

השפעת רעידות האדמה על התפתחות התקינה בתחום התשתיות בעולם

רעידות אדמה הן אסונות טבע גדולים שהאנושות טרם השכילה להתמודד עם מגוון תוצאותיהם הקטלניות. תוצאות הנזקים שהן מסבות כוללות רעידות המשך (שחרור לחצים, aftershocks), התנזלות הקרקע, מפולות וגלישת אדמה, התלקחויות וצונאמי. רעידות אדמה חזקות גורמות להרג ולהרס, כתוצאה מקריסת בניינים, מבנים ותשתיות. מניעת אסונות והמשך החיים התקינים מחייבים תכנון מניעתי, בשילוב חוקים, תקנים והנחיות

מאת ד"ר דוד זיו

סגן מנהל מרכז מידע, המוסד לבטיחות ולגיהות

רשימת 20 רעידות האדמה החזקות (מן העולם) החל משנת 1900		
תאריך	מיקום	דרגה
22.5.1960	צ'ילה	9.5
28.3.1964	דרום אלסקה	9.2
26.12.2004	סומטרה	9.1
13.3.2011	אונשה יפן	9.1
4.11.1952	קמצ'טקה רוסיה	9.0
27.2.2010	ביו-ביו צילה	8.8
31.1.1906	אקוודור	8.8
4.2.1965	איסלנד	8.7
15.8.1950	טיבט	8.6
11.4.2012	סומטרה	8.6
23.3.2005	אינדונזיה	8.6
9.3.1957	איסלנד	8.6
1.4.1946	אלסקה	8.6
1.2.1938	ים בנדה אינדונזיה	8.5
11.11.1922	גבול צ'ילה-ארגנטינה	8.5
13.10.1963	איסלנד	8.5
3.2.1923	קמצ'טקה רוסיה	8.4
12.9.2007	אינדונזיה	8.4
23.6.2001	פרו	8.4
2.3.1933	אונשה יפן	8.4

מקור: USGS Earthquake

נתונים סטטיסטיים של (National Earthquake Information Center) NEIC, המובאים באתר US Geological Survey (USGS), מראים כי במאה העשרים התרחשו עשרות רעידות אדמה גדולות בעוצמה של 7.0 בסולם ריכטר או יותר, שגרמו להרוגים רבים. אינספור נכסים אבדו, כולל תשתיות חיוניות, כגון מתקני כוח חשמלי, מתקני זיקוק נפט, תשתיות גז, מערכות אספקת מים, גשרים ומבנים, וגרמו לנסיגה בצמיחת המשק.

כללי

הארצות השוכנות באזורים הסובלים מרעידות אדמה תכופות נפגעו קשה מבחינה כלכלית. בעשורים האחרונים חוו כמה מדינות בעלות כלכלות מפותחות, כמו סין, יפן, מקסיקו, טייוואן, הפיליפינים, אינדונזיה, ארצות הברית ועוד, שורה של רעידות אדמה קשות שהביאו לפגיעה קשה בכלכלה, בתשתיות לסוגיהן, להאטה בפיתוח הכלכלי ולאובדן חיים ונכסים.

שיבושים בתשתיות עלולים להגביר את ממדי האסון, עקב הקושי בהגשת עזרה וסיוע לנפגעים, ולגרום להפסדים כלכליים נרחבים, עקב הפגיעה במערכות אספקת האנרגיה (חשמל, גז), מים, תקשורת, תחבורה וכד'.

כיוון שכך, נדרש תכנון מניעתי שיאפשר את המשך החיים התקינים בעת רעידות האדמה הגדולות ולאחריהן.

כדי לאתר דרכים ושיטות להתמודדות עם רעידות האדמה ותוצאותיהן הוקמו צוותי עבודה משותפים לכמה ארצות.

