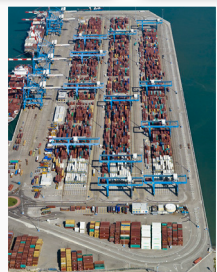
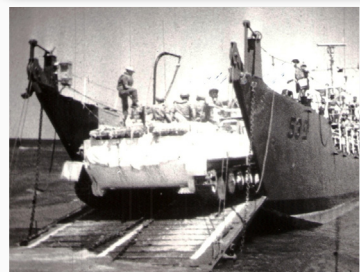


הערכה אסטרטגית ימית לישראל 2019/20

עורך ראשי: פרופ' שאול חורב

עורך והפיק: אהוד גובן



15. צונמי בים תיכון

דבר

מבוא

ריכוז האוכלוסייה בישראל לאורך החוף כמו גם מיקום תשתיות קריטיות (הפקת חשמל, התפלת מים וכולי) באזור זה, יחד עם היסטוריה של אירועי רעידות אדמה במזרח הים התיכון מעלים את הסיכון הלאומי לנזק כבד עקב פגיעת צונמי בחופי ישראל.

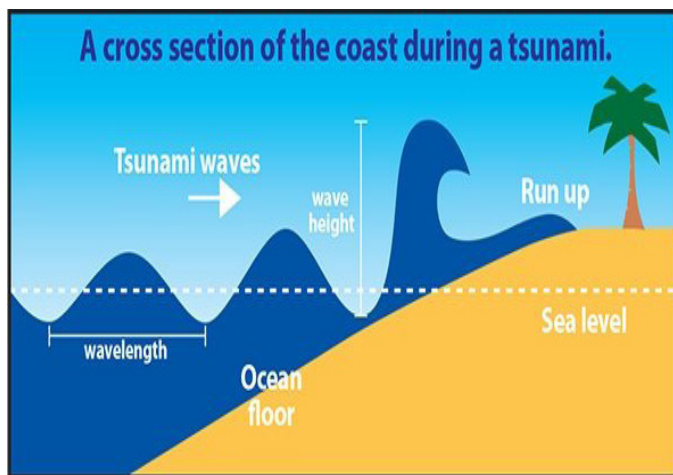
צונמי ביפנית או "גל נמל" הוא אחת מתופעות הטבע הבלתי צפויות וההרסניות ביותר בעולם. המראות הקשים מאירועי הצונמי האחרונים בעולם בהודו (2004), אינדונזיה (2004, 2018) ויפן (2011) אשר צרובים היטב בזיכרון, גבו עשרות אלפי קורבנות בנפש, וגרמו להרס עצום לתשתיות ולערים לאורך החוף.

מטרת הפרק לבחון בקצרה את הרקע התאורטי ואת הסיבות להיווצרותו של צונמי, את ההיסטוריה האזורית ואת פוטנציאל הנזק למדינת ישראל בעקבות אירוע צונמי משמעותי. כמו כן לבדוק מהן הפעולות שנעשו על מנת להעלות את רמת המוכנות לאירוע צונמי בישראל.

רקע תאורטי

כמו כל גל גם גלי הצונמי הם למעשה הפרעה של אנרגייה הנעה בתווך. בתופעה המוכרת כגלים בים, הידועים גם כ"גלי רוח" בשל העובדה כי הרוח היא שמסיעה את המים, האנרגייה של הגל עוברת בשכבה העליונה בלבד של המים, זו המושפעת מהרוח. האנרגייה האצורה בגלי רוח מושפעת משלושה פרמטרים – מרחב הנשיבה, זמן הנשיבה ועוצמת הנשיבה של הרוח. גם בגלי גיבוע (Swell), שהם למעשה 'שאריות' רחוקות של גלי רוח לאחר שהרוח שכחה, האנרגייה עוברת רק בשכבה העליונה של המים. לעומת גלים אלו, בגלי הצונמי האנרגייה נוצרת בעקבות הפרעה פתאומית וחרیפה העוברת בתווך לכל גובהה של עמודת המים, המגיעה לעיתים למאות ואף אלפי מטרים של עומק ים. אורך הגל, במקרה של צונמי יכול להגיע למאות ק"מ, וזמן המחזור של הגל עד כדי עשרות דקות. מהירות הגל עצומה ויכולה להגיע לכמה מאות ק"מ בשעה, אולם בים הפתוח גובהו נמוך מאוד, ומגיע על פי רוב לכדי כמה עשרות ס"מ בלבד, ועל כן הוא אינו מורגש כמעט. נתונים פיזיקליים אלו הם שהופכים את תופעת גלי הצונמי להרסנית כל כך.¹

