

עמוס סלמון

צונאמי, מים אדירים

העבר מפתח לעתיד: הערכת הסיכון לצונאמי בישראל



SHUTTERSTOCK / ASAP

תופעת הצונאמי זכתה בשנים האחרונות ליחסי ציבור נרחבים ביותר ובייחוד לאחר דצמבר 2004, אז אירע נחשול הים שהתרחש לאחר רעידת אדמה חזקה מאוד במגניטודת מומנט 9.2, שהמוקד שלה היה בסומטרה שבאינדונזיה.¹ האבדות בנפש והנוק שנגרם היו ללא תקדים, וכך גם הצער והתסכול, משום שמרכזי המעקב בעולם ראו על המסכים שלנגד עיניהם את האירוע מתפתח והולך בזמן אמיתי, אך בהיעדר תקשורת מתאימה לא יכלו להתריע עליו במקומות המועדים לפורענות. כעת, בחסות אונסק"ו, מוקמות בכל האוקיינוסים והימים הגדולים בעולם, כולל בים התיכון, מערכות התרעה מוקדמת לצונאמי, בתקווה שבעתיד אפשר יהיה להודיע עליו מבעוד מועד ולמזער את הפגיעה בנפש. כיצד אפשר ליישם את הלקחים הללו ולהעריך את הסיכון לצונאמי בישראל, בפרט לאור העובדה שבעידן המודרני לא נצפה בישראל ולו נחשול ים סיסמי משמעותי אחד שמקורו בפעילות סיסמית? במאמר זה נתאר את העקרונות ושיטת העבודה המנחים בהערכת הסיכון: החל בבניית קטלוג אירועי צונאמי היסטוריים שעליהם יש דיווח כי פגעו בחוף המזרחי של הים התיכון ואיתור הגורמים שחוללו אותם; המשך בהדמייה ממוחשבת של תרחישי צונאמי על בסיס הניסיון ההיסטורי; וכלה בבניית מפות של האזורים המועדים להצפה מצונאמי, מתן המלצות להפחתת הסיכון והנחיות להתנהגות הציבור במקרה אמת. ההסבר ילווה בדוגמאות ובמצאים מהאזור.²

ואם הים גועש

מה הוא צונאמי, ובמה הוא נבדל מסערות גלים המוכרות לנו? צונאמי הוא גל גדול מאוד שמתפתח בים עקב הפרעה חריפה ופתאומית בגוף המים. ההפרעה יכולה להתרחש בקרקעית הים עקב רעידת אדמה חזקה, גלישה תת-ימית גדולה או התפרצות געשית, או לחלופין הפרעה בפני הים המתרחשת בגלל התמוטטות של צלע הר, מצוק או קרחון הגולשים מהיבשה לים, ואף מפגיעת מטאוריט. המונח צונאמי נגזר מיפנית ומשמעותו "גל-נמל". היפנים, כמו גם יושבי חוף ויורדי ים אחרים, היו ערים לתופעה שבה – בשונה מסערת ים רגילה – מגיעים לחוף גלי ים גדולים וארוכים במיוחד ופגיעתם בנמלים קשה. הגלים הללו הגיעו בדרך כלל לאחר רעידת אדמה. גלי הצונאמי ארוכים, עמוקים ומהירים מאוד וזאת בהשוואה לגלי הים "הרגילים" שהם קצרים, רדודים ואטיים. בטבלה 1 מוצגת השוואה בין גלי ים לגלי צונאמי. אף שהגלים בסערת חורף קיצונית בישראל



1. דירוג העוצמה של רעידות אדמה על בסיס מידותיו של ההעתק שפעל ברעידה והתנועה הטקטונית שאירעה עליו. זוהי השיטה המקובלת היום, מאחר שסולם ריכטר אינו אמין בהערכת העוצמה של רעידות אדמה חזקות מאוד. ציון המגניטודות בהמשך המאמר מתייחס גם הוא לדירוג זה.

2. העבודה נעשתה במכון הגאולוגי, בשיתוף פעולה עם חוקרים מאיטליה בנושא ניתוח המידע ההיסטורי וחוקרים מקליפורניה בנושא הרצת מודלים ממוחשבים והערכת סיכונים, במסגרת ועדת ההיגוי להיערכות לרעידות אדמה בישראל. בימים אלה נעשית עבודת המשך משותפת במכון לחקר ימים ואגמים ובמכון הגאולוגי, במסגרת המינהל למדעי האדמה והים במשרד התשתיות.

טבלה 1: השוואה בין גלי סערה חזקה ובין גלי צונאמי 'בינוני' בישראל

מאפיינים	גל סערה	גל צונאמי
גובה הגל	כ-5 מטרים בסערת חורף חזקה	כשני מטרים במקרה של רעידת אדמה במגניטודה 7.5 בקפריסין; כחמישה מטרים כתוצאה מגלישה תת-ימית בנפח של 1 ק"מ מעוקב.
אורך הגל	כמאה וחמישים עד שלוש מאות מטרים	בים העמוק - מאות ק"מ בקרב החוף - עשרות ק"מ
מהירות התקדמות הגל (חפזות)	עשרות קמ"ש	בים העמוק - מאות קמ"ש בקרב החוף - עשרות קמ"ש
זמן מחזור, תקופה	כעשר עד ארבע-עשרה שניות	דקות בודדות עד כמה עשרות דקות
בסיס הגל – עומק	כמאה מטרים	קרקעית הים
תדירות ההופעה בישראל	אחת בשנה	אחת ל-250 שנה

