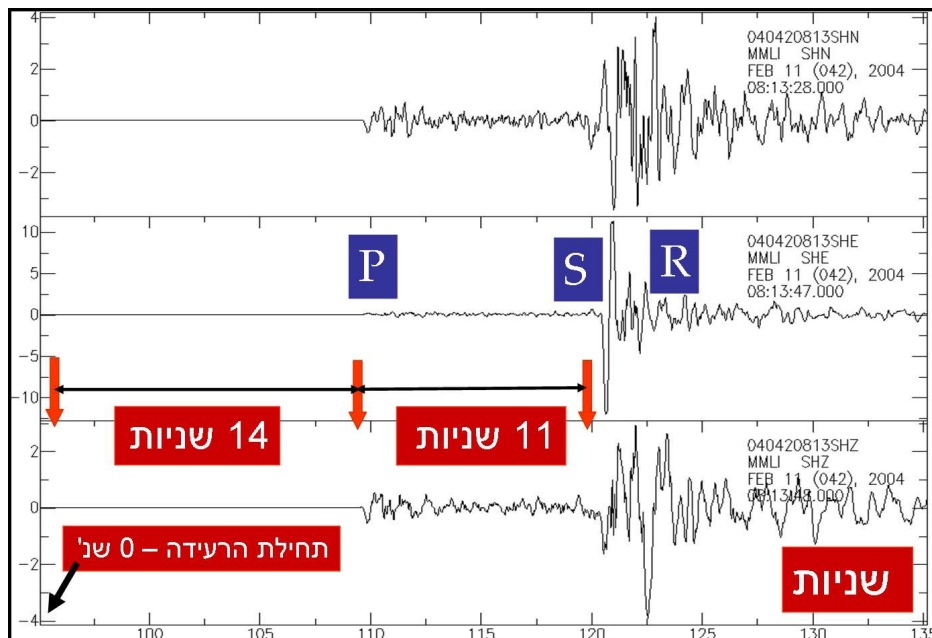




משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

התרעה קצרת מועד* לרעידות אדמה בישראל

הערכה ראשונית



אריאל היימן

*שניות עד עשרות שניות



משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

התרעה קצרת מועד* לרעידות אדמה בישראל

הערכה ראשונית

אריאל היימן

*** שניות עד עשרות שניות**

תקציר

רקע

מדינת ישראל ממוקמת על גבול הלוחות הטקטוניים של ערב ואפריקה. התנועה היחסית בין לוחות אלו גורמת לרעידות אדמה חזקות, העלולות להיות הרסניות. לרעידות במגניטודה כזו ואף לחלשות ממנה (6~) יש פוטנציאל גדול מאד לנזק. בהיסטוריה של ארץ ישראל ישנן עדויות על מספר רעידות אדמה חזקות. רעידת האדמה שהתרחשה ב-1837, בצפון ישראל ובמגניטודה של 7.0, גרמה לאלפי הרוגים ולנזק רב. ב-1927 התרחשה רעידת אדמה במגניטודה של 6.2 בצפון ים המלח אשר גרמה למאות הרוגים ולנזק רב בירושלים, שכס, רמלה ולוד. הרעידה החזקה האחרונה התרחשה במפרץ אילת ב-1995 במגניטודה של 7.2 וגרמה לנזק נמוך יחסית ולהרוגים בודדים מכיוון שמוקדה היה באזור מדברי המרוחק ממרכזי אוכלוסיה גדולים. הסכנה הנובעת מרעידות אדמה גוברת עקב הגידול המשמעותי באוכלוסיה וריכוזה בערים.

אין כיום ביכולתנו לחזות רעידות אדמה. אולם, כדאי לבדוק את היכולת לתת התרעה קצרת מועד לפני הגעת גלי ההרס מרעידת אדמה ההרסנית הבאה בישראל ובסביבותיה, התרעה של שניות בודדות ועד עשרות שניות. מערכות התרעה קצרות מועד קיימות בעולם כבר משנות השישים של המאה הקודמת. המדינה הראשונה שהקימה מערכת כזו הייתה יפן כשמטרת המערכת הייתה עצירת רכבות מהירות בעת רעידת אדמה. מאז מופעלות ביפן מערכות מתקדמות יותר ובתחומים נוספים. מדינות נוספות בהן קיימת מערכת התרעה ברמות טכנולוגיות שונות הן טיוואן, מקסיקו, תורכיה, רומניה, וכיום שוקדים על פיתוח מערכת כזו גם בארה"ב.

מטרה

מטרת סקירה זו היא להציג את עקרונות מערכת התרעה קצרת מועד לרעידות אדמה, את שקיים בעולם בתחום זה, את השיקולים הבסיסיים להקמת מערכת התרעה קצרת מועד לרעידות אדמה בישראל, ולבחון את הכדאיות של הרחבת העיסוק בתחום על ידי הכנת סקר היתכנות יסודי בנושא זה.

עקרונות מערכת התרעה קצרת מועד

מערכת התרעה קצרת מועד היא מערכת שמזהה ארוע של רעידת אדמה על ידי הגלים הסייסמיים הנוצרים ברעידה, מזהה את תכונות הרעידה (מגניטודה ומיקום המוקד), מעריכה את הנזק הצפוי ברעידה ובהתאם מפיקה התרעה הנשלחת לגורמים ממשלתיים, חברות, מפעלים ולאוכלוסיה.

רעידת אדמה מייצרת מספר סוגי גלים כאשר החשובים בהם הם גלי P (Primary) המהירים יותר, וגלי S (Secondary) האיטיים יותר אשר יחד עם גלי השטח הם גורמי הנזק.

יש שני סוגים של מערכות התרעה קצרת מועד :

1. מערכת הממוקמת באתר עליו יש להגן, מזהה את הגעת גל P, מחשבת את המגניטודה הצפויה ובהתאם נותנת התרעה קצרה לפני הגעת גל S. אורך זמן ההתרעה תלוי בפער הזמנים שבין הגעת גלי P ל-S ולפיכך, ככל שהאתר רחוק ממוקד הרעידה אורך זמן ההתרעה גדול יותר.
2. מערכת אזורית המורכבת ממספר רב של חיישנים הממוקמת באזור בו צפויות רעידות האדמה. המערכת מזהה את הגעת גלי P, מבצעת חישוב מהיר של מיקום מוקד הרעידה, והמגניטודה, מייצרת

מפת תרחיש המציגה את עוצמת תנודת הקרקע הצפויה בכל מקום במדינה ומשגרת אות התרעה בהתאם. אות זה מועבר בדרך אלקטרומגנטית ולכן הוא מהיר הרבה יותר מגלים סייסמיים. בשנים האחרונות נעשתה התקדמות מדעית משמעותית ויש כיום יכולת לזהות את מאפייני הרעידה על ידי עיבוד נתוני 4 השניות הראשונות של גלי P. מידע הניקלט מארבע תחנות בלבד מספיק לצורך החישוב. בדרך זו ניתן להוציא התרעה כבר לאחר כ- 8 שניות. גם במקרה זה, ככל שנהיה רחוקים ממוקד הרעידה זמן ההתרעה יהיה ארוך יותר. יחד עם זאת, קיים אזור הקרוב למוקד ואשר אליו הגלים הסייסמיים יגיעו מהר יותר מהיכולת לייצר התרעה.

מרכיב נוסף במערכת ההתרעה הן מערכות הקליטה. במערכות גדולות מערכת הקליטה מקבלת את אות ההתרעה ובעקבותיו מתבצעות סדרת פעולות אוטומטיות, בהתאם להחלטות שהתקבלו מראש, שמטרתן להקטין את הנזק הצפוי לקרות כשיגיע הגל הסייסמי. בבתים פרטיים, בתי ספר, משרדים, ובגופים קטנים אחרים יכולה המערכת הקולטת את האות ההתרעה להפיק אזעקה קולית שבעקבותיה יבצעו האזרחים פעולות הגנה בסיסיות.

השימושים במערכת ההתרעה

אפשרויות השימוש באות ההתרעה מגוונות. להלן מספר דוגמאות: האוכלוסיה בבתים פרטיים, במשרדים ובמקומות נוספים יכולה, אם ניתן, לצאת מהבית לשטח פתוח או להכנס למקומות מוגנים יחסית (חדר מוגן, מתחת לשולחן, משקוף וכו'). בבתים פרטיים ובמשרדים המערכת מסוגלת לנתק את מערכות החשמל והגז ולמנוע שריפות ונזקים נוספים. בבתי ספר יכולים להורות לתלמידים להכנס מתחת לשולחנות, והדבר דומה גם לגבי כל אוכלוסיה המרוכזת במקומות ציבוריים (בתי חולים, משרדים וכו'). ניתן לעצור מעליות בקומה הקרובה ולהורות למשתמשים לעזוב את המעלית, ניתן לבצע הפסקות חשמל יזומות, כולל הפסקת פעילות טורבינות, ניתן לסגור ווסתים, וצנרת של מפעלי חומרים מסוכנים. ניתן לבצע גיבויים מהירים למחשבים, לעצור המראות ונחיתות של מטוסים, להאט או לעצור רכבות ולעצור כלי הרכב.

זמן התרעה אפשרי בישראל

חישובים ראשוניים שנעשו בעבודה זו מציגים את זמן ההתרעה למדינת ישראל. מערכות הממוקמות באתר עליו יש להגן יכולות להפיק התרעה של בין שניות ספורות ועד עשרים שניות. לדוגמא, מוקד של רעידה בצפון ים המלח, אינו מאפשר התרעה בירושלים, אך בתל אביב משך זמן ההתרעה הוא כ- 6 שניות, ובחיפה משך זמן ההתרעה יהיה 12 שניות. קיים אזור ללא התרעה ברדיוס של 35 ק"מ סביב המוקד.

אם תוקם מערכת התרעה מרכזית למדינת ישראל, רדיוס האזור בו לא תנתן התרעה ירד ל-25 ק"מ סביב המוקד, וההתרעה יכולה להגיע במקומות היותר רחוקים ל-30 שניות. בתרחיש של רעידה בצפון ים המלח, תנתן בירושלים אפשרות להתרעה של 3 שניות, בת"א 18 שניות ובחיפה כ- 30 שניות. בתרחיש אחר של רעידה בצפון הארץ זמן ההתרעה יהיה קצר יותר בחיפה וארוך יותר בירושלים.

הקמת מערכת התרעה קצרת מועד בישראל

הדוח להלן מפרט את הידע המקצועי הזמין בנושא מערכות התרעה קצרות מועד, ומציג את הנעשה בתחום בעולם הרחב. נראה כי הידע המקצועי הקיים בעולם ובארץ מאפשר הקמת מערכת כזו. על-מנת להקים מערכת מסוג זה בארץ יש ללמוד מנסיונם של אחרים לגבי הידע המקצועי והידע הטכנולוגי. בישראל קיימות מערכות התרעה, כגון במערכת ה"חץ", מערכות ההתרעה שהתריעו במלחמת

לבנון השניה על נפילת טילים ומערכת "צבע אדום" המתריעה לפני נפילת טילים במערב הנגב. השיקולים בהקמת מערכת התרעה קצרת מועד צריכים לכלול מחקר סוציולוגי לגבי ההשפעות של מערכת כזו, למרות שלכאורה נראה שהאזרחים בישראל ערוכים לקבלת התרעות.

רעידות האדמה הצפויות למדינת ישראל יתרחשו בעיקרן לאורך בקע ים המלח ולפיכך, הסיכון הסייסמי למדינות שכנות, ובעיקר ירדן, הוא רב. לאור זאת, ראוי לבחון את האפשרות לשיתוף פעולה אזורי בהקמת מערכת התרעה קצרת מועד.

עלותה של מערכת התרעה קצרת מועד מוערכת במליוני דולרים ועד מספר עשרות מיליונים. יש לבדוק בסקר היתכנות מפורט את עלות הקמתה ואחזקתה של מערכת כזו, ואת כדאיותה.

סיכום

במדינת ישראל צפויה רעידת אדמה הרסנית. למרות הודאות להתרחשות רעידת אדמה כזו, איננו יודעים לחזות את מועד התרחשותה, ולפיכך יש להתכונן לקראתה ולצמצם נזקיה בדרכים שונות (בניה נכונה, הכנת האוכלוסיה להתגוננות בעת הרעידה, טיפול באוכלוסיה ובמדינה לאחריה, ועוד). אחת הדרכים להתגוננות בפני רעידת אדמה היא הקטנת הנזק על ידי ביצוע פעולות מהירות בשניות שלפני הרעידה. מרכזי האוכלוסין בישראל ממוקמים במרחק ממוקדי רעידות האדמה המאפשר זמן התרעה מינימאלי וסביר. בנוסף, בשנים האחרונות מתפתחת בעולם היכולת לשגר התרעה קצרת מועד בתוך שניות ספורות מרגע התחלת הרעידה. ראוי לציין שבתורכיה ובקליפורניה מניחים שגם זמן התרעה של שניות בודדות עשוי להועיל מאד ולהצדיק הקמת מערכת התרעה קצרת מועד. הניתוח הראשוני המוצג כאן מצדיק בדיקת היתכנות מעמיקה של כדאיות הקמת מערכת התרעה קצרת מועד בישראל.

המלצות

מסקנתנו הראשונית היא שמערכת התרעה קצרת מועד עשויה להקטין את הנזק הצפוי בעקבות רעידת אדמה הרסנית בישראל ואנו מציעים לבחון לעומקה את האפשרות להקמת מערכת מסוג זה.

אנו ממליצים לבצע סקר היתכנות יסודי שיכלול בין השאר את התחומים הבאים (ראה פרוט בדוח):

1. איפיון המערכת על מרכיביה.
2. בדיקת צרכים והגדרת צרכנים.
3. איפיון מערכת עיבוד המידע (אלוגריתם החישוב), הטכנולוגיה והתקשורת.
4. בחינת המשמעויות החברתיות והחוקיות.
5. בחינת ההחלטות האוטומטיות המתקבלות במערכת – מהן, סף הקבלה והביצוע.
6. השפעת הקמת המערכת על גופים שונים (כגון: מערכת הביטחון, רשויות מקומיות, ומפעלים גדולים).
7. הערכת סיכוני פיתוח.
8. בחינת התרעת שווא, ובכלל זה הסיכון והעלויות.
9. בחינת שיתוף פעולה אזורי.
10. הערכת עלות ההקמה והאחזקה ובנית מודל כלכלי.
11. בחינת הגורמים הפוטנציאליים להקמת מערכת כזו (ממשלתי, חברות ביטוח או גופים פרטיים) ודרכי מימון (ממשלתי או מימון פרטי ותשלום "דמי מנוי").

תוכן העניינים

תקציר

א. מבוא

ב. רקע

1. רעידות אדמה, גלים סייסמיים, שיעור הנזק והשפעת התשתית

2. רעידות אדמה בישראל

3. נזקי רעידות אדמה – משמעויות כלכליות

4. חיזוי רעידות אדמה

5. הערכות לקראת רעידת אדמה וצמצום נזקה

6. זמן הגעת גלים סייסמיים ממוקדי רעידות האדמה למרכזי אוכלוסיה בישראל

7. סיכום

ג. עקרונות מערכת התרעה קצרת מועד

1. מבוא

2. מרכיבי המערכות

2.1 מערכת חיישן בודד או מספר חיישנים הממוקמת באתר

2.2 מערכת רבת חיישנים הממוקמת באזור המוקד הצפוי של רעידת האדמה

2.3 שימוש משלים במערכות GPS

2.4 דרכי תקשורת בין מרכז עיבוד הנתונים לגופים השונים ולציבור

2.5 שרידות המערכת

3. התרעה בעזרת המידע מהשניות הראשונות של גלי P: חידושים מהשנים האחרונות

4. הדיוק בקביעת המגניטודה ומספר החיישנים הנדרש

5. משך זמן האזעקה ומשך זמן ההתרעה

6. מפת התרחיש

7. היתרונות והחסרונות של מערכת רבת חיישנים הממוקמת בקרבת מוקדי רעידות האדמה

בהשוואה למערכת הממוקמת בקרבת האתרים

8. עקרונות תהליכי קבלת ההחלטות של המערכת

9. התרעת שווא

10. הערות נוספות

ד. מערכות התרעה בעולם

1. יפן

2. מקסיקו

3. תורכיה

4. רומניה

5. טייואן

6. ארה"ב

ה. ההיתכנות של מערכת התרעה קצרת מועד בישראל

1. מערכת ההתרעה בישראל

2. זמני התרעה קצרת מועד לרעידות אדמה בישראל

3. דוגמאות לשימוש במערכת ההתרעה בישראל

41	4. שלבים בבניית מערכת התרעה קצרת מועד בישראל והערכות לגבי עלותה
42	5. שיתוף פעולה אזורי
42	6. יתרונות וחסרונות למערכת התרעה קצרת מועד בישראל
42	6.1 יתרונות
43	6.2 חסרונות וקשיים בהקמת מערכת התרעה בישראל
43	7. המלצות לסקר היתכנות
44	8. סיכום - סיכון מול סיכוי
45	ו. מקורות
	ז. נספחים
49	1. רקע מדעי
49	1) מקור רעידות האדמה, מגניטודה ועצמה
49	2) גלים סייסמים
50	3) מהירות הגלים הסייסמים
51	4) שיעור הנזק
52	5) השפעת התשתית
53	2. דוגמאות למערכות התרעה קצרת מועד מסחריות המתאימות לשימוש ביתי או לגופים קטנים
58	3. רשימת המשתמשים במערכת התרעה במקסיקו סיטי

רשימת האיורים

- 4 1. תמונת המצב הטקטונית במזרח התיכון
- 5 2. רעידות אדמה בישראל ובסביבותיה
- 6 3. רדיוס ההשפעה של רעידות אדמה שמוקדן בבקע ים המלח על מרכזי אוכלוסין בישראל
- 10 4. מרחק מרכזי אוכלוסין בישראל ממוקדים אפשריים של רעידות אדמה וזמן הגעת גלי S
- 18 5. מספר התחנות הנדרשות לקביעת מיקום המוקד והמגניטודה
- 20 6. זמן ההתרעה במערכת ElarmS (ארה"ב) כתלות בהסתברות לרעידת האדמה ולעוצמתה הצפויה
- 30 7. פיזור התחנות הסייסמיות במערכת ההתרעה במקסיקו
- 34 8. זמן ההתרעה הצפוי בעקבות רעידת אדמה בטייואן
- 39 9. משך זמני ההתרעה בישראל לאתר המצוייד במערכת התרעה הממוקמת בשטחו
- 40 10. משך זמני ההתרעה ברחבי מדינת ישראל בעזרת מערכת מרכזית הממוקמת לאורך בקע ים המלח

נספח :

- 50 א. תנועת גלי P
- 50 ב. תנועת גלי S
- 51 ג. סייסמוגרמה של רעידת האדמה בים המלח, 11.2.04

א. מבוא

ישראל ממוקמת באזור בעל פעילות סייסמית בינונית. על פי נתונים סייסמולוגיים התרחשו במאה השנים האחרונות בישראל ובסביבתה הקרובה 10 רעידות אדמה במגניטודה 6.0-7.2. רעידות אדמה כאלה נחשבות לחזקות והן בעלות פוטנציאל לגרימת נזקים גדולים מאד בנפש וברכוש כאשר הן מתרחשות בקרבת ריכוזי אוכלוסין.

ניתן להיערך לקראת רעידת אדמה על ידי בניה נכונה וחיזוק מבנים, כמו גם על ידי היערכות מוקדמת של גופי ההצלה והכנת האוכלוסיה. לצערנו איננו יודעים לחזות מבעוד מועד את התרחשותה של הרעידה ולאפשר לאוכלוסיה לפנות את המבנים ולכוחות ההצלה להתכונן לרעידה מסויימת.

אולם, יש כיום יכולת לתת התרעה קצרת מועד, בעזרת מערכת התרעה, של מספר שניות ועד עשרות שניות. הזמן הקצר החולף מרגע התרחשות הרעידה ועד הגעת הגלים הסייסמיים ההרסניים הינו זמן קריטי המאפשר לזהות את מאפייני הרעידה (המגניטודה שלה ומיקום המוקד), לחשב את הנזק הצפוי, להפיק התרעה, ובעקבותיה לבצע מספר פעולות אשר עשויות להציל חיים, ולהגן על האוכלוסיה מפני חלק מההשפעות והתופעות המשניות (בעיקר הסביבתיות והכלכליות) שקורות בעקבות רעידת אדמה. לא ניתן בפרק זמן של שניות בודדות להוציא את האוכלוסיה ממבנים רבי קומות או ממבנים המאכלסים מספר רב של אנשים אך ניתן לבצע מספר פעולות בסיסיות שיצמצמו את הנזק ברמה המערכתית וברמת הפרט. יש לציין כי במספר מדינות בעולם קיימות כיום מערכות התרעה קצרות מועד.

השימוש בהתרעה קצרת מועד מיועד בעיקרו לסגירה (או ניתוק) של מערכות או הפעלה של אחרות, וכן לביצוע פעולות הצלה ברמת הפרט. רשימת השימושים שלהלן (המוצגת שלא בסדר חשיבות) היא חלקית בלבד וניתן להוסיף לה תחומים נוספים :

- ✓ מתן התרעה שהזעזוע הקרוב הוא רעידת אדמה ולא ארוע ביטחוני
- ✓ התרעה ביתית ופעילות עצמית של האזרחים להגנה עצמית (כניסה מתחת לשולחנות, עמידה מתחת למשקופים, יציאה מהירה מבתיים צמודי קרקע וכו').
- ✓ עצירת רכבות
- ✓ סגירת מערכות תעשייתיות, בעיקר אלו שדורשות דיוק מיוחד
- ✓ סגירת טורבינות חשמל
- ✓ העברת מתח בדרכים עוקפות באזורים בהם עלולים עמודי מתח לקרוס
- ✓ סגירת מערכות צורכות אנרגיה במפעלים שונים
- ✓ סגירת צנרת על ידי מגופים במפעלים, ובעיקר אלו המאכסנים חומרים מסוכנים
- ✓ התרעה לבתי חולים והפעלת מערכות חרום
- ✓ הפעלת גנרטורים לחרום
- ✓ גיבוי מערכות מחשבים ו/או סגירתם
- ✓ סגירת שדות תעופה (עקב קשיים בנייתוב המטוסים וסכנה לשלמות המסלולים)
- ✓ סגירת מערכות גז ביתיות ועירוניות
- ✓ פתיחת דלתות של תחנות לכיבוי אש, מגן דוד אדום, ושאר מערכות החרום

- ✓ עצירת מעליות בקומה הקרובה, פתיחת דלתות והודעה לנוסעים לצאת מהמעלית
- ✓ סגירת מערכות מים
- ✓ התרעה למערכות ביטחוניות
- ✓ עצירת תחבורה לפני כניסה למנהרות ומעבר על גשרים
- ✓ הודעה לפועלי יצור להתרחק ממכשירים מסוכנים.
- ✓ התרעה לבתי ספר ולמקומות ציבוריים (וביצוע פעולות הגנה עצמית).

מערכות התרעה קצרות מועד מופעלות כיום במספר מדינות: יפן, טייוואן, מקסיקו, רומניה ותורכיה. בארה"ב נערכים כיום להקמת מערכת כזו.

רעידות אדמה בישראל מנוטרות על ידי המכון הגיאופיסי מזה מספר עשרות שנים, ומחקרים בנושא הערכת הסיכונים הסייסמיים למדינת ישראל נערכים במכון הגיאופיסי, במכון הגיאולוגי ובאוניברסיטאות השונות. רעיון להקמת מערכת התרעה קצרת המועד לישראל הוצע כבר לפני מספר שנים על ידי ד"ר דניאל וקס מהמכון הגיאולוגי, אך טרם נבחן לעומקו.

הדוח להלן סוקר את הרקע למערכת התרעה קצרת מועד, ומציג את עקרונות הפעלת המערכת, וכן את המצב הקיים בעולם בתחום זה. הדוח יבחן את המצב בישראל ואת הפוטנציאל הגלום במערכת כזו, ואת התועלת של המערכת למדינת ישראל. הרקע המדעי הבסיסי מובא בנספח לדוח זו.

מסקנתנו הראשונית היא שהקמת והפעלת מערכת התרעה קצרת מועד בישראל עשויה להקטין את הנזק בעקבות רעידת אדמה הרסנית ואנו מציעים לבחון לעומק את האפשרות להקמת מערכת מסוג זה.

תודות:

תודתי נתונה לד"ר בנימין בגין ולד"ר רבקה אמית מהמכון הגיאולוגי, לד"ר רמי הופשטר, ד"ר ולדימיר פינסקי וד"ר אורי פריזלנדר מהמכון הגיאופיסי, לד"ר דניאל וקס, לד"ר יוסי ברטוב, לד"ר זאב לוי, למר אורי אמית, ולמר צבי כוכבי, אשר קראו גרסאות מוקדמות של הדוח, העירו, האירו, ושיפרו את הדוח לאין ערוך. תודה מיוחדת לבני, קיקי, ודני אשר הביאו אותי להתעניין בתחום, הניעו כתיבת דוח זה ועזרו לכל אורך הדרך. תודה לגבי נילי אלמוג על שרטוט האיורים המלווים את הדוח.

ב. רקע

1. רעידות אדמה, גלים סייסמיים, שיעור הנזק והשפעת התשתית

(להרחבה ראה נספח מס' 1)

רעידות אדמה נפוצות על פני כדור הארץ ומתרחשות בדרך כלל בגבול הלוחות הטקטוניים אשר נעים בהתמדה האחד ביחס לשני. תזוזה מהירה בין חלקי הקרום של כדור הארץ היא שגורמת לרעידה. האנרגיה המשתחררת בעת רעידת אדמה מבוטאת ביחידות הנקראות מגניטודה (Magnitude). הביטוי לנזק בכל מקום ומקום היא העוצמה הסייסמית (Intensity). לפיכך, המגניטודה מבטאת את שמתרחש במוקד בעוד שהעוצמה הסייסמית מבטאת את שמורגש באתר המצוי במרחק מסויים ממוקד הרעידה. ראוי לציין כי המוקד היא הנקודה בה מתחילה השבירה, וברעידות חזקות מקור האנרגיה איננו נקודה אחת כי אם מישור שאורכו עשרות ק"מ.

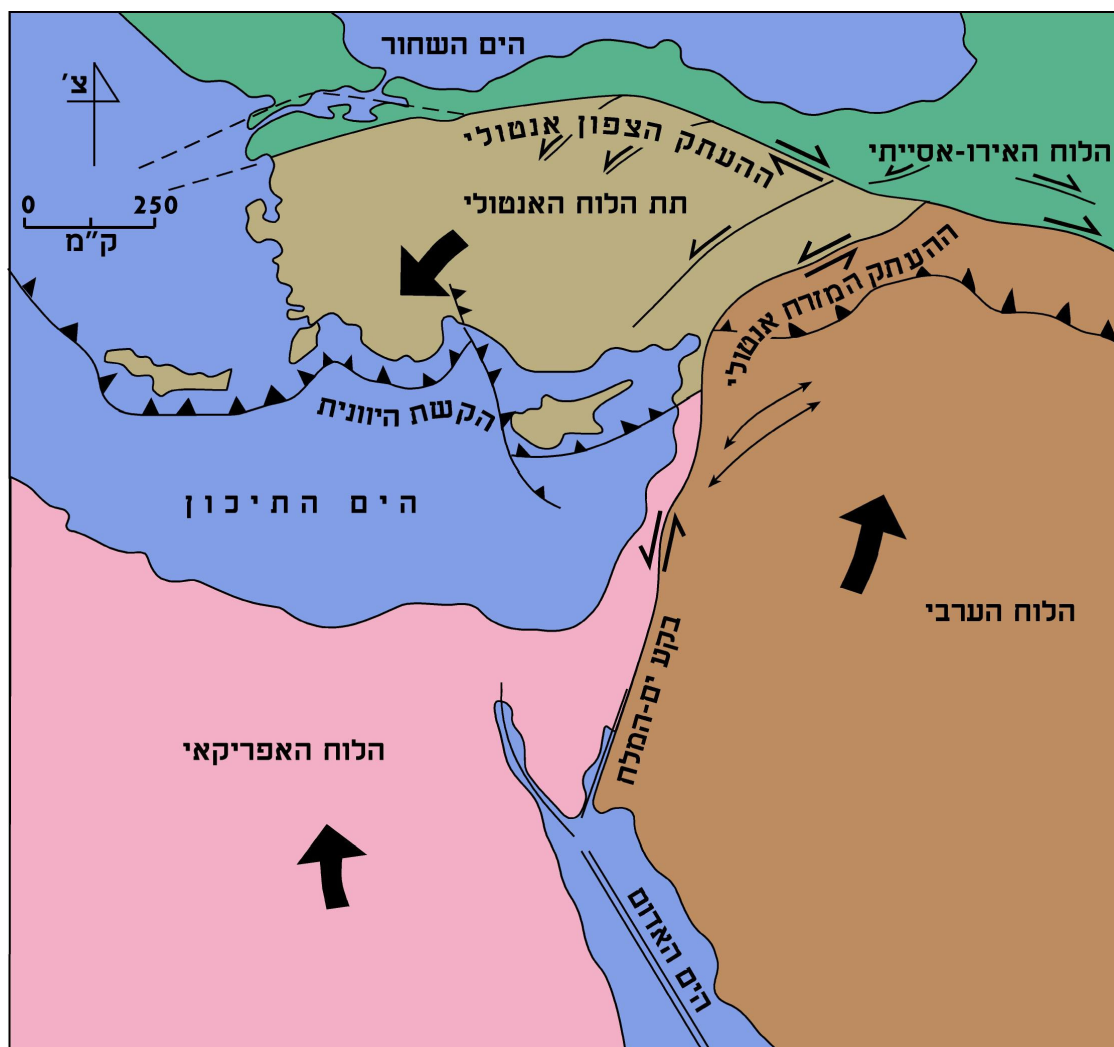
גלים סייסמיים הינם גלים אלסטיים הנעים דרך כדור הארץ והנוצרים בדרך כלל כתוצאה מרעידות אדמה או פיצוצים. נהוג לחלק את הגלים הסייסמיים לגלי גוף וגלי שטח. גלי הגוף (גלי לחיצה (P) וגלי גזירה (S)) הם גלים הנעים בכל הטווח של פנים כדור הארץ ואילו גלי שטח נעים במקביל לפני השטח. בעוד שגלי הלחיצה (P) הם הראשונים המגיעים לאתר, גלי הגזירה (S) וגלי השטח הם המשמעותיים ביותר לעניין רעידות אדמה משום שהם אלו הגורמים לעיקר הנזק הנגרם באתר.