1 גלנטי, ברק, עמוס סלמון ואריק גולן. 2014. "פוטנציאל הפגיעה של גלי צונמי בתשתיות ימיות לאורך חופי הים התיכון של ישראל – דוגמאות להמחשה". חיפה: המכון לחקר ימים ואגמים לישראל. <https://www.mapi.gov.il/earthquake/documents/tsunamireport.pdf>



איור 1: המחשת תהליך הפגיעה של הגל בחוף

ישנן מגוון סיבות העלולות לגרום להיווצרותם של גלי צונמי. העיקרית שבהן היא רעידת אדמה חריפה שמוקדה נמצא בים. הסיבה השנייה בשכיחותה היא גלישות קרקע על מדף היבשת, בין אם הן טבעיות ובין אם מקורן בעבודות מעשה ידי אדם. סיבות נוספות אך שכיחות הרבה פחות הן התפרצויות געשיות תת-מימיות, פיצוצים גרעיניים, גלישות קרחונים, ואף פגיעה של מטאוריטים.²

הנתונים הבסיסיים של הגל שהופכים אותו להרסני כל כך בעת פגיעתו ביבשה הם מהירותו של הגל, והעובדה כי האנרגייה אצורה על פני כל גובהה של עמודת המים. בעת ההתקרבות של הגל ליבשה (איור 1) עומק הים הולך ונהיה רדוד, ובשל כך מהירותו של הגל מואטת לכדי מספר מטרים בשנייה בלבד, ואורכו מתקצר לכמה עשרות ק"מ. האנרגייה, שכידוע על פי חוק שימור האנרגייה אינה הולכת לאיבוד, מתחילה "לדחוף" את המים כלפי מעלה לגובה שיכול להגיע לכדי מספר מטרים. עוצמת הנזק והיקף ההצפות המתרחשות בעקבות הגל תלוי בעוצמתו, בגרדיאנט החוף (חריף/מתון) ובמאפייני החוף (תלול/שטוח).³

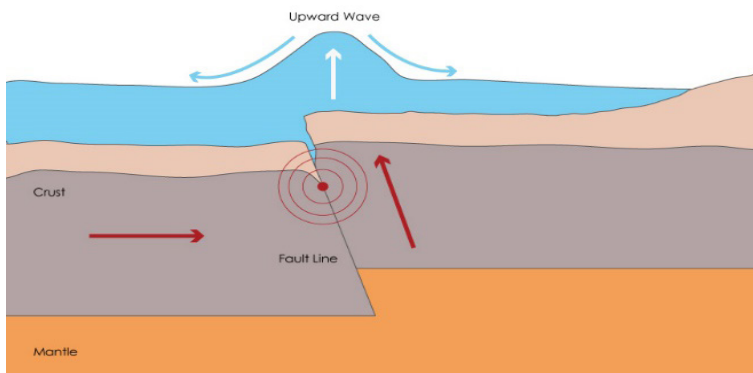
בדרך כלל הפגיעה של הגל בחוף מתחילה בשפילה מהירה של המים, מה שמדווח כ"היעלמות של המים". קו המים יכול לסגת לאחור במקרים מסוימים עד לכדי כמה עשרות מטרים. מיד לאחר מכן נוצרת גאות מהירה תוך עלייה של קו המים שמציפה וסוחפת את