מודלים ממוחשבים מנסים לעקוב אחר התפתחות הצונאמי, אולם זמן החישוב עדיין ארוך יותר מזמן ההתרעה לצונאמי בישראל ויש להכין את מרב התרחישים האפשריים

באזור השרון יהוו חומת הגנה מפני גלי הצונאמי, ואילו באזור פני החוף ובמוצא הנחלים לים התיכון (הקישון, חדרה, אלכסנדר, פולג, הירקון, וכד') תתרחש הצפה עמוקה יותר, עד כדי כמה קילומטרים מקו החוף במקרי קיצון. אין להמעיט בעוצמתו של הצונאמי. אירוע כזה כולל סדרה של גלים עוקבים, כמה מהם בולטים במיוחד, שעלולה להימשך שעות ארוכות בטרם הם שב ונרגעו. הצונאמי מלווה בתופעות של פיזור ומיקוד גלים, התאבכות בונה והורסת, החזרות, עקיפה וכדומה, בפרט בחופים מפורצים. שעות רבות לאחר שהמאורע החל עוד עלולים להופיע זרמים תת-ימיים חזקים, אשר אינם מלווים בהכרח בביטוי מרשים בפני הים, אך הם משמעותיים במיוחד בנמלי ים סגורים, ובכוחם להזיק.

מקורות המידע על צונאמי

כיצד אנו למדים על תופעת טבע הרסנית זו, ומהם הכלים העומדים למחקרה?

תיאורים ודיווחים ממקורות היסטוריים, רישום ותצפיות אמת מתיאורים רבים, כולל במקורותינו אנו, ניכר כי בני האדם הכירו את התופעה עוד בתקופות היסטוריות, אף

עשויים להגיע לגובה מקסימלי של כ-15 מ' (לדוגמה, בחורף 2001 נמדד גל בגובה של 13.75 מ' מול חיפה. זמן החזרה של סערות בעוצמה זו הוא כעשרים שנה) אורכם קצר יחסית, הם אינם מכילים נפח מים רב ומציפים את החוף אך במעט. לעומתם גלי צונאמי גם אם הם נמוכים יחסית, 2-3 מטרים למשל, מכילים נפח עצום של מים בשל אורכם (אורך הגל של הצונאמי מתייחס למובן הרגיל בפיזיקה של אורך-גל, לאמור – המרחק משיא לשיא; "רוחבו" של נד המים). באופן ציורי אפשר לתאר את הגל הארוך של הצונאמי מגיע לחוף, ובמשך דקות ארוכות מביא עוד ועוד מים ללא סוף; הים עולה על גדותיו ומציף את היבשה. כך גם כאשר הגל נסוג, פני המים יורדים ופוחתים במהירות, וקרקעית הים נחשפת והולכת. הצונאמי עלול להופיע כעלייה הדרגתית בפני המים או כחזית גל נשבר, מלווה בסחף רב ובשברי עצמים.

ככל שגל הצונאמי גבוה יותר ו/או ארוך יותר, יכולתו להציף את שטחי היבשה גדולה יותר. המקומות שבהם החוף מתון והתכסית (כלומר כל מה שמכסה את פני השטח) שעליו דלילה יחסית יהיו חשופים להצפה נרחבת יותר מאשר מקומות שבהם התכסית צפופה. מכאן ברור שמצוקי החוף של ישראל השכיחים

שפירשו אותה במונחים שונים מהמקובל כיום וייחסו אותה לכוחות על טבעיים וכדומה. ראוי לציון מחקרו החלוצי של הגאוגרף נתן שלם (1956, וראו: לקריאה נוספת) אשר העמיק לבחון היבטים אלה. אף שהתיאורים ההיסטוריים מוגבלים לנקודת מבטו של הצופה, מוטים לפי השקפת עולמו של המתאר, וחלקיים כפי ששרדו את מהלך ההיסטוריה, אין להם תחליף, משום שמרבית אירועי הצונאמי לא הותירו כל סימן או עדות פיזית אחרת להתרחשותם. לכן נראה שהתועלת במידע ההיסטורי, על אף חסרונותיו ומגבלותיו, רבה. נדרש טיפול זהיר וביקורתי במידע זה, כמובן, והוא אינו ראוי לכל מטרה. עם הזמן הפכו הדיווחים תיאוריים ומקושרים טוב יותר לרצף הזמן היסטורי. היום, התופעה נמדדת ומתועדת במגוון רחב של אמצעים טכנולוגיים מתקדמים, הנמצאים מקרקעית הים ועד לחלל.

עדידות גאולוגיות

ברוב המקרים העדיויות שמשאיר אחריו הצונאמי דלות יחסית, מטושטשות בחלוף הזמן ורובן נמחק. בשנים האחרונות התפתח תחום מחקרי חדש בגאולוגיה העוסק באיתור עדיויות ובממצאים להתרחשות צונאמי קדום (פְּלִיאָו-צונאמי). הממצא הגאולוגי שמחפשים אחריו מכונה צונאמיט (tsunamiite), אשר לרוב הוא נעדר מאפיינים ייחודיים וקשה לזיהוי משום דמיונו למשקעי חוף, סערות וזרמים תת-ימיים רגילים. במקרים רבים ממצא גאולוגי מוגדר כצונאמיט אך ורק מתוך ההקשר לרצף המשקעים שבתוכם הוא מצוי. לדוגמה, שכבה שמכילה מאובנים שמקורם בים העמוק אך נמצאת בתוך רצף של משקעים יבשתיים הרחק מהחוף והרחק מתחום ההשפעה של סערות חזקות, עשויה להעיד על צונאמי קדום. אולם לרוב אין הדברים חד משמעיים ונדרשת מידה של שיקול דעת וביקורתיות בקביעה האם ממצא מסוים מהווה עדות לצונאמי.