מהירות הגלים הסייסמיים תלויה בתכונות האלסטיות ובצפיפות החומר דרכם עוברים הגלים. גלי P הם גלי לחץ ולכן הם נעים במהירות הקול, כלומר 333 מ'שנייה באויר, ובקרום כדור הארץ מהירותם היא בד"כ בין 5 – 7 ק"מ/שנייה. מהירותם של גלי S היא כ- 40% פחות מאשר גלי P בכל מדיום נתון והיא יכולה להגיע עד ל- 8 ק"מ/שנייה בסלעים קשים בעומק כדור הארץ, ואילו בסדימנט פריך ובלתי מלוכד הם ינועו במהירות של 1 ק"מ/שנייה. בדרך כלל נעים גלים אלו בקרום כדור הארץ במהירויות של 3-4 ק"מ/שנייה. גלי השטח איטיים עוד יותר ומהירותם בדרך כלל 2-3 ק"מ בשנייה ולעיתים הם מגיעים גם למהירויות של עד 4.4 ק"מ בשנייה (כתלות בתדירות הגל).

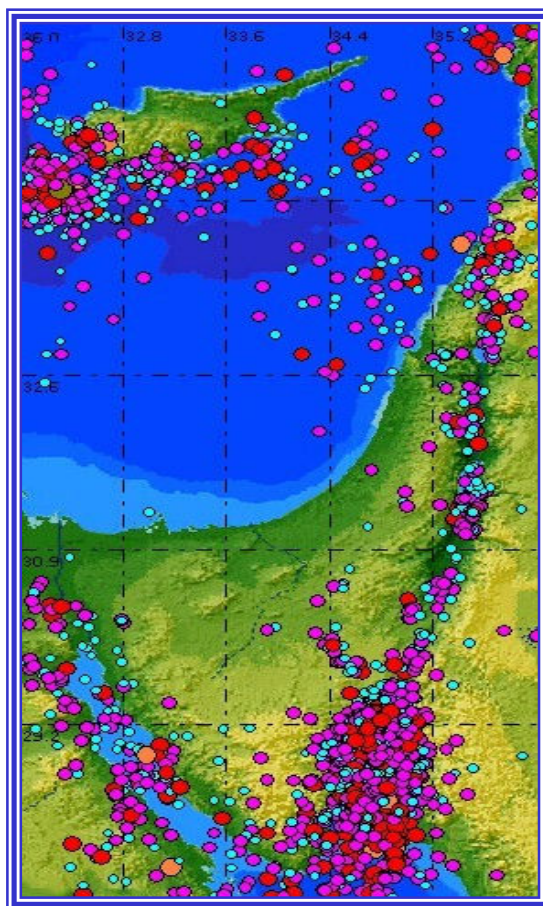
עוצמתה של רעידת אדמה ושיעור הנזק שיגרם בעקבותיה תלויים בשילוב של מספר גורמים: (א) מגניטודת הרעידה: ככל שהמגניטודה גבוהה יותר, תנודות הקרקע הצפויות תהיינה חזקות יותר. (ב) המרחק מהמוקד: ככל שהמרחק קטן יותר תנודות הקרקע הצפויות תהיינה חזקות יותר. (ג) אופי התשתית: לאופי התשתית חשיבות רבה בקביעת העוצמה של רעידת האדמה במקום מסויים (ראה פרוט להלן). (ד) סוג המבנה ואופי הבניה: לאיכות הבניה השפעה רבה על הנזק שיגרם למבנה עקב רעידת אדמה. בנוסף לנזקים הישירים הנגרמים עקב הרעידה נגרמים בדרך כלל גם נזקים עקיפים, סביבתיים בעיקרם (כגון שריפות, זיהום אויר, זיהום מים), שיכולים במקרים מסויים להיות משמעותיים אף יותר מהנזקים הישירים. לאופי התשתית עליה בנויים מבנים חשיבות גדולה ביותר בקביעת גודל הנזק הנגרם ברעידת אדמה. תכונות התשתית קובעות את הפרמטרים הבאים: 1. הגברת עצמת הגלים הסייסמיים; 2. כשל התשתית: (א) גלישות סלע; (ב) התנזלות; (ג) קריעת פני השטח.

2. רעידות אדמה בישראל

ישראל ממוקמת בגבול שבין הלוחות של ערב ואפריקה (איור 1). גבול זה, המכונה בקע ים המלח, פעיל מזה כ- 18 מליון שנה ולאורכו נע הלוח של ערב צפונה יחסית לישראל וסיני. קצב התנועה הממוצע לאורך הבקע הוא כ- 5 מ"מ בשנה. מפת רעידות האדמה שהתרחשו בעת האחרונה בישראל ובסביבתה (איור 2), מדגישה נתונים אלו.



איור 1. תמונת המצב הטקטונית במזרח התיכון



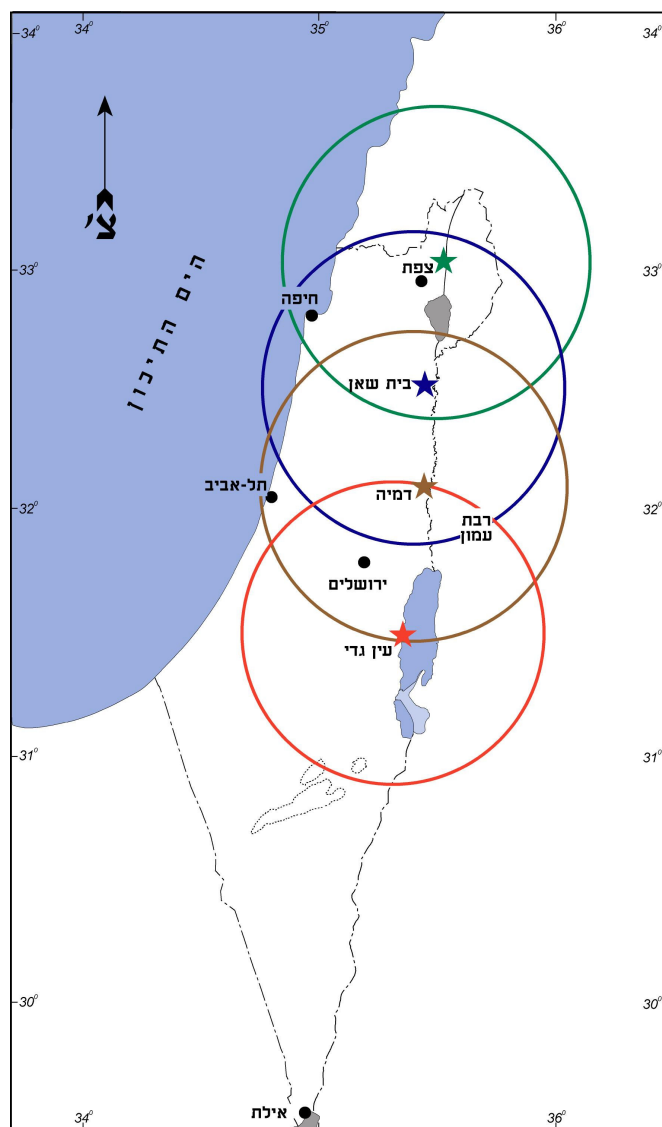
איור 2. רעידות אדמה בישראל ובסביבותיה (נתוני המכון הגיאופיסי לישראל)

רמת הפעילות הסייסמית באזורנו נחשבת כבינונית. על פי הנתונים הסייסמולוגיים, הנאספים כיום במכון הגיאופיסי לישראל, התרחשו במאה השנים האחרונות במרחב הקרוב לישראל 10 רעידות אדמה במגניטודה 6.0-7.2. רעידת אדמה במגניטודה של 6 ומעלה נחשבת לחזקה ובעלת פוטנציאל לגרום להרס. כך למשל, רעידת האדמה שהתרחשה ב-1927 (שמוקדה היה בצפון ים המלח), היתה בעלת מגניטודה של 6.2, גרמה למותם של כ-300 איש והסבה נזקים בנפש וברכוש בירושלים, רמלה, לוד ובשכם. ב-1837 התרחשה רעידת אדמה בעלת מגניטודה משוערת של 7.0 שמוקדה היה מצפון לעמק החולה וגרמה לאלפי הרוגים בגליל ולנזק רב ברכוש (Ambraseys, 1997). רעידת אדמה בעלת מגניטודה משוערת של 7.0-7.5 התרחשה בדרום לבנון ב-1759 וגרמה לכ-200 הרוגים ופגיעה בצפת, בעכו, בטבריה ובמספר רב של מבנים בכפרים בגליל העליון. מלבנון דווח על כעשרים אלף הרוגים ונזק רב לרכוש.

ב-22 בנובמבר 1995 התרחשה רעידת אדמה במגניטודה של 7.2 שמוקדה היה במפרץ אילת, כ-70 ק"מ דרומית לאילת. עקב המרחק הרב יחסית ממרכזי אוכלוסין, ההרס היה קטן יחסית ובאילת נגרם נזק לרכוש בלבד. אם הרעידה היתה מתרחשת כ-150 ק"מ צפונה מאילת, לאורך בקע ים המלח, הנזק המשוער היה גבוה בהרבה. חשוב לזכור כי לו התרחשה היום לאורך בקע ים המלח במרכז או בצפון ישראל אחת מהרעידות שהוזכרו לעיל, הנזק הצפוי יהיה גדול יותר מכיוון שמספר המבנים וגודל האוכלוסיה וצפיפותה, גבוהים בהרבה ממה שהיה קיים בעת התרחשות הרעידות הללו.

למרחק מהמוקד, כפי שכבר נאמר לעיל, חשיבות רבה מאד בקביעת הנזק. ברעידת האדמה במגניטודה של 7.5, שהתרחשה בתורכיה ב- 25 באוגוסט 1999, רדיוס הנזק המשמעותי היה כ- 70 ק"מ. אם נתייחס למרחק זה כמרחק סביר של נזק משמעותי ברעידת אדמה חזקה, ונבדוק את מרחבי השפעת רעידת אדמה עתידית שכזו לאורך בקע ים המלח, התמונה שתתקבל (איור 3) מאיימת. מרכזי האוכלוסין הצפוניים יושפעו מרעידות אדמה שמוקדן יהיה באזור עמק הירדן או הכנרת, בעוד שמרכזי האוכלוסין שבמרכז ישראל וירושלים יושפעו מרעידות אדמה שמוקדן יהיה בבקעת הירדן, ובים המלח.

איור 3. רדיוס ההשפעה של רעידות אדמה שמוקדן בבקע ים המלח על מרכזי אוכלוסין בישראל. רדיוס המעגלים נבחר לצורך ההדגמה ל- 70 ק"מ, וזאת על פי רדיוס הנזק בעקבות רעידת האדמה שהתרחשה בתורכיה באוגוסט 1999.



לסיכום: בהיסטוריה של ארץ ישראל מצויות עדויות להתרחשותן של רעידות אדמה, אשר חלקן היו חזקות דיין כך שגרמו לנזקים ואסונות כבדים. המנגנון העיקרי הגורם לרעידות אדמה לאורך בקע ים המלח נחקר ומובן לנו, ועל כן, ברור כי רעידת אדמה חזקה תתרחש בעתיד בישראל. ההסתברות לרעידת אדמה במגניטודה 7 ומעלה באזורינו נמוכה יחסית. אולם, הסבירות לרעידה במגניטודה 6.5-6 גבוהה למדי, וגם בעקבות רעידה בסדר גודל כזה צפוי נזק משמעותי. חלקים ניכרים של מדינת ישראל מצויים בתחום "השדה הקרוב" של אזור הפעילות שממוקם לאורך בקע ים המלח ולכן סביר שכל רעידת אדמה חזקה שתתרחש באזור ים המלח וצפונה תגרום לנזקים כבדים.

3. נזקי רעידות אדמה – משמעויות כלכליות

הנזקים הכלכליים הנגרמים עקב רעידות אדמה הינם קשים. הנזק הכלכלי הגדול ביותר הידוע נגרם ברעידת האדמה בקובה שביפן ב-1995, ונאמד בכ- 110 מליארד דולר, למרות שמספר ההרוגים היה נמוך יחסית לרעידות אחרות. להלן, רשימה חלקית של רעידות האדמה הגדולות ב-30 השנים האחרונות והנזק שנגרם בעטיין, כפי שנאספו ממקורות שונים כולל מאתרי האינטרנט של גורמים רשמיים של המדינות השונות.

מגניטודה	מקום	השנה	הרוגים	נזק (מיליוני \$)
9.4	סומטרה, דרום מזרח אסיה	2004	230,000 (רובם עקב הצונמי)	13,000
8.2	טנגשאן, סין	1976	250,000	5,600
8.1	מקסיקו	1985	35,000	4,000
7.9	בוג', הודו	2001	90,000	???
7.7	לוזון, פיליפינים	1990	1621	2,000
7.7	צפון מערב איראן	1990	40,000	7,000
7.5	איזמיט, תורכיה	1999 (אוגוסט)	25,000	14,000
7.4	איזמיט, תורכיה	1999 (נובמבר)	17,000	
7.2	קובה, יפן	1995	6000	110,000
7.1	סיאטל, ארה"ב	2001	2	3,000
6.9	סיציליה	1990	20	15,000
6.9	לומה פריאטה, סן פרנסיסקו	1989	62	7,000
6.8	נורת'רידג', קליפורניה	1994	56	40,000
6.8	לנינקן, ארמניה	1988	25,000	650
6.4	מראאשטרה, הודו	1993	30,000	280
6.1	באם, איראן	2003	26,000	5,000
6.1	קליפורניה, ארה"ב	2003	1	זניח

במקרים מסויימים נגרמות אבידות גדולות בנפש ונזקים כלכליים נמוכים יחסית (בד"כ באזורים עניים יחסית), לעומת מקרים בהם מספר ההרוגים קטן יחסית והנזק הכלכלי גבוה מאד (דוגמת יפן וארה"ב). בנוסף לנזקים הכלכליים הישירים (התמוטטות מבנים, כשל התשתית, וכיו"ב) ישנם נזקים עקיפים הנגרמים בעקבות הרעידה. לדוגמה, נתאר התמוטטות של גשר, שלא גרמה פגיעה בנפש, וגם עלות בנייתו איננה גבוהה. אולם, לחסימת צירי התנועה בעקבות התמוטטות זו יכולה להיות משמעות לפגיעה בנפש אם גשר זה ממוקם, לדוגמא, על ציר תנועה ראשי לכיוון בית חולים. בנוסף, יש לקחת בחשבון גם את הנזק הנפשי של אזרחים, ואת הפגיעה הכוללת בחברה.

4. חיזוי רעידות אדמה

איננו יודעים כיום לחזות את מועד ההתרחשות של רעידת אדמה, לא את מיקומה המדויק, וגם לא את עוצמתה. יחד עם זאת, יש לקהילה המדעית יכולת להעריך באופן כללי היכן צפויים מוקדי רעידות אדמה, את המגניטודה המרבית הצפויה, את ההסתברות להתרחשות, ואת השפעת הרעידות על התשתית (הגברת התשתית וכשל התשתית).

הנזק הנגרם עקב רעידת אדמה הוא נזק לגוף, לנפש ולרכוש. הנזק הגופני נגרם בעיקרו עקב התמוטטות מבנים על יושביהם. לו היינו יודעים לחזות מועדן של רעידות אדמה היינו יכולים להקטין את מספר הנפגעים באופן משמעותי ביותר, על ידי פינוי האוכלוסיה מהמבנים.

במצב זה, יש להתכונן לרעידה הבאה, שתתרחש במוקדם או במאוחר. בידינו להקטין את הנזק המידי הצפוי לגוף ולנפש בעקבות הרעידה, ולהקטין את הנזק הכלכלי והחברתי שיצטרך בתקופה שלאחר הרעידה.

5. היערכות לקראת רעידת אדמה וצמצום נזקה

ההיערכות היעילה ביותר לרעידות אדמה היא על ידי בניה על פי תקנים מחמירים המגינים על המבנה בעת רעידת אדמה, וחיזוק מבנים קיימים תוך מתן עדיפות למבני ציבור (בתי ספר וכו') ולמבנים מצילי חיים (בתי חולים וכו'). כמו כן ניתן לבצע פעולות משלימות כגון הדרכת האוכלוסיה להתגוננות, היערכות גופי הצלה והגופים השלטוניים והעירוניים, והתכוננות לשלב השיקום שלאחר הרעידה, ועוד. פעילויות מסוג זה המתקיימות בקליפורניה מזה שנים הביאו לכך שמספר ההרוגים עקב רעידות האדמה נמוך משמעותית בהשוואה למקומות אחרים בעולם (ראה טבלה לעיל).

תקן הבניה העמידה לרעידות אדמה בישראל תוקן לראשונה בשנת 1975, על אף שגרסה ראשונה לתקן הוצעה כבר בשנת 1961. מאז עודכן התקן מדי 8-10 שנים, ולאחרונה בשנת 2003. יש כוונה לבצע בקרוב עדכון נוסף וזאת על בסיס מידע עדכני בנושא סיכוני התשתית. תקני הבניה שיושמו במהלך 30 השנים שחלפו תרמו רבות לצמצום הנזקים במבנים חדשים יחסית, אולם מתקנים ומבנים ישנים רבים נבנו ללא תקן, וככל הנראה הם עמידים פחות בפני רעידת אדמה. בנוסף, מכיוון שלא מתבצעת אכיפה של תקן הבניה, אין הערכה אמיתית לגבי טיב המבנים. לאור זאת, מרבית האוכלוסייה מתגוררת במבנים לא עמידים ובמתקנים רבים פועלות מערכות העלולות לקרוס ברעידה ולסכן את האוכלוסייה והמבנים המצויים בקרבתם. לחיזוק מבנים קיימים נדרש תקציב ממשלתי גדול ונכונות של האוכלוסייה להשקיע בכך. יחד עם זאת, על פי דרישת התקן, יש הסתברות של 10% ב-50 שנה שבניין יהיה נתון לתאוצת קרקע מעל ערך מסויים הקבוע בתקן ואז צפוי שיגרם נזק והבנין אף עלול להתמוטט גם אם נבנה על פי התקן. בנוסף, אין כיום במדינת ישראל תקן לתכולת המבנים, כגון תקן לחיבור ארונות קיר לקירות, לבינוי תקרות אקוסטיות ולחלונות זכוכית, ולאופן התקנה של מערכות גז בבתים בהתייחסות לסיכוני רעידות אדמה. לפיכך, פגיעה בנפש אפשרית גם בבנינים הבנויים על פי תקן הבניה.

הפעילות בתחום ההיערכות לרעידות אדמה בארץ (כמו בכל מדינה אחרת) תלויה בתקציבים ובקדימויות. במציאות הקיימת בישראל אין כיום די משאבים לטיפול יסודי בהכנת המדינה לקראת רעידת אדמה חזקה בכלל, ולחיזוק מבנים קיימים בפרט.

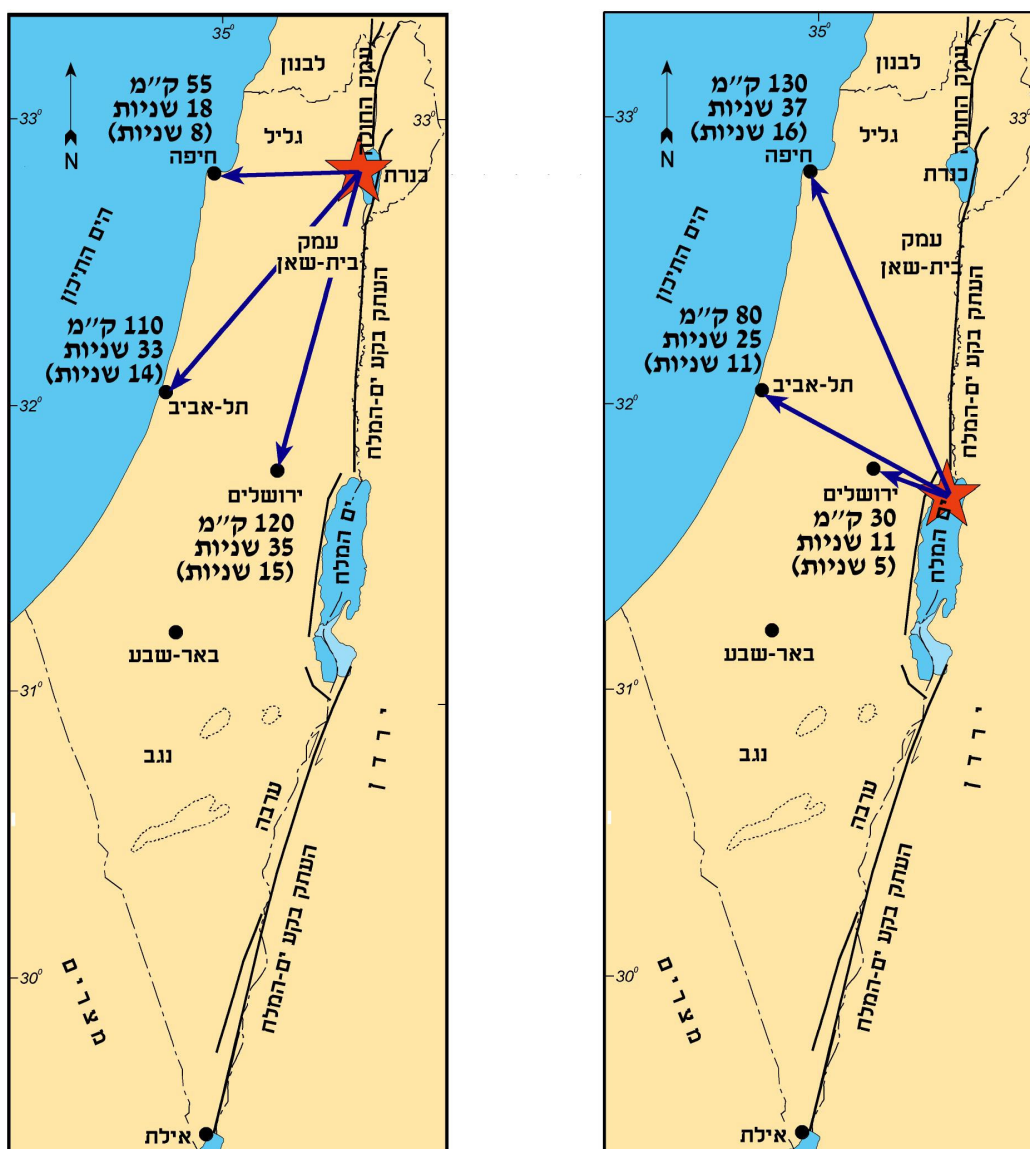
6. זמן הגעת גלים סייסמיים ממוקדי רעידות האדמה למרכזי אוכלוסיה בישראל

מכיוון שמקור רעידות האדמה במדינת ישראל מצוי בעיקרו לאורך העתק בקע ים המלח, והמרכזים העירוניים מצויים במרחק לא גדול ממנו, הסכנה הסייסמית גבוהה, וראוי לבחון כמה זמן לוקח לגל סייסמי להגיע ממוקד הרעידה אל האתרים השונים.

המרחק הממוצע מבקע ים המלח אל המרכזים העירוניים שלחוף הים התיכון הוא כ- 60 ק"מ (נהריה ומפרץ חיפה – 50 ק"מ, חדרה, נתניה – 60 ק"מ, תל-אביב 70 ק"מ, אשדוד 80 ואשקלון 90 ק"מ), בעוד שירושלים קרובה הרבה יותר כ- 30 ק"מ. בחישוב זה נלקח המרחק הקצר ביותר מכל עיר אל בקע ים המלח. העומק האופייני של מוקדי רעידות האדמה החזקות בישראל הוא כ- 15 ק"מ (כמו למשל רעידת האדמה שהתרחשה במפרץ אילת ב- 1995). מכאן, שאם ניקח לדוגמה רעידת אדמה שתתרחש בכנרת אזי המרחק מהמוקד לחיפה הוא 55 ק"מ, המרחק לתל אביב הוא 110 ק"מ ולירושלים 120 ק"מ.

מנתוני המכון הגיאופיסי עולה כי המהירות הממוצעת של הגלים הסייסמיים באזורנו היא 3.6 ק"מ/שנייה לגלי S (גלי ההרס) ו- 6.7 ק"מ/שנייה לגלי P. אולם, לצורך חישוב מדויק יותר יש להשתמש במודל מהירויות של גלים אלה בתת הקרקע בישראל. על פי חישוב בעזרת מודל זה, שערכו ד"ר ר. הופשטר וד"ר ו. פינסקי מהמכון הגיאופיסי, מתברר כי במקרה שהמוקד בכנרת יגיעו גלי P לחיפה בחלוף 9.9 שניות וגלי S לאחר 17.6 שניות (בהפרש של 7.7 שניות). לתל אביב יגיעו גלי P אחרי 18.5 שניות וגלי S אחרי 32.9 שניות (הפרש של 14.4 שניות). לירושלים יגיעו גלי P אחרי 19.8 שניות וגלי S אחרי 35.3 שניות (הפרש של 15.5 שניות). נעשה חישוב דומה לרעידת אדמה שמוקדה בים המלח – ראה איור 4. כפי שיובהר בהמשך, לצורך ההתרעה יש חשיבות לפער הזמנים שבין הגעת גלי P וגלי S אשר גדל ככל שהמרחק מהמוקד גדול יותר.

מרגע הגעתם של גלי ההרס לאתר מסויים ועד לקריסת המבנים בעקבות התנודות, חולפות עוד כ- 10-20 שניות. כלומר בסה"כ חולפות מרגע קרות הרעידה במוקד ועד קריסת מבנים באתרים הרחוקים רק 50 ק"מ מהמוקד לפחות כ- 25 שניות. כאשר המרחק גדול יותר, כבדוגמת מוקד בכנרת והגעת גלים לירושלים או תל-אביב, הזמן החולף בין תחילת הרעידה להתמוטטות המבנים יכול להגיע לכדי 45-50 שניות.



איור 4. מרחק מרכזי אוכלוסין בישראל ממוקדים אפשריים של רעידות אדמה והערכת זמן הגעת גלי S (וגלי שטח), הגלים הגורמים למרב ההרס ברעידות אדמה. בסוגרים הפרש הזמנים בין הגעת גלי P וגלי S (חישוב הזמנים נעשה על ידי ד"ר ר. הופשטר וד"ר ו. פינסקי, המכון הגיאופיסי).

7. סיכום

אזורים נרחבים במדינת ישראל, בהם קיימת צפיפות גבוהה של האוכלוסיה, מפעלים ומתקנים שונים, מצויים באזור הקרוב למוקדי רעידות האדמה הצפויות באזורנו (מרחק של עד כ- 100 ק"מ). הנזק הצפוי עקב רעידת אדמה חזקה אחת גבוה מאד.

איננו יודעים להתריע מבעוד מועד על רעידת אדמה, ולאפשר בין השאר לאוכלוסיה להתפנות מהמבנים, ולכוחות ההצלה להיערך. אולם, בעיקרון ניתן כיום לתת התרעה קצרת מועד של מספר שניות ועד מספר עשרות שניות. הזמן הקצר החולף מרגע קרות הרעידה ועד הגעת הגלים ההרסניים מאפשר לבצע מספר פעולות אשר עשויות להציל חיים, להקטין את הנזקים, ובעיקר להגן על האוכלוסיה מפני חלק מהאפקטים המשניים (ובעיקר הסביבתיים) שקורים בעקבות רעידת אדמה.

ג. עקרונות מערכת התרעה קצרת מועד

1. מבוא

ביסוד האפשרות להעניק התרעה קצרת מועד על התרחשות רעידת אדמה עומד פער הזמנים שבין קרות הרעידה לבין הגעת גלי ההרס ועצם ההריסה. הרעיון למערכת מסוג זה הוצע לראשונה על ידי Cooper כבר בשנת 1868 אך למרות שהרעיון הבסיסי של המערכת הוא פשוט לכאורה, הישום של מערכת התרעה קצרת מועד דורש שימוש בטכנולוגיה מורכבת.

יש שני סוגים של מערכות התרעה :

א. מערכות הממוקמות באתר עצמו. מערכות אלה מנצלות את פרק הזמן הקצר שבין הגעת גלים אל האתר לבין קרות הנזק. המערכות המיושנות והפשוטות יותר מזהות את תחילת תנועת הקרקע (הגעת גלי S) ומנצלות את פרק הזמן שבין תחילת הרעידה לקריסת המבנים להוצאת התרעה. מערכות מתקדמות יותר מזהות את גל P שמגיע לפני גלי ההרס (גלי S וגלי השטח) ומציאות התרעה ארוכה יותר.

ב. רשת של חיישנים סייסמיים הממוקמים באזור המשוער של מוקדי רעידות אדמה. הרשת מתבססת על הצבת חיישנים קרוב לכל מוקד אפשרי של רעידת אדמה באזור, המזהים את הרעידה קרוב לזמן התרחשותה. לאחר עיבוד מהיר של המידע מועברת ההתרעה על ידי גל אלקטרומגנטי (במהירות האור) לכלל המדינה, לאזור מסויים, ואז לגופים מסויים. התרעה זו תגיע לנקודות רחוקות מהמוקד מספר שניות לפני הגלים הסייסמיים, ותהיה ארוכה יותר מההתרעה שיכולה להתקבל על ידי מערכות הממוקמות באתר עצמו.