2 סלמון, עמוס, דב רוזן, יפים גיטרמן, אמיר יהב, שלום בן אריה, יוסי דבוטון, דלית דובר, מיכאל ואטנמכר וטוביה מילוא. 2014. המלצה למדיניות, עקרונות התרעה ומסגרת להיערכות לצונאמי בישראל. ירושלים: המכון הגאולוגי. [http://www.gsi.gov.il/_uploads/ftp/GsiReport/2014/Salamon-\(Amos\)-GSI-16-2014.pdf](http://www.gsi.gov.il/_uploads/ftp/GsiReport/2014/Salamon-(Amos)-GSI-16-2014.pdf)

כל מה שעומד בדרכה, וזאת כתלות במאפייני הגל ומאפייני החוף שבו הוא פגע. במקרים ייחודיים ובמאפייני חוף מסוימים עלולים להיווצר גלים נשברים בגובה של כמה עשרות מטרים. סדרת הגלים עלולה לכלול מספר גלים עוקבים, ולהימשך במשך שעות ולעיתים אף יממה שבהן ישנה סחיפה וחזרה של המים מדי כמה שעות.

מאפיינים של צונמי שנוצר בעקבות רעידות אדמה

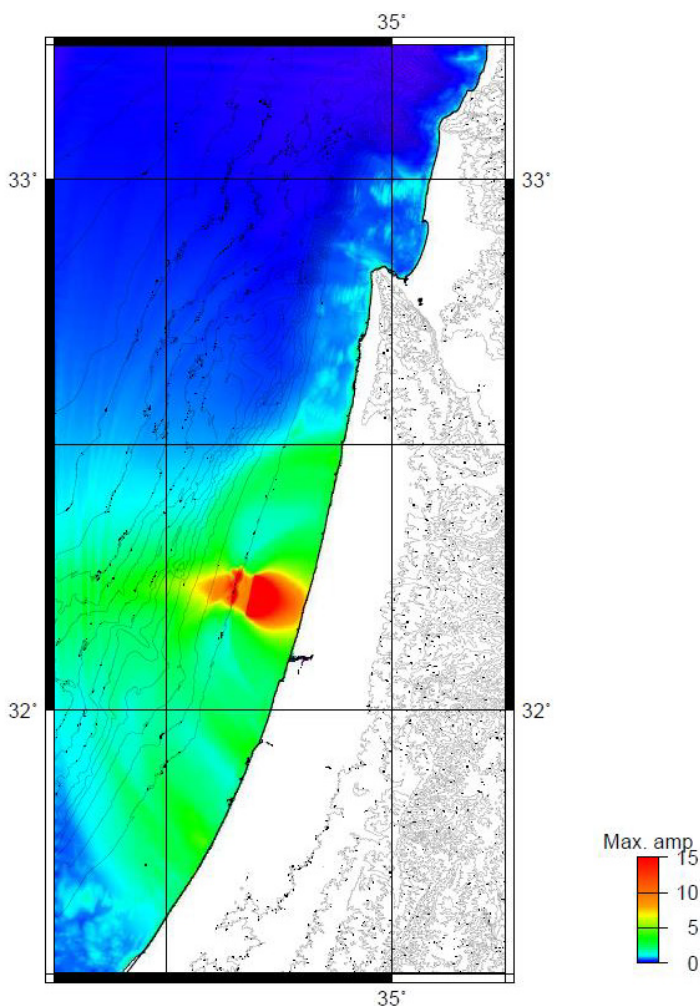
כאמור התופעה השכיחה ביותר היא היווצרות של גל צונמי בעקבות רעידת אדמה. התזוזה של הקרקע גורמת ל"דחיפה" של המים כלפי מעלה (איור 2), מה שגורם לגל להתפשט ב- 360° יחסית לרכב ההסטה האנכי של ההעתק, ובניצב לציר האורך של רעידת האדמה. במתאר כזה הנתונים של הגל הם הנתונים הקלאסיים שצוינו לעיל – אורך גל של עד מאות ק"מ, ומחזור של כמה עשרות דקות. נתונים אלו גורמים לכך שהאנרגיה מתפשטת על פני מרחב גדול מאוד, ועל כן הפגיעה במקטעי חוף היא אחידה ובאורכי גל גדולים.⁴



