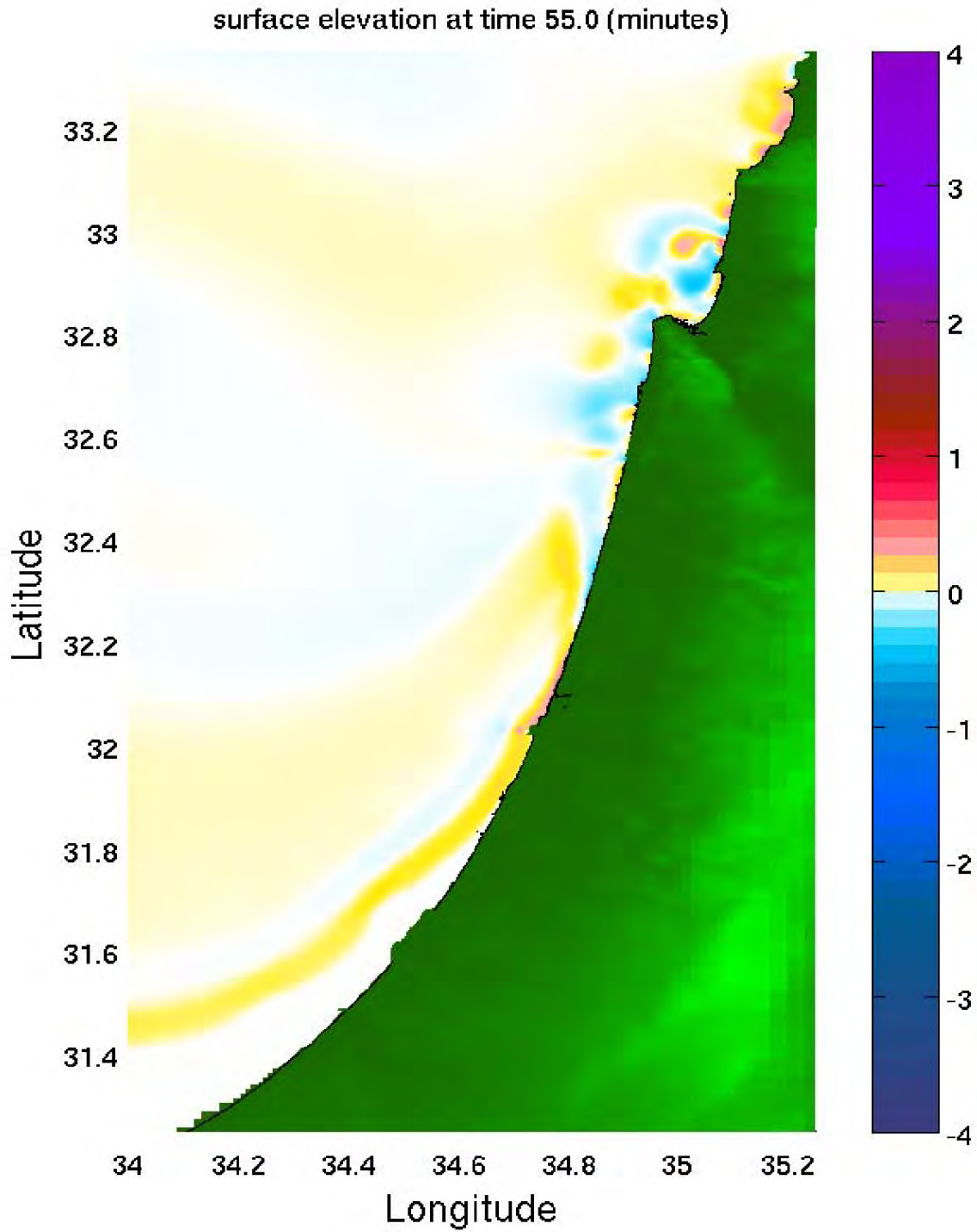
תוצאות רעידת אדמה מול קפריסין EQ-CYPRUS-2-HR