מערכות אלו ידועות בשם "מערכת התרעה קצרת מועד" (Earthquake Alert System (EAS), או Earthquake Early Warning System (EEWS). מערכות אלו, כולל תת-המערכות שבהן, צריכות להיות מדוייקות, מהימנות, אמינות ובעלות שרידות גבוהה.

2. מרכיבי המערכות

2.1 מערכת חיישן בודד או מספר חיישנים הממוקמת באתר

מערכות התרעה אלו מורכבות מחיישן בודד או ממספר חיישנים וממוקמות באתר המיועד להגנה. מערכות אלו מתבססות על עקרונות תפיסת ההתרעה המקומית ולא ההתרעה האזורית.

המערכת מכילה חיישן(ים) המגיב לתנודות קרקע כאשר אלו עוברות סף מסויים. המערכת הבסיסית ביותר מגיבה רק לתנודות חזקות, אלו של גלי S. זמן ההתרעה במקרה זה, קצר מאוד ומתבסס למעשה רק על זמן החולף בין תחילת רעידת המבנה ועד התרחשות הנזק.

מערכות מתקדמות יותר מכילות חיישנים לגלי P. מערכות אלו יודעות לסנן את רעידות האדמה על ידי זיהוי תנודות קרקע בתדירויות של גלי P על מנת להבדילן למשל מפיצוצים במחצבות. מערכת זו מסוגלת לשלוח התרעה כאשר עוצמת התנודות של גלי P עוברת סף מוגדר. מערכות אלו יגיבו מהר יותר ויתנו

ההתרעה ארוכה יותר משום שהן מנצלות את פרק הזמן מאז הגעת גלי P לאתר ועד הגעת גלי S (וגלי השטח) ההרסניים וכן את פרק הזמן שעובר מתחילת הרעידה ועד קרות הנזק. למערכות אלו יתרון בעיקר במקומות בהם האתרים המוגנים ממוקמים בקרבת המוקד.

בהנתן אות ההתרעה מבצעת המערכת פעולות אוטומטיות שהוגדרו מראש, כמו למשל סגירת או פתיחת מפסקים ומערכות שונות. מערכות אלה פשוטות וזולות יחסית בהשוואה למערכות רבות חיישנים. למערכות מסוג זה יתרון במקומות בהם ניתן להסתפק בזמן קצר יחסית לצורך ביצוע פעולות חירום שונות. מערכות כאלו ניתן למצוא למשל בכורים גרעיניים הרגישים במיוחד להתרעות שווא הנובעות מכך שלמרות שהרעידה הייתה חזקה (ולפיכך נשלחה התרעה כללית) תנודות הקרקע באתר הספציפי אינן חזקות באופן הדורש ביצוע פעולות חירום. חיישן הממוקם באתר מזהה את מה שאכן מגיע, ולא את מה שמחושב (בתרחיש – ראה להלן) שעלול להגיע. כאמור, זמן ההתרעה קצר יותר, אך רמת הוודאות לגבי עוצמת תנודת הקרקע באתר גבוהה הרבה יותר.

Leach and Dowla (1996) הציגו מערכות מסוג זה וציינו שלצורך דיוק מרבי של המידע, על המערכת לבצע עדכון של המידע המתקבל מהחיישן (או מספר חיישנים באתר) לפחות 10 פעמים בשנה. במערכת כזו מתקבל מידע ראשוני כבר לאחר 0.3 שניות והמערכת מתעדכנת כל 0.04 שניות.

מערכות המתבססות על חיישן בודד מצויות גם בשימוש ביתי. המערכות הבסיסיות ביותר הינן מערכות המייצרות אזעקה קולית בלבד, הן זולות וניתן להתקין בפשטות בכל בית. ישנם מערכות מורכבות יותר, ודוגמאות לכך היא מערכת Kinemetrics Mitigator, או מערכת Seismic Switch SS-3 שהן מערכות הכוללת מד תאוצה תלת-צירי ומרכיבים המסוגלים לסגור או לפתוח מעגלים אלקטרוניים כאשר התאוצה או התנודה עוברת סף שהוגדר על ידי המפעיל. מערכות אלו אינן יקרות במיוחד ועלותן החל מ-\$100 ועד מספר מאות דולרים (ראה תאור של מערכות אלו בנספח מס' 2).

ראוי לציין שמערכות מסוג זה היו כבר בשימוש לפני כחמישים שנה. דוגמא לכך היא מערכת הרכבות הלאומית של יפן אשר השתמשה במערכות מסוג זה מאז תחילת שנות השישים של המאה ה-20 וזאת על מנת לסגור את מערכות החשמל ולעצור רכבות בקטעי מסילה, כאשר תנודת הקרקע עוברת סף מסויים (ראה למשל Nakamura, 1989). כיום ישנם ביפן מאות מערכות כאלו המגינות על 20,000 ק"מ של מסילות הברזל הרגילות ועל 2,000 ק"מ של הרכבת המהירה (ראה פירוט להלן על מערכת ההתרעה ביפן).

מערכות של חיישנים בודדים קיבלו בשנים האחרונות משנה חשיבות בעיקר בתכנון מערכות למקרים בהם המוקד נמצא בקרבת המטרופולין עליו רוצים להגן, כדוגמת קליפורניה, ותוך שימוש ביכולת הזיהוי של הרעידה מהשניות הראשונות של הגעת גלי P (ראה פירוט להלן).

2.2 מערכת רבת חיישנים הממוקמת באזור המוקד הצפוי של רעידת האדמה

מערכות רבות-חיישנים הינן מערכות המוקמות על פני שטח נרחב ובקרבת מוקדי רעידות האדמה. בכך מנצלות מערכות אלו את העובדה שהחיישנים יחושו ברעידה זמן קצר ככל האפשר לאחר התרחשותה ובמרחק גדול יחסית מהאתר הדורש הגנה, ובכך ניתנת האפשרות להגדיל את זמן ההתרעה. ככל שהאתר רחוק מהמוקד, הגדלת זמן ההתרעה משמעותית יותר.

במערכות מיושנות יותר החיישנים הם כאלו החשים את תנודות הקרקע. מערכות אלו פועלות על עקרון זיהוי של שיא תנודות הקרקע (Peak Ground Motion) על מנת לחשב את מגניטודת הרעידה. זוהי השיטה המדוייקת ביותר והמקובלת לחישוב מגניטודה של רעידות אדמה, אך חסרונה הוא באורך הזמן הגדול יחסית לקבלת מידע מדוייק.

על מנת לצמצם את הזמן להתרעה (ולהגדיל בכך את זמן ההתרעה) החלו כבר בשנות ה-90 של המאה הקודמת להשתמש בהגעת גלי P לצורך ההתרעה וזאת עוד לפני הגעת גלי S ההרסניים. Nakamura היה הראשון שפיתח מערכת כזו, שנקראה UrEDAS (1988). בשיטה זו מזהים את המגניטודה ואת מיקום המוקד של רעידת האדמה באמצעות ניתוח של גלי P. עד לשנים האחרונות נעשה לצורך החישוב שימוש במידע שהתקבל ברוב או בכל פרק הזמן של הגעת גלי P. רק בשנים האחרונות התברר כי ניתן להסתפק לצורך החישוב במידע המתקבל בשניות הראשונות להגעת גלי P (ראה להלן).

מרכיבי מערכת התרעה רבת חיישנים

מרכיבי המפתח בכל מערכת התרעה קצרת מועד הם :

1. מערכת חיישנים (מדי תאוצת קרקע או סייסמומטרים) המפוזרים באזור בו עלולה להתרחש רעידת אדמה, קרוב ככל הניתן למוקדים אפשריים.
2. מערכת תקשורת להעברה מיידיית של המידע מהחיישנים למרכז עיבוד הנתונים.
3. מערכת עיבוד נתונים.
4. מערכת הפצת אות ההתרעה והמידע.
5. מערכות לקליטת המידע ואות ההתרעה במקומות שונים וביצוע פעולות אוטומטיות כנקבע מראש.

כאשר תאוצת הקרקע בעת הרעידה, הנקלטת על ידי אחד או יותר מהחיישנים, עוברת סף מסויים המוגדר מראש, מעבירה התחנה את הנתונים הנאספים בה למרכז עיבוד נתונים. מרכז זה אוסף את הנתונים מכל החיישנים ומעבדם לכלל קביעת מיקום המוקד, זמן הרעידה, מגניטודת הרעידה, ומהימנות הנתונים. בהתאם לאינטגרציה המתקבלת בחישוב מהתחנות השונות מתקבלת החלטה (אוטומטית) לגבי הפעילות שתבצע בשניות הקרובות על מנת להקטין את הנזק מרעידת האדמה.

במערכות אחרות החיישנים בכל תחנה, שהיא למעשה תחנה סייסמית, מסוגלים לבצע עיבוד נתונים עצמאי של מיקום המוקד והמגניטודה. גם במקרה זה תוצאות עיבוד הנתונים מועברות למרכז עיבוד נתונים שמבצע עיבוד של כלל הנתונים ומתקבלת ההחלטה לגבי הפעילות הנדרשת. היתרון של מערכת זו היא שבמידה והרעידה התרחשה קרוב מאד לתחנה מסויימת ואין די זמן לעיבוד נתונים מרכזי תתקבל התרעה על פי עיבוד הנתונים שמבצע החיישן המסויים. בעקבות התרעה זו תתקבל החלטה (אוטומטית, המתוכננת מראש) שתגרום לביצוע מספר פעולות. לגבי האזורים המרוחקים יותר ההחלטה תתקבל על פי עיבוד הנתונים המרכזי הלוקח בחשבון מידע ממספר תחנות. מידע זה מדוייק יותר, אך לוקח זמן רב יותר להפיק את התוצאה (ראה להלן).

מערכות עיבוד הנתונים מסוגלות, כפי שיתואר להלן, לחשב תרחיש נזקים ראשוני לגבי שטח גדול. תהליך עיבוד נתונים זה מורכב מאד ודורש בעיקר עבודת הכנה רחבה המגדירה למערכת מראש את תנאי התשתית, פרמטרים הנדסיים של המבנים שעל פני השטח, וכן מערכת חישובית מתקדמת ומהירה.

בעקבות עיבוד נתונים זה מקבלת המערכת החלטה אוטומטית לאילו אזורים בארץ ולאלו גופים ספציפיים תשלח התרעה קצרת המועד. כאשר התרחיש מדויק, ניתן לדייק בביצוע הפעולות האוטומטיות. כאשר המידע כללי עלולות להנתן פקודות מיותרות לסגירת מערכות. להתרעות שוא יש מחיר: כך, למשל, אם ההנחיה שתוביל לסגירת טורבינות חשמל מיותרת, הנזק כפול: עלות גבוהה לכיבוי והפעלה של הטורבינות, וכן איבוד החשמל לחלקים שונים במדינה בפרק זמן חשוב שלאחר רעידת אדמה. ככל שמספר החיישנים במערכת נמוך יותר הסיכוי להתרעות שווא ותקלות גדול יותר, משום שאין אפשרות לבצע הצלבת מידע ולוודא שלפחות חלק מהחיישנים האחרים חש ברעידה.

מערכות רבות-חיישנים הממוקמות בקרבת מוקדי רעידות האדמה מסוגלות לספק את זמן ההתרעה הארוך ביותר לקראת רעידת האדמה. המערכות מנצלות את עיבוד הנתונים המהיר ואת העובדה שהחיישנים ממוקמים בקרבת המוקד ובמרחק מריכוזי האוכלוסין.

מערכות לקליטת אות ההתרעה יכולות להיות מוצבות באתרים שלהם נדרשת הגנה מפני רעידות אדמה כגון: גורמים שילטוניים ומוניציפאליים, מפעלים, אתרים ביטחוניים, תעשיות (כגון חברת חשמל ומערכות הגז), מרכזי אוכלוסין (כגון קניונים, אולמות תרבות, בתי ספר), ובתים פרטיים. באתרים אלה נקלט המידע המעובד מהמערכת ובכל אתר מתבצע תהליך קבלת החלטות אוטומטי המתאים לו. כך, יתכנו מקרים שבהם רעידת אדמה תגרום למערכות בגופים שונים לקבל החלטות שונות על ביצוע פעולות אוטומטיות. למשל, יתכן שבעקבות רעידה חלשה יחסית תתקבל החלטה להכניס תלמידים בבתי ספר אל מתחת לשולחנות ולעצור רכבות, אך תתקבל החלטה שלא לבצע כל פעולה בתחנות כח של חברת החשמל.

אחד הנושאים המסובכים יותר הוא מערכת עיבוד הנתונים. קביעת אלוגריתם החישוב מסובכת מאד, תוך שהוא צריך להיות פשוט דיו כך שזמן החישוב יהיה קצר והסיכוי להתרעת שווא יהיה קטן ככל הניתן. ככל שנדרש חישוב מדויק יותר, שבסופו הסיכוי להתרעת שווא נמוך יותר, זמן החישוב ארוך יותר.

2.3 שימוש משלים במערכות GPS

Hudnut et al. (2002) הציעו להשתמש בטכנולוגיית GPS כמרכיב משלים לאלמנטים הסייסמיים במערכות התרעה קצרות מועד. ניתן להשתמש ב-GPS לצורך זיהוי קריעה של פני השטח ותנועה יחסית לאורך העתקים בעקבות רעידות אדמה וזאת זמן קצר מאד לאחר הרעידה. עוצמת או גודל (אורך) קריעת פני השטח עומדת ביחס ישר למגניטודת הרעידה. לפיכך, המידע שיגיע מ-GPS יבקר את המידע שיתקבל מהמערכת הסייסמית ובכך יקטנו הסיכויים שרעידה חלשה (ללא קריעה של פני השטח) תזוהה מסיבה כלשהי על ידי המערכת הסייסמית כרעידה חזקה. על מנת לתרום ביעילות מרבית למערכת זו, דרוש זמן דגימה קצר ביותר של מערכת ה-GPS. נתוני GPS משלימים את נתוני מערכת ההתרעה קצרת מועד כפי שתוארה ואינם יכולים לעמוד בפני עצמם לצורך התרעה קצרת מועד. הנתונים יתוספו בכל מקרה למפות התרחיש שיחשבו ויונפקו זמן קצר לאחר הרעידה (ראה להלן). המידע לגבי פעילות העתקים בעזרת GPS נותן לפיכך למערכת ההתרעה מימד נוסף, דבר שמגביר את אמינות המערכת.

2.4 דרכי תקשורת בין מרכז עיבוד הנתונים לגופים השונים ולציבור

המידע המעובד במרכז עיבוד הנתונים חייב להיות משודר במהירות רבה לגופים המעוניינים במידע זה ולציבור. אות התרעה מועבר בדרכים שונות בעזרת אחת מהטכנולוגיות הבאות:

א. טכנולוגית תקשורת ציבורית: רדיו, טלוויזיה, מערכות כריזה.

ב. תקשורת סלולרית (טלפניה, SMS).

ג. תקשורת לוויינית.

ד. קווי תקשורת יעודית.

יש להבחין בין ציבור לא מאורגן (בתים פרטיים, משרדים קטנים), ציבור מאורגן (בתי ספר, בתי חולים, מפעלים וכו'), וגופים גדולים (למשל בתי זיקוק, חברת חשמל, וכו'). אותות הנשלחים ממרכז עיבוד הנתונים יכולים להיות כלליים או פרטניים:

1. אות התרעה כללי המועבר באופן אחיד לכל המדינה, וכל גורם המקבל אותו יפעל בהתאם להחלטות שהתקבלו מראש.

2. אות התרעה סלקטיבי: אות זה ישלח רק לחלק מהגורמים על פי החלטות שהתקבלו מראש לגבי גודל רעידה, המרחק מהגורם והסיכון לפגיעה בו.

נושא התקשורת במערכות התרעה, תוך שימת דגש על יעילות וקיצור הזמן, תופס בשנים האחרונות מקום חשוב יותר ויותר בתכנון מערכות התרעה קצרות מועד (ראה למשל Horiuchi et al., 2005).

2.5 שרידות המערכת

מערכת התרעה קצרת מועד על כל מרכיביה חייבת להיות במצב מוכנות מרבית בכל רגע לפני הרעידה, בזמן הרעידה ולאחריה. ישנם שני מרכיבים המהווים סיכון לשרידות המערכת:

א. שרידות המערכת בשגרה, קרי, אחזקתה לכל אורך התקופה שלפני הרגע הקריטי בו אנו זקוקים לשרותיה. לכך משמעות רבה בתכנון המערכת כמו למשל תכנון מיקום החיישנים על מנת למנוע פגיעה זדונית בהם או גניבתם. בנוסף יש לקחת בחשבון את העלות של אחזקת המערכת לאורך זמן. בהקשר זה יש לציין שבישראל יכולה לחלוף תקופה ארוכה של עשרות רבות של שנים עד לרעידה ההרסנית הבאה.

ב. שרידות המערכת בעת רעידת אדמה. על המרכיבים השונים לעמוד בתנועת הקרקע הצפויה עקב הרעידה. אנו זקוקים לחיישנים גם אחרי הרעידה, למשל לצורך ניטור של רעידות המשך (aftershocks). כמו כן, נזדקק למערכת תקשורת ולמערכת עיבוד נתונים לצורך עיבוד מדויק יותר של נתוני הרעידה הראשונה, ועיבוד של רעידות נוספות. בנוסף, כל מערכת קבלת האותות בגופים השונים חייבת לפעול בזמן רעידת האדמה ולאחריה. ישנם מקומות בעולם שבהם מקימים שני מרכזי עיבוד נתונים, הממוקמים במרחק זה מזה כך שבמקרה שהאחד נפגע השני נכנס לפעולה.

3. התרעה בעזרת מידע מהשניות הראשונות של הגעת גלי P: חידושים מהשנים

האחרונות

בשנים האחרונות זוהה הפוטנציאל שבזיהוי ואיפיון רעידות אדמה בעזרת נתוני התדירות של גלי P ועם מספר חיישנים מצומצם. Allen and Kanamori (2003) הציגו לראשונה את היכולת להעריך את מיקומו של המוקד ואת המגניטודה ממידע המתקבל מגלי P בשניות הראשונות בלבד לאחר הרעידה. בכך נוצרת אפשרות להקטנה נוספת של הזמן החולף מרגע הרעידה ועד משלוח ההתרעה ונפתחת למעשה לראשונה האפשרות למתן התרעה גם לערים שממוקמות בקרבה ממשיית למוקדים, כמו למשל בקליפורניה, שם התבצע מחקר זה.

המחברים הצביעו על הקשר בין התדר של גלי P בארבע השניות הראשונות של רעידות אדמה למגניטודה שבין 3.0 ל-7.3. בין השאר הצביע המחקר על כך שרעידות אדמה חלשות מייצרות גלי P בתדר גבוה, בעוד שרעידות חזקות מייצרות גלי P בעיקר בעלי תדר נמוך. Allen (2004) הצביע על הקשר בין תדר גלי הרעידה לבין המגניטודה על בסיס נתונים מ-53 רעידות אדמה בקליפורניה. נמצא כי ברעידות עם מגניטודה קטנה מ-5 ניתן לזהות את המגניטודה כבר על פי שתי השניות הראשונות בתדר של 10 הרץ, וברעידות גדולות יש צורך במידע המגיע במהלך 4 השניות הראשונות של הרעידה (בתדר של 3 הרץ).

Allen and Lockman (2003, ו-2006) הראו קשר דומה גם ברעידות באוקיינוס השקט וביפן והסיקו שאין השפעה לשונות בתכונות הסייסמיות באזורים השונים (בעיקר תכונות הניחות - attenuation relations) על הקשר בין תדירות גלי ה-P והמגניטודה.

Olson and Allen (2005) הרחיבו את המחקר והתבססו על 71 רעידות אדמה בקליפורניה, יפן, טיוואן, ואלסקה. הם הראו כי ניתן לאמוד את המגניטודה של רעידה עוד בטרם הסתיימה, וזאת בניגוד למודלים קודמים שהעריכו שכאשר רעידת אדמה מתפתחת מתחוללים בתכונותיה שינויים תוך כדי התרחשותה, דבר המגביל את היכולת להעריך את המגניטודה כל עוד לא הסתיימה התנועה על גבי מישור ההעתק. היכולת להעריך את המגניטודה מהנתונים של ארבע השניות הראשונות בלבד, גם כאשר זמן הרעידה רב יותר, מצביעה על כך, שמנגנון ההתחלה של רעידות אדמה חזקות שונה מזה של רעידות חלשות.

Kanamori (2005) ולאחריו Wu and Kanamori (2005) הראו כי כאשר תדר הגלים גדול מ-1 הרץ מגניטודת הרעידה לא תהיה מעל ל-6. אם התדר קטן מ-1 הרץ, הארוע יהיה עם מגניטודה גדולה מ-6 וככל הנראה הרעידה תגרום נזק. אם התדר קטן מ-0.5 הרץ, הארוע הוא כמעט בודאות הרסני. שיטה זו מאפשרת קביעת רף להתרעות.

Allen and Olson (2005), הציגו את הקשר שבין זמן המחזור למגניטודה:

$$M=5.93+7.14\log T_p^{\max}$$

כאשר $T_p^{\max}$ הוא זמן המחזור המרבי של גל P בין 0.05 שניות ל-4 שניות מתחילת ארוע הרעידה. המחברים מצאו כי השגיאה המתקבלת מכלל הרעידות היא 0.5 יחידות מגניטודה.

המסקנה מנתונים אלה היא כי ניתן לאמוד את המגניטודה של הרעידה תוך השניות הראשונות של התרחשותה באופן בלתי תלוי באורכה. יש לציין כי אורך הזמן של חלק מהרעידות שהתקבלו היה 30 או 40 שניות במוקד.

בשנים האחרונות עוסקת קבוצת מדענים מישראל ויפן בשיפור היכולת לקביעת מיקום המוקד ברשת הישראלית וביפן. הקבוצה בראשותו של ד"ר ו. פינסקי, מהמכון הגיאופיסי לישראל, מציגה יכולת זיהוי של המוקד בדיוק של פחות משלושה ק"מ, דיוק החשוב בחישוב מפות התרחיש וקביעת ההתרעה (ראה להלן) (Pinsky, 2006; Pinsky et al., 2004, 2006, 2007; Polozov et al., 2007).

4. הדיוק בקביעת המגניטודה ומספר החיישנים הנדרש

למספר החיישנים יש השפעה על זמן ודיוק עיבוד הנתונים. ככל שיהיו יותר חיישנים המידע יהיה רב יותר והדיוק בהתרעה גבוה יותר, אך זמן החישוב יגדל בגלל הזמן הדרוש לגלים להגיע לכל התחנות. לפיכך, יש צורך לקבוע את מספר החיישנים המיטבי, כזה שיספק דיוק מרבי, ובזמן הקצר ביותר.

מספר החיישנים הנדרש ופריסתם צריכים להיות כאלה שחלקם יהיה קרוב דיו לכל מוקד צפוי של רעידת אדמה. בהנחה שרעידת האדמה הצפויה תתרחש רק לאורך העתקים ידועים ובהנחת עומק רעידות אדמה מסויים ניתן לבצע חישוב של המספר הנדרש של חיישנים כפי שהציע Heaton (1985) עבור מערכות התרעה שאינן אומדות את המגניטודה על פי השניות הראשונות של גלי P :

בהנחה שאורך ההעתקים הכולל הוא L , והמוקדים יכולים להופיע לכל אורכם, ומספר החיישנים המפוזרים באופן אחיד הוא N , זמן התנועה הממוצע t של גלי P מהאפיצנטר (הנקודה על פני השטח שמעל המוקד) אל התחנה הקרובה ביותר הוא :

$$t = L/4NV$$

כאשר V היא מהירות גלי P .

אם נניח עומק h לכל מוקדי רעידות האדמה, זמן ההגעה הממוצע אל התחנה הקרובה ביותר יהיה :

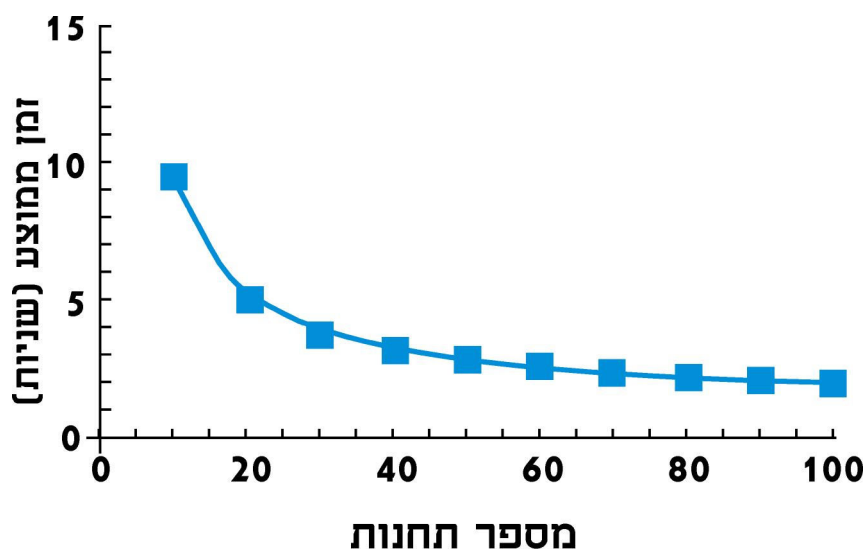
$$t = ((L/4N)^2 + h^2)^{1/2} / V$$

אם נניח שכדי ליצור התרעה ראשונית, אפילו ללא עיבוד נתונים, דרוש מידע משתי תחנות לפחות, אזי הזמן הממוצע להגעת גלי P הוא :

$$t = ((3L/4N)^2 + h^2)^{1/2} / V$$

נתאים את חישוביו של Heaton למצב במדינת ישראל: נניח שהאורך הכולל של העתקים החשודים כפעילים במדינת ישראל הוא כ- 800 ק"מ, שמהירות גלי P היא 6.7 ק"מ/שניה, ושעומק ממוצע של רעידות האדמה הוא 15 ק"מ, ועל פי זאת נחשב את הזמן הממוצע להגעת הגל אל שתי תחנות הקרובות ביותר כפונקציה של מספר התחנות הסייסמיות שימוקמו לאורך ההעתקים. מהחישוב המוצג באיור 5, מסתבר כי

אם נשתמש ב- 10 תחנות בלבד הזמן הממוצע להגעת הגל יהיה כ- 9 שניות ואילו אם נשתמש ב- 50 תחנות הזמן הממוצע יהיה כ- 3 שניות. אם נוסיף עוד תחנות מעבר למספר זה של תחנות, הקיצור בזמן ההגעה הממוצע לא יהיה משמעותי.



איור 5. זמן הגעת הגל הסייסמי לשתי תחנות לפחות כתלות במספר התחנות הסייסמיות הממוקמות באזור בו צפויה רעידת האדמה (על פי Heaton, 1985 ; Leach and Dowla, 1996).

ככל שנדע להעריך נכון יותר את המיקום של ההעתקים שעליהם צפויות הרעידות ההרסניות, ובכך להעריך את מיקום מוקדי הרעידות, ניתן להקטין את מספר התחנות הנדרשות לצורך קבלת התרעה מהירה. החידושים של השנים האחרונות ביכולת לזהות את תכונות הרעידה על פי השניות הראשונות להגעת גלי P הביאו גם ליכולת להקטין את כמות החיישנים ולהשגת דיוק רב יותר בקביעת המגניטודה ומיקום המוקד.

Allen (2004) ו-Lockman and Allen (2004) עסקו בנושא הדיוק בחישוב המגניטודה כפונקציה של הזמן מאז הרעידה ומספר החיישנים הנדרש. חישוב מגניטודה תוך שימוש במידע מתחנה בודדת בקרבת המוקד, ובתוך 2 שניות, מביא לשגיאה של כ- 0.7 יחידות מגניטודה. שימוש בשתי תחנות מפחית את השגיאה ל- 0.6 יחידות, שימוש ב- 4 תחנות, ולאחר 4 שניות מפחית את השגיאה לכ- 0.5 יחידות, ושימוש ב- 10 תחנות ולאחר כ- 10 שניות מפחית את השגיאה ל- 0.3 יחידות מגניטודה. בסיכומו של דבר מתברר, שלמרות שהדיוק במגניטודה עולה ככל שמספר החיישנים רב יותר ופרק הזמן הנבחן של הרעידה ארוך יותר, ניתן להגיע לדיוק מספק באמדן המגניטודה תוך שימוש במידע המתקבל מארבע השניות הראשונות ומארבעה חיישנים בלבד עם ערך שגיאה של 0.4 יחידות מגניטודה.

Allen (2004) הציג לדוגמא השתלשלות של תהליך הגדרת המגניטודה עם התקדמות הזמן והגעת המידע מתחנות שונות. כך למשל ניתוח הנתונים של רעידת האדמה של Hector Mine (התרחשה ב- 1999, מוקדה היה ממזרח ללוס אנג'לס בקליפורניה, מגניטודה 7.1) מראה כי בשניה הראשונה ההערכה תהיה שהרעידה היא חלשה ותוך שימוש בנוסחה המתאימה להנחה זו (על פי תדר הגלים) הזיהוי הוא של מגניטודה 4.2. לאחר שלוש שניות המערכת מבחינה (לפי התדר) שהרעידה חזקה ועוברת לחישוב על פי הנוסחה המתאימה למצב זה. לאחר 4 שניות המגניטודה הנאמדת היא 6.7 עם שגיאה של 0.4 יחידות מגניטודה. לאחרונה

הציעו (2006) Simons et al. אלוגריתם חדש לחישוב אוטומטי של המגניטודה המתבסס על הבחנה דקה באופי הגל הסייסמי על בסיס המידע המתקבל מהשניות הראשונות של הגעת גלי P.