עדידות ארכיאולוגיות

נזק והרס שנתגלו באתרים ארכיאולוגיים חופיים או ימיים עשויים גם הם להעיד על צונאמי, אך גם כאן אין הדברים פשוטים. הפיתוי למצוא עדיויות לקטסטרופה היסטורית



איור 1. אירועי צונאמי שהתרחשו לאחר רעידות אדמה מקומיות באגן המזרחי של הים התיכון.



איור 2. אירועי צונאמי שנצרו במקורות רחוקים יותר בים התיכון.

מהירות ההתקדמות של הצונאמי בקרבת החוף (עשרות קמ"ש) גבוהה ממהירות ריצה של אדם, וכשמבחינים בגל המגיע כבר מאוחר מכדי לברוח!

מבוקרים במעבדה, וגם כאן נעזרים בתוצאות לכיול מודלים והתאמתם למציאות. מודלים שמקבלים תוקף מאפשרים ללמוד על התופעה ומאפייניה, כולל חיזוי והערכות סיכון. כאשר מדמים תרחיש צונאמי, מזינים את המודל הממוחשב בתנאי ההתחלה של הגורם לצונאמי (למשל רעידת אדמה) ובמודל גובה דיגיטלי של קרקעית הים (בתימטריה) ואזורי החוף הסמוכים. התוכנה "מתרגמת" את תנועת הגורם לצונאמי להפרעה בגוף המים ומחשבת את התקדמות הגלים שנוצרו על גבי מודל הגובה. החישוב מאפשר לאפיין כמותית את תנועת הצונאמי במרחב ובזמן, כולל גובה הגלים בים ובחוף, זמן הגעתו של הגל הראשון לחוף מרגע תחילת האירוע, מהלך ההצפה של החוף, וכדומה. ככל שדימוי התהליך וסריג הגבהים מפורטים יותר, כך החישוב מצריך משאבי מחשב גדולים יותר ומשכו מתארך. כיום, זמן החישוב עדיין ארוך יותר מזמן ההתרעה לצונאמי בישראל ונדרש קיצור דרך, למשל בעזרת הכנה מראש של מרב התרחישים האפשריים. אם וכאשר יתרחש אירוע מסוים, אפשר יהיה לשלף בזמן אמת את התרחיש המתאים לו ביותר ולהיערך לפיו.

מושך הרבה יותר מאשר לייחס את הנזק לסתם כשל הנדסי או אף לסופות גלים חורפיות חריגות בעוצמתן שזמן המחזור שלהן עשרות עד מאות שנים. כך, למשל, לאחרונה נטען ששובר הגלים הראשי של נמל הורדוס בקיסריה נהרס מגלי צונאמי שנוצרו בשל רעידת האדמה של שנת 115 לספירה. ואולם מתברר שדי היה בגלי סערה שכיחים כדי למוטט את שובר הגלים ההרודיאני אשר הוצב על גבי הקרקעית החולית של הים. כך או אחרת, העדויות לרוב אינן חד משמעיות וראוי להציג לפני הקורא את מגוון השיקולים והסיבות להרס כדי שיוכל להתרשם ולחוות דעה עצמאית.

מודלים, תוכנות חישוב וניסויי מעבדה

בשל מיעוט תצפיות וניסיון המוגבל לחלון זמן גאולוגי קצר, פונים החוקרים לדימוי גלי הצונאמי והתפשטותם במרחב בעזרת מודלים מתמטיים ופיזיקליים. אלה גם אלה משמשים להרצת תרחישים בעזרת תוכנות מחשב מתקדמות והתוצאות נבדקות מול נתוני אמת שנמדדו באירועים מתועדים. הדמיות צונאמי נעשות גם בעזרת ניסויים

טבלה 2: אירועי צונאמי משמעותיים שפקדו את חופי מזרח הים התיכון

תאריך האירוע	חופים שנפגעו	היקף	הגורם	הערות
1600-1627 לפנה"ס	כרתים, יוון, תורכיה	רחב	התפרצות הר הגעש סנטורני (ת-רה) בים האגאי	סביר להניח שהגיע לישראל, אך העדויות לכך מוטלות בספק
1365±5 לפנה"ס	אוגרית (ליד לטקיה, סוריה)	מקומי	לא ידוע	הים הציף את העיר וחציה נהרס
אמצע המאה השנייה לפנה"ס	בין צור ועכו	מקומי	לא ידוע	הים הציף את החוף
23±3 לפנה"ס	בין אלכסנדריה ופלוסיום (צפון סיני)	מקומי	לא ידוע	
13 בדצמבר 115 לספה"נ?	בין קיסריה ליבנה	מקומי	רעידת אדמה ביבשה בצפון-מערב סוריה	ספק צונאמי; המקורות ההיסטוריים והעדויות הגאולוגיות אינם חד משמעיים
21 ביולי 365	אלכסנדריה, יוון, כרתים, הים האדריאטי, סיציליה	רחב	רעידת אדמה חזקה בכרתים	נפגעים רבים ונזק רב באלכסנדריה
9 ביולי 551	לבנון וצפון ישראל, יתכן גם בקיסריה	מקומי	רעידת אדמה בים מול חופי לבנון	נזק בערי החוף בלבנון, לווה בנסיגה חריפה של הים

