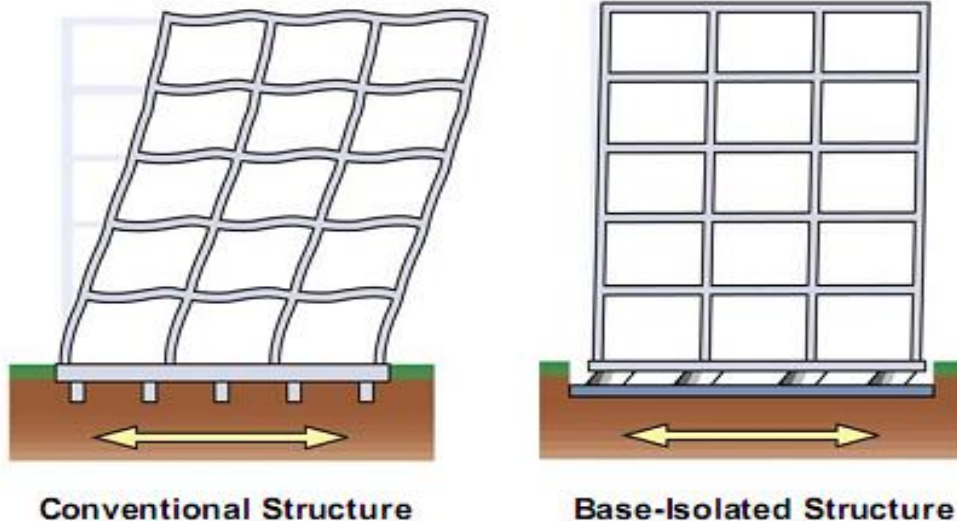


מחקר

בנושא: היבטים קונסטרוקטיביים, סטטיים, דינאמיים וכלכליים של שימוש במערכות בידוד סיסמי עבור מבנים מסוגים שונים באזורים סיסמיים שונים במדינת ישראל



הוכן עבור: משרד התשתיות הלאומיות. ועדת ההיגוי להיערכות לרעידות אדמה

הוכן ע"י: ד"ר מיכאל מוגילבסקי

ד"ר מיכאל רבינוביץ

מר מיכאל סיליץ

מאי 2013

תקציר

דו"ח זה מסכם תוצאות המחקר של פוטנציאל שימוש בולמי זעזועים סיסמיים לבידוד מבנים מסוגים שונים מפני רעידות אדמה במדינת ישראל.

הדוח כולל עשר פרקים הבאים:

בפרק הראשון מוגש מידע כללי בסיסי לגבי:

* תחום שימוש בבידוד רעידות סיסמי.

* סוגים ומאפיינים בסיסיים של בולמי זעזועים לבידוד מבנים מפני רעידות אדמה.

* תיאור בולמי זעזועים בהם נעשה שימוש במדינות מתקדמות.

* מאפיינים מכאניים של בולמי זעזועים סיסמיים.

* סכמות של התקנת בולמי זעזועים סיסמיים.

בפרק השני מתוארים:

* שיטות לחישוב סיסמי של מבנים ובחירת שיטה בה נעשה שימוש במחקר זה.

* מאפיינים של רעידות אדמה לאזורים שונים במדינת ישראל עבורם נעשה ניתוח השוואתי של מבנים ללא ועם בולמי זעזועים.

* אוסף מייצג של אקסלרוגרמות רעידות אדמה לאזורים שונים במדינת ישראל בהתאם לתנאים גיאולוגיים (גיאופיסיים) טיפוסיים באמצעות אופטימיזציה ובהתבסס על תגובה ספקטרית של מבנים הנקבעת לפי ת"י 413.

בפרק השלישי נקבעו סכמות קונסטרוקטיביות של מבנים טיפוסיים לבדיקה השוואתית של תגובת המבנים לרעידות אדמה ללא ועם בולמי זעזועים.

פרק רביעי כולל תיאור של תכנה/מודל בה נעשה שימוש לחישוב סיסמי של מבנים קונבנציונליים ומבודדים ותוארו תוצאות החישוב.

בפרקים 5-8 מוצגות תוצאות החישובים.

פרק התשיעי כולל ניתוח תוצאות החישוב והמסקנות.

בפרק העשירי מוצג מידע על היבטים כלכליים של בידוד רעידות סיסמי.

תוכן עניינים

תקציר

פרק 1 תחום שימוש בבידוד רעידות סיסמי. סוגים ומאפיינים בסיסיים של בולמי זעזועים לבידוד מבנים

- 1.1 מבוא
- 1.2 עקרונות של בידוד סיסמי
- 1.3 תחום שימוש בבידוד סיסמי
- 1.4 תכנון מבנים מבודדים
- 1.5 מאפיינים של בולמי זעזועים לבידוד סיסמי
- 1.6 סכמות קונסטרוקטיביות של בידוד סיסמי

פרק 2 שיטות חישוב מבנים לרעידות אדמה. מאפייני רעידות אדמה לאזורים שונים במדינת ישראל

- 2.1 בחירת שיטה לחישוב סיסמי של מבנים
- 2.2 שיטת סינתזה לרעידות אדמה
- 2.3 סינתזת אקסלרוגרמות

פרק 3 מבנים טיפוסיים לבדיקה

- 3.1 סכמות מבנים טיפוסיים לבדיקה

פרק 4 תיאור חישובים סיסמיים

- 4.1 תיאור כללי של מודל Stera 3D
- 4.2 מאפייני בולמי זעזועים
- 4.3 תיאור החישובים
- 4.4 תוצאות החישובים

פרק 5 תוצאות החישוב. מבנה מגורים 4F

- 5.1 סכימת המבנה
- 5.2 תקופות וצורות תנודות עצמיות
- 5.3 הפחתת כוח גזירה קומתית מרבית

פרק 6 תוצאות החישוב. מבנה מגורים 8F

6.1 סכימת המבנה

6.2 תקופות וצורות תנודות עצמיות

6.3 הפחתת כוח גזירה קומתית מרבית

פרק 7 תוצאות החישוב. מבנה בית חולים 7F

7.1 סכימת המבנה

7.2 תקופות וצורות תנודות עצמיות

7.3 הפחתת כוח גזירה קומתית מרבית

פרק 8 תוצאות החישוב. מבנה משרדים 12F

8.1 סכימת המבנה

8.2 תקופות וצורות תנודות עצמיות

8.3 הפחתת כוח גזירה קומתית מרבית

פרק 9 ניתוח תוצאות החישוב והמסקנות

פרק 10 היבטים כלכליים של בידוד סיסמי

ביבליוגרפיה

פרק 1

תחום שימוש בבידוד רעידות סיסמי

סוגים ומאפיינים בסיסיים של בולמי זעזועים לבידוד מבנים בפני רעידות אדמה

מאפיינים של בולמי זעזועים וסכמות של בידוד רעידות סיסמי

1.1 מבוא

1.1.1 תכנון סיסמי של מבנים קונבנציונאליים, בהם אין הפרדה (בידוד) מכאנית בין בסיס (החלק התחתון) של המבנה לבין חלקו העליון, מבוסס על עקרון הבא: בעת רעידות אדמה אנרגיה של הרעידות, תעבור למרכיבי שלד המבנה, אשר יעמדו בשילוב של כוחות סטטיים ודינאמיים הנוצרים בעת רעידות אדמה.

במקרים רבים כוחות דינאמיים, שנוצרים במבנים, הפועלים בתחום הליניארי, הינם גדולים מאוד, ומבחינה פרקטית לא ניתן לתכנן מבנים בעלי תסבולת מספקת, הנדרשת לצורך עמידה ברעידות אדמה כך שהרעידות אינן גורמות לדפורמציות פלסטיות. מסיבה זאת תקנים לאומיים, כולל ת"י 413, מאפשרים משיכות של אלמנטים קונסטרוקטיביים, כשמתפתחות דפורמציות פלסטיות (לא ליניאריות) ונוצרים מפרקים פלסטיים.

מפרקים פלסטיים משנים את התגובה הדינאמית ומרסנים אנרגיה של תנודות במבנה. במידה ומתכננים מבנה שיעבוד בתחום לא ליניארי לוקחים בחשבון מקדם הקטנה של כוחות סיסמיים, הפועלים על קומות המבנה, יש לתכנן את המבנים בהתחשב לדפורמציות פלסטיות.

1.1.2 למבנים שבהם לא ניתן לאפשר דפורמציות גדולות, כולל דפורמציות פלסטיות, וכאשר גם מתחשבים במקדם הקטנת הכוח, אך הכוחות ברכיבי מבנה עולים על תסבולת שלהם, נוקטים באמצעים קונסטרוקטיביים שונים, כגון:

א. "חיזוק" קונסטרוקציה

חיזוק נועד בעיקר להגדיל תסבולת אלמנטים של מבנה מפני כוחות דינאמיים הנוצרים בעת רעידות אדמה. לצורך זה מתכננים מסגרות מוקשחות, קירות הקשחה ועוד, אשר מספקים תסבולת הנדרשת לעמידה בכוחות דינאמיים בעת רעידות אדמה. יצוין כי אמצעי החיזוק ככלל אינם משפיעים בצורה משמעותית על כוחות דינאמיים הפועלים על המבנה אלא מגבירים את תסבולת המבנה.

ב. מרסני רעידות

בניגוד לאמצעי "חיזוק" מרסני הרעידות אינם משנים בצורה משמעותית את קשיחות המבנה ותקופה בסיסית של תנודות המבנה בכיוון האופקי ולא משפיעים על תסבולת המבנה. השימוש במרסני הרעידות מבוסס על עקרון הבא: גודל תנודות המבנה עקב רעידת אדמה קטן עם עליה במקדם ריסון אינטגרלי של המבנה ולכן קטנים גם כוחות דינאמיים ברכיביו. למשל לפי גיליון תיקון ת"י 3 413 (2009) הגדלה במקדם הריסון גורמת למקדם הפחתת כוחות דינמיים:

$$\eta = [10 / (5 + \zeta)]^{0.5}$$

כאשר ζ – מנת הריסון באחוזים בפועל (יותר מ-5%).

היום קיים מגוון של מרסני רעידות בעלי קונסטרוקציות שונות המאפשרים להגדיל בצורה משמעותית מקדם ריסון של מבנה עבור תנודות בכיוון אופקי בעת רעידות אדמה.

ג. שינויים קונסטרוקטיביים לצורך הגדלת התקופה הבסיסית

לפעמים ניתן באמצעות שינויים קונסטרוקטיביים לשנות את התקופה הבסיסית כדי להקטין עומסים סיסמיים נורמטיביים לפי עקומת תכן של תגובה ספקטרית. ככלל מדובר על הקטנת קשיחות המבנה. אמצעי זה בדרך כלל בעייתי עקב הגבלות קונסטרוקטיביות שונות ולכן השיטה אינה נפוצה. יצוין כי, באופן עקרוני אמצעי זה מבוסס על אותו בסיס פיזי כמו בידוד רעידות – הפחתת תדר עצמי של המבנה. יחד עם זאת קיים הבדל משמעותי בין אמצעים אלה כי מטרת בידוד הרעידות היא לבודד את המבנה מהקרקע הרועדת ולהפחית אמפליטודות תנודות המבנה ללא שינויים קונסטרוקטיביים משמעותיים.

ד. אמצעים המשלבים "חיזוק" וריסון הרעידות במבנה

שילוב אמצעים אלה נועד גם להגביל אמפליטודות של תנועת המבנה בעת רעידות אדמה וגם להגדיל "תסבולת המבנה" מפני רעידות אדמה.

לאמצעים לעיל יש חסרונות ידועים רבים:

- * ככלל אמצעים אלה הם מורכבים ויקרים ולא תמיד יש אפשרות טכנית להשתמש בהם.
- * ככלל לא ניתן למנוע נזקים קלים ולעתים גם נזקים כבדים במבנה.

ה. בידוד רעידות

הרעיון הוא לבודד מרכיבים קונסטרוקטיביים של מבנה באמצעות בולמי זעזועים. הרעיון זה, הוא רעיון ישן שמומש בהצלחה למיגון מבנים מפני רעידות מיקרו-סיסמיות, כמו, למשל, רעידות הנגרמות על ידי תחבורה כבדה. מערכות הבידוד בפועל "מקבלות על עצמן" תנועה ומפחיתות בצורה משמעותית תנועה של המבנה המבודד, הממוקם על בולמי זעזועים. על עקרון

זה מתבססת גם שיטה לבידוד מבנה מפני רעידות אדמה.

מבחינת רעידות אדמה שימוש בבולמי זעזועים מאפשר לשפר פרמטרים דינאמיים של מבנה :

- * להקטין תדר בסיסי (להגדיל תקופה בסיסית) של תנודות עצמיות של מבנה.
- * להגדיל מקדם ריסון אנרגיה במבנה.
- * להגדיל מסה משתתפת של מבנה ברעידות אדמה עבור צורת תנודה בסיסית.

הודות לשילוב של שלושת הגורמים האלה השימוש בבידוד מרעידות אדמה מאפשר להפחית בצורה משמעותית כוחות גזירה, הנוצרים ברכיבים קונסטרוקטיביים. הודות ליתרונות אלה ועקב סיבות כלכליות ובטיחותיות, מיגון מבנים מפני רעידות אדמה באמצעות בולמי זעזועים הפך כיום לשגרה במדינות רבות, פותחו שיטות לתכנון בולמי זעזועים ולתכנון מבנים מבודדים מפני רעידת אדמה. שיטות אלה מופיעים בספרות ידועה כגון: FEMA 274, ASCE 7-10, Eurocode 8-1. כמו כן, קיימות שיטות תכנון ומגוון בולמי זעזועים מסוגים שונים, המיוצרים על ידי חברות שונות ברחבי העולם.

בבידוד סיסמי משתמשים עבור :

* מבנים לשימור, בהם יכולת רכיבי השלד לשאת עומסים אופקיים מוטלת בספק ותיקונם או הוספת קונסטרוקציות נוספות בעיתית או בלתי אפשרית עקב לוגיסטיקה מורכבת, הוצאות שיקום גבוהות ודרישות שימור מחמירות. במבנים לשימור מסיבות קונסטרוקטיביות, ארכיטקטוניות ואחרות בדרך כלל קשה מאוד, או בלתי אפשרי למנוע באמצעים רגילים את הנזקים הקונסטרוקטיביים והלא קונסטרוקטיביים, שיוצרו בעת רעידות אדמה.

* מבנים ומתקנים בעלי חשיבות גבוהה, אשר קיים צורך בתפקודם בעת ומיד לאחר התרחשות רעידת אדמה, מבנים בעלי חשיבות לאומית או כלכלית, כגון: מבנים משמשים מערכת בריאות, חינוך, הצלה, חומ"ס, מבנים חיוניים ובטחונים, מתקני ומבני תעשייה, מוזיאונים, גשרים וגם מבנים משותפים ופרטיים.

1.1.3 תכנון סיסמי של מבנים עם מערכת בידוד מפני רעידות אדמה כולל תכנון סטטי, דינאמי וקונסטרוקטיבי של בולמי זעזועים, אשר מהווים בסיס של מערכת הבידוד. בספרות המקצועית מתואר מגוון רחב של סוגי מערכות בידוד מפני רעידות. המערכות בידוד סיסמי המפותחות ביותר, אשר קבלו שימוש רחב במדינות שונות בעולם הינן מערכות עם בולמי זעזועים סיסמיים מסוגים הבאים :

- * (High Damping Rubber Bearing) HDRB.
- * (Lead-Rubber Bearing) LRB.
- * (Friction Pendulum Systems) FPS.

למטרות המחקר נבחרו שלושה סוגים אלה של בולמי הזעזועים, עבורם קיימת ספרות מקצועית רבה, אשר כוללת תיאור של שיטות לתכנון בולמי זעזועים. מסמכים אלה כוללים רשימה רחבה של פרסומים עד לשנת 2010 עבור תכנון בולמי זעזועים סיסמיים למבנים ומתקנים מסוגים שונים, ומתייחסים לרוב המידע אשר ידוע בנושא.

לכל אחד מבולמי זעזועים קיימים חסרונות ויתרונות ידועים, ולכן שיטת הבידוד מוגדרת לכל מצב ספציפי בהתבסס על מאפיינים עקרוניים של בולמי הזעזועים על בסיס תנאים תכנוניים של מבנה המבודד וגם של בולמי הזעזועים עצמם.

לאור כך שבולמי זעזועים נועדים לעמוד בכוחות דינאמיים גדולים הם מקבלים דפורמציות גדולות ולכן פועלים בתחום לא ליניארי. מסיבה זאת תכנון סיסמי של מבנה מבודד ובולמי זעזועים עצמם הוא מורכב ומתייחס למצב כאשר הבולמים יעבדו בפאזה לא ליניארית. יצוין, שעבודה זאת לא עוסקת במגוון של בולמי זעזועים אחרים, אשר לא נחקרו באופן מלא, כנדרש לתכנון מבנים, וגם בולמי זעזועים עליהם כעת קיים מידע מועט.

תכנון סיסמי של מבנים עם בולמי זעזועים מבוסס על מאפיינים דינאמיים של בולמי הזעזועים וסכמה קונסטרוקטיבית של מבנה. קיימים מודלים שונים לתכנון עבור מבנים עם מערכות בידוד, שיטות לחישוב דינאמי וקונסטרוקטיבי של מבנים מפני רעידות אדמה, המתוארים במדריכים ידועים.

1.1.4 המידע הקיים לגבי תכנון של בולמי זעזועים עצמם, מודלים ותכנון דינאמי של מבנים עם מערכות בידוד הביאו למימוש השיטה והקמת מבנים רבים על מערכות מבודדות. תוצאות מעקב ובדיקות של מבנים מבודדים הביאו למסקנות הבאות:

* תכנון מבנים עם מערכות בידוד מדויק ואמין יותר, מאשר תכנון מבנים קונבנציונאליים.

* שימוש במערכות לבידוד סיסמי מאפשר למנוע ו/או למזער נזק קונסטרוקטיבי ולא קונסטרוקטיבי גם בעת רעידות אדמה חזקות, עם כל ההשלכות הנגזרות מכך.

1.1.5 מטרת העבודה המוצעת היא, לעשות בדיקה עקרונית של היבטים שונים של שימוש בבולמי זעזועים סיסמיים עבור מבנים טיפוסיים במדינת ישראל, הממוקמים באזורים שונים מבחינת רעידות אדמה צפויות בהתבסס על שיטות תכנון קיימות של בולמי הזעזועים סיסמיים ושיטות שונות של תכנון סיסמי של מבנים, כולל בחינה:

* סוג אופטימאלי של בולמי הזעזועים.

* יעילות השימוש בבולמי הזעזועים בהשוואה לחיזוק/או הקמת מבנים בשיטה קונבנציונאלית.

* היבטים כלכליים של שימוש בבולמי זעזועים.

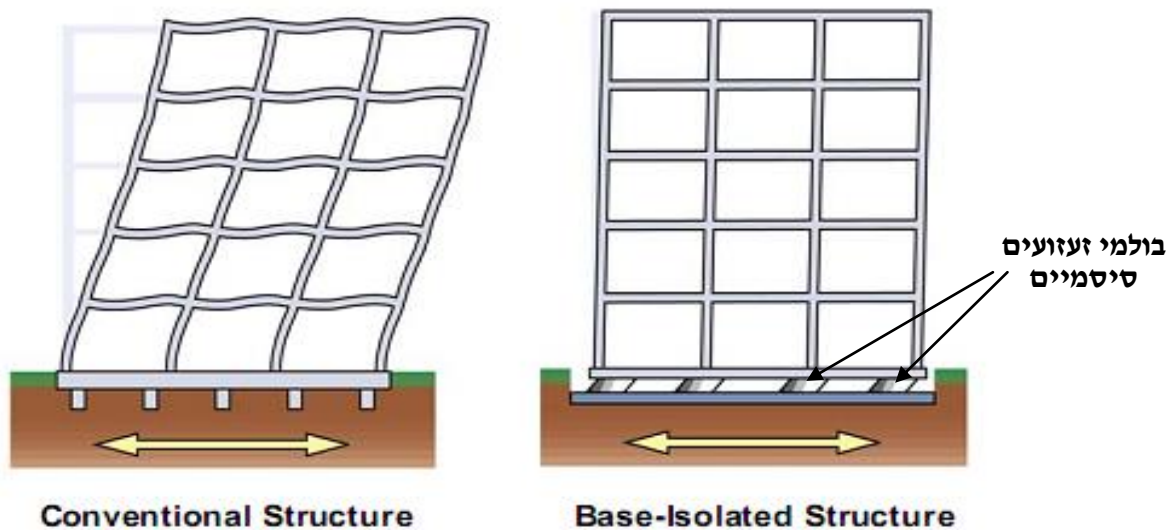
להערכתנו תוצאות המחקר יהיו שלב ראשון לקידום מערכות בידוד סיסמי לשימוש במבנים במדינת ישראל, אשר מהווה אמצעי אפקטיבי ופרספקטיבי למיגון מבנים מסוגים שונים, מפני רעידות אדמה.

בדו"ח זה מוצג מידע בסיסי על תחום שימוש בולמי הזעזועים לבידוד סיסמי של מבנים, סוגים שימושיים של בולמי הזעזועים, מאפיינים מכאניים שלהם וסכמות להתקנה של בולמי זעזועים במבנים.

1.2 עקרונות של בידוד רעידות סיסמי

סכימה כללית של בניין על בולמי זעזועים מוצגת באיור מס' 1.2.1. בניגוד למבנה לא מבודד תנועת הקרקע אינה "עוברת" ישירות מבסיס המבנה לחלקו העליון, אלא דרך מערכת בולמי זעזועים (רעידות).

איור 1.2.1: תנועת מבנה לא מבודד ומבודד בעת רעידות אדמה



קיימים שלושה היבטים עיקריים, אשר מביאים להקטנה של כוחות דינאמיים הנוצרים במבנה המותקן על בולמי הזעזועים:

א. הפחתת תאוצה של רכיבי מבנה מעל בולמי הזעזועים בהשוואה לתאוצת הקרקע עקב הקטנת תדר עצמי בסיסי

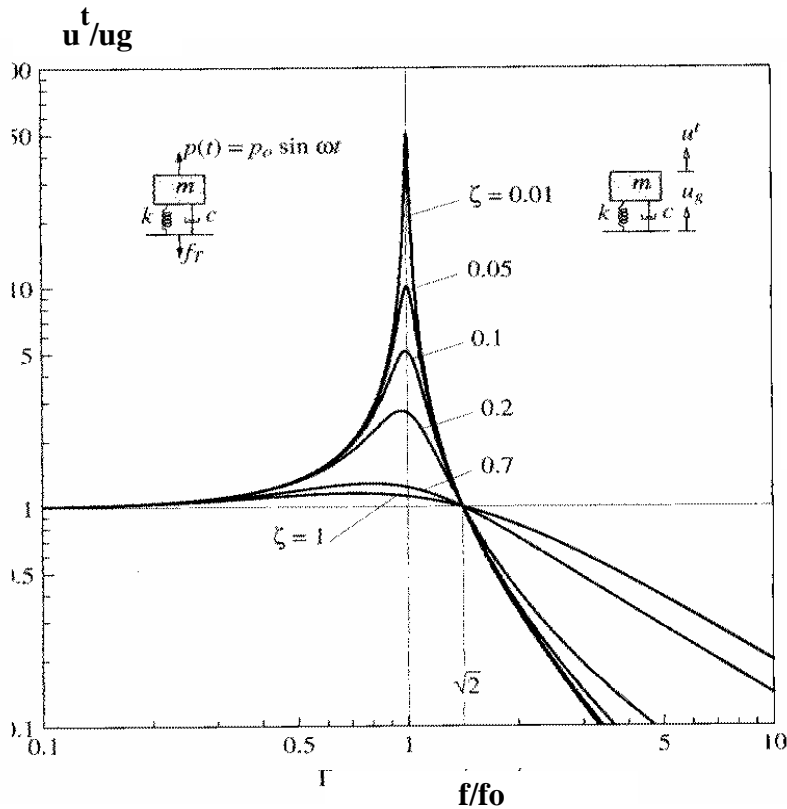
באיור מס' 1.2.2 מוצגת סכימה אלמנטארית של מבנה כמתנד (oscillator) עם דרגת חופש אחד וגם ספקטרום תגובה של המתנד לתאוצה הפועלת על בסיס המתנד. מודל פשוט זה מהווה בסיס לקביעת עקומות נורמטיביות של תגובת המבנים לרעידות אדמה, המשמש לקביעת כוחות דינאמיים אופקיים הפועלים על מבנה. ניתן לראות כי בתדרים גבוהים מאשר תדר עצמי בסיסי של המתנד תאוצת המבנה היא נמוכה מתאוצת הקרקע ולכן כוחות גזירה בעמודים (קירות) יוקטנו בהתאם. מסיבה זאת שימוש בבולמי זעזועים מאפשר להקטין תדר עצמי בסיסי של מבנה ולהזיזו בגרף עקומה ספקטרית מתחת לתחום תדרים דומיננטיים ברעידות אדמה, אמפליטודת רעידות המבנה תוקטן בהשוואה למצב ללא בולמי הזעזועים.

מבחינת ת"י 413 שימוש בבולמי זעזועים מביא להגדלת תקופה בסיסית של המבנה המבודד ולכן

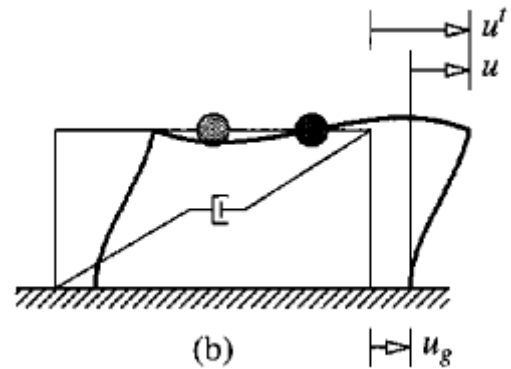
להסתה של נקודת עבודה לאורך ציר של התקופות הבסיסיות לכיוון תקופות גדולות יותר, כמוצג באיור מס' 1.2.3. כתוצאה מכך ניתן להקטין מקדם ההגברה הספקטרי הבסיסי כאשר תדר עצמי של המבנה (ללא בולמים) הוא גבוה יחסית (תקופה בסיסית קטנה יחסית). לדוגמה באיור 1.2.3 מקדם הגברה ספקטרי בסיסי קטן בשיעור יותר מ-2.5. מנגנון זה מוצג באיור 1.2.3 על רקע של צורת ספקטרום התגובה לפי תיקון 1 (1998) לת"י 413, והוא נכון גם לספקטרום התגובה לפי תיקון מס' 3 (2009).

איור 1.2.2: מבנה כמתנד עם דרגת חופש אחד וספקטרום של תגובת המבנה לרעידות הבסיס

ספקטרום של תגובת המבנה - מתנד פשוט



סכימה דינאמית של המבנה - מתנד פשוט



בתרשים זה:

u_g – תאוצת קרקע אופקית.

u^t – תאוצת מבנה אופקית.

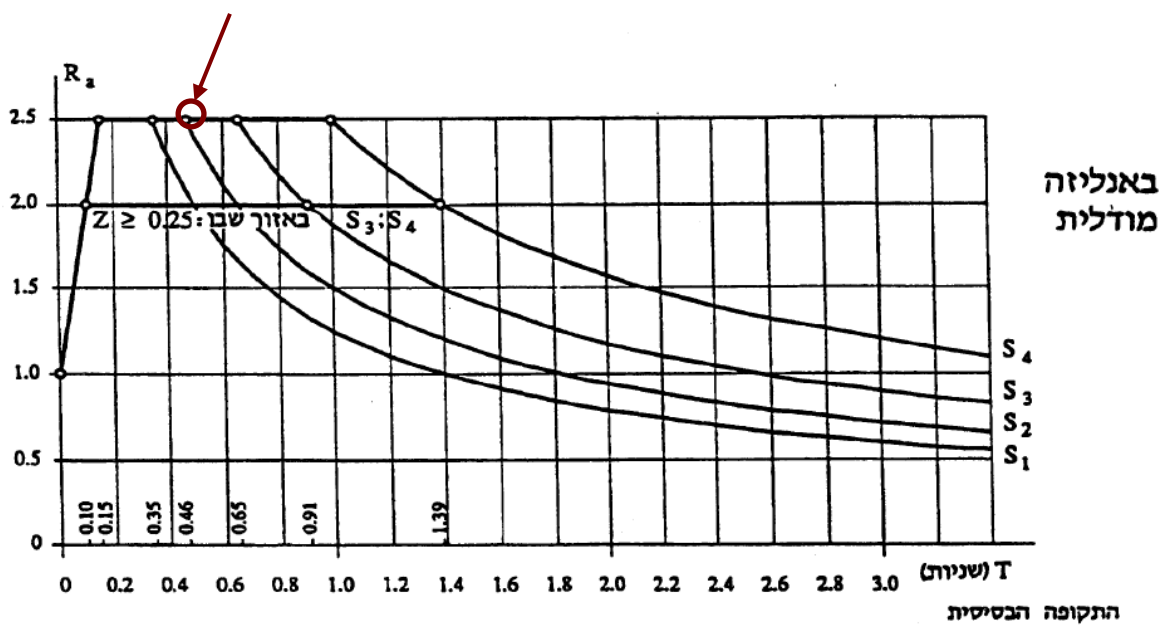
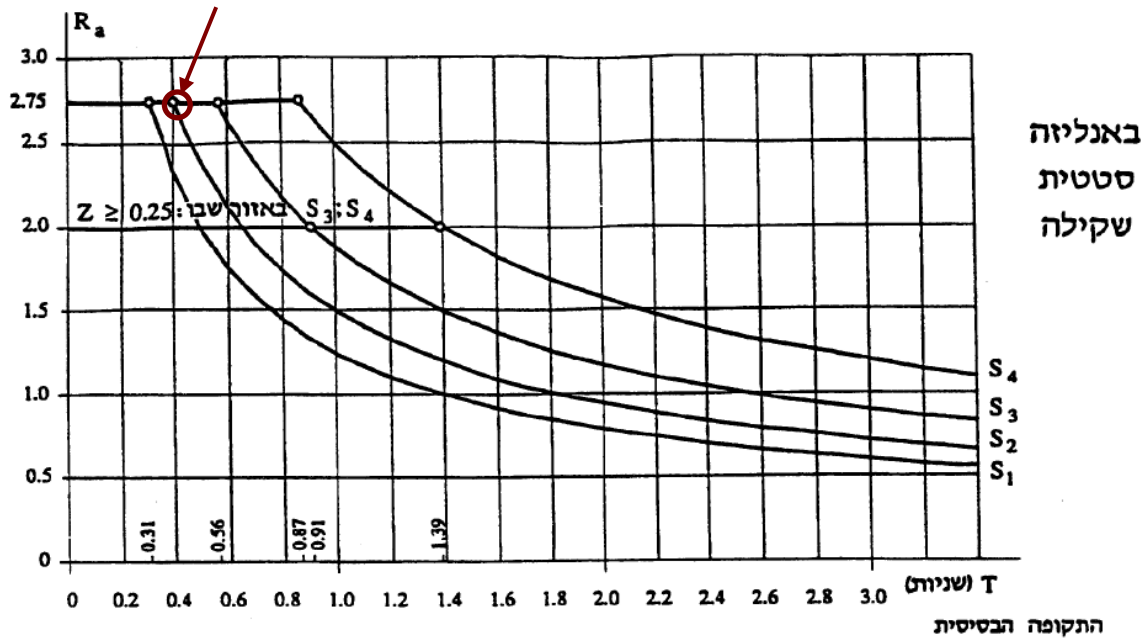
f – תדר הפעלה (רעידות אדמה).

f_0 – תדר עצמי בסיסי של מבנה (רעידות בכיוון אופקי).

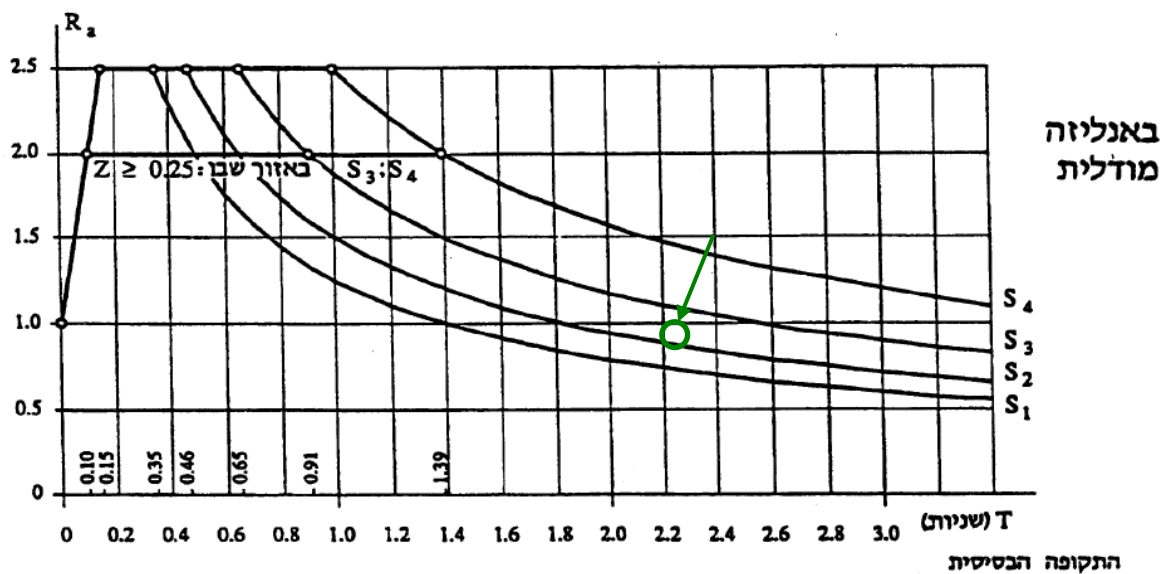
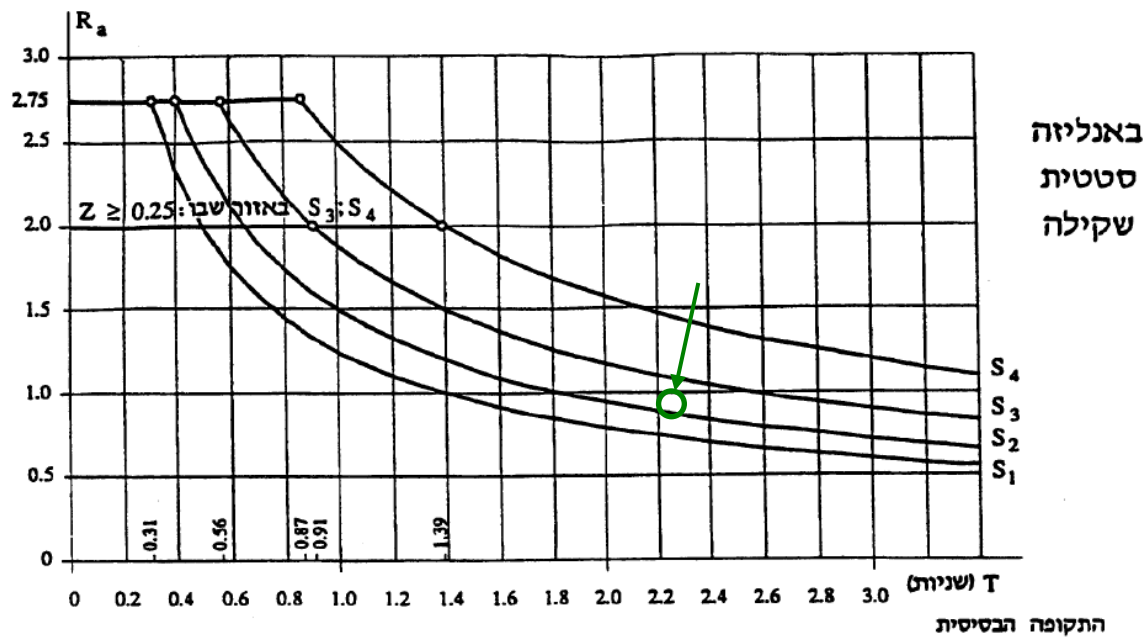
ζ – מקדם ריסון.

איור 1.2.3: ספקטרום תגובה של מבנה לפי ת"י 413 תיקון מס' 1 (1998)

מבנה קונבנציונאלי – לפי ת"י 413.
דוגמה של תגובת המבנה בעל תקופה בסיסית של 0.4 שנייה



מבנה מבודד לפי ת"י 413
תקופה בסיסית של 2.2 שנייה

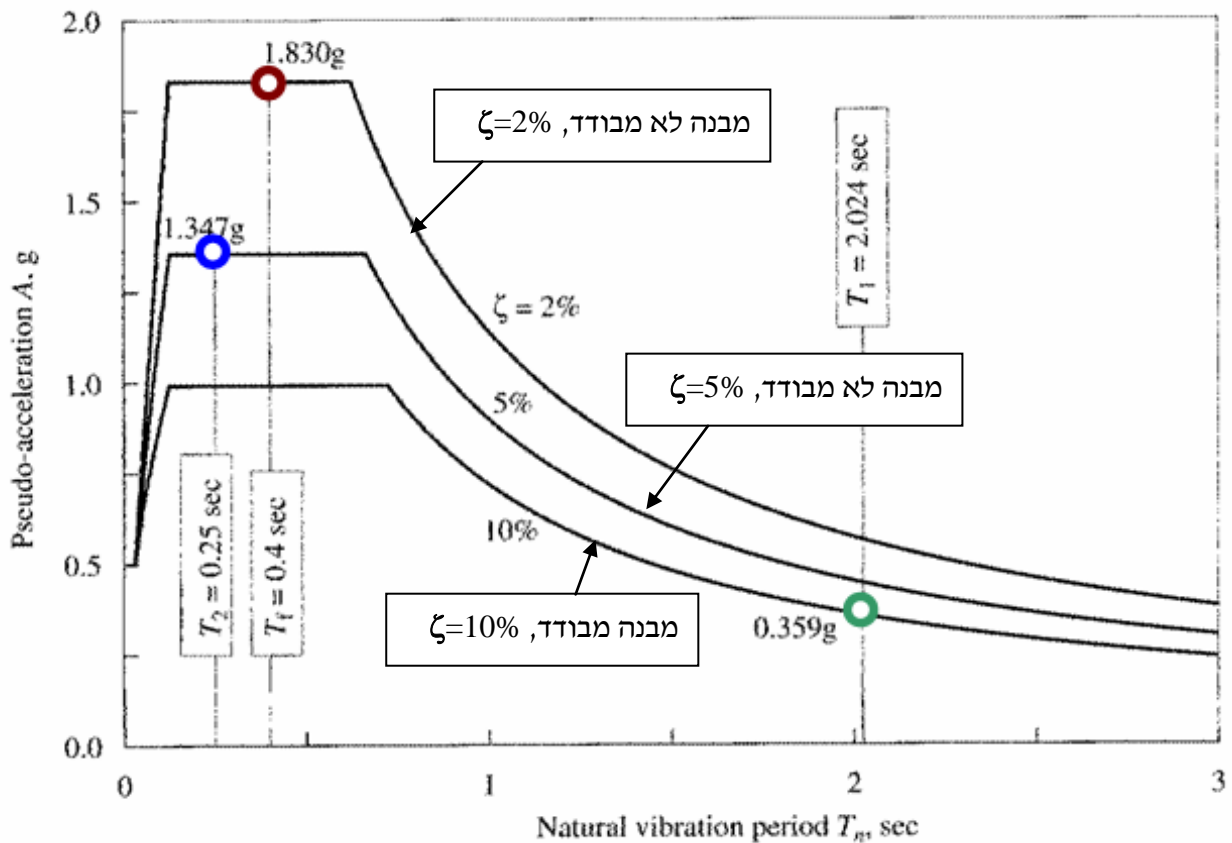


ב. הפחתת תאוצה של בסיס הבניין מעל בולמי הזעזועים בהשוואה לתאוצת הקרקע עקב הגדלה במקדם ריסון אפקטיבי

מאיור מס' 1.2.2 ניתן לראות כי מקדם הריסון האפקטיבי של המבנה ζ הוא אחד מהגורמים הדומיננטיים, אשר משפיעים על תגובת המבנה לרעידות אדמה והגדלה במקדם הריסון מביאה עימה הקטנה בתאוצת המבנה וכוחות הגזירה הנוצרים בו. לאור זה שימוש בבולמי הזעזועים (ראה להלן), בעלי מקדם ריסון גבוה מאוד, גורמת להפחתת רעידות נוספת עקב הגדלה של מקדם ריסון אפקטיבי של המבנה.

באיור מס' 1.2.4 מוצגת דוגמה לתוצאת חישוב של תגובת מבנה ללא בידוד הרעידות ועם בידוד הרעידות, אשר מראה את ההשפעה המשותפת של הקטנה בתדר עצמי והגדלה במקדם ריסון של המבנה לאחר התקנת מערכת הבידוד.

איור מס' 1.2.4: ספקטרום תגובת תכן תאוצות של המבנה לפני ואחרי התקנה על בלמי זעזועים



● ● - מבנה לא מבודד

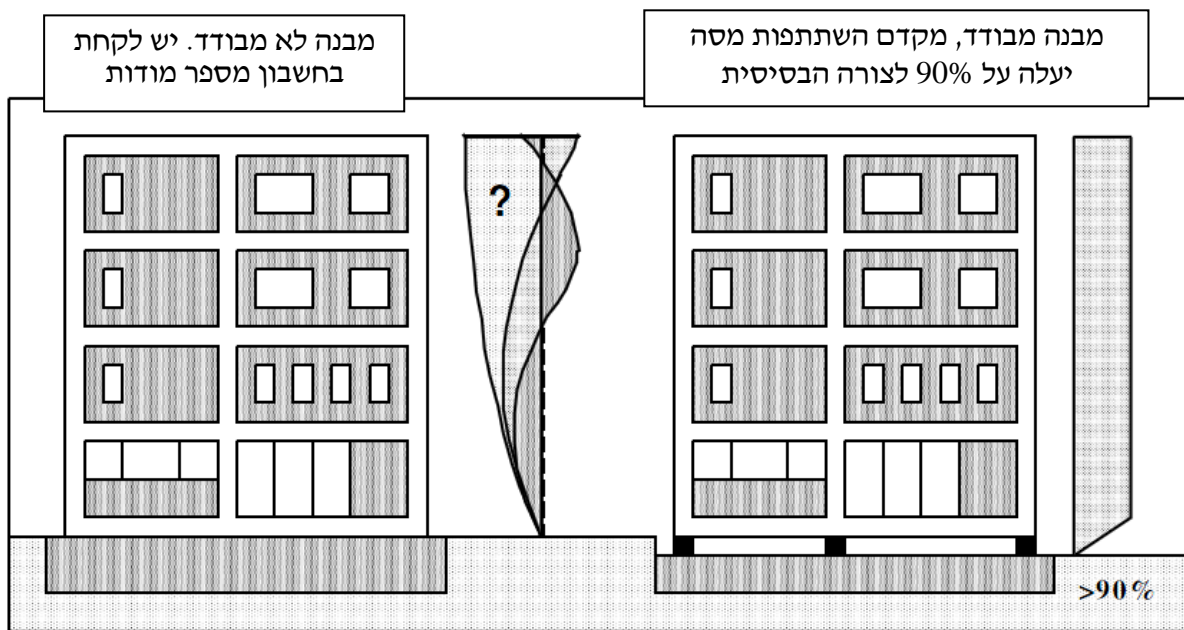
● - מבנה מבודד באמצעות בולמי זעזועים מסוג HDRB

ג. השתתפות מסה של מבנה ברעידות

מסת המבנה, המשתתפת בתנועה עקב רעידות אדמה, היא אחד מהגורמים החשובים מבחינת תגובת המבנה לרעידות אדמה (ראה ת"י 413). כידוע למבנים קונבנציונאליים (ראה איור מס' 1.2.1) יש לקחת בחשבון מספר צורות של רעידות המבנה כי השתתפות של מסה לפי הצורה הבסיסית וגם לפי צורות נוספות היא יחסית נמוכה. המצב הוא שונה לחלוטין עבור מבנה הממוקם על בולמי הזעזועים, המתוכנן בצורה נכונה, כי כמעט כל המסה משתתפת בתנועה כבר לפי הצורה השייכת לתדר עצמי בסיסי. באיור מס' 1.2.5 מוצגות, באופן סכמטי, צורות רעידות

בכיוון אופקי של מבנה לא מבודד ומבנה מבודד על בולמי זעזועים. ניתן לראות כי לצורך חישוב תגובה של מבנה לא מבודד (ראה ת"י 413) נלקחים בחשבון מספר צורות רעידות (מודות) כך שמקדם ההשתתפות יעלה על 90%. עבור מבנה מבודד מקדם השתתפות ככלל עולה על 90% כבר למודה הבסיסית שהינה קשורה בעיקר לדפורמציות של בולמי זעזועים עצמם כאשר הסטה קומתית היא קטנה (ראה צורת רעידות באיור מס' 1.2.5).