באחד מצוותי העבודה שהוקמו במדינות השוכנות לחופו של האוקיינוס השקט (Asia-Pacific Economic Cooperation – APEC) הוגדרו ארבעה סיכונים ("4R" – risk management), אשר משמשים

כהכוונה:

הפחתה - reduction

מוכנות - readiness

תגובה - response

התאוששות - recovery

תוצאות עבודתם של צוותי העבודה הוכיחו כי שילוב של חוקים, תקנים והנחיות הוא המסגרת העקרונית הבסיסית היעילה ביותר לבטיחותם של מבנים ומערכות תשתית בהתמודדותם עם גורמי



ימית פנים-ארצית), הן חלק חשוב במרקם החיים העירוני המודרני. אובדן תפקודן בעת אסון כרעידת אדמה גורם לשיבושים משמעותיים, נוסף על היותן מקור בפני עצמו לאסונות, כגון דליפת גז.

פיתוח כלכלי-אורבני, לעומת זאת, כולל הפרברים, מחייב השקעה במערכות תשתית חיוניות. הרס תשתיות אלה באסון טבע כרעידת אדמה יחזיר את האנושות עשרות שנים לאחור מבחינת רמת חיים. אסונות שקרו כתוצאות מרעידות אדמה חזקות בעבר הלא רחוק, ב-Northridge קליפורניה, ב-Kobe יפן וב-Chi-Chi צ'ילה, הדגישו את הצורך בהערכת הפגיעות במערכות תשתית והצלה כתוצאה מהתרחשות אירועי טבע מסוכנים.

כדי להדגיש את הסיכונים שברעידות אדמה לתשתיות חיוניות, נבחן את היסטוריית הפיתוח ההנדסי של מערכות אלו.

נעשה זאת בעזרת המודל האמריקאי (ALA) American Lifelines Alliance.

המודל האמריקאי הוא שיתוף פעולה בין הסוכנות הפדרלית לניהול מצבי חירום (FEMA) והמכון הלאומי לתקנים וטכנולוגיה (NIST) לפיתוח תקנים לאומיים לעמידות של מערכות תשתית חיוניות ברעידות אדמה.

בשנת 1998, FEMA, בשותפות עם האגודה המהנדסים האזרחיים האמריקאית (ASCE), הקימה את ALA. מטרתה של ALA היא ליצור מתודולוגיות להערכת ביצועי תוחלת העמידות של מערכות התשתית, זיהוי נקודות חולשה והמלצה על פעולות נדרשות להפחתת כשלים בעת רעידות אדמה.

שיתוף פעולה זה הניב סדרת פרסומי הנחיות, כגון:

Guidelines for Utility Performance Assessment

- Electric Power Systems
- Oil and Natural Gas Pipeline Systems
- Wastewater Systems

Guide for Seismic Evaluation of Active Mechanical Equipment Design Guideline for Seismic Resistant Water Pipeline Installations

U.S. Geological Survey's ShakeMap and ShakeCast: Improving Utilization within the American Lifelines Alliance (ALA) Community

Seismic Design Standards for Aboveground Steel Storage Tanks Seismic Design and Retrofit of Piping Systems

- Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe**
- Seismic Fragility Formulations for Water Systems**

הסיכון, כפי שהוגדרו לעיל. פיתוח תקנים למבנים מצריך ידע מתקדם במדע ובהנדסה.

רוב התקנים שאומצו כיום פותחו על ידי ארצות הברית, ובחלקם על ידי יפן, בשל היותה חשופה תדיר לרעידות אדמה. לכן, פעילותן של שתי מדינות אלו בתחומי התקינה רבה, ויש בהן הקצאת משאבים נרחבת לאקדמיה ולארגונים הנדסיים (כגון אגודת המהנדסים האזרחיים בארה"ב; מכון הנפט האמריקאי). כמו כן, עוסקים בתקינה ארגונים בין-לאומיים כ-ISO, ואירופיים - EN.

דרכי ההתמודדות

מבנים

במשך זמן רב נחשבו סיכוני רעידות אדמה כבלתי נמנעים. היה מקובל שמבנים ייפגעו כתוצאה מרעידות אדמה. אמצעי מנע לנזקים שהסבו רעידות אדמה לא היו בנמצא, ועיקר המאמצים הופנה לניהול תוצאות האסון. צעדי מנע הקשורים בשיטות הבנייה הוצעו כבר בתחילת המאה ה-20. התחיקה המנחה המודרנית הראשונה פורסמה בשנת 1925 (לאחר רעידת האדמה בעוצמה של 6.2 בסן ברברה, קליפורניה). רק במהלך 20 השנים שלאחר מכן הראו תוצאות מחקרים כיצד להפחית בעילות את הפגיעות במבנים.