לא ברור אם הדיווח ההיסטורי מתייחס לים התיכון, לכנרת או לים המלח (ראו קטלוגים ברשימת לקריאה נוספת)	רעידת אדמה בעמק הירדן	מקומי	(?) דרום לבנון וצפון ישראל	18 בינואר 746 (ייתכן 749)
	רעידת אדמה בקרבת מקום	מקומי	מפרץ איסקנדרון	בין 30 בדצמבר 802 ל-19 בדצמבר 803
נמל עכו יב ש לפרק זמן	רעידת אדמה, ככל הנראה בעמק הירדן	מקומי	צפון ישראל	5 בדצמבר 1033 (ייתכן 4 בינואר 1034)
	רעידת אדמה בקרבת מקום	מקומי	מפרץ איסקנדרון	בין 12 במרס 1036 ל-11 במרס 1037
הים נסוג באופן משמעותי וחזר	רעידת אדמה, ככל הנראה במרכז או דרום ישראל	מקומי	החוף הדרומי בישראל	29 במאי 1068
גלים עצומים, נזק בעכו	רעידת אדמה ביבשה בלבנון וצפון ישראל	אזורי	דרום לבנון וצפון ישראל, קפריסין	20 במאי 1202
נמל פאפוס יב ש לחלוטין	רעידת אדמה בדרום קפריסין	מקומי	לימסול, פאפוס (קפריסין)	11 במאי 1222
הצפה בעכו	רעידת אדמה חזקה באזור כרתים	רחב	אלכסנדריה, עכו, כרתים	8 באוגוסט 1303
סירות נזרקו לחוף	רעידת אדמה ביבשה? בצפון מערב סוריה	מקומי	צפון סוריה	29 בדצמבר 1408
הים כיפו נסוג ולאחר מכן חזר והציף	רעידת אדמה, יתכן בעמק הירדן	מקומי	בין יפו לעזה	14 בינואר 1546
הצפה בעכו לגובה 2-2.5 מ'	רעידת אדמה ביבשה בגבול סוריה לבנון	מקומי	לבנון וצפון ישראל	30 באוקטובר 1759
נזק בעכו	רעידת אדמה ביבשה בגבול סוריה לבנון	אזורי ?	ישראל, אזור הדלתה של הנילוס	25 בנובמבר 1759
הים הציף את הנמל באלכסנדריה	רעידת אדמה בים האגאי	אזורי	אלכסנדריה, יוון, איטליה?	24 ביוני 1870
הים הציף את החוף בקרבת אנטיוכיה	רעידת אדמה, ככל הנראה ביבשה, בצפון מערב סוריה	מקומי	צפון סוריה	3 באפריל 1872
עשרות אלפי נפגעים והרס מאסיבי במסינה ובמיצר הסמוך	רעידת אדמה וגלישה תת-ימית במצרי מסינה, סיציליה, איטליה	רחב	סיציליה, דרום איטליה, חופי לוב ומערב מצרים עד אלכסנדריה	28 בדצמבר 1908
הצונאמי לא גרם נזק	רעידת אדמה בים, דרומית מערבית לקפריסין	מקומי	קפריסין ודרום תורכיה	10 בספטמבר 1953
נזקים באיי יוון, צונאמי חלש נרשם בנמל יפו	רעידת אדמה וגלישה תת-ימית בים האגאי	אזורי	הים האגאי, נמל יפו, נמל חיפה?	9 ביולי 1956

הרשימה כוללת את אירועי הצונאמי הבולטים ביותר שהתרחשו בחוף המזרחי של הים התיכון, ממצרים בדרום ועד מפרץ איסקנדרון בתורכיה בצפון, ובקפריסין, כפי שעולה מדיווחים היסטוריים. האירוע משנת 1956 תועד באזורנו במכשירים בלבד. צונאמי שפגע באתר אחד או קטע חוף מצומצם לכמה עשרות ק"מ הוגדר כמקומי, אירוע שהשפיע על רצועת חוף באורך כמה מאות ק"מ הוגדר אזורי, ואירוע שהשפיע על כל האגן המזרחי של הים התיכון הוגדר כרחב.

צונאמי בישראל ובאזורנו

הניתוח ההיסטורי מלמד שבישראל פגע מגוון רחב של סוגי צונאמי (ראו אירורים 11-2 וטבלה 2). בייחוד מפתיע הדיווח המוקדם ביותר המוכר לנו: בחפירות תל עמרנה במצרים נמצא לוח חרס ועליו רשומה בכתב יתדות הודעה ממלך צור למלך מצרים על כך שאוגרית, עיר הנמצאת לחוף הים התיכון בצפון סוריה, הוצפה וחציה נהרס. לא נכתב מה היה הגורם להצפה ועד כה לא נודע על מאורע זה ממקורות היסטוריים חלופיים. זמן המאורע נקבע ל- 1365 ± 5 לפנה"ס, וכמו כן נמצא שחומר הגלם ממנו הוכן לוח החרס דומה לחומרים שנמצאים באזור אוגרית, כלומר ככל הנראה המכתב מקורי. אפשר כמובן להניח שבאותו הזמן קרתה באזור רעידת אדמה, אך גם לא מן הנמנע שההצפה נגרמה מגלישה תת-ימית ספונטנית, שלא כתוצאה מאירוע סיסמי.