איור מס' 1.2.5: צורות רעידות עצמיות של מבנה בכיוון אנכי למבנה לא מבודד ומבנה מבודד באמצעות בולמי זעזועים



- כיוצא מכך תחום השימוש בבידוד רעידות מפני רעידות אדמה ככלל ניתן להגדיר באופן הבא:
- אזורים עם רעידות אדמה ללא תרומה גדולה של אנרגיה בתדרים נמוכים.
 - מבנים עם תדירות עצמית שלא נמוכה מאוד.

מכיוון שבולמי זעזועים מגדילים בצורה משמעותית תנועה של מבנים החשופים לכוחות דינאמיים לא סיסמיים (למשל רוח), אשר פועלים על מבנה עצמו, כדי להגביל אי-נוחות של שוהים במבנה עקב תנודת המבנה לכיוון אופקי, מומלץ להשתמש בבולמי זעזועים כאשר כוחות אופקיים הלא סיסמיים לא עולים על כ-10% ממשקל המבנה. תחום השימוש בבולמי זעזועים סיסמיים מבחינות שונות מתואר בפרק הבא.

1.3 תחומי שימוש בבידוד סיסמי

שימושים שונים בבידוד רעידות סיסמי מתוארים בספרות מקצועית, ספרים ומאמרים רבים וגם במסמכים נורמטיביים מחייבים ומנחים, העוסקים בהיבטים שונים של שימוש בבידוד רעידות סיסמי. ניתן לסווג תחומי שימוש בבידוד רעידות סיסמי באמצעות מספר סיווגים לפי היבטים שונים. להלן תיאור קצר של סיווגים אלה.

1.3.1 סיווג לפי שטח מבנה

בידוד רעידות סיסמי משמש גם למבנים בעלי שטח גדול מאוד וגם למבנים ששטחם קטן יחסית או קטן ראה למשל טבלה 1.3.1 שפורסמה לפני כ-10 שנים, אשר כוללת מאפיינים בסיסיים של מבנים אזרחיים שעברו תהליך שיחזור (שיקום) באמצעות בולמי זעזועים.

1.3.2 סיווג לפי גובה מבנה

משתמשים באמצעים לבידוד רעידות סיסמי גם למבנים נמוכים וגם למבנים די גבוהים – ראה למשל טבלה מס' 1.3.1

1.3.3 סיווג לפי חומרי בניה

משתמשים באמצעים לבידוד רעידות סיסמי למבנים בנויים מחומרים שונים: בטון, פלדה, ועץ – ראה למשל טבלה מס' 1.3.1

1.3.4 סיווג לפי סכמה קונסטרוקטיבית

משתמשים באמצעים לבידוד רעידות סיסמי למבנים בעלי סכמות קונסטרוקטיביות שונות לחלוטין – ראה למשל טבלה מס' 1.3.1

1.3.5 מבנים לשיקום ומבנים חדשים

* שיקום (שחזור, שיפור) של מבנים קיימים

שיקום (שחזור) של מבנים קיימים הוא אחד מהתחומים הפוטנציאליים והחשובים של שמימוש בבידוד רעידות סיסמי, עקב סיבות הבאות:

- יעילות פוטנציאלית גבוהה.
- מניעת נזקים למבנה עקב רעידות אדמה.
- מניעת שינויים קונסטרוקטיביים וויזואליים משמעותיים הנגרמים עקב שימוש באמצעים אחרים כולל אמצעים לריסון רעידות.

באיור מס' 1.3.1 מופיעה דוגמה לשיקום מבנה היסטורי גדול (San Francisco City Hall) בארצות הברית.

טבלה מס' 1.3.1: דוגמאות למבנים משוחזרים בארצות הברית ומאפייניהם

Table C9-3 Summary of US Seismic Isolation Rehabilitation Projects

Building/Project Information			Structural Information		
Name (Location)	Status	Size in Sq. Ft.	Isolation System	Original Structure	New Structure
Salt Lake City and County Building (Salt Lake City, UT)	Complete (1988)	170,000	447 Isolators (208 LRB + 239 RB + PTFE)	1894 5-story URM bearing wall w/clock tower (240' total height)	Steel braced frame (clock tower only)
Rockwell Building (Seal Beach, CA)	Complete (1991)	300,000	78+ Isolators (52 LRB + 26 RB + PTFE)	1967 8-story RC moment frame	RC moment frame at perimeter, floors 1–6
Hawley Apartments (San Francisco, CA)	Complete (1991)	20,000	31 Isolators (FPS)	1920 4-story wood bearing wall	Steel moment frame at first floor
Mackay School of Mines (Reno, NV)	Complete (1993)	50,000	106 Isolators (64 HDR + 42 PTFE)	1908 3-story URM bearing wall	Floor ties/wall anchors (new basement)
Campbell Hall, Western Oregon State College (Monmouth, OR)	Complete (1994)		42+ Isolators (26 LRB + 16 RB + PTFE)	1872–1898 3-story URM bearing wall	
Oakland City Hall (Oakland, CA)	Complete (1995)	153,000	126 Isolators (42 LRB + 69 RB + 15 PTFE)	1914 18-story steel frame/ URM in-fill w/clock tower (324' total height)	RC shear walls at cores, steel braced frame at clock tower
U.S. Court of Appeals (San Francisco, CA)	Complete (1995)	350,000	256 Isolators (FPS)	1905 4-story steel frame/URM in-fill with 1933 addition	RC shear walls
Long Beach Veterans Admin. Hospital (Long Beach, CA)	Complete (1995)	350,000	156 Isolators (110 LRB + 18 RB + 30 PTFE)	1967 12-story RC perforated shear wall	Basement columns strengthened
Building S-12 Hughes (El Segundo, CA)	Complete (1995)	240,000	45+ Isolators (24 LRB + 21 RB + PTFE)	1960s 12-story RC shear wall/frame building	First floor and substructure strengthened
Kerckhoff Hall, Univ. of California, Los Angeles (Westwood, CA)	Complete (1996)	92,000	126+ Isolators (33 LRB + 93 RB + PTFE)	6-story RC and brick wall structure	First floor and substructure strengthened
San Francisco City Hall (San Francisco, CA)	Complete (1997)	500,000	591 Isolators (530 LRB + 61 PTFE)	1912 5-story steel frame/URM in-fill with dome (~300' total height)	Steel braced frame in dome and RC shear walls at lower floors

LRB: Lead-rubber bearing isolators

RB: Rubber bearing isolators

PTFE: Sliding polytetra fluoroethylene isolators

FPS: Friction pendulum system isolators

HDR: High damping rubber bearing isolators

איור מס' 3.11: דוגמת שיחזור מבנה היסטורי פעיל גדול (San Francisco City Hall) באמצעות בולמי זעזועים סיסמיים

Sec. 20.5 Applications of Base Isolation

751



יצוין כי בולמי זעזועים הם אלמנטים סטנדרטיים בגשרים, והחלפה (שיחזור) בולמי זעזועים הינו דבר שגרתי.

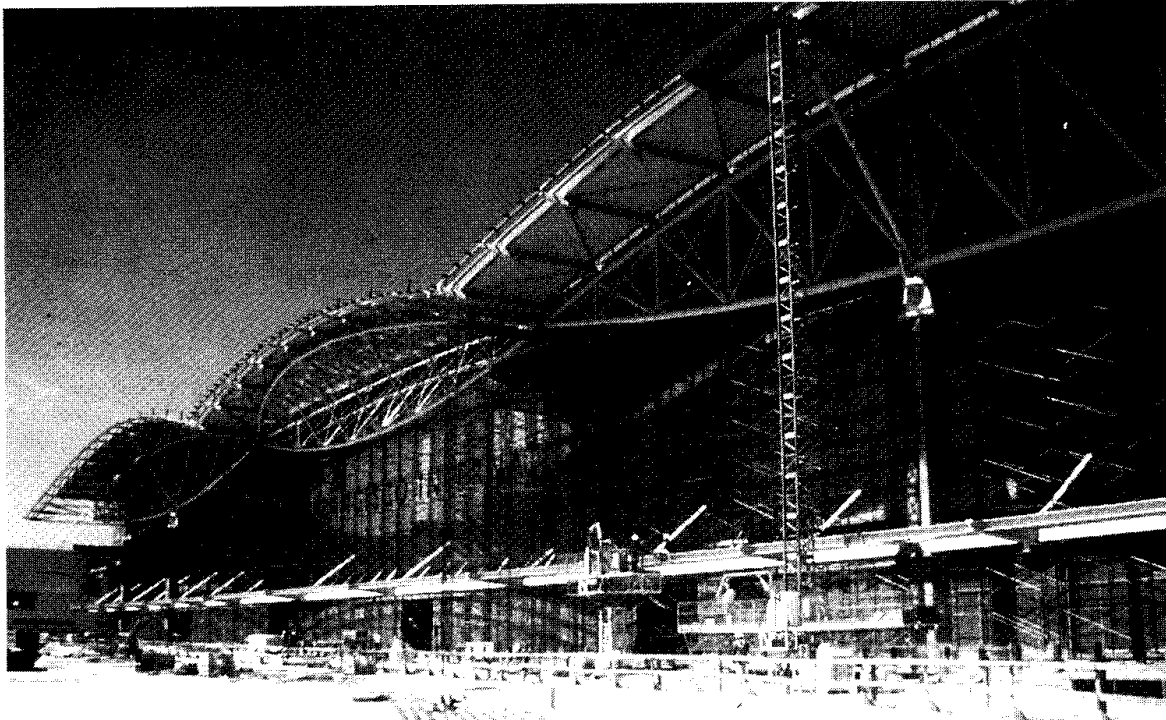
*** מבנים חדשים**

כאמור, בולמי זעזועים סיסמיים בתחום זה הפכו כיום במדינות מובילות לאמצעי שגרתי בו משתמשים למבנים גדולים וקטנים, גבוהים ונמוכים, אזרחיים ותעשייתיים, בנויים מחומרים שונים ולמבנים בעלי צורות גיאומטריות שונות בתנאים סיסמיים שונים. מספר דוגמאות מופיעות באיורים מס' 1.3.2 – 1.3.9.

**איור מס' 1.3.2: דוגמת מבנה חדש גדול המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים
(San Francisco International Airport)**

Sec. 20.5 Applications of Base Isolation

753



**איור מס' 1.3.3: דוגמת מבנה תעשייתי ומשרדים המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים
(Flight Simulator Manufacturing Facility)**



Fig. 1.8 Flight Simulator Manufacturing Facility, Salt Lake City, Utah.

איור מס' 1.3.4: דוגמת מבנה ציבורי גבוה המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים
(Los Angeles City Hall)



Fig. 1.12 Los Angeles City Hall.

איור מס' 1.3.5: דוגמה למבנה מגורים המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים
(Marina Apartments, San Francisco)

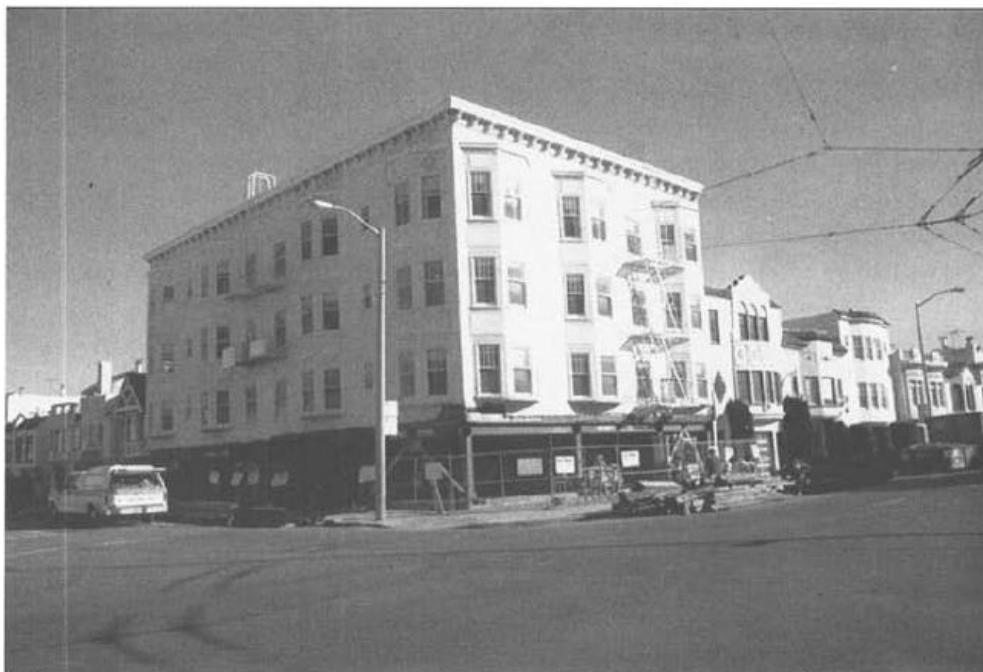


Fig. 1.14 Marina Apartments, San Francisco, California.

איור מס' 1.3.6: דוגמה של מבנה משרדים ותעשייה המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים, יפן



Fig. 1.16 West Japan Postal Center, Sanda, Japan.

איור מס' 1.3.7: דוגמת מבנה משרדים המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים, ניו זילנד

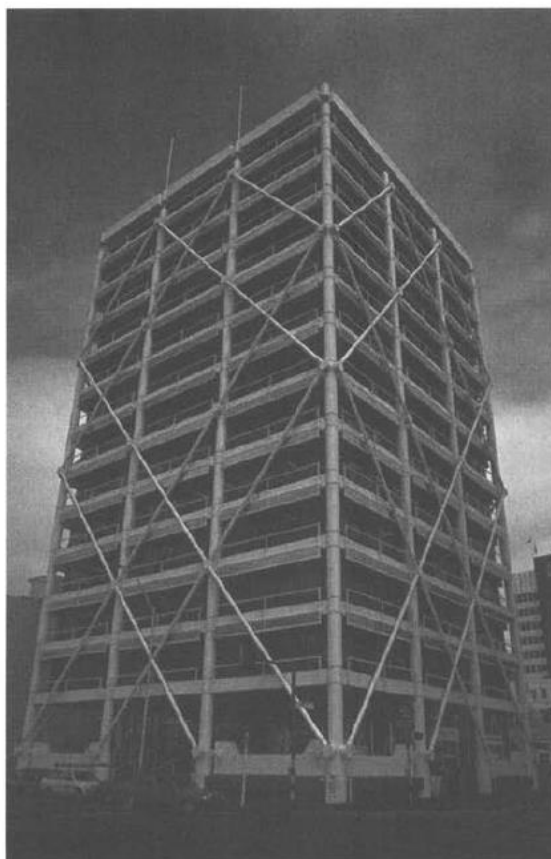


Fig. 1.19 Union House, Auckland, New Zealand.

איור מס' 1.3.8: דוגמת מבנה ציבור מותקן על בולמי זעזועים סיסמיים, איטליה

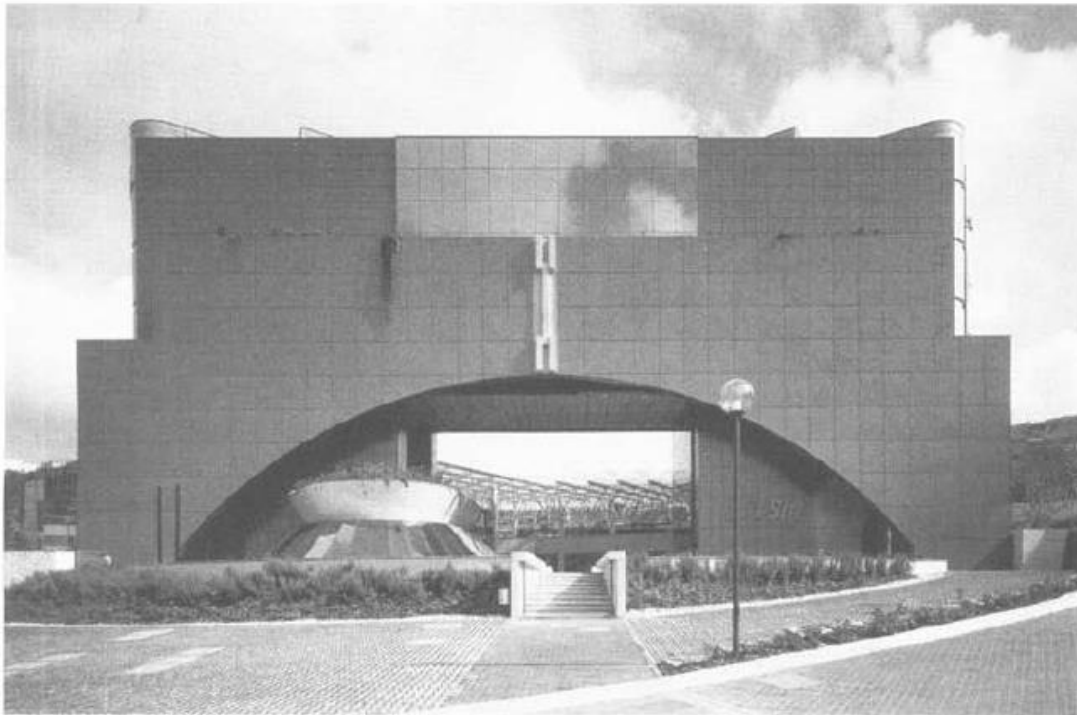


Fig. 1.18 The SIP Complex, Ancona, Italy.

איור מס' 1.3.9: דוגמה למיכל נוזלים המותקן על בולמי זעזועים סיסמיים

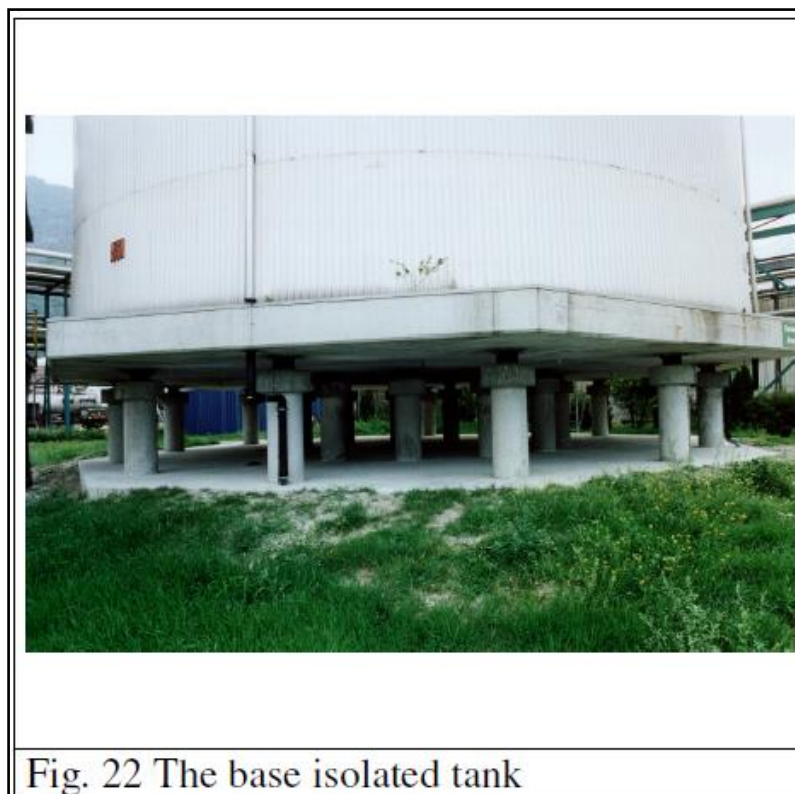


Fig. 22 The base isolated tank

בגשרי בטון בולמי זעזועים הם אלמנט חובה, וקיימת ספרות מקצועית רבה ייחודית הנועדת בעיקר לתכנון סיסמי של גשרים עם בולמי זעזועים. בפועל תכנון סיסמי של גשרים מהווה תחום הנדסי מיוחד, אליו עבודה זאת אינה מתייחסת. בהקשר לזה נציין כי ת"י 413 אינו חל על גשרים אשר מתוכננים לפי תקנים אחרים.

1.3.6 סיווג לפי השלכות פונקציונאליות

סיווג זה מסביר פוטנציאל של בולמי זעזועים למיגון מבנים מפני רעידות אדמה. ניתן להגדיר תחום שימוש בבולמי זעזועים סיסמיים כלהלן:

1.3.6.1 עליה ברמת בטיחות של מבנה

שימוש בבולמי זעזועים מאפשר להקטין סכנה של נזקים קונסטרוקטיביים במבנה, לתכולתו וגם מונע סיכון להתמוטטותו ובכך מצמצם פיצוי ביטוחי.

1.3.6.2 המשכיות התפקוד

למבנים אשר נועדים לתפקד באופן רציף בעת ולאחר רעידות אדמה, משתמשים בבולמי זעזועים סיסמיים, כי בעת ולאחר רעידות אדמה מבנים על בולמי זעזועים ממשיכים לתפקד ולעתים קרובות אף אין צורך בטיפול או החלפה של בולמי הזעזועים לאחר האירוע.

1.3.6.3 הקטנה של כוחות דינאמיים

למבנים שונים לא ניתן באמצעים קונבנציונאליים סבירים לספק תסבולת הנדרשת ברכיבים, ולכן יש לנקוט בבידוד סיסמי.

1.3.6.4 הגבלת תזוזות, משיכות, דפורמציות ונזקים עקב רעידות אדמה

מסיבות שונות למגוון מבנים ומתקנים בהם דפורמציות גדולות ונזקים קונסטרוקטיביים מהווים סיכון או אסורים, מומלץ להשתמש בבידוד מפני רעידות אדמה, וזאת גם במקרה בו ניתן לספק את התסבולת הנדרשת באמצעות שיטות אחרות.

1.3.6.5 הפחתת תנודות של מכשור וציוד בתוך מבנה

קיים מגוון אמצעים להפחתת רעידות של רכיבים לא נושאי עומס כגון: מכשור, ציוד, צינורות, ותכולה נוספת במבנה. יחד עם זאת לא תמיד אמצעים אלה יעילים או ניתן להשתמש בהם, גם במקרים אלה בולמי זעזועים סיסמיים מהווים פתרון אפקטיבי.

1.3.6.6 אמצעים קונבנציונאליים לא יעילים לא פרקטיים, או לא כלכליים.

במקרים רבים אמצעים קונבנציונאליים, כמו קירות הקשחה (shear walls), מסגרות מוקשחות (braced frames), מסגרות כפיפות (moment resisting frames), הם לא יעילים ו/או לא פרקטיים ו/או לא כלכליים. כל מצבים אלה מהווים תחום פוטנציאלי

לשימוש באמצעי בידוד מפני רעידות סיסמיות.

יציין כי לאותן המטרות נועדים גם אמצעים לריסון אנרגיה. הטבלה הבאה מ- FEMA 274 Ch 09 Seismic Isolation and Energy Dissipation נותנת הערכה של פוטנציאל שימוש בשני סוגים של אמצעים אלה – בידוד רעידות (Isolation) וריסון רעידות (Energy Dissipation).

Table C9-1 Applicability of Isolation and Energy Dissipation Systems

Performance Level	Performance Range	Isolation	Energy Dissipation
Operational	Damage Control	Very Likely	Limited
Immediate Occupancy		Likely	Likely
Life Safety	Limited Safety	Limited	Likely
Collapse Prevention		Not Practical	Limited

כמו כן, המסמך מגדיר פוטנציאל שימוש בבידוד הרעידות לבניינים חדשים ומסביר פוטנציאל גדול של שימוש בבולמי זעזועים מפני רעידות אדמה כלהלן:

Table C9-2 Protection Intended for New Buildings

Risk Category	Earthquake Ground Motion Level		
	Minor	Moderate	Major
Life Safety ¹	F/I	F/I	F/I
Structural Damage ²	F/I	F/I	I
Nonstructural Damage ³ (Contents Damage)	F/I	I	I

1. Loss of life is not expected for fixed-base (F) or isolated (I) buildings.
2. Significant structural damage is not expected for fixed-base (F) or isolated (I) buildings.
3. Significant nonstructural (contents) damage is not expected for fixed-base (F) or isolated (I) buildings

1.3.7 סיווג לפי שיטת שימוש

כתלות בתנאים ומטרות תכנון, מתכננים מבנים על מערכות של בולמי זעזועים ללא אמצעים נוספים אחרים או בשילוב עם אמצעים אחרים מסוגים שונים. שילוב של אמצעים שונים מאפשר לנצל במלואן את היתרונות של כל אחד מאמצעים אלה.

1.4 תכנון מבנה מבודד

1.4.1 כללי

תכנון מבנה מבודד כולל:

- * חישוב תגובת המבנה לרעידות האדמה.
- * תכנון אלמנטים של מבנה, כולל בסיס מתחת ומעל בולמי זעזועים.
- * חישוב ותכנון בולמי זעזועים עצמם.

תכנון סיסמי של מבנים מבודדים מבצעים לפי מסמכים מחייבים או מנחים כמו FEMA P 750 או Eurocode 8, מסמכים לאומיים דומים וספרות מקצועית, בהם מתוארים בצורה די מפורטת דרישות לתכנון מבנים מבודדים (ראה ביבליוגרפיה).

לפי מטרת העבודה דו"ח זה אינו עוסק בתכנון מפורט של מבנים ואלמנטים קונסטרוקטיביים וגם בפרטים של תכנון בולמי זעזועים, משום כך במסגרת העבודה לא מתוארים פרטים ושיטות של תכנון מבנים מבודדים. בהתאם לכך נסתפק בהצגה של תוכן עניינים של שני המסמכים המצויינים לעיל אשר מספקים מידע על מהות של מגוון צעדים בתכנון סיסמי, כאשר בולמי זעזועים עצמם יתוארו בהמשך דו"ח זה.

FEMA P 750, תוכן עניינים של פרק לתכנון בידוד סיסמי של מבנים

Commentary to Chapter 17, Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures	
C17.1	General 207
	C17.1.1 Variations in Material Properties 208
C17.2	General Design Requirements 208
	C17.2.4 Isolation System 209
	C17.2.5 Structural System 209
	C17.2.6 Elements of Structures and Nonstructural Components 209
C17.3	Ground Motion for Isolated Structures 209
	C17.3.1 Design Spectra 209
	C17.3.2 Ground Motion Histories 210
C17.4	Analysis Procedure Selection 210
C17.5	Equivalent Lateral Force Procedure 211
	C17.5.3 Minimum Lateral Displacements 211
	C17.5.4 Minimum Lateral Forces 212
	C17.5.5 Vertical Distribution of Forces 213
	C17.5.6 Drift Limits 213
C17.6	Dynamic Analysis Procedures 214
C17.7	Design Review 214
C17.8	Testing 214
	C17.8.5 Design Properties of the Isolation System 215
References 216

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance

Part 2: Bridges

7	BRIDGES WITH SEISMIC ISOLATION	86
7.1	GENERAL	86
7.2	DEFINITIONS AND SYMBOLS	86
7.3	BASIC REQUIREMENTS AND COMPLIANCE CRITERIA.....	87
7.4	SEISMIC ACTION	88
7.4.1	<i>Design spectra</i>	<i>88</i>
7.4.2	<i>Time-history representation</i>	<i>88</i>
7.5	ANALYSIS PROCEDURES AND MODELLING.....	88
7.5.1	<i>General</i>	<i>88</i>
7.5.2	<i>Design properties of the isolating system.....</i>	<i>89</i>
7.5.3	<i>Conditions for application of analysis methods</i>	<i>94</i>
7.5.4	<i>Fundamental mode spectrum analysis</i>	<i>95</i>
7.5.5	<i>Multi-mode Spectrum Analysis.....</i>	<i>97</i>
7.5.6	<i>Time history analysis</i>	<i>99</i>
7.5.7	<i>Vertical component of seismic action.....</i>	<i>99</i>
7.6	VERIFICATIONS	99
7.6.1	<i>Design seismic combination</i>	<i>99</i>
7.6.2	<i>Isolating system</i>	<i>99</i>
7.6.3	<i>Substructures and superstructure.....</i>	<i>100</i>
7.7	SPECIAL REQUIREMENTS FOR THE ISOLATING SYSTEM.....	101
7.7.1	<i>Lateral restoring force</i>	<i>101</i>
7.7.2	<i>Lateral restraint at the isolation interface</i>	<i>101</i>
7.7.3	<i>Inspection and Maintenance.....</i>	<i>101</i>

במסגרת העבודה נבחן פוטנציאל שימוש בבולמי זעזועים נפוצים, בתנאי מדינת ישראל באזורים סיסמיים שונים, עבור מבנים קיימים טיפוסיים. לצרכי המחקר נעשה שימוש במאפיינים של בולמי זעזועים משלושה סוגים, אשר מיוצרים על ידי יצרנים ידועים, נחקרו היטב, ועבורם קיימות שיטות מפורטות לתכנון. שלושת הסוגים הם :

*(Lead-Rubber Bearing) LRB.

*(High Damping Rubber Bearing HDRB).

*(Friction Pendulum Systems) FPS.

סוגים אלה ניתן לסווג כשימושיים ביותר לבידוד סיסמי של מבנים במדינות המובילות בתחום זה.

1.4.2 שיטות חישוב סיסמי

קיימות שיטות שונות לחישוב סיסמי של מבנים :

1.4.2.1 אנליזה סטטית שקילה.

1.4.2.2 אנליזה מודלית.

שתי שיטות אלה הן בפועל שיטות "סטטיות", בהן בצורה עקיפה לוקחים בחשבון דפורמציות פלסטיות במבנה.

1.4.2.3 אנליזת Push-over לא ליניארית.

1.4.2.4 אנליזה דינאמית מרישום תאוצות (nonlinear earthquake analysis).

תיאור שיטות אלה ושיטה שתבחר למחקר זה יתוארו בפרק הבא.

1.4.3 מודלים (תכנות) לחישוב

חישוב של מבנים מבודדים (וגם לא מבודדים) מתבצע באמצעות תכנות ממוחשבות ידועות שונות. ניתן לחלק את התכנות למספר סוגים:

1.4.3.1 תכנות המתמחות בתכנון מפורט של מבנים (לביצוע)

אלה תכנות FEM (אלמנט סופי) תכנות "כבדות" אשר נועדות לחישוב תגובת מבנים לרעידות אדמה ותכנון מפורט של אלמנטים. אחת התכנות מסוג זה, בה עושים שימוש גם בארץ, היא תכנה ETABS, אשר נועדה לתכנון ליניארי ולא ליניארי של מבנים. תכנות מסוג זה דורשות השקעת זמן רב להקמה ואנליזה של מודלים וגם להרצת המודל.

1.4.3.2 תכנות כלליות רב-תחומיות

אלה תכנות כלליות רב-תכליתיות (רב-תחומיות) המאפשרות לבצע גם חישובים סיסמיים למבנים מבודדים (על בולמי זעזועים סיסמיים) ולא מבודדים, בתחום ליניארי ולא ליניארי. ככלל תכנות אלה הן עוצמתיות המציעות סכמות שונות של חישוב דינאמי לא ליניארי, אך הן "כבדות" מאוד (למשל ANSYS) ודורשות השקעת זמן משמעותית, הנדרשת להכנה וולידציה של מודלים לחישוב במסגרת תכנות אלה והכנת תכנות לעיבוד תוצאות החישוב (post processor).

1.4.3.3 תכנות הנועדות לאנליזה כללית של עבודת מבנה תחת עומס סיסמי

תכנות אלה מתאימות למטרת מחקר ובחינה כללית של התנהגות מבנים בעמסה דינאמית, ולכן לצרכי המחקר נעשה שימוש בתכנות מסוג זה ביניהם תכנות ידועות הבאות Stera 3D, Nonlin 7.0 ו-Seismostruct, יצוין, שגם בקבוצה הזאת וגם בקבוצות האחרות שהוזכרו לעיל קיימות תכנות רבות נוספות.

תכנות אלה כוללות אחד או מספר מודולים המממשים שיטות חישוב המתוארות לעיל וכוללות מודול של חישוב דינאמי מרישום התאוצות. באמצעות תכנות אלה נעשה ניתוח של תגובת מבנים טיפוסים המפורטים בפרק 3 באזורים שונים במדינת ישראל ובהתאם לצורת תגובה נורמטיבית המוגדרת בת"י 413. כל התכנות האלה מאפשרות לחשב תגובת מבנים ללא בולמי

זעזועים (fixed -base building) וגם מבנים מבודדים (base-isolated buildings) בהתחשב למאפיינים של בולמי זעזועים ריאליים, אשר עובדים בתחום אלסטי וגם בתחום לא ליניארי (אלסטו-פלסטי).

להלן תיאור בולמי זעזועים בהם נעשה שימוש במחקר זה.

1.5 מאפיינים של בולמי זעזועים

1.5.1 HDRB (High Damping Rubber Bearing)

בולמי זעזועים אלה בנויים משכבות גומי ולוחות מתכת (איור מס' 1.5.1) המהווים מבנה רב שכבתי, אשר קשיח מאוד לכיוון אנכי וגמיש מאוד לכיוון אופקי. בבולמי זעזועים אלה משתמשים בגומי בעל תסבולת ודפורמציות אלסטיות ופלסטיות אפשריות גדולות וגם מקדם ריסון גבוה.

איור מס' 1.5.1: בולמי זעזועים מסוג HDRB



מחזורים של העמסה והורדת עומס לבולמי זעזועים מסוג זה מאופיינים על יד דיאגרמות

1.5.2 ו1.5.3 המוצגות באיור מס' 1.5.2 ובסכמה המופיעה באיור מס' 1.5.3.

איור מס' 1.5.2: דיאגרמות מחזורי העמסה והורדת עומס לבולמי זעזועים מסוג HDRB

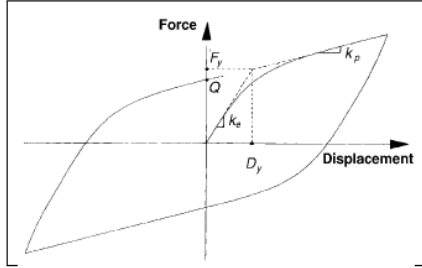


Figure C9-4 Idealized Hysteretic Force-Displacement Relation of Elastomeric Bearing

The yield force is then given by

$$F_y = Q + k_p D_y \quad (C9-4)$$

High-damping rubber bearings are made of specially compounded rubber that exhibits effective damping between 0.10 and 0.20 of critical. The increase in effective damping of high-damping rubber is achieved by the addition of chemical compounds that may also affect other mechanical properties of rubber. Figure C9-5 shows representative force-displacement loops of a high-damping rubber bearing under scragged conditions.

$$Q = A_p \sigma_{YL} \quad (C9-1)$$

The post-yield stiffness, k_p , is typically higher than the shear stiffness of the bearing without the lead core:

$$k_p = \frac{A_p G f_L}{\Sigma t} \quad (C9-2)$$

where A_p is the bonded rubber area, Σt is the total rubber thickness, G is the shear modulus of rubber (typically computed at shear strain of 0.5), and f_L is a factor larger than unity. Typically, f_L is 1.15, and the elastic stiffness ranges between 6.5 to 10 times the post-yield stiffness.

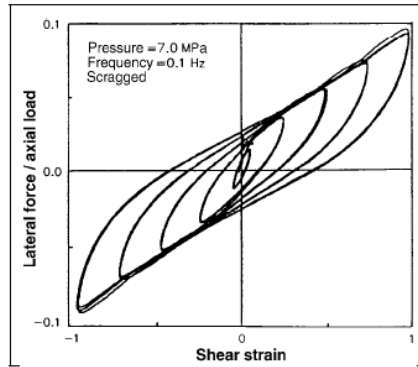


Figure C9-5 Force-Displacement Loops of a High-Damping Rubber Bearing

איור מס' 1.5.3: סכמות תכן של העמסה והורדת עומס לבולמי זעזועים מסוג HDRB, בהן עושים שימוש לתכנון מבנים מבודדים

7.5.2.2.1 Hysteretic behaviour

(1) The force-displacement relation of the isolator unit may be approximated by a bi-linear relation, as shown in Fig. 7.1, for an isolator unit i (index i is omitted)

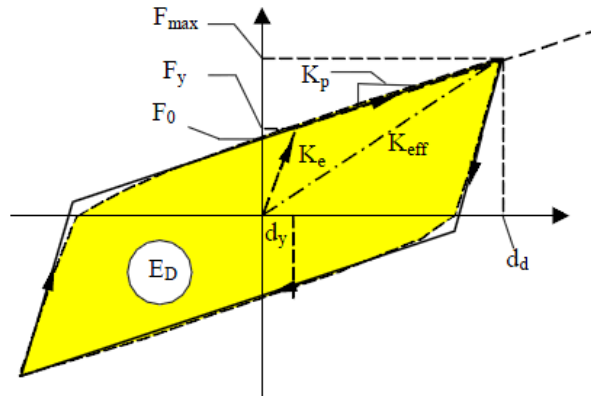
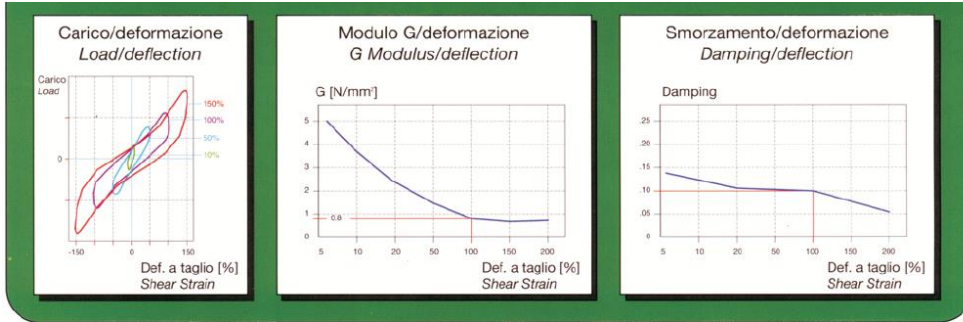


Figure 7.1: Bilinear approximation of hysteretic behaviour

בקטלוגים של יצרני בולמי זעזועים מסוג זה מוצגים מאפיינים בסיסיים של בולמים אלה (ראה למשל איור מס' 1.5.4).

איור מס' 1.5.4: מידע המוצג בקטלוגים טיפוסיים לבולמי זעזועים מסוג HDRB



HDN.A	Carico vert. Vertical load max [kN]	Deformazione Displacement max [mm]	Rigidezza orizzontale Horiz. stiffness at 100% strain [kN/mm]	Dimensioni - Dimensions Te = spessore totale gomma total rubber thk. [mm]			
				D	H	B	Te
HDN.A 300	700	112	0.71	300	177	380	80
HDN.A 400	1700	146	0.97	400	210	480	104
HDN.A 500	2900	179	1.23	500	243	580	128
HDN.A 600	4000	218	1.45	600	274	680	156
HDN.A 700	5700	252	1.71	700	326	800	180
HDN.A 800	7500	280	1.97	800	374	900	204
HDN.A 900	9500	280	2.49	900	374	1000	204
HDN.A 1000	11000	280	2.99	1000	398	1140	210
HDN.A 1100	14000	280	3.62	1100	398	1240	210
HDN.A 1200	16000	280	4.31	1200	398	1340	210

Legenda | Legend

HDS (High Damping Soft)
G=0,4N/mm² - ξ ≈10%
HDN (High Damping Normal)
G=0,8N/mm² - ξ ≈10%
HDH (High Damping Hard)
G=1,4N/mm² - ξ ≈16%

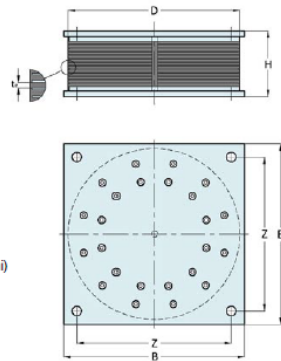
Dati tecnici | Technical Data

V_{max} Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo
Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement
V_{slu} Carico verticale in condizione sismica
Vertical load under seismic conditions
K_r Rigidezza orizzontale
Horizontal stiffness
S_{max} Spostamento di progetto
Design displacement
 ξ Smorzamento viscoso della gomma
Viscous damping of the rubber

Dati geometrici | Geometrical Data

D Diametro elastomero
Diameter of the elastomer
H Altezza totale isolatore
Overall height of the isolator
t_e Spessore elastomero
Thickness of the elastomer
B Dimensione d'ingombro dell'isolatore (nelle due direzioni)
Overall dimensions (space requirement) of the isolator (in two directions)
Z Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)
Distance between centers of anchorages (in two directions)

B = D + 50
Z = 0,75 x B



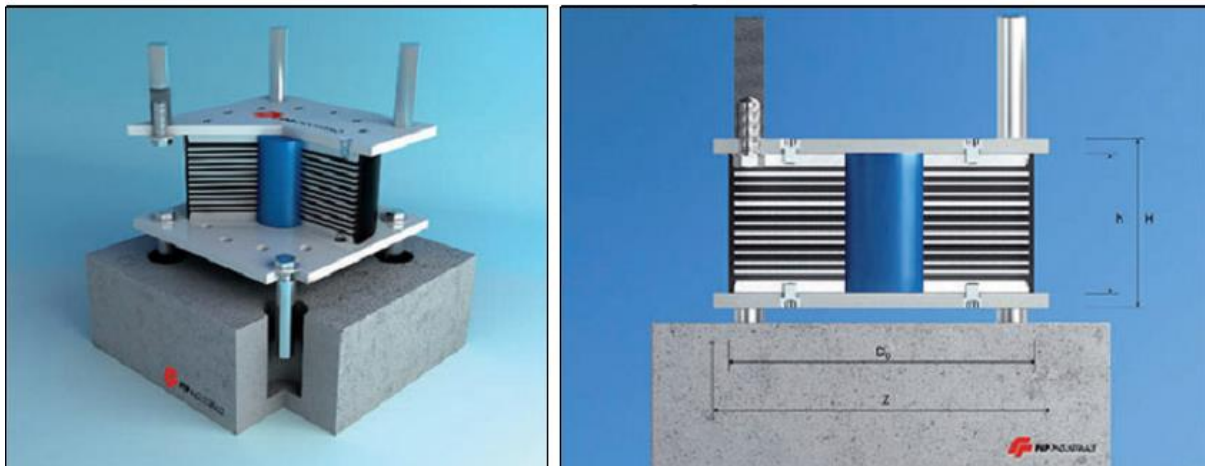
HDS	V _{max}	V _{slu}	K _r	HDN	V _{max}	V _{slu}	K _r	HDH	V _{max}	V _{slu}	K _r	H	te	S _{max}
	[kN]	[kN]	[kN/mm]		[kN]	[kN]	[kN/mm]		[kN]	[kN]	[kN/mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 650														
HDS650X65	3150	3150	2,04	HDN650X65	6350	6350	4,08	HDH650X65	11050	11050	7,15	175	65	130
HDS650X78	3600	3600	1,70	HDN650X78	7200	7200	3,40	HDH650X78	12600	12600	5,96	198	78	160
HDS650X91	3900	3900	1,46	HDN650X91	7800	7800	2,92	HDH650X91	13650	13650	5,11	217	91	190
HDS650X104	4150	3700	1,28	HDN650X104	8300	7400	2,55	HDH650X104	14525	12950	4,47	243	104	210
HDS650X117	4250	3050	1,13	HDN650X117	8500	6100	2,27	HDH650X117	14900	10800	3,97	263	117	240
HDS650X130	4400	2650	1,02	HDN650X130	8800	5300	2,04	HDH650X130	15400	9350	3,57	283	130	260
HDS650X143	4000	2250	0,93	HDN650X143	8000	4500	1,86	HDH650X143	14100	7950	3,25	303	143	290
HDS650X156	3600	1950	0,85	HDN650X156	7200	3900	1,70	HDH650X156	12700	6800	2,98	312	156	320
HDS650X169	3300	1700	0,79	HDN650X169	6600	3400	1,57	HDH650X169	11600	6000	2,75	331	169	340
HDS650X182	3000	1450	0,73	HDN650X182	6000	2900	1,46	HDH650X182	10600	5200	2,55	337	182	370
HDS650X195	2750	1300	0,68	HDN650X195	5500	2600	1,36	HDH650X195	9700	4600	2,38	355	195	390
HDS650X208	2550	1100	0,64	HDN650X208	5100	2200	1,28	HDH650X208	9000	4000	2,23	373	208	420
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 700														
HDS700X70	3650	3650	2,20	HDN700X70	7300	7300	4,40	HDH700X70	12900	12900	7,70	180	70	140
HDS700X84	4200	4200	1,83	HDN700X84	8400	8400	3,67	HDH700X84	14750	14750	6,41	204	84	170
HDS700X98	4550	4550	1,57	HDN700X98	9100	9100	3,14	HDH700X98	16000	16000	5,50	230	98	200
HDS700X112	4800	4250	1,37	HDN700X112	9600	8500	2,75	HDH700X112	16800	14900	4,81	251	112	230
HDS700X126	4950	3550	1,22	HDN700X126	9900	7100	2,44	HDH700X126	17350	12550	4,28	272	126	260

ניתן לראות כי מקדם ריסון של בולמי זעזועים אלה הוא די גבוה - כ-10%, יחד עם זאת מקדם ריסון זה לא תמיד מספק. הבעיה השנייה של בולמי זעזועים מסוג זה היא גמישות גדולה גם לעומסים אופקיים קטנים יחסית הנוצרים בתנאים יום-יומיים, כמו למשל מרוח, אשר מביאה למיקרו רעידות העלולות להפריע לשהים במבנה. לבולמי זעזועים מסוג זה קיימת גם בעיית יציבות בתזוזות אופקיות גדולות.