ארצות הברית

בשנת 1958 פורסם החוק האחיד למבנים (Uniform Building Code). נקודת מפנה נוספת בחקיקה נרשמה לאחר רעידת האדמה בסן פרננדו, בשנת 1977, בגלל הפגיעות בתשתיות העירוניות, זאת, נוסף על הפגיעה בתשתיות ברעידת האדמה, שהתחוללה בסן פרנסיסקו בשנת 1906.

בשנת 1977 יסד הקונגרס בתחיקה (Public Law 95-124) תוכנית להקטנת הסיכונים מרעידות אדמה -

(National Earthquake Hazards Reduction Program) NEHRP, שבה נאמר, בין השאר: "להקטין את הסיכונים לחיים ולרכוש מרעידות אדמה עתידיות בארצות הברית, באמצעות הקמה ותחזוקה של תוכנית יעילה להפחתת סיכונים מרעידת אדמה". כמו כן, קיים תקן האגודה האמריקנית של המהנדסים האזרחיים (ASCE), אשר מתעדכן מעת לעת:

ASCE 7, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

יפן

חוק הבנייה ביפן נחקק בשנת 1950 כדי לשמור על חייהם, בריאותם ורכושם של האזרחים, על ידי קביעת סטנדרטים מינימליים בנוגע לאתר, למבנה, לציוד ולשימוש בבניינים, וכדי לתרום לקידום רווחת הציבור. החוק אמור להבטיח את בטיחותם של מבנים מאסונות כגון רעידות אדמה.

מאז חקיקתו, תוקן החוק ללא הרף, כך שיוכל לשקף התפתחויות טכנולוגיות.

ניו זילנד

קוד הבנייה הלאומי בניו זילנד, המבוסס על חוקי הבנייה, נכנס לתוקפו בשנת 1993 והוא חלק ממערכת חוקת בנייה חדשה משנת 1991, אשר עוברת עדכונים מעת לעת. הקוד כולל פרק על עמידות ברעידות אדמה.

תשתיות חיוניות

תשתיות חיוניות כגון מים, שפכים, חשמל, גז, דלק ותקשורת, תחבורה (כבישים מהירים, מסילות ברזל, נמלי אוויר וים, תעבורה

למכלי פלדה מרותכים במהדורה של שנת 2005 החמיר את הדרישה לעמידות ברעידות אדמה מעוצמה העשויה להתרחש בתדירות של פעם ב-500 שנה, לעוצמה העשויה להתרחש בתדירות של פעם ב-2,500 שנה (שהיא חזקה יותר).

צנרת

צנרת תת-קרקעית מתוכננת, בדרך כלל, להשפעות של דפורמציה קרקעית קבועה (PGD), הנגרמת על ידי רעידות אדמה גדולות, יותר מאשר השפעה של תנודות הקרקע. תופעות ה-PGD כוללות התנזלות הקרקע, התפשטות וכד'.

צנרת על-קרקעית

אגודת המהנדסים האזרחיים האמריקאית ASCE, בשיתוף הסוכנות הפדרלית FEMA, הוציאה הנחיות תכנון לצנרת (בחלקן הוזכרו לעיל).

נוסף על הדוגמה הזו, קיים התקן האמריקאי לגז טבעי מנוזל, אשר במהדורת 2016 נכללו בו דרישות נוספות לעמידות ברעידות אדמה, כדי להבטיח את בטיחותם ואמינותם של המערכות והמתקנים.