לאזור מפרץ חיפה



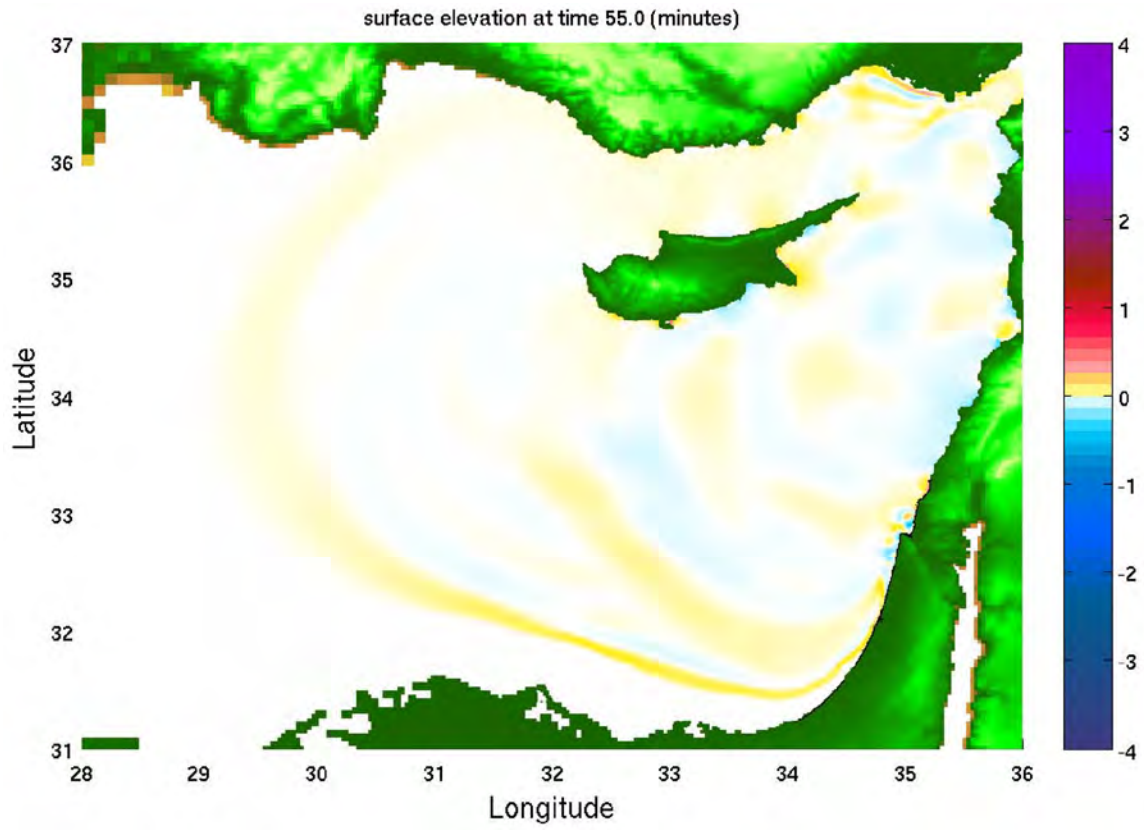
תמונה מס' 1

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור האירוע



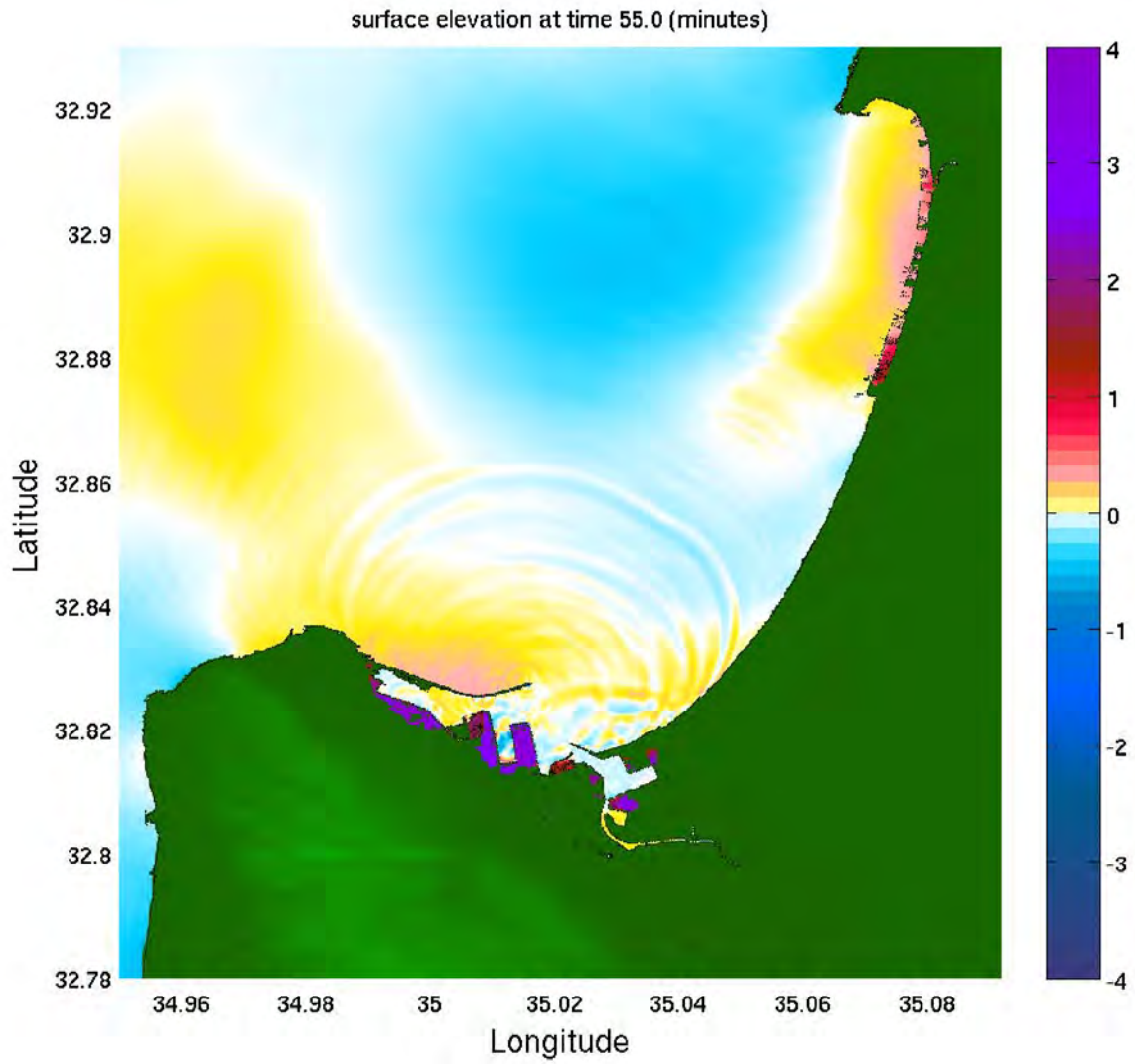