מתברר שמרבית אירועי הצונאמי שפגעו בחופי ישראל התרחשו לאחר רעידת אדמה יבשתית, לאו דווקא חזקה במיוחד, במגניטודה 6-6.5 ומעלה. מחקרי שטח של רעידות אדמה עתיקות (פליאו-סיסמולוגיה) ואתרים ארכיאולוגיים שבהם זוהו נזקים מרעידות אדמה (ארכיאו-סיסמולוגיה), יכולים להעיד במקרים מסוימים על המיקום האפשרי של מוקד הרעש. במקביל, הבתימטריה (הטופוגרפיה) של מדרון היבשת בישראל מראה צלקות רבות בצורת סהר, צורה אופיינית לגלישות קרקע, ולמרגלות המדרון נערם חומר גלוש רב. מכאן אפשר להסיק שרעידת אדמה חזקה בבקע הירדן, ים המלח והערבה (לאורך השבר הסורי-אפריקאי) עשויה לגרום לכשל הקרקעית במדרון היבשת, והגלישה היא זו אשר תחולל את הצונאמי. דוגמה לכך היא רעידת האדמה משנת 1202 לספירה, אשר לגביה יש דיווח על צונאמי מול חופי דרום לבנון וצפון ישראל, ואף בקפריסין הסמוכה. עדות ארכיאו-סיסמית מרשימה לגבי מוקד רעש זה נמצאה במצד עתרת שבדרום עמק החולה. עם זאת, מיקומה של הגלישה התת-ימית מאירוע זה עדיין לא פוענח.

הניסיון מראה שמגניטודה 7-7.5 מהווה מעין סף תחתון לרעידות אדמה ימיות הגורמות לצונאמי. רעידות חלשות יותר אינן גורמות לשינוי מספיק חריף בקרקעית הים ולכן אינן מסוכנות. שתי החזקות מבין אלה שעברו את הסף אירעו בשנים 365 ו-1303 לספירה; עוצמתן נאמדה בדרגה 8 ומעלה והמוקד שלהן מוקם סביב כרתים. הצונאמי של שנת 365 גרם לאבדות ולנזקים רבים באלכסנדריה שבמצרים, וזה של שנת 1303 פגע בעכו.

ראה שהצונאמי המפורסם ביותר באגן המזרחי של

הים התיכון הוא זה שנגרם כתוצאה מהתפרצות הר הגעש סנטוריני (תְּרָה) שבים האגאי, כנראה בסביבות 1627-1600 לפנה"ס. עד כה לא נמצאו עדויות בכתב לאירוע זה, אך הממצאים הגאולוגיים והארכיאולוגיים על התפרצות הר הגעש וקריסתו, והצונאמי שבא בעקבותיהם, מעידים ללא ספק שהיה זה אירוע קטסטרופלי, מהבולטים שהתרחשו על פני כדור הארץ באלפי השנים האחרונות. בין השאר נטען שאירועים אלה גרמו לנפילתה של האימפריה המינואית בכרתים ואולי אף לעשר המכות במצרים, נושאים שנדונים מעת לעת בספרות המקצועית והפופולרית ללא מסקנה חד משמעית. עוד הוצע שאבני פומיס (Pumice, אבן ממקור וולקני, קלה, ספוגית וצפה במים) ומצבורי צדפים שנמצאו על גבעות ורכסים סמוכים לחוף הים התיכון בישראל בגובה של כחמישה מטרים מעל פני הים, מהווים עדות לצונאמי הזה. ואולם בחינה מדוקדקת של העדויות הללו מעלה שאין הכרח בצונאמי ליצירתן ובחלקן אין ממש, גם אם הסיפור מצית את הדמיון ואף ייתכן שצונאמי זה באמת פגע בישראל.

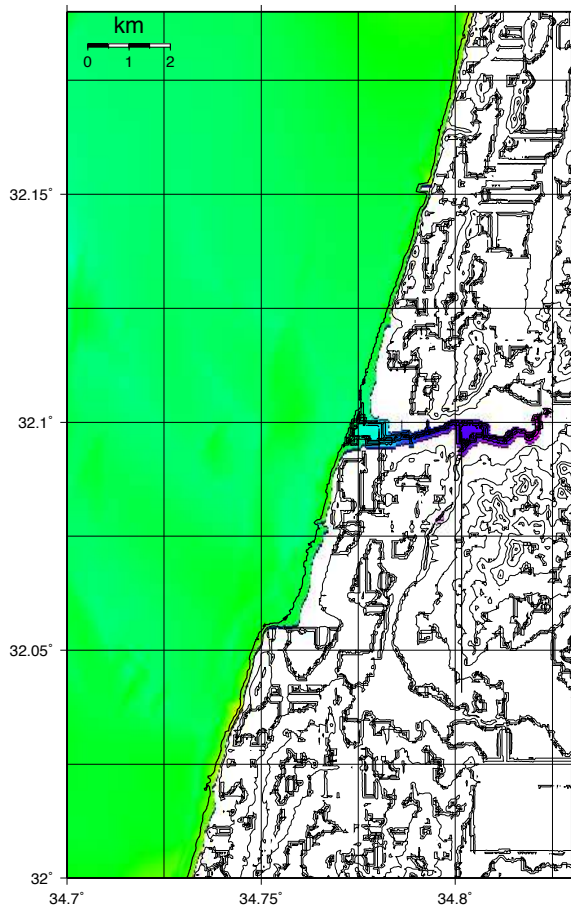
בספרות מוזכר אירוע משנת 198 לפנה"ס בחוף המזרחי של הים התיכון, ומסופר שם שמיד לאחר הופעתו של שביט אירעה רעידת אדמה מלווה בנחשול-ים. בחינת המקורות ההיסטוריים העלתה שהדיווח לגבי האירוע משנת 198 לפנה"ס הוא למעשה בדיון, המשכפל אירוע מהשנים 372-373 לפנה"ס שאכן התרחש במפרץ קוריתוס ביוון.