איור 2: היווצרות צונאמי בעקבות רעידת אדמה

מאפיינים של צונאמי שנוצר בעקבות גלישות קרקע

במקרה של גלישות קרקע מאפייני הגל שנוצר שונים מעט. עוצמתו של הגל (איור 3) תלויה בעובי, בנפח ובמהירות הגלישה של החומר הגולש. זהו מקור נקודתי הנע על קרקעית הים במדרון לאורך כמה מאות מטרים, ועל כן העוצמה הרבה ביותר נוצרת לאורך ציר התנועה של הגלישה, ודועכת ככל שמתרחקים ממוקד הגלישה לצדדים. ביחס לגל הנוצר בעקבות רעידת אדמה, אורך הגל קצר יותר.



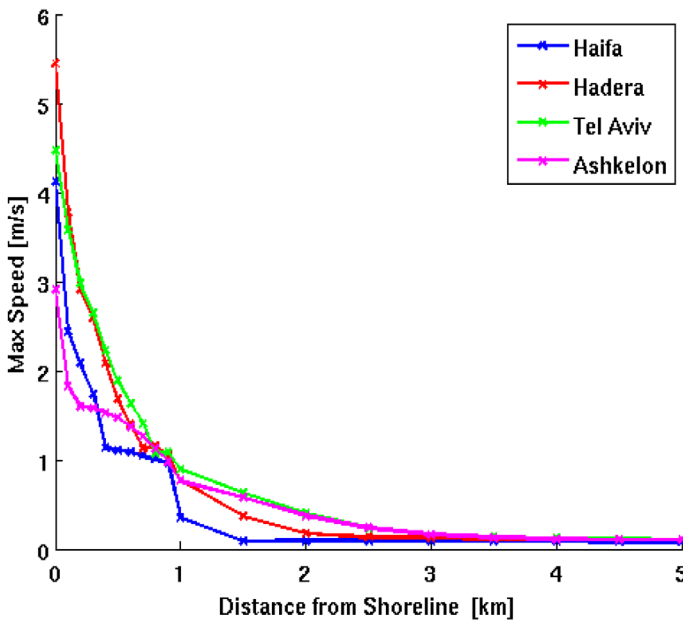
איור 3: תיאור עוצמת צונמי בעקבות גלישת קרקע (סלמון ואחרים 2014)

אפקטי הנזק הצפויים בעקבות גלי צונמי

באופן טבעי הנזק המיידני והברור לעין הוא הצפה של שטחים, אך אין מדובר בנזק היחיד שכן תופעות משניות נוספות עלולות לגרום לנזקים חמורים לתשתיות לאורך החוף. במקרים שבהם עוצמת הגל גדולה ובקרבה לחוף, עשויה מהירות זרימת המים (איור 4) להגיע לכדי עוצמת סחיפה של 3-5 מטרים בשנייה. מהירות זו של המים כשלעצמה עלולה לגרום לנזקים חמורים למבנים, תשתיות, ציוד מיטלטל ועוד. גריפת הציוד המטלטל (כלי רכב, פסולת, סירות וכדומה) והטחתו כנגד מבנים ומתקנים עלולה לגרום לנזקים חמורים לתשתיות מעבר לנזק המיידני שנגרם לציוד עצמו.

תופעות נוספת נוצרת בעקבות שפילת המים שמתרחשת לפני ההצפה של גל הצונמי. "היעלמות" המים עלולה לסכן נמלים, וזאת בעקבות ירידה חדה במפלס המים שגורמת לירידה גם בגובה הציפה של כל השיט הקשורים בנמל, מה שיגרום בתורו לנזקים לתשתיות הנמל בעקבות תלישה של זקפי קשירה, פגיעה ברציפים או הטחה של כלי שיט שמשקלם מאות אלפי טונות על הרציפים. מתקנים רבים הדורשים שאיבה של מי ים כגון תחנות כוח, או מתקני התפלה עלולים להיחשף בשל ירידת מפלס המים להפסקה בשאיבה. אירוע כגון זה עלול להוביל לנזקים חמורים, ואף להרס מוחלט למשאבות ולשאר המכלולים כגון טורבינות לייצור חשמל, מתקני התפלה ועוד.