תמונה מס' 2

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים באזור החוף הישראלי



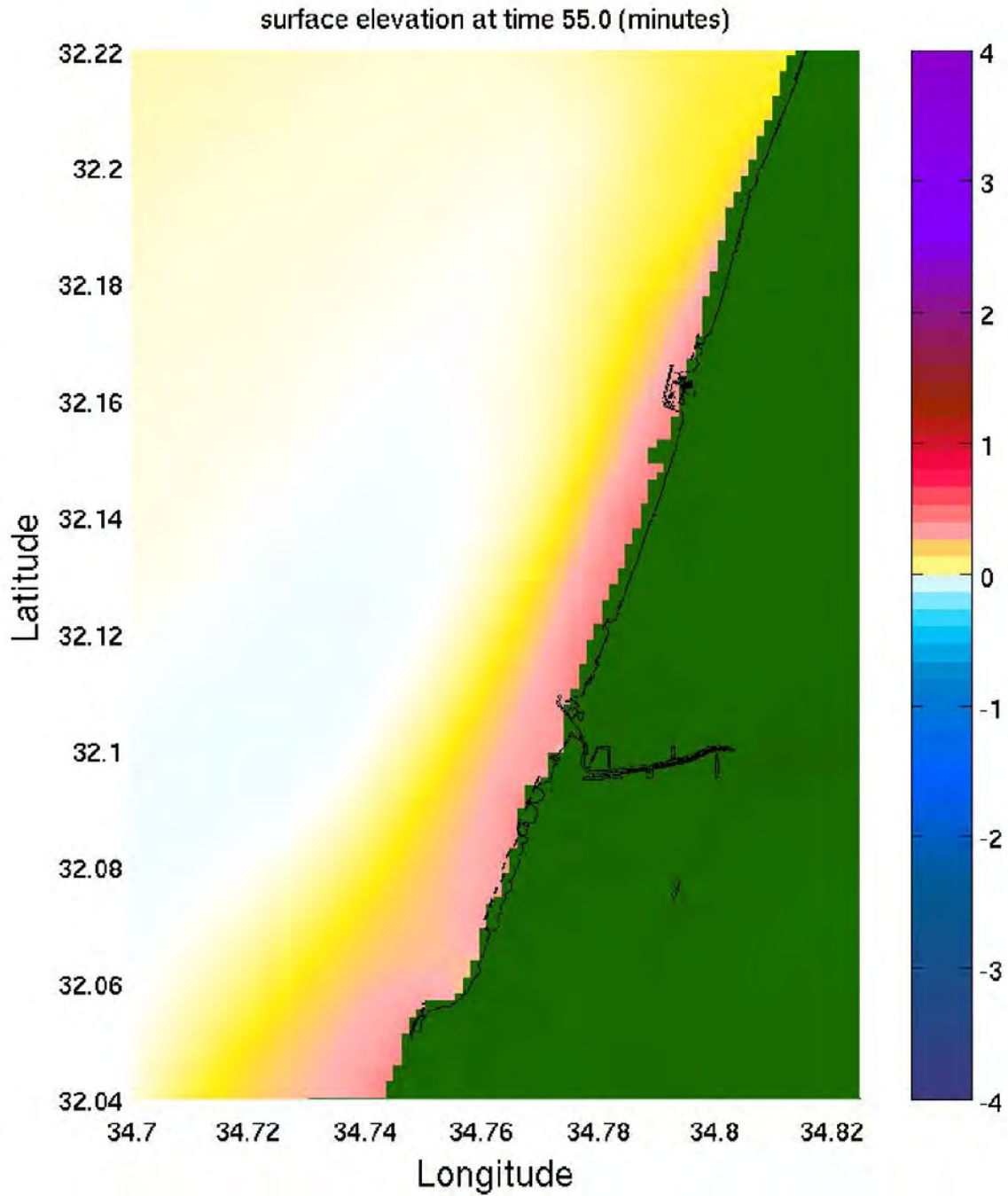
תמונה מס' 3