1.5.2 (Lead-Rubber Bearing) LRB

ניתן לשפר ביצועים קריטיים של **HDRB** (גם מקדם הריסון וגם היציבות), באמצעות הוספת מוט (מוטות) עופרת אנכי בתוך גוף בולם **HDRB** רב שכבתי. בולמי הזעזועים המשופרים שייכים לסוג **LRB** (איור מס' 1.5.5), אשר בעלי צורה זהה ומותקנים בצורה דומה לסוג **HDRB** (ראה איור מס' 1.5.5).

איור מס' 1.5.5: בולמי זעזועים מסוג LRB



מחזורים של העמסה והורדת העומס לבולמי זעזועים מסוג **LRB** מאופיינים על ידי דיאגרמות דומות לדיאגרמות לעיל עבור בולמי זעזועים מסוג **HDRB**. באיורים מס' 1.5.6 ו-1.5.7 מוצגים נתונים טיפוסיים מקטלוג עבור בולמי זעזועים מסוגים אלה.

איור מס' 1.5.6: מידע המוצג בקטלוגים טיפוסיים לבולמי זעזועים מסוג HDRB ו-LRB

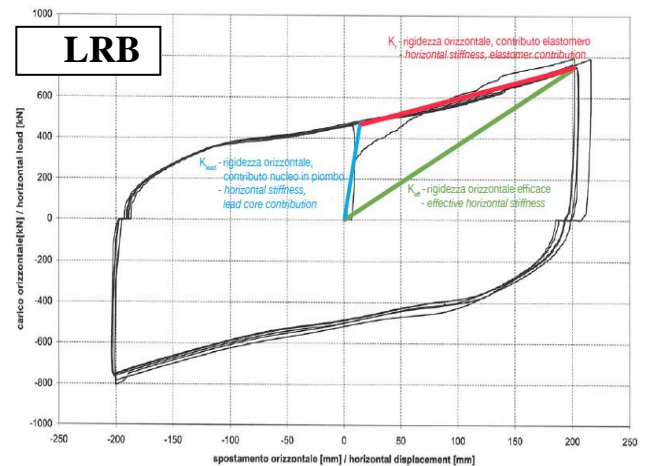
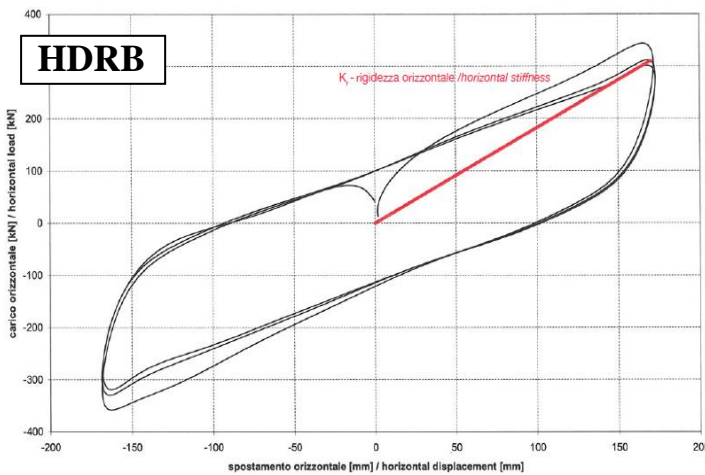
LRB

HDRB (High Damping Rubber Bearing) ו-LRB (Lead-Rubber Bearing)



Proprietà meccaniche delle mescole Mechanical characteristics

	Shore A3	Mescola / Compound			
		Normale nd / Normal nd	Morbida / Soft	Normale / Normal	Dura / Hard
		50±3	40±3	60±3	75±3
	N/mm ²	20	20	20	18
Allungamento a rottura / Tensile strain	%	600	750	600	500
Modulo di elasticità G / G Modulus	N/mm ²	0,9	0,4	0,8	1,4
Smorzamento viscoso equivalente del solo elastomero / Viscous damping of the rubber	%	4	10	10	16
Smorzamento viscoso equivalente dell'intero isolatore / Equivalent viscous damping	%	20%-40%	20%-40% (LRS) 10% (HDS)	10	16
Isolatore corrispondente / Corresponding Isolator		LRN	LRS / HDS	HDN	HDH



איור מס' 1.5.7: מידע המוצג בקטלוגים לבולמי זעזועים מסוג LRB ו-HDRB

Legenda | Legend

LRS
LRS $\xi_r = 10\%$ - G = 0,4 MPa
LRN
LRN $\xi_r = 4\%$ - G = 0,9 MPa

Dati tecnici | Technical Data

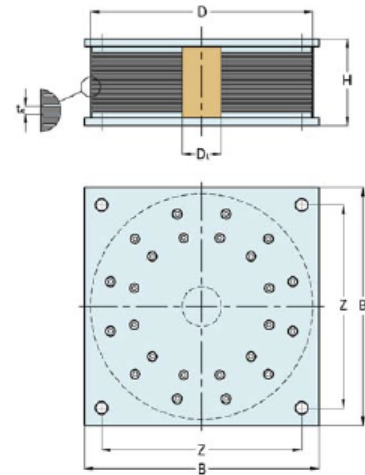
V_{max} Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo
Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement
V_{seim} Carico verticale in condizione sismica
Vertical load under seismic conditions
K_r Rigidezza orizzontale (contributo elastomero)
Horizontal stiffness (elastomer contribution)
K_{lead} Rigidezza orizz. (contr. nucleo in piombo)
Horizontal stiffness (lead core contribution)
F_y Carico di snervamento del nucleo
Yield point load for lead core
K_{eff} Rigidezza orizzontale efficace
Effective horizontal stiffness
S_{max} Spostamento di progetto | Design displacement

ξ_r Smorzamento viscoso della gomma
Viscous damping of the rubber
 β_{eff} Smorzamento efficace | Effective damping

Dati geometrici | Geometrical Data

te Spessore elastomero
Thickness of the elastomer
H Altezza totale isolatore
Overall height of the isolator
D Diametro elastomero
Diameter of the elastomer
B Dimensione d'ingombro dell'isolatore (nelle due direzioni)
Overall dimensions (space requirement) of the isolator (in two directions)
Z Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)
Distance between centers of anchorages (in two directions)

$\beta_{eff} = 28\%$
per tutti gli isolatori
for all isolators
 $B = D + 50$
 $Z = 0,75 \times B$



LRS	V _{max} [kN]	V _{seim} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	LRN	V _{max} [kN]	V _{seim} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	H [mm]	te [mm]	S _{max} [mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 300																
LRS300X48	750	650	0,57	6,43	26	0,81	LRN300X48	1450	1250	1,18	21,27	83	1,96	146	48	100
LRS300X54	800	550	0,51	5,72	26	0,72	LRN300X54	1550	1050	1,06	17,06	75	1,70	156	54	110
LRS300X60	800	450	0,46	4,25	22	0,62	LRN300X60	1600	900	0,95	15,36	75	1,54	166	60	120
LRS300X66	700	400	0,41	4,68	26	0,58	LRN300X66	1350	750	0,86	15,47	83	1,42	176	66	140
LRS300X72	650	350	0,38	4,29	26	0,54	LRN300X72	1250	650	0,79	14,18	83	1,31	175	72	150
LRS300X78	600	300	0,35	3,96	26	0,50	LRN300X78	1150	550	0,73	11,81	75	1,18	184	78	160
LRS300X84	550	250	0,33	3,68	26	0,47	LRN300X84	1050	500	0,68	10,97	75	1,10	193	84	170
LRS300X90	500	200	0,31	2,84	22	0,41	LRN300X90	950	450	0,64	10,24	75	1,03	202	90	180
LRS300X96	450	0	0,28	3,22	26	0,40	LRN300X96	850	350	0,59	10,64	83	0,98	211	96	200
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 350																
LRS350X56	1050	900	0,66	7,70	36	0,94	LRN350X56	2000	1700	1,38	24,11	110	2,24	154	56	120
LRS350X63	1100	750	0,59	5,83	31	0,81	LRN350X63	2100	1450	1,23	21,43	110	2,03	165	63	130
LRS350X70	1150	650	0,53	5,25	31	0,74	LRN350X70	2100	1250	1,10	19,29	110	1,85	176	70	140

מעיון באיורים מס' 1.5.6 ניתן לראות שיפור תכונות של בולמים HDRB, כאשר מקדם הריסון גדל לכ-30% ואף יותר.

1.5.3 בולמי זעזועים מסוג (Friction Pendulum Systems) FPS

בולמי זעזועים מסוג FPS מבוססים על מנגנון פיסי אחר ויציבים יותר בהשוואה לבולמים מסוגים LRB ו-HDRB (איורים מס' 1.5.8-1.5.10). הודות לצורת בולמי הזעזועים FPS כל תזוזה ממצב תחילי גורמת להיווצרות כוח מחזיר על ידי משקל המבנה המונח על בולמי הזעזועים, הכוחות הנוצרים ממשקל המבנה גורמים לחיכוך ולריסון הרעידות. שילוב של שני הכוחות מובא בדיאגרמה של העמסה – הורדת עומס, אשר מופיעה באיורים מס' 1.5.9 ו-1.5.10.

איור מס' 1.5.8: בולמי זעזועים מסוג FPS

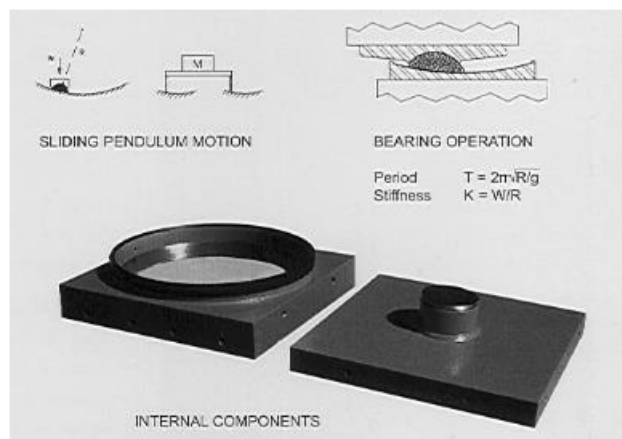


Fig. 5 Construction of FPS

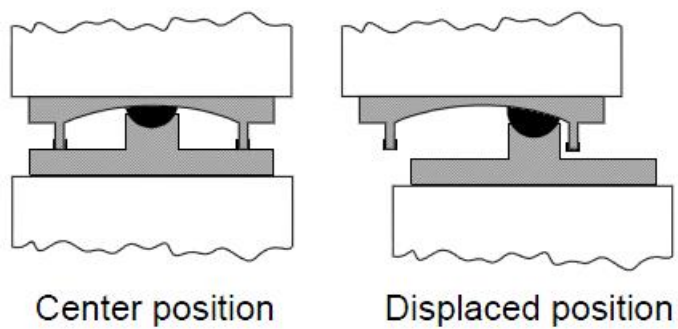


Fig.6 Motions of FPS

איור מס' 1.5.9: מודל מכאני של בולמי זעזועים מסוג FPS

7.5.2.2.4 Friction behaviour

(1) Sliding devices with flat sliding surface limit the force transmitted to the superstructure to

$$F_{\max} = \mu_d N_{Sd} \text{sign}(\dot{d}) \quad (7.1)$$

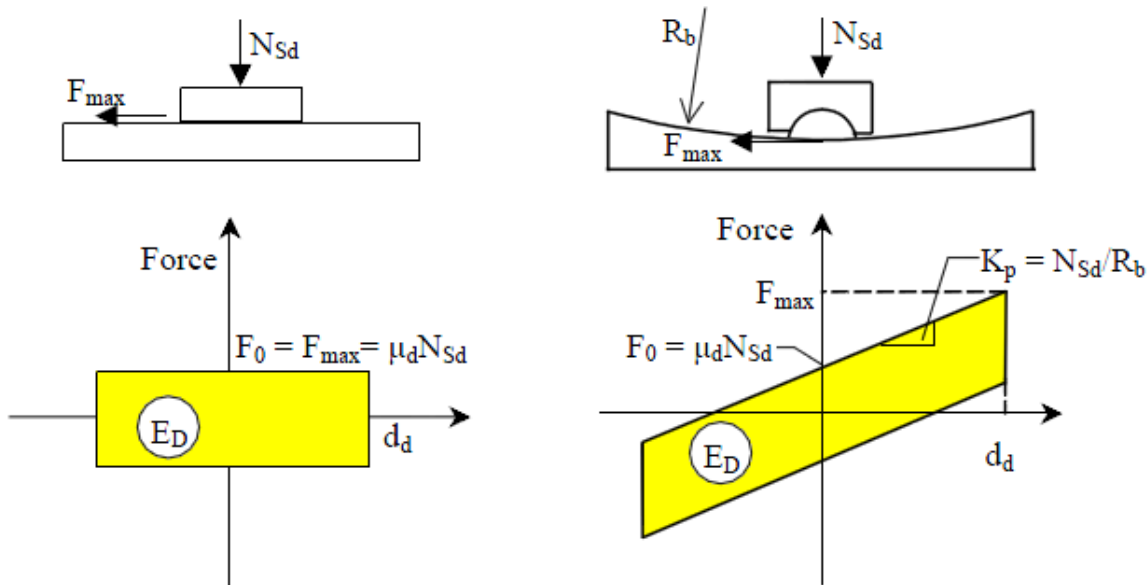
where:

μ_d is the dynamic friction coefficient

N_{Sd} is the normal force through the device, and

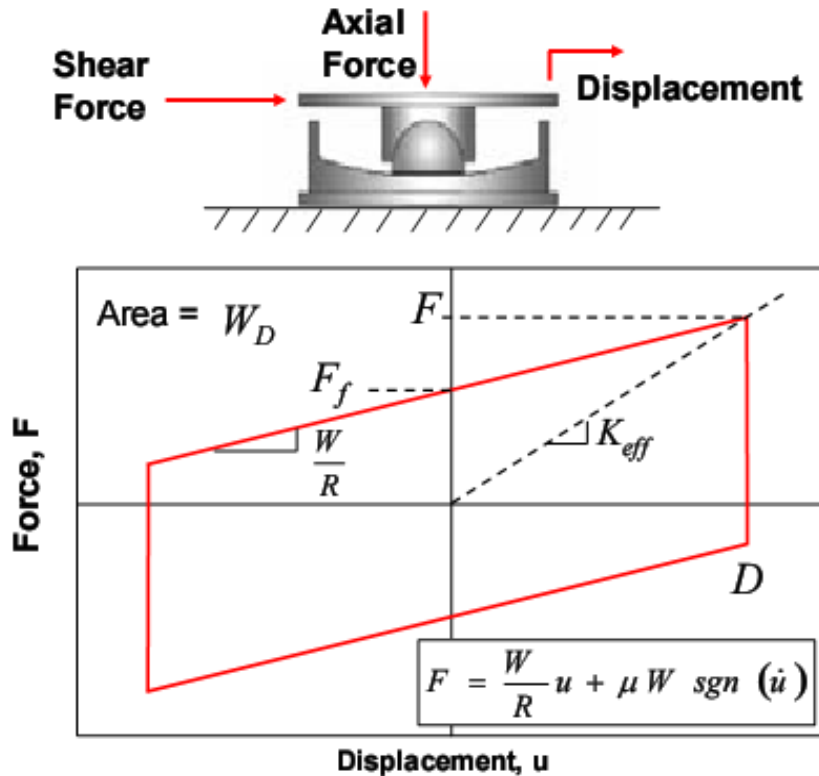
$\text{sign}(\dot{d})$ is the sign of the velocity vector \dot{d} .

Such devices however can result in substantial permanent offset displacements. Therefore they should be used in combination with devices providing adequate restoring force.



איור מס' 1.5.10: מאפיינים של מודל מכאני של בולמי זעזועים מסוג FPS

Idealized FPS Bearing Hysteresis Loop



בהתאם לכך מאפיינים דינאמיים של בולמי הזעזועים – קשיחות אופקית אפקטיבית, תקופה בסיסית אפקטיבית ומקדם ריסון אפקטיבי - מחושבים לפי הנוסחאות הבאות:

- Effective stiffness $K_{eff} = \frac{H}{D} = W\left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D}\right)$
- Effective period $T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}g}} = 2\pi \sqrt{\frac{RD}{(D + \mu R)g}}$
- Equivalent viscous damping $\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right]$

כאשר:
 W - משקל שחל על הבולם
 μ - מקדם חיכוך דינאמי

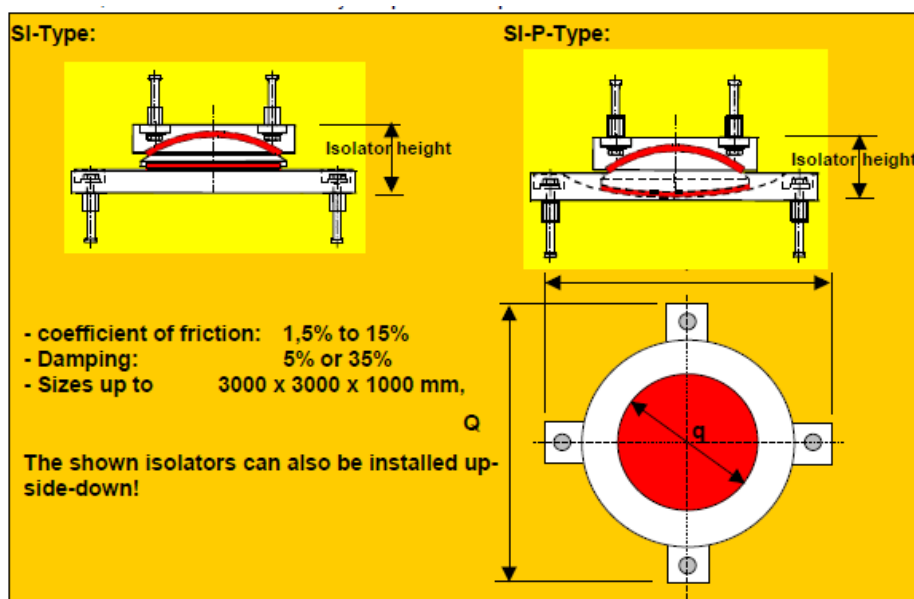
g - תאוצת הכובד

R- רדיוס של משטח העבודה התחתון של הבולם

ניתן לראות שלמרות המנגנון הפיסי אחר לגמרי ניתן להשתמש לחישוב סיסמי בדיאגרמות דומות של העמסה והורדת עומס שבהם מקדמים מחושבים דרך מאפייני הבולמים כמתואר לעיל. יש לציין שכמו לרוב בולמי זעזועים אחרים, מנגנון פיסי של ריסון רעידות הוא שונה מחיכוך צמיג ומקדם הריסון האפקטיבי (של חיכוך צמיג), בו עושים שימוש לחישוב תגובת מבנים לרעידות אדמה, מחושב בהתבסס על דרישה שכמות אנרגיית הרעידות שנבלעה (מפוזרת) למחזור רעידות אחד תהיה שווה לזו של ריסון פיסי ריאלי בפועל.

כאמור, בולמי זעזועים מסוג זה מיוצרים על ידי חברות ידועות ומאפיינים דינאמיים של הבולמים מוצגים בקטלוגים של היצרנים (ראה דוגמה באיור מס' 1.5.11).

איור מס' 1.5.11 : נתונים בקטלוג טיפוסי עבור בולמי זעזועים מסוג FPS



Vertical load* (MN)	Horizontal displacements*** d [mm]	Dimension Q of SI Q = q + d + 100 [mm]	Height of SI **	Dimension Q of SI-P [mm]	Height of SI-P ** [mm]
0,5	+/-150	544	80	544	174
1,0	+150	579	100	579	196
2,0	+/-150	628	110	628	228
3,0	+150	666	110	666	253
4,0	+/-150	698	110	698	274
5,0	+150	726	115	726	292
6,0	+/-150	751	115	751	328
7,0	+150	775	115	775	344
8,0	+/-150	796	115	796	358
9,0	+150	817	120	817	381
10,0	+/-150	836	120	836	393
11,0	+150	854	125	854	435
12,0	+/-150	872	125	872	447
13,0	+150	889	130	889	458
14,0	+/-150	905	135	905	468
15,0	+150	921	135	921	478
20,0	+/-150	992	150	992	525
25,0	+150	1055	165	1055	566
30,0	+/-150	1111	180	1111	602
35,0	+150	1164	200	1164	636
40,0	+/-150	1212	230	1212	668

* the maximum vertical load is depending on applied standard

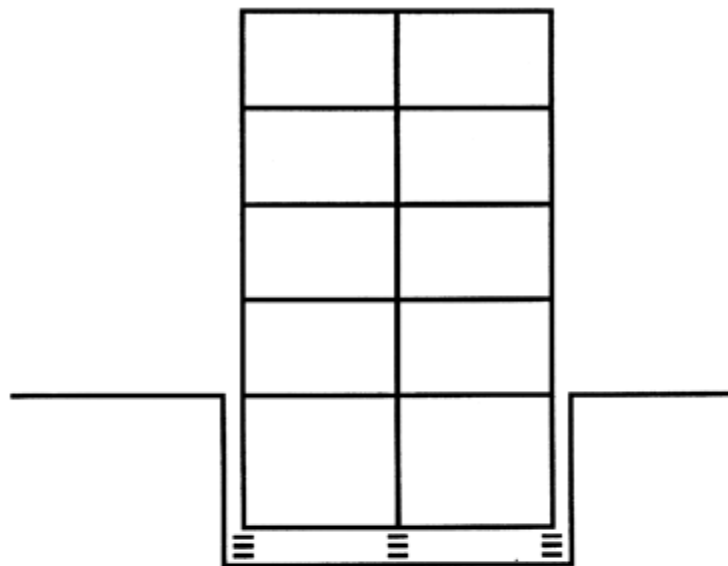
** the isolator height value is without anchor stud length, which is normally 180 mm

*** The displacement is assumed an will be individually adapted

1.6 סכמות קונסטרוקטיביות של בידוד סיסמי

לצורך הערכת עלות שימוש בבולמי זעזועים יש לקחת בחשבון עלות של בולמי זעזועים עצמם ורכיבי מבנה הנדרשים לצורך התקנה, תפקוד והחלפה של הבולמים. בעבודה זאת לא יבוצע תכנון מפורט, אך תעשה בדיקה של העלויות הרלוונטיות בהתבסס על הנתונים המופיעים בספרות המקצועית. באיורים מס' 1.6.1 – 1.6.4 מוצגות סכמות קונסטרוקטיביות טיפוסיות של מבנים המותקנים על בולמי זעזועים ואפיון חלופות מבחינה קונסטרוקטיבית - היתרונות והחסרונות.

איור מס' 1.6.1: סכימת מבנה מבודד עם בולמי זעזועים המותקנים על גבי בסיס תחתון



ADVANTAGES

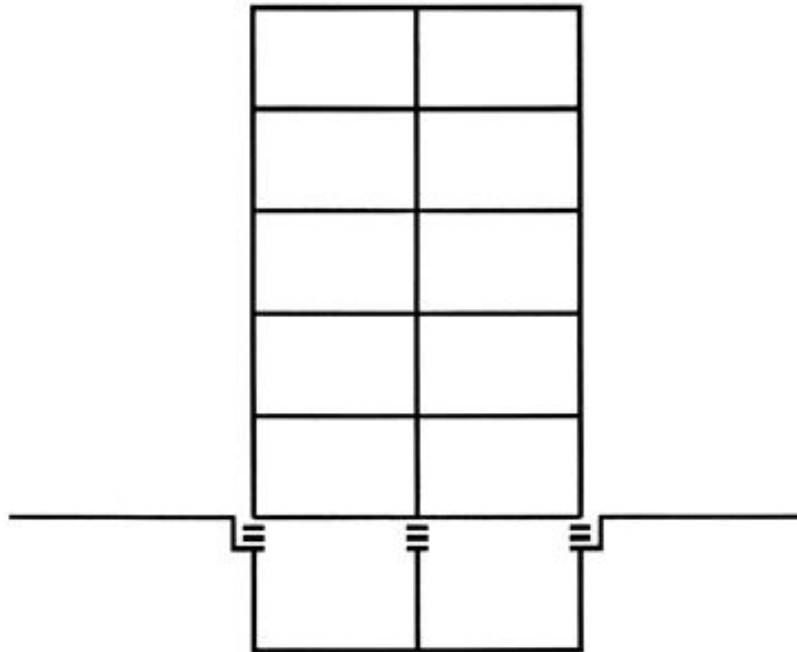
- No special detailing required for separation of internal services such as elevator and stairways.
- No special cladding separation details.
- Base of columns connected by diaphragm at isolation level
- Simple to incorporate back-up system for vertical loads

DISADVANTAGES

- Added structural costs unless sub-basement required for other purposes.
- Requires a separate (independent) retaining wall.

Bearings located in sub-basement

איור מס' 1.6.2: סכימת מבנה מבודד עם בולמי זעזועים המותקנים על עמודי יסוד



ADVANTAGES

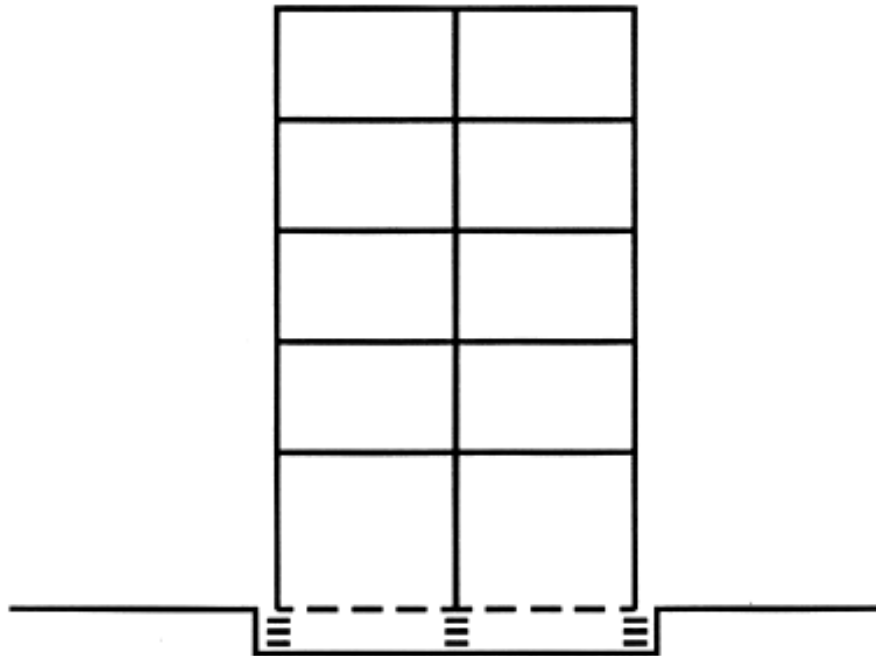
- No Sub-basement Requirement.
- Minimal added structural costs.
- Base of columns connected by diaphragm at isolation level
- Backup system for vertical loads provided by columns.

DISADVANTAGES

- May require cantilevered elevator shaft below first floor level.
- Special treatment required for internal stairways below first floor level.

Bearings located at top of basement columns

איור מס' 1.6.3: סכימת מבנה מבודד עם בולמי זעזועים המותקנים מתחת לעמודים בקומת קרקע



ADVANTAGES

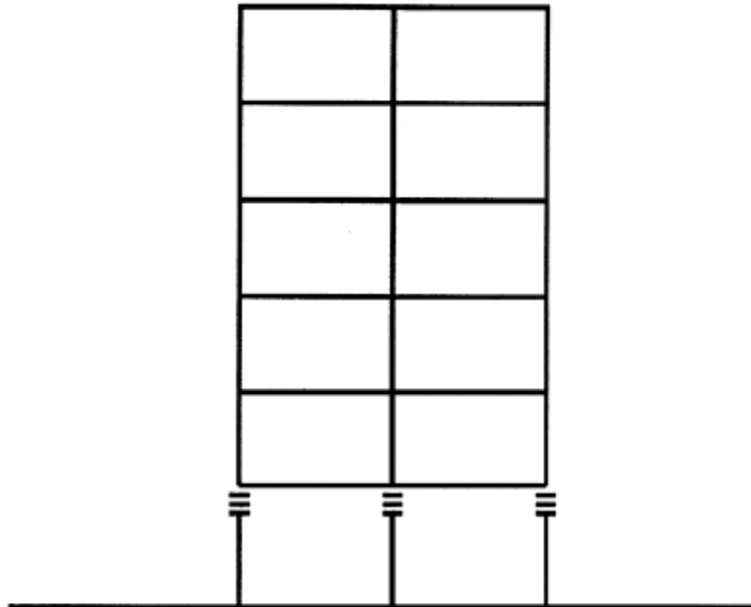
- Minimal added structural costs.
- Separation at level of base isolation is simple to incorporate.
- Base of columns may be connected by diaphragm.
- Easy to incorporate back-up system for vertical loads.

DISADVANTAGES

- May require cantilever pit.

Bearings located at bottom of first story
columns

איור מס' 1.6.4: סכימת מבנה מבודד עם בולמי זעזועים המותקנים על עמודים בקומת קרקע



ADVANTAGES

- Minimal added structural costs.
- Economic if first level is for parking.
- Backup system for vertical loads provided by columns.

DISADVANTAGES

- Special detail required for elevators and stairs.
- Special cladding details required if first level is not open
- Special details required for vertical services.

**Bearings located at top of first story
columns**

פרטי התקנה טיפוסיים של בולמי זעזועים לפי סכמות קונסטרוקטיביות לעיל מוצגים באיור מס'

1.6.5.

איורים מס' 1.6.5: פרטי התקנה טיפוסיים של בולמי זעזועים סיסמיים

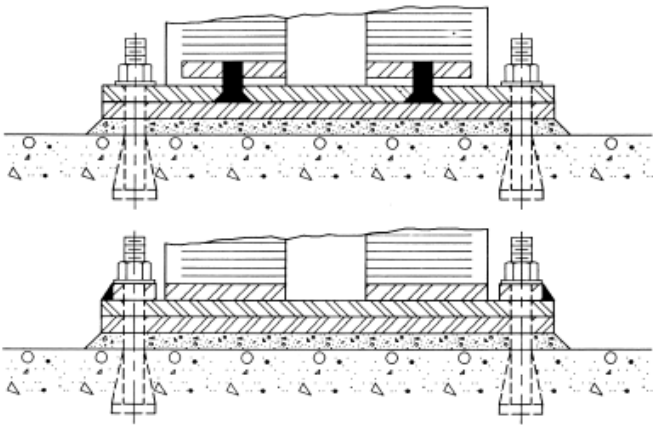


Figure 14-21. Details for replacement bearings

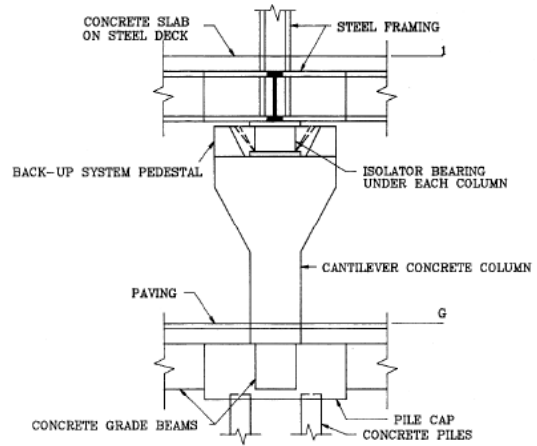


Figure 14-23. Bearings at top of columns

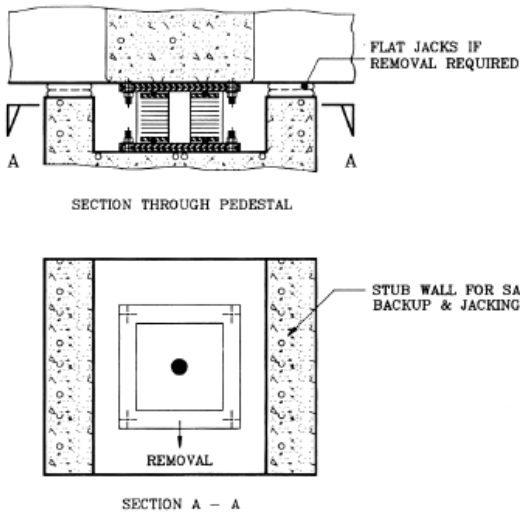


Figure 14-22. Backup and removal detail

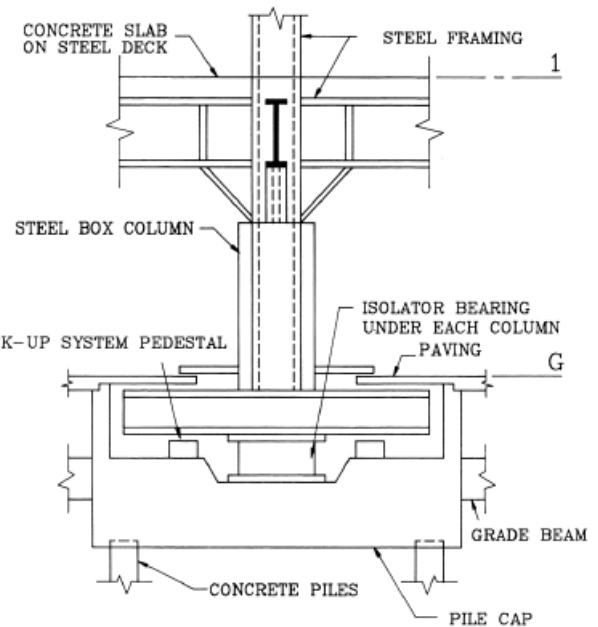


Figure 14-24. Bearings at base of columns

פרק 2

שיטות חישוב מבנים לרעידות אדמה

מאפייני רעידות אדמה באזורים שונים במדינת ישראל

2.1 בחירת שיטה לחישוב סיסמי של מבנים

להלן תיאור קצר של שיטות לחישוב מבנה לרעדות אדמה לצורך בחירת שיטה לאנליזה השוואתית של מבנים ללא ועם בידוד רעידות סיסמי, בה נעשה שימוש במחקר זה.

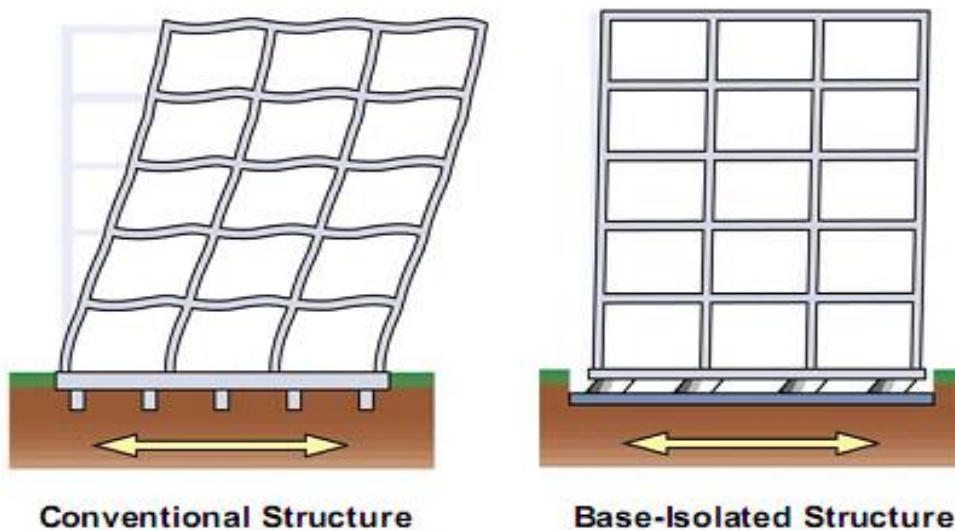
להלן ארבעה שיטות בסיסיות לחישוב סיסמי של מבנים (ראה גם 1.4.2).

2.1.1 אנליזה סטטית שקילה

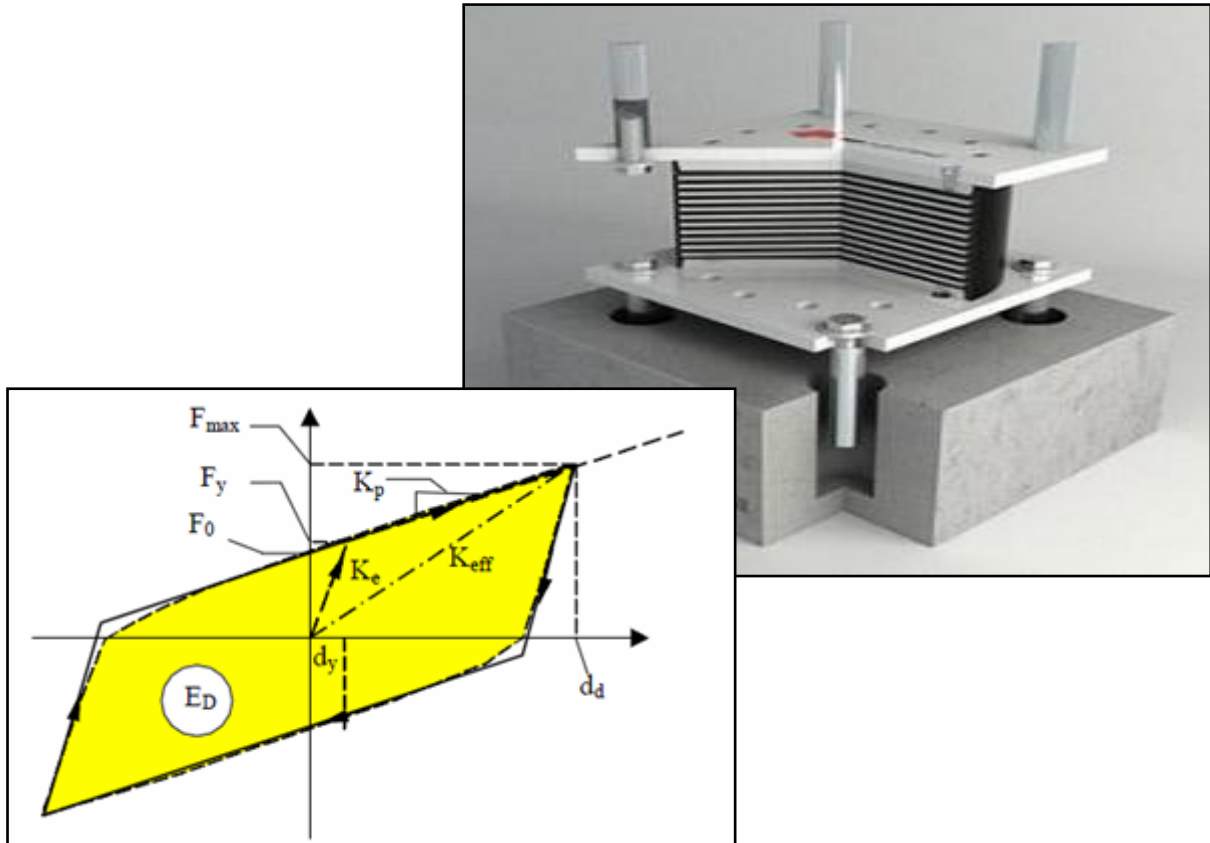
שיטה זאת מתוארת בת"י 413 בגרסה משנת 1998 ובגרסה (תיקון 3) משנת 2009. בשיטה אנליזה סטטית שקילה לא מתבצע חישוב דינאמי לא ליניארי של מבנים המופעלים על ידי רעידות אדמה. בשיטה זו מחשבים כוחות אופקיים סטטיים שקולים באמצעות מקדמים שונים, שנקבעו בהתבסס על חישובים וניסיון בתחום רעידות אדמה. באופן כזה לוקחים בחשבון את התופעות הלא ליניאריות שנוצרות בעת רעידות אדמה במבנים ריאליים, אשר מביאים לשינויים משמעותיים בסכימה מכאנית של המבנה כמערכת דינאמית, לפיזור אנרגית רעידות והפחתה משמעותית באמפליטודות תזוזה של קומות המבנה, להסטות קומתיות וכוחות גזירה באלמנטים קונסטרוקטיביים של מבנה.

השיטה, בצורה זאת או אחרת, נמצאת בשימוש במדינות שונות עקב פשטות רבה, אך קיימות הגבלות לשימוש בה, הנגזרות מתנאים, עבורם נקבעו מקדמים שעליהם מבוססת השיטה. המגבלות חלות גם על המצב בו המבנה מתוכן באמצעות בולמי זעזועים, ובעת רעידת אדמה המבנה, בניגוד לשיטה קונוונציונלית (fixed-base building), מקבל תזוזות קטנות, בעיקר בתחום אלסטי, כאשר נוצרות דפורמציות גדולות בתוך בולמי זעזועים עצמם, אשר לא ליניאריות ולא רק מגדילות את התקופה הבסיסית אלא גם גורמות לריסון רעידות (ראה איורים מס' 2.1.1 – 2.1.2, ופרק 1 לעיל).

איור 2.1.1: תנועת מבנה לא מבודד ומבודד בעת רעידת אדמה



איור מס' 2.1.2: בולם זעזועים מסוג HDRB וסכמת תכן של העמסה והורדת עומס לבולמים

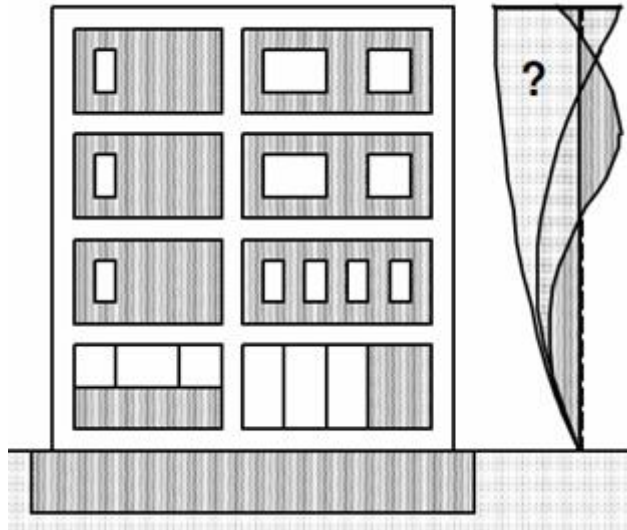


כתוצאה מכך אנליזה סטטית שקילה לא מתארת בצורה נכונה עבודה של מבנים מבודדים, כי נועדה לחישוב סכמות קונסטרוקטיביות אחרות ומבוססת על מקדמים שנקבעו עבור סכמות אלה. כך למשל, לפי שיטה סטטית שקילה תופעות פיזור אנרגיה במערכת מתוארת באמצעות מקדמי הפחתת כוחות סטטיים שקולים, המבוססים על מנגנון אחר של פיזור אנרגיית רעידות במבנה (עקב מפרקים פלסטיים), וחישוב לפי שיטה זאת אינו מאפשר לקחת בחשבון מנגנון לא ליניארי של עבודת הבולמים וגם ריסון רעידות בהם.

2.1.2 אנליזה מודלית

אנליזה מודלית מהווה בפועל שיטה משופרת של אנליזה סטטית שקילה לצורך הרחבת תחום שימוש של שיטת החישוב ושיפור בדיוק חישובים ותכנון. כמו בשיטה סטטית שקילה, בשיטה מודלית לא מבצעים חישובים לא ליניאריים של מבנה, אלא מתבססים על מקדמים שנקבעו מראש. החישוב הדינאמי מתבצע רק במסגרת תחום ליניארי כדי לקבוע צורות ותדרים עצמיים של מבנה. בשיטה זאת, בניגוד לשיטה סטטית שקילה, אשר מהווה בפועל שיטה מודלית, המתייחסת למודת בסיסית אחת, ניתן לקחת בחשבון תגובה של מבנה בתדירויות נוספות לפי צורות השייכות למודות רעידות עצמיות נוספות (איור 2.1.3).

איור 2.1.3: מודות רעידות עצמיות של מבנה בשיטה מודלית



משום כך, השיטה המודלית מהווה בפועל אחת מהשיטות הסטטיות, כמו שיטה סטטית שקילה, שבה בצורה עקיפה, לוקחים בחשבון דפורמציות פלסטיות במבנה. מסיבות אלה (ראה הסבר לעיל) שיטה זאת אינה מתאימה למחקר זה.

2.1.3 אנליזת Pushover

שיטת pushover מהווה שיפור של שיטה סטטית שקילה ומהווה עדיין סוג של חישוב קווי סטטי. בשיטה זאת צעד-צעד מחשבים פרמטרים בסיסיים המתארים את מצב המבנה. בכל צעד בודקים מתחים במרכיבים קונסטרוקטיביים של המבנה וקובעים נקודה שותפת בעקומות מתח – דפורמציה של בטון או מתכת. גישה כזאת מאפשרת חישוב תגובת המבנה לרעידות אדמה בהתחשב לתופעות לא ליניאריות במרכיבים קונסטרוקטיביים של המבנה. קיימות מודיפיקציות שונות של שיטה זאת (static pushover analysis, static adaptive pushover analysis) ופרוצדורות ספרתיות שונות לחישוב מצב של מבנה בכל כיוון העמסה ברעידת אדמה. חישובים מסוג זה הם מורכבים ומבוצעים באמצעות תכנות מקצועיות שונות.