תופעות צד נוספות העלולות לגרום לנזקים ארוכי טווח הן חלחול אפשרי של מי הים הגואים לתוך מי התהום ובעקבות כך המלחתם. כמו כן, מורפולוגיית החוף עלולה להשתנות ללא הכר בעקבות סחיפת כמויות גדולות של חול מהיבשה לכיוון הים.



איור 4: מהירות הזרימה החזויה (גלנטי, סלמון וגולן 2014)

רקע היסטורי

ההיסטוריה מוכיחה כי אירועי צונמי באגן המזרחי של הים התיכון הם עובדה קיימת. בתרשימים (איור 5) מוצגים אירועי צונמי שהתרחשו באגן המזרחי במהלך אלפי השנים האחרונות הן בעקבות רעידות אדמה (חץ חום), והן בעקבות גלישות קרקע (כיתוב צהוב).

13 דקות לאחר מכן. כך או אחרת, ישנם חוקרים שמצאו עדויות לצונמי במפרץ חיפה, אך התייעוד העיקרי מגיע מתוך רישום גובה פני הים שבוצע בנמל יפו, ומראה כי הייתה עלייה של 28 ס"מ מעל מפלס המים השכיח, במחזורים של 12-15 דקות שנמשכה ליותר מיום שלאחר רעידת האדמה.⁸

פוטנציאל הפגיעה של צונמי בישראל

בטרם נעסוק בפוטנציאל הפגיעה של צונמי בישראל, נדרש לברר תחילה מתי ובאילו מקרים עלול להיווצר צונמי. על פי אנליזות שונות שבוצעו ישנם מספר תנאי סף להיווצרות של צונמי בחופי ישראל. האנליזות בחנו הן מתארים של רעידות אדמה, והן מתארים של גלישות קרקע.

רעידת אדמה בעלת פוטנציאל לייצר צונמי צריכה להתרחש בחלק הדרום מזרחי של ה"קשת ההלנית", בעוצמה של 7 ומעלה בסולם ריכטר. כמו כן מוקד הרעידה צריך להיות רדוד יחסית ועד לעומק של 100 ק"מ מפני הים לכל היותר. על פי התייעוד ההיסטורי, מוערך כי התרחשו לפחות שני אירועים מסוג זה בעוצמה של 8 ומעלה, בחזרתיות של אחת ל-800-1000 שנה. גלישות קרקע נדרשות להיות במדרון היבשת או בדלתה של הנילוס, כשהמוקד במרחב קרוב מ-100 ק"מ מהחוף ובעוצמה של 6 ומעלה. התייעוד ההיסטורי מצביע על שמונה אירועים מוכרים מהסוג הזה בחזרתיות ממוצעת של אחת ל-250 שנה.