בשנים האחרונות התברר שרעידות אדמה רבות מאוד ואירועי צונאמי מוזכרים בספרות המקצועית בטעות או עקב פרשנות שגויה, ולכמה מהם חסר מקור היסטורי מוסמך. למשל, בספרות המקובלת מוזכרים כ-60 אירועי צונאמי שפגעו בחוף המזרחי של הים התיכון בשלושת אלפי השנים האחרונות, אולם רק כשליש מהדיווחים הללו אמינים. ללא סינון האירועים השגויים היתה הערכת הסיכון לצונאמי בישראל חמורה פי שלושה.

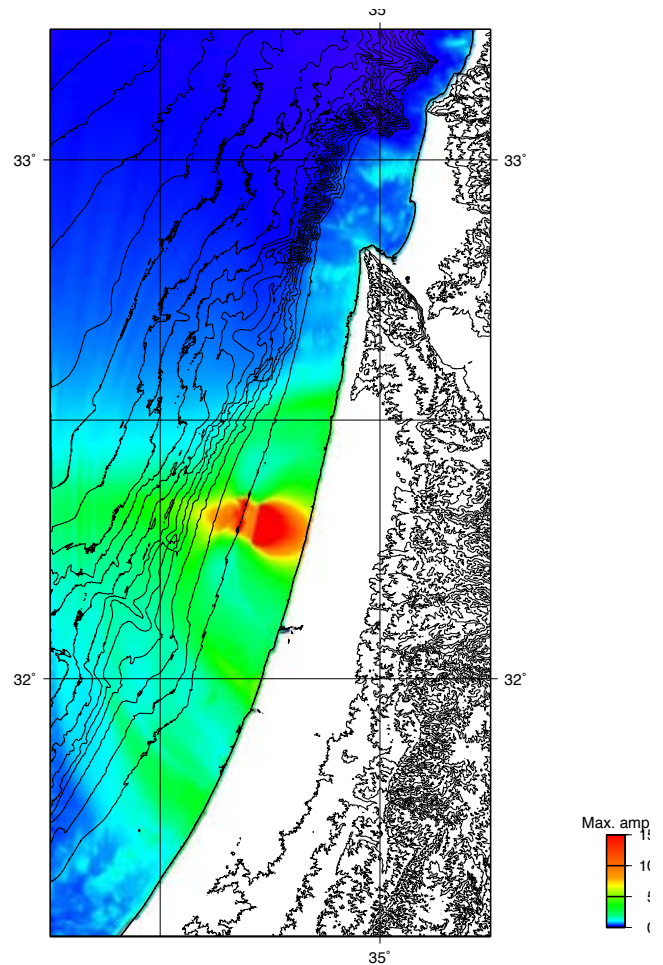
לאור הבנת הטקטוניקה בים התיכון, צפויים גם אירועי צונאמי מסוגים שלא הופיעו בתיעוד ההיסטורי.

קיים מגוון רחב של גורמים מזוהים לצונאמי במזרח הים התיכון, אולם רק מקצתם באו לביטוי בקטלוג ההיסטורי. ייתכן שהגורמים האחרים אכן יצרו צונאמי אך הם לא תועדו, ואפשר גם שחלון הזמן ההיסטורי קצר מכדי לכלול אירועים שזמן המחזור שלהם ארוך. כך, למשל, נמצאו עדויות לגלישות ענק תת-ימיות במדרון היבשת של ישראל שתכיפותן אחת למאה אלף שנה ויותר; זמן החזרה האפשרי של אירועים מסוג התפרצות הסנטוריני הוא כעשרים וחמישה אלף שנה; קיימות

תרחיש צונאמי כתוצאה מגלישה תת ימית מול מרכז הארץ. נפח הגלישה כ-5 ק"מ מעוקב. מתוך עבודתו של Thio (2009).



האזור המועד להצפה לאורך חופי גוש דן, תחום בין קו החוף (רציף) לקו ההצפה המרבית (מקוקו). שימו לב להצפה האפשרית באזור שפך הירקון.



גובה גל מרבי לאורך החוף בישראל. גובה הגל המרבי על פי מקרא הצבעים וסרגל הגובה לצד המפה.

המדויק שבו יתרחש צונאמי, אך בהכירנו את התהליך המניע תופעות אלה, אין ספק שהן יתרחשו בעתיד. למרות זאת, הטכנולוגיה הקיימת מאפשרת לזהות רעידות אדמה דקות ספורות לאחר שהתרחשו בעזרת רשת סיסמוגרפים, להעריך על פי הניסיון אם ביכולתן לחולל צונאמי, ובמקרים מסוימים אף לאמת או לשלול הערכה זו בזמן אמת בעזרת מדי מפלס-ים וחיישני לחץ מים ביים. כך אפשר להתריע על בואו של צונאמי לאחר שנוצר אך עוד בטרם הגיעו לחופינו.

עדויות להתמוטטות צלע הר הגעש אטנה בסיציליה, איטליה, לפני כ-8,000 שנה, אשר ככל הנראה גרמה לצונאמי שהגיע לישראל. מכאן אפשר להבין כי המידע ההיסטורי מוגבל וכדי לקבל תמונה כוללת יש לזהות לא רק אירועי צונאמי מן העבר אלא גם את כל גורמי הסיכון לצונאמי האפשריים.