שיטה pushover מאפשרת לעשות אנליזה סיסמית של מבנים הרבה יותר מושלמת, מאשר שיטה סטטית שקילה או שיטה מודלית, ומשתמשים בה לתכנון מבנים מסוגים שונים. יחד עם זאת, כיום קיימת שיטה מתקדמת יותר לתכנון סיסמי של מבנים - חישוב מרישום התאוצות (Displacement-Based Seismic Design), בה מבצעים אנליזה דינאמית מלאה, ללא הנחות שונות ומגבילות.

2.1.4 אנליזה דינאמית מרישום התאוצות (Displacement-Based Seismic Design)

אנליזה דינאמית מרישום התאוצות היא השיטה המורכבת, המלאה והגמישה מכל השיטות המתוארות לעיל ומאפשרת לבצע חישוב דינאמי לא ליניארי בהתחשב בכל הגורמים החשובים ללא הנחות עקרוניות כלשהן. השיטה מבוססת על רישום תאוצות רעידות אדמה וחישוב דינאמי של מבנים המופעלים על ידי רעידות האדמה אלה. השיטה מאפשרת לבצע חישוב סיסמי של מבנה ללא הנחות תחילה מגבילות, לקחת בחשבון התנהגות לא ליניאריות של בטון מזוין, מבני פלדה ועוד, כולל אמצעים (אלמנטים) שונים הנועדים להפחתת תזוזות המבנה בעת רעידות אדמה וגם ולכלול בחישוב בולמי זעזועים עליהם מונח המבנה, בהתחשב בתכונות לא ליניאריות של בולמי זעזועים עצמם. השיטה היא המתקדמת ביותר ובעתיד לפי הערכה של מדענים המובילים בתחום בעולם, תהפוך לשיטה סטנדרטית לתכנון מבנים.

מסיבות לעיל במחקר זה נעשה שימוש באנליזה דינאמית מרישום תאוצות.

קיימים מודלים ממוחשבים רבים ותכנות ידועות, הבנויות על מודלים אלה, לחישוב סיסמי של מבנים לפי אנליזה דינאמית מרישום תאוצות, אשר כוללים גם אופציה לחישוב של מבנים מבודדים. החישובים לפי שיטה זאת הם מורכבים מאוד ומבוצעים באמצעות תכנות (מודלים) FEM ממוחשבות או שילוב של מודלים שונים לאלמנטים שונים של מבנה (ראה להלן). קיים מספר תכנות ידועות מסוג זה כמתואר בסעיף 1.4.3 לעיל, כאשר המודלים המתאימים למחקר זה הינן תכנות המתמחות והנועדות לאנליזה כללית של מבנים המופעלים על ידי רעידות אדמה. תכנות אלה:

- * מאפשרות להפעיל אקסלרוגרמה של רעידות האדמה על הסלע ועל הקרקע עליהם ממוקם המבנה. משום כך ניתן לעשות חישוב סיסמי של תגובת מבנים מסוגים שונים לרעידות אדמה הצפויות באזורים שונים במדינת ישראל, כולל רעידות אדמה לכיוון אופקי אשר מתואמות לצורת תגובה נורמטיבית (תאוצת תכן ספקטרית לפי ת"י 413).
- * כוללות אחד או מספר מודולים המממשים שיטות חישוב דינאמיות ליניאריות ולא ליניאריות שונות.
- * מאפשרות לבנות מודלים דו-ותלת-ממדיים עם מספר רב של דרגות חופש, כך שניתן לעשות מודלים עבור מבנים ריאליים רב קומתיים עם מספר רב של מפתחים לכל כיוון.
- * מאפשרות לחשב תגובת מבנים גם במצב ללא בולמי זעזועים (fixed-base building) ומבנים מבודדים (base-isolated buildings) בהתחשב למאפיינים (מודלים) של בולמי זעזועים ריאליים, אשר עובדים בתחום אלסטי וגם בתחום לא ליניארי (אלסטו-פלסטי).

במחקר זה נעשה שימוש בשיטה (תוכנה) יפנית Stera 3D, אשר נבחרה לאחר בדיקה השוואתית של שיטות שונות בהיבט התאמה למטרת המחקר. השיטה מתוארת בפרק הבא.

בשלבם הבאים של העבודה ייעשה חישוב דינאמי השוואתי של מבנים לא מבודדים ומבודדים באמצעות אנליזה דינאמית מרישום תאוצות. בהתאם לכך, כשלב ראשון נוצרה "משפחת" אקסלרוגרמות רעידות אדמה ששימשה לבדיקת המבנים הנחקרים.

2.2 שיטת סינתזה של רעידות אדמה

2.2.1 דרישות כלליות לסינתזת רעידות אדמה

בהתאם למטרת העבודה נעשתה בדיקה של היבטים שונים של שימוש בבולמי זעזועים סטנדרטיים עבור מבנים טיפוסיים באזורים שונים במדינת ישראל, וזאת בתאום עם דרישות אשר נקבעו בת"י 413. בהתאם לכך, הוגדרו מאפייני הקרקע (פני הקרקע) עבור רעידות אדמה הפועלות על המבנה, אשר עומדות בדרישות הבאות:

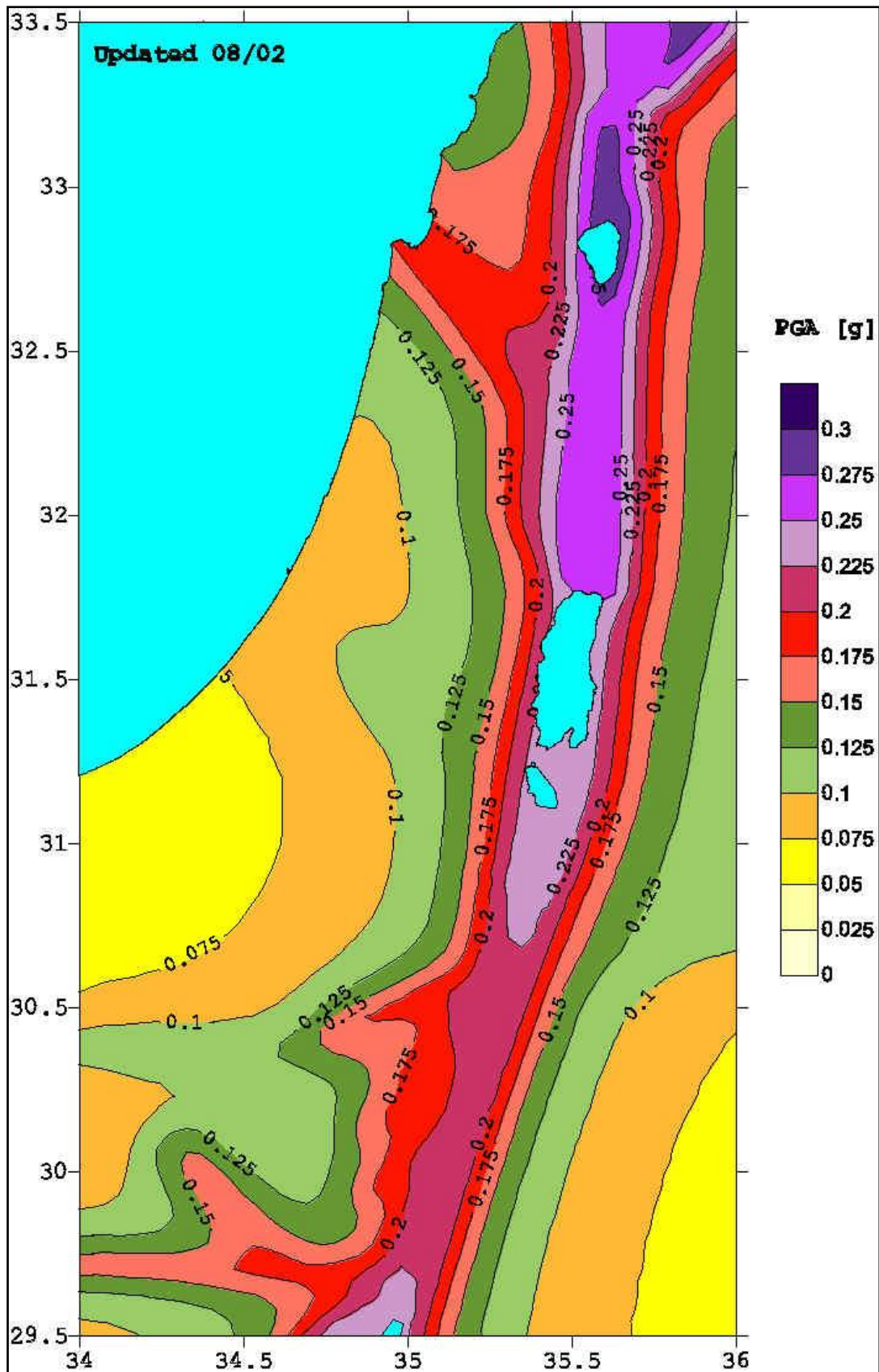
- * לכל אזור הוכנה "משפחה" מייצגת של אקסלרוגרמות, בהתאם לספרות מקצועית הממליצה כי לכל אתר נבדק תהיו 5 אקסלרוגרמות לפחות.
- * כל אחת מאקסלרוגרמות נבחרה מבסיסי נתונים ידועים, אשר נרשמו עבור תנאים דומים מבחינת סוג הקרקע, סוג ועוצמת (מגניטודה) הרעידות, עומק אפיצנטר ומרחק ממנו.
- * מאחר ואקסלרוגרמות מופעלות ישירות על מבנה, התאוצה האופקית המרבית של אקלרוגרמות בכל "משפחה" נבחרה בהתאם לגודל של מקדם תאוצה חסר ממד Z (ביחס לכבידה, g) המוגדרת בנספחיו (מפה או טבלאות) של ת"י 413 וגם בהתאם למקדם השתית המוגדר בת"י 413 לאתר הנתון.
- * תגובה של מתנד עם מקדם ריסון של 5% לכל אחת מאקסלרוגרמות, קרוב ככל הניתן, לצורת תאוצת תכן ספקטרי המוגדרת בת"י 413.

2.2.2 תיאור אתרים

2.2.2.1 גודל של תאוצה אופקית מרבית Z

תאוצות אופקיות מרביות ($a_{h,max}$ או $Z = a_{h,max} / g$) על סלע עקב רעידות אדמה לפי תחזית שלגבייה קיימת הסתברות של 10%, שתאוצה חזקה ממנה תתרחש לפחות פעם אחת בתוך תקופה של 50 שנה (זמן חזרה של 475 שנה), מוצגות בנספח לת"י 413. מפת מקדם התאוצה חסר ממד Z על סלע מוצגת באיור מס' 2.2.1.

איור 2.2.1: מפת מקדם התאוצה התאוצה האופקית Z (חסר ממד) על סלע במדינת ישראל
(נתוני המכון התקנים הישראלי)



מעיון במפה לעיל (ראה גם טבלאות בנספחים לת"י 413) ניתן לראות שלמדינת ישראל מקדם תאוצה Z נע בתחום 0.05-0.3, כאשר הערים הגדולות ממוקמות באזורים עבורם התאוצה תהיה כמפורט בטבלה מס' 2.2.1. כמו כן, ניתן לראות, כי התאוצות המרביות צפויות באזורים שונים (כולל טבריה ואילת) בהם מקדם התאוצה Z מגיעה ל-0.25. בהתאם לכך בעבודה זאת נעשתה בדיקה של תגובת מבנים עם ובלי בידוד סיסמי עבור אזורים בהם מקדם תאוצה על סלע Z יהיה 0.1, 0.15, 0.20 ו-0.25.

טבלה מס' 2.2.1: מקדם התאוצה האופקית על סלע עבור ערים שונות במדינת ישראל

תאוצה, Z	עיר
0.1	תל אביב
0.15	ירושלים
0.2	חיפה
0.25	טבריה, אילת

2.2.2.2 סוגי הקרקע

סוג הקרקע משפיע גם על צורת רעידות אדמה וגם על מקדם השתית, כמוגדר בת"י 413.

סיווג הקרקעות לעניין תכנון סיסמי מוצג בת"י 413 משנת 1998 (טבלה 1) בו הקרקעות מסווגות לארבעה סוגים S1-S4, כאשר סוג הקרקע הנפוץ הינו קרקע S3 שמתייחס לקרקעות בהן מהירות גלי גזירה נעה בתחום 200-400 מ' לשנייה. בתיקון 3 של התקן משנת 2009 מוגדר סיווג שונה של הקרקעות, כשהקרקעות הנפוצות בעלות אותן מהירויות גלי גזירה, שייכות לסוג D (גיליון תיקון 3 ת"י 413 טבלה מס' 1).

במסגרת העבודה חישובים סיסמיים בוצעו עבור קרקעות הנפוצות (S3 לפי ת"י 413 משנת 1998 ו-D לפי תיקון 3), אשר שימשו גם לקביעת מקדם השתית לחישוב תאוצה על פני הקרקע וגם לסינתזת רעידות האדמה לכל אתר בנפרד.

2.2.3 סוג רעידות אדמה

בהתאם למידע הקיים, מקורות רעידות האדמה הצפויות בארץ (Fault type) שייכות בעיקר לסוג Strike-Slip. סינתזת רעידות האדמה לכל אתר נערכה עבור סוג זה של מקור רעידות אדמה.

2.2.4 עוצמת רעידות אדמה

סינתזה של רעידת אדמה בוצעה עבור מגניטודות 4-6.5 הצפויות בארץ.

2.2.5 מרחק בין מבנים לבין אפיצנטר של רעידות האדמה

תאוצות מרביות אופקיות של הקרקע נוצרו למצב בו אפיצנטר הרעידות יהיה במרחק של 5-30 ק"מ. סינתזת רעידות האדמה לכל אתר נעשתה עבור מרחקים אלה מאפיצנטר.

2.2.6 שיטת סינתזה של רעדות אדמה

ניתן לסנתז רעידות אדמה בארץ בהתבסס על עקומות תאוצת תכן ספקטרית לפי ת"י 413 ובסיסי נתונים על רעידות אדמה שהתרחשו בעבר ונבנו על ידי גיאופיסיקאים במדינות שונות. בסיסי הנתונים הם ממוחשבים וככלל כוללים כלים, המאפשרים לעבד ולסווג את אקסלרוגרמות לפי קריטריונים שונים ולמטרות שונות בהתחשב לסוג של מקור רעידות האדמה, עוצמתן, ופרמטרים אחרים המצויינים לעיל.

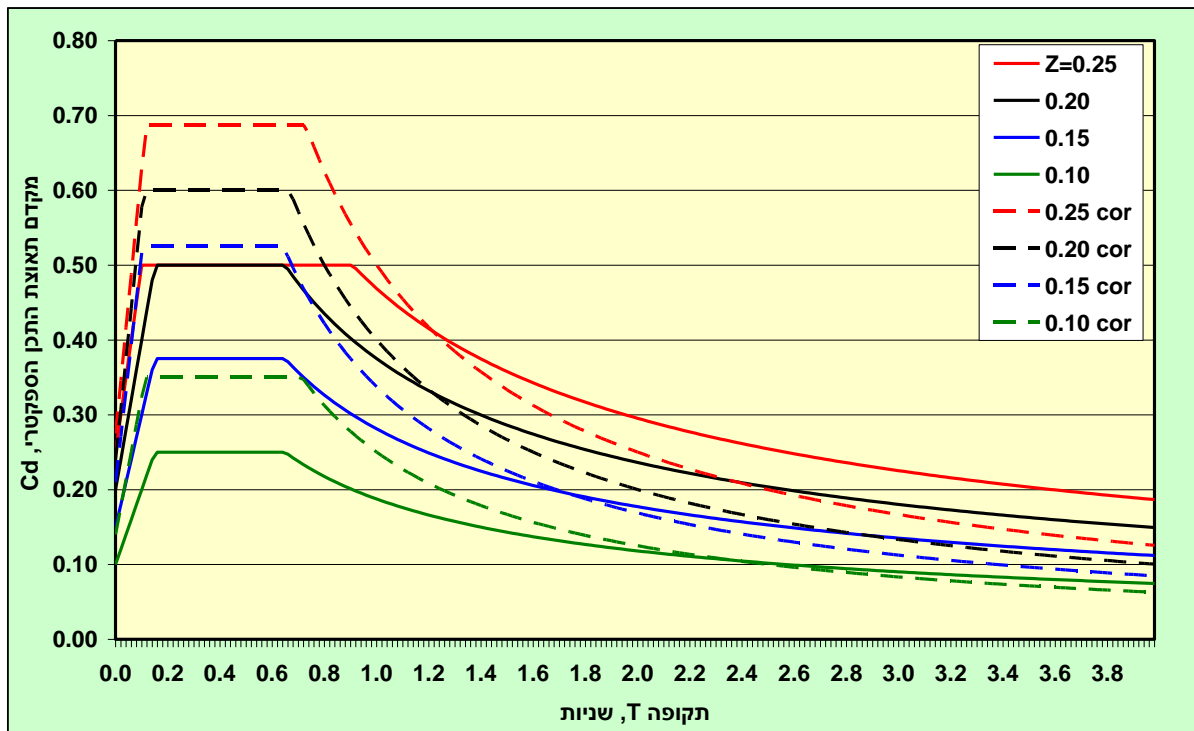
בעבודה זאת נעשה שימוש בבסיס נתונים של PEER Center - PEER Ground Motion Database, Berkely, אשר מאפשר לבחור מבסיס הנתונים, תוצאות שנרשמו בעבר בעת רעידות אדמה במקומות שונים בעולם, המתואמות ביותר לקריטריוני חיפוש.

לאחר בחירת אקסלרוגרמות מבסיס הנתונים של PEER Ground Motion Database Center נערכה עריכה ואופטימיזציה שלהם לכל אתר ואתר להתאמה מרבית של תגובת המבנה (response spectrum), המופעל עלי די אקסלרוגרמות, לעקומה של תאוצת תכן ספקטרית המוגדרת בת"י 413. ניתוח ואופטימיזציה של אקסלרוגרמות בוצעו באמצעות תכנה ידועה Seismomatch.

2.2.7 תאוצת תכן ספקטרית לפי ת"י 413

גרפים של מקדם תאוצת התכן הספקטרית Cd לפי ת"י 413 לגרסאות משנת 1998 ו-2009 מוצגים באיור מס' 2.2.2 עבור מקדם תאוצה האופקי על סלע Z, 0.1, 0.15, 0.2 ו-0.25 לסוג קרקע S3 לפי גרסת התקן משנת 1998 ו-D לפי גרסתו משנת 2009. בהתאם למטרת הסינתזה מקדם חשיבות יהיה 1, ומקדם הקטנה מתקבל כ-1, כי הקטנת הכוחות מחושבת במהלך החישוב הלא-ליניארי עצמו.

איור 2.2.2: גרפים של מקדם תאוצת התכן ספקטריית Cd



הקווים המקוטעים מתייחסים לגרסת התקן משנת 2009. ניתן לראות כי התקן המעודכן (2009) מגדיר תאוצות גבוהות בצורה משמעותית מתאוצות לפי גרסת התקן משנת 1998. לאור המצב שזכת שתי גרסאות התקן מאושרות לשימוש והיתרונות של בידוד הרעידות הסיסמי גדלים עם עוצמת רעידות אדמה (ראה להלן), במחקר זה נעשה שימוש בתאוצות התכן לפי גרסת התקן משנת 1998. עקומות להלן משמשות כספקטרום-מטרה (target spectrum) לסינתזה רעידות אדמה עבור כל אחד מהאתרים.

2.3 סינתזת אקסלרוגרמות

2.3.1 אתרים Z=0.1

מתוך 30 אקסלרוגרמות, המוצעות על ידי בסיס הנתונים PEER Ground Motion Database Center (להלן PEER) לפי קריטריונים לחיפוש לעל, נבחרו 5 המתאימות ביותר.

באיור מס' 2.3.1 מוצגת דוגמת חלון, בו מופיעים קריטריונים לחיפוש ובחירה, כולל מקדם תאוצת התכן הספקטרי של תגובת המבנה לאקסלרוגרמות, רכיבי התאוצה לאחת מאקסלרוגרמות הנבחרות לכיוון אופקי לאורך השבר ובניצב לשבר.

איור 2.3.1: חלון של בסיס נתונים PEER

Edit Search

PEER-NGA Spectrum

Magnitude : 4,6 (min,max)

Fault Type : Strike Slip(SS)

D9-95(sec) :

R_{JB}(km) : 5,30 (min,max)

R_{rup}(km) : 5,30 (min,max)

Vs30(m/s) : 200,400 (min,max)

Pulse : Any Record

Scaling : [learn more](#)

Single Period :

Factor Limit : (min,max)

T (sec) :

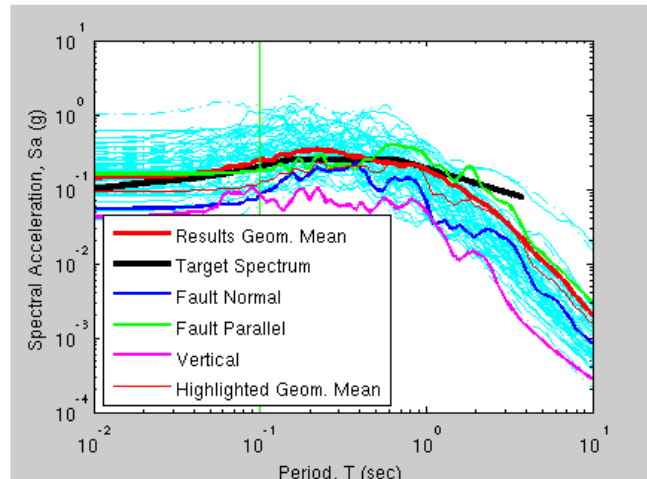
[Additional Search Options](#)

Weight Function

Period : 0.1 10 (min max)

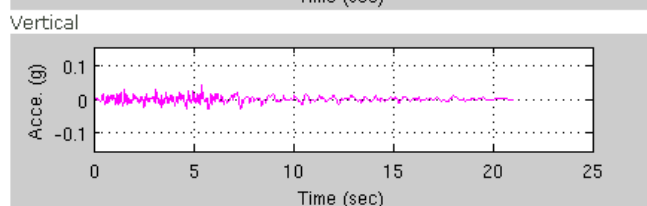
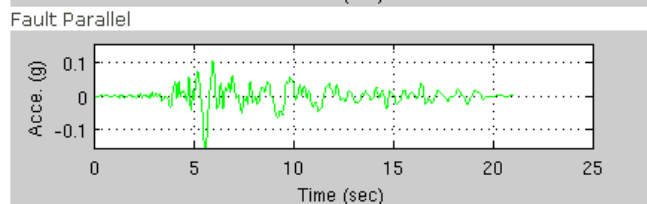
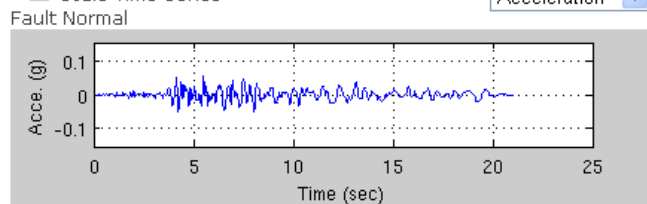
Weight : 1 1 (wt. wt.)

[Show chart controls](#)



Zoom In Time (min,max)

Scale Time Series Acceleration



*Displayed time series is highlighted in yellow below

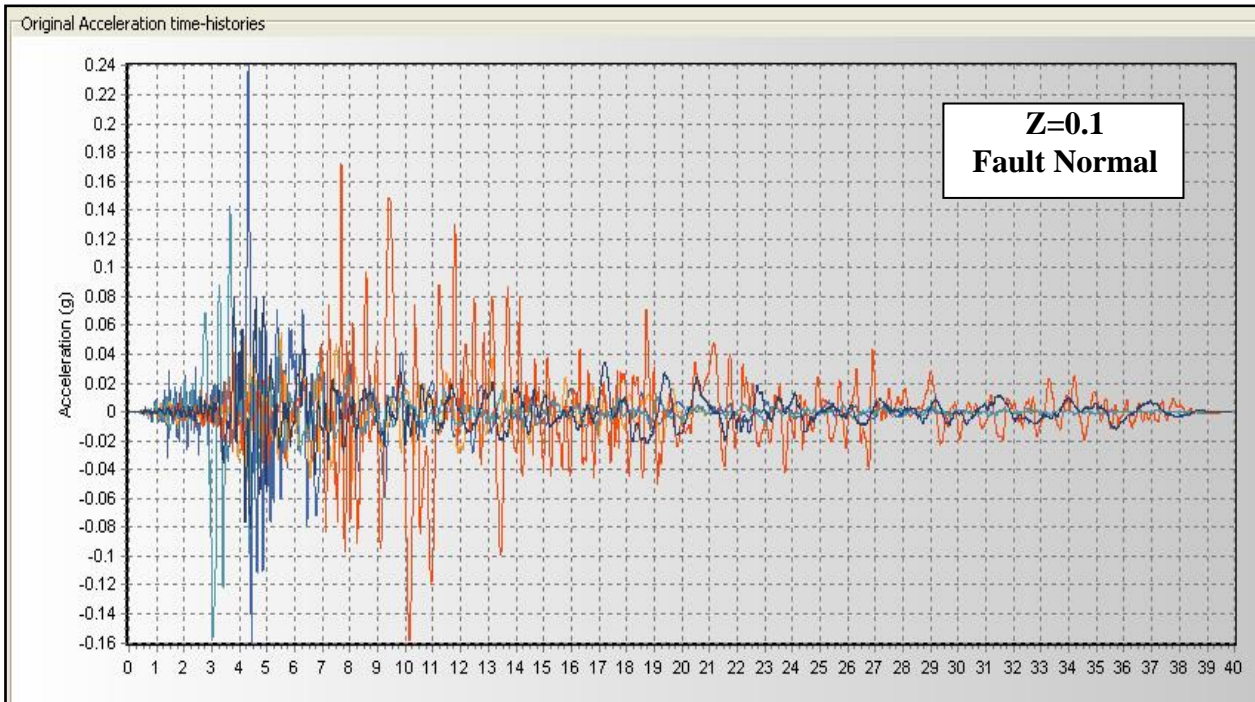
באיור מס' 2.3.2 מופיע חלון בו מסומנים אירועי רעידות אדמה אשר שייכים ל-5 אקסלרוגרמות המתאימות.

באיורים מס' 2.3.3 ו-2.3.4 מופיע רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים של PEER וספקטרום תגובת המבנה לאקסלרוגרמות.

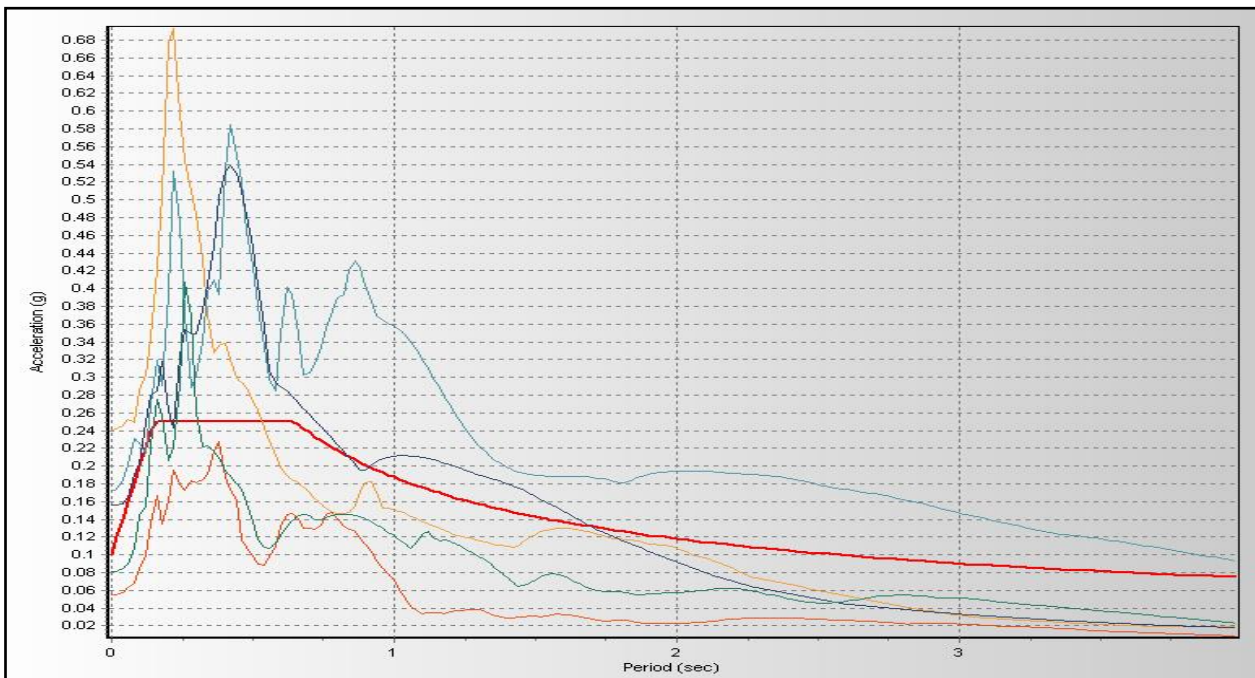
איור 2.3.2: חלון של בסיס נתונים PEER עם תיאור אירועי רעידות אדמה המוצעים 5-1
אירועים שנבחרו (מסומנים)

<input type="checkbox"/>	Result#	Comp.	NGA#	MSE	ScaleF	Pulse	TP(s)	D5-95(s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism
<input checked="" type="checkbox"/>	1	GM	316	0.2654	1.0000	1 1	3.6 4.2	17.3 15.5	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	2	GM	214	0.2957	1.0000	0 0	-- --	14.0 10.5	Livermore-01	1980	San Ramon - Eastman Kodak	5.80	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	3	GM	544	0.3030	1.0000	0 0	-- --	20.9 21.8	Chalfant Valley-01	1986	Bishop - LADWP South St	5.77	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	4	GM	212	0.3290	1.0000	0 0	-- --	7.0 13.2	Livermore-01	1980	Del Valle Dam (Toe)	5.80	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	5	GM	502	0.4274	1.0000	0 0	-- --	5.1 9.4	Mt. Lewis	1986	Halls Valley	5.60	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	6	GM	498	0.4336	1.0000	0 0	-- --	21.3 16.1	Hollister-04	1986	Hollister Diff Array #1	5.45	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	7	GM	148	0.4835	1.0000	0 0	-- --	9.6 7.9	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #3	5.74	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	8	GM	147	0.5574	1.0000	0 0	-- --	8.4 3.7	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.74	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	9	GM	320	0.6220	1.0000	0 0	-- --	9.1 6.8	Mammoth Lakes-10	1983	Convict Creek	5.34	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	10	GM	547	0.6288	1.0000	0 0	-- --	12.9 8.5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	11	GM	562	0.6331	1.0000	0 0	-- --	17.4 14.5	Chalfant Valley-04	1986	Bishop - LADWP South St	5.44	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	12	GM	499	0.6488	1.0000	0 0	-- --	20.1 19.1	Hollister-04	1986	Hollister Diff Array #3	5.45	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	13	GM	314	0.7687	1.0000	0 0	-- --	8.1 8.6	Westmorland	1981	Brawley Airport	5.90	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	14	GM	1099	0.8516	1.0000	0 0	-- --	6.9 8.3	Double Springs	1994	Woodfords	5.90	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	15	GM	154	0.9028	1.0000	0 0	-- --	13.2 13.8	Coyote Lake	1979	San Juan Bautista, 24 Polk St	5.74	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	16	GM	248	0.9644	1.0000	0 0	-- --	6.8 5.2	Mammoth Lakes-06	1980	Convict Creek	5.94	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	17	GM	223	0.9687	1.0000	0 0	-- --	8.5 5.9	Livermore-02	1980	San Ramon - Eastman Kodak	5.42	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	18	GM	239	0.9992	1.0000	0 0	-- --	8.4 7.5	Mammoth Lakes-03	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.91	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	19	GM	250	1.2367	1.0000	1 0	1.1 --	7.2 6.5	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	20	GM	238	1.2669	1.0000	0 0	-- --	12.8 9.2	Mammoth Lakes-03	1980	Long Valley Dam (L Abut)	5.91	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	21	GM	204	1.3178	1.0000	0 0	-- --	2.0 6.5	Imperial Valley-07	1979	El Centro Array #6	5.01	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	22	GM	237	1.3877	1.0000	0 0	-- --	11.6 7.3	Mammoth Lakes-03	1980	Long Valley Dam (Downst)	5.91	Strike-Slip
<input type="checkbox"/>	23	GM	1853	1.4082	1.0000	1 0	0.73 -	3.3 3.6	Yountville	2000	Napa Fire Station #2	5.00	Strike-Slip

איור מס' 2.3.3 : $Z=0.1$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים PEER



איור מס' 2.3.4 : $Z=0.1$. ספקטרום תגובת מבנה לרכיב אופקי, אקסלרוגרמות בניצב לשבר. בסיס נתונים PEER

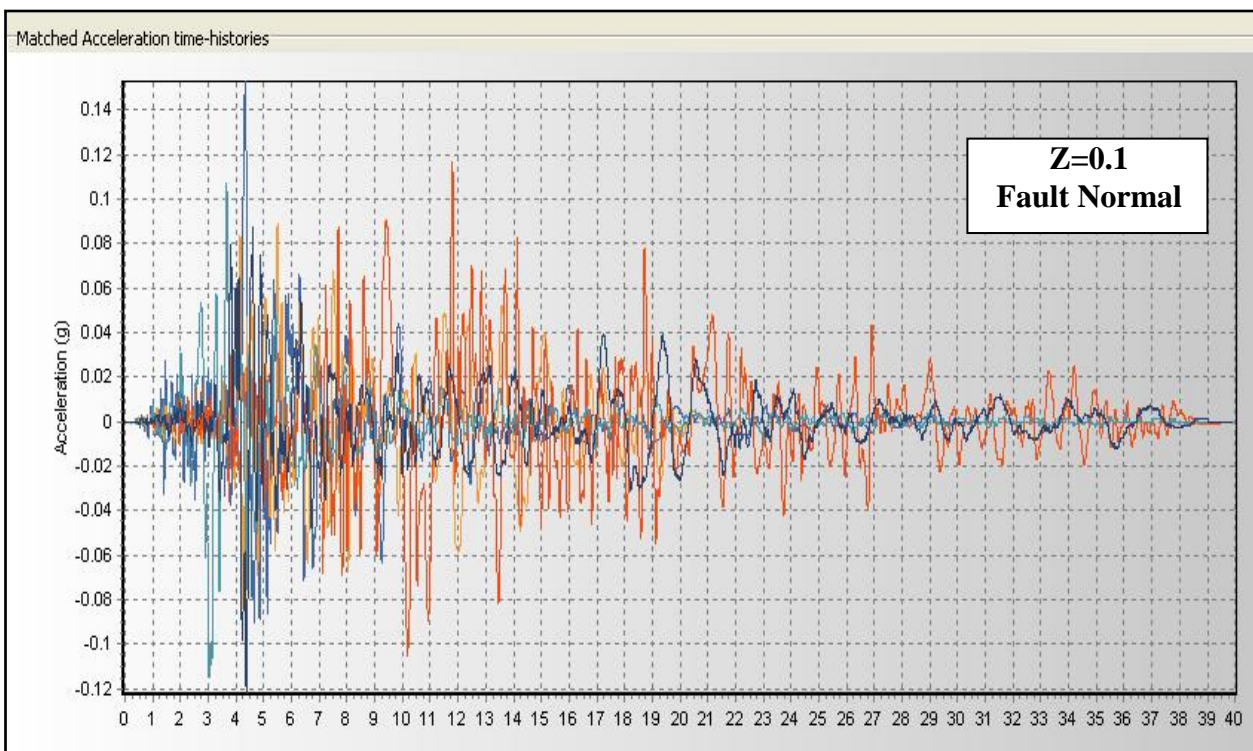


ניתן לראות שאקסלרוגרמות אינן מתואמות עם דרישה $Z=0.1$ וגם עם תאוצת התכן הספקטרי לפי ת"י 413. בהתאם לכך אקסלרוגרמות עובדו באמצעות תכנת Seismomatch.

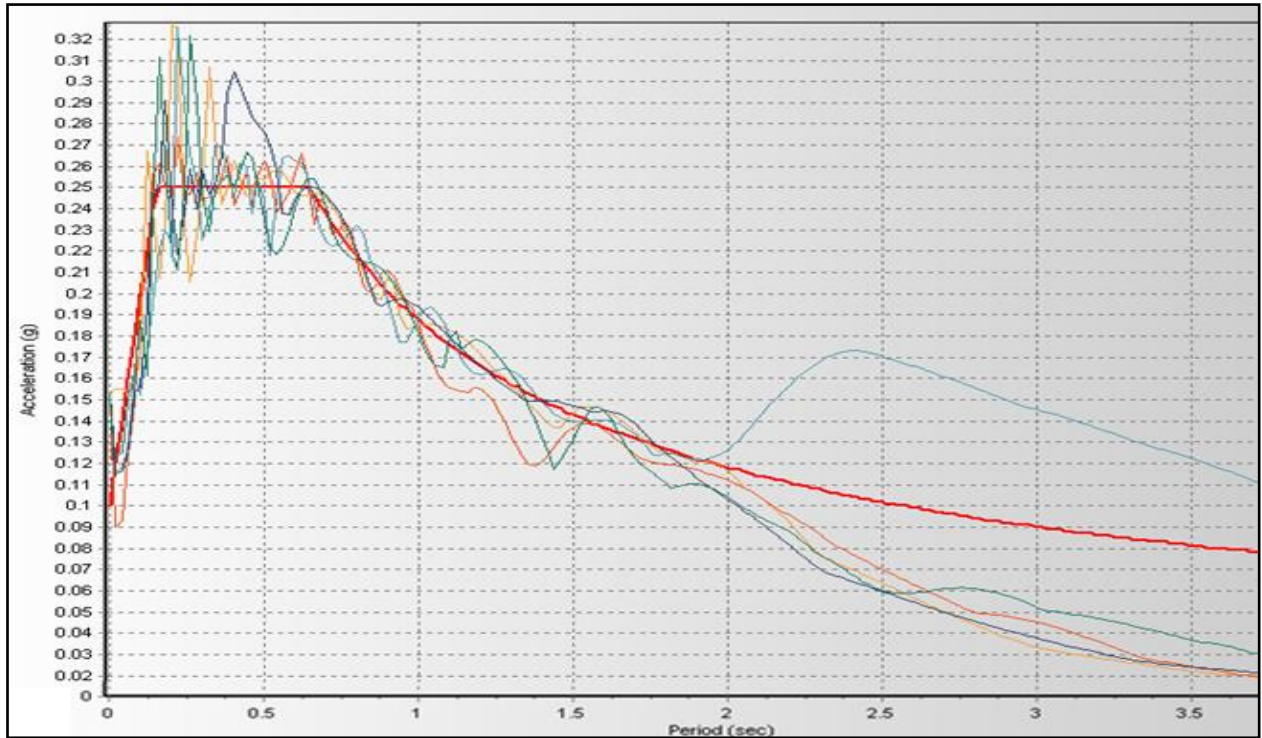
אקסלרוגרמות אותן יצרה תכנת Seismomatch וגם תגובת המבנה מופיעים באיורים 2.3.5-2.3.7, ניתן לראות כי אחרי העיבוד באמצעות תכנת Seismomatch אקסלרוגרמות מתואמות בצורה סבירה (למטרת מחקר זה) עם הדרישות (גודל Z וצורת התגובה של מבנה לאקסלרוגרמות).

רכיב אקסלרוגרמות לכיוון מקביל לשבר של אקסלרוגרמות מבסיס נתונים של PEER וגם אקסלרוגרמות המעובדות באמצעות תכנת Seismomatch מוצגות באיורים 2.3.12-2.3.8.