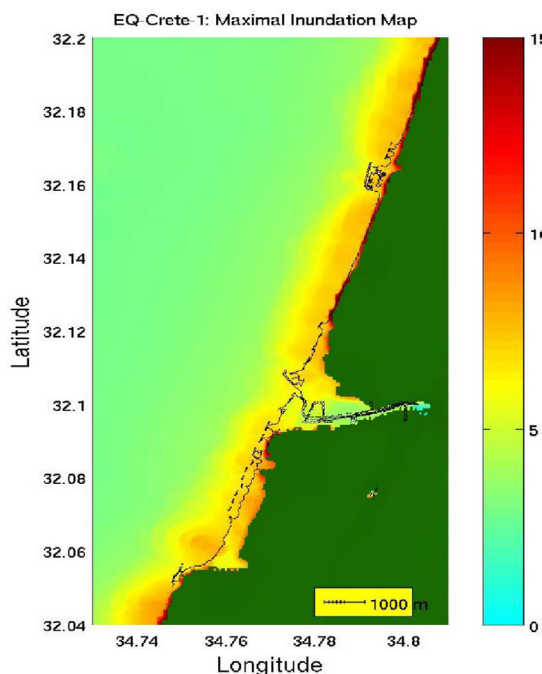
שני דוחות של המכון לחקר ימים ואגמים לישראל,^{9,10} ניתחו את פוטנציאל הפגיעה בתשתיות לאורך החוף בישראל. כמובן שמידת הפגיעה מותנית בעוצמה הצונמי, בתוואי החוף, במצב הים הספציפי בעת האירוע, בעיתוי שלו על פני היממה ובפרמטרים נוספים. מכיוון שהאירועים ההיסטוריים אינם מספקים נתונים כמותיים מספיקים, הניתוח נעשה על בסיס מודלים ממוחשבים. תרחיש הייחוס מבוסס על אירוע הצונמי שקרה בשנת 1303, שבו רעידת אדמה בעוצמה של 8 בקירוב באזור הקשת ההלנית גרמה לצונמי רחב היקף באגן המזרחי. החוקרים אומנם לא ביצעו אנליזות מלאות לאפקט הנזק בכלל רצועת החוף, אך הם כן בחנו מספר אזורים בעלי חשיבות מיוחדת, כגון אזורים מיושבים במיוחד, מתקני תשתיות חשובים, ומתקנים ימיים מיוחדים כגון אסדות ההפקה בדרום ועוד.

8 Beisel, S., L. Chubarov, I. Didenkulova, E. Kit, A. Levin, E. Pelinovsky, Y. Shokin, and M. Sladkevich. 2009. "The 1956 Greek Tsunami Recorded at Yafu, Israel, and Its Numerical Modeling." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114 (9). <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JC005262>

9 גלנטי, ברק, דב רוזן ועמוס סלמון. 2009. "התאמת תוכנות להדמיית צונאמי ויצירת מגוון תרחישים לצורך התרעה מוקדמת." חיפה: המכון לחקר ימים ואגמים לישראל. <https://www.mapi.gov.il/earthquake/documents/d2.pdf>

10 גלנטי ואחרים, 2014.

כפי שניתן לראות בהדמיה (איור 6), היקף ההצפות החזויות באזור תל אביב משמעותי למדי. גובה המים צפוי לעלות באזורים מסוימים עד לגובה מקסימלי של עשרה מטרים ולהציף שטחים נרחבים. באזור פארק הירקון הנמוך יחסית וסביב שפך הנחל (כולל אזור תחנת הכוח רידינג), צפויות להתרחש הצפות נרחבות במיוחד. בנוסף לנזקים הצפויים באזור תל אביב, ניתן ללמוד מהדוחות על נזקים פוטנציאליים נוספים. לדוגמה בחדרה צפויה עלייה וירידה במפלס פני המים ליד מזח הפחם של כעשרה מטרים במצטבר, והפעלת כוח של עשרות טונות על כלונסאות המזח בעקבות מהירות הזרימה הצפויה של המים. כמו כן, צפויה פגיעה חמורה ביניקות של תחנות הכוח ומתקני ההתפלה עקב שפילה/הצפה וסחיפת מיטלטלין ופסולת עד כדי השבתה מוחלטת והרס התחנה.



איור 6: היקף ההצפות החזויות באזור תל אביב (סלמון ואחרים 2014)

היערכות לצונמי בישראל

ההיערכות בישראל החלה בעקבות החלטת ממשלה משנת 2012 הקובעת כי יש לבצע היערכות ברמה הלאומית לאירוע צונמי.¹¹ ההחלטה עוסקת בעיקר בצורך בהקמת מרכז

¹¹ החלטת ממשלה מס' 4738 מיום 7 ביוני 2012: "הקמת מערכת התרעה קצרת מועד ארצית לרעידות אדמה וצונאמי (מערכת "תרועה" ומערכת "מים אדירים")", ובהמשך תיקון מס' 5371 מיום 20 בפברואר 2013.