הערכת הסיכון לצונאמי בישראל

בדומה לרעידות אדמה, אי אפשר לחזות את המועד

מאפייני הצונאמי

הניסיון והמחקר בעולם מאפשרים לאפיין את הצונאמי ואת הסימנים המבשרים על בואו, ואפשר להסתמך עליהם לצורכי התרעה מוקדמת, היערכות, התגוננות וניסוח כללי התנהגות.

א. הצונאמי עלול להציף את החוף מעבר לתחום השפעת גלי ים וסערה רגילים.

ב. מרבית אירועי הצונאמי בישראל התרחשו לאחר רעידת אדמה חזקה בבקע ים המלח, ככל הנראה במגניטודה 6.5-6 ומעלה. על פי תרחיש זה, זעזועי קרקע חזקים וארוכים יורגשו בעוצמה רבה בכל הארץ ויקידמו בכמה דקות את בואו של הצונאמי. אף שרק חלק מהרעידות החזקות ייצרו צונאמי, כדאי להתייחס לכולן כאל התרעה משום שהנזק האפשרי עולה על הטרחה הכרוכה באזעקת שווא. התעלמות מרעידת האדמה כסימן התרעה לצונאמי עלולה להתברר כטעות שתוביל לאסון שאפשר היה למנוע אותו.

ג. בכמה מהמקרים הצונאמי מתחיל בירידת פני הים ונסיגת קו המים תוך כדי חשיפת שטחים ניכרים של קרקעית הים. מיד לאחר מכן הים שב למקומו ואף מציף את החוף הסמוך. על כן נסיגת הים מהווה סימן אזהרה חד משמעי לצונאמי, ויש להתרחק במהירות מאזור החוף למקום גבוה. נזכיר כאן בקצרה את סיפורה של טילי סמית, ילדה אנגלייה שלמדה על הצונאמי שבועות ספורים קודם לחופשה המשפחתית בראילנד ב-2004. הילדה הבחינה ב"התנהגות" מי הים והזהירה את בני משפחתה, ואלה הצליחו לפנות כ-100 בני אדם מהחוף לפני פגיעת הצונאמי.

ד. מהירות ההתקדמות של הצונאמי בקרבת החוף (עשרות קמ"ש) גבוהה ממהירות ריצה של אדם, וכשמבחינים בגל המגיע מאוחר מכדי לברוח!

ה. רעש חזק עלול ללוות את בואו של הצונאמי, לעתים זמן מה לפניו.

ו. הצונאמי עלול להופיע כעלייה מהירה של פני הים ולאוו דווקא כגל רגיל. במקרים אחרים הצונאמי מופיע כנד מים או שיטפון מהיר שבחזיתו סחף רב, רסק, שברים והריסות.

ז. אירוע צונאמי כולל סדרה של גלים גבוהים וארוכים במשך כמה שעות, כאשר הגל הראשון אינו הגבוה ביותר בהכרח או זה שיגרם להצפה הנרחבת ביותר!

ח. הים יתנהג בשונה מהמוכר וייתכנו מערבולות, זרמים מקבילים לחוף, וכדומה. צפויים זרמים תת-ימיים חזקים במיוחד במפרצים סגורים, נמלי ים, מעגנים, וכד'. הזרמים עלולים להימשך שעות רבות, גם לאחר שהים נרגע לכאורה.

ט. גלי הצונאמי אינם בהכרח גבוהים יותר מגלי סערה רגילים, אולם הם ארוכים מאוד ולכן מביאים לחוף כמויות מים גדולות הרבה יותר מגלי סערה. בעוד שבסערה הגלים תכופים ומופיעים מדי כמה עשרות שניות, גל צונאמי בודד עלול להמשך דקות ארוכות.

מקורות הסיכון

ניתוח רשימת אירועי הצונאמי ההיסטוריים, הגאולוגיה והבתימטריה של האגן המזרחי של הים התיכון, העלה שאזור הים האגאי וקרתיים, סביבות קפריסין והעתקים בים מול חופי לבנון, הם המקור העיקרי לרעידות אדמה גורמות צונאמי (וראו איור 3). לגבי גלישות קרקע נמצא שמדרון היבשת של ישראל הוא הגורם העיקרי, ולאחריו הדלתא של הנילוס והר האטנה. לכל אחת ממשפחות האירועים הללו נאמדה תדירות ההופעה האופיינית, כך שאפשר לשקלל את תרומתה היחסית לסיכון המצטבר. על בסיס הנחה זו אפשר היה לבצע את הרצת התרחישים המדמים צונאמי לאורך חופי ישראל.

קיימת גמישות רבה בבחירת הפרמטרים של תרחישי הצונאמי וברור שבחירה זו קובעת מראש את חומרתו של התרחיש. הצונאמי באוקיינוס ההודי שהתרחש בשנת 2004 המחיש את החשיבות בגישה מחמירה לצורך הערכת הסיכון. עיקר המידע שמתקבל מהתרחישים כולל את גובה הגלים המרבי בים ובחוף ואת השטח המועד להצפה או לנסיגת-ים. כמו כן נעשה רישום של הופעת הגלים לאורך הזמן (סדרת זמן) במקומות מייצגים ולבסוף מתקבלים מועדי הגעתם לחוף מרגע תחילת האירוע, כלומר את חלון הזמן להתרעה.