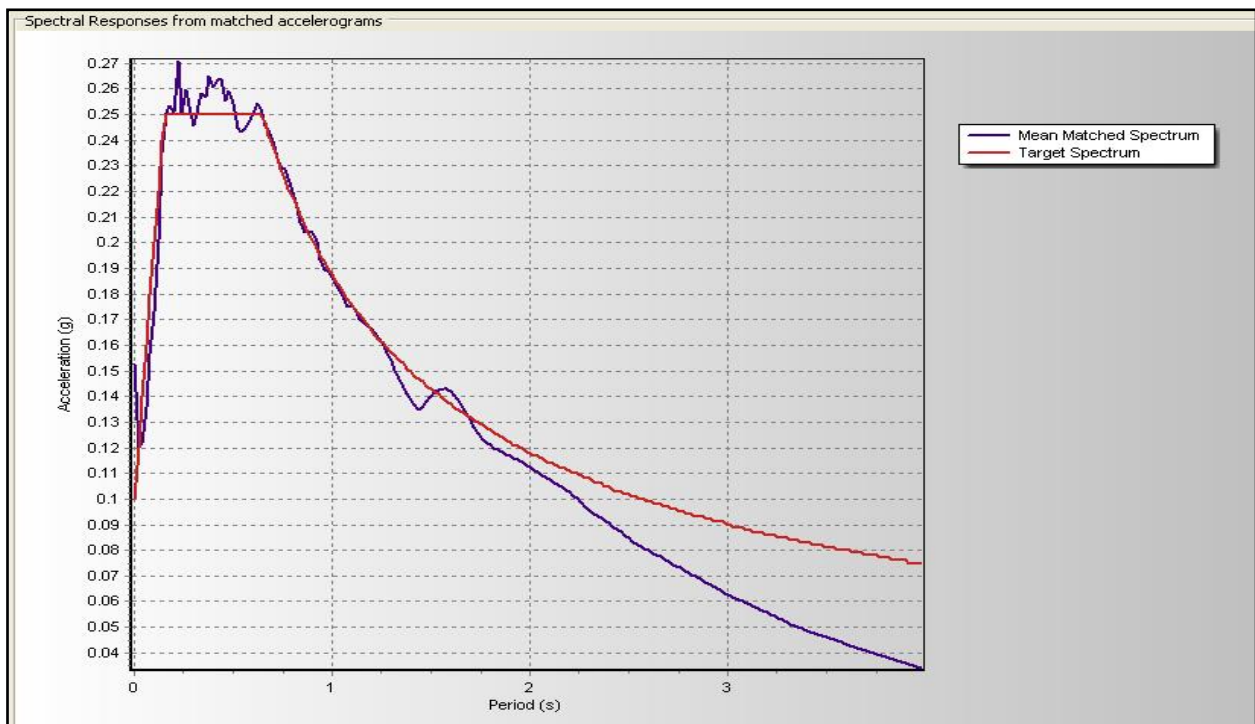
איור מס' 2.3.5: $Z=0.1$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



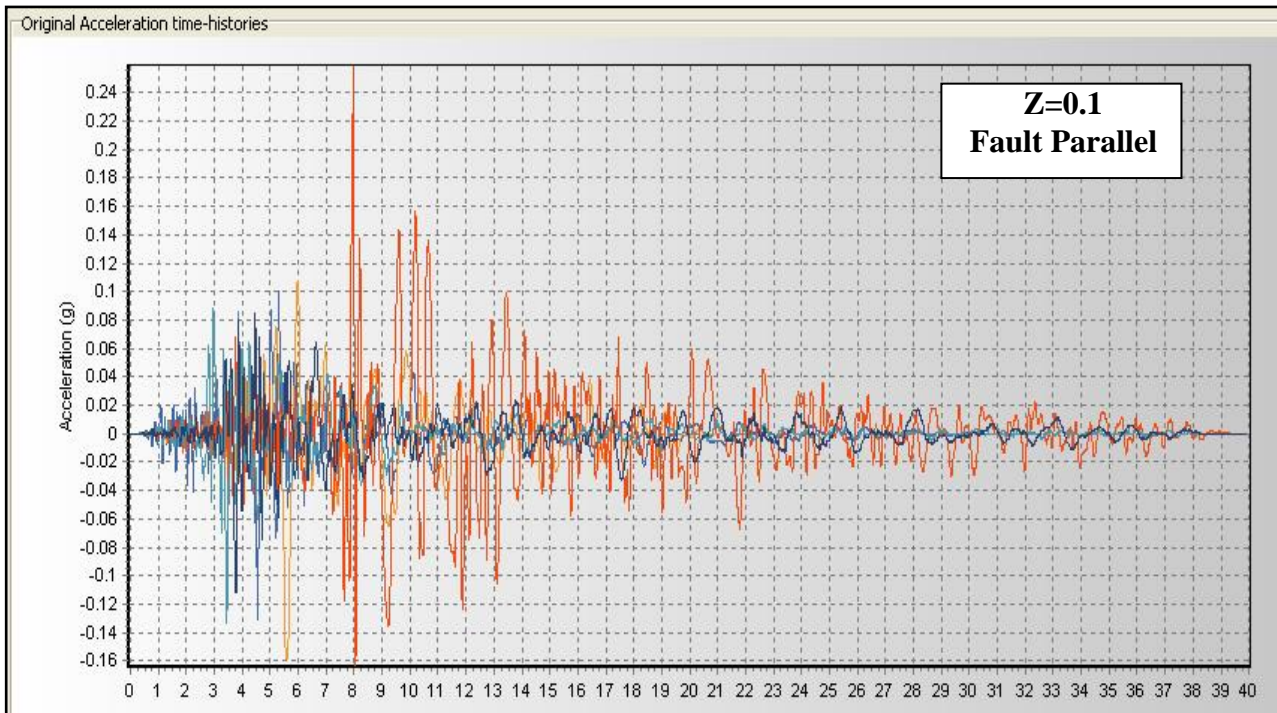
איור מס' 2.3.6: $Z=0.1$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב לשבר
לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



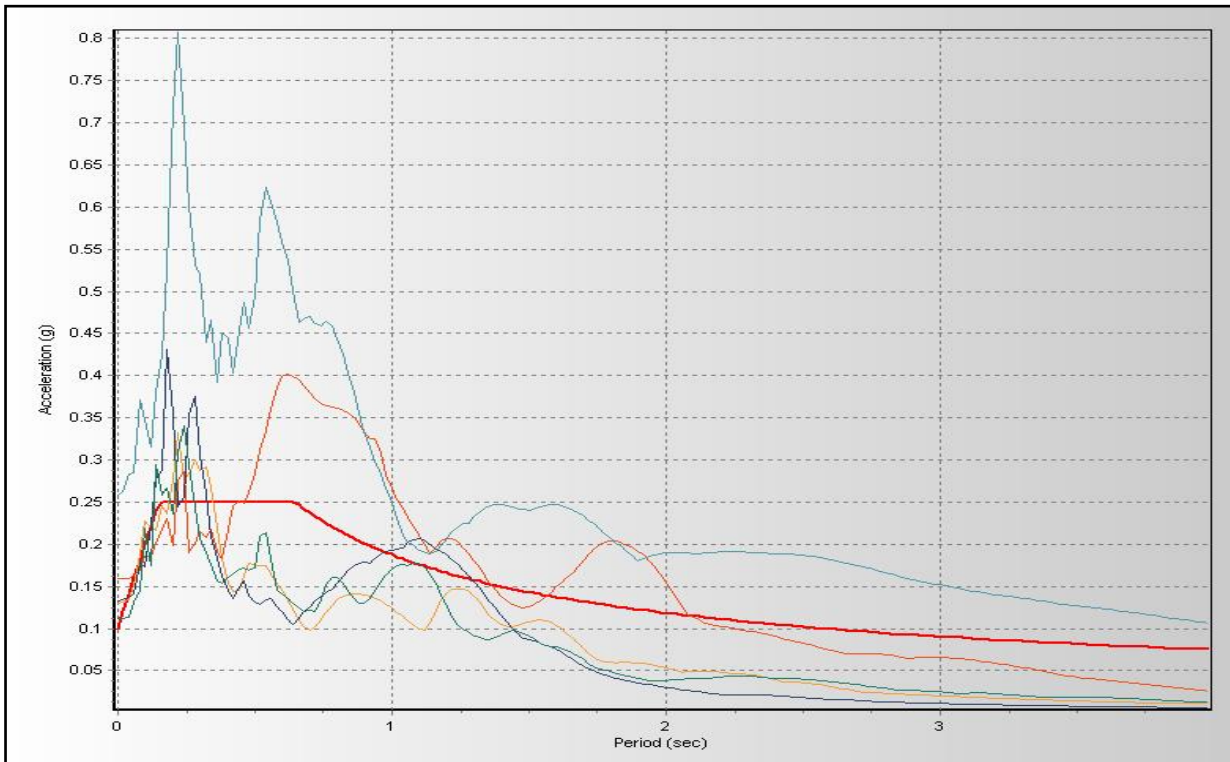
איור מס' 2.3.7: $Z=0.1$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב
לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



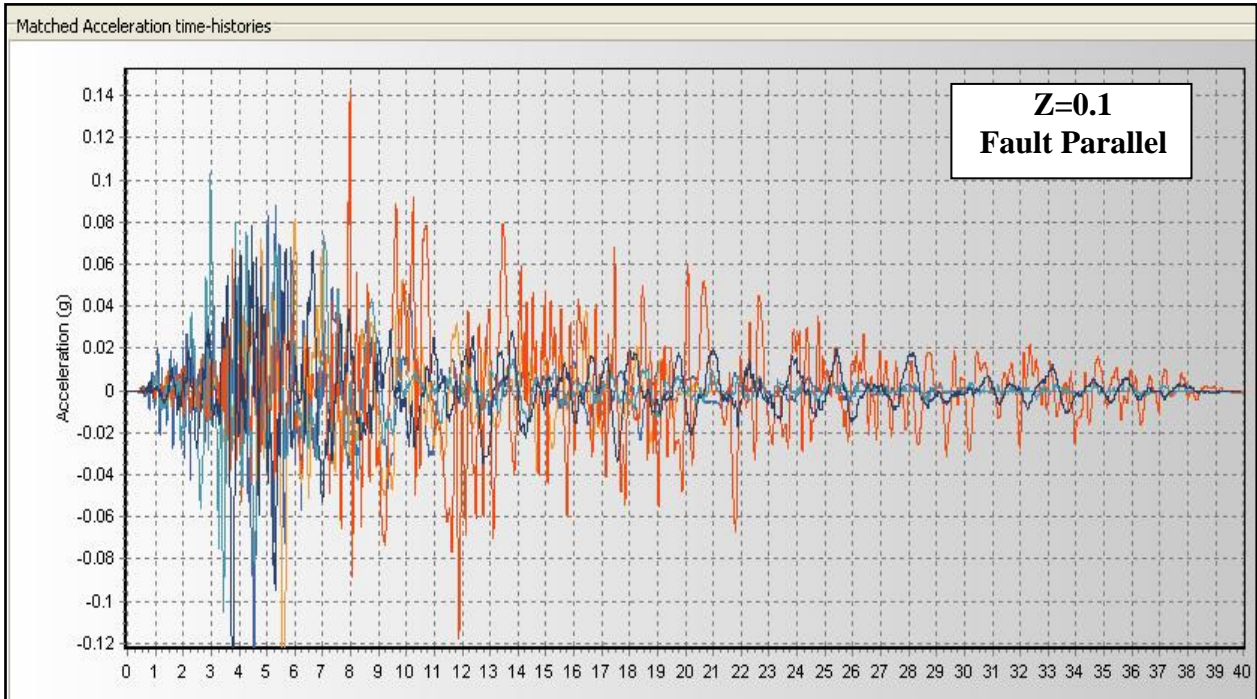
איור מס' 2.3.8: $Z=0.1$. רכיב מקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים PEER



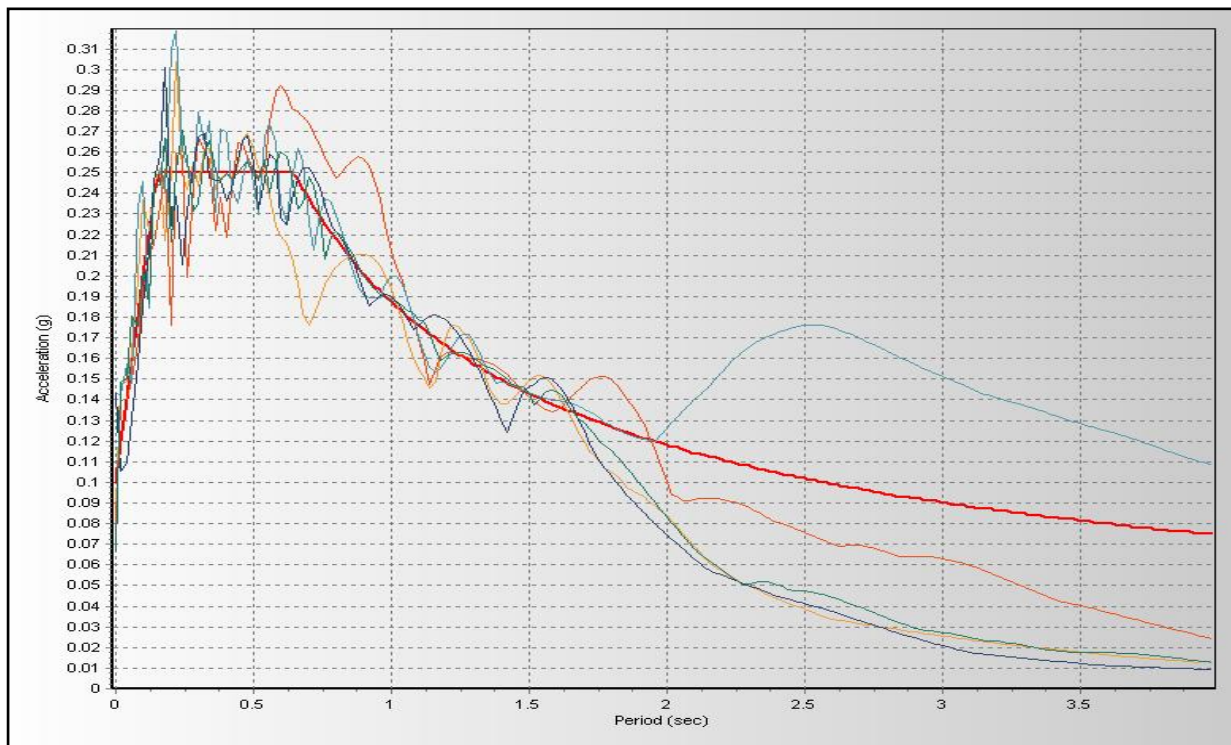
איור מס' 2.3.9: $Z=0.1$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי במקביל לשבר לאקסלרוגרמות מבסיס נתונים PEER



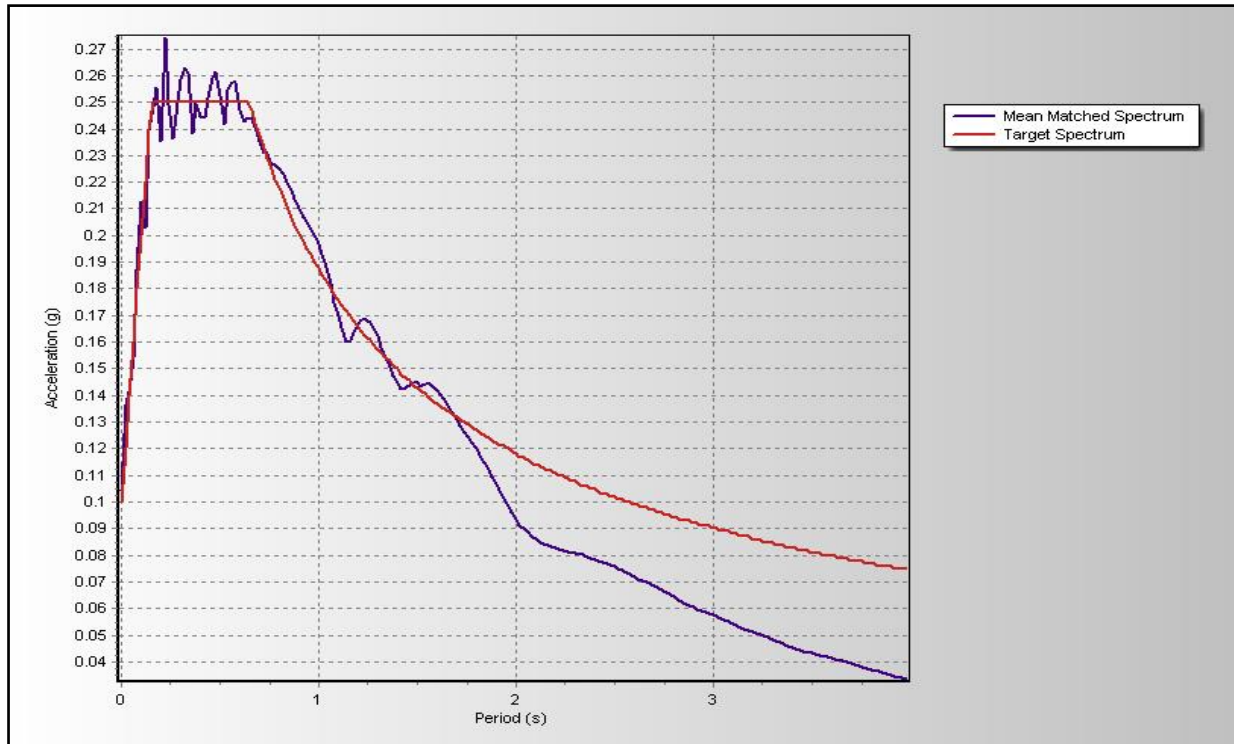
איור מס' 2.3.10: $Z=0.1$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד
באמצעות תכנת Seismomatch



איור מס' 2.3.11: $Z=0.1$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל
לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



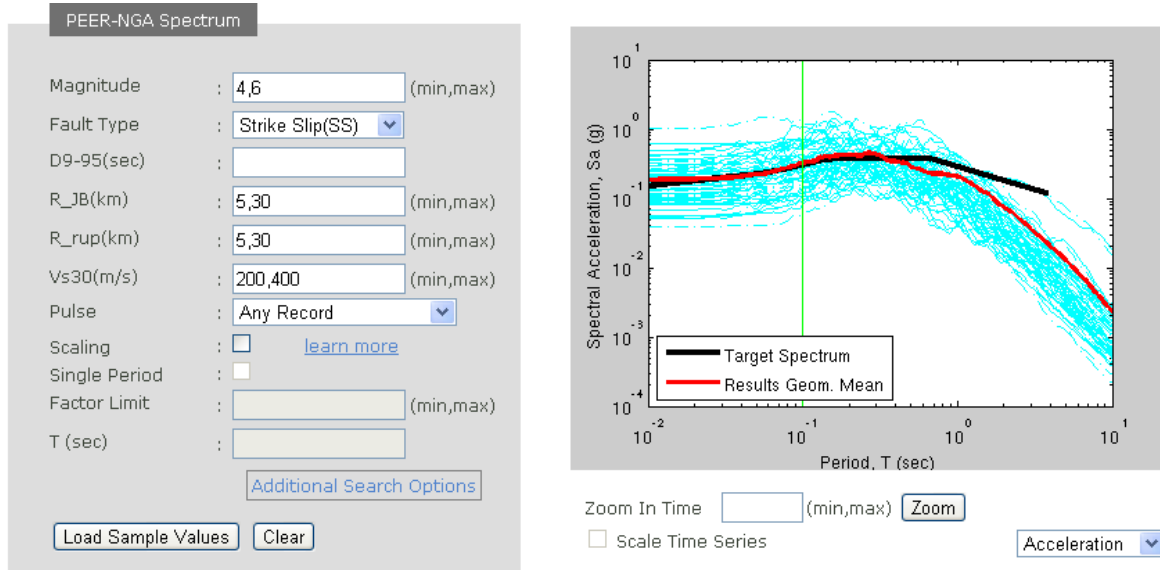
איור מס' 2.3.12: $Z=0.1$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



2.3.2 אתר $Z=0.15$

5 אקסלרוגרמות הנבחרות מבסיס נתונים PEER מתוארות באיור מס' 2.3.13, ורכיבי אקסלרוגרמות לכיוון ניצב ומקביל לשבר מוצגים באיורים מס' 2.3.14-2.3.23.

איור 2.3.13: חלון של בסיס נתונים PEER ל- $Z=0.15$

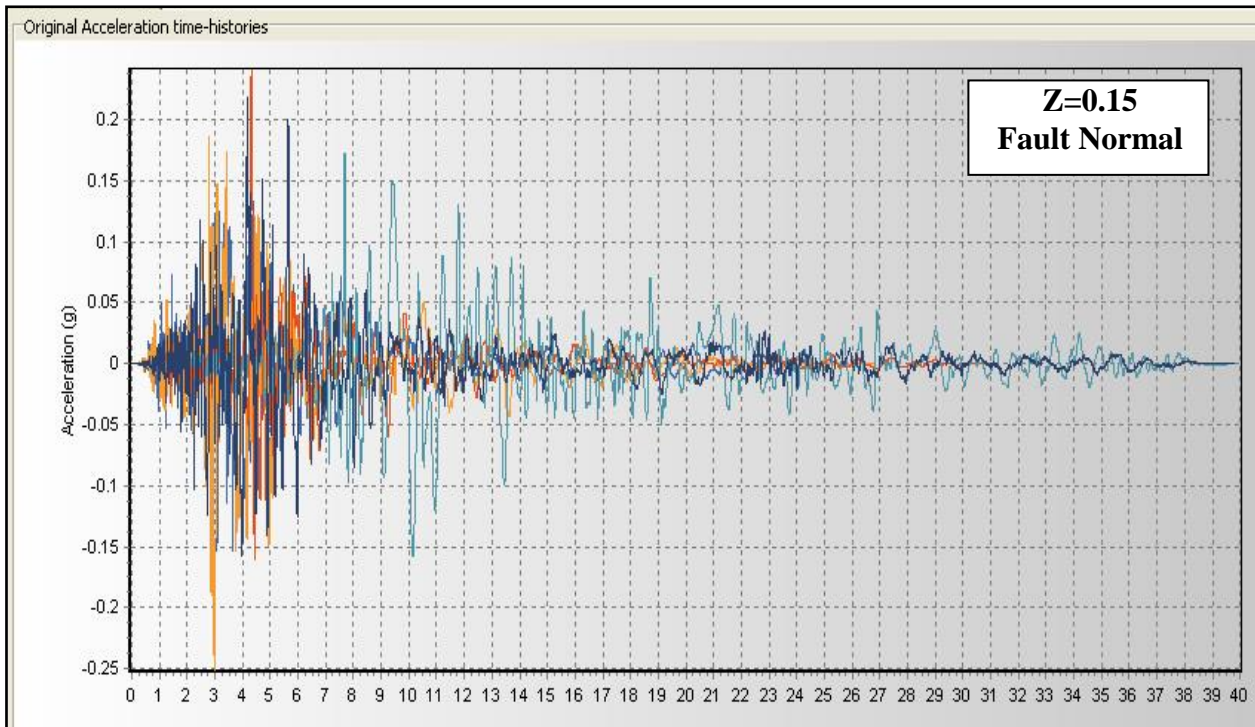


*Click on the record below to display Spectra and Time series

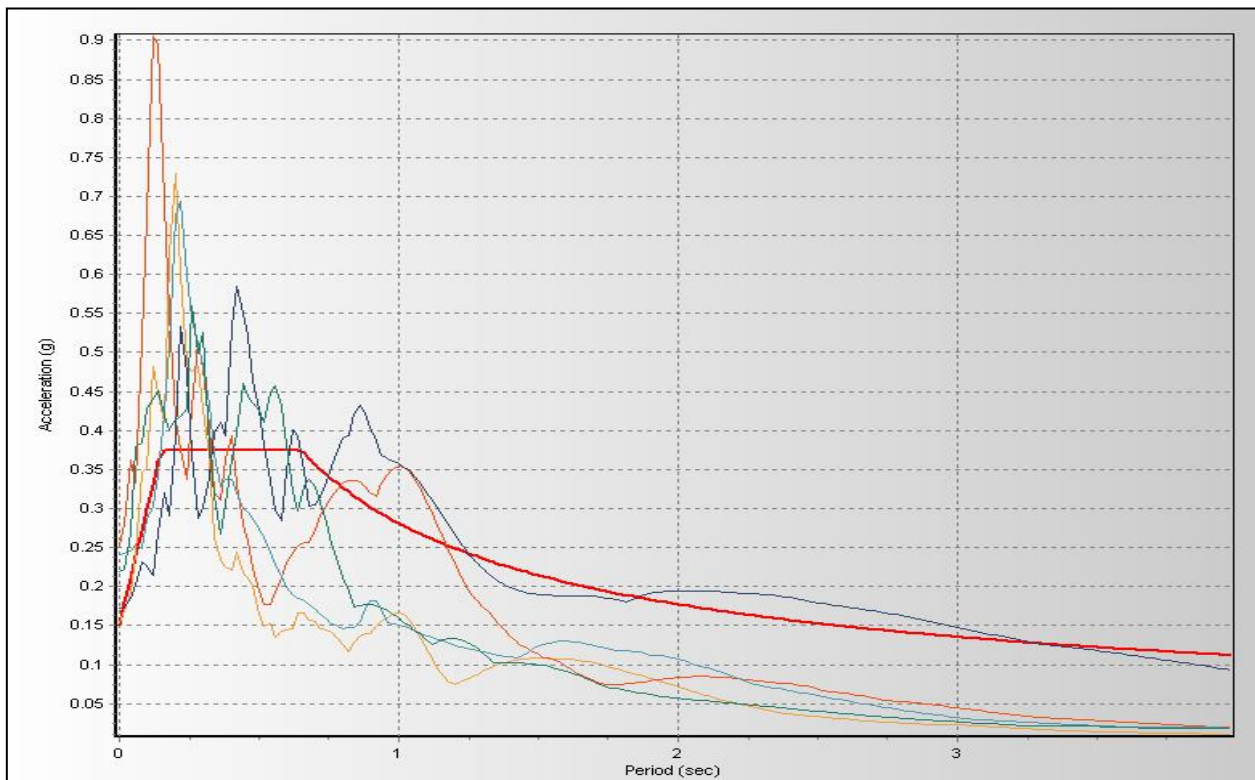
Plot Selected

<input type="checkbox"/>	Result#	Comp.	NGA#	MSE	ScaleF	Pulse	Tp(s)	D5-95(s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism
<input checked="" type="checkbox"/>	1	GM	316	0.0309	1.0000	1 1	3.6 4.2	17.3 15.5	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	2	GM	148	0.3954	1.0000	0 0	-- --	9.6 7.9	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #3	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	3	GM	147	0.5852	1.0000	0 0	-- --	8.4 3.7	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	4	GM	212	0.6657	1.0000	0 0	-- --	7.0 13.2	Livermore-01	1980	Del Valle Dam (Toe)	5.80	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	5	GM	547	0.7055	1.0000	0 0	-- --	12.9 8.5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	Strike-Slip

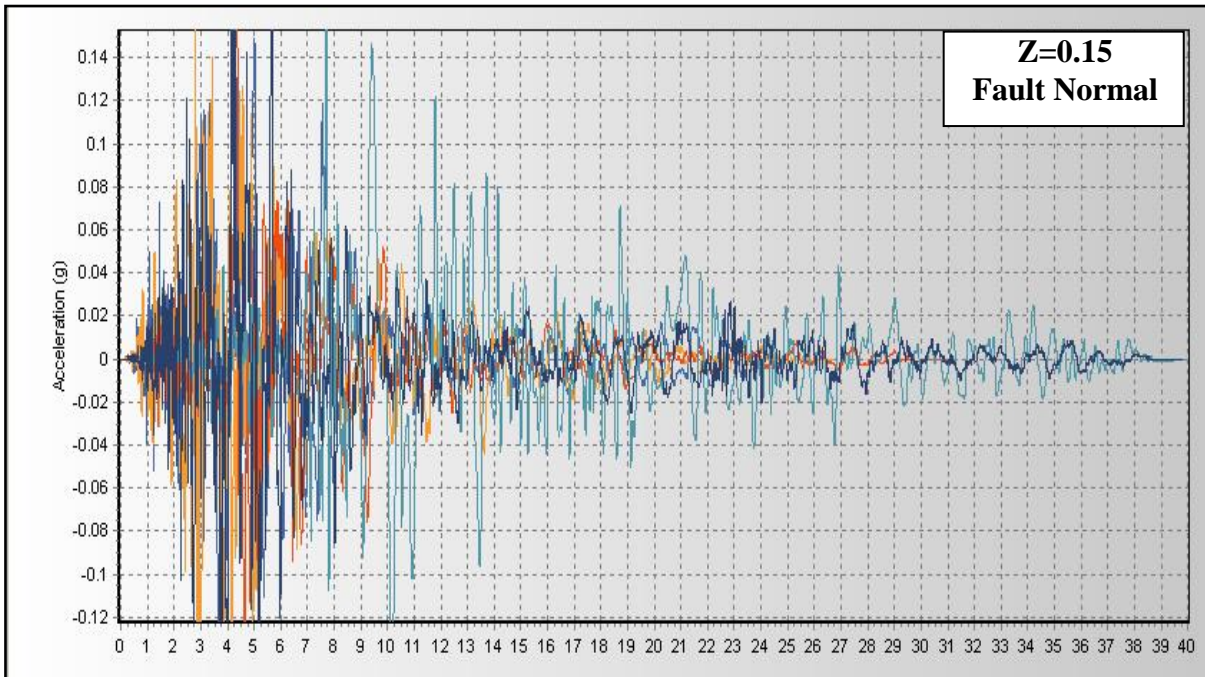
איור מס' 2.3.14: $Z=0.15$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים PEER



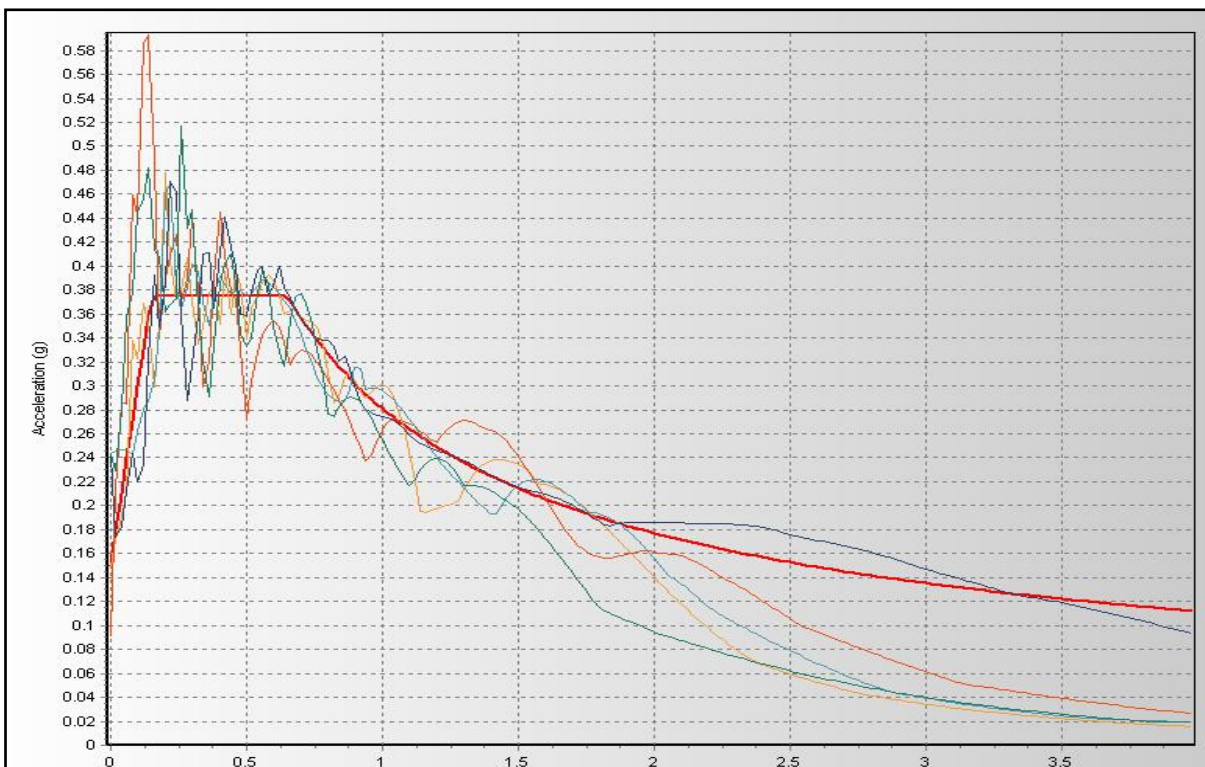
איור מס' 2.3.15: $Z=0.15$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי אקסלרוגרמות בניצב לשבר. בסיס נתונים PEER



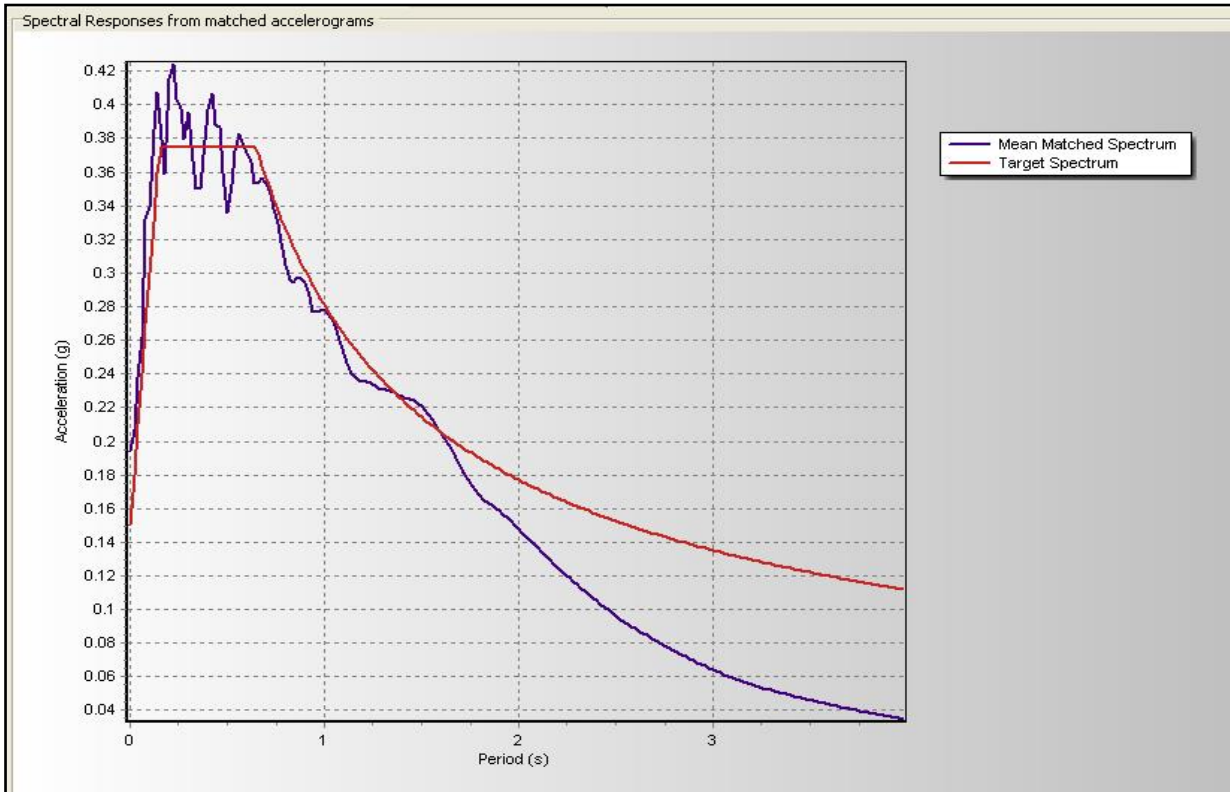
**איור מס' 2.3.16: $Z=0.15$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד
באמצעות תכנת Seismomatch**



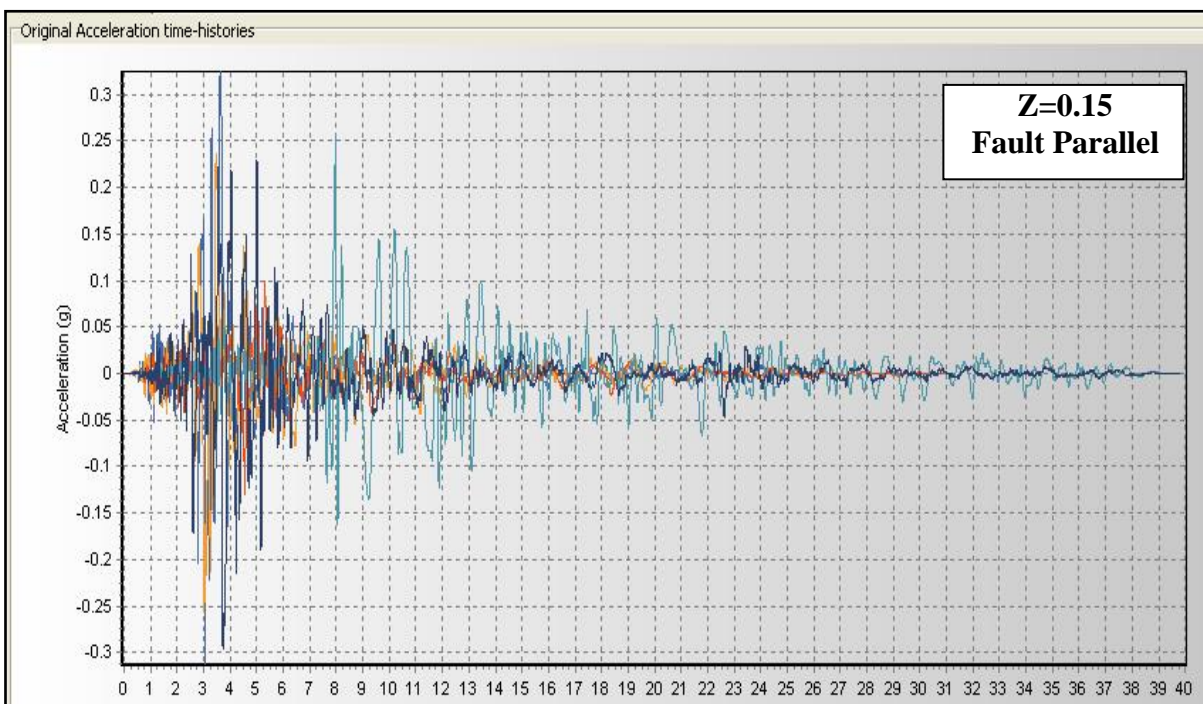
**איור מס' 2.3.17: $Z=0.15$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב
לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch**



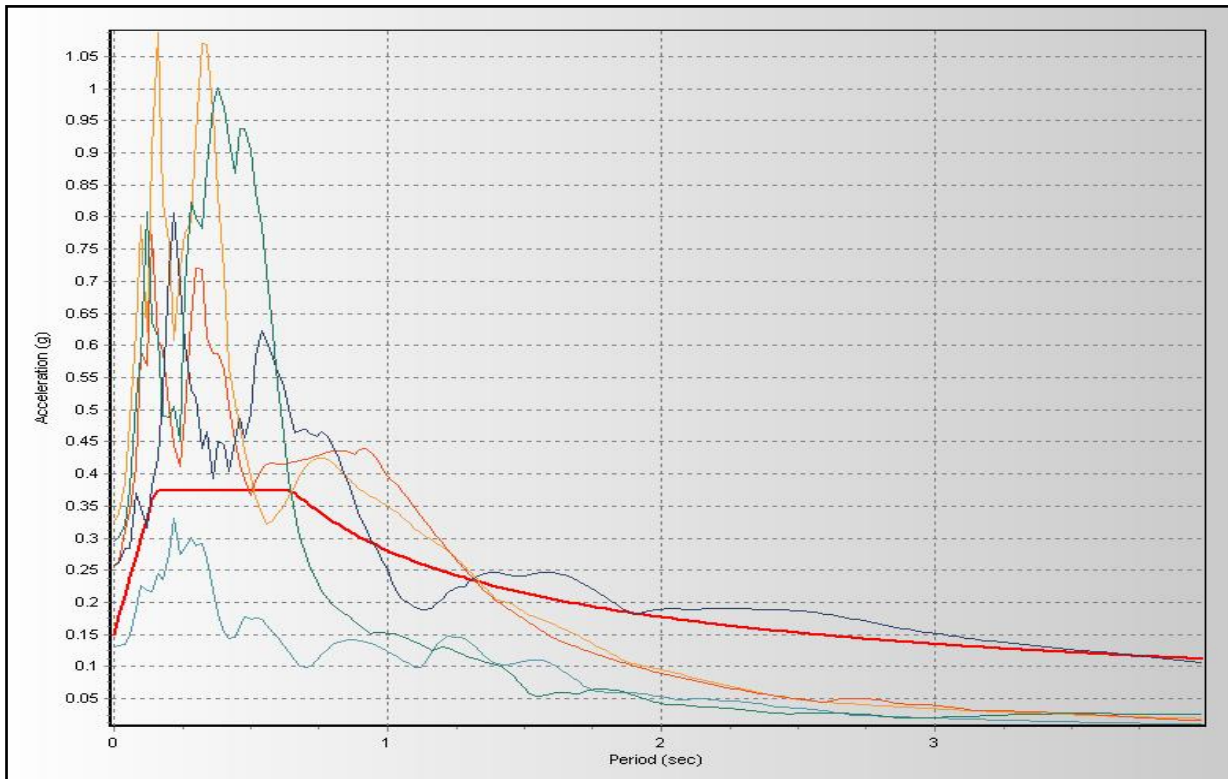
איור מס' 2.3.18: $Z=0.15$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות
 בניצב לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



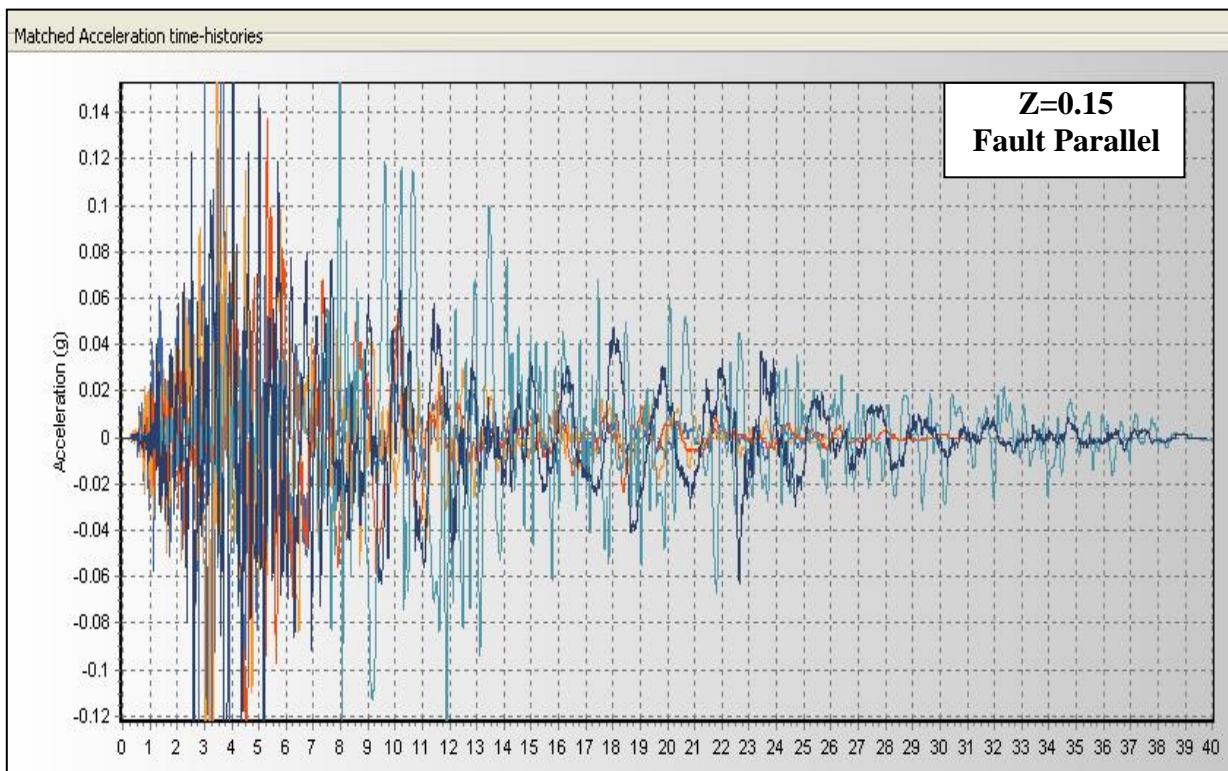
איור מס' 2.3.19: $Z=0.15$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים
PEER



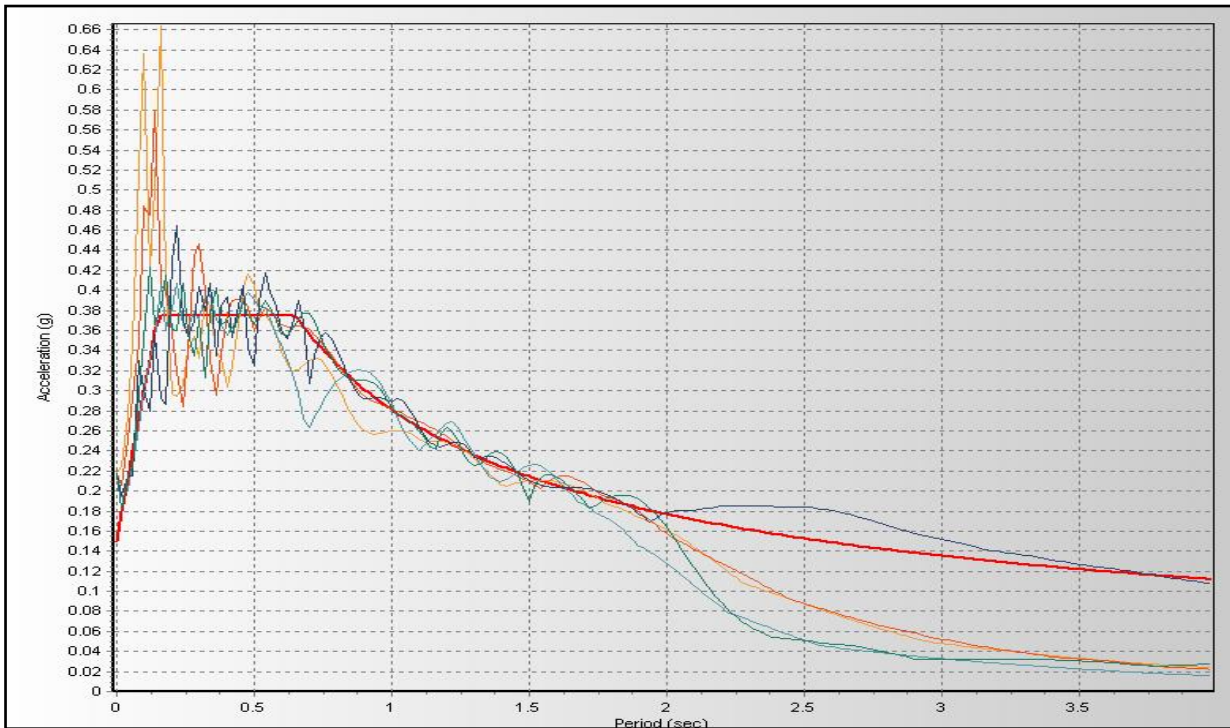
איור מס' 2.3.20 : $Z=0.15$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר. בסיס נתונים PEER



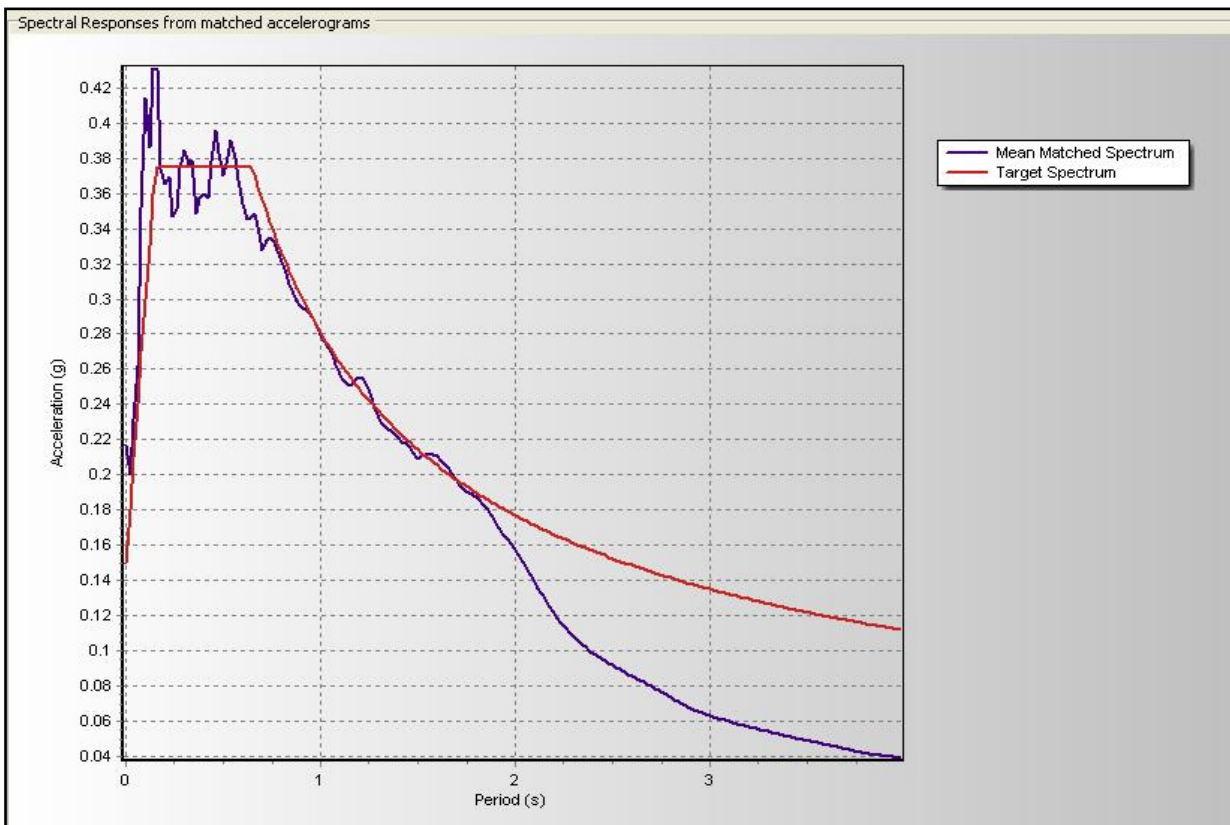
איור מס' 2.3.21 : $Z=0.15$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



איור מס' 2.3.22: $Z=0.15$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



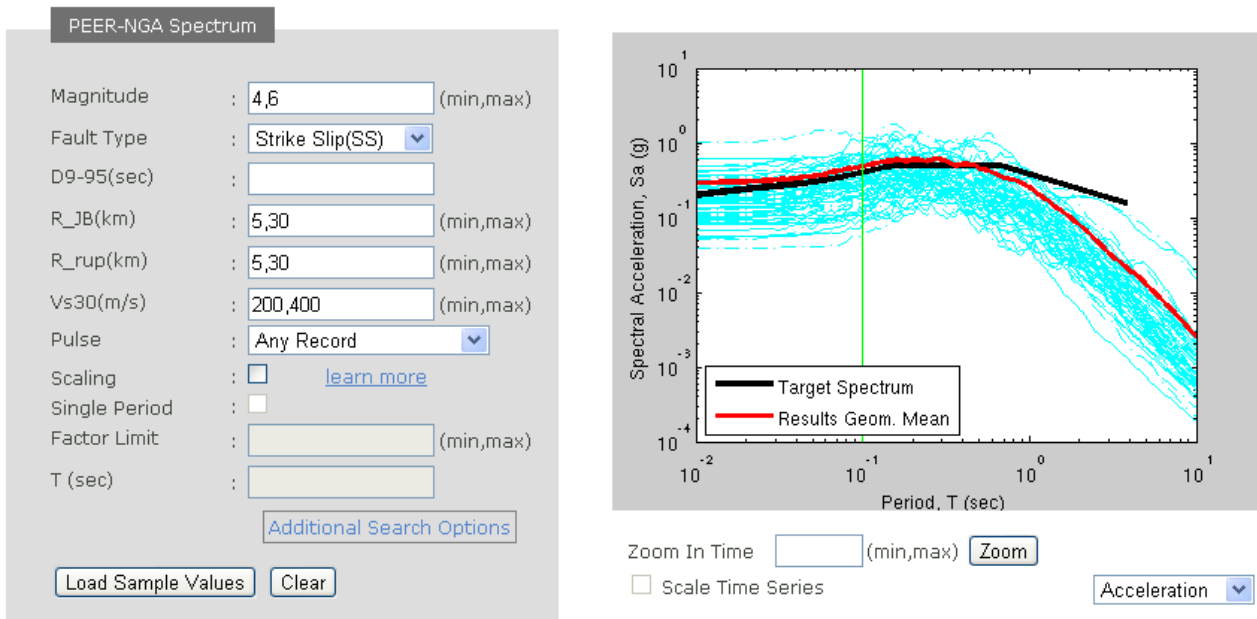
איור מס' 2.3.23: $Z=0.15$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



2.3.3 אתר Z=0.20

5 אקסלרוגרמות הנבחרות מבסיס נתונים PEER מתוארות באיור מס' 2.3.24, ורכיבי אקסלרוגרמות לכיוון ניצב ומקביל לשבר מוצגים באיורים מס' 2.3.25-2.3.34.