במקרים בהם יש צורך בעיבוד מהיר במיוחד של הנתונים, ניתן להשתמש בחיפוש בודד או בצמד החיפשים הקרוב ביותר למוקד לצורך איכון הרעידה וקבלת החלטות בהתאם. Lockman and Allen (2005), בדקו מידע שהתקבל מ-50 תחנות סייסמיות מיד לאחר רעידה. נבדק עיבוד הנתונים המהיר שהתקבל מחישוב המידע מתחנה בודדת בהשוואה לנתוני הרעידה כפי שהתקבלו לאחר העיבוד הסופי. המידע שנבדק היה מגניטודת הרעידה, המרחק מהמוקד, והאזימוט למוקד, וזאת על ידי שימוש בנתונים של גלי P. החוקרים מדווחים על פיזור גדול בדיוק המדידות. רבע מהתחנות הראה תוצאות בדיוק של ± 0.3 בהערכת המגניטודה, ± 15 ק"מ במרחק מהמוקד ו- ± 20 מעלות בחישוב האזימוט למוקד. למרות אי הדיוק אמדן זה עדיין מספק לצורך התרעה מוקדמת לרעידת אדמה.

לסיכום, מכלול הנתונים שהוצגו מצביע על הפוטנציאל הטמון בזיהוי ואיפיון רעידת האדמה לפי גלי P לצורך מערכת התרעה הנדרשת לעיבוד מהיר של מידע ממספר תחנות מצומצם. ההתרעה תוך שימוש בגלי P היא מהירה, מדויקת, ומאפשרת שימוש במספר חיישנים מינימאלי, וחשובה במיוחד במקומות בהם האתר המוגן ממוקם בקרבת המוקד.

5. משך זמן האזעקה ומשך זמן ההתרעה

עיקר המחקרים הנעשים כיום בתחום הערכות זמן ההתרעה מתקיימים בקליפורניה בקבוצתו של Prof. Richard Allen מאוניברסיטת קליפורניה בברקלי (למשל, Allen, 2004, Allen, 2003; Allen and Kanamori, 2006 ועוד) ובטייואן בקבוצתו של Wu (למשל Wu and Kanamori, 2005; Wu et al., 2004). Allen (2004) הגדיר את "משך זמן האזעקה" כזמן החולף מרגע תחילת הרעידה ועד הוצאת אות ההתרעה. "משך זמן ההתרעה" הוא הזמן שחולף בין הוצאת ההתרעה לבין הזמן שבו תנודת הקרקע באתר היא המרבית. כלומר, משך זמן ההתרעה שונה מאתר לאתר.

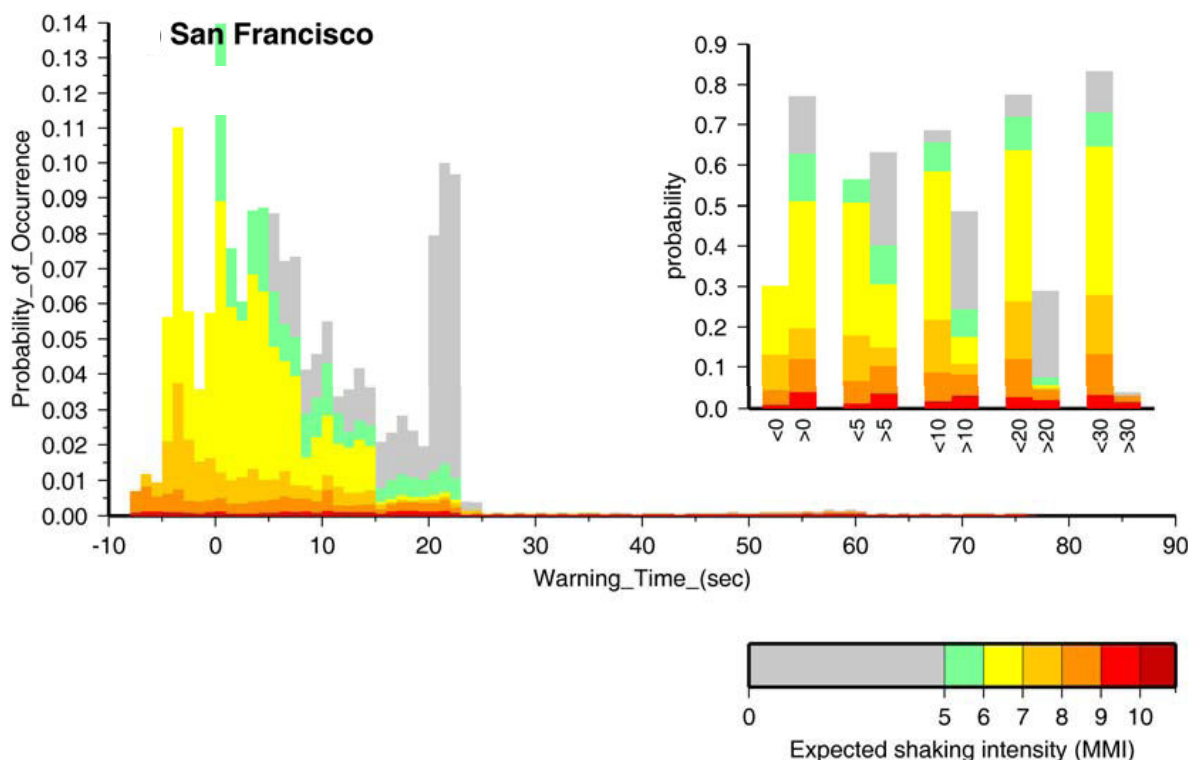
בבסיס חישוב משך זמן האזעקה עומדת ההחלטה כמה זמן יש להקצות לחישוב לפני הסקת המסקנות לגבי המגניטודה ומיקום מוקד הרעידה. המחברים בחרו, כפי שהוצג לעיל, לקבל את המידע שמעובד במערכת מנתוני 4 השניות הראשונות של גלי P, ב-4 תחנות. לזמן זה יש להוסיף את זמן צבירת הנתונים בתחנות ועיבודם, שהוא כ-4.5 שניות. 2.5 שניות מתוך 4.5 שניות אלו הוא הזמן שלוקח לכל מכשיר כדי להכין את הנתונים לשידור. בנוסף, דרושה שניה אחת כדי להעביר את הנתונים אל מרכז העיבוד, ושניה נוספת להעברת אות האזעקה למשתמשים. זמן עיבוד הנתונים עצמו כמעט זניח (Allen, 2004). הערכת זמן זו היא על בסיס החומרה הקיימת היום בקליפורניה. על מנת להקטין זמן זה ניתן לשפר את מערכות העיבוד בחיישנים, את הטלמטריה ולהגדיל את צפיפות המכשירים.

Allen and Kanamori (2003), Allen (2004), (2006 ועבודות נוספות), בחנו הערכות של זמן התרעה שתתכן לאזורים במפרץ סן פרנסיסקו על בסיס 35 תרחישים נבחרים בצפון קליפורניה שנבחרו על פי צפי הפעילות הסייסמית כפי שנקבע על ידי ה-WGCEP Working Group on California Earthquake Probabilities (2003). ההסתברות להתרחשות אחד או יותר מתרחישים אלה ב-30 השנים הקרובות במגניטודה שבין 5.8 ל-7.9 הוערכה כ-84%. הסיכוי לרעידת אדמה במגניטודה של 6.7 או יותר באזור מפרץ סן פרנסיסקו

בשלושים השנים הקרובות הוא 62% ($\pm 25\%$). על פי נתונים אלו נעשה חישוב של זמן ההתרעה על בסיס מערכת החיישנים הקיימת כיום בקליפורניה ועל בסיס מערכת ElarmS להתרעה מרעידות אדמה (Allen, 2004).

משך זמן האזעקה תלוי מאוד במרחק התחנות מהמוקד. בצפון קליפורניה ממוקמות מספר אלפי תחנות סייסמיות, אולם מערכת Elarms בנויה על מידע המתקבל רק מתחנות מסוג Broadband, כמוהן יש בצפון קליפורניה כ-140. המרחק האופייני בין התחנות הסייסמיות בקליפורניה (מערכת TriNet) הוא כ-25 ק"מ. פיזור צפוף זה חשוב מאוד בדיוק קביעת המגניטודה, אשר תלוי במספר התחנות הרושמות את הגעת גלי P (Kanamori et al., 1997, Hauksson et al., 2001).

הסיכויים לזמן ההתרעה עבור סן פרנסיסקו מוצגים באיור 6 (מתוך Allen, 2006). מתברר כי עבור כל רעידות האדמה ההרסניות הצפויות, העיר סן פרנסיסקו יכולה לקבל התרעה שבין שניות אחדות לבין 77 שניות. משמעות זמן התרעה שלילי בגראף היא שההתרעה תגיע לאחר הגלים הסייסמיים ולמעשה אין יכולת ליצור התרעה. הציר האנכי מציג את הסיכוי להתרחשותה של רעידת אדמה אחת או יותר לפני שנת 2032 ועם זמן התרעה מסויים. כפי שניתן לראות רוב ההתרעות יתקבלו בפחות מ-25 שניות. הצבעים באיור 6 מציגים את העוצמה הצפויה של רעידת הקרקע בכל ארוע על פי סולם העוצמה המעודכן של מרקלי (MMI); בעוצמה הקטנה מ-5 לא צפוי נזק ובעוצמה מעל 9 צפוי נזק משמעותי. ה"זנב" הארוך בעקומה נובע מקיומו של העתק סן אנדראס שהוא ההעתק המשמעותי באזור ושיכול ליצר רעידות חזקות מאוד במרחק רב מסן פרנסיסקו, אשר מחד יתכן ויפגעו בעיר אך מאידך המרחק יאפשר התרעה ארוכה יחסית.



איור 6. זמן ההתרעה בסן פרנסיסקו במערכת ElarmS (ארה"ב) כתלות בהסתברות לרעידת האדמה ולעוצמתה הצפויה (Allen, 2006).

חלקו הימני של איור 6 מציג את ההסתברות שרעידת אדמה אחת או יותר תקרה עד 2032, ואשר תנתן עבודה התרעה של יותר ופחות מ-0, 5, 10, 20, ו-30 שניות. כך למשל הנתונים מצביעים שיש סיכוי של 63% לזמן התרעה הקטן מ-10 שניות מפני רעידות שיגרמו לנזק בסך פרנסיסקו (MMI גדול מ-5) וסיכוי של 30% שלא תהיה התרעה כלל. אולם, יש סיכוי של 40% להתרעה הארוכה מ-5 שניות (MMI גדול מ-5) וסיכוי של 35% שלא תהיה התרעה כלל. מכאן, שהסיכוי להתרעה של 5 שניות ומעלה גדול מהסיכוי לאי התרעה כלל ואלה נתונים מעודדים עבור עיר הבנויה על העתקים פעילים ראשיים ובקרבתם. חישוב דומה לגבי ערים אחרות בקליפורניה ראה אצל Allen (2006).

Allen (2004) מצביע על כך שחישוב הזמנים הוא שמרני וזהיר וכי יתכן שזמן ההתרעה יהיה ארוך יותר. זאת משום שהחישוב מתבסס על המרחק של האתר מהמוקד ועל ההנחה שגלי S נעים ישירות מהמוקד אל האתר. המחבר טוען כי קצב התקדמות ההעתקה נמוך מקצב תנועת גלי ה-S ולפיכך יתכן שזמן הגעת הגלים יהיה מאוחר מהחישוב כפי שנעשה בעבודה זו.

6. מפת התרחיש

תוצר מרכזי של מערכות התרעה קצרת מועד הן מפות תרחיש, כלומר מפות המחשבות באופן אוטומטי ובמהירות רבה את תנודת הקרקע המרבית (Peak Ground Motion) ואת הנזקים שעלולים להתרחש באזורים שונים בעקבות רעידת אדמה. על פי חישוב הנזקים הצפויים באזורים השונים (והבאים לידי ביטוי במפה), המערכת אמורה להפיק באופן אוטומטי את ההתרעה לכל מקום ברחבי המדינה, התרעה שיכולה להיות שונה מאזור לאזור. החשיבות איננה רק בקביעה לאילו אזורים יש להוציא התרעה, ובאיזו חומרה, אלא גם לאילו אזורים אין צורך בהתרעה, ובכך למנוע שם התרעת שווא.

ראוי לציין כי יש חשיבות רבה בהפקת מפת תרחיש, ולא רק לצורך התרעה, אלא לצורך טיפול באוכלוסיה ובתשתיות בשעות שלאחר הרעידה. מפה זו שימושית לכוחות ההצלה ולמקבלי ההחלטות לצורך תכנון פעולותיהם, ולכן תועבר לידיהם במהירות האפשרית. מפה זו יכולה להתעדכן על ידי מערכת ההתרעה עם הגעת הנתונים מחיישנים מרוחקים. לעדכונים אלה יש חשיבות ומשמעות עד להפקת מפת נזק אמיתית על פי שהתרחש בפועל בשטח.

חישוב מפת התרחיש לוקח בחשבון את מגניטודת הרעידה, את מיקום המוקד שלה, ואת נתוני התשתית והתכסית ברחבי המדינה. במערך החישובים משולבים גם נתונים הנדסיים של המבנים ובעזרת מידע זה ניתן לחשב את הנזק שיגרם למבנים בעקבות אותה רעידה.

אחד הנושאים המורכבים ביותר והמקשים באופן משמעותי על החישוב ועל רמת הדיוק של מפת התרחיש היא משוואת הניחות. משוואת הניחות מתארת את הפחתת האנרגיה של הגלים הסייסמיים בדרכם ממוקד הרעידה אל האתר. הפחתת האנרגיה תלויה במרחק האתר מהמוקד ובתכונות התשתית הסלעית דרכה נעים הגלים.

ישנן מספר רב של פונקציות בהן נעשה שימוש בעבר עבור רעידות אדמה שונות באזורים שונים (רשימת מקורות בנושא מוצגות אצל Allen (2004)). רוב המשוואות מתבססות על הקשר הבא, המוכר כבר מזה כשלושים שנה:

$$A = A_0 r^n e^{-kr}$$

כאשר A הוא תאוצת הקרקע המרבית (Peak Ground Acceleration - PGA) במרחק r ו- A_0 , n , k הינם קבועים שתלויים באופי התווך בו נעים הגלים.

מערכת ElarmS המתוכננת בארה"ב (תפורט להלן), משתמשת במשוואות הניחות בתהליך דו-שלבי. כאשר מתרחשת רעידה ומחושבת המגניטודה הצפויה, המערכת מחשבת את A_0 , n מיחסים שנקבעו על בסיס רעידות קודמות (ראה פרוט אצל Allen, 2004), ומחושב ערך תאוצה מרבית כתלות במרחק. עם חלוף הזמן מאז הרעידה, התחנות הקרובות למוקד מודדות את התאוצה המרבית אצלן בפועל. כאשר יש מידע ממספר תחנות קרובות ניתן לחשב ביתר דיוק את משוואת הניחות וממנה את תאוצת הקרקע המרבית הצפויה בכל אתר. ראוי לציין כי חישובים אלה מניחים שהתחנה בנוייה על סלע קשה ואינם מתחשבים במסלע האמיתי.

7. היתרונות והחסרונות של מערכת רבת חיישנים הממוקמת בקרבת מוקדי רעידות

האדמה בהשוואה למערכת הממוקמת בקרבת האתרים

1. מערכת רבת חיישנים הנשענת על מרכז עיבוד נתונים מסוגלת לספק מידע מדויק יותר על מיקום המוקד ועל מגניטודת הרעידה ולספק תרחיש של הנזקים הצפויים ברחבי המדינה בעקבות רעידת האדמה.
2. זמן הוצאת ההתרעה של מערכת רבת חיישנים ארוך במעט לעומת חיישן בודד עקב הזמן הדרוש להגעת גלי הרעידה לחיישנים ולעיבוד הנתונים.
3. התרחיש שמחשבת המערכת לאתר מסויים המרוחק מהמוקד, כאשר החיישנים בקרבת המוקד, מתבסס על מידע המוזן למערכת מראש (כמו תנאי תשתית ומשוואת הניחות) יחד עם נתוני רעידת האדמה. משוואות הניחות והערכת ההגברה אינן מדויקות ולכן התרחשים אף הם אומדניים ובלתי מדויקים. לעומת זאת, חיישן הממוקם באתר מודד את תאוצת הקרקע הממשית ואיננו נזקק לאומדן.
4. במקרים שבהם המוקד סמוך למרכזים עירוניים מערכת ההתרעה רבת חיישנים אינה מסוגלת להפיק התרעה ארוכה דיה משום שהזמן הנדרש לגל להגיע לאתר קצר מזמן החישוב. במקרים אלו יש יתרון לחיישנים בודדים הממוקמים באתרים עצמם. לעומת זאת, ככל שהמרחק מהמוקדים גדול יותר, הפער בין התרעת מערכת רבת חיישנים להתרעת חיישן בודד באתר הולכת וגדלה.
5. מערכות רבות חיישנים, הכוללות מרכז עיבוד נתונים, מורכבות ודורשות תחזוקה משמעותית לאורך זמן, יותר מאשר מערכות של חיישן בודד. יחד עם זאת, אמינות מערכת רבת חיישנים גבוהה יותר משום שגם אם חלק מהחיישנים לא יעבדו, יהיו אחרים שיספקו את המידע.

6. המערכות של החיישן הבודד באתר זולות מאד יחסית למערכות רבות החיישנים הממוקמות בקרבת המוקדים. מערכת רבת חיישנים יקרה עקב הצורך בחיישנים רבים, מרכיבי תקשורת ועיבוד נתונים. יחד עם זאת ראוי לזכור כי לצורך השוואת עלויות לאומית יש לסכום את עלות כלל המערכות של החיישנים הבודדים.

8. עקרונות תהליכי קבלת ההחלטות של המערכת

מערכות ההתרעה קצרות מועד מתוכננות להגיע לאיזון נכון בין הדיוק הנדרש, הסיכון להתרעת שווא וזמן החישוב, וזאת על מנת להפיק התרעה מדוייקת ביותר בזמן קצר ביותר ולהפיצה לאזורים ולגופים הנכונים.

אם האתר רחוק ממוקד הרעידה יש די זמן בדרך כלל לביצוע תהליך סדור של חישוב מהיר, לקבלת החלטות אוטומטיות ולמשלוח אות התרעה. אולם, ניתן להעביר מידע מידי גם לאחר עיבוד נתונים חלקי. למשל, במצב בו האמדן הראשוני הוא לרעידה חזקה ביותר (לדוגמא במגניטודה 7 ומעלה) המערכת יכולה להעביר אות אזהרה לא מעובד גם אם המידע הגיע ממספר תחנות קטן בלבד ולאחר עיבוד נתונים קצר, וזאת משום שברור שהרעידה הרסנית וחשובה מדוייק יביא אמנם למידע נוסף אך אין בו לשנות מהותית. גם ברעידות פחות חזקות ניתן להעביר נתונים ראשוניים ובהמשך, לאחר עיבוד נתונים סדור ניתן להעביר מידע מדוייק פעם נוספת.

העברת אות במהירות רבה, גם אם המידע איננו מדוייק, יכולה להיות חשובה ונדרשת לגופים אשר פעילות אוטומטית שתבצע מיידיית אחרי קבלת האות איננה גוררת משמעות רבות. כך למשל, אם מעבירים אות ונפתחות דלתות של שרותי חירום כמו תחנות כיבוי אש, או מעליות נעצרות בקומה הקרובה, אזי גם אם הייתה הגזמה בהערכה והרעידה המחושבת איננה חזקה, האוכלוסיה לא הוטרדה משמעותית, וגם לא נגרם נזק כלכלי גבוה בעקבות כך. עבור גופים גדולים כמו חברת חשמל, מפעלים פטרוכימיים, כורים גרעיניים, מערכות גז וכיו"ב, חשיבות ההתרעה, ובזמן קצר, רבה ביותר, אך דיוקה חייב להיות גבוה מאד. התרעה מדוייקת יכולה להתקבל רק כתוצאה מעיבוד מסודר, בניית מפת תרחיש, תוך הקטנת הסיכון לאזעקת שווא כמעט לאפס. הערכה מדוייקת של המידע אורכת שניות בודדות ולכך משמעות רבה במקרה של רעידה חזקה. ניתן לומר כי החשיבות של דיוק החישוב היא קריטית ברעידות בינוניות וזאת משום שבעקבות רעידות חלשות אין צורך בפעולה כלשהי וברעידות חזקות מאד דיוק החישוב אינו קריטי משום שברור מיד שהרעידה היא כה חזקה שיש צורך לבצע את כל הפעולות הנדרשות.

לסיכום, בתכנון בניית מערכת ההתרעה יש לבצע תהליך מורכב של קבלת החלטות תוך הגדרת סוגים שונים של התרעות, על פי רמת הדיוק, מהירות העברת האות, הימנעות מהתרעות שווא, וסוגי הגורמים אליהם נשלחת ההתרעה.

9. התרעת שווא

אחד הנושאים הבעייתיים ביותר במערכות התרעה היא הסכנה של התרעת שווא. להתרעת שווא שני סיכונים עיקריים:

1. עלות נכבדה עקב ביצוע פעולות בעקבות ההתרעה. ישנם הבדלים משמעותיים בגודל הנזק הנגרם עקב התרעת שווא לגורמים שונים. פעולות פשוטות של פתיחה או סגירת דלתות אינן כרוכות בעלות

כלכלית בעוד שסגירת טורבינות חשמל, מתקנים גרעיניים, ובתי זיקוק הם בעלי משמעות כלכלית רבה. מפעולות אלו עלולות גם להגזר הוצאות עקיפות. כך למשל, סגירת טורבינות חשמל תביא להפסקות חשמל שיגרמו לנזקים לגופים שונים במשק, יש לה עלויות גבוהות והיא גם מפריעה לנוהל החיים התקין של האוכלוסיה.

2. השפעה פסיכולוגית על האוכלוסיה, הן בהפחדתה והן בהפחתת העירנות בטווח הרחוק.

לכן, מערכת התרעה קצרת מועד חייבת להקטין את האפשרות להתרעות שווא. כחלק מעיבוד הנתונים ניתן לקבל גם את רמת הוודאות של התוצאה. ברמת וודאות נמוכה תבוצענה אוטומטית פעולות מזעריות בשני מקרים: (1) רמת הנזק העלולה להגרם עקב התרעת שווא תהיה נמוכה; (2) הסיכון לאתר גבוה מאד ורצוי לבצע את הפעולות גם אם ההתרעה תהיה התרעת שווא. ניתן לדרג את התניית ביצוע הפעולות ברמת וודאות גדלה ולהגיע לרמת וודאות מסויימת בה יבוצעו הפעולות השונות להקטנת הנזק כולן.

במחקר שנערך לאחרונה על ידי Grasso and Allen (in review), נעשה ניסיון להגדיר את החשיבות היחסית של גורמים שונים לאי דיוק בהתרעות, ומשמעותן בעיקר במימד הכלכלי. החוקרים בחנו את השפעת הגורמים השונים על מערכת ElarmS (המתוכננת בקליפורניה - ראה לעיל) על פי בסיס הנתונים של רעידות האדמה בקליפורניה, ומצאו שהגורם המשפיע ביותר על הערכת תאוצת הקרקע המרבית באתר היא משוואת הניחות. השגיאה בהערכת המגניטודה משמעותית פחות, אך עדיין בעלת משמעות בעיקר ב-5-10 השניות הראשונות מאז הרעידה. ברעידות רחוקות (עשרות ק"מ) הטעות בקביעת מיקום המוקד כמעט חסרת משמעות, ואילו בקרובות מאד יש לכך משמעות ונדרש דיוק רב.

מכאן, שההחלטה על ביצוע פעולות אוטומטיות במתקן מסויים צריכה להיות מושתתת על שיקולי עלות-תועלת של משמעות התגובה במקרה של התרעת שווא. קרי, ההחלטה צריכה להתקבל כך שבמקרה של ביצוע פעולות העלות צריכה להיות נמוכה מעלות נזק הרעידה, ומאידך במקרה של החלטה לאי פעילות, עלות החסכון (מאי הפעילות) צריכה להיות גבוהה מעלות הנזק.

המערכות המתקדמות בעולם מסוגלות לתת התרעה כעבור זמן קצר ביותר, ובהמשך לעדכן את ההערכה עם התווספות הנתונים. המידע הראשוני מתבסס על מידע מוגבל מתחנה אחת או ממספר קטן של תחנות והוא מאופיין באי דיוק רב יחסית. בחלוף הזמן, מתקבל מידע נוסף מאותן תחנות ומתחנות נוספות, ואז נעשה חישוב מחדש בדיוק רב יותר, אך מנגד זמן ההתרעה קצר יותר. מערכת ההתרעה צריכה להיות כזו שתאפשר לצרכנים לבחור את זמן ההתרעה ביחס לדיוק שהם דורשים. כך למשל בית ספר יכול להחליט לקבל את ההתרעה המוקדמת ביותר משום שהוא יכול לסבול התרעת שווא אחת או שתיים בשנה והנזק הנגרם קטן יחסית (כלכלית, ואולי אף פסיכולוגית). מנגד, מפעל תעשייתי יכול להחליט שהוא מעדיף דיוק רב יותר תוך ויתור מסויים על אורך זמן ההתרעה לפני שיבצע פעולות סגירת מערכות שגורות אחריהן משמעות כלכלית נכבדה.

ראוי לציין כי מספר התרעות השווא במערכות הקיימות היום איננו גדול. המערכת המותקנת במקסיקו הפיקה מאז הוקמה ב-1991 כ-60 התרעות, מהן התרעת שווא אחת בלבד (ראה פירוט להלן). המערכות החדשניות יותר המושתתות על איפיון הרעידה על פי המידע המתקבל מהשניות הראשונות של גלי P אמורות להיות מדוייקות ואמינות אף יותר.

המרכיב הפסיכולוגי בהתרעות שווא

התרעה כללית לאוכלוסיה איננה עניין פשוט משום שזמן ההתרעה יהיה של מספר שניות והאזרח בדרך כלל אינו מסוגל לבצע פעולות רבות במהלך שניות אלו. יש הטוענים שהתרעה כזו אף מסוכנת משום שתגרום לפאניקה ולקבלת החלטות שגויות על ידי רוב האוכלוסיה, והנוק עלול להיות גדול מהתועלת. יחד עם זאת נראה, כי הגברת המוכנות המשולבת עם פעילות נכונה של האוכלוסיה לתפיסת עמדות בהן הסיכון לפגיעה הוא קטן יותר, ובעיקר כניסה למחסה מתאים (מתחת לשולחנות אם תוכננו לכך) או עמידה מתחת למשקופי דלתות, יכולה להקטין באופן משמעותי את גודל הפגיעה. ברוב המקרים זמן של מספר שניות מספיק על מנת לבצע פעולה זו. יש להדגיש, שאם הבניין מתמוטט לחלוטין, גם פעולה זו לא תעזור. אולם, לא כל הבתים מתמוטטים ורק ניזוקים, ואנשים רבים נפגעים עקב נפילת חלקי תיקרות, ארונות קיר וכדומה.

נסיון העבר בתחומי התרעה שונים מצביע לכאורה על כך שהתרעות שווא חוזרות עלולות להביא את האוכלוסיה לזלזל ולא להתייחס ברצינות להתרעה עתידית. אך שלוש עובדות סותרות הנחה זו:

1. במקסימום קיימת מערכת התרעה מזה זמן ובעבר ארעה התרעה שווא. האוכלוסיה התייחסה לארוע זה בשוויון נפש ועל פי מחקרים שנעשו לא חלה ירידה בנכונות להגיב בדרך הנכונה להתרעה עתידית (ראה להלן בתאור המערכת במקסימום).

2. במלחמת לבנון השנייה שהתרחשה בישראל ביולי-אוגוסט 2006, ישבו למעלה ממיליון תושבים בחדרי הביטחון ובמקלטים למעלה מחודש. בתקופה זו ניתנו מאות התרעות שווא על ידי קטיושות מלבנון. רוב התושבים הגיבו בצורה בוגרת והתייחסו לכל התרעה בצורה רצינית למרות הידיעה שהסיכוי להתרעה שווא גבוה מהסיכוי לפגיעה.

3. תושבי שדרות וסביבתה חיים מזה שנים אחדות תחת איום טילים (הקסאמים). לפני זמן הוקמה מערכת התרעה קצרת מועד ("צבע אדום"), ומעת לעת המערכת מתריעה התרעות שווא. יתרה מכך, מבחינת האדם הבודד רוב ההתרעות הן התרעות שווא משום שברוב המקרים הטיל אינו נופל בקרבתו. למרות זאת, האוכלוסיה נוהגת בבגרות רבה ואינה מזלזלת בהתרעות המערכת.

לסיכום: ברור כי חשוב ביותר להקטין את הסיכוי להתרעה שווא. יש לכך חשיבות כלכלית ואירגונית רבה. יחד עם זאת נראה, כי חינוך, הסברה ותרגול נכון של הציבור, יגביר את מוכנות הציבור והתושבים יהיו מיומנים וינקטו בפעולות הנכונות בעת התרחשות רעידת אדמה ללא בהלה ואף ללא זלזול עקב התרעות שווא קודמות.

10. הערות נוספות

א. מערכת התרעה קצרת מועד המוצגת בדוח זה, מתריעה בפני רעידת הקרקע באתרים שונים. המערכת אינה מתריעה בפני תרחישים משניים. לדוגמה, ניתן להתאים את המערכת כך שתחשב, בעקבות רעידת אדמה, את הסיכוי לגל צונמי ותתריע מפניו.

ב. למערכת התרעה קצרת מועד השפעה חברתית משמעותית. מחקרים בתחום זה נעשו בעיקר בארה"ב (למשל: Goltz and Flores, 1997, Hauksson et al., 2001 Goltz, 2002, 2003, ונוספים) ועוסקים בהשפעת התרעה על האוכלוסיה, בצרכים וברצונות של גופים שונים למערכת התרעה, דרכי התקשורת הטובות ביותר, המשמעויות המשפטיות וכו'. בכל בניה של מערכת התרעה יש צורך לשקול שיקולים אלו ונוספים, ולהקדיש מחשבה רבה לצד הפסיכולוגי-חברתי של התנהגות האוכלוסיה והגופים השונים בעת הקמת המערכת ובעת ההתרעה.