גובה הגל הוא המאפיין המוחשי והציורי ביותר שיש לנו עניין בו, אך לבדו הוא אינו מספק וחשוב לדעת גם מהו אורך הגל הצפוי. שילוב שני מאפיינים אלה, תוך התחשבות בתבליט החוף, קובע את התחום המועד להצפה. לצרכים הנדסיים יש עניין גם במהירויות הזרימה והמומנט או הלחץ שהמים מסוגלים להפעיל על מבנים ותשתיות שנמצאים בתחום ההצפה. מידע ראשוני מסוג זה כבר קיים במכון הגאולוגי לישראל והוא זמין לרשות הציבור (וראו קישור ב"לקריאה נוספת").

מפות האזורים המועדים להצפה

בשלב הראשון נבנו מפות של האזורים המועדים להצפה בחופי מפרץ חיפה, גוש דן, אשדוד ואשקלון, עבורם קיים מודל גובה דיגיטלי מפורט. אזורי הסיכון מוצגים על גבי מפות הזמינות באתר האינטרנט של המכון הגאולוגי. המפות משקפות את הסיכון הנובע מסך כל אירועי הקיצון האפשריים ומציגות את הסיכון החזוי החמור ביותר, ללא תלות בזמן. המפה קלה להבנה ונוחה לשימוש גם לצרכנים שאינם אנשי מקצוע.

המפות מאפשרות לאתר את המבנים והתשתיות

כללי התנהגות בזמן צונאמי

אחד או יותר מהסימנים הבאים עלול לבשר על בואו של צונאמי: רעידת אדמה חזקה, עליית פני הים והצפת החוף, נסיגת המים וחשיפת קרקעית הים, התנהגות מוזרה של הים, רעש חזק. במקרה של צונאמי או חשש מצונאמי: יש להתרחק מיד מהים, לעלות למקום גבוה, ולהמתין כמה שעות עד שהאירוע יסתיים. אין להמעיט בסכנה הנשקפת גם אם לכאורה הצונאמי נראה חלש. אין להתקרב לחוף או לרדת לקרקעית הים שנחשפה מאחר שהים צפוי לחזור, ובמהירות גבוהה.

תודות

המחבר מבקש להודות לד"ר דב צביאלי, מהמכון ללימודי ים ע"ש ליאון רקנאטי, אוניברסיטת חיפה, על עזרתו והערותיו המועילות.

ד"ר עמוס סלמון הוא חוקר במכון הגאולוגי, ירושלים.

לקריאה נוספת

רקע כללי:

Tsunami Teacher, 2009: http://ioc3.unesco.org/TsunamiTeacher/tsunami_hlp.htm

אתר המכון הגאולוגי:
<http://gsi.gov.il>

קטלוג היסטורי של רעידות אדמה וצונאמי באזור הים התיכון: Guidoboni, E., and Comastri, A., 2005. Catalogue of earthquakes and tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th Century. INGV-SGA, Italy.

Guidoboni, E., Comastri, A. and Traina, G., 1994. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th Century. ING-SGA, Bologna, Italy.

צונאמי בישראל:
שלם, נ., 1956. על נחשולי ים סיסמיים (צונאמים) במזרח הים התיכון. ידיעות החברה לחקירת ארץ ישראל ועתיקותיה, תשט"ז, שנה כ', 159-170.

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, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 3, p. 705-724, doi: 10.1785/0120060147.

Thio, H. K., 2009. Tsunami hazard in Israel. Prepared for the Geological Survey of Israel, by URS Corp., Pasadena, http://www.gsi.gov.il/Eng/_Uploads/264Israel-Tsunami-Hazard.pdf.

החשופים להצפה, כמו גם לתכנן ולבנות מתוך התייחסות לסיכוני צונאמי. אזורים נמוכים הסמוכים לחוף נתונים לסיכון גבוה יותר וככל שמתרחקים מהחוף ועולים לגובה הסיכון יורד. מצוק החוף צפוי לבלום את גלי הצונאמי, אולם מוצאי הנחלים לים מועדים להצפה נרחבת. כמו כן הצונאמי ישפיע על צורת פני השטח, בפרט במקומות בהם התשתית רכה ומורכבת למשל מחול, חמרה, חרסית, או בנויה מכורכר פריך.

סיכום

אי אפשר אמנם למנוע התרחשות צונאמי אבל אפשר לצפות את ממדיו, להעריך באיזו תדירות יתרחש, ולשרטט את האזורים המועדים להצפה. בעשור האחרון מתאפשר לזהות היווצרותו של צונאמי בזמן אמת ולהתריע על בואו לפני שיגיע לחוף. מידע זה מאפשר להיערך טוב יותר לטווח ארוך, להתריע על בוא הצונאמי, לתכנן ולבנות בהתאם לסיכון. כמו כן יאפשר המידע לחנך את הציבור ולהקנות לו כלי עזר להתמודדות עם הצונאמי בזמן אמת.

המגבלות ואי הוודאות הכרוכים בבניית מפות ההצפה ברורים ומרבייתם הוצגו כאן. עם זאת, המפות הללו ראשונות מסוגן בישראל והן מקנות הערכה לגבי מידת הסיכון מצונאמי, ומאפשרות להתחיל בהיערכות לאירועים אלה. ❖

ביום א' 29.11.2009, בשעות 19:00-22:00, יתארח ד"ר עמוס סלמון בפורום "גליליאו" וישוחח עם הקוראים והגולשים על גלים, רעידות אדמה ואפשרות לצונאמי בישראל. המעוניינים מוזמנים לפורום מדע וחברה באתר "גליליאו":
http://www.ifeel.co.il/forum_mada