איור 2.3.24: חלון של בסיס נתונים PEER ל-Z=0.20



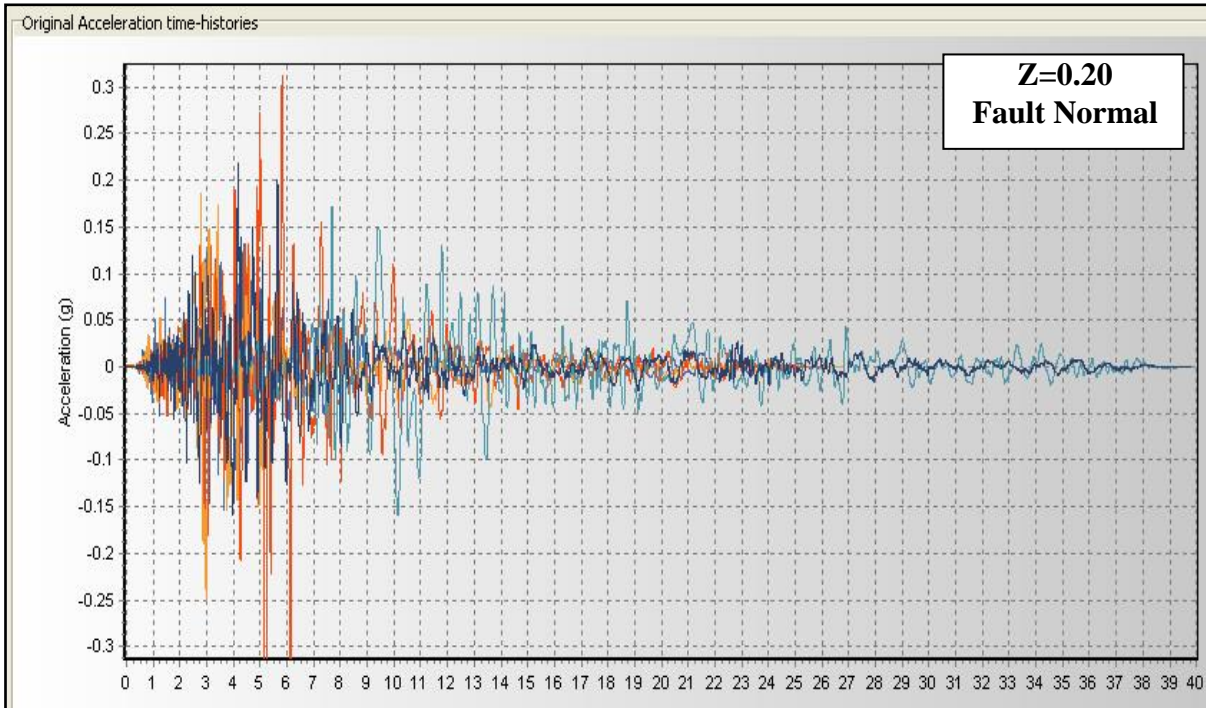
Records

*Click on the record below to display Spectra and Time series

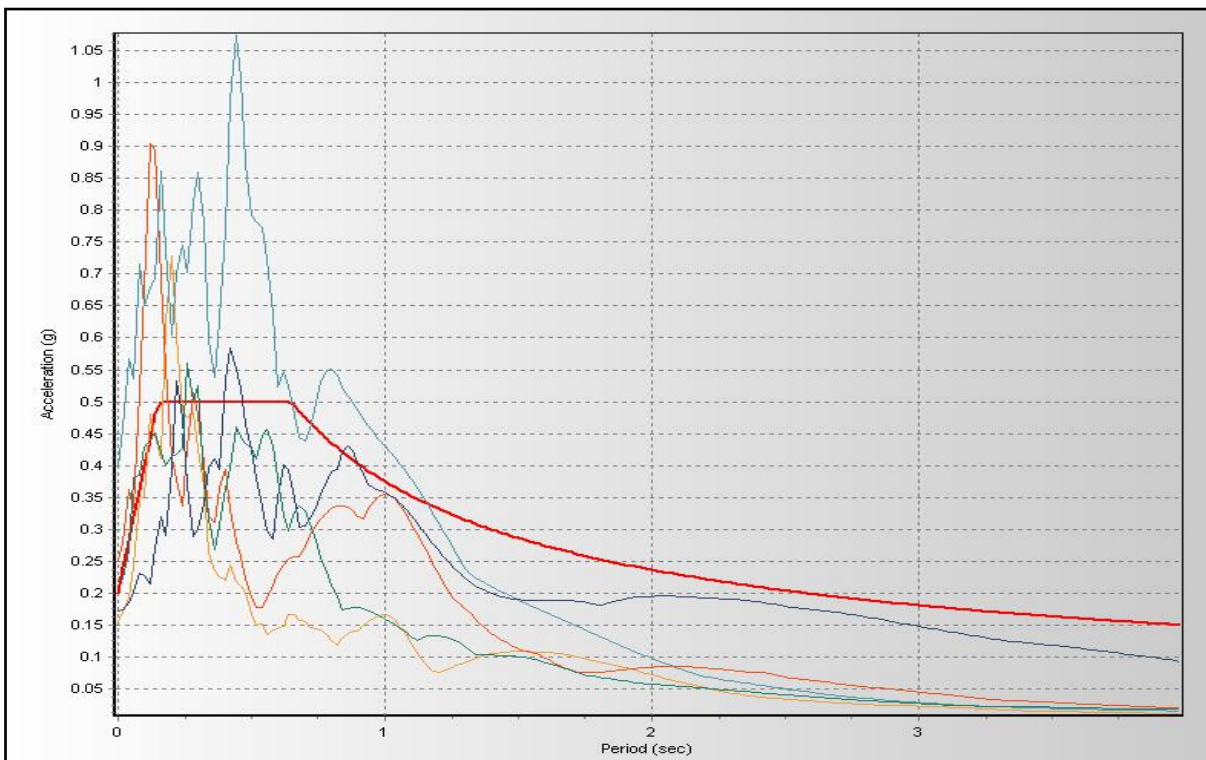
Plot Selected

<input type="checkbox"/>	Result#	Comp.	NGA#	MSE	ScaleF	Pulse	Tp(s)	D5-95(s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism
<input checked="" type="checkbox"/>	1	GM	316	0.0638	1.0000	1 1	3.6 4.2	17.3 15.5	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	2	GM	148	0.5324	1.0000	0 0	-- --	9.6 7.9	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #3	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	3	GM	147	0.8045	1.0000	0 0	-- --	8.4 3.7	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	4	GM	250	0.8483	1.0000	1 0	1.1 --	7.2 6.5	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	5	GM	547	0.9597	1.0000	0 0	-- --	12.9 8.5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	Strike-Slip

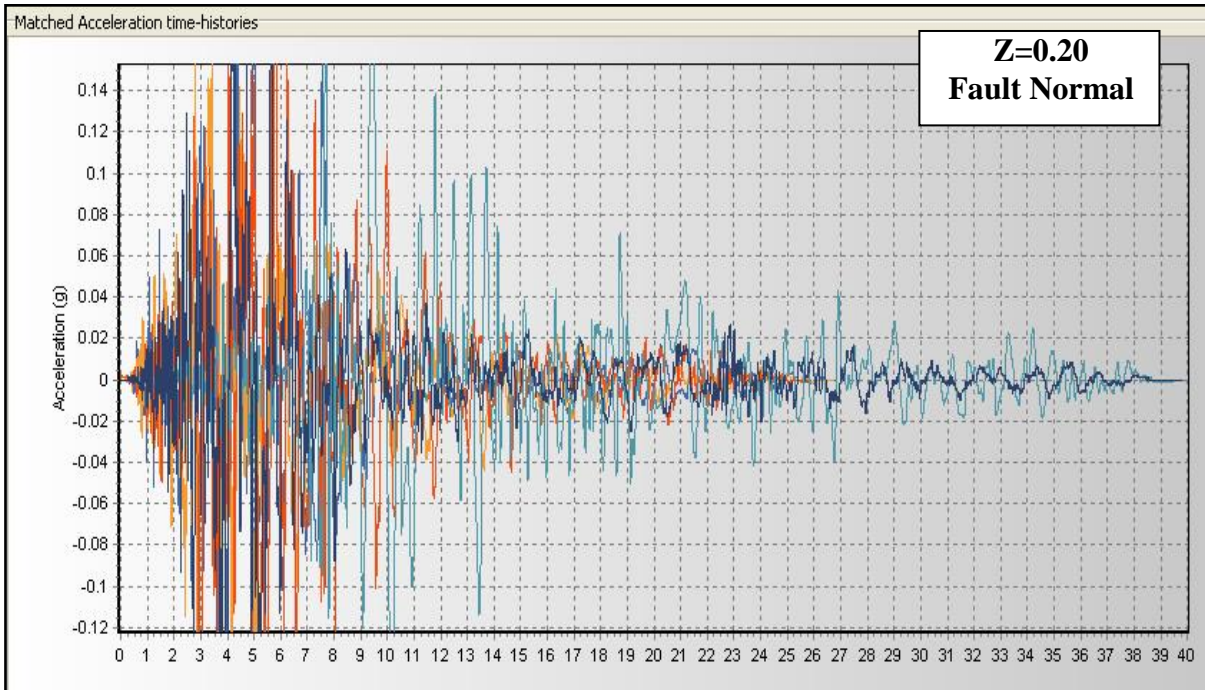
איור מס' 2.3.25: $Z=0.20$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים
PEER



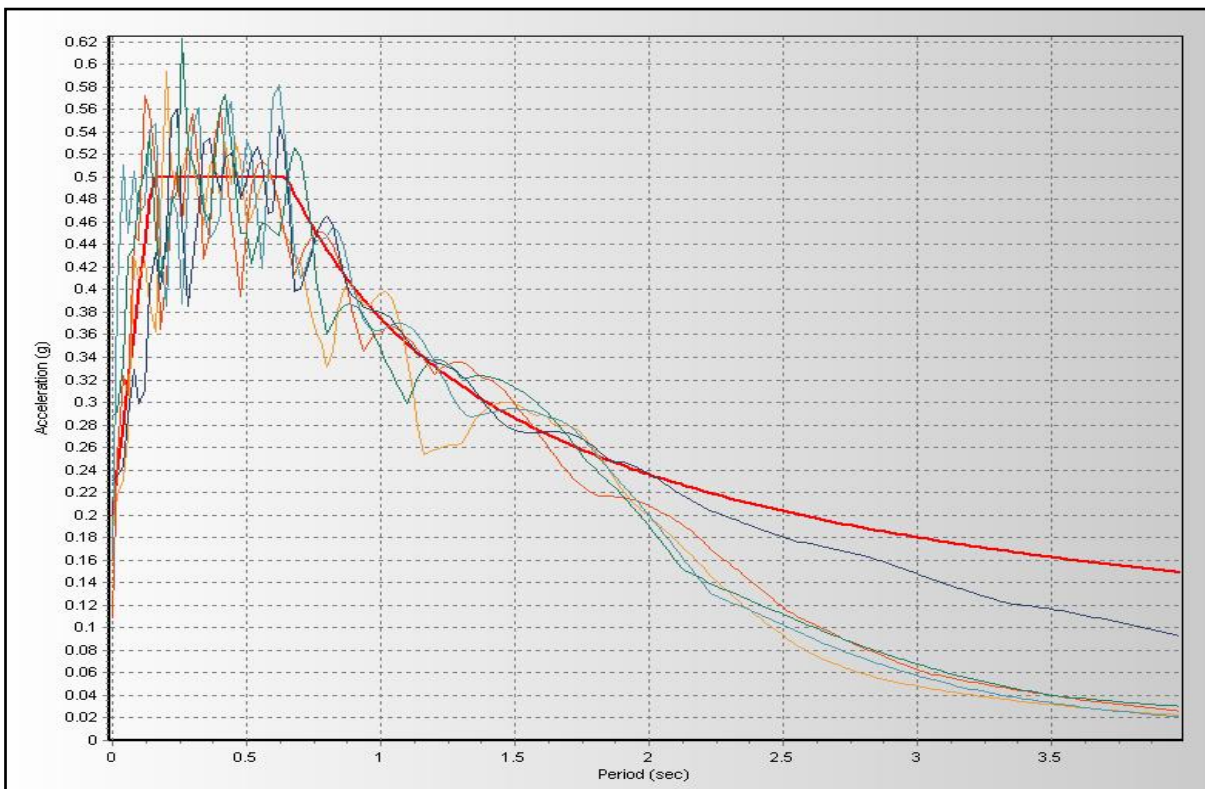
איור מס' 2.3.26: $Z=0.20$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב
לשבר. בסיס נתונים PEER



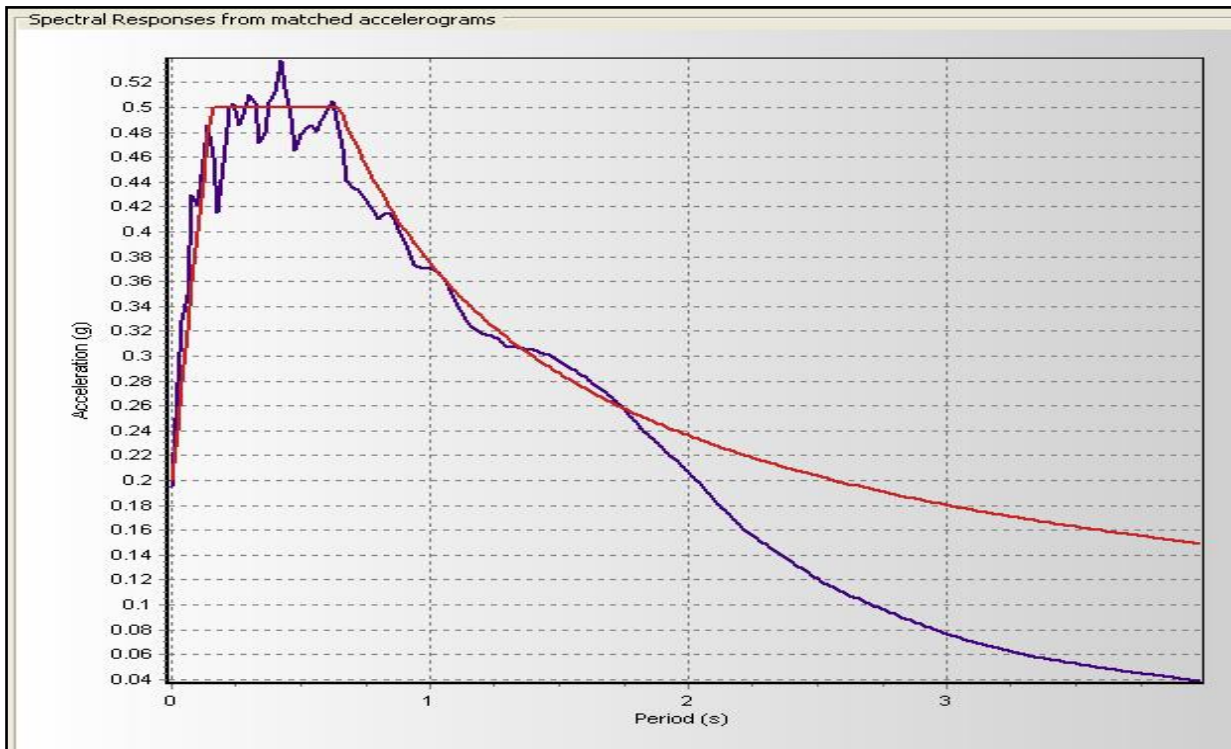
איור מס' 2.3.27 : $Z=0.20$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד
באמצעות תכנת Seismomatch



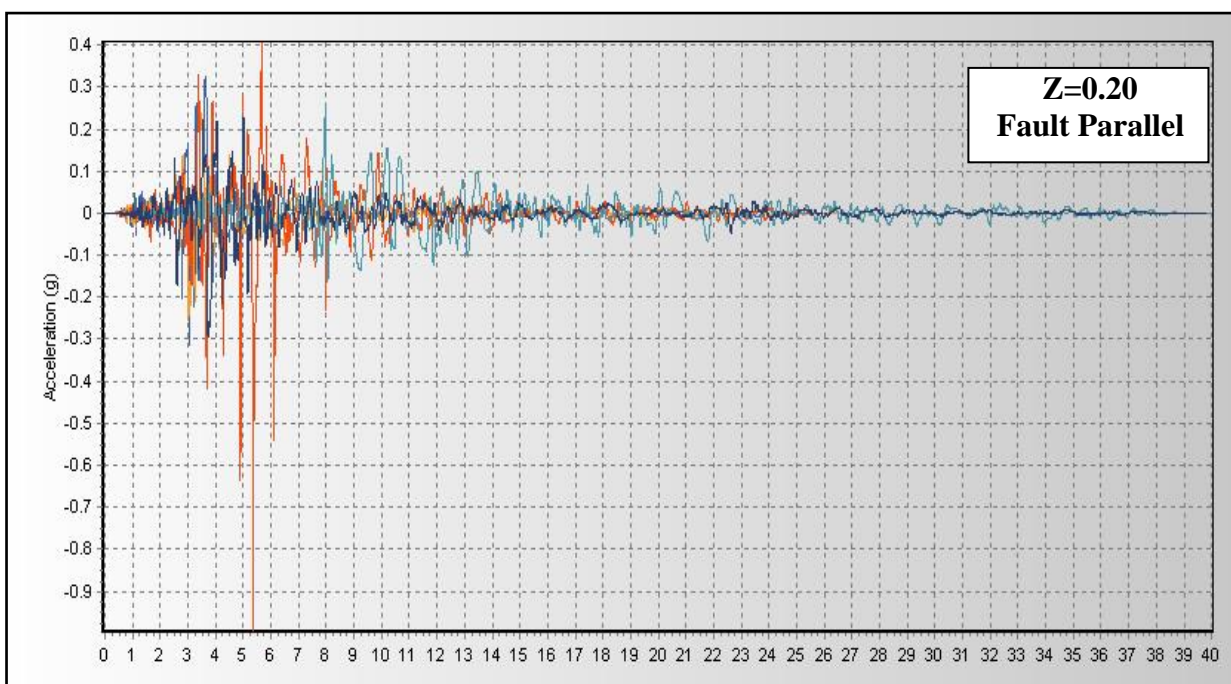
איור מס' 2.3.28 : $Z=0.20$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב
לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



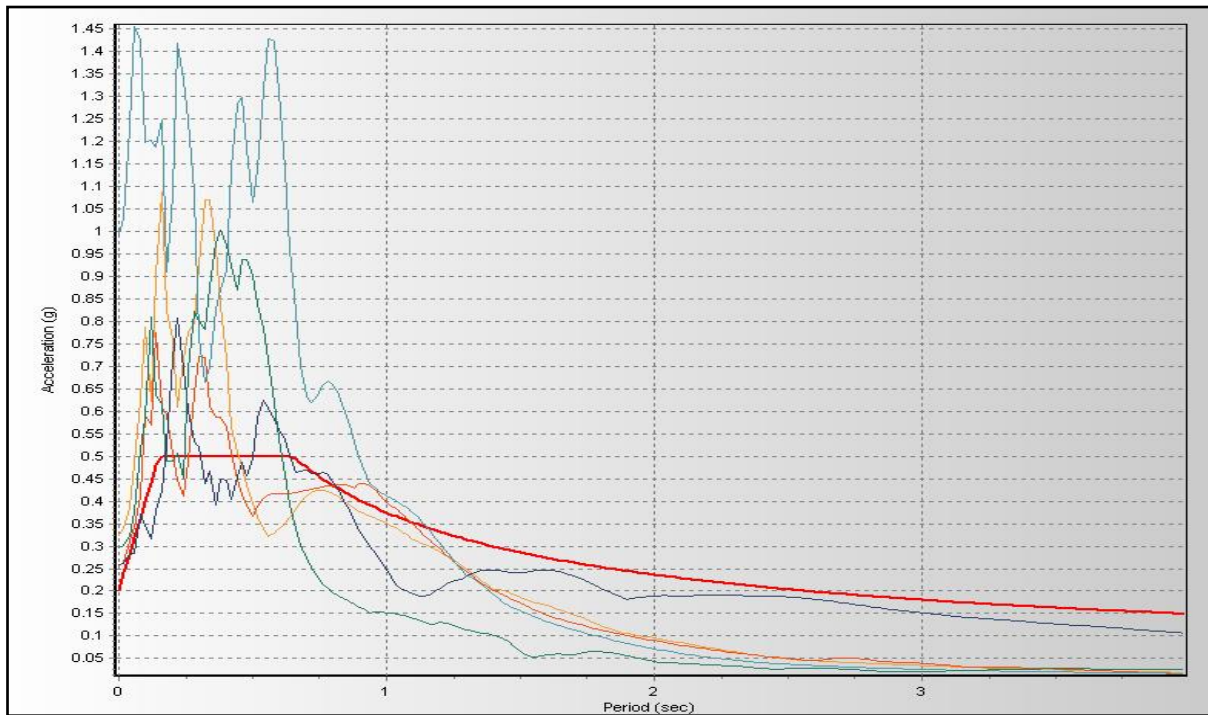
איור מס' 2.3.29: $Z=0.20$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות
 בניצב לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



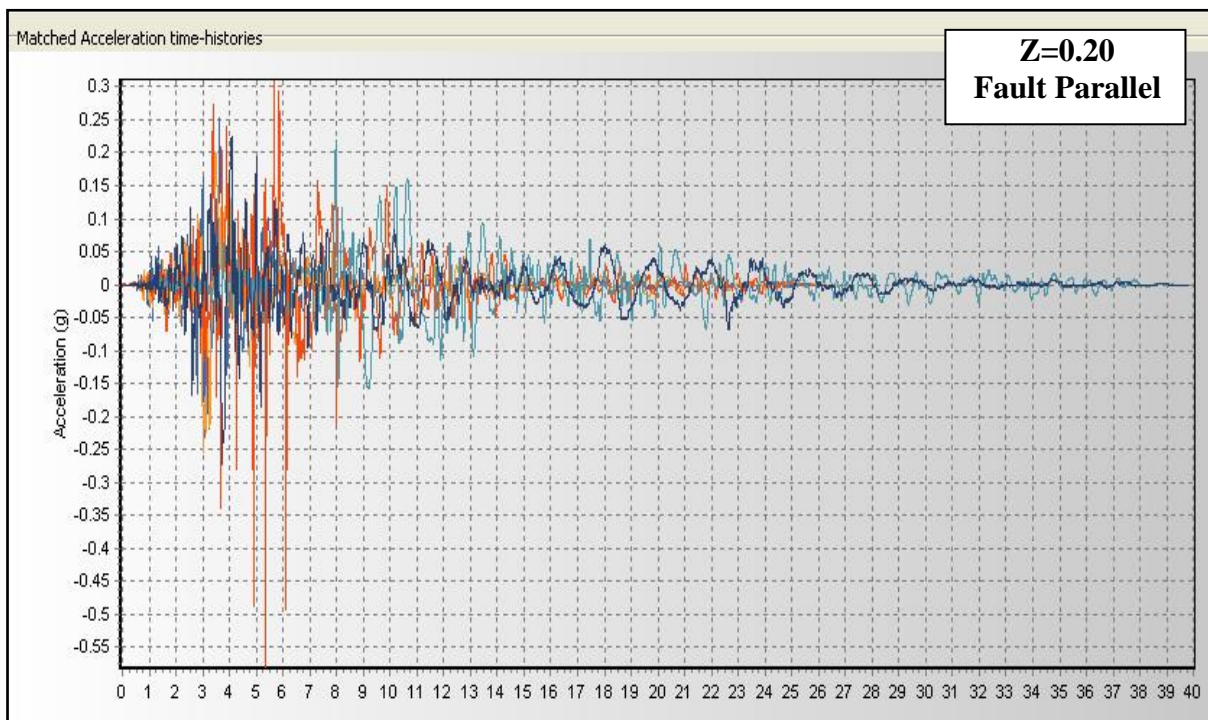
איור מס' 2.3.30: $Z=0.20$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים
PEER



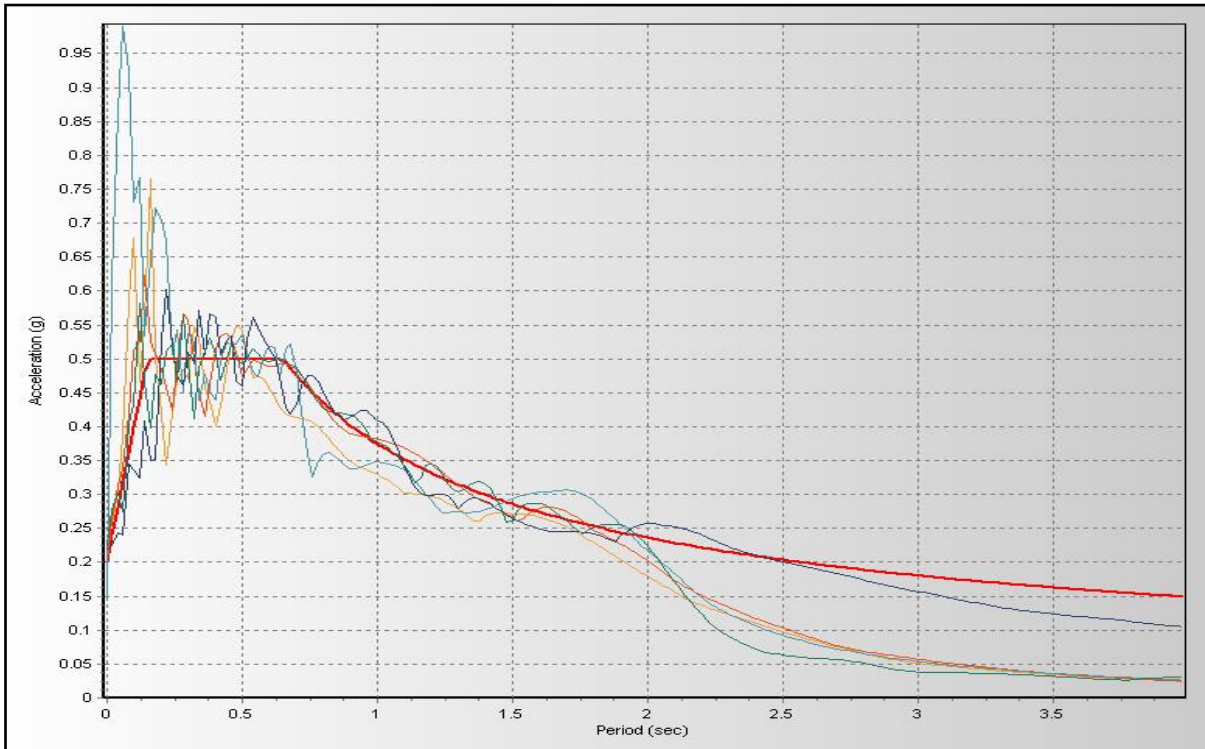
איור מס' 2.3.31: $Z=0.20$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר.
בסיס נתונים PEER



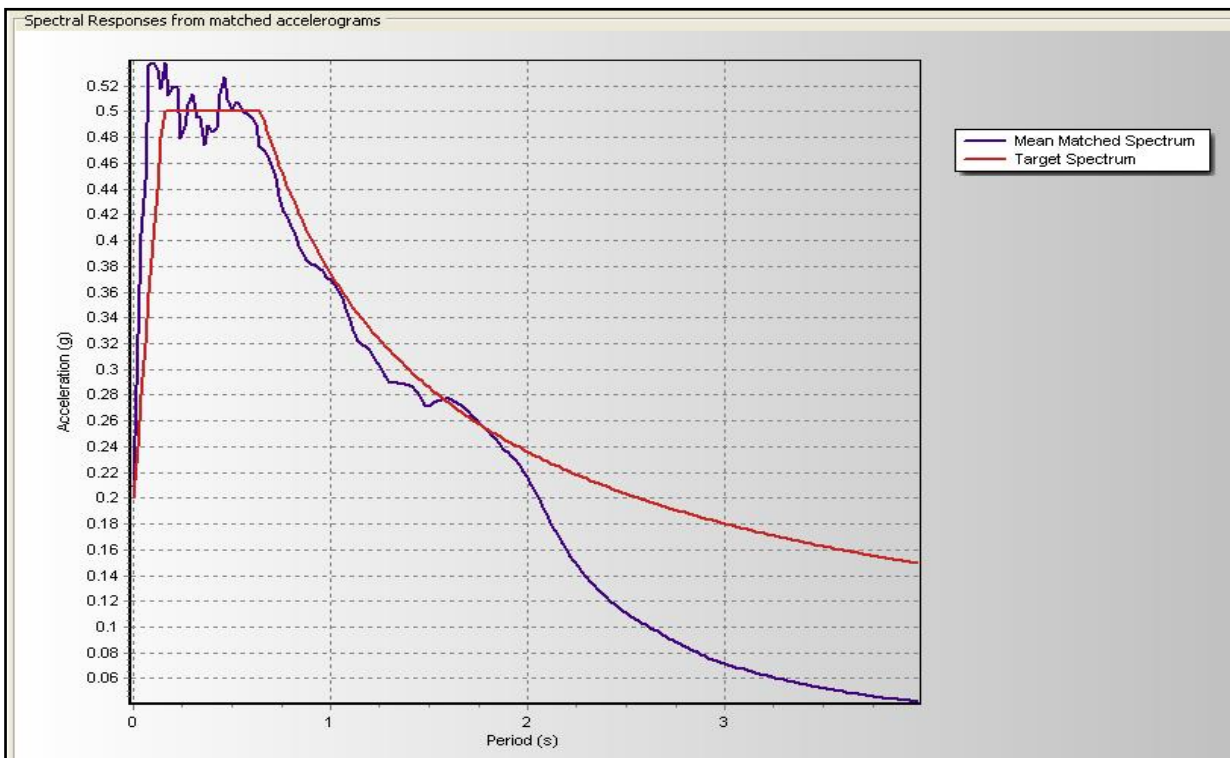
איור מס' 2.3.32: $Z=0.20$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד
באמצעות תכנת Seismomatch



איור מס' 2.3.33 : $Z=0.20$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



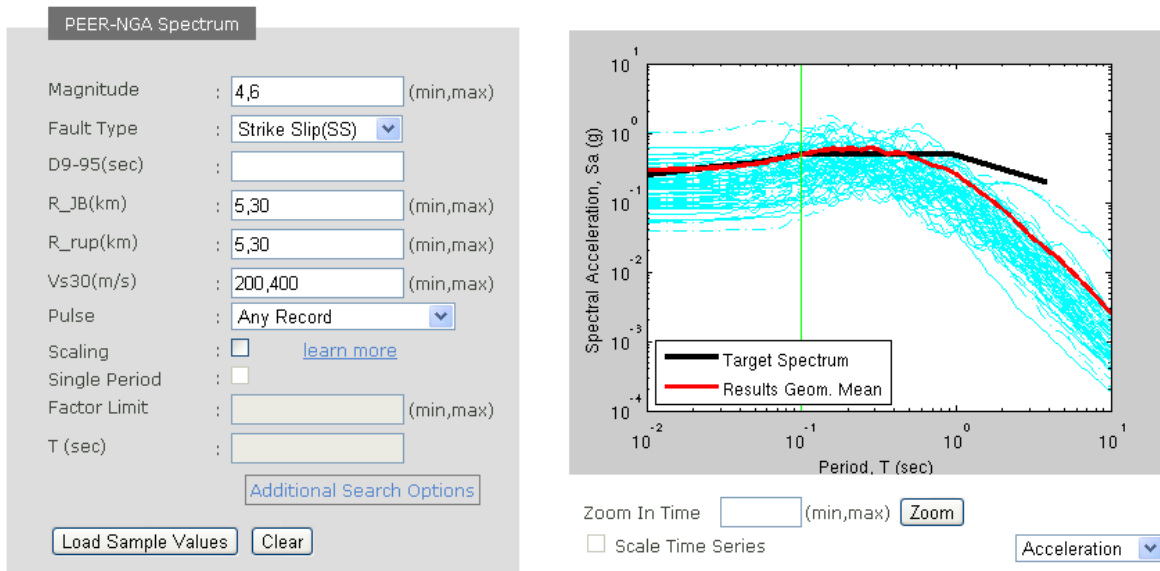
איור מס' 2.3.34 : $Z=0.20$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



2.3.4 אתר Z=0.25

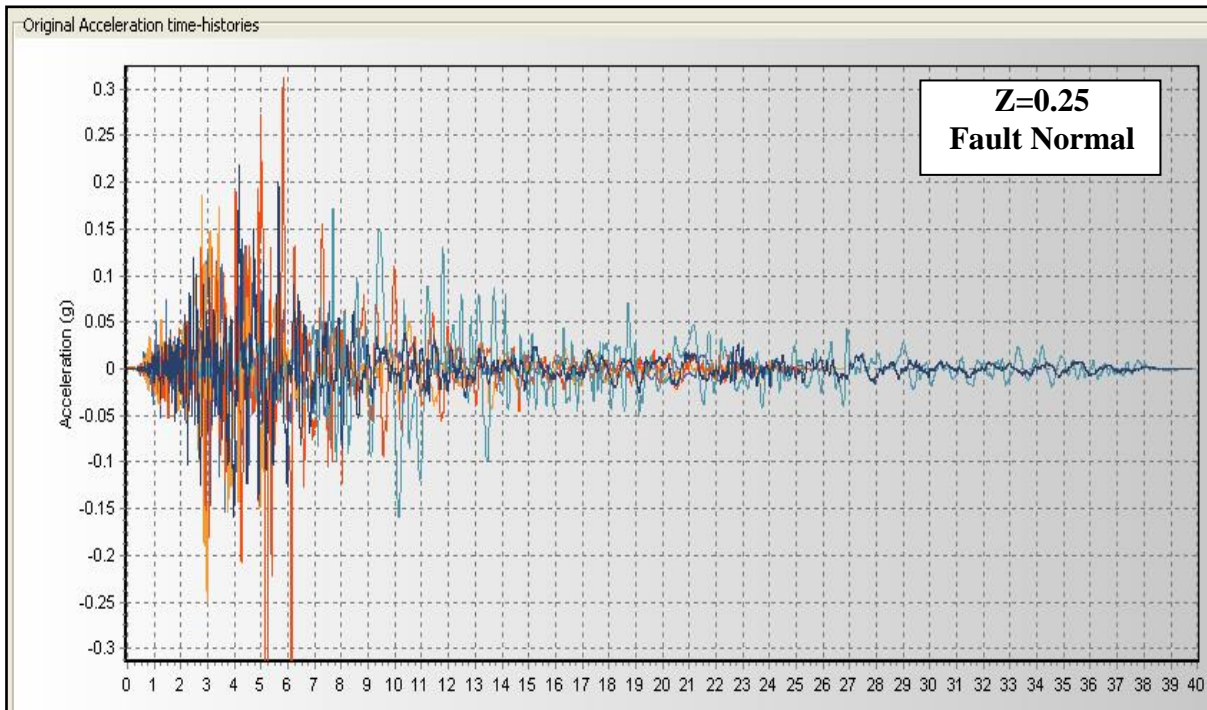
5 אקסלרוגרמות נבחרות מבסיס נתונים PEER מתוארות באיור מס' 2.3.35, ורכיבי אקסלרוגרמות לכיוון ניצב ומקביל לשבר מוצגים באיורים מס' 2.3.36-2.3.45.