ג. ברחבי העולם, ובעיקר ביפן, נבנים היום מבנים המסוגלים להגיב לרעידות אדמה (active-response buildings). מבנים אלו מסוגלים לשנות את התכונות המכניות שלהם בתוך שניות וזאת על מנת להיות עמידים יותר לתנודות הקרקע (Housner et al., 1997). בטווח הרחוק, אמורים הבניינים להגיע למצב בו האזרח המצוי בתוכם כמעט לא יחוש ברעידת האדמה. בניינים מסוג זה, אם יהיו מחוברים למערכות התרעה קצרת מועד, ידעו לבצע את השינוי המכני בעוד מועד, ולספוג את הרעידה ביתר קלות. חסרונה של מערכת זו שהיא תלוייה באספקת חשמל שעלולה להפסק בעת רעידת אדמה הרסנית (Sappenfield, 2003).

ד. מערכות התרעה בעולם

מערכות התרעה לרעידות אדמה הוקמו בעשרות השנים האחרונות במספר מדינות בעולם. המערכות הראשונות נבנו במדינות בהן זמן ההתרעה הפוטנציאלי גבוה יחסית. זאת במקרים בהם המרחק מהמוקד לאתרים המרכזיים עליהם מתכוונים להגן (ערים ראשיות) גדול. במצב זה גם מערכות פשוטות ואיטיות יחסית מסוגלות לשדר התרעה בזמן המספיק לבצע מספר פעולות אוטומטיות. להלן פירוט מערכות ההתרעה המותקנות במדינות בעולם ואשר המידע לגבי אופי המערכת והציפיות ממנה מפורסם.

1. יפן

יפן הינה אחת מהמדינות הראשונות שהתקינה מערכות התרעה קצרות מועד על מנת להפחית את הנזקים מרעידות האדמה הנפוצות כל כך ביפן (כ- 20% מהרעידות בעולם במגניטודה שמעל 6 מתרחשות ביפן או בסביבתה הקרובה).

המערכות הראשונות, אשר שוכללו מאוחר יותר למערכת הקרויה UrEDAS, הוקמו ביפן כבר בשנות השישים של המאה הקודמת, במיוחד עבור חברת הרכבות. כיום, מתבססת המערכת על תנודות הקרקע הראשונות (גלי P) המובחנות במערכת חיישנים שהותקנה בקרבת אזורי מקור אפשריים לרעידות אדמה. המערכת מחשבת את המגניטודה ואת מקום המקור ובהתאם לכך מפסיקה את תנועת הרכבות באזורים המועדים לפגיעה ולנזק (Ashiya, 2002; Nakamura, 1988, 2004).

חברת הגז של טוקיו התקינה את מערכת SIGNAL אשר בעזרת תנודות הקרקע מעריכה את הנזק הצפוי למערכות הגז עקב רעידת אדמה, ובעקבות כך מתקבלת החלטה לגבי סגירת צנרת מרכזית. הגוף המספק ביפן גז טבעי מגן על עצמו בעזרת מערכת הסוגרת אוטומטית את הברזים המרכזיים ומשגרת אות למערכות מחשוב זעירות המצויות בבית הלקוחות ומסוגלות לסגור גם שם ברזים (Yamazaki, 1998).

מערכת הכבישים היפנית נשלטת גם היא על ידי מערכת התרעה אשר שופרה משמעותית בעקבות רעידת האדמה של קובה (1995), רעידה שפגעה קשות במערכת התנועה. מערכת זו מודדת את תנועת הקרקע המבוטאת בתאוצה המרבית. בעקבות החלטה אוטומטית מתבצעות הפעולות הבאות (או חלק מהן): נסגרת התנועה במנהרות וגשרים, מורדת המהירות המותרת בכבישים בעזרת מערכת השלטים האלקטרונית עד לעצירה מוחלטת, כל זאת כתלות בעוצמת הרעידה.

מערכת החשמל ביפן נשלטת על ידי מערכת התרעה הפועלת באמצעות מדי תאוצה המודדים את תאוצת הקרקע המרבית קרוב לאתרי הגנרטורים. כאשר התאוצה עוברת ערך מסויים הטורבינות והגנרטורים מפסיקים פעילותם. החיישנים ממוקמים בקרבת מערכות החשמל השונות וזאת עקב הצורך להקטין למינימום את המקרים של התרעת שווא גם במקרים שהיתה רעידה משמעותית אך תנודת הקרקע באתרי הטורבינות ואתרים אחרים אינה כה חמורה.

למערכת המים יש חיישנים משלה אשר מאפשרים סגירת מיכלים ומונעים דליפה מהצנרת העלולה להקרע עקב הרעידה. מערכת זו עמדה יפה במבחן הרעידה של קובה (1995), ותודות לסגירת מגופים נמנעה התרוקנות מכלי מים גדולים, דבר שהיה חיוני לטיפול באוכלוסיה בימים הראשונים שלאחר הרעידה.

מערכת חיישנים להתרעה קיימת גם למעליות. מערכת זו מודדת את תנודת הקרקע בתחתית הבניין ובעת הצורך עוצרת את המעליות בקומה הקרובה, פותחת את הדלתות ומאפשרת מילוט.

כלל המערכות שנסקרו לעיל נבנו כמערכות בודדות ולא כחלק מפעילות לאומית כוללת. הגוף הלאומי האחראי ביפן על המידע על רעידות אדמה הן בשגרה והן במצב של רעידת אדמה הוא ה-Japan Meteorological Agency (JMA). בעת האחרונה פותחה ביפן על ידי ה-JMA מערכת לאומית, המסוגלת לתת התרעה ראשונית בתוך מספר שניות. המערכת מתבססת, בדומה למערכת בארה"ב (להלן), על המידע המתקבל בשניות הראשונות להגעת גלי P. Kiyomoto et al. (2005) שהשתתפו בפיתוח עקרונות החישוב של המערכת, הציגו כי המערכת מחשבת באופן רציף תוך כדי הרעידה ומעדכנת את חישוביה ככל שמתקבלים יותר נתונים. מיקום המוקד מחושב ראשית על ידי החיפוש הראשון החש ברעידה ובהמשך מתקבל מידע מהחיישנים הנוספים והחישוב מעודכן. לאחר חישוב המוקד נעשה חישוב מהיר של המגניטודה על פי המרחק למוקד ומכסימום האמפליטודה המתקבלת המעודכנת מדי שניה. ראוי לציין כי המערכת מסיקה מסקנות גם מעצם העובדה שחיישנים מסויימים טרם חשו ברעידה (שיטה הקרויה " Not yet arrived data method").

חישוב העוצמה הסייסמית באתרים השונים מתבסס על מידע קודם ועל נתוני מוקד הרעידה והמגניטודה שלה. Kiyomoto וחבריו (2005) מציינים כי בפיתוח המערכת החשובית השתתפו מלבד מדענים גם גורמים מתעניינים כמו ה-Railway Technical Research Institute וכן גורמי המחקר הממלכתיים National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED).

מערכת ההתרעה החדשה ביפן נקראת (EQA) Emergency Quake Alert והיא הוכרזה כפעילה ב-1.8.2006. המערכת החדשנית משלבת כ-200 מערכות סייסמיות עם חיישנים מתקדמים, עיבוד נתונים מהיר, ומערכת תקשורת מתקדמת. קבלת אות ההתרעה ממערכת זו מושתת על תשלום חודשי. 41 חברות ואירגונים כולל רכבות, חברות בניה, ומרכז רפואי אחד נרשמו עוד קודם להשקתה של המערכת והם ישלמו כ-900 דולר לחודש בעבור קו תקשורת, אחזקה ובעת הצורך אות התרעה ומידע על העוצמה הצפויה באתר הארגון.

הגורמים הממשלתיים ביפן מזכירים בפירסומיהם לקהל בתקשורת כי למרות השכלול של מערכת זו, המקומות הקרובים ביותר למוקד יפגעו על ידי העוצמה הגבוהה ביותר, ודווקא להם זמן ההתרעה יהיה הקצר יותר.

בעקבות הקמת מערכת ההתרעה הלאומית פיתחו מספר חברות תעשייתיות מערכות משנה לשימוש ביתי או משרדי הנשענות על המידע האמור להתקבל ממערכת התרעה זו :

א. מערכת Tecs היא מערכת המורכבת ממחשבים המחוברים ברשת והאמורים לקבל כל אחד את אות ההתרעה ישירות משרת מרכזי המחובר למערכות המספקות את המידע לגבי הרעידה. המערכת מייצרת התרעה על גבי צג, הפקת אות אזעקה קולי וכו'. החברה המייצרת מציעה אופציה של שימוש ברשת המדפסות הפנימית במשרד גדול. במדפסות תותקן תוכנה יעודית המקשרת את רשת המדפסות לשרת המרכזי. מתברר שהתקשורת דרך המדפסות מהירה יותר מאשר תקשורת המחשבים במשרד.

ב. מערכת מורכבת מעט יותר היא של Meisei. במערכת זו יש מחשב יעודי המחובר ישירות ל-JMA בקו ישיר או דרך VPN (Virtual Private Network). מערכת זו אמינה יותר לגבי קבלת אות ההתרעה. ניתן להתקין צגי התרעה יעודיים ברחבי המשרד, בית הספר ודומיהם.

ג. חברת הטלפונים של טוקיו (NTT) פיתחה מערכת המושתת על התקשורת הטלפונית, IPv6. יתרונה של מערכת זו בכך שהיא מונעת את העיכוב האפשרי בתקשורת האינטרנטית.

2. מקסיקו

ב-19 בספטמבר 1985, הוכתה מקסיקו סיטי על ידי רעידת אדמה במגניטודה 8.1, שמוקדה היה בקרבת חוף האוקיינוס השקט כ-350 ק"מ מדרום מערב לעיר, אזור אשר בו מתרחשת מרב הפעילות הסייסמית במקסיקו. הנזקים היו בעיקרם בעיר הבירה מקסיקו-סיטי ובסביבתה הקרובה אך גם באזורים אחרים במקסיקו.

הרעידה גרמה למותם של למעלה מ-10,000 איש ולפציעתם של לפחות 30,000, וכ-150,000 איש נותרו מחוסרי קורת גג. כ-100,000 יחידות דיור התמוטטו או יצאו משימוש, ומבנים ציבוריים נוספים נפגעו אף הם. הנזק הוערך בכ-4 מיליארד דולר.

העוצמה הגיעה ל-9 בסולם מרקלי באזור החוף ובמקסיקו סיטי. קל להבין את העוצמה הגדולה של הנזק באזור החוף הקרוב למוקד רעידת האדמה, אך יש צורך להסביר את הנזק העצום שנגרם לעיר המרוחקת למעלה כ-350 קילומטרים מהמוקד. הסיבה לכך היא תנאי התשתית של העיר המורכבת מסלעים אגמיים רכים המונחים על סלע קשה, שגרמו להגברה חזקה של הגלים הסייסמיים למרות המרחק הרב מהמוקד.

כשנה לאחר רעידת האדמה החלו במקסיקו להערך לבניית מערכת התרעה קצרת מועד. זאת מתוך הבנה, כי בעוד העיר יושבת על תשתית המועדת להגברת גלים סייסמיים, המרחק הגדול יחסית מהמוקדים הפוטנציאליים מאפשר זמן התרעה ארוך יחסית בהנחה שהרעידה אכן תתרחש בקרבת החוף.

המערכת שנבנתה Seismic Alert System (SAS) היא מערכת רבת חיישנים שהושלמה בשנת 1991, ופעילה מאז. ראה פרוט לגבי המערכות השונות אצל Espinosa-Aranda et al. (1995, 2003). 12 תחנות סייסמיות הוקמו לאורך מישור החוף במדינת Guerrero (איור 7).



איור 7. פיזור תחנות סייסמיות במערכת ההתרעה של מקסיקו סיטי (SAS) שהוקמה במישור החוף. על פי אתר המכון הסייסמולוגי המקסיקני http://www.cires.org.mx/sas_in.php

במערכת זו כל תחנה מחשבת את המגניטודה ואת מיקום מוקד הרעידה, ומשדרת את המידע בתקשורת רדיו לתחנת העיבוד המרכזית במקסיקו סיטי. טכניקת ההתרעה במקסיקו סיטי מתבססת על מערכת גלי רדיו, כלומר, האות משודר על ידי המערכת ונקלט במכשירי הרדיו הביתיים, הטלוויזיה ומערכות יעודיות שנבנו לשם כך (מערכות הגברה ועוד).

למרות שהמערכת אינה חדשנית בתפיסתה (החישוב אינו נעשה על פי גלי P הראשונים), ובנוסף המערכת החישובית אינה מהמהירות, עדיין זמן ההתרעה ארוך יחסית. מערכת ההתרעה מסוגלת לשדר אות התרעה למקסיקו סיטי ולעמק שסביבה בתוך כ- 20 שניות. בגלל המרחק הרב של העיר מקו החוף יגיעו גלי ההרס למקסיקו-סיטי רק כ-80 שניות לאחר הרעידה. מכאן שנותרות כ- 60 שניות זמן לפעולות מכינות (רובן אוטומטיות). מאז הוקמה המערכת בשנת 1991 עוסקים הגורמים השונים בשיפור התגובה בעיר במקרה של התרעה. ראוי לציין כי ברחבי מקסיקו סיטי מוצבים בנוסף 79 מדי תאוצה המודדים את התאוצות ותנודות הקרקע ברעידות האדמה החזקות. כך למשל ברעידת האדמה שהתרעה באזור החוף ב- 11.8.2006, במגניטודה של 5.9 ומוקד באזור החוף, הופעלו בעיר 10 מדי תאוצה (לצורך ההשוואה ראוי לציין שבאיראן קיימים למעלה מ- 1000 מדי תאוצה, ובישראל קיימים כיום 63 מדי תאוצה).

ב- 2003 הוקמה מערכת נוספת המורכבת מ- 36 חיישנים במדינת Oaxaca. התחנות הוקמו באזור החוף של מדינה זו (מדרום ומדרום מזרח למקסיקו סיטי) וכן בתוך המדינה. המערכת קרויה SASO (System of Seismic Alert of the State of Oaxaca). מערכת עיבוד המידע של מערכת זו מצויה בבירת המדינה ומחוברת למערכת הישנה יותר.

המשתמשים הפוטנציאליים בהתרעה מחולקים לשתי קבוצות: האחת היא כלל הציבור, הבתים הפרטיים וגופים קטנים. הקבוצה השנייה כוללת מוסדות רבים מהם ראוי לציין את מערכת החינוך, הרכבת התחתית, מערכות ההצלה בעיר, מערכות החשמל, גופים ממשלתיים, תקשורת ועוד (ראה רשימה מפורטת בנספח 2).

מערכת ההתרעה במקסיקו סיטי (SAS) מקבלת בעקבות זיהוי רעידת אדמה אחת משלוש החלטות: החלטה שלא להפיק התרעה כלל, התרעה למוסדות מרכזיים בלבד, או התרעה לכלל הציבור. מאז שהמערכת פעילה ועד אמצע פברואר 2007 זוהו בה 1836 אירועי רעידות אדמה ומתוכן הוחלט להפיק התרעה ב- 58 מקרים בלבד. ב- 47 אירועים התקבלה החלטה על התרעה חלקית, קרי למוסדות בלבד, כאשר האירועים האחרונים התרחשו ב- 18.9.05 בעקבות רעידת אדמה במגניטודה של 4.4, וב- 9.1.2003 בעקבות רעידה במגניטודה של 4.9. 11 פעמים מאז שהוקמה המערכת נשלחה התרעה לציבור כולו. האירועים האחרונים היו ב- 7.10.2001 (מגניטודה של 5.5) וב- 17.7.1998 (מגניטודה של 4.6). רעידת האדמה החזקה ביותר שלגביה ניתנה התרעה התרחשה בקרקעית האוקיינוס בקרבת החוף ב- 14.9.1995 עם מגניטודה של 7.3. ההתרעה הגיעה למקסיקו סיטי 72 שניות לפני הגעת גלי S והועברה לתושבים בעיקר על ידי תחנות הרדיו המסחריות. בעקבות ההתרעה הופעלו פעולות אוטומטיות שונות במוסדות שונים, וזאת על פי תכנית שהוכנה מבעוד מועד. בבדיקה שנערכה לאחר הרעידה התברר כי ההתרעה הגיעה לכ- 4 מליון תושבים (כרבע מהתושבים) (ראה Espinosa-Aranda et al., 1998).

כל ההתרעות שהועברו לציבור (חוץ מאחת – ראה להלן) היו התרעות אמת, כלומר, המערכת התריעה על פי ההחלטה שהתקבלה מראש לגבי סף ההתרעה. אולם, מכיוון שהמערכת התרחישית איננה משוכללת, סף התרעה נמוך יחסית, ולעיתים ניתנת התרעה במקרים בהם הרעידה אמנם מורגשת במקסיקו סיטי אך לא נגרם נזק רב או פגיעות בנפש, ולכאורה ההתרעה הייתה מיותרת. ראוי לציין כי ב- 11.8.2006 התרחשה רעידת אדמה במגניטודה של 5.9 ולמרות המגניטודה הגבוהה לא הוצאה כל התרעה וזאת עקב המרחק הגדול ממקסיקו סיטי ועומק הרעידה הרב יחסית (55 ק"מ).

המערכת החדשנית יותר SASO זיהתה מאז הוקמה בסוף 2003 130 אירועים ללא התרעה, 2 אירועים אשר בעקבותיהם הוצאה התרעה לכלל הציבור ($M = 5.5 - 13.1.04$, $M = 5.8 - 14.6.04$), ו-2 אירועים שבעקבותיהם יצאה התרעה למוסדות בלבד ($M = 5.1 - 13.1.04$, $M = 4.5 - 15.12.04$).

לפרוט ראה באתר האינטרנט של המכון הגיאופיזי המקסיקני - <http://www.cires.org.mx>

חשוב לציין כי מכל ההתרעות ששוגרו על ידי שתי המערכות, רק במקרה אחד לא שוגרה התרעה למרות שעל פי החישובים בדיעבד הרעידה הייתה חזקה במידה כזו שנדרשה התרעה. בנוסף מתברר כי רק התרעה אחת הייתה התרעת שווא. ראוי לבחון את התרעת-שווא זו עקב הטענות לגבי הסיכון הנובע מהתרעות שווא. יש הטוענים כי רוב האוכלוסיה בדרך כלל (ובמקסיקו סיטי בפרט) איננה מתורגלת, והתרעת שווא עלולה לגרום לפאניקה וכתוצאה ממנה פגיעה בנפש. בנוסף, ישנה הדאגה כי גם באוכלוסיה מתורגלת יחסית עלולה התרעת שווא לגרום לנזקים ולפגיעה מיותרת ברכוש ובגוף. ב- 16.11.1993 הוצאה התרעת שווא בשעה 19:11 שהיא שעת השיא במקסיקו סיטי. בבדיקה שנעשתה בדיעבד נמצא כי הציבור, כולל אלה שלא עברו הדרכה מראש, פעל ברוב המקרים בצורה נכונה וכי אף לא אדם אחד נהרג או נפצע כתוצאה מפעולות חפוזות שנעשו עקב ההתרעה (ראה Espinosa-Aranda et al., 1998).

ברעידות אדמה במקסיקו סיטי נהרגו בשנים האחרונות מאות בני אדם אך במקסיקו סיטי לא נרשם הרוג אחד! השלטונות מייחסים זאת הן למערכת ההתרעה, הן לחינוך הציבור לעזוב את המבנים ולהתמקם באזורים ריקים הרחק ממבנים ומקווי מתח, כפי שתורגל לפני הרעידה, והן לבניה הנכונה והבטוחה יותר הננקטת בעיר מאז 1985.

3. תורכיה (איסטנבול)

תורכיה מצוייה באזור פעיל מאד מבחינה סייסמית. ההעתק הפעיל ביותר הוא ההעתק הצפון אנטולי, אך גם ההעתק המזרח אנטולי, המשכו של בקע ים המלח במזרח תורכיה, והעתקים רבים נוספים נחשבים לפעילים. רעידות אדמה היסטוריות וכאלו שהתרחשו במאה השנים האחרונות גרמו בתורכיה לנזקים כבדים בנפש וברכוש. בתאריכים 17 באוגוסט 1999 ו-12 בנובמבר באותה שנה התרחשו רעידות אדמה באזור איזמיט, במגניטודות של 7.5 ו-7.4 בהתאמה, שגבו כ-40,000 קורבנות ונזק משמעותי ביותר לתשתיות, לתעשיות, ולמבני המגורים.

איסטנבול, כרך המונה 18 מליון נפש, עומדת בפני סיכון סייסמי גבוה ביותר. ההעתק הצפון אנטולי הפעיל עובר מספר ק"מ מדרום לעיר, בתוך ים השיש (Marmaris). רעידת האדמה באוגוסט 1999 הייתה על המשכו של העתק זה מזרחה ובמרחק של בסך הכל 70 ק"מ מהעיר.

בעקבות תמונת המצב הגיאולוגית, מאפייני התשתית וארועים אלו, ובעזרת הידע המדעי שהצטבר, הוקמה באזור איסטנבול מערכת המורכבת משני רכיבים (ראו תאור אצל Erdik et al., 2003): (1) מערכת התרעה קצרת מועד; (2) מערכת למידע מהיר אשר תספק מידע על תנודות הקרקע בדקות ובשעות הראשונות לאחר רעידת אדמה.

המערכת קרויה Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System (IERREWS). המערכת מופעלת על ידי Bogazici University הכולל בתוכו את המרכז הסייסמולוגי התורכי (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute), ובשיתוף מערכות ממשלתיות ועיריית איסטנבול. המערכת תוכננה על ידי חברת GeoSig השוויצרית (ראה www.geosig.com), וחברת Electrowatt-Ekono. מערכת התקשורת תוכננה ומסופקת על ידי חברת Aria GSM.

המערכת מורכבת מהרכיבים הבאים:

1. חיישנים מסוגים שונים.
2. מערכת תקשורת להעברת המידע מהחיישנים למרכז העיבוד (off-line) למערכת המידע המהיר ו-on-line למערכת ההתרעה קצרת המועד).
3. שני מרכזי עיבוד לחישוב הנתונים, ראשי, ומשני אשר מהווה גיבוי במקרה ובו המרכז הראשי אינו מסוגל לתפקד, בין השאר עקב נזק של הרעידה עצמה.
4. מערכת הפצת המידע.

מערכת ההתרעה קצרת המועד (Early Warning System) מושתתת על 10 תחנות הממוקמות על חוף ים השיש בקרבה הגדולה ביותר האפשרית להעתק מרמריס. המערכת מחוברת online למרכז עיבוד הנתונים. התקשורת מושתתת על קשר רדיו.

מפאת הקרבה הגדולה של איסטנבול להעתק וזמן ההתרעה הקצר הנובע מכך, תוכננה מערכת חישוב עם אלוגריתם פשוט יחסית, המתבסס על הגעת אמפליטודות לסף המוגדר מראש. התאוצות והמהירויות המועברות מהחיישנים מושוות לערכי סף שונים של תאוצות ומהירויות הידועים מרעידות קודמות. כאשר שתיים או שלוש תחנות עוברות את סף התאוצה או המהירות בתוך זמן מסוים אחרי התחנה הראשונה

שעברה את הסף, מתקבלת באופן אוטומטי ההחלטה על הוצאת התרעה. ההתרעה מתקבלת באחת משלוש דרגות ובהתאם לכך תתבצענה פעולות אוטומטיות אצל המשתמשים השונים בעיר איסטנבול. המידע מועבר למשתמשים במספר שיטות תקשורת המופעלות על ידי חברות שונות – FM, UHF, תקשורת טלפונית ותקשורת לוויינית. במערכת הקיימת כיום (על מערכת החיישנים והעיבוד) בהתאם למרחק המוקד מהעיר, ההתרעה יכולה להגיע לכדי 8 שניות, התרעה קצרה אמנם אך עדיין יעילה ועם פוטנציאל גבוה להקטנת הנזק שבעקבות הרעידה.

ראויה לציון גם מערכת המידע המהיר שהוקמה במקביל ולא תפורט כאן משום שאינה קשורה באופן ישיר לדוח זה. המערכת מתבססת על 100 מקלטי תנועות חזקות (Strong Motion Recorders), שמוצבים באזורים המאוכלסים של איסטנבול על פני שטח של 50X30 ק"מ עם תקשורת למערכת המרכזית המושתתת על מערכת חיוג הפועלת לפי הצורך. המערכת הוקמה על מנת לקבל מידע אמין לגבי רמת תנודות הקרקע והנזק הצפוי בעקבות רעידת אדמה, כמו גם לאיסוף מידע מרעידות אדמה לצורך מחקר מתמשך בתחום ההנדסה, הגיאולוגיה וסייסמולוגיה. המידע מועבר בשיטת ה-SMS בכל 20 שניות ישירות למרכז עיבוד הנתונים בתקשורת GSM (ראה פירוט אצל Erdik et al., 2003). לאחר העיבוד, ובתוך 5 דקות מזמן הרעידה, מסופק המידע (נתונים ומפות), למערכות השילטוניות ולכל דורש. מערכת החישובים ועיבוד הנתונים דומה למערכת HAZUS האמריקאית (<http://www.fema.gov/hazus>).

4. רומניה (בוקרשט)

בוקרשט, בירת רומניה, עומדת בפני סיכון סייסמי גבוה עם הסתברות של 50% לרעידת אדמה ב-50 שנה במגניטודה של 7.6. ב-60 השנים האחרונות התרחשו 4 רעידות חזקות באזור Vrancea המרוחק 150 ק"מ מהעיר (1940-7.7 בעומק 160 ק"מ, 1977-7.5 בעומק 100 ק"מ, 1986-7.2 בעומק 140 ק"מ, 1990-6.9 בעומק 80 ק"מ). רעידת האדמה של 1977 גבתה 1500 הרוגים, ו-35 מבנים רבי קומות התמוטטו.

המרחק הגדול באופן יחסי מאזור מוקדי רעידות האדמה והעומק של המוקדים מאפשרים להפיק התרעה ארוכה יחסית לבוקרשט. מערכת כזו הוקמה על ידי חברת Foton 2000 SELF והמכון הגיאופיסי הרומני עבור ממשלת רומניה. זמן ההתרעה אמור להיות בין 25-30 שניות. התחנות הסייסמיות ממוקמות באזור מוקדי הרעידות (Vrancea), ומעבירות את המידע בתקשורת רדיו למרכז עיבוד הנתונים בבוקרשט. לאור חישוב תכונות הרעידה מופעלת מערכת ההתרעה, ובד"כ במגניטודה 4.8 ומעלה.

המערכת מתמודדת עם העובדה שהמוקדים מצויים באזור טקטוני זה בעומק גדול יחסית (100-150 ק"מ) עובדה המעכבת את הגעת הגלים לפני השטח.

תכונות המערכת ומרכיביה מפורטים באתר החברה המרכיבה:

http://www.fotonsas.ro/romanian_institute_for_applied_seismology.htm

לפרוט נוסף ראה גם Wenzel et al. (1999).

5. טייוואן

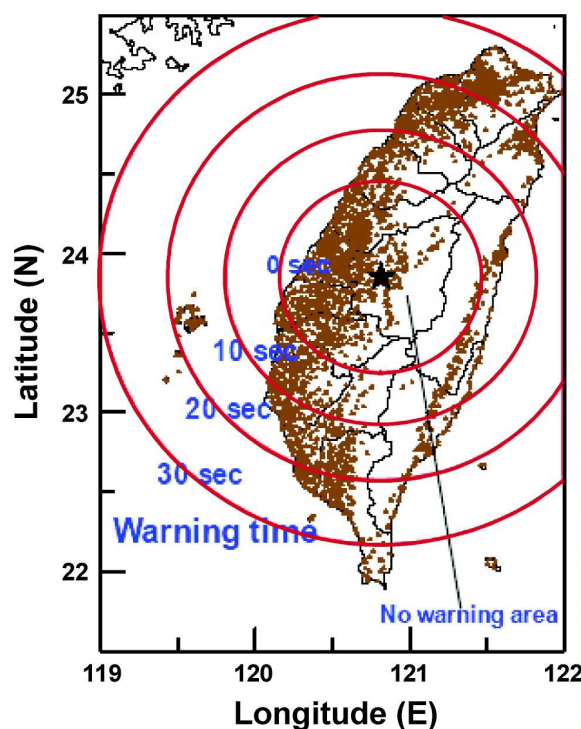
ב-21 בספטמבר 1999 היכתה רעידת האדמה Chi-Chi במגניטודה של 7.6 את טייוואן וגרמה למותם של 2,300 אזרחים ולנזק כלכלי נרחב. מקור רעידות האדמה של טייוואן הוא בנחיתת הלוח של האוקיינוס השקט מתחת ללוח האסייתי. בעקבות ארועים דומים והיסטוריה ארוכת השנים של רעידות אדמה

בטייואן הוקמה מערכת מידע והתרעה קצרת מועד המופעלת על ידי ה-Central Weather Bureau of Taiwan (CWB). עד לאחרונה המערכת הייתה מערכת למידע מהיר בלבד, והיא סיפקה, רק כדקה לאחר הרעידה, מידע ודיווח על רעידת האדמה, המגניטודה שלה, מיקום המוקד, העוצמות, ותחזית הנזק, וזאת בעבור מקבלי ההחלטות.

מערכת ההתרעה קצרת המועד, (EWS) Early Warning System, הוקמה על בסיס מערכת המידע המהיר, ומופעלת כיום בטייואן (לפרוט ראה Wu et al., 2004). המערכת מושתתת על 82 תחנות של מדי תאוצת קרקע המפוזרות באי על פני שטח של 300×100 ק"מ. המערכת אוספת נתונים בקצב של 50 דגימות בשניה כמקובל במערכות כאלה בעולם. רגישות המערכת נבחרה כך שרעידה במגניטודה 4.0 תזוהה בטווח של 100 ק"מ. המערכת הטכנית קרויה (RTD) Rapid Earthquake Information Release system (Wu et al., 2004).