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור האגן המזרחי של ים התיכון



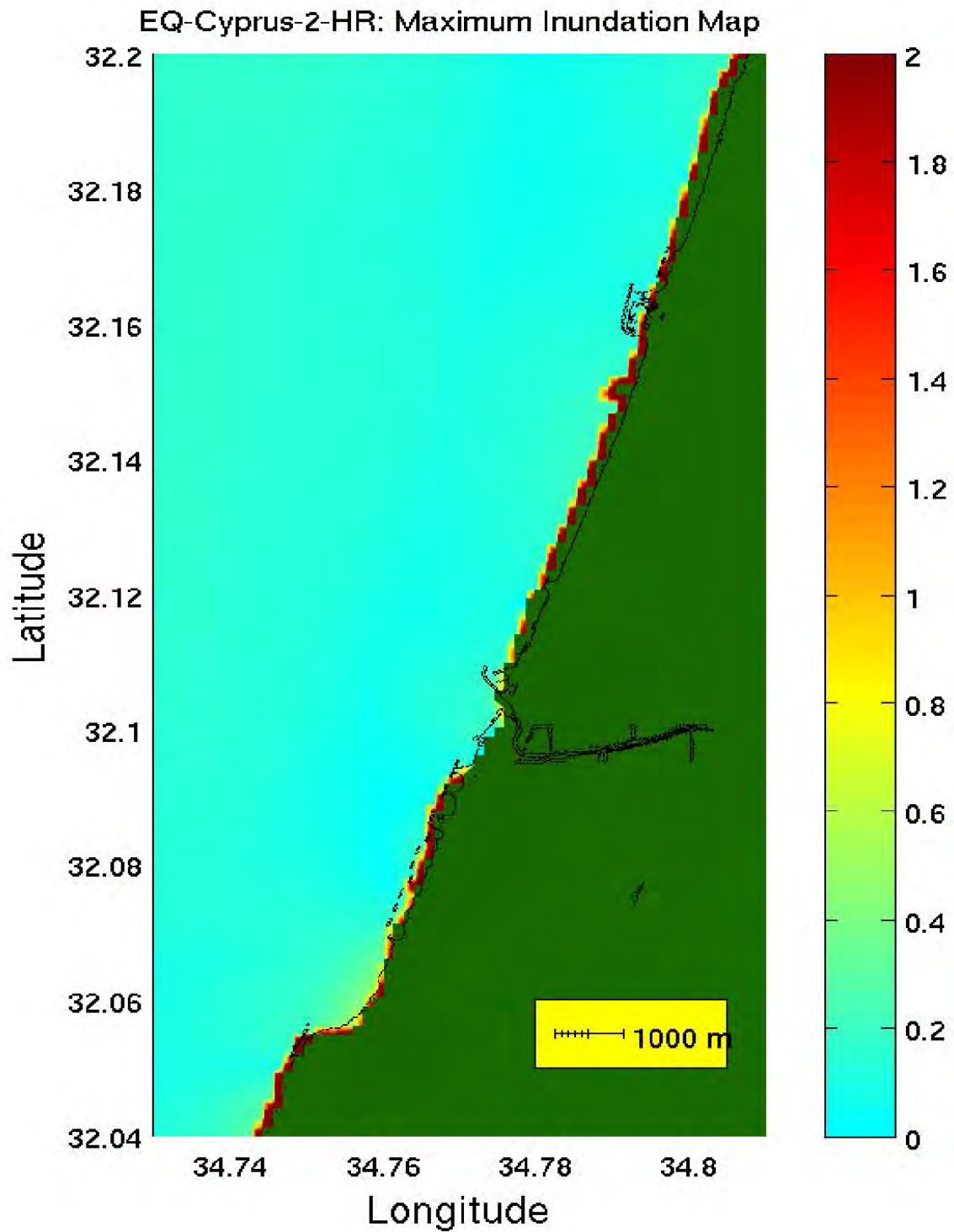
תמונה מס' 4

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור מפרץ חיפה