איור 2.3.35: חלון של בסיס נתונים PEER ל-Z=0.25

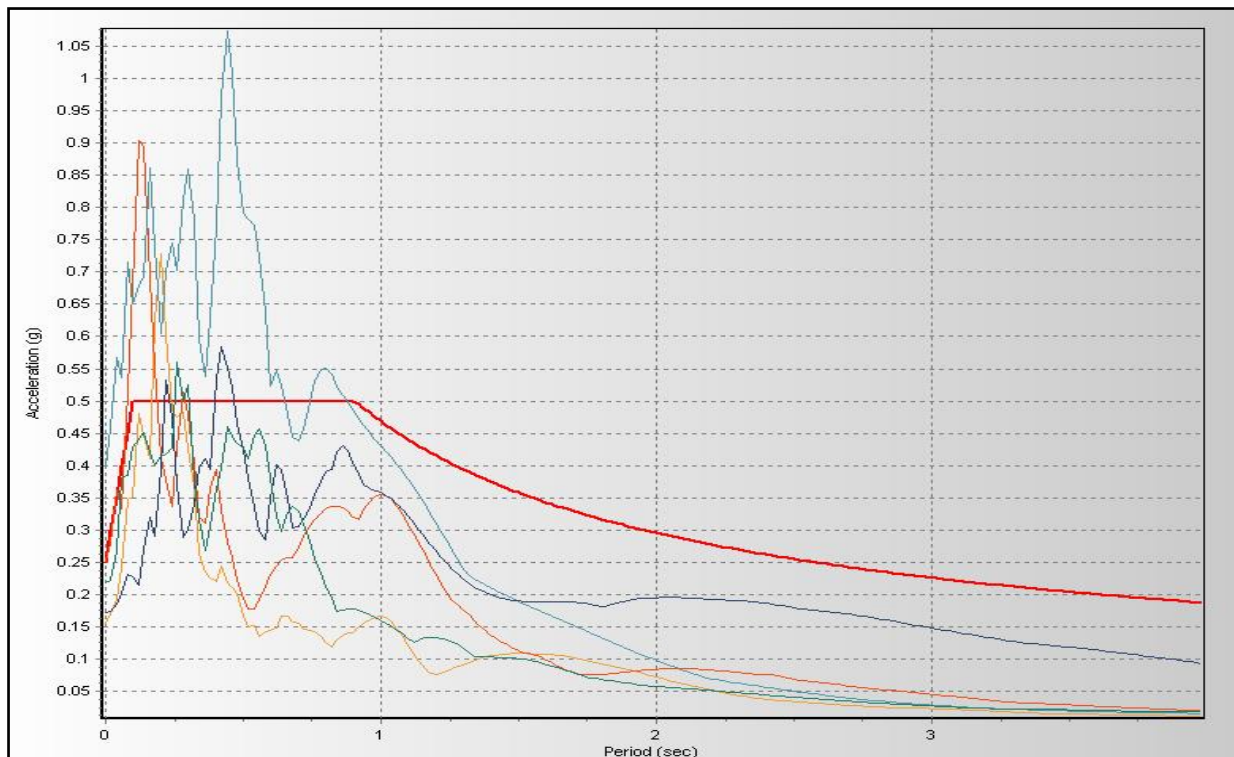


<input type="checkbox"/>	Result#	Comp.	NGA#	MSE	ScaleF	Pulse	Tp(s)	D5-95(s)	Event	Year	Station	Mag	Mechanism
<input checked="" type="checkbox"/>	1	GM	316	0.1442	1.0000	1 1	3.6 4.2	17.3 15.5	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.90	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	2	GM	148	0.7044	1.0000	0 0	-- --	9.6 7.9	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #3	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	3	GM	250	1.0200	1.0000	1 0	1.1 --	7.2 6.5	Mammoth Lakes-06	1980	Long Valley Dam (Upr L Abut)	5.94	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	4	GM	147	1.0413	1.0000	0 0	-- --	8.4 3.7	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.74	Strike-Slip
<input checked="" type="checkbox"/>	5	GM	547	1.2464	1.0000	0 0	-- --	12.9 8.5	Chalfant Valley-01	1986	Zack Brothers Ranch	5.77	Strike-Slip

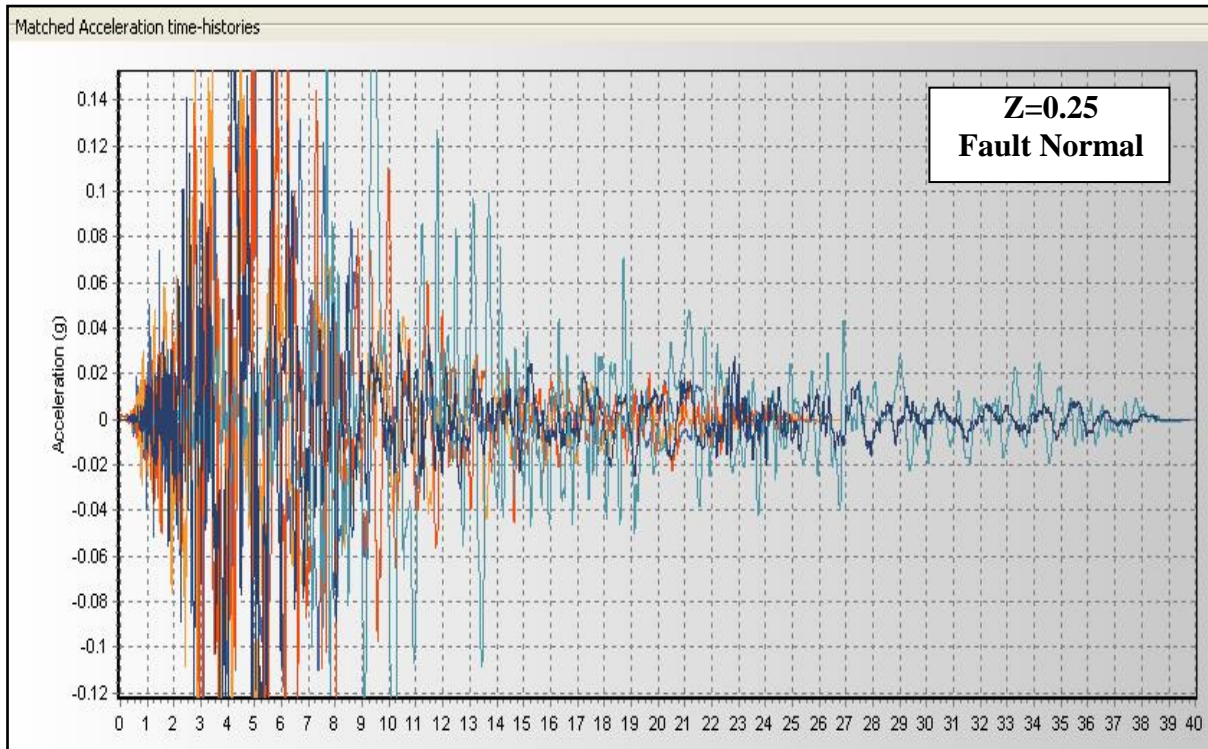
איור מס' 2.3.36: $Z=0.25$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים PEER



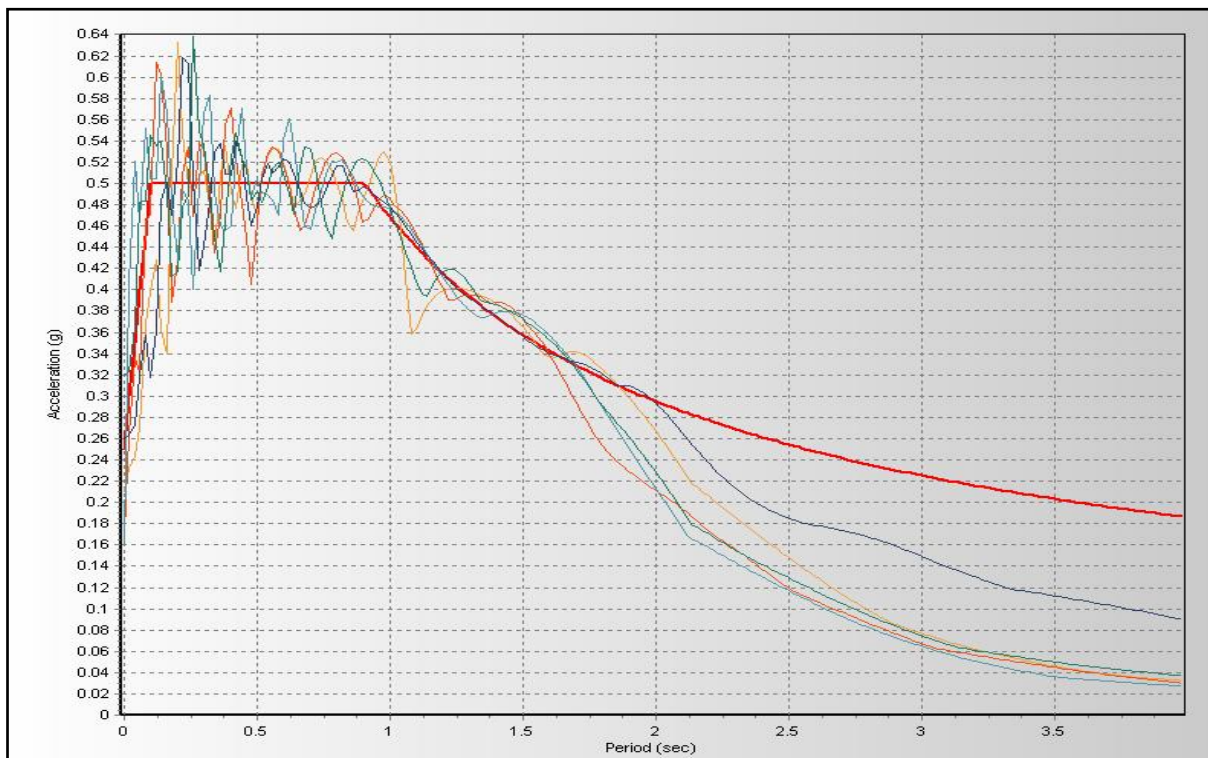
איור מס' 2.3.37: $Z=0.25$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב לשבר. בסיס נתונים PEER



איור מס' 2.3.38 : $Z=0.25$. רכיב אופקי בניצב לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד
באמצעות תכנת Seismomatch

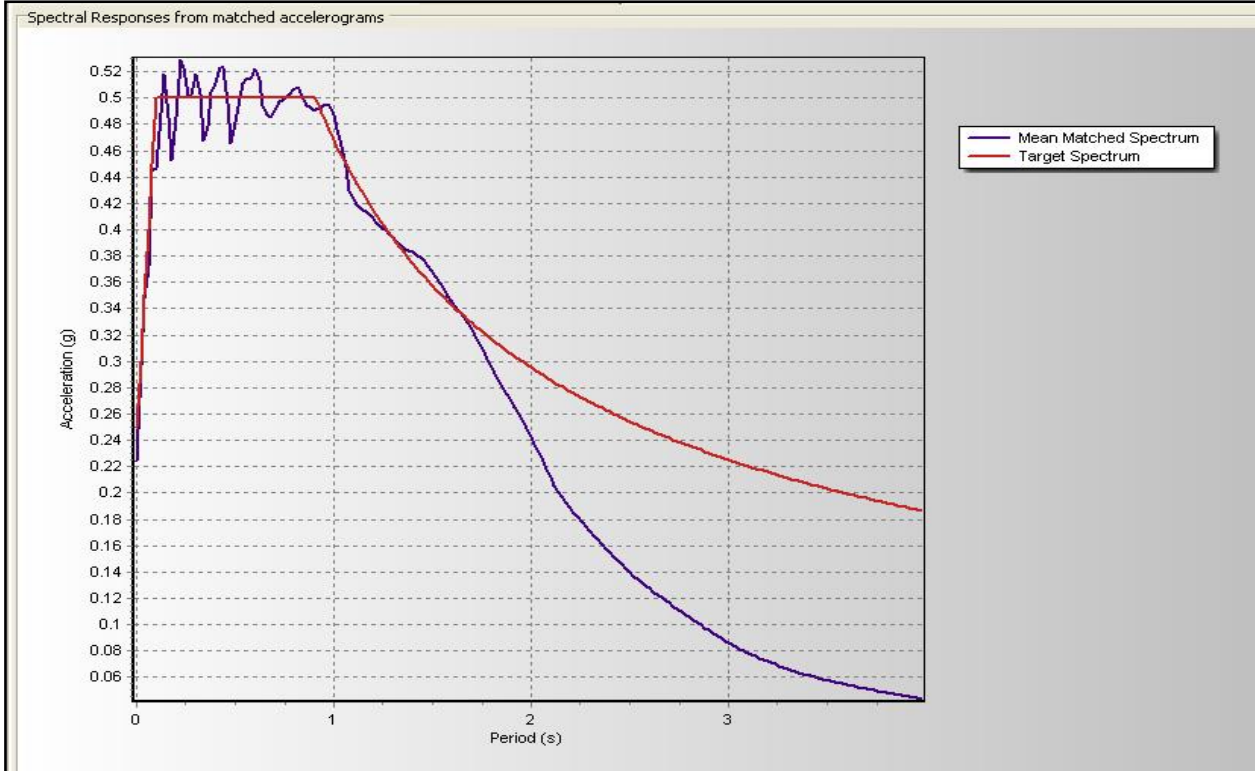


איור מס' 2.3.39 : $Z=0.25$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב
לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



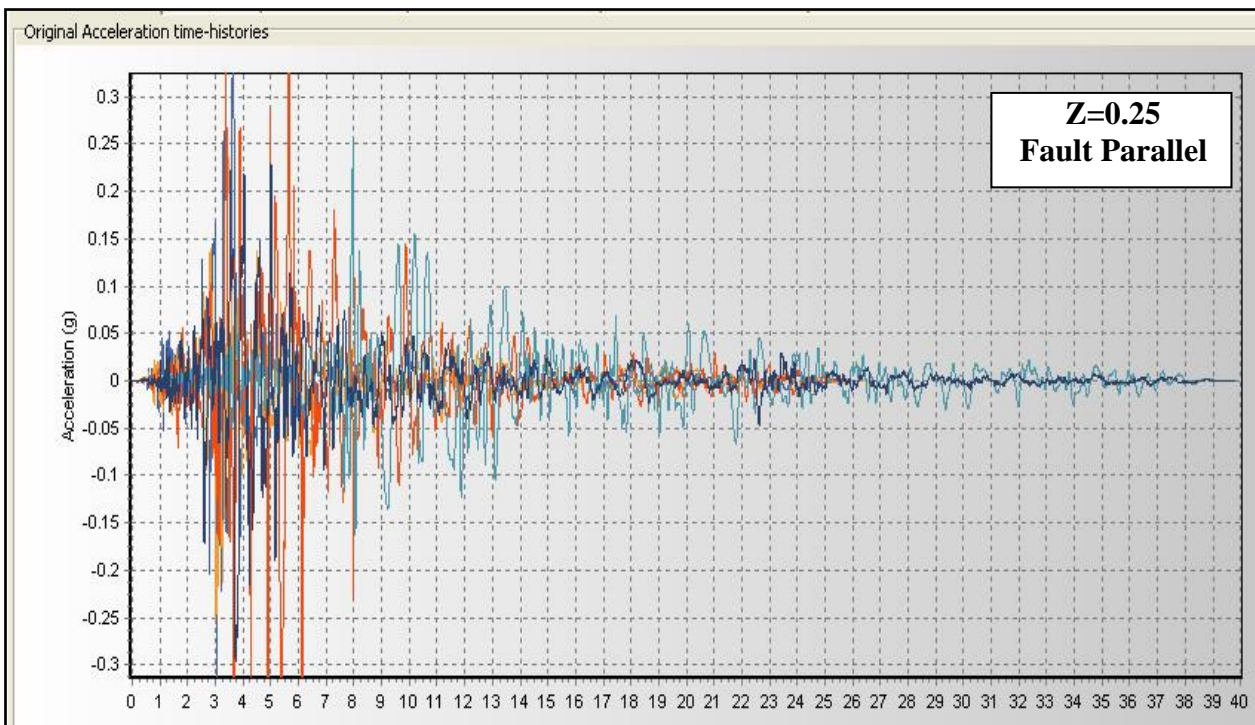
איור מס' 2.3.40: $Z=0.25$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות בניצב

לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch

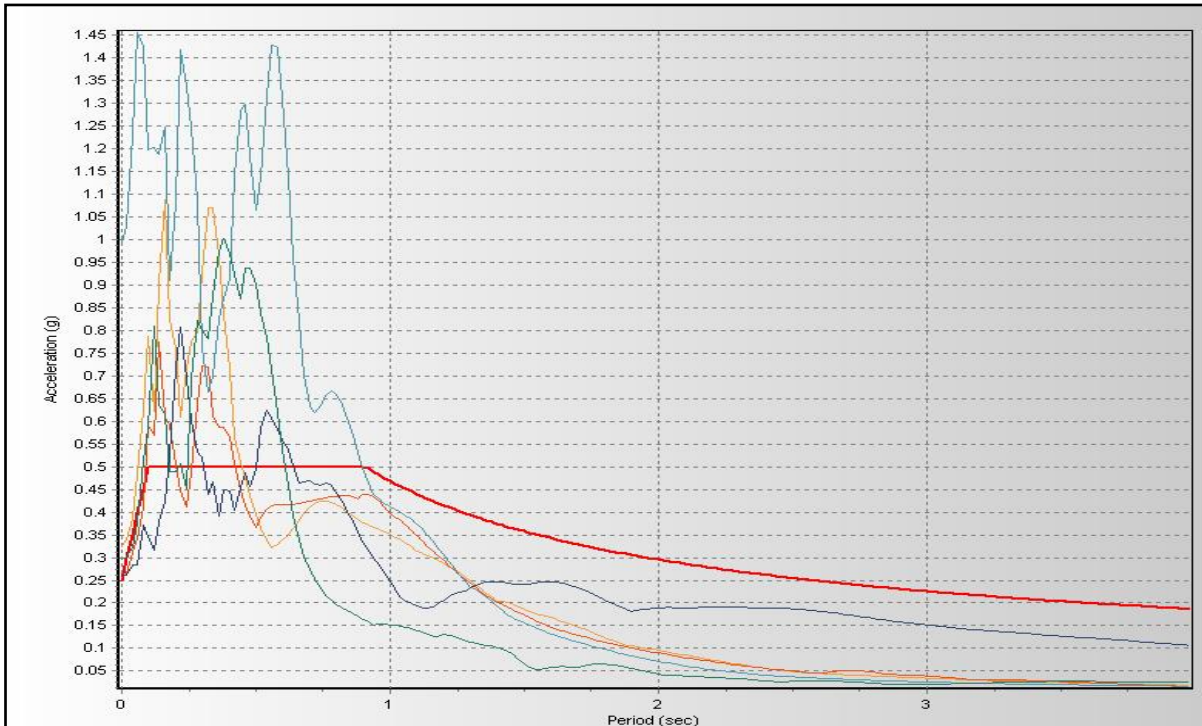


איור מס' 2.3.41: $Z=0.25$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות שנבחרו מבסיס נתונים

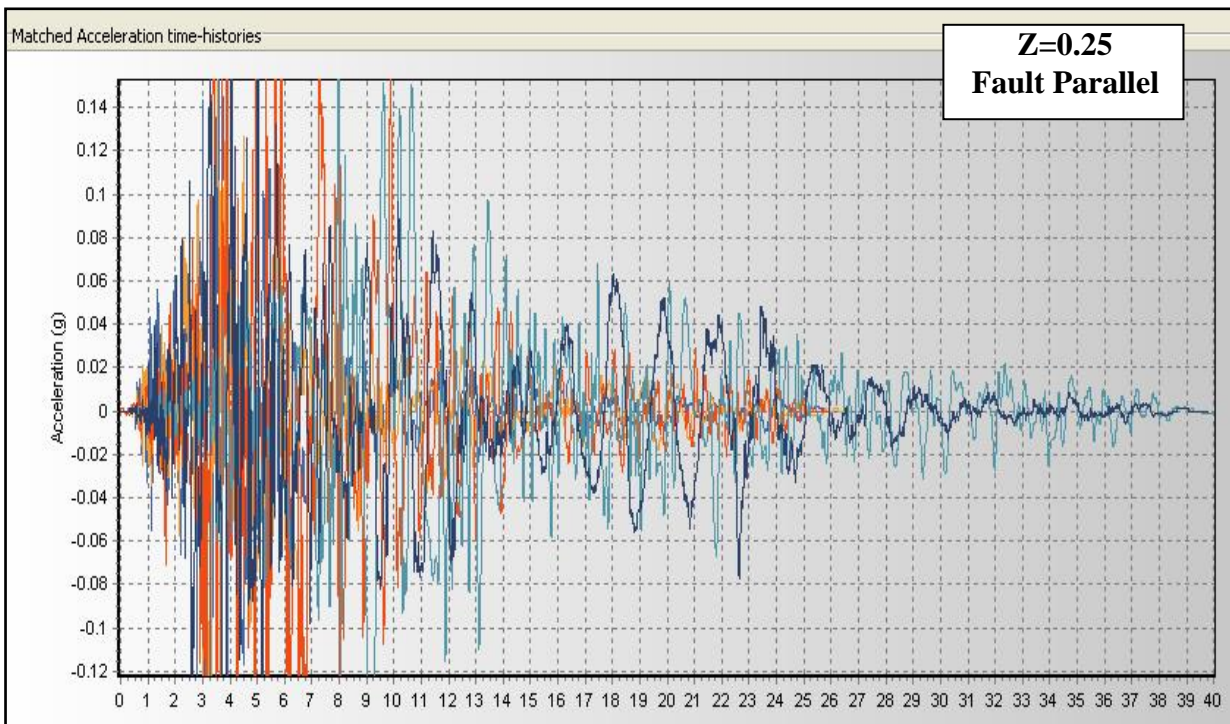
PEER



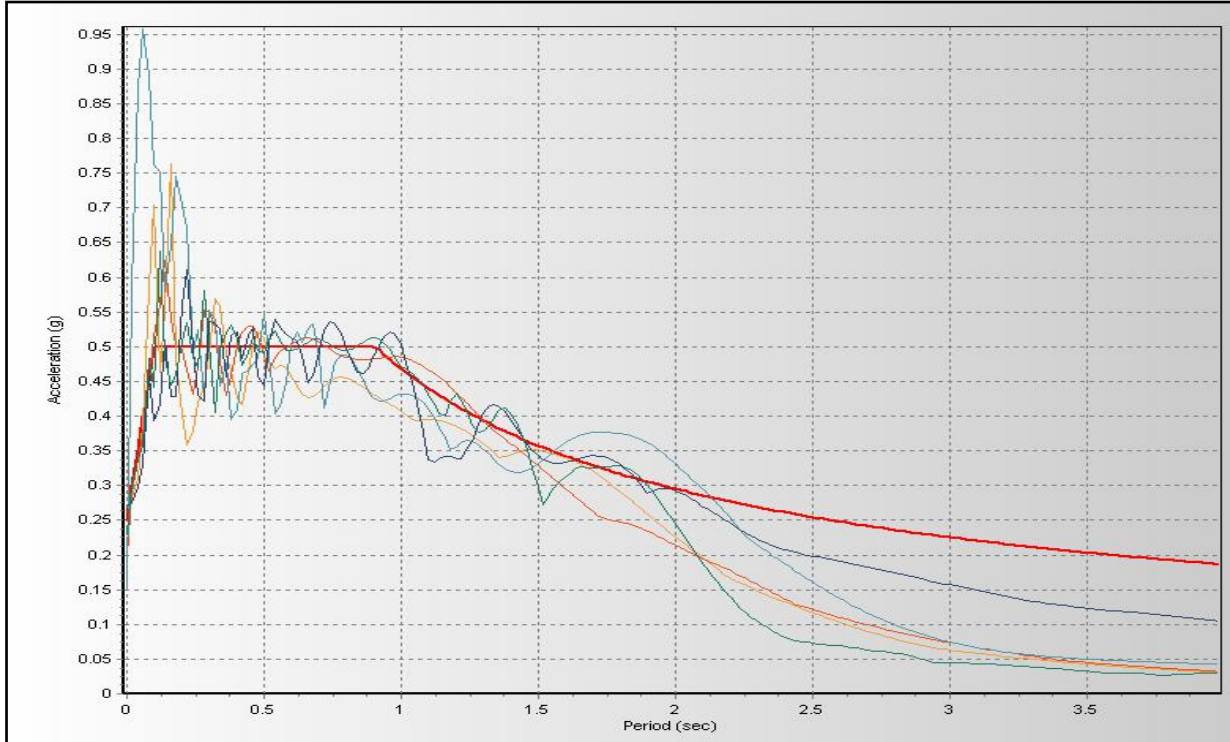
איור מס' 2.3.42: $Z=0.25$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי במקביל לשבר. בסיס נתונים PEER



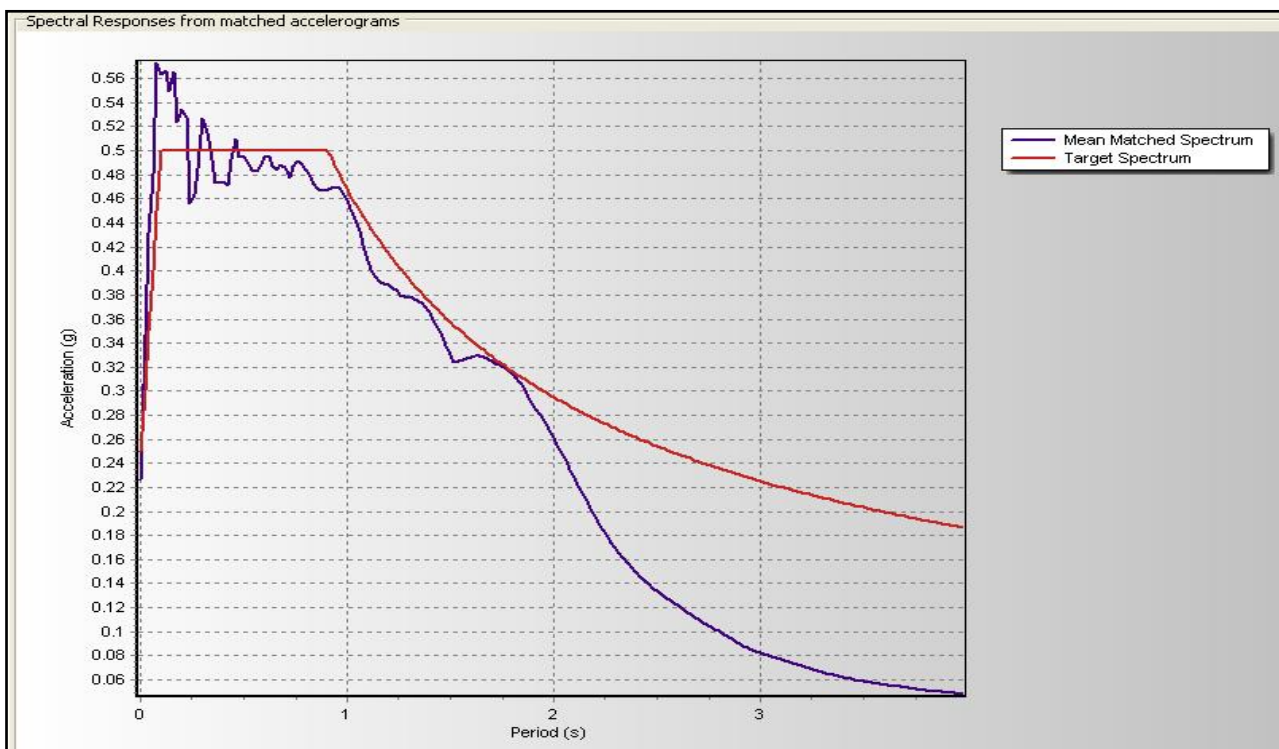
איור מס' 2.3.43: $Z=0.25$. רכיב אופקי במקביל לשבר ל-5 אקסלרוגרמות לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



איור מס' 2.3.44 : $Z=0.25$. ספקטרום של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות במקביל לשבר
לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



איור מס' 2.3.45 : $Z=0.25$. ספקטרום ממוצע של תגובת מבנה לרכיב אופקי של אקסלרוגרמות
במקביל לשבר לאחר עיבוד באמצעות תכנת Seismomatch



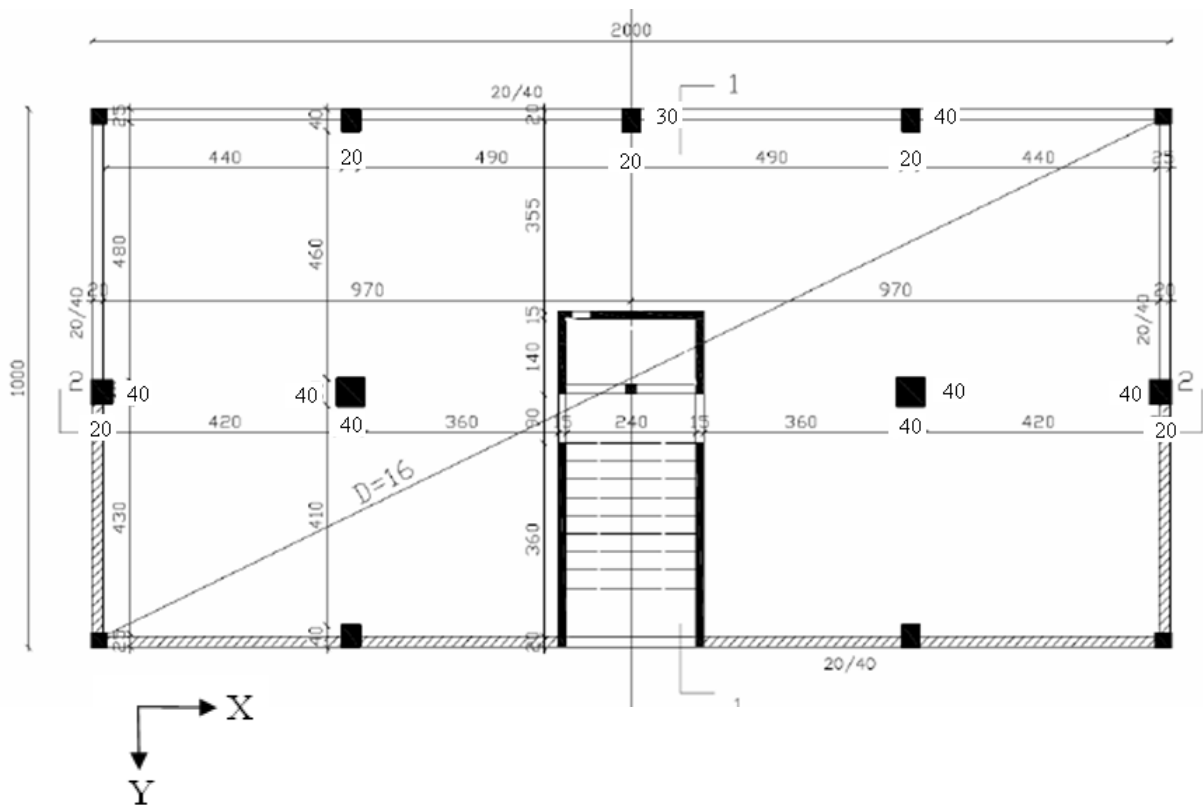
פרק 3**מבנים טיפוסיים לבדיקה**

3.1 סכמות מבנים לבדיקה

לצורך הערכת יתרונות וחסרונות של שימוש בבולמי זעזועים סיסמיים נעשה חישוב סיסמי למספר מבנים הבאים:

3.1.1 מבנה מגורים 4F קונבנציונלי שלוד מבטון מזוין יצוק באתר עם קירות ומחיצות בני בעל 4 קומות
 המבנה שייך למבנים מייצגים בהתאם לסקר "הכנת בסיס מידע על הבנייה הקיימת בישראל", 2011 אשר הוכן לפי הזמנת משרד התשתיות הלאומיות. תכנית של קומה טיפוסית מופיעה באיור מס' 3.1.1.

איור מס' 3.1.1: קומה טיפוסית של בניין מגורים מייצג לבדיקה 4F בגובה 4 קומות

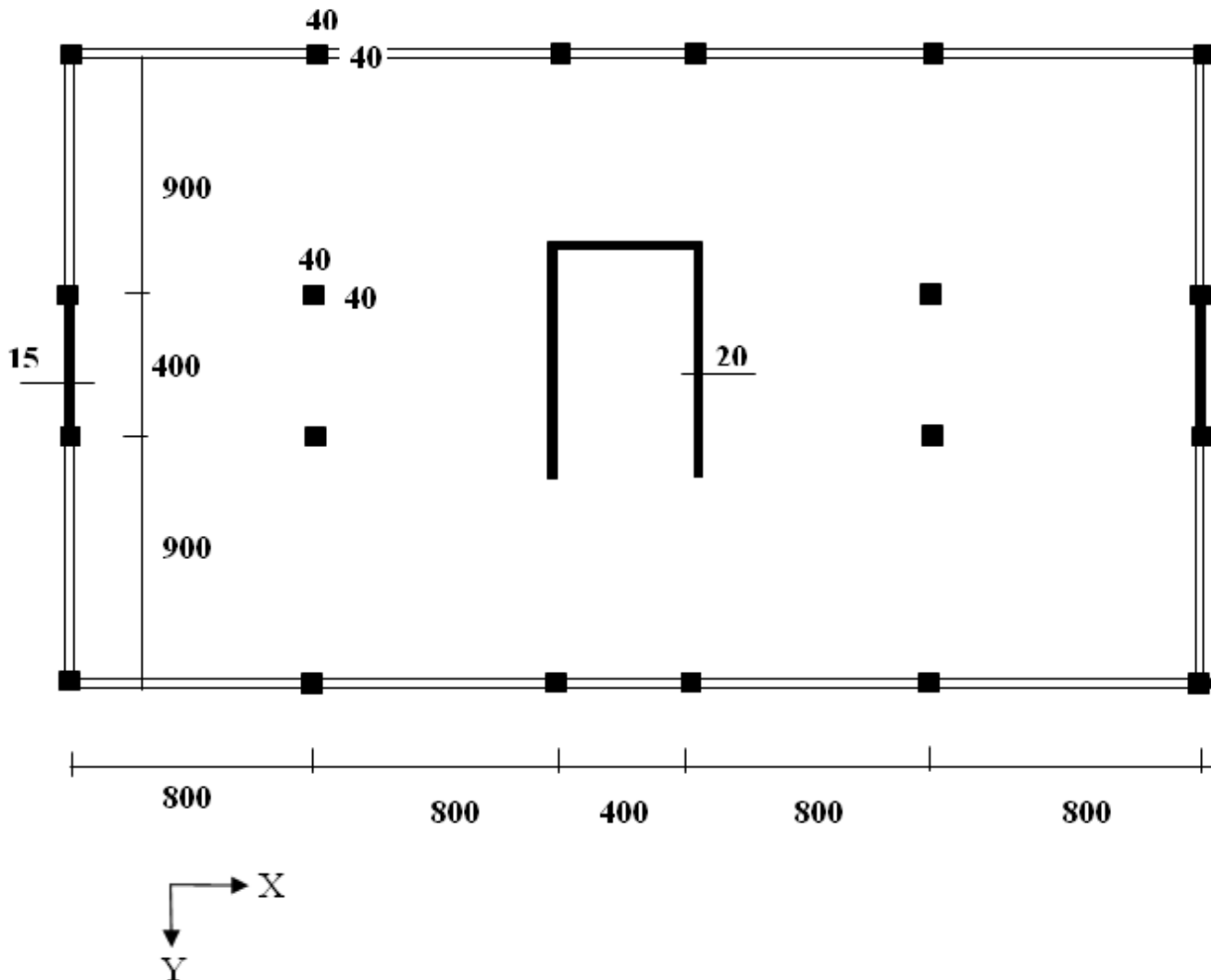


גובה קומה - 3 מ'.

חתכים לרוחב של העמודים והקורות מופיעים באיור מס' 3.1.1. עובי התקרה מפלטות בטון יצוק כ- 15 ס"מ. חוזק הבטון ופלדת הזיון סטנדרטי, מנת הזיון לעמודים והקורות נעה בתחום של 1.3-1.8%.

3.1.2 מבנה מגורים קונבנציונלי 8F שלוד מבטון מזוין יצוק באתר עם קירות ומחיצות בני בעל 8 קומות
 המבנה שייך למבנים מייצגים בהתאם לסקר לעיל. תכנית של קומה טיפוסית היא דומה לתכנית

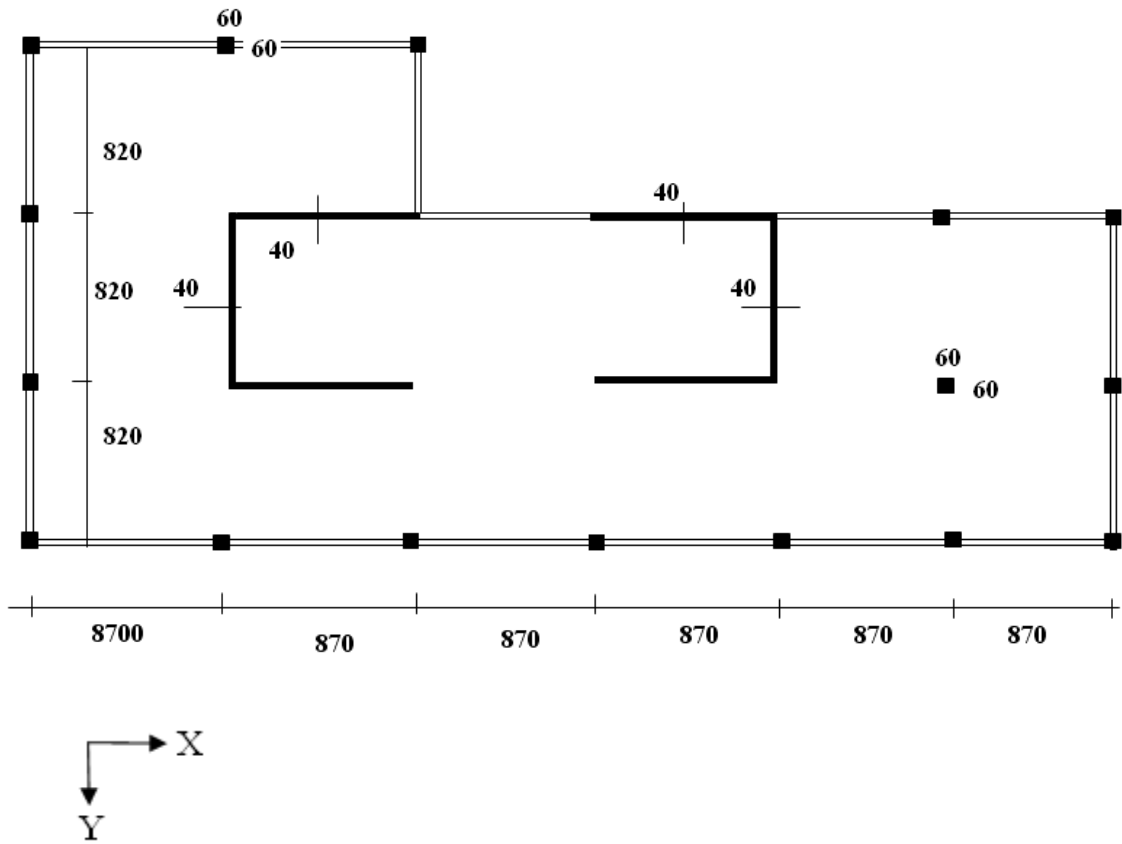
איור מס' 3.1.3: קומה טיפוסית של מבנה בית חולים 7F, בעל 7 קומות



3.1.4 מבנה משרדים F12 שלוד מבטון מזוין יצוק באתר, בעל 12 קומות

תכנית של קומה טיפוסית מופיעה באיור מס' 3.1.4. גובה קומה 3.8 מ'. קורות בטון הינם 30/60 ס"מ. עובי של פלטות בטון יצוק של הרצפה הוא 15 ס"מ. חוזק בטון ופלדת זיון הוא סטנדרטי, מנת זיון לעמודים וקורות נעה בתחום של 1.3-1.9%.

איור מס' 3.1.4: קומה טיפוסית של מבנה משרדים 12F, בעל 12 קומות



בתכנויות לעיל צוינו צירים X ו-Y, בהם נעשה שימוש להקמת מודלים של תכנת Stera 3D.

פרק 4**תיאור חישובים סיסמיים**

4.1 תיאור כללי של מודל Stera 3D

החישובים בוצעו באמצעות גרסה 5.8 האחרונה של התכנה, אשר מאפשרת לעשות חישובים סיסמיים לא ליניאריים למבנים ללא ועם בולמי זעזועים מסוגים המתוארים לעיל. המודל הוא תלת ממדי ולמעשה אינו מוגבל מבחינת מספר קומות ומפתחים בבניין הנבדק.

רכיבים קונסטרוקטיביים של מבנה במודל הם לא ליניאריים, הקירות מחושבים באמצעות מודל האלמנט הסופי.

בולמי זעזועים מוצגים באמצעות אלמנטים לא ליניאריים עם דיאגרמות העמסה-הורדת עומס המוצגות באיור מס' 1.5.3. משום כך המודל מאפשר לחשב מבנה על בולמי זעזועים מכל הסוגים לעיל, כאשר לבולמי הזעזועים מוגדרים מאפיינים רלוונטיים אפקטיביים (ראה להלן).

המודל מחשב ומציג בטבלאות מידע רב על תכונות דינאמיות של מבנים מבודדים ולא מבודדים, כולל תקופות של רעידות עצמיות וצורות הרעידות, תזוזת קומות והסטות קומתיות, כוחות גזירה קומתיות, תזוזות, תאוצות, מומנטים וכוחות גזירה, דפורמציות אלסטיות ופלסטיות בעמודים, קורות ועוד.

4.2 מאפייני בולמי הזעזועים

בשלב תכנון מפורט, כשמבצעים גם תכנון קונסטרוקטיבי ומכינים מפרטים של בולמים, קובעים פרמטרים שלהם, כולל עומס מרבי, כוח אופקי אלסטי מרבי, מקדמי קשיחות (בקטעים שונים של דיאגרמות מחזורי העמסה – הורדת עומס), תזוזות מרביות, קשיחות אפקטיבית, מידות וכדומה. יחד עם זאת, בהתאם למהות העבודה, היא איננה עוסקת בכל הפרמטרים האלה ובדוח זה יוצגו מאפיינים עקרוניים של בולמי הזעזועים מבחינת בידוד הרעידות הסיסמיות, בהם משתמשים מהנדסים לבחירת בולמי זעזועים. להלן יוצגו מאפיינים הבאים עבור כל בניין וכל חישוב שנעשה:

* תקופה בסיסית של מבנה מבודד, אשר תלויה במאפייני המבנה, כולל משקל קומות (משפיע על קשיחות אופקית של בולמי זעזועים בעלי תסבולת נדרשת), כמות, מיקום וקשיחות אופקית של בולמי הזעזועים. פרמטר זה הוא החשוב מבחינת בידוד הרעידות, ותלוי לא רק במאפיינים של בולמי זעזועים אלא גם במאפייני המבנה, ובדרך כלל הינו המאפיין העיקרי של המבנים המבודדים.

* יחס בין מקדמי קשיחות K_p ו- K_e (ראה איור מס' 1.5.3) בדיאגרמה העמסה – הורדת עומס, אשר מאפיין באופן אינטגרלי תכונות אלסטו-פלסטיות של בולמי הזעזועים ופיזור אנרגית רעידות בהם.

* בחישובים להלן נעשה שימוש בבולמי זעזועים סטנדרטיים, כאשר הבולמים נקבעו לפי המשקל שחל עליהם מהמבנה המבודד, כאשר היחס K_p/K_e התקבל כלהלן:

– 0.35 אשר שייך לבולמי זעזועים עם מקדם ריסון נמוך יחסית וקשיחות אופקית גדולה -

בולמי זעזועים קשיחים מסוג HDRB או FPS.

– 0.1 אשר שייך לבולמי זעזועים עם מקדם ריסון גבוה - בולמי זעזועים מסוג LRB או FPS.

4.3 תיאור החישובים

לכל אחד מהמבנים נערכו חישובים הבאים :

4.3.1 חישוב סיסמי ל-10 אקסלרוגרמות (רעידות אדמה) מסוג FN ו-FP שנבנו (ראה לעיל) עבור מקדם תאוצת הסלע של $Z=0.1$ למצב של בניין לא מבודד עם תאוצות הקרקע לכיוון X (10 הרצות המודל).

4.3.2 חישוב סיסמי ל-10 אקסלרוגרמות (רעידות אדמה) מסוג FN ו-FP שנבנו עבור מקדם תאוצת הסלע של $Z=0.1$ למצב של בניין לא מבודד עם תאוצות הקרקע לכיוון Y (10 הרצות המודל).

4.3.3 חישוב סיסמי ל-10 אקסלרוגרמות (רעידות אדמה) מסוג FN ו-FP שנבנו עבור מקדם תאוצת הסלע של $Z=0.1$ למצב של בניין מבודד עם תאוצות הקרקע לכיוון X (10 הרצות המודל).

4.3.4 חישוב סיסמי ל-10 אקסלרוגרמות (רעידות אדמה) מסוג FN ו-FP שנבנו עבור מקדם תאוצת הסלע של $Z=0.1$ למצב של בניין מבודד עם תאוצות הקרקע לכיוון Y (10 הרצות המודל).

החישובים בסעיפים 4.3.1 – 4.3.4 בוצעו גם עבור סטים אקסלרוגרמות שנבנו עבור מקדם תאוצת הסלע של 0.15, 0.20 ו-0.25.

בהתאם לכך לכל בניין נבדק נערכו 80 חישובים (הרצת המודל) למצב ללא בידוד ואותו מספר החישובים לבניין מבודד, כאשר מספר החישובים הכולל לארבע מבנים שנבדקו הוא 640.

4.4 תוצאות החישובים

כאמור, כתוצאה מכל חישוב מתקבל מידע רב מאוד, ובדוח זה מוצגים רק מאפיינים הבאים החשובים להערכת פוטנציאל של שימוש בבולמי הזעזועים לבידוד מבנים מפני רעידות אדמה :

* תקופות לרעידות עצמיות של מבנה לא מבודד ומבודד וגם צורות הרעידות הרלוונטיות.

* יחס בין גודל של כוח גזירה קומתי מרבי לפני ואחרי בידוד הרעידות.

* יחס בין כוחות גזירה קומתיים לכל קומה עבור מבנה מגורים בן 8 קומות (8 F).

* יחס בין הסטות קומתיות למספר מצבים טיפוסיים.

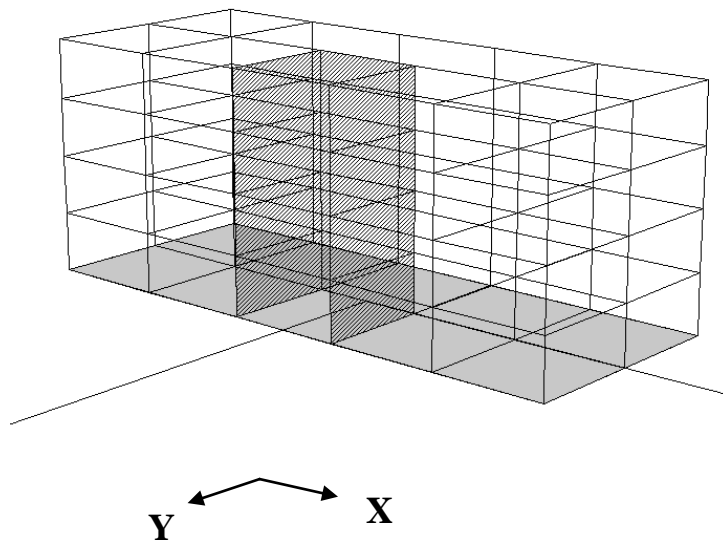
פרק 5**תוצאות החישוב. מבנה מגורים 4F**

5.1 סכימת המבנה

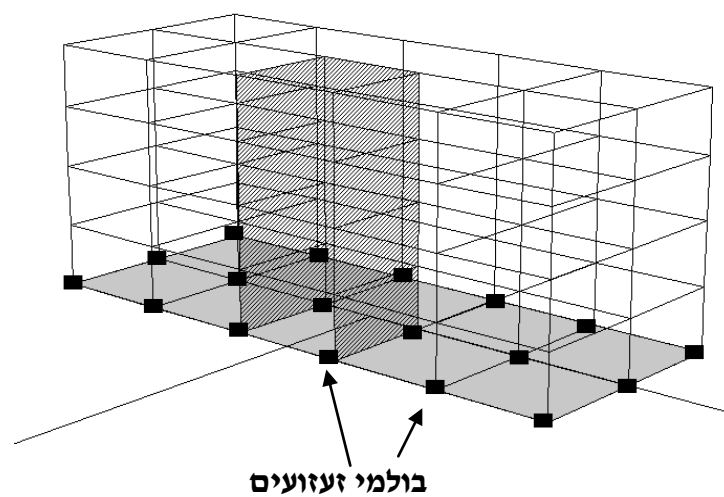
תכנית קומה טיפוסית של המבנה מוצגת באיור מס' 3.1.1. סכימת המבנה במודל Stera 3D מופיעה באיור 5.1.1.

איור מס' 5.1.1: סכימת מבנה 4F במודל Stera 3D

מבנה לא מבודד



מבנה מבודד



5.2 תקופות וצורות רעידות עצמיות

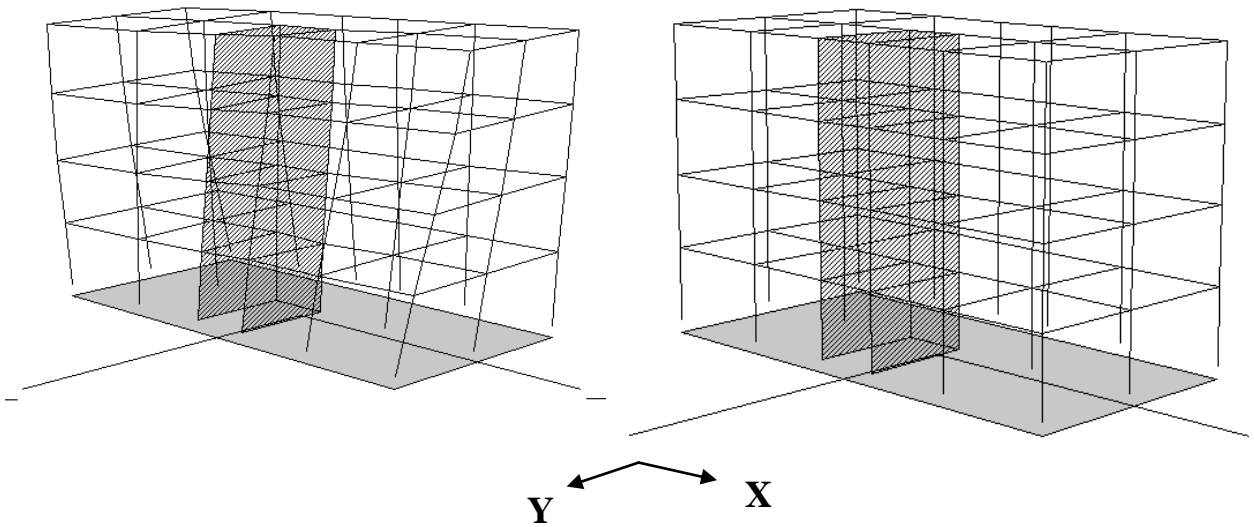
5.2.1 מבנה לא מבודד

תקופות וצורות רעידות עצמיות לשלוש התקופות הגדולות (תדירויות עצמיות הנמוכות) מוצגות

באיור מס' 5.2.1. עבור פיתול לתקופה בסיסית של 0.63 s המבנה מוצג במצב תחילי וגם אחרי תזוזות הפיתול.