המערכת שופרה ועודכנה בשנת 2002 בעזרת שיטת (VSN) Virtual Subnetwork (Wu and Teng, 2002) המאפשרת ליצור פתרון אופטימלי בין מערכת התרעה קצרת מועד לבין הערכה מדויקת של מגניטודת הרעידה. למרות שיפור זה, עדיין לא מתאפשרת התרעה מהירה בקרבת מוקד רעידות האדמה.

המערכת במצבה הנוכחי מעבירה מידע לאחר 22 שניות של עיבוד ולכן קיים אזור ברדיוס של 70 ק"מ מהמוקד אשר בו לא מתקבלת התרעה (איור 8). דיוק המגניטודה במערכת זו הוא ± 0.25 . ברעידת Chi-Chi ב-1999, טייפה בירת טייואן, הייתה מרוחקת 145 ק"מ מהמוקד וקיבלה התרעה של למעלה מ-20 שניות שהספיקה לצורך הפעולות הדחופות שהיו מתוכננות מראש.



איור 8. זמן ההתרעה הצפוי בטייואן בארוע הדומה לרעידת האדמה Chi-Chi שהתרחשה בספטמבר 1999. הנקודות מציינות את מיקום בתי הספר היסודיים ובכך מייצגים את צפיפות האוכלוסיה (מתוך Wu and Kanamori, 2005).

לאחרונה, נעשים בטייואן, כמו גם בארה"ב ויפן, מחקרים שמטרתם לקצר את זמן ההתרעה בעזרת שימוש בגלי P. Wu and Kanamori (2005) בעקבות עבודות של Allen and Kanamori (2003) Wu et al. (2004) ו-Kanamori (2005) בדקו את השימוש בנתוני 3-4 השניות הראשונות ובתדר הרעידה.

בשנת 2003 התרחשה בטייואן רעידת האדמה Chengkung שהייתה במגניטודה של 6.8. מערכת ההתרעה התריעה לאחר 22 שניות על רעידה במגניטודה של 6.5 וזיהתה את המוקד בדיוק טוב. בהדמיה תוך שימוש בשיטת גלי P ותדר הרעידה נעשה שימוש בגלים מתחנות בטווח של 21 ק"מ מהמוקד. גלי P מגיעים לתחנות אלה בתוך 4.5 שניות, ויש צורך בצבירת מידע של הגלים במשך 3 שניות. בזמן זה של 7.5 שניות, גלי S מגיעים למרחק של 20 ק"מ. כלומר, הרדיוס של האזור שלגביו אין התרעה קטן בשיטה זו מ-70 ק"מ לכ-20 ק"מ.

לשיטה זו יתרון נוסף משום שהעברת המידע מתבצעת בתוך זמן קצר והמידע מגיע באופן בטוח, משום שהוא נשלח בזמן הגעת גלי P שגורמים לתחנה נזק קטן, אם בכלל. בשיטה המקובלת הקיימת, יכול להגרם נזק לתחנה והעברת המידע מופרת. מערכת זו מצוייה כיום בפיתוח ובטייואן מתכוונים להצטייד בה בעתיד הקרוב.

6. ארה"ב

הסיכון הסייסמי העיקרי הקיים בארה"ב מצוי בחוף המערבי, לאורך העתק San Andreas. העתק זה חוצה את סן-פרנסיסקו, לוס אנג'לס וערים נוספות. ידועות רעידת האדמה שהתרחשו ב-1906 (מגניטודה 8.3) ו-1989 (מגניטודה 7.1) שפגעו קשות בסן פרנסיסקו, וזו של 1994 שפגעה בלוס אנג'לס (מגניטודה 6.9). קבוצת עבודה של מדענים מקליפורניה (Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP)), (2003), העוסקת בקביעת הסיכויים לרעידת אדמה מעריכה כי ישנה הסתברות של 62% ($\pm 25\%$) לרעידת אדמה במגניטודה הגבוהה מ-6.7 באזור סן פרנסיסקו ב-30 שנים הבאות. במצב שבו הערים הגדולות ממוקמות על ההעתק או בקרבה מיידית אליו, זמן ההתרעה האפשרי הוא שניות אחדות.

כיום, כאשר ניתן לאסוף ולעבד מידע על נתוני הרעידה בתוך שניות ספורות בעזרת גלי P (כפי שתואר לעיל), נפתח צוהר חדש להקמת מערכת התרעה גם בקליפורניה. מכיוון שהאזור מיושב בצפיפות, בכל תרחיש אזור מסויים לא יקבל התרעה כלל ואזור אחר, מרוחק יותר מן המוקד, יוכל לקבל התרעה. כך למשל, אם מוקד הרעידה יהיה ממש מתחת לסן פרנסיסקו, העיר לא תוכל לקבל התרעה, אולם אוקלנד תוכל לקבל התרעה של מספר שניות וסן חוזה תקבל התרעה של כ-15 שניות (Allen, 2006).

מצב זה הנחה מדענים ואנשי שלטון בקליפורניה לפעול בשנים האחרונות להקמת מערכת התרעה שנקראת ElarmS. המחקרים המתקיימים כיום בקליפורניה בתחום מערכת התרעה קצרת מועד מתבצעים ברובם בקבוצתו של הסייסמולוג Richard Allen מאוניברסיטת קליפורניה בברקלי (למשל Allen and Kanamori, 2003; Allen, 2004, Allen, 2006 ועוד) ועל ידי קבוצתו של הסוציולוג Jim Goltz מ-Caltech (למשל Goltz, 2002, 2003 ועוד).

מערכת ה- ElarmS מיועדת לספק את הצרכים הבאים: (1) זיהוי מהיר של רעידת אדמה; (2) זיהוי מיקום המוקד ומגניטודת הרעידה; (3) הערכה של שיא תנודת הקרקע; (4) שיגור התרעה לאוכלוסיה ולגופים שונים באזורים בהם צפויה תנודת קרקע משמעותית.

כיום נמצאים המרכיבים השונים בבחינת היתכנות לשימוש בדרום קליפורניה, תוך שהמערכות השלטוניות עוסקות בבחינת ישום התכנית, ובטיפול בהיבטים הסוציולוגיים, התכנוניים, החוקתיים ועוד. מערכת ElarmS בדרום קליפורניה מיועדת לזיהוי והתרעה של רעידות רחוקות כמו גם של רעידות שיתרחשו ממש מתחת לעיר על ידי זיהוי גלי P בתחנה הקרובה ביותר למוקד, לחישוב המוקד והמגניטודה ולחיזוי פיזור תנודות הקרקע המרביות. המערכת מהירה מאד, ומשתמשת במידע ממספר קטן של חיישנים הממוקמים בקרבת המוקד והמעבירים את המידע מיד לאחר התרחשות הרעידה.

מערכת ElarmS מתוכננת על העיקרון של הוצאת מידע ראשוני ברגע שמצטבר, ועידכון מתמשך על בסיס המידע הממשיך לזרום למערכת. כשניה לאחר שהגיע גל P הראשון אל התחנה הקרובה למוקד, מתקבלת ההערכה הראשונית של המגניטודה ושל שיא תאוצת הקרקע כפונקציה של המרחק מהמוקד. כבר אז אפשר להפיק את "מפת ההתרעות" המראה את פיזור שיא תאוצת הקרקע. עם התקדמות הזמן, מתקבל מידע נוסף מגלי P מהתחנה הקרובה ביותר, ובנוסף מתחיל להגיע מידע מתחנות נוספות הרחוקות מעט יותר. הדבר מאפשר עדכון של המגניטודה, מיקום המוקד, ומפת תאוצות השיא הצפויות. מכאן שהדיוק בהערכת הסכנה גדל עם הזמן, בעוד שזמן ההתרעה קטן. לפרוט לגבי מערכת ElarmS ראה:

<http://elarms.org>

לקראת הקמת מערכת התרעה קצרת מועד בארה"ב נעשה סקר צרכים של גופים שונים למערכת (Goltz, 2002) בקרב 200 ארגונים בדרום קליפורניה, תוך חלוקתם לארבעה סוגים: חינוך, מוסדות בריאות, גופי הצלה (של המדינה ושל הערים), וגורמי השירות הציבורי כגון, תחבורה וחשמל. המחקר בדק אירגונים שיהיו מעוניינים להשתמש בהתרעה קצרת מועד, היכולות הטכנולוגיות-תקשורתיות שלהם לקבלת התרעה, איך אירגונים אלה ישתמשו בהתרעה של 10 שניות ושל 50 שניות, וכן הערכת עלות לארגון בעקבות הצורך להתארגן לקבלת האות והשימוש בו. הארגונים נשאלו לגבי הרצון שלהם להשתתף בניסוי חלוץ (פיילוט) לפרויקט וכמחצית מהארגונים היו מעוניינים בכך. המעוניינים ביותר היו ארגוני ההצלה, ולאחריהם גורמי החינוך, והפחות מעוניינים היו ארגוני הבריאות. רק כחמישית מהארגונים הצהירו שלא יהיו מעוניינים במערכת זו כלל.

ה. ההיתכנות של מערכת התרעה קצרת מועד בישראל

מדינת ישראל מצוייה כמעט כולה בטווח קצר מאזור מוקדי רעידות אדמה המצוי לאורך בקע ים המלח (איור 3). כפי שהוצג בפרק המבוא גלי S, הגלים ההרסניים ברעידת אדמה, צפויים להגיע למרכזי האוכלוסין הגדולים בתוך 10 ועד 40 שניות, כתלות במרחק בין מוקד הרעידה למרכז האוכלוסין (איור 4). זמן זה של עשרות שניות להגעת הגלים מאפשר הגעת אות התרעה וביצוע מספר פעולות במרכז האוכלוסין קודם להגעת גל ההרס.

1. מערכת ההתרעה במדינת ישראל

יש, כפי שהוצג בדוח זה, שתי אפשרויות להקמת מערכות התרעה קצרת מועד בישראל:

א. התרעה:

(1) מערכת התרעה אזורית: מערכת זו תורכב ממספר תחנות של חיישנים (סייסמומטרים או מדי תאוצת קרקע) שיוצבו לאורך בקע ים המלח, ממטולה ועד אילת, שהוא האזור בו מתרכזים רוב מוקדי רעידות האדמה באזורנו. על פי שיקולים סייסמולוגיים וגיאולוגיים יתכן שיוקמו מספר תחנות גם מחוץ לבקע. במערכת זו יוקם מרכז עיבוד נתונים, ומרכז גיבוי, בשני אתרים שונים. המערכת תפעל על בסיס שיטות החישוב המתבססות על השניות הראשונות בהגעת גלי P כפי שמפותחות כיום בארה"ב, יפן וטייוואן. המערכת תזהה את מיקום המוקד והמגניטודה, ותייצר מפת תרחיש על בסיס מידע זה. המערכת תהיה מסוגלת לשדר אות אחיד של התרעה לכל הגורמים, אך גם לשדר אות התרעה סלקטיבי בהתאם למפת התרחיש שתיוצר בתוך שניות אחדות.

(2) מערכות "אתר": אלו מערכות שיוצבו בגופים שיעדיפו דיוק על פני זמן התרעה. כפי שתואר לעיל מפת התרחיש מתבססת בין השאר על משוואת הניחות אשר במקרים רבים אינה מדויקת דיה, ולפיכך יתכן ותשוגר התרעה לאזורים אשר יתברר כי אליהם לא היה הכרחי לשגר אות זה, ולהיפך. ישנם גופים, שיעדיפו מערכת התרעה שתמוקם בשטחם, ובכך יבטיחו דיוק מרבי. מערכות אלו יזהו את גלי P, יעשו את החישוב ובעקבותיו יבוצעו פעולות אוטומטיות. במקרה זה ההחלטות תתקבלנה על בסיס המידע מהגל המגיע לאתר, ולא על בסיס חישוב מפת תרחיש, ולפיכך, הדיוק יהיה רב יותר אך זמן ההתרעה יתקצר.

ב. קליטה:

(1) מערכות קולטות ומחליטות: מערכות שיקלטו בגופים השונים את ההתרעה שנשלחה ממרכז עיבוד הנתונים. על בסיס המידע שנשלח, ועל בסיס מערכת החלטות שנקבעה מראש, תתקבל במערכות אלו החלטה לגבי הפעולות שיבוצעו אוטומטית.

(2) מערכות אזעקה "ביתיות": מערכות פשוטות שיוצבו בבתי פרטיים, משרדים, וגופים קטנים ובינוניים נוספים. כאשר יקלט אות ההתרעה תשגר המערכת אזעקה קולית.

2. זמני התרעה קצרת מועד לרעידות אדמה בישראל

זמן ההתרעה למדינת ישראל תלוי במרחק האתר ממקור הרעידה ובזמן עיבוד הנתונים. בנוסף, זמן ההתרעה תלוי בסוג מערכת ההתרעה: מערכת הממוקמת באתר עצמו והמושגת על הפרשי הזמנים של הגעת גלי P ו-S לאתר, או מערכת מרכזית בה החיישנים ממוקמים בקרבת מוקדי רעידות האדמה.

ראוי לזכור את ההבדל בין משך הזמן עד התרעה, שהוא הזמן שבין התחלת הרעידה לרגע בו יוצאת ההתרעה (אם המערכת החליטה כך), לבין זמן ההתרעה שהוא הזמן שבין הוצאת אות ההתרעה לבין הגעת גלי ההרס לאתר. ראוי לציין שעובדות שניות נוספות עד לתחילת פעולתם של גלי ההרס על המבנה. בחישובי הזמן להלן אנו לוקחים בחשבון מערכת המתבססת על הידע החדשני של זיהוי מגניטודת רעידת אדמה ומיקום המוקד שלה על פי המידע המתקבל מגלי P בשניות הראשונות שלאחר הרעידה.

במערכת הממוקמת באתר עצמו ניקח בחשבון זמן של 4 שניות מהגעת גל P לחישוב מגניטודת הרעידה (ראה לעיל). יתכן ובעתיד ניתן יהיה לקצר זמן זה. במקרה זה של מערכת הממוקמת באתר אין צורך בריכוז נתונים. בנוסף לזמן חישוב המגניטודה נדרש זמן נוסף, הקצר משניה, לחישוב המידע, קבלת החלטה (אוטומטית) והוצאת ההתרעה. ולכן בסה"כ נחשב זמן של 5 שניות מהגעת גל P ועד הוצאת ההתרעה שבמקרה זה היא גם תחילת הפעילות האוטומטית להקטנת הנזק באתר. פרק הזמן הנותר לצורך הפעולות להקטנת הנזק, כלומר הזמן בין הוצאת ההתרעה להגעת גלי S, תלוי במרחק מהמוקד.

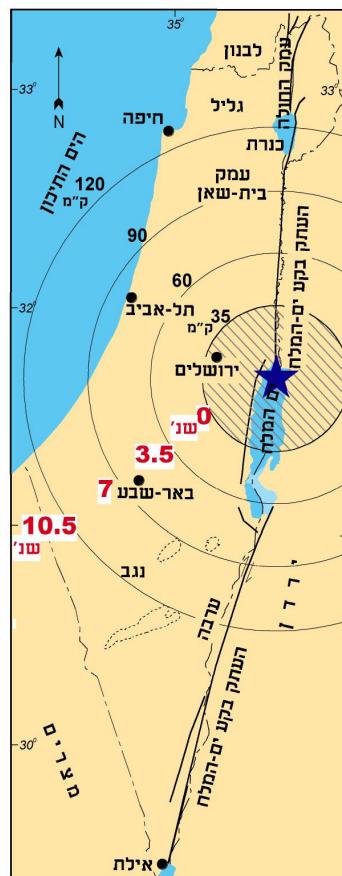
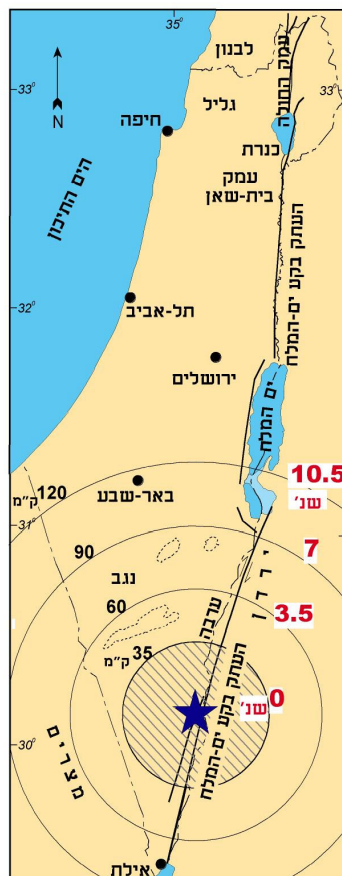
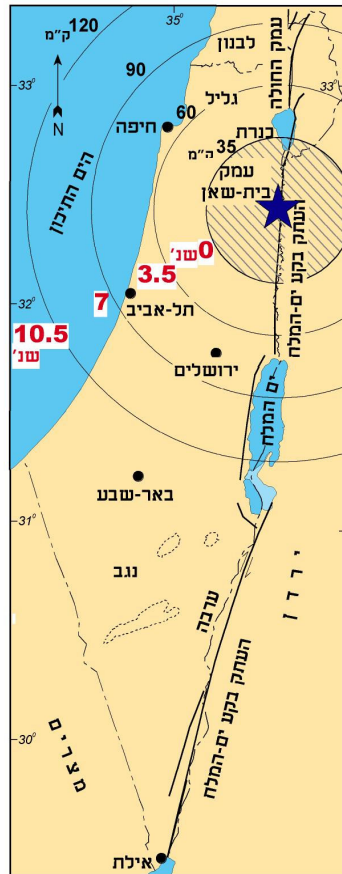
לצורך חישוב זמני ההתרעה במערכת רבת חיישנים הממוקמת בקרבת המוקד נלקח בחשבון זמן של 8 שניות לצורך הוצאת ההתרעה (בעקבות Allen, 2006). זמן זה מורכב מהרכיבים הבאים: 4 שניות של זמן איסוף הנתונים של גל P בכל תחנה ותחנה. הזמן הנדרש לארבע תחנות (לפחות) לאסוף את הנתונים ולהכין אותם לשידור הינו 2-2.5 שניות. שניה נוספת דרושה כדי לשלוח את הנתונים למרכז המידע ושניה נוספת לעיבוד הנתונים, קבלת ההחלטה והעברת אות ההתרעה לצרכנים. ראוי לציין שהערכה זו מתבססת על הטכנולוגיות הקיימות כיום. יתכן שניתן יהיה בעתיד לקצר זמן זה בעוד כשתי שניות בעיקר על ידי שיפור מערכות עיבוד הנתונים והכנתם לשידור בחיישנים עצמם.

זמן ההתרעה האפקטיבי בכל אתר ואתר, קרי הזמן שנותר בין קבלת ההתרעה להגעת גלי ההרס ותחילת הווצרות ההרס, תלוי במרחק בין המוקד לאתר ובסוג מערכת ההתרעה כלומר מערכת באתר עצמו או מערכת רבת חיישנים בקרבת המוקד.

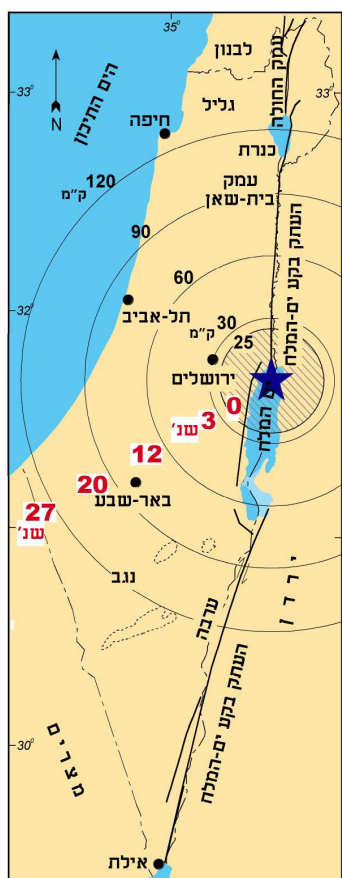
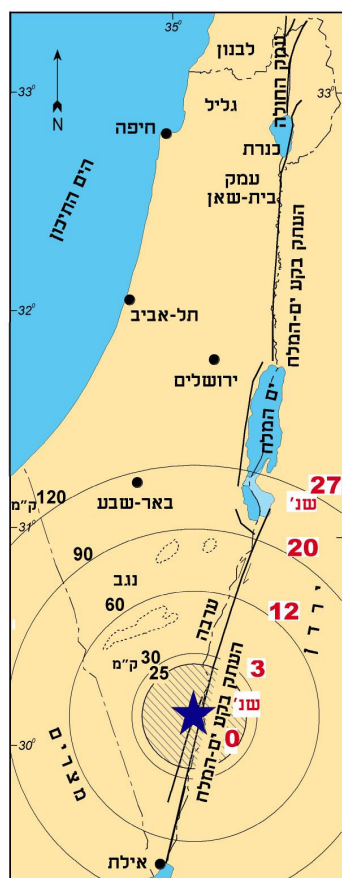
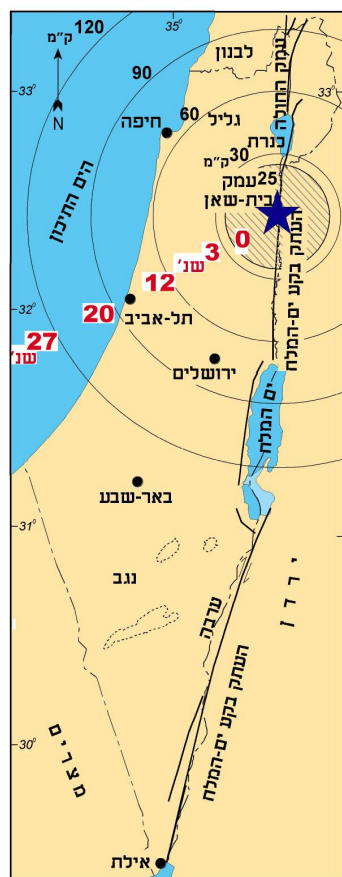
בחישוב זמן ההתרעה לגבי מדינת ישראל ההנחה היא שמוקד הרעידה הצפויה יהיה לאורך בקע ים המלח. בחישובים אלו התבססנו על מודל מהירויות הגלים הסייסמים בישראל (באדיבות ד"ר רמי הופשטטר וד"ר ולדימיר פינסקי, המכון הגיאופיסי לישראל).

איור 9 מציג את משך זמני ההתרעה במערכת בה המכשירים ממוקמים באתרים עליהם מבקשים להגן, בארבעה תרחישים של מוקדי רעידת אדמה לאורך בקע ים המלח. ניתן לראות כי קיים אזור ברדיוס של 35 ק"מ שבו לא יכולה להנתן התרעה. לדוגמא, מוקד של רעידה בצפון ים המלח, אינו מאפשר התרעה בירושלים, אך בתל אביב משך זמן ההתרעה הוא כ-6 שניות, ובחיפה משך זמן ההתרעה יהיה 12 שניות.

איור 10 מציג את משך זמני ההתרעה במערכת בה המכשירים ממוקמים לאורכו של בקע ים המלח, באזור מוקדי הרעידות, בארבעה תרחישים של מוקדי רעידת אדמה לאורך הבקע. במקרים אלו ישנו אזור ללא התרעה ברדיוס של 25 ק"מ. בתרחיש של רעידה בצפון ים המלח, תנתן בירושלים אפשרות להתרעה של 3 שניות, בת"א 18 שניות ובחיפה כ-30 שניות. בתרחיש אחר של רעידה בצפון הארץ זמן ההתרעה יהיה קצר יותר בחיפה וארוך יותר בירושלים.



איור 9. משך זמני ההתרעה לאתר המצוייד במערכת התרעה הממוקמת בשטח האתר. לצורך ההדגמה מתוארים ארבעה תרחישי רעידות אדמה לאורך בקע ים המלח. סביב כל מוקד קיים שטח ברדיוס של 35 ק"מ אשר לגביו לא תוכל להתן התרעה.



איור 10. משך זמני ההתרעה ברחבי מדינת ישראל בעזרת מערכת התרעה מרכזית הממוקמת לאורך בקע ים המלח. לצורך ההדגמה מתוארים ארבעה תרחישי רעידות אדמה לאורך הבקע. סביב כל מוקד קיים שטח ברדיוס של 25 ק"מ אשר לגביו לא תנתן התרעה.

3. דוגמאות לשימוש אפשרי במערכת התרעה קצרת מועד בישראל

להלן מספר דוגמאות לשימוש במערכת התרעה במדינת ישראל בהנחה שאות ההתרעה יגיע שניות אחדות לפני גלי ההרס:

3.1 מפעלים גדולים

1. חברת חשמל – סגירה סלקטיבית של טורבינות, ניתוק מערכות חשמל באתרים בהם יכולים להקרע כבלי מתח גבוה מאד.
2. רשות שדות התעופה – הפסקת המראות ונחיתות.
3. מפעלים פטרוכימיים – סגירת מגופים, למניעת דליפה במקרה של קריעת צנרת (מלבד החומר שמצוי בין המגופים שסביב נקודת הקריעה).
4. מפעלים אחרים – סגירת מערכות בהתאם לרגישותן.
5. מערכות גז – סגירת מגופים.
6. אתרים ביטחוניים – ביצוע פעולות בהתאם להחלטה.

3.2 אתרי ריכוזי אוכלוסין

1. בתי ספר – הוראה לתלמידים להכנס מתחת לשולחנות (או מתקנים ממוגנים) לצורך מניעת נזק מנפילת תקרות אקוסטיות, מדפים וכו'.
2. הפסקת פעילות מעליות במגדלים, עצירת המעלית בקומה הקרובה והודעה לציבור לצאת מהמעלית.
3. התרעה לכל מקומות העבודה וכניסת אנשים אל מתחת למתקנים ממוגנים (שולחנות) או עמידה מתחת למשקופים.
4. סגירת מערכות גז וניתוק החשמל.

3.3 בתים ודירות פרטיים

1. יציאה מהבית החוצה, במידת האפשר, או כניסה למרחב מוגן, מתחת לשולחנות או משקופים.
 2. סגירה אוטומטית של מערכות הגז והחשמל הביתיים.
- ראוי לציין כי מערכת ההתרעה יכולה גם לחשב תרחישים לצונמי בעקבות רעידת אדמה שתתרחש בבקע ים המלח או בים התיכון, ובהתאם לכך להוציא התרעה.

4. שלבים בבניית מערכת התרעה קצרת מועד בישראל והערכות ראשוניות של עלותה

במדינת ישראל מפוזרות כיום 26 תחנות סייסמיות עם פס תדרים צר, מערך תחנות בהר מירון ו-7 תחנות עם פס תדרים רחב. בנוסף ישנה רשת של 63 מדי תאוצה. מערך זה מופעל על ידי האגף לסייסמולוגיה במכון הגיאופיסי לישראל. מערכות אלו יכולות להוות את הבסיס להקמת מערכת ההתרעה קצרת מועד בישראל. יהיה צורך לאפיין את המערכת ובעקבות כך להשלים את מרכז עיבוד הנתונים, ואת מערכת התקשורת, ולעבות את מערכת החיישנים ולעדכן לפחות את חלקה.

להערכתנו, באמצעות הידע המצוי כיום במדינת ישראל, במכון הגיאופיסי, במכון הגיאולוגי, ובחברות המתמחות בין השאר בעיבוד נתונים מהיר, תקשורת ואוטומציה, ניתן להקים מערכת כזו בישראל, תוך הסתמכות על הנסיון המצטבר בעולם ועל חברות בין לאומיות העוסקות בתחומים אלה.

במהלך עבודה זו נעשה ניסיון לבדוק את העלות של הקמת המערכות בארצות השונות ובעיקר ארה"ב, יפן, טיוואן ותורכיה ואת עלות אחזקתן. אולם, לא הצלחנו לקבל הערכה מספקת של העלות מגורמי הפיתוח של המערכות במדינות אלה, בין השאר משום שכל מערכת נבנתה על ידי גורמים שונים, יש בה מרכיבים והיקף שונים ולפיכך הערכה כוללת איננה פשוטה.

הערכה ראשונית של עלות מערכת שלמה להתרעה קצרת מועד היא בסדר הגודל של מליוני ועד עשרות מליוני דולרים.

ראוי לציין כי מדינות כגון רומניה, תורכיה ומקסיקו, שמצבן הכלכלי בינוני, מצאו לנכון להקים ולהחזיק מערכות התרעה קצרת מועד.

5. שיתוף פעולה אזורי

בקע ים המלח, המקור לרוב רעידות האדמה באזורנו, מהווה את הגבול עם מדינת ירדן. המרחק בין צפון ים המלח לרבת עמון הוא 45 ק"מ, מעט יותר מאשר לירושלים (30 ק"מ) ופחות מאשר לתל-אביב (80 ק"מ). מכאן, שהסיכון הסייסמי לרבת עמון וא-סאלט מרעידות לאורך הבקע דומה לסיכון הקיים לערים הראשיות בישראל. דבר זה נכון גם לגבי הערים הראשיות ביהודה ושומרון (שכם, רמאללה וחברון) הקרובות ברוב המקרים למוקדי רעידות האדמה יותר מהערים הגדולות בישראל. נזכיר בהקשר זה כי ברעידת האדמה שהתרחשה ב-1927 ואשר מוקדה היה בצפון ים המלח נגרמו אבידות ונזק רב בירושלים, בלוד ורמלה, בשכם וברבת עמון. בעקבות רעידת אדמה שמוקדה עלול להיות בצפון ישראל או בדרום לבנון צפוי נזק גם בדמשק, המרוחקת כ-75 ק"מ מעמק החולה, ובלבנון.

לפיכך מתבקש שיתוף פעולה אזורי בכלל, ועם ירדן בפרט, בתחום ההתרעה קצרת המועד, אם על ידי שיתוף פעולה בהקמת המערכת ואם על ידי שיגור אות ההתרעה שיתקבל במערכת בישראל למדינות השכנות.