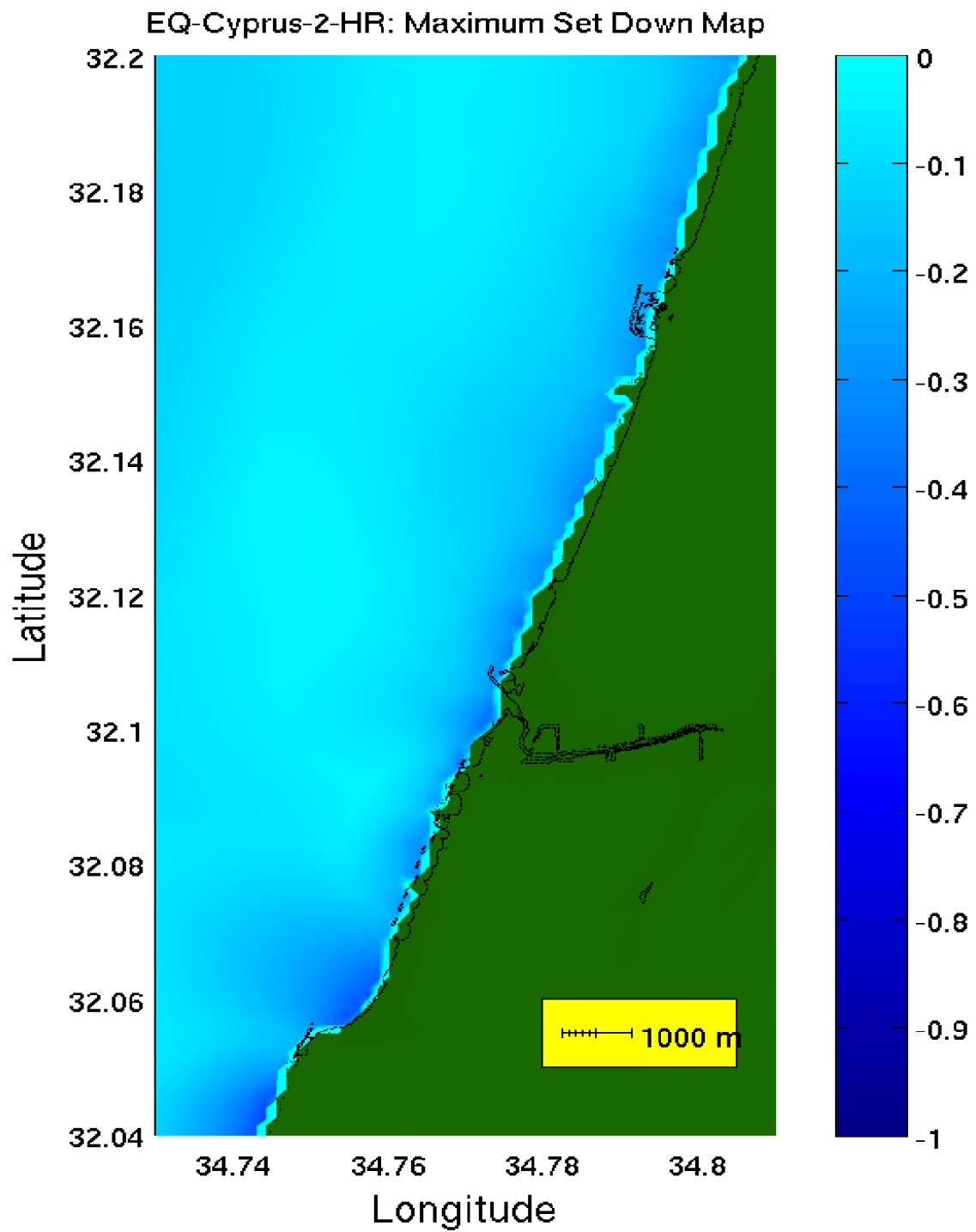
תמונה מס' 5

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. תצלום בזק של שינוי רום פני הים לאזור תל אביב