התראה ארצי, מרכז "נחשול נצפה", ובמתן היכולת להתריע מפני סכנת צונמי בזמן אמת באזורים המועדים על ידי מערכת התראה – "מים אדירים". ייעודו של המרכז הוא להכיל את כלל המרכיבים הנדרשים לזיהוי וניתוח מהיר של רעידות אדמה, על מנת להעריך בזמן אמת את רמת הסכנה מצונמי, ולהעביר את המידע וההתראה באמצעים שונים. חשוב לציין כי המרכז מתמודד עם רמה גבוהה יחסית של אי-ודאות מכיוון שהתראה ברמת סמך גבוהה ניתן להוציא רק לאחר מדידה ודאית של מפלס מי הים ונתונים המעידים על אירוע צונמי מתקרב. בשל כך התכנון הוא לחבר את המרכז למערכות התראה בינלאומיות, ולבצע שיתוף פעולה ותיאום מול מדינות הים התיכון השונות.

זמן ההתראה הצפוי ברעידות מקומיות הוא מספר דקות בלבד, ובאירועים מרוחקים עד כשעתיים לכל היותר. כמו כן, נקבעו פרמטרים ברורים, ועל פי הנתונים הסיסמולוגיים של האירוע קובעים איזו התראה להוציא (היכון/הפעל), ובאיזו רמת סמך.¹² היערכות מסוימת ניתן לראות גם ברמה המוניציפלית, כאשר בשנים האחרונות החלו להופיע בחלק מערי החוף שלטים (איור 7) המסמנים אזורי סיכון מצונמי והכוונה לנתיבי מילוט.



איור 7: שלטי הכוונה באזורי חוף

חרף העובדה כי הדיון על החלטת הממשלה התקיים כבר בשנת 2012 ונקבע כי בתוך שלוש שנים תוקם מערכת ההתראה, חוזה להקמה של המרכז ולהתקנת מערכות ההתראה

נחתם רק ב-2017, והצפי לסיום הקמתו עומד כרגע על 2020. בדוח של מרכז המידע של הכנסת משנת 2017 צוין כי רמת המוכנות של הרשויות המקומיות לצונמי עדיין נמוכה.¹³

סיכום ומסקנות

נראה כי התרחשות של אירוע צונמי משמעותי במזרח הים התיכון הוא רק עניין של זמן. הסכנה מתחדדת לאור העובדה כי ההיסטוריה מוכיחה שאירוע משמעותי מתרחש אחת ל-800-1000 שנה, והאחרון התרחש בשנת 1303. המבנה הגאוגרפי של מדינת ישראל וריכוז התשתיות והאוכלוסייה לאורך רצועת החוף מגדילים משמעותית את פוטנציאל הנזק מצונמי לכה שייתכן שיקשה על המדינה להתאושש ממנו במשך שנים ארוכות. החלטת הממשלה בנושא שקבעה את 2016 כשנת יעד להקמת מרכז התראה מבוצעת בעצלתיים, ומרכז כזה עדיין לא הוקם.

ההיבטים החסרים כיום בהיערכות של המדינה לאירוע צונמי רחב היקף הם:

1. **העלאת רמת המודעות האזרחית** – מרבית האזרחים בישראל אינם מודעים למשמעות השלטים שהוצבו ברחבי החופים, לסכנת הצונמי ולמה שעליהם לעשות בעת התראה על אירוע כזה.
2. **יישום החלטת הממשלה** – קיימים פערים בין ההחלטה ובין קצב היישום בפועל וכן בהיקף התחומים שבהם ההחלטה מטפלת.
3. **טיפול ממוקד בתשתיות חיוניות** – נדרש ניתוח מעמיק יותר של מידת הנזק האפשרי לתשתיות חיוניות, ובעיקר מה ניתן לעשות על מנת למנוע את הנזק או לפחות לצמצם אותו.
4. **נהלי הפעלה/השבתה של מתקנים חיוניים בעת אירוע** – אם אכן השבתת חירום של מתקנים עשויה להנציל חלק מהתשתית, נדרש לקבוע נהלים לביצוע זאת.

13 יכימוביץ-כהן, נורית. 2017. "היערכות ומוכנות הרשויות המקומיות לרעידות אדמה". הכנסת – מרכז המחקר והמידע <http://din-online.info/pdf/kn175.pdf>