6. יתרונות וחסרונות להקמת מערכת התרעה קצרת מועד בישראל

6.1 יתרונות

1. עיקר מוקדי רעידות האדמה העיקריים במדינת ישראל מרוכז לאורך בקע ים המלח. מרכזי האוכלוסין העיקריים מרוחקים מבקע ים המלח מרחק המאפשר על פי החישוב הראשוני התרעה של כ-10-30 שניות (איורים 9, 10). אפילו במקרה של רעידה בבקע ים המלח בקרבת ירושלים, בית שאן, טבריה או קריית שמונה, תתכן, על פי החישוב הראשוני, התרעה של 2-3 שניות. מכאן ניתן ללמוד על חשיבות העיסוק במשמעות הקמת של מערכת התרעה קצרת מועד בישראל.
2. חיישנים סייסמיים אחדים המופעלים כיום על ידי המכון הגיאופיסי לישראל, ממוקמים לאורך הבקע וניתן להשתמש בתשתית זו.
3. הידע המדעי והטכנולוגי הקיימים בישראל מספיקים לצורך הקמת מערכת כזו, בתמיכה של מרכיבי חומרה שונים מחו"ל.
4. בישראל קיימים גופים המסוגלים להקים מערכת התרעה מסוג זה ולתחזק אותה לאורך זמן.
5. אזרחי ישראל רגילים במצבי חרום, ולגביהם, הסבר על מערכת כזו ודרכי השימוש בה, תרגול האוכלוסיה, ועמידה בפני התרעות שווא, אינם חריגים.

6. כחמישים אלף מבנים בישראל דורשים חיזוק כדי להפכם לעמידים ברעידות אדמה. בהעדר צפי לשוני במצב זה בעתיד הנראה לעין, מערכת התרעה קצרת מועד מאפשרת נקיטת פעולה מיידית להצלת חיי אדם.

6.2 חסרונות וקשיים בהקמת מערכת התרעה בישראל

1. עלות הקמת המערכת היא מספר מליונים עד עשרות מליוני דולרים ולכך מתוספת עלות אחזקה שוטפת. בנוסף ישנן עלויות לכל גוף לצורך הכנסת מערכת הפעולות האוטומטיות שיש לבצע בעת קבלת ההתרעה. יש צורך בהגדרת גורמי המימון ומחיר החיבור למערכת ההתרעה למנויים, אם כך יוחלט.
2. האחזקה והתפעול של המערכות אינם פשוטים. המכשירים פועלים בשטח ונתונים לחסדי הטבע ולנזקים על ידי אנשים.
3. יש צורך בחינוך האוכלוסייה להתנהגות בעת קבלת התרעה.
4. נוכח בעיות משפטיות אפשריות יתכן שיהיה צורך בחקיקה. המהלך החקיקתי עלול להיות מסובך וארוך.
5. במצב בו נתונה מדינת ישראל, העמדת איום משמעותי נוסף על סדר היום הציבורי והטיפול בו איננו קל, ובמיוחד כאשר נראה לכאורה שאיום כזה איננו מוחשי ומיידי.

7. המלצות לסקר היתכנות

הערכתנו הראשונית היא שמערכת התרעה קצרת מועד עשויה להקטין בישראל את הנזק הצפוי בעקבות רעידת אדמה הרסנית ואנו מציעים לבחון לעומק את האפשרות להקמת מערכת מסוג זה.
בחינת האפשרות צריכה להעשות על ידי סקר היתכנות שיכלול בין השאר את התחומים הבאים:

1. איפיון המערכת על מרכיביה.
2. בדיקת צרכים והגדרת צרכנים.
3. לימוד המערכות השונות הקיימות בחו"ל ובחינת התאמתן לישראל.
4. בחינת שלבי פיתוח המערכת והקמתה.
5. הערכת סיכוני פיתוח.
6. בחינת ההחלטות האוטומטיות המתקבלות במערכת – מהן, סף הקבלה והביצוע.
7. בחירת הפתרון הטכנולוגי.
8. בדיקת המצב הקיים ובחינת היכולת להתאים את הציוד הנוכחי למערכת היעודית.
9. איפיון מערכת עיבוד המידע (אלוגריתם החישוב).
10. בחירת הפתרון התקשורתי.
11. בחינת אופן הפצת אות ההתרעה.
12. בעיות באחזקת המערכת לאורך זמן.
13. בחינת המשמעויות החברתיות.
14. בחינת הצורך בתרגול והמשמעות הנובעות מכך.
15. בחינת המשמעויות המשפטיות.
16. בחינת משמעויות למערכת השילטונית.

17. השפעת הקמת המערכת על גופים שונים (כגון : מערכת הביטחון, רשויות מקומיות, ומפעלים גדולים).
18. הערכת עלות ההקמה והאחזקה ובנית מודל כלכלי.
19. בחינת התרעת שווא, ובכלל זה הסיכון והעלויות.
20. הערכת הנזק הכלכלי הצפוי עקב רעידת אדמה בתרחישים שונים, והערכת החסכון עקב הפעלת המערכת.
21. בחינת הגורמים הפוטנציאליים להקמת מערכת כזו (ממשלתי, חברות ביטוח או גופים פרטיים) ודרכי מימון (ממשלתי או מימון פרטי ותשלום "דמי מנוי").
22. בחינת שיתוף פעולה אזורי.

8. סיכום - סיכון מול סיכוי

במדינת ישראל צפויה רעידת אדמה הרסנית. איננו יודעים לחזות את מועד התרחשותה, ולפיכך יש להתכונן לקראתה בדרכים שונות (כגון בניה נכונה, הכנת האוכלוסיה להתגוננות בעת הרעידה, טיפול באוכלוסיה ובמדינה לאחריה). אחת הדרכים להתגוננות בפני רעידת אדמה היא הקטנת הנזק על ידי ביצוע פעולות מהירות בשניות שלפני ההרס. מרכזי האוכלוסין בישראל ממוקמים במרחק ממוקדי רעידות האדמה המאפשר זמן התרעה מינימאלי וסביר. בנוסף, בשנים האחרונות מתפתחת בעולם היכולת לשגר התרעה קצרת מועד בתוך שניות ספורות מרגע התחלת הרעידה. ראוי לציין שבתורכיה ובקליפורניה מניחים שגם זמן התרעה של שניות בודדות עשוי להועיל ולהצדיק הקמת מערכת התרעה קצרת מועד. הקמת מערכת התרעה קצרת מועד בישראל, וביצוע פעולות אוטומטיות במפעלים ומרכזי אוכלוסין, עשויה להקטין באופן משמעותי את הנזק לנפש ולרכוש במקרה של רעידת אדמה.

חסרונות המערכת והסיכון בהקמתה :

1. מערכת התרעה עלולה להשפיע על התנהגות האוכלוסיה ויצירת מתח עקב הקמתה, וכן לגרום נזק במקרה של התרעת שווא. ראוי לבחון נושא זה מהבחינה החברתית, אך על פניו נראה שאזרחי ישראל ערוכים לאיומים ולהתרעות.
2. מערכת התרעה בישראל עשויה לפעול שנים רבות קודם שנזדקק לה. יש לפיכך, לבחון את הכדאיות הכלכלית של הקמת מערכת כזו ואחזקתה במשך עשרות שנים.

יתרונות המערכת והסיכויים בהקמתה :

1. מניעת אבידות ונזקים עקיפים אם מערכת כזו תפעל לפני רעידת אדמה הרסנית.
2. היכולת להפיק במהירות מפות תרחיש עם התרחשות הרעידה, שישמשו גם לצורך תפעול מערכות ההצלה מיד לאחר הרעידה.
3. הקטנת המתח הכולל של האוכלוסיה לקראת רעידה מתוך ההבנה שאמנם איננו יודעים לחזות התרחשות רעידה אך אנו יכולים להתריע עליה שניות אחדות לפני קרות הנזק וכך להגן על חלק מהאוכלוסיה ועל מפעלים וגופים נוספים.
4. מערכת התרעה קצרת מועד שתוקם לאורך בקע ים המלח יכולה לשרת את המדינות השונות הממוקמות לאורכו – ירדן, סוריה, לבנון וישראל. ייתכן שגורמים בינלאומיים יביעו עניין בהקמה משותפת של מערכת זו.

ו. מקורות

- Allen, R.M., 2004. Rapid magnitude determination for earthquake early warning. In: "The many facets of seismic risk." Edited by Pecce, M., Manfredi, G. and Zollo, A., Napoli: Universita degli Studi di Napoli "Federico II", pp. 15-24.
- Allen, R.M., 2006. Probabilistic warning times for earthquake ground shaking in the San Francisco Bay area. *Seismological Res. Lett.*, 77 (3), 371-376.
- Allen, R.M., and Kanamori, H., 2003. The potential for earthquake early warning in southern California, *Science*, 300, 786-789.
- Ambraseys, N. N., 1997. The earthquake of 1 January 1837 in southern Lebanon and northern Israel. *Annali Di Geofisica*, 40, 4, 923-935.
- An analysis of the eastern Mediterranean earthquake of 20 May 1202. In: Lee, W. K. H., Meyers, H. and Shimazaki, K. (Editors), *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*. Academic Press, San Diego, California, 181-200.
- Ashiya, K., Odaka, T., Tsukada, S., Yokota, T., Kato, T. and Kamigaichi, O., 2002. Nowcast earthquake information and its application to early earthquake alarm system. In: *Regional disaster prevention and exploration geophysics*. *Geophysical Exploration*, 55 (6), 485-494.
- Braile, L., 2005. Seismic wave demonstration and Animation.
<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>
- Erdik, M., Aydinoglu, N., Fahjan, Y., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Siyahi, B., Durkal, E., Ozbey, C., Biro, Y., Akman, H. and Yuzugullu, O., 2003. Earthquakes risk assessment for Istanbul metropolitan area. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2, 1-25.
- Erdik, M., Fahjan, Y., Ozel, O., Alcik, H., Mert, A. and Gul, M., 2003. Istanbul earthquake rapid response and the early warning system. *Bull. of Earthquake Engineering*, 1, 157-163.
- Espinoza-Aranda, J.M., Jimenez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M. and Maldonado, S., 1995. Mexico City seismic alert system. *Seism. Res. Lett.*, 66, 42-52.
- Espinoza-Aranda, J.M., Jimenez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M. and Maldonado, S., 1998. Seismic alert system of Mexico City. *The Third International Conference on Early Warning (EWC III)- From Concept to Action*. Potsdam, Germany.
- Espinoza-Aranda, J.M., Jimenez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M., Maldonado, S. and Higareda, R., 2003. The seismic alert system in Mexico City and the school prevention program. In: in "Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction". Edited by J. Zschau and A. N. Koppers, p. 441-446, Springer, Berlin.
- Frankel, A.D., Mueller, C.S., Barnhard, T., Perkins, D.M., Leyendecker, E.V., Dickman, N., Hanson, S.L., and Hopper, M., 1996. New seismic-hazard maps for the United States. *Seismol. Res. Lett.*, 67 (2), 38 p.

- Frankel, A.D., Mueller, C.S., Barnhard, T., Harmsen, S.C., Leyendecker, E.V., Perkins, D.M., Dickman, N. and Hanson, S.L., 1998. New seismic-hazard maps for the Western U.S. In: "Basin and Range Province seismic-hazards summit." Lund-William, R. (editor), Utah Geol. Surv. 98-2, 33 p.
- Goltz, J.D., 2002. Introducing earthquake early warning in California: a summary of social science and public policy issues. Rep. to the Governor's office of Emergency Services, 15 p.
- Goltz, J.D., 2003. Applications for new real-time seismic information: the TriNet project in southern California. In: education and outreach, Mellors, R. and Wald, L. (editors), Seismol. Res. Lett., 74, 516-521.
- Goltz, J.D. and Flores, P.J., 1997. Real-time earthquake early warning and public policy; a report on Mexico City's Sistema de Alerta Sismica. Seismol. Res. Lett., 68, 727-733.
- Grasso, V. and R.M. Allen, 2006. Earthquake Warning Systems from the user perspective. 1906 Earthquake Conference. Seismological. Soc. of America.
- Grasso, V.F. and Allen, R.M., 2006. Uncertainty in real-time earthquake hazard predictions (in Review).
- Greek, G. and Kumpel, H.J., 1997. Statistical analysis of strong-motion accelerogram and its application to earthquake early-warning system. Geophys. J. Int., 129, 113-123.
- Harben, P.E., Jarpe, S. and Hunter, S., 1996. Real-time earthquake alert system for the greater San Francisco Bay area; a prototype design to address operational issues. UCRL-JC-123900.
- Hauksson, E., Small, P., Hafner, K., Busby, R., Clayton, R., Goltz, J.D., Heaton, T., Hutton, K., Kanamori, H., Polet, J., Given, D., Jones, L.M. and Wald, D., 2001. The southern California seismic network: the Caltech/USGS element of TriNet, 1997-2001. Seismol. Res. Lett., 72, 690-704.
- Heaton, T.H., 1985. A model for a seismic computerized alert network. Science, 228, 987-990.
- Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K., Kamimura, A. and Fujinawa, Y., 2005. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms. Bull. Seismol. Soc. Am., 95 (2), 708-718.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G. and Claus, R.O., 1997. Structural control: past, present and future. J. Engineering Mechanics, 123, 897-971.
- Hudnut, K.W., Anderson, G.J., Aspiotes, A., King, N.E., Moffitt, R.A. and Stark, K.F., 2002. GPS fault slip sensors. Asia-Pacific Economic Coop. Symp. Confronting Urban Earthquakes-Seismic Early Warning. Taipei, Taiwan, pp. 1-5.
- Kanamori, H., Hauksson, E. and Heaton, T., 1997. Real-time seismology and earthquake hazard mitigation. Nature, 390, 461-464.

- Kanamori, H., 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 195-214.
- Kiyomoto, M., Tsukada, S., Ohtake, K., Shiozu, Y., Morimoto, M., Saito, M., Sekita, Y., Doi, K., Yoshida, Y., Odaka, t., Ashiya, K. and Horiuchi, S., 2005. Earthquake early warning system in Japan. *Amer. Geophys. Union, Fall meeting*.
- Leach, R.R. and Dowla, F.U., 1996. Earthquake Early Warning System Using Real-Time Signal Processing IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing, Kyoto, Japan, 12 p.
- Lockman, A.B. and Allen, R.M., 2003. Rapid magnitude determination using P-wave arrivals: magnitude-period relations for Japan and Pacific northwest (AGU fall meeting).
- Lockman, A.B. and Allen, R.M., 2004. Utilization of Station Clusters for Earthquake Early Warning, AGU Fall Meeting.
- Lockman, A.B. and Allen, R.M., 2005. Single station earthquake characterization for early warning. *BSSA*, 95 (6), 2029-2039.
- Lockman, A.B. and Allen, R.M., 2006. Magnitude-period scaling relations for Japan and Pacific northwest: implications for earthquake early warning. *BSSA* (in Review).
- Nakamura, Y., 1988. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). *Proc. of the 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Nakamura, Y., 1989. Earthquake alarm system for Japan railways. *Japanese Railway Engineering*, 109, 1-7.
- Nakamura, Y., 2004. UrEdAS urgent earthquake detection and ararm system, now and future. *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering*, paper no. 908.
- Olson, E.L. and Allen R.M., 2005. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 438, 212-215.
- Pinsky, V., 2006. Using beamforming for the global network location. *Physics of the Earth and Planet. Int.*, 158, 75-83.
- Pinsky, V., Feldman, L. and Avirav, V., 2004.. Advanced location study of the Dead Sea earthquake series. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.*, p. 89.
- Pinsky, V., Gitterman, Y., Hofstetter, R. and Polozov, A., 2006. Application of new developed location algorithms to ground truth data. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.*, p. 98.
- Pinsky, V., Horiuchi, S. and Hofstetter, R., 2007. Investigation of network beamforming for the real-time earthquake location in Israel and Japan. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.*
- Polozov, A., Pinsky, V., Kadosh, D., Avirav, V., Karmon, Y. and Hofstetter, R., 2007. New Israel seismic network acquisition system – NISNAS. *Isr. Geol. Soc. Annu. Meet.*
- Sappenfield, 2003. Seconds before earthquakes, an early-warning system.
<http://www.csmonitor.com/2003/0502/p02s02-usgn.html>

- Simons, F.J., Dando, Ben D.E. and Allen, R.M., 2006. Automatic detection and rapid determination of earthquake magnitude by wavelet multiscale analysis of primary arrival. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 250, 214-223.
- Wenzel, F., Oncescu, M.C., Baur, M., Fiedrich, F. and Ionescu, C., 1999. An Early Warning System for Bucharest, *Seismological Res. Lett.*, 70 (2), 1-4.
- WGCEP (Working Group on California Earthquake Probabilities), 2003. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2003-2031, U.S. Geological Survey Open-File Rep. 03-214.
- Wu, Y.M. and Teng, T.L., 2002. A virtual sub-network approach to earthquake early warning. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2008-2018.
- Wu, Y.M., Chung J.K., Chen C.C., Hsiao N.C., Shin T.C., Tsai Y.B. and Kuo K.W., 2003. On the establishment of an automatic earthquake information broadcast system in Taiwan, in "Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction" edited by J. Zschau and A. N. Koppers, p. 461-464, Springer, Berlin.
- Wu, Y. M., Teng T.L., Hsiao N.C., Shin T.C., Lee W.H.K. and Tsai Y.B., 2004. Progress on earthquake rapid reporting and early warning systems in Taiwan, in "IUGG Special Volume on Earthquake Hazard, Risk, and Strong Ground Motion" edited by Y. T. Chen, G. F. Panza, and Z. L. Wu, Seismological Press, Beijing, p. 457-480.
- Wu, Y. M. and Kanamori H., 2005. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, 347-353.
- Yamazaki, F., 1998. Early warning systems for the mitigation of earthquake-related technological risks. The Third International Conference on Early Warning (EWC III)-From Concept to Action. Potsdam, Germany.

נספחים

1) מקור רעידות האדמה, מגניטודה ועצמה

רעידת אדמה היא תופעת טבע נפוצה בכדור הארץ. מידי שנה נמדדות מליוני רעידות אדמה אשר מתרחשות בדרך כלל בגבול הלוחות הטקטוניים. על פי תאוריית הלוחות (Plate tectonics) הקרום הצפיד של כדור הארץ שבור ללוחות בגדלים שונים אשר נעים בהתמדה האחד ביחס לשני. תנועה יחסית זו שבין הלוחות היא שגורמת לרעידות האדמה על ידי תזוזה מהירה לאורך משטחי החיכוך שבין חלקי הקרום של כדור הארץ. במקרים מסויימים התנועה לאורך משטח החיכוך רצופה ואינה גורמת לרעידות גדולות (aseismic slip), אך במקרים רבים משטח חיכוך "נעול" ואין עליו תנועה רצופה. כאשר המאמץ המצטבר על משטח זה משתחרר, מתרחשת רעידת האדמה העלולה לשחרר כמות גדולה מאד של אנרגיה בזמן קצר. האנרגיה מבטאת בעזרת המגניטודה, מדד אשר הוגדר לראשונה על ידי ריכטר בשנת 1935. יש להדגיש: המגניטודה מבטאת את כמות האנרגיה המשתחררת במוקד, ולא את שמרגיש כל אדם או מבנה במקום בו הוא נמצא במרחק מסויים ממוקד הרעידה.

על-מנת לתת מדד לרעידת האדמה על פי מה שהתרחש בנקודה מסויימת ועל פי מה שחש מי שנמצא בנקודה זו בעת הרעידה, הוגדר על ידי מרקלי סולם העוצמה הסייסמית (Seismic Intensity), המבטא, בניגוד למגניטודה, את האפקטים של הרעידה במקום מסויים ולא דוקא בקרבת המוקד. העוצמה הסייסמית, לפיכך, תהיה שונה במקומות שונים בעקבות אותה הרעידה (לה כמובן מגניטודה אחת ומסויימת).

2) גלים סייסמים

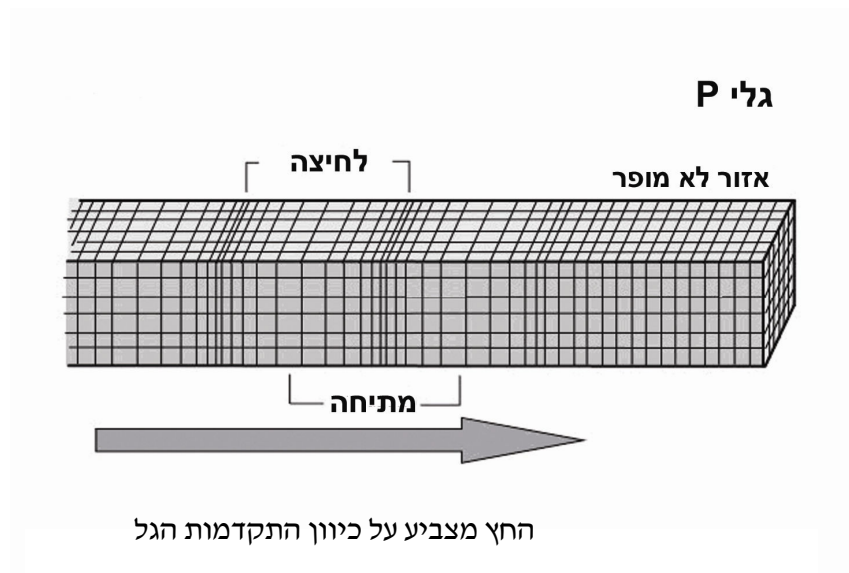
גלים סייסמים הינם גלים הנעים דרך כדור הארץ ונוצרים בדרך כלל כתוצאה מרעידות אדמה או פיצוצים.

את הגלים הסייסמים נהוג לחלק לגלי גוף וגלי שטח. גלי הגוף הינם גלים הנעים בכל הטווח של פנים כדור הארץ. גלי שטח נעים במקביל לפני השטח של כדור הארץ. גלים אלה אמנם חודרים לעומק משמעותי בפני השטח אך אינם נעים דרך החלק הפנימי של כדור הארץ. שני סוגי גלי שטח ידועים – גלי ריילי (Rayleigh) וגלי לאב (Love). גלי ריילי נעים כגלים בפני השטח בדומה לגלים בפני המים, ואילו גלי לאב יוצרים גזירה אופקית בפני השטח. גלי לאב מהירים מעט יותר מגלי ריילי.

הגלים החשובים יותר לתחום רעידות אדמה הם גלי הגוף הנחלקים לגלי לחץ (Compressional waves) וגלי גזירה (Shear waves). גלי לחץ נקראים גלי P משום שהם מהירים יותר ומגיעים לכל מקום ראשונים (Primary) בעוד שגלי הגזירה, גלי S, איטיים יותר (Secondary waves).

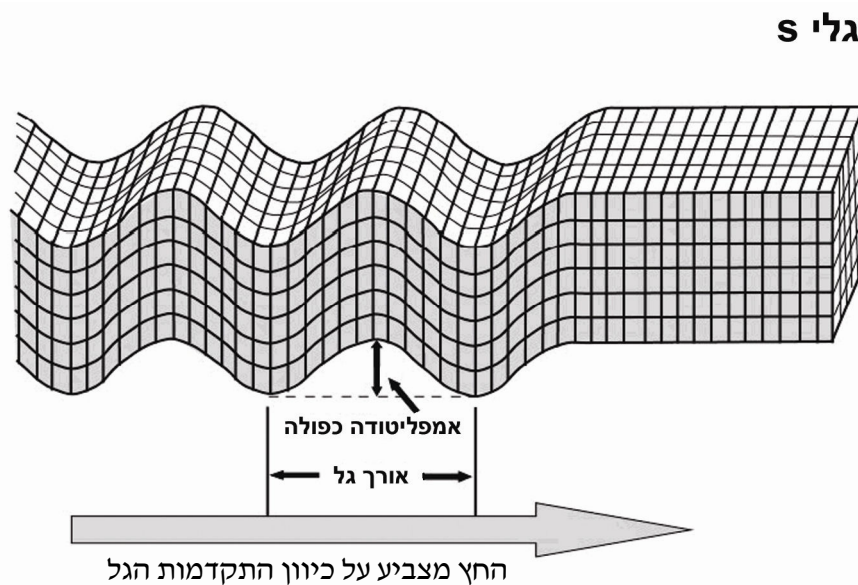
בעוד שגלי הלחיצה (P) הם הראשונים להגיע, גלי הגזירה (S) וגלי השטח הם המשמעותיים ביותר לעניין רעידות אדמה משום שהם אלו היוצרים את עיקר הנזק הנגרם באתר.

גלי P עוברים דרך סלעים מוצקים ודרך נוזלים (כמו למשל המעטפת של כדור הארץ), ובתנועתם הם מושכים ודוחפים את הסלע דרכו הם עוברים, בדומה לגלי קול העוברים באויר (איור א').



איור א. תנועת גלי P (על פי Braile, 2005).

גלי S הם גלי גזירה אשר אותם אנו מרגישים ברעידות אדמה. הם איטיים יותר מגלי P ויכולים לנוע רק דרך סלעים מוצקים. גלים אלה מניעים את הסלע דרכם הם עוברים בניצב לכיוון התקדמות הגל (איור ב').



איור ב. תנועת גלי S (על פי Braile, 2005).

אנימציות והסברים מעמיקים יותר על הגלים הסייסמיים ניתן לראות בין השאר באתרי האינטרנט:

1. <http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>

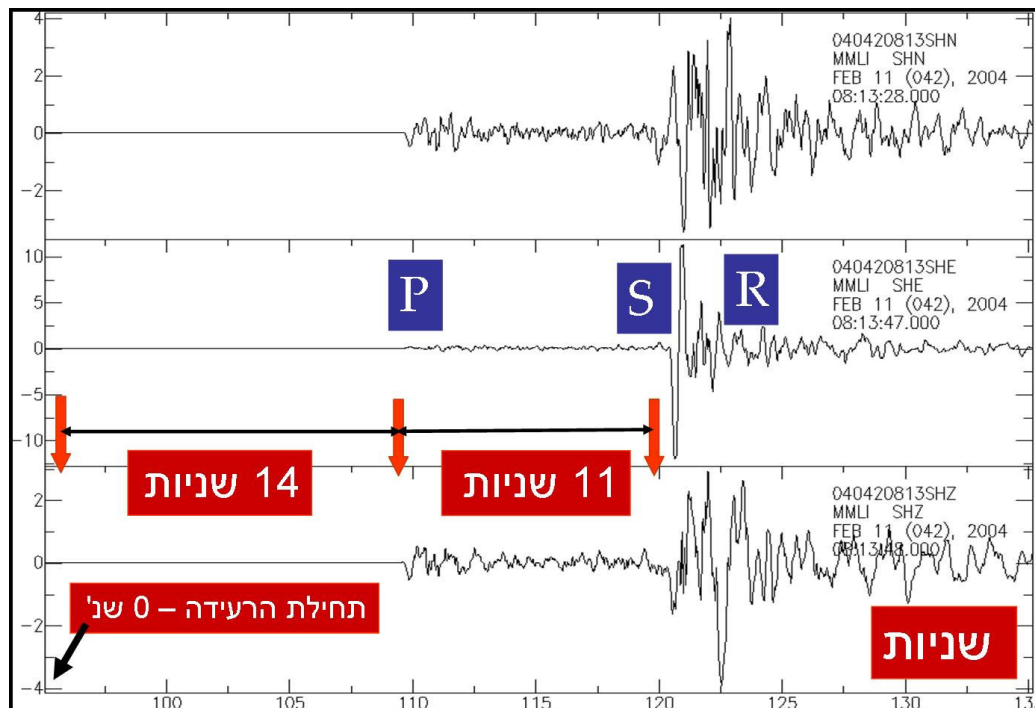
2. <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>

3) מהירות הגלים הסייסמיים

מהירות הגלים הסייסמיים תלויה בתכונות האלסטיות ובצפיפות החומר דרכם עוברים הגלים. גלי P הם כאמור הגלים המהירים יותר ומגיעים ראשונים לכל אתר. מאחר וגלים אלה הם גלי לחץ הם נעים במהירות הקול, כלומר 333 מ'שניה באויר, 1450 מ'שניה במים, כ- 5000 מ'שניה בסלע גרניט, וכ- 14,000

מ'אשניה בגלעין כדור הארץ. אם מוציאים מהחשבון את התנועה בנוזלים ובאוויר, ואת המהירויות הגבוהות בעומק כדור הארץ, הרי שמהירות גלי P בקרום כדור הארץ היא בד"כ בין 5 – 7 ק"מ/שניה.

ראוי לציין שלמרות שגלי P הם כאמור "גלי קול" אוזן האדם אינה שומעת אותם משום שהתדירות שלהם נמוכה מיכולת השמיעה של בני אדם. יש שטוענים שבעלי חיים יכולים להתריע מפני רעידות אדמה, ויתכן שבעלי חיים מסויימים מסוגלים לשמוע את גל P המגיע לאתר המסויימ לפני גלי S ההרסניים ולכן הם חשים ברעידה המתקרבת עוד לפני שבני האדם המצויים באותו מקום יחושו בה וזאת רק כאשר יגיעו גלי ה-S. גלי S, נעים כאמור רק במוצקים. מהירותם היא כ- 40% פחות מאשר גלי P בכל מדיום נתון. מהירות הגלים יכולה להגיע עד ל- 8 ק"מ/שניה בסלעים קשים בעומק כדור הארץ, ואילו בסדימנט פריך ובלתי מלוכד הם ינועו במהירות של 1 ק"מ/שניה ופחות. בדרך כלל נעים גלים אלו בקרום כדור הארץ במהירויות של 3-4 ק"מ/שניה. גלי השטח איטיים עוד יותר ומהירותם בדרך כלל 2-3 ק"מ בשניה ולעיתים הם מגיעים גם למהירויות של עד 4.4 ק"מ בשניה (כתלות בתדירות הגל). את הפער בזמני ההגעה ניתן לראות היטב באיור ג' המציג סייסמוגרמה של רעידת האדמה, שהתרחשה בצפון ים המלח בפברואר 2004 במגניטודה 5.1, כפי שנקלטה בסייסמוגרף בהר מלכישוע שבגלבע.