NFPA 59A

Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)

בשנת 1998 הקימה הסוכנות הפדרלית לניהול מצבי חירום FEMA בשותפות עם אגודת המהנדסים האזרחיים האמריקאית ASCE, את ALA. מטרתה של ALA היא ליצור מתודולוגיות להערכת העמידות של מערכות התשתית, זיהוי נקודות חולשה והמלצה על פעולות נדרשות להפחתת כשלים בעת רעידות אדמה

סיכום

כדי למנוע פגיעות מרעידות אדמה באוכלוסייה התלויה במבנים ובתשתיות חיוניות, נחוץ פיתוח ועדכון מתמיד של התקינה הרלבנטית לעמידות הסיסמית של מבנים ותשתיות, זאת, לאור ההתפתחויות הטכנולוגיות.

רעידות אדמה הן בלתי נמנעות. צמצום הסיכונים צריך להיות בראש סדר העדיפויות, לא רק עבור מהנדסי בטיחות וארגוני הצלה, אלא גם עבור מתכנני הפיתוח ומקבלי החלטות ברחבי העולם.

מקורות

1. **The American Lifelines Alliance (ALA)**
<http://www.americanlifelinesalliance.org/>
2. **U.S. Geological Survey (USGS)**
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/largest-world.php> <https://earthquake.usgs.gov/>
3. **Seismic Codes and Standards of Energy Supply System**
Earthquake Response Cooperation Program for Energy Supply Systems Report for Asia-Pacific Economic Cooperation Energy Working Group
4. **Federal Emergency Management Agency (FEMA)**
<https://www.fema.gov/> ■

עד לפני כמה עשורים סיכוני רעידות אדמה נחשבו כבלתי נמנעים. היה מקובל שמבנים יפגעו כתוצאה מרעידות אדמה. אמצעי מניע לנזקים שהסבו רעידות אדמה לא היו בנמצא, ועיקר המאמצים הופנה לניהול תוצאות האסון

אחד מהגורמים שזירזו את בחינת תהליכי התכנון הסיסמי של מתקני התשתית החיוניים היה רעידת האדמה בסן פרננדו, בשנת 1971. אף על פי שרעידות אדמה קודמות בארצות הברית הדגישו את חשיבותן של מערכות תשתית לאחר אסונות גדולים (למשל, רעידת האדמה בסן פרנסיסקו בשנת 1906), הביא אירוע סן פרננדו בשנת 1971 להכרה בחשיבותו של הסיכון הסיסמי של מערכות התשתית, והוביל לשינויים חשובים בתכנון ובבנייה.

דוגמאות לשלבי התפתחות של תקנים במתקני תשתית בארצות הברית

מתקני חשמל

לפני שנת 1970, היו דרישות העמידות ברעידות אדמה עבור תחנות משנה/טרנספורמציה של מערכת החשמל בארצות הברית מינימליות. נקודות המפנה התחוללו בשנות השבעים והשמונים, לאחר שכמה רעידות אדמה בקנה מידה גדול פגעו בקליפורניה וגרמו לנזקים כבדים, בעיקר לתחנות המשנה. כתוצאה מכך, הוחמרו הדרישות הקיימות לעמידות ברעידות אדמה. בשנת 1997 הוצאה גרסה מחמירה של תקן 693 - תכנון סיסמי של תחנות משנה על ידי מכון מהנדסי החשמל האלקטרוניקה (IEEE), ובהמשך, המסמך שימש גם את אגודת המהנדסים האזרחיים האמריקאית (ASCE).

מתקני אחסנת נוזלים

לעתים, אין דרישה בחוקי הבנייה המקומיים לעמידות סיסמית של מתקנים, אולם הם נדרשים להתאים את התכנון לתקנים של עמידות סיסמית בהתאם לדרישות הרשויות. לדוגמה, תכנון מכלי אחסון הנוזלים נשלט על ידי האגודה האמריקאית למפעלי מים, בתקן AWWA D100, או מכון הנפט האמריקאי, בתקן API 650 עבור מכלים על-קרקעיים לנוזלים מסוכנים, כגון דלקים.

תשתיות דלק

רוב הציוד ומערכות התשתית של מתקנים פטרוכימיים נבנה בהתאם לסטנדרטים המינימליים לעמידות סיסמית. קיימים סטנדרטים ספציפיים לתעשייה, כגון מכון הנפט האמריקאי (API), אשר מעדכן מדי פעם את דרישות העמידות. לדוגמה: תקן API 650