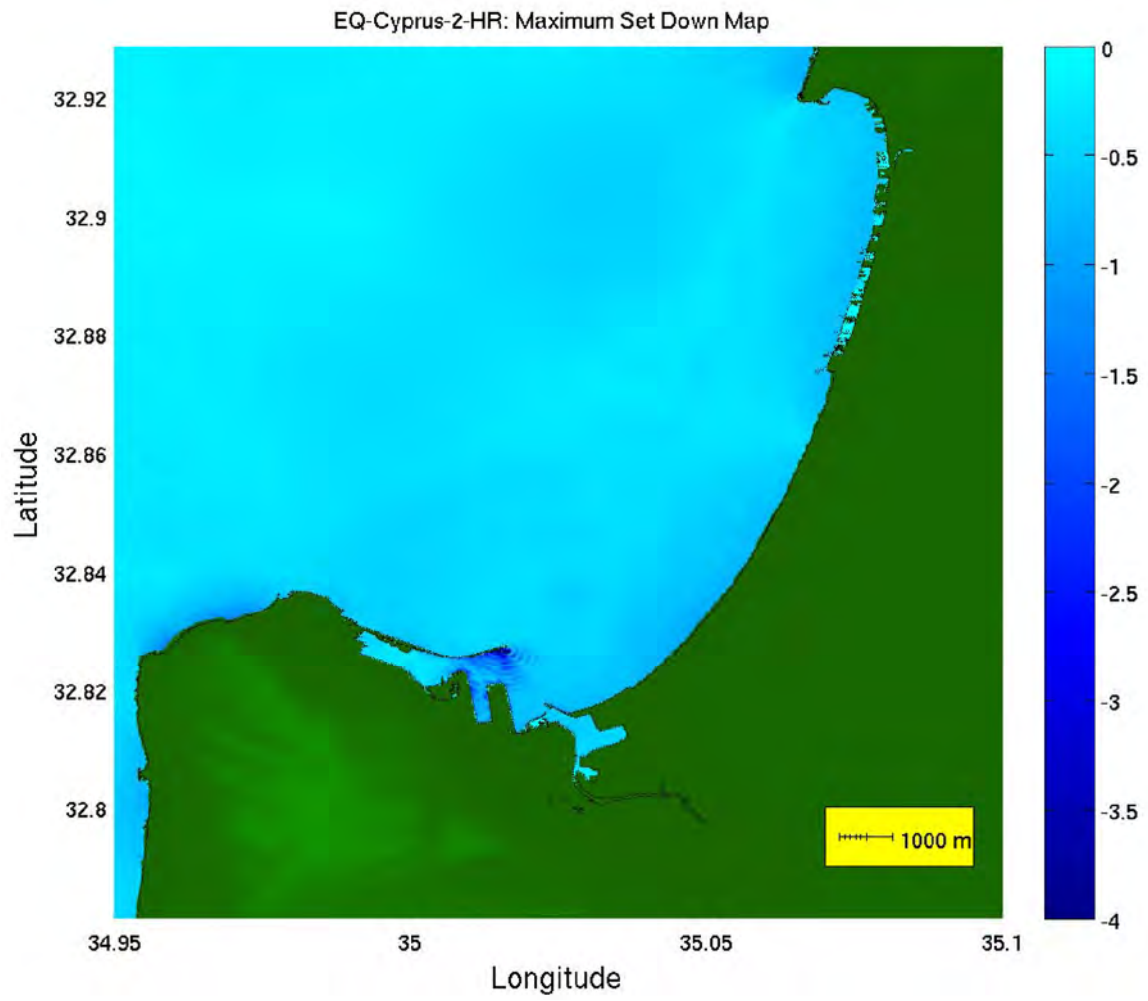
תמונה מס' 6

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור תל אביב



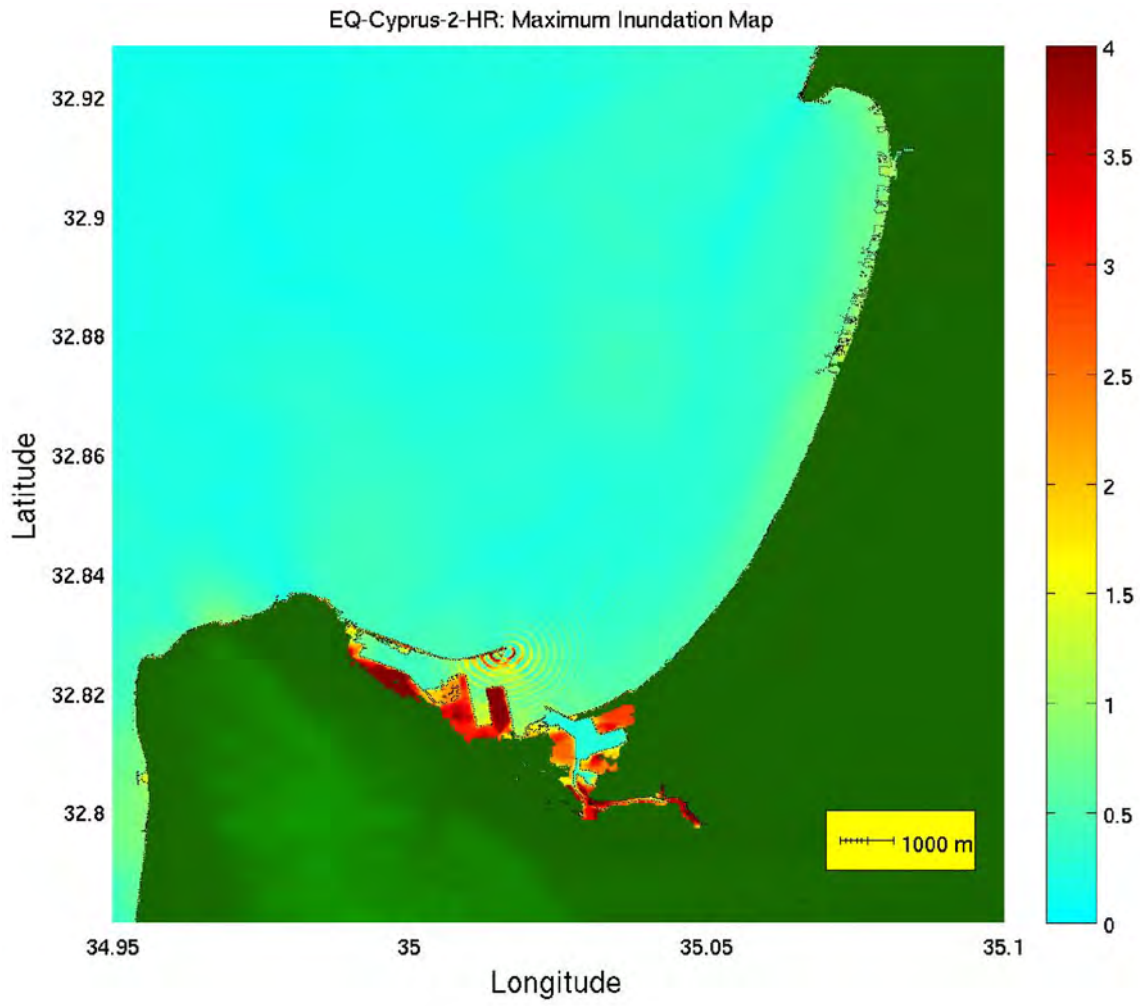
תמונה מס' 7

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור תל אביב



תמונה מס' 8

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת שפילה מרבית באזור מפרץ חיפה



תמונה מס' 9

תרחיש EQ-CYPRUS-2-HR, רעידת אדמה ליד קפריסין. מפת הצפה מרבית באזור מפרץ חיפה