איור ג'. סייסמוגרמה של רעידת האדמה שהתרחשה בצפון ים המלח ב- 11 בפברואר 2004, במגניטודה 5.1, כפי שנקלטה בתחנה הסייסמית בהר מלכישוע (בגלבע) במרחק של 83 ק"מ. ניתן לראות כי גלי P הגיעו 14 שניות לאחר הרעידה, גלי S (ההרסניים) 11 שניות לאחר מכן וגלי ריילי מיד אחריהם. כל אחד משלושת השרטוטים מבטא קריאה של הסייסמוגרף בציר מרחבי אחר (נתוני האגף לסייסמולוגיה, המכון הגיאופיסי).

4) שיעור הנזק

שיעור הנזק ועוצמת רעידת אדמה, שיגרמו עקב הרעידה תלויים במספר גורמים: (א) מגניטודת הרעידה: ככל שהמגניטודה גבוהה יותר, תנודות הקרקע הצפויות תהיינה חזקות יותר. (ב) המרחק מהמוקד: ככל שהמרחק קטן יותר תנודות הקרקע הצפויות תהיינה חזקות יותר. (ג) אופי התשתית: לאופי התשתית

חשיבות רבה בקביעת העוצמה של רעידת האדמה במקום מסויים (ראה פרוט להלן). (ד) סוג המבנה ואופי הבניה: לאיכות הבניה השפעה רבה על הנזק שיגרם למבנה עקב רעידת אדמה.

השילוב בין ארבעת הגורמים הללו הוא שקובע את שיעור הנזק ברעידה. ידועות רעידות אדמה חזקות שגרמו לנזקים קטנים יחסית ורעידות חלשות יותר שגרמו לנזקים עצומים. רעידת האדמה שהתרחשה באזור סן-פרנסיסקו ב- 1989 (מגניטודה 6.8) גבתה 61 הרוגים ולעומתה רעידת האדמה שהתרחשה בארמניה בשנת 1988 עם אותה מגניטודה ומרחק דומה למוקד גרמה ל- 55,000 הרוגים.

בנוסף לנזקים הישירים הנגרמים עקב הרעידה נגרמים בדרך כלל גם נזקים עקיפים, סביבתיים בעיקרם, כמו לדוגמה דליפת חומרים מסוכנים, שריפות, מחלות ועוד. נזקים אלו יכולים במקרים מסויימים להיות משמעותיים אף יותר מהנזקים הישירים.

5) השפעת התשתית

לאופי התשתית עליה בנויים מבנים חשיבות גדולה ביותר בקביעת גודל הנזק הנגרם ברעידת אדמה.

1. הגברת עצמת הגלים הסייסמיים: כאשר גלים עוברים בתת הקרקע מסלע אחד לאחר אשר יש ביניהם עכבה סייסמית (seismic impedance) גבוהה יש לצפות להגברה (amplification) של תנודות הקרקע בפני השטח. כאשר סלע רך מונח על סלע קשה תהיה הגברה של הגלים הסייסמיים, לעומת זאת באזור בו על הסלע הקשה אין קרקע רכה או סלעים אחרים, לא תהיה הגברה של הגלים הסייסמיים. לפיכך, תשתית שתגרום להגברה היא תשתית מסוכנת יותר. ראוי לציין את המקרה הידוע של רעידת האדמה במקסיקו סיטי בה חלקי העיר, שהיו בנויים על תשתית שהגבירה את תנודות הקרקע, ניזוקו קשה מרעידה שהתרחשה במרחק של כ- 350 ק"מ בעוד אתרים קרובים יותר למוקד הרעידה שנבנו על תשתית שונה ניזוקו פחות.

2. כשל התשתית: זהו גורם נוסף העלול לגרום לנזק משמעותי ברעידת אדמה. מוכרים שלושה כשלי תשתית: (א) גלישות סלע (landslides) גדולות כך שלעיתים חלקי הר גולשים יחד עם הבנוי עליהם על כל הקיים במורד. בישראל נמצאו עדויות לגלישות קרקע בעבר ואופיים ההררי של אזורים רבים במדינה בשילוב עם סוגי המסלע מצביע על סיכון גם בעתיד. (ב) התנזלות התשתית (liquefaction). תשתית חולית בלתי מלוכדת הרוויה במים עלולה לעבור התנזלות בזמן רעידת אדמה ולאבד את יכולתה לתמוך ביסודות המבנים הבנויים עליה. כתוצאה מכך דוחקת התשתית כלפי מעלה עצמים שמסקלם הסגולי קטן ממשקל המים, ועצמים כבדים מהמים שוקעים. חלק ניכר מהנזקים שנגרמו כתוצאה מרעידת האדמה שהתרחשה בקובה שביפן בתחילת 1995, מיוחסים לתופעה זו וממחישים את שעלול לקרות לאורך מישור החוף אצלנו אם יתקיים השילוב "הקטלני" בין רעידה חזקה וקרובה ותשתית מתנזלת. (ג) קריעת פני השטח (surface rupture) כתוצאה מרעידת האדמה. מבנים הממוקמים על קו ההעתק נפגעים בדרך כלל בצורה קשה מאד.

3. צונמי הוא גל ים (נחשול) בגובה של מספר מטרים שנוצר עקב רעידת אדמה המתרחשת בים, או גלישות גדולות בקרקעית הים (הנוצרות בדרך כלל גם הם כתוצאה מרעידת אדמה ביבשה או בים). בישראל קיימות עדויות היסטוריות להתרחשות התופעה ויש סיכון שגם תתרחש בעתיד.

נספח מס' 2. מערכות התרעה קצרת מועד מסחריות המתאימות לשימוש ביתי או לגופים קטנים.



MitiGator® Seismic Switch



Small, lightweight, and inexpensive, the MitiGator® seismic switch offers a full spectrum of powerful features. Inside the compact 3"× 4"× 0.75" case is a programmable computer capable of shutting down critical devices at the onset of a strong earthquake. Not only can the MitiGator detect the earthquake waves, but it will also detect in all three axes: vertical, longitudinal and transverse.

The MitiGator® is maintenance free and capable of performing its own tests, and its sensing elements are highly reliable. An RS-232 serial port allows the user to communicate with this powerful seismic switch.

Specifications

Power Requirements:	85 mA from +12 VDC: additional 25 mA for each energized relay
Sensors:	Triaxial acceleration monitoring micro-machined silicon accelerometers
Frequency Response:	Digital filter for establishing bandpass of earthquake-related signals (1Hz to 15 Hz)
Acceleration Threshold:	User selectable from 25mg to 0.5g
Switching Elements:	3 low power relays (the trigger threshold for each relay can be independently selected by the user)
Communications:	RS-232C Serial port
Diagnostics:	Self-diagnostics at power on and reset
Temperature Range:	-25°C to +70°C

[Go back to Products home](#)



SEISMIC SWITCH Model SS-3

The SS-3 Seismic Switch is a low cost alternative to other monitoring systems. The unit is triggered upon a strong seismic motion and used to shutdown sensitive equipment, elevators, open automatic doors, or sound an alarm.



The standard unit includes an internal triaxial $\pm 1g$ accelerometer. It has an internal trigger bandpass filter and will only trigger on accelerations with frequency components between 0.5Hz and 15Hz.

The user can easily select, without programming, 6 standard acceleration thresholds that will trigger the unit. Standard trigger thresholds are from 0.01g through 0.5g in various steps.

When the user selected acceleration threshold is exceeded, the unit closes its internal relays. The relays will remain in the triggered condition as long as the acceleration remains above the selected threshold. After the acceleration drops below the selected threshold the relays will automatically reset after a user defined delay time. The user may select the option to latch the relay requiring a manual reset.

The SS-3 is housed in a NEMA 4x environmental case with military style connector. It has two LED's on the front panel to indicate power on, and trigger status. The unit is very easy to install and requires no maintenance. It is shipped fully calibrated with instructions on field installation and calibration.

Options include custom trigger levels, variable trigger adjust, remote reset of relays, and external 12V battery pack.

SS-3 Specifications

Accelerometer	Internal triaxial accelerometers
Full Scale	+/- 1g, others optional
Outputs	2 form C (DPDT) contacts rated 120VAC 5A max
Selectable trigger levels	0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 g, others optional
Accuracy	5%
Relay output duration	3-20 Sec (adjustable) or latched
Trigger Bandwidth	0.5hz to 15Hz
Indicators	LED, power on and trigger, others optional
Adjustments	Accelerometer null, accelerometer span, Relay time delay
I/O Connector	10 pin military screw lock style, or pro- tected terminal strip(s)
Operating Voltage	11 – 14 VDC (external)
Current	60mA max (triggered)
Case size	5 x 5 x 2.5 inches
Case type	NEMA 4x, painted diecast aluminum
Environmental	Waterproof, dustproof
Operating temperature	-10° to 60° C
Vibration survival	5 g peak, 20 to 2,000 Hz
Shock survival	1000 g, 1 ms 100 g, 11 ms
Options	Custom trigger thresholds, additional relays, sensor output connector, external battery pack



DSD-060 EARTHQUAKE SHUTDOWN UNIT

DESCRIPTION

DATAKOM DSD-060 is a high-tech unit which detects seismic acceleration. On the occurrence of an earthquake it closes relay contacts to shutdown any critical devices such as generators, elevators, valves and industrial equipment. Thus it is possible to minimize the probable damage that occurs after an earthquake.

DSD-060 is a very cost effective device for shutdown applications. The device is based on highly reliable dual axis silicon micromachined acceleration sensors. It is lightweight, small, maintenance free and capable of performing self-test.

The unit has two independent relay outputs. The seismic properties of the standard output are conformal to ANSI Z.21-70(1981) and ASCE 25-97 standards. The auxiliary relay output which is more sensitive is intended for warning purposes.

The unit has a user adjustable sensitivity potentiometer. The adjustment range is between low and high limits allowed by the standards.

FEATURES

Conformal to ANSI Z.21-70 (1981)
Conformal to ASCE 25-97
Microprocessor controlled
Semiconductor acceleration sensors
Dual axis
Non-seismic accelerations filtered
Separate outputs for standard and high sensitivity
Maintenance free
Capable of performing self-test
Operates on 10 to 30 volts DC
Direct interface to gensets, elevators and alarm systems
Overload protected relay outputs
Resin molded design



TECHNICAL SPECIFICATIONS

Sensor: Dual axis micro-machined polysilicon accelerometers
Acceleration Threshold: User adjustable from 0.1g to 0.25g. The high sensitive secondary output is adjustable from 0.03g to 0.1g
Detection Delay: 0.5sec maximum
Supply Voltage: 10 to 30V-DC
Power Consumption: 30mA. Additional 40mA for each energized relay
Frequency response: 0.5 Hz to 10 Hz. Non-Earthquake signals are filtered
Short circuit current: Maximum 0.5A
Switching: 2 low power relays for high and low sensitive applications
Diagnostics: Self-diagnostics at power-on and reset
Operating temperature range:
-20 to 70 °C (-4 to +158°F)
Weight: 500 grams (approx.)
Dimensions: 115x157x40 mm
Conformity: ANSI Z21.70(1981), ASCE 25-97

APPLICATIONS

Generators and industrial equipment

After a heavy earthquake, generally the AC power is cut in order to prevent short circuit and fire risk. However, if an automatic generator is available, it runs automatically and causes possible damage. The DSD-060 gives a shutdown signal to the generator control panel if the seismic motion exceeds the predefined level. Therefore DSD-060 may be used in all critical installations to be shutdown during an earthquake.

Elevators

If an earthquake happens in daytime, especially in work hours, too many people get stuck in the elevators. Additionally the displacement of counterweights from guides and wire ropes from pulleys can be hazardous and needs expensive repairs if the elevators are permitted to continue operation.

DSD-060 Earthquake Shutdown Device will issue a shutdown signal to the elevator control panel. The elevator should not be given in service unless an elevator mechanic has the opportunity to examine the mechanical system and make any necessary repairs.

According to the regulation in California State a seismic shutdown device must be provided in every building in which an elevator or moving walk is installed.

Natural Gas, LPG, LNG facilities

Natural Gas and LPG are often used in industrial facilities and in houses. The crack and the leakage occurred on the pipes and valves during a strong earthquake cause fire risk. The DSD-060 will help to minimize fire risk by closing automatically explosive gas and chemical material valves during an earthquake.

Audible Warning

The DSD-060 unit is capable to give audible warning through the high sensitive output. Therefore it is possible to warn the people in public areas such as schools, shopping malls, markets and offices. This device may also be used in houses to alert inhabitants if an earthquake happens while they are sleeping.

DISPLAYS

OPERATIONAL: It turns on continuously for 15 seconds after power-up or reset. It flashes while the unit is operational.

WEAK MOTION: It turns on when the unit detects a weak motion. It turns off when the motion is over.

STRONG MOTION: It turns on when the unit detects a strong motion. It turns off when the motion is over.

YELLOW ALARM: It turns on when the unit detects a weak motion. It turns off after manual reset. This indicator also shows the position of the auxiliary relay output.

RED ALARM: It turns on when the unit detects a strong motion. It turns off after manual reset. This indicator also shows the position of the standard relay output.

SENSITIVITY ADJUSTMENT: It defines the seismic detection sensitivity. The adjustment range is between 0.10g and 0.25g. It is advised to set this potentiometer to mid-course.

נספח מס' 3. רשימת המשתמשים במערכת ההתראה במקסיקו סיטי. ניתן לראות את מגוון המשתמשים ואת כמותם.

[Print](#) [Close](#)

No	USERS	TELEPHONES
	PUBLIC AND PRIVATE SCHOOLS AND UNIVERSITIES	
1	SEP. PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIA ESCOLAR	554-29-90; 659-1234
2	SEP "ESCUELA SAUL M. CARASSO"	689-09-75
3	SEP "ESCUELA CANADA"	674-5554
4	SEP "ESCUELA NIÑO DE JESÚS GUARNEROS"	795-4408
5	SEP "ESCUELA QUETZALCÓATL"	740-6096; 740-6479
6	SEP "ESCUELA ANACLETO BARCENAS ROJAS"	555-02-74
7	SEP "ESCUELA ARTEMIO DEL VALLE ARIZPE"	552-0971
8	SEP "ESCUELA PROFESOR CLAUDIO CORTÉS CASTRO"	558-4596
9	SEP "ESCUELA ESTADO DE ISRAEL"	571-0965
10	SEP "ESCUELA SECUNDARIA #18 SOLEDAD A. SOLORZANO"	514-4098 ; 511-6391
11	SEP "ESCUELA SECUNDARIA #3 HÉROES DE CHAPULTEPEC"	511-5977
12	SEP "ESCUELA SECUNDARIA #1 CESAR A. RUÍZ"	522-60-96; 522-7147
13	SEP "ESCUELA MAESTRO JOSÉ VASCONCELOS"	556-5957
14	SEP "ESCUELA PROFESOR MANUEL AGUILAR SAENZ"	691-50-72
15	SEP "ESCUELA TELESECUNDARIA #71"	319-42-27 8 a 13 hrs.
16	SEP "ESCUELA FRANCISCO GABILONDO SOLER"	557-5647; 557-8457
17	SEP "ESCUELA LIC. ANTONIO MARTÍNEZ CASTRO"	610-11-05
18	SEP "ESCUELA PLAN DE 11 AÑOS"	633-1791
19	SEP "ESCUELA PROFESOR ANTONIO S. LÓPEZ"	602-10-06; 602-20-13
20	SEP "ESCUELA GASPAR MELCHOR DE JOVELLANOS"	616-22-66
21	SEP "ESCUELA PIPILA"	515-6392; 273-15-67
22	SEP "ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA # 14 CINCO DE MAYO"	559-66-80
23	SEP "ESCUELA SECUNDARIA #106 ANTONIO BALLESTEROS USANO"	597-4975
24	SEP "ESCUELA IGNACIO MANUEL ALTAMIRANO"	521-5592
25	SEP "ESCUELA VASCO DE QUIROGA"	570-0331; Fax: 259-31-35
26	SEP "ESCUELA JORGE CASAHONDA CASTILLO"	616-10-29
27	SEP "ESCUELA VALENTÍN GÓMEZ FARIAS"	754-8768
28	ITESEM PLANTEL EDO. DE MÉX.	326-5692; 326-5693
29	COLEGIO MADRID	673-1826; 673-2347
30	CENTRO DE INTEGRACIÓN EDUCATIVA SUR	Fax 573-7381; 513-1573
31	UNAM FACULTAD DE INGENIERÍA	616-28-27

32	INSTITUTO PEDAGÓGICO "HORACIO ZÚÑIGA", S.C.	Fax: 797-70-94; 792-27-89
33	COLEGIO VASCONCELOS	735-38-56 Fax: 735-39-97
34	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA	744-17-01; 745-7871
35	UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA	292-33-83,
36	COLEGIO DE LA PAZ VIZCAINAS	512-42-67; 512-50-55
37	INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO (ITAM)	628-40-00 ext. 4130 a 1701
38	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLINANA (UAM)	724-4698; 612-4665
39	UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS	209-9869
40	ESCUELA MODERNA AMERICANA, S.C.	658-25-48; 658-25-87
41	CENTRO ESCOLAR DEL TEPEYAC	5373-4224; 5377-4612
42	UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR	5202-0635
43	COLEGIO ALEMÁN SECUNDARIA PREPARATORIA LOMAS VERDES	5344-4587
44	COLEGIO ALEMÁN KINDER PRIMARIA LOMAS VERDES	5344-4588
45	COLEGIO ALEMÁN SECUNDARIA PREPARATORIA XOCHIMILCO	5344-4589
46	COLEGIO ALEMÁN KINDER PRIMARIA XOCHIMILCO	5344-4590
47	COLEGIO ALEMÁN KINDER GARDEN PONIENTE	5344-4591
48	UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL	5630-9760
49	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO CAMPUS LOMAS VERDES	5238-7300 EXT. 10641
50	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO CAMPUS SAN RAFAEL	5628-6367, 5628-6354
51	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA IZTAPALAPA BIBLIOTECA	5724-4698, 5724-4805
52	SOCIEDAD EDUCATIVA Y CULTURAL S. C.	5726-4580
53	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO TLALPAN EDIF. A Y B	5638-5300 ext. 04641
54	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO TLALPAN EDIF. G Y F	5638-5300 ext. 04641
55	COLEGIO CRISTOBAL COLÓN	5343-2705; 5344-3322
56	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA CAMPO 1	5623-0518; 5623-0517
57	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLINANA (UAM) UNIDAD XOCHIMILCO	5483-7385
58	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLINANA RECTORÍA	5563-6300
59	COLEGIO ALEMÁN PLANTEL CUAJIMALPA	5813-2485
60	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLINANA (UAM) UNIDAD AZCAPOTZALCO	5318-9545
61	ESCUELA ANA MARÍA BERLANGA	5547-3318
62	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO SAN ANGEL	5481-0300
63	INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO (ITAM) CAMPUS SANTA TERESA	5628-4109
64	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO CHAPULTEPEC	5278-9911
65	COLEGIO AMERICANO	5227-4965
66	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE MÉXICO CAMPUS 2 SAN RAFAEL	5628-6367, 5628-6354
	EMERGENCY AND CIVIL PROTECTION INSTITUTIONS	

67	CRUZ ROJA MEXICANA	3955892; fax 580-66-82
68	PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO DE MÉXICO BASE NAUCALLI	358-1378 ; 358-1499
69	UNAM CENTRO DE ATENCIÓN DE EMERGENCIAS	616-0914; 622-2440
70	PROTECCIÓN CIVIL DEL (GDF) BASE SAN JERÓNIMO	56 83 28 38; Fax: 56 83-21-31
71	INSTITUTO DE PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO DE MÉXICO, TECAMAC	0172-14-2692
72	INSTITUTO DE PROTECCIÓN CIVIL DEL ESTADO DE MÉXICO, TOLUCA, CORSA	0172-14-2692
73	CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES (CENAPRED)	606-7956; 606-8837 ext. 240
74	PROTECCIÓN CIVIL DE TOLUCA BASE TOLOTZIN (EDO. DE MÉXICO)	Fax - 91(72)13-1748
75	PROTECCIÓN CIVIL TLALNEPANTLA EDO. DE MÉXICO	390-49-92; 05-87
76	COORDINACIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL DE SAN ANGEL	5128-0182
77	COORDINACIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN	5128-0182
	SUBWAY AND ELECTRIC TRANSPORTATION SYSTEM	
78	STC. METRO PCCII	227-0659
79	SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO	709-11-33 ext 2428; 627-24-24
80	SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO FÉRREO LÍNEA "A"	227-0613; 227-0614
81	SISTEMA DE TRANSPORTES ELÉCTRICOS	5539-6162
	GOVERNMENT DEPENDENCES	
82	SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS DEL D.F.	542-8338; 521-8575 ext 1538
83	REPRESENTACIÓN DEL GOBIERNO DEL EDO. DE MÉXICO EN EL D.F.	202-75-75 Fax : 520-14-07
84	CÁMARA DE DIPUTADOS DEL EDO. DE MEX. (TOLUCA)	(91-72) 14-52-80; 14-34-24
85	DIR. GENERAL DE SEGURIDAD POLICÍA Y TRÁNSITO DEL EDO. DE MÉXICO	91(72)1781-47; 17-87-81
86	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	0172-14-2690
87	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	0172-14-2691
88	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	172-14-2692
89	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	0172-14-2692
90	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	0172-14-2692
91	EDO. MEX. (EQUIPO EN BODEGA)	0172-14-2692
92	CASA DE GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO	01(72)19-75-00
93	PRIMERA BRIGADA BLINDADA (EDO. DE MEX.)	01595-61-608; 60457; 61593
94	PALACIO DE GOBIERNO EN TOLUCA	(91-72)14-40-66
95	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, UNIDAD TAXQUEÑA	617-49-40 ext. 410
96	CORETT	Tel. 55 25 75 80
97	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD OKLAHOMA	229-4400 ext. 9702; 687-81-0
98	SECRETARÍA DE MARINA	684-81-88, Ext. 6239
99	COMISIÓN NACIONAL DE LIBROS DE TEXTO GRATUITOS (CONALITEX)	448-6414 ext. 6221
100	DGCOH	654-22-58; 654-12-92

101	GERENCIA DE INFORMÁTICA Y TELECOMUNICACIONES CFE.	52 29 44 00; ext. 8187
102	PRESIDENCIA, TLALNEPANTLA, EDO. DE MÉXICO	565-51-86; 390-77-95
103	SECRETARÍA DE SEGURIDAD PÚBLICA DEL D.F.	208-2127; 242-53-30
104	SEC. DE LA DEFENSA NAC. COMPAÑÍA DE TRANSMISIONES DEL EDO. MAYOR	557-45-00 ext. 3581
105	CÁMARA DE DIPUTADOS DEL D. F.	628-13-00 ext. 2108
106	REGISTRO AGRARIO NACIONAL	722-5800
107	DELEGACIÓN IZTACALCO	649-56-91; 654-3786
108	SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO (SEDECO)	682-20-96, Ext. 134
109	EMBAJADA DE ISRAEL	5520-1582; 5540-5210
110	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO CALZADA DE LA VIRGEN	5228-5304, 5228-5315
111	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO INSURGENTES SUR No. 795	5228-1097; 5228-1043
112	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO INSURGENTES SUR No. 826 TORRE HEMICOR	5228-2010; 5228-1748
113	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO BARRANCA DEL MUERTO	5228-595
114	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO CONSTITUYENTES	...
115	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO PALACIO NACIONAL	5228-1378; 5228-1556
116	COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA	5650-2088; 5650-4666
117	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO ESCUELA PESTALOZZI No. 37	5228-5304
118	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO ESCUELA RAMON PRIDA No. 41	5228-5304
119	INSTITUTO NACIONAL DE PSQUIATRÍA "RAMON DE LA FUENTE MUNÍZ"	5573-1200
120	CAPFCE	5480-4700
121	INSTITUTO FEDERAL ELECTORAL	5723-4298
122	CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL. EDIFICIO SEDE	5133-8805
123	CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL. EDIFICIO PRISMA	5133-8806
124	CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL. EDIFICIO PALACIO DE JUSTICIA FEDERAL DE SAN LAZARO	5133-8807
125	CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL. EDIFICIO PERIFÉRICO SUR	5133-8808
126	TRIBUNAL FISCAL DE LA FEDERACIÓN. EDIFICIO SEVILLA	5525-9060
127	TRIBUNAL FISCAL DE LA FEDERACIÓN. EDIFICIO MISSISSIPPI	5525-9061
128	TRIBUNAL FISCAL DE LA FEDERACIÓN. EDIFICIO VARSOVIA	5525-9062
129	TRIBUNAL ELECTORAL DEL DISTRITO FEDERAL. EDIFICIO CUAUHTÉMOC	5601-0130 ext. 1108
130	CONSEJO DE LA JUDICATURA FEDERAL. EDIFICIO REVOLUCIÓN	5133-8805
131	SUPREMA CORTE DE JUSTICIA. EDIFICIO PINO SUÁREZ NO. 2	5130-1148
132	FONDO DE LA VIVIENDA ISSSTE	5322-3142
133	JUNTA FEDERAL DE CONCILIACIÓN Y ARBITRAJE	5722-8700 ext. 1402
134	INSTITUTO NACIONAL DE NUTRICIÓN "SALVADOR SUBIRAN"	5573-1200
135	INSTITUTO DE SEGURIDAD Y SERVICIOS SOCIALES DE LOS TRABAJADORES ISSSTE	5141-5390
136	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO REPÚBLICA DEL SALVADOR	9185-5307

137	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO EDIFICIO REPÚBLICA DE GUATEMALA	9185-5308
138	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO EDIFICIO EULALIA GÚZMAN	9185-5309
139	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO EDIFICIO LEGARIA	9185-5310
140	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO EDIFICIO UNIVERSIDAD	9185-5311
141	SECRETARÍA DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO EDIFICIO VALENTIN GÓMEZ FARÍAS	9185-5311
142	COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CENACE)	5595-4400 ext. 5653
	TV AND RADIO	
143	GRUPO RADIO CENTRO	728-48-26 ; 728-48-26
144	INFORED	329-1180 ; 329-1224
145	INSTITUTO MEXICANO DE LA RADIO (IMER)	604-87-16; 604-89-11
146	NÚCLEO RADIO MIL	662-6060; 663-1832 ext 231
147	RADIORAMA	546-22-78; 576-04-71
148	GRUPO 7	682-43-70; 682-84-18
149	IMAGEN, COMUNICACIÓN EN RADIO	722-09-29 ext. 0929
150	GRUPO ACIR	259-1806 ; 259-0001
151	MVS RADIO	...
152	RADIO FÓRMULA 10	281-4001; 282-1016 ext. 152
153	RADIO EDUCACIÓN	559-46-81; ext. 231
154	MÉXICO RADIO S.A. (ABC RADIO)	705-00-57; 7-05-22-75
155	STEREO 100	545-7736; 545-47-42
156	RADIO UNAM	523-4640
157	RADIO FÓRMULA PLANTA DE TRANSMISIONES CHURUBUSCO	5654-4404
158	CANAL 11 XEIPN	396-81-77 729-63-00
159	RADIO CAPITAL	...
160	TV METROPOLITANA (CANAL 22)	544-60-80; 544-1630
161	SONIDO ULTRA	91(72)1466-82; 13-3377
162	SISTEMA DE RADIO MEXIQUENSE (EDO. DE MÉXICO)	01(72) 710571, ext. 151 y 151
163	SISTEMA DE TELEVISIÓN MEXIQUENSE (EDO. DE MÉXICO)	01(72) 710571, ext. 151 y 152
164	RADIO 6.20	286-12-22; 286-27-20
165	RADIO , S. A.	531-1300; 203-65-08
166	RADIO FÓRMULA PLANTA DE TRANSMISIONES TRIGO	5681-2974
167	RADIO FÓRMULA UNIVERSIDAD	5681-2975
	PRIVATE INSTITUTIONS	
168	PLAZA INN	687-4542
169	FUNDACIÓN JAVIER BARROS SIERRA	645-4959; 645-4834
170	FRABEL S. A. de C. V. NAVE 2	Tel. 58 04 11 12

171	EQUIPO MONITOR CIRES	687-4542 ; 687-4581
172	EQUIPO MONITOR CIRES	687-4542 ; 687-4582
173	PRONÓSTICOS PARA LA ASISTENCIA PÚBLICA	5-98-55-11 ; Fax 598-8184
174	LOREAL, S.A. DE C.V.	420-51-00
175	NESTLE	250-99-44
176	GRUPO INBURSA, S.A.	325-05-05
177	SODEXHO PRESTACIONES MEXICANAS, S.A. DE C.V.	255-0343; 254-66-24
178	COMPAÑÍAS UNIDAS DE GAS (CUGAS)	382-30-11
179	FRABEL, S.A. DE C.V. NAVE 6 y 7	420-3333; fax: 726-6103
180	CILAG DE MÉXICO, S.A. DE C.V.	5659-5119
181	EMBAJADA DE ISRAEL	5520-1582; 5540-5210
182	CONDOMINIO CORDOBA 42	5207-1404
183	DR. OSCAR GONZALEZ CUEVAS	55 64 49 15
184	CIBA ESPECIALIDADES QUIMICAS, MÉXICO, S.A. DE C.V.	5422-6149
185	SALA DEL SAS	...
186	SALA DE JUNTAS	...
187	METROGAS	...
188	INSTITUTO NACIONAL DE PSQUIATRÍA "RAMON DE LA FUENTE MUNÍZ"	5573-1200
189	COORPORATIVO CADIZ	5524-4960
190	SERVICIOS A CONDOMINIOS, S.A. DE C.V.	5257-2083
191	ASOCIACIÓN MEXICANA DE HIGIENE Y SEGURIDAD, A.C.	5547-8782
192	BANCO NACIONAL DE MÉXICO, S.A.	5720-1421
193	TELEVISA CHAPULTEPEC. OFICINAS	5224-5000
194	INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS MEDICAS Y NUTRICIÓN "SALVADOR ZUBIRAN"	5573-1200
195	SYNGENTA	9183-9186
196	PEDRO DOMEQ ALLIED	5326-3440
	HABITATIONAL UNITS	
197	UNIDAD HABITACIONAL EL ROSARIO	390-49-92; 05-87