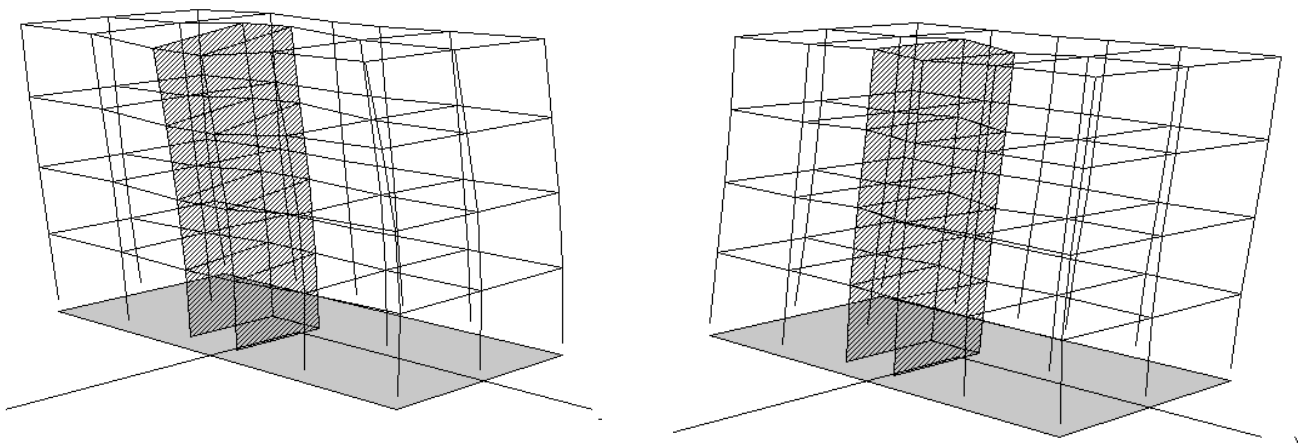
איור מס' 5.2.1: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 4F לא מבודד

פיתול, $T_1=0.63\text{ s}$



תזוזה לכיוון Y, $T_3=0.26\text{ s}$

פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_2=0.37\text{ s}$

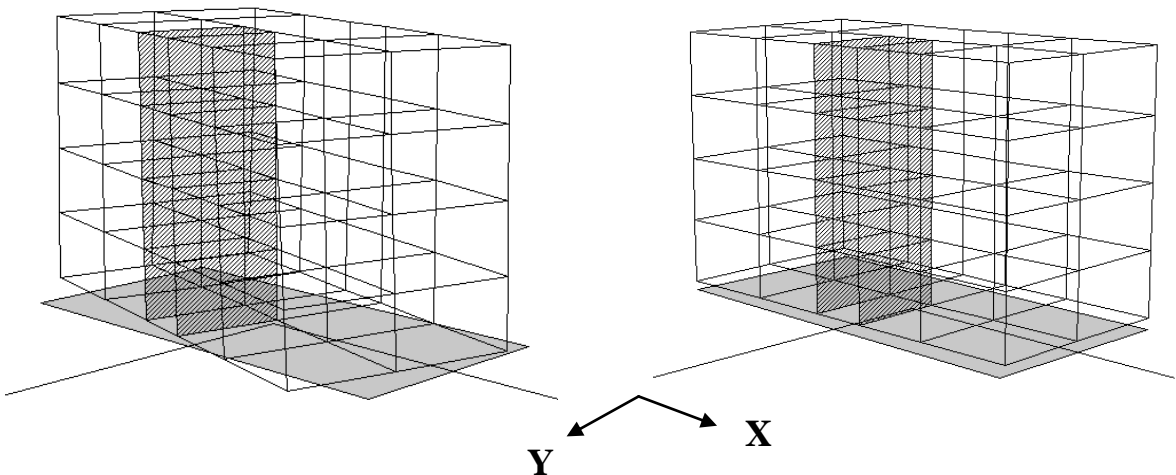


5.2.2 מבנה מבודד

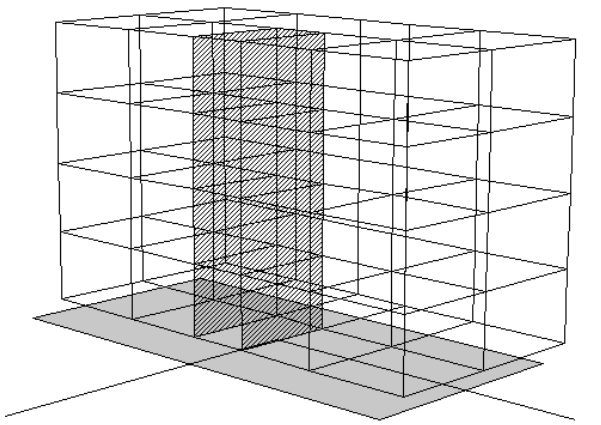
במודל תוכננו בולמי זעזועים די קשיחים המספקים את התקופה הבסיסית של 1.83 s . באיור 5.2.2 מוצגות תקופות וצורות רעידות עצמיות לשש התקופות הגדולות. ניתן לראות כי לשלוש מודות הרעידות הראשונות המבנה נע כמו גוף קשיח כמעט בלי דפורמציות ורק במודה הרביעית עם תקופה די קטנה של 0.37 s נוצרות דפורמציות, הסטות בין קומות, כוחות גזירה בעמודים ומומנטים.

איור מס' 5.2.2: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 4F מבודד

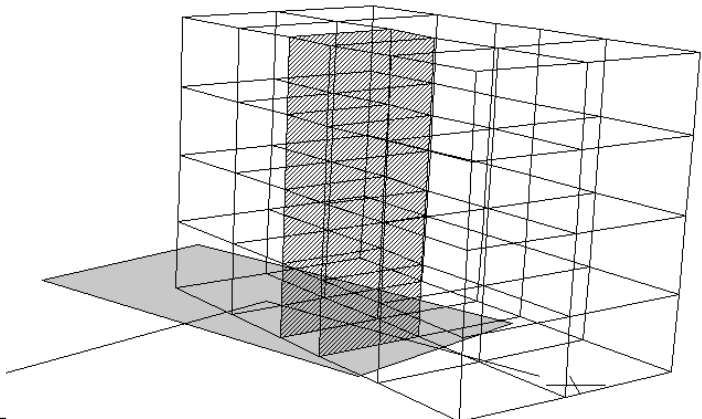
פיתול, $T_1=1.87\text{ s}$



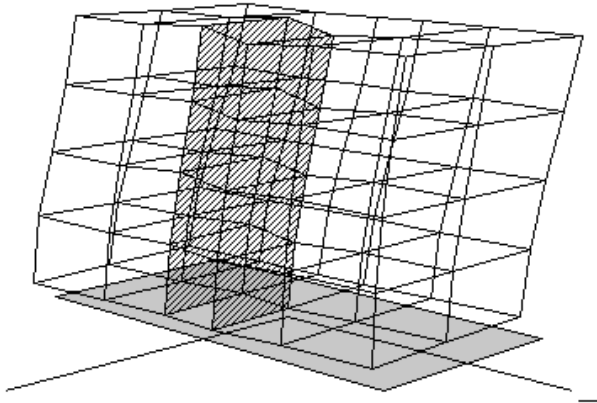
תזוזה לכיוון Y, $T_3=1.81\text{ s}$



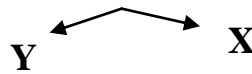
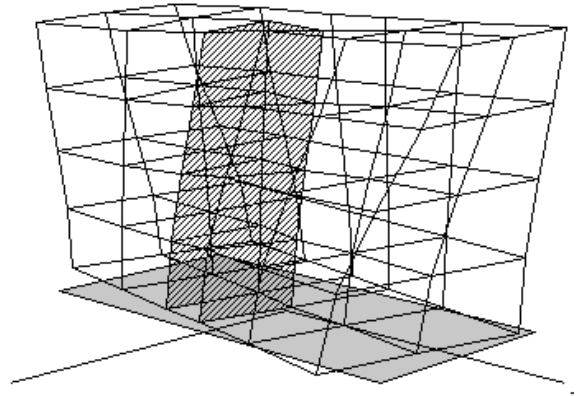
פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_2=1.83\text{ s}$



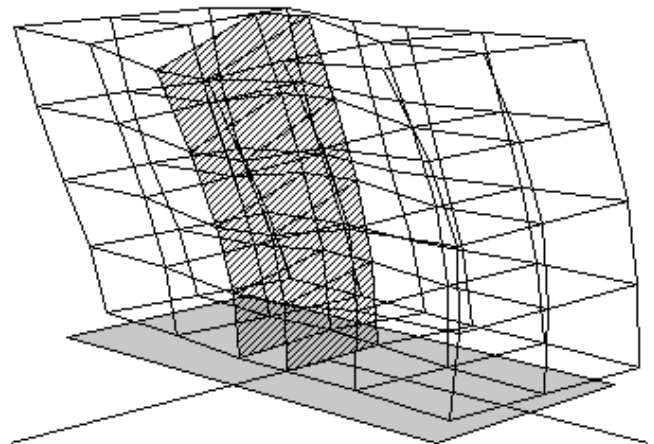
X תזוזה לכיוון, $T5=0.24\text{ s}$



פיתול, $T4=0.37\text{ s}$



תזוזה לכיוון Y, $T6=0.18\text{ s}$



5.3 הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי

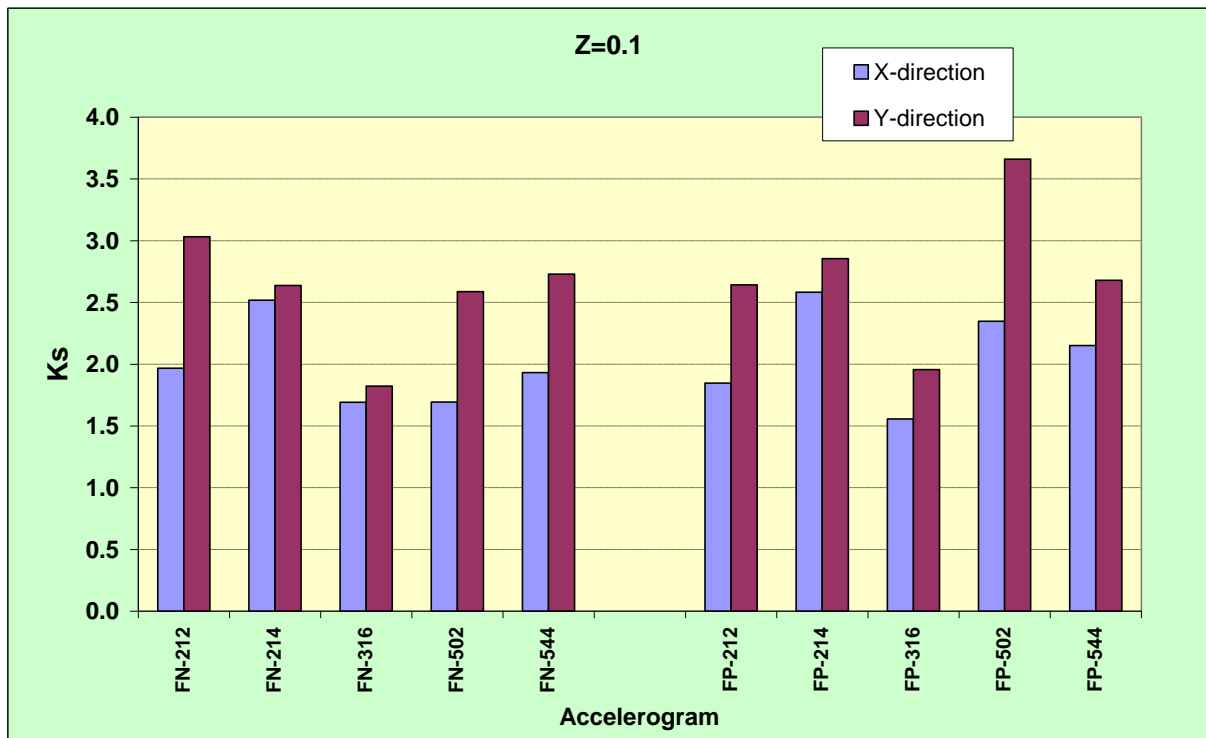
5.3.1 עבור רעידות אדמה השייכות ל- $Z=0.1-0.15$ נעשה שימוש בבולמי זעזועים עם מקדם $K_p/K_e=0.35$, כאשר לרעידות אדמה חזקות יותר, השייכות ל- $Z=0.2-0.25$, נעשה שימוש בבולמים עם מקדם $K_p/K_e=0.1$ שמספקים בליעת אנרגיה גדולה יותר.

5.3.2 באיורים מס' 5.3.1-5.3.4 מוצג לכל אחת מאקסלרוגרמות (רעידות אדמה) מקדם K_s הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי בבניין מבודד בהשוואה לבניין לא מבודד. בכל גרף מופיעות תוצאות החישוב השייכות לגודל מסוים של מקדם תאוצה Z לתאוצות הקרקע לכיוון X ולכיוון Y . בציר X של הגרפים מצוין שם רעידת האדמה ובציר Y מופיע מקדם K_s .

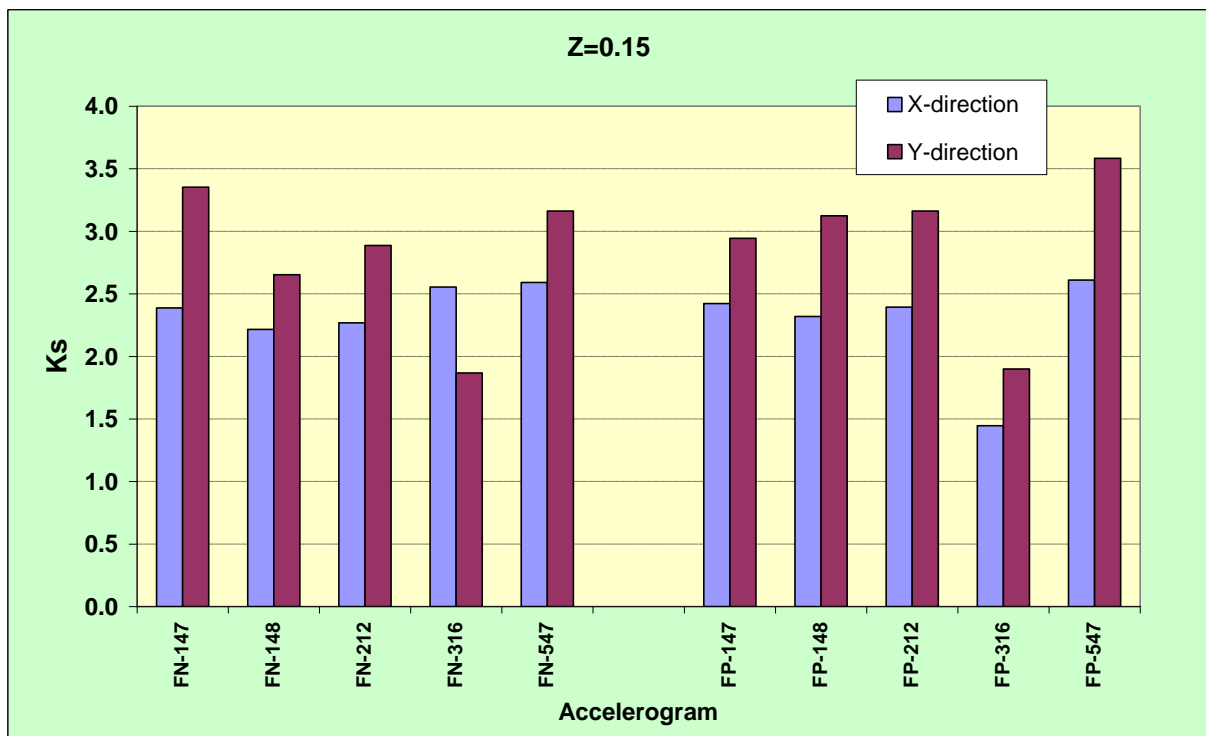
5.3.3 הכוחות למבנה זה ולמבנים אחרים להלן חושבו בהתחשב בדפורמציות פלסטיות, הנוצרות במבנה לא מבודד ומבודד, והפחתת הכוחות הנגזרות מכך. בבניין מבודד הסטות קומתיות הן קטנות, נוצרים כוחות (כולל כוחות גזירה) קטנים יחסית והמבנים עובדים בתחום אלסטי. באותו זמן בולמי זעזועים של מבנה מבודד מקבלים תזוזות גדולות והבולמים מסוג **HDRB** וגם מסוג **LRB** עובדים עם דפורמציות פלסטיות גדולות. בולמי זעזועים מסוג **FPS** יעבדו באופן לא ליניארי עם תזוזות גדולות, אך פעילות בולמים אלה אינה קשורה לדפורמציות פלסטיות ברכיביהם עקב אי-ליניאריות גיאומטרית ולא פיזית.

5.3.4 כוחות גזירה קומתיים מרבים נוצרים בעמודים בקומת הקרקע, ולכן הגרפים מתארים הפחתת הכוחות לקומת הקרקע. נתונים טיפוסיים לכל הקומות מוצגים להלן בדוגמת מבנה מגורים של 8 קומות (F 8).

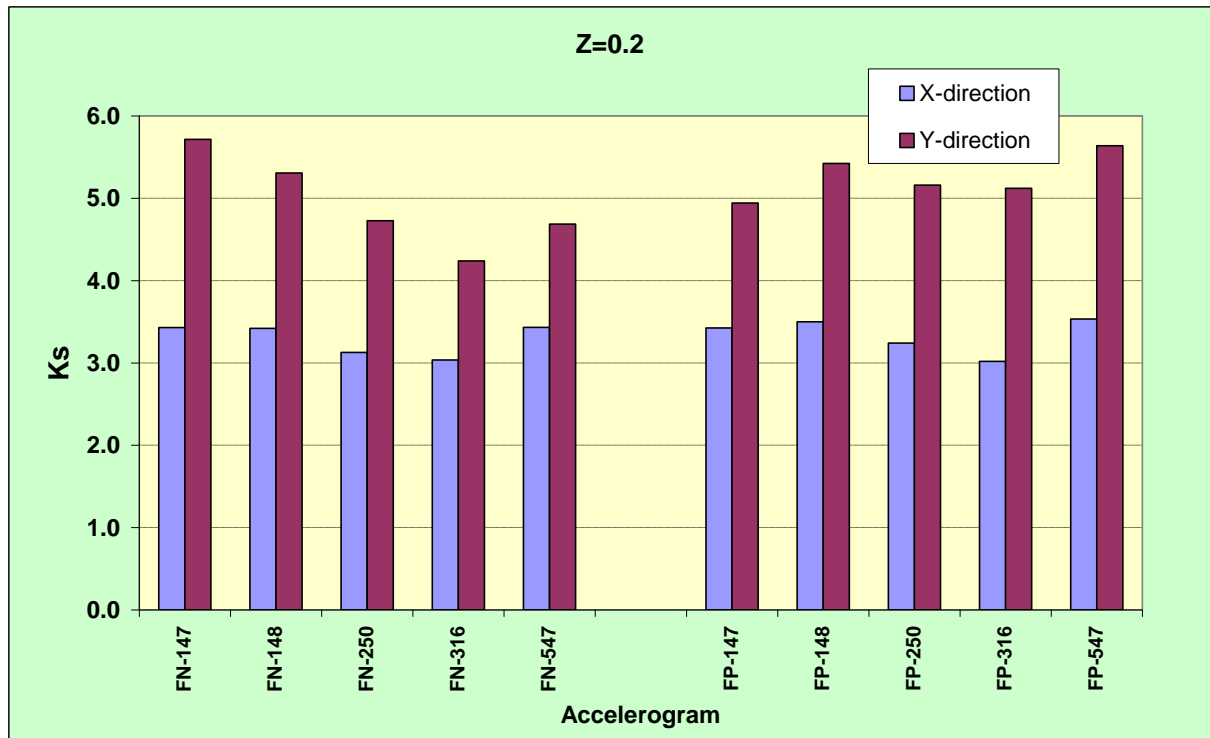
איור מס' 5.3.1: מבנה 4F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.1$



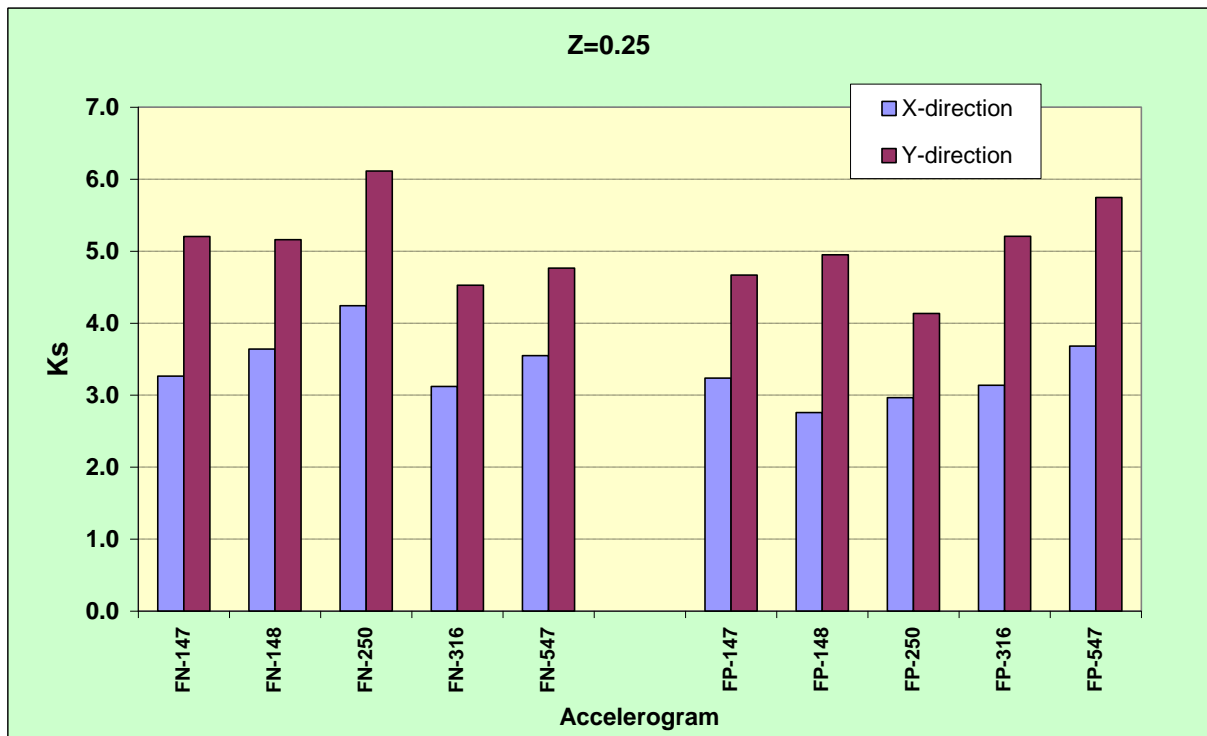
איור מס' 5.3.2: מבנה 4F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



איור מס' 5.3.3: מבנה 4F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



איור מס' 5.3.4: מבנה 4F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



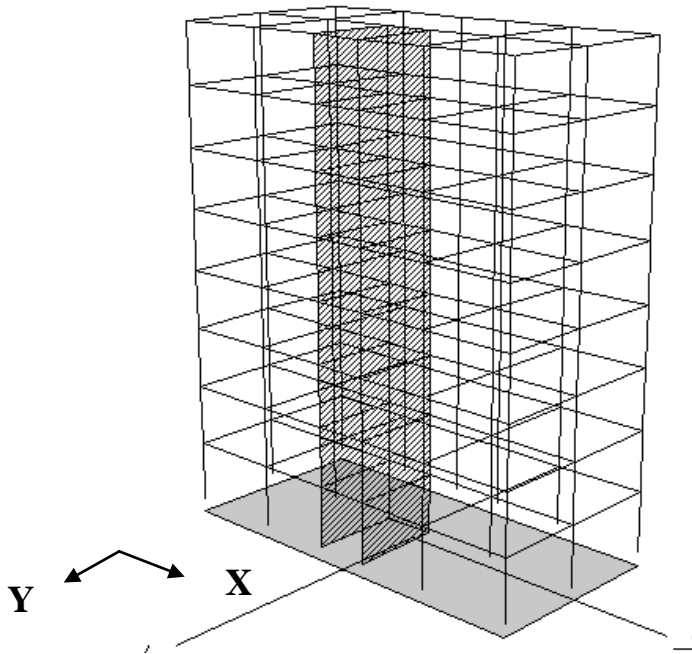
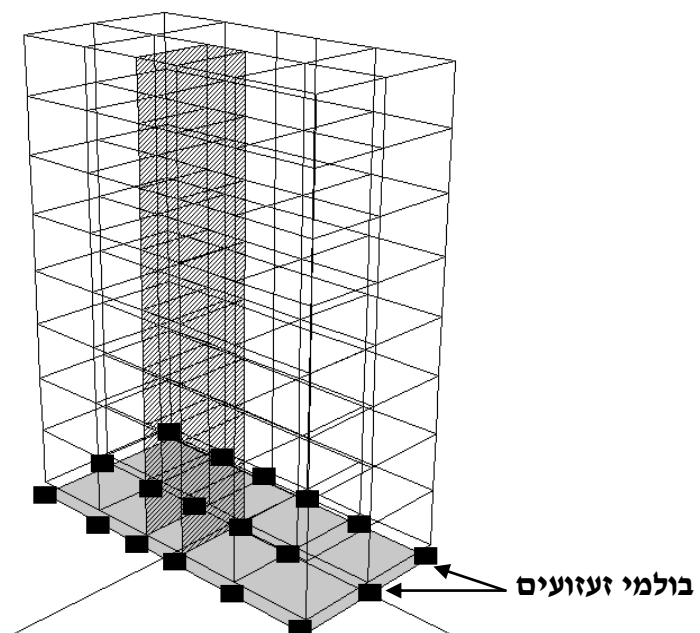
פרק 6

תוצאות החישוב. מבנה מגורים 8F

6.1 סכימת המבנה

תכנית קומה טיפוסית של המבנה מוצגת באיור מס' 3.1.2. סכימת המבנה במודל Stera 3D מופיע באיור 6.1.1.

איור מס' 6.1.1: סכימת מבנה 8F במודל Stera 3D

מבנה לא מבודדמבנה מבודד

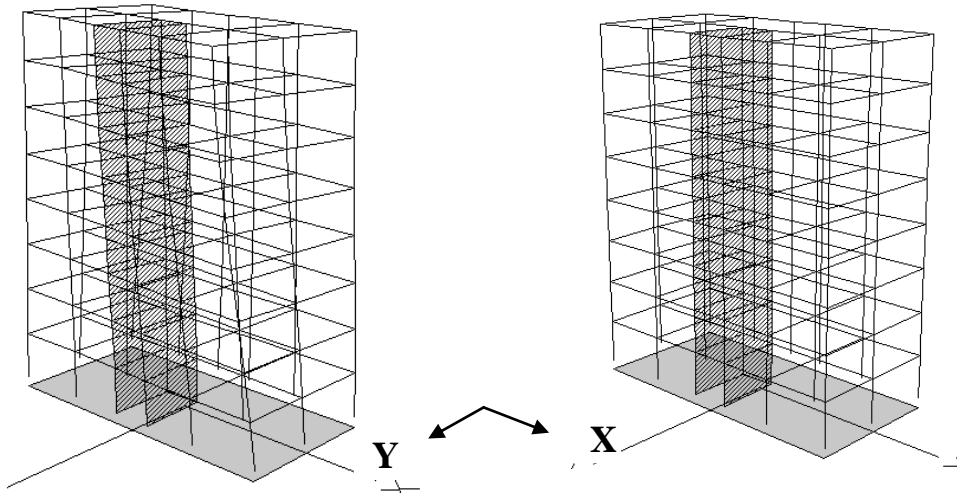
6.2 תקופות וצורות רעידות עצמיות

6.2.1 מבנה לא מבודד

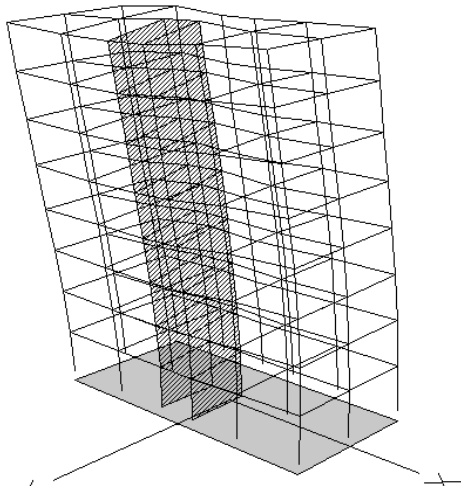
תקופות וצורות רעידות עצמיות לשלוש התקופות הגדולות מוצגות באיור מס' 6.2.1. עבור הפיתול בתקופה הגדולה של 1.05 s, המבנה מוצג במצב תחילי וגם אחרי תזוזות הפיתול.

איור מס' 6.2.1: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 8F לא מבודד

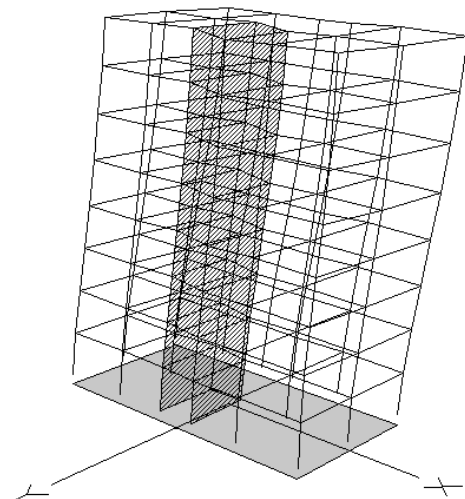
פיתול, $T_1=1.05$ s



תזוזה לכיוון Y, $T_3=0.67$ s



פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_2=0.76$ s

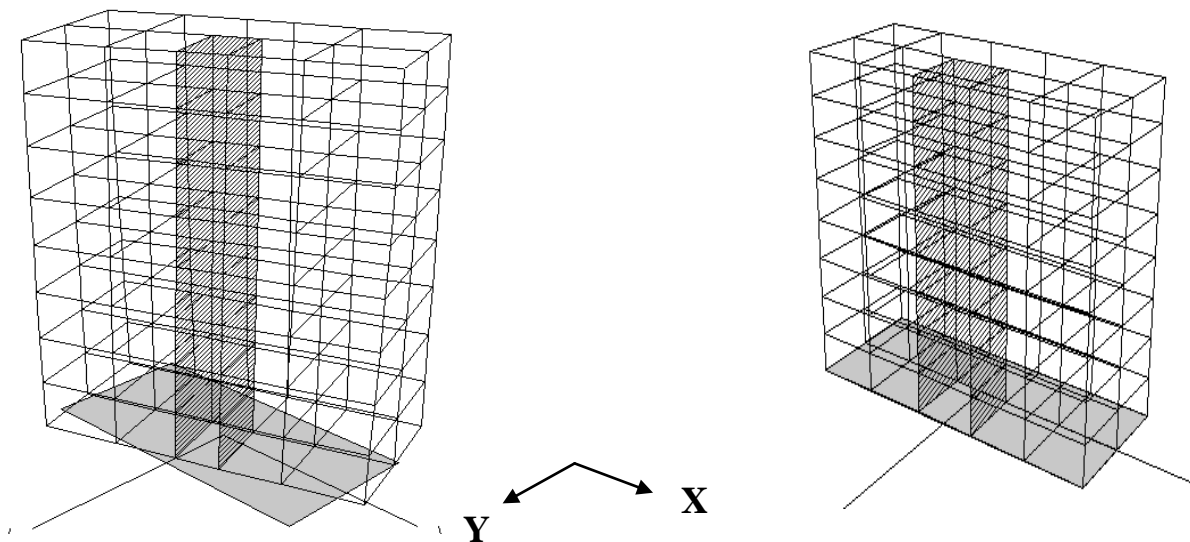


6.2.2 מבנה מבודד

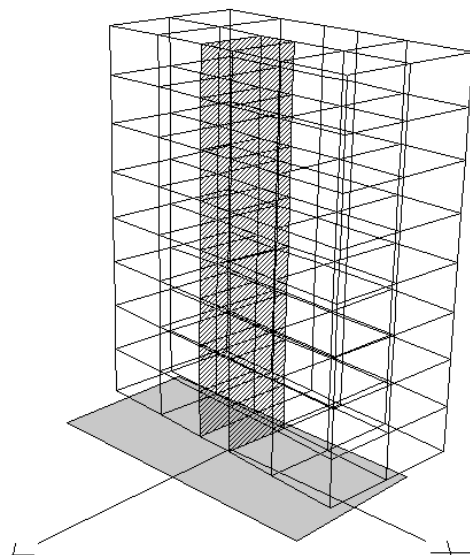
למבנה מתוכננים בולמי זעזועים די קשיחים אשר מספקים את התקופה הבסיסית של 2.51 s . באיור 6.2.2 מוצגות תקופות וצורות רעידות עצמיות לשש התקופות הגדולות. ניתן לראות כי שלוש מודות הרעידות הראשונות המבנה נע כמו גוף קשיח כמעט בלי דפורמציות ורק במודה הרביעית עם תקופה די קטנה של 0.56 s נוצרות דפורמציות, הסטות בין קומות, כוחות גזירה בעמודים ומומנטים.

איור מס' 6.2.2: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 8F מבודד

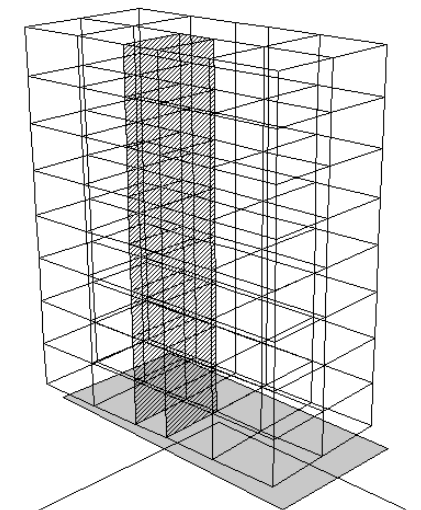
פיתול, $T_1=2.51\text{ s}$



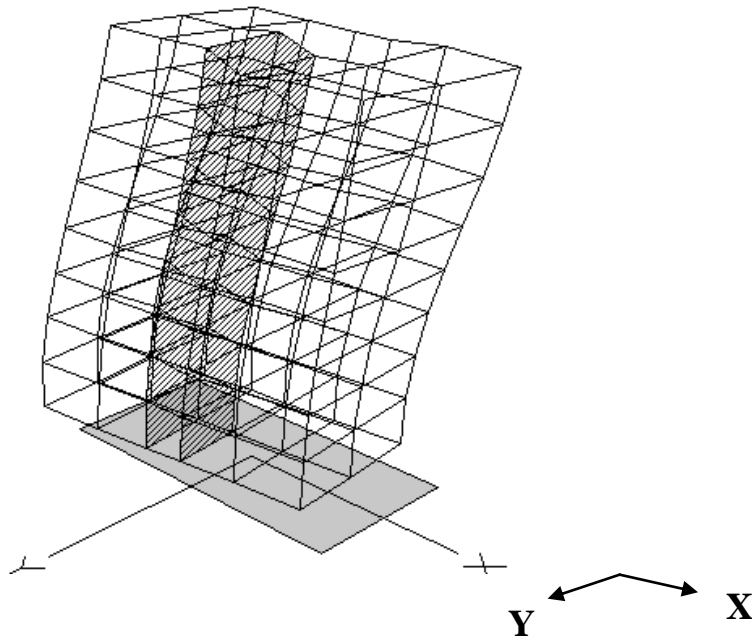
תזוזה לכיוון Y, $T_3=2.40\text{ s}$



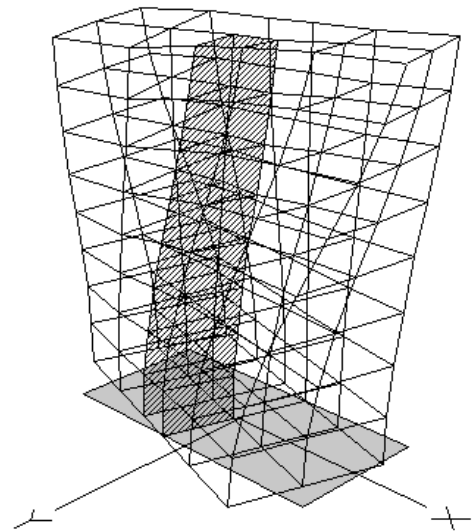
פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_2=2.43\text{ s}$



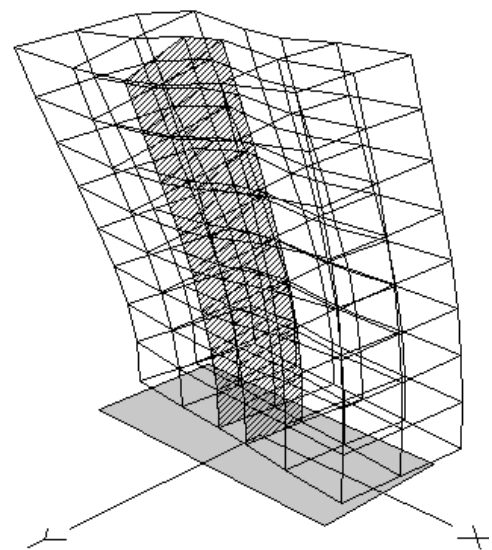
X תזוזה לכיוון X, $T5=0.43$ s



פיתול, $T4=0.56$ s



תזוזה לכיוון Y, $T6=0.39$ s



6.3 הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי

6.3.1 עבור רעידות אדמה השייכות ל- $Z=0.1-0.15$ נעשה שימוש בבולמי זעזועים עם מקדם $K_p/K_e=0.35$, כאשר לרעידות אדמה חזקות יותר השייכות ל- $Z=0.2-0.25$ נעשה שימוש בבולמים עם מקדם $K_p/K_e=0.1$ שמספקים בליעת אנרגיה גדולה יותר.

6.3.2 להלן מוצג מקדם K_s - הפחתת כוח גזירה קומתי:

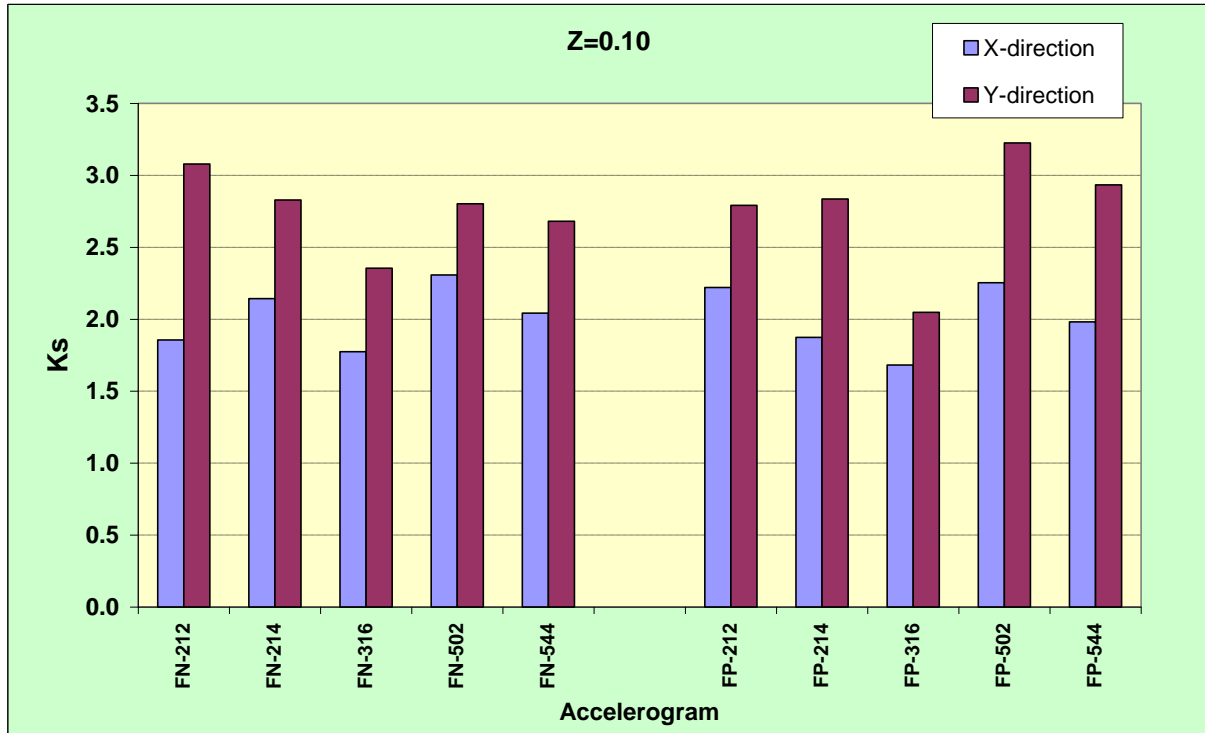
* באיורים מס' 6.3.1-6.3.8 מוצג המקדם K_s לכל קומות הבניין עבור אקסלרוגרמות רעידות אדמה השייכות לרעידות אדמה עם $Z=0.1$.

* באיורים מס' 6.3.9-6.3.16 מוצג המקדם K_s לכל קומות הבניין עבור אקסלרוגרמות השייכות לרעידות אדמה עם $Z=0.15$.

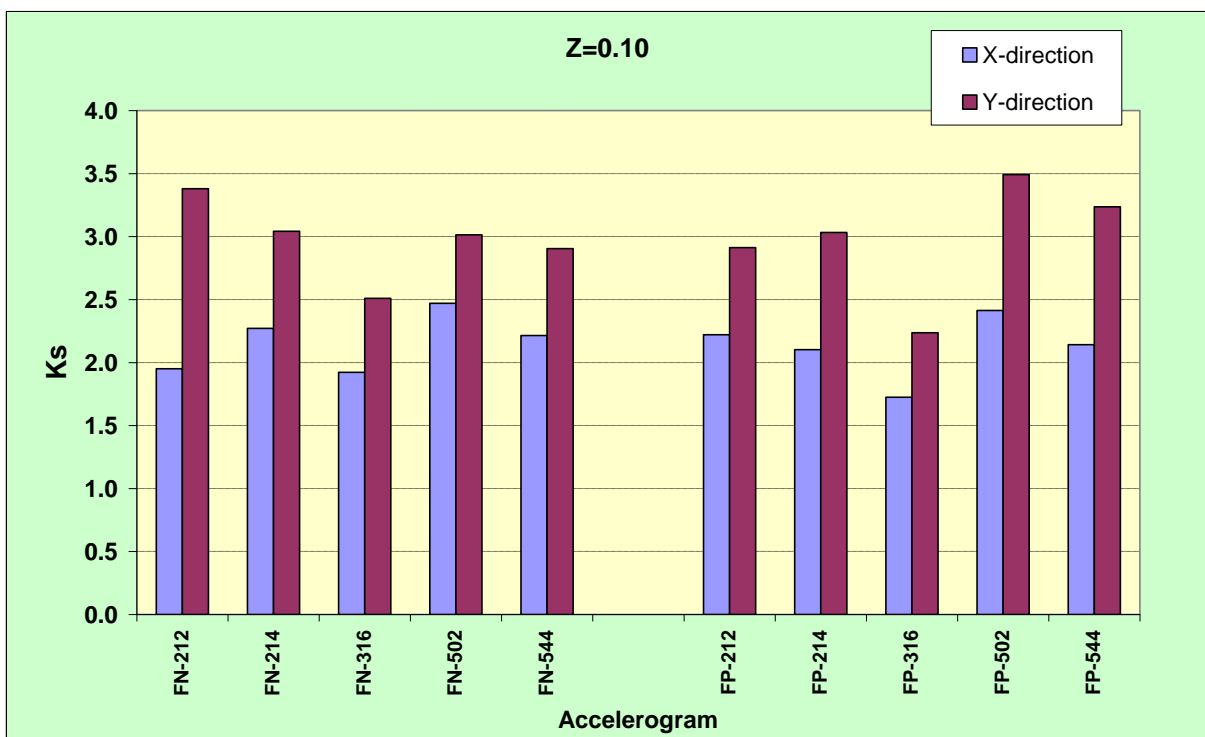
* באיורים מס' 6.3.17-6.3.24 מוצג המקדם K_s לכל קומות הבניין עבור אקסלרוגרמות השייכות לרעידות אדמה עם $Z=0.2$.

* באיורים מס' 6.3.25-6.3.32 מוצג המקדם K_s לכל קומות הבניין עבור אקסלרוגרמות השייכות לרעידות אדמה עם $Z=0.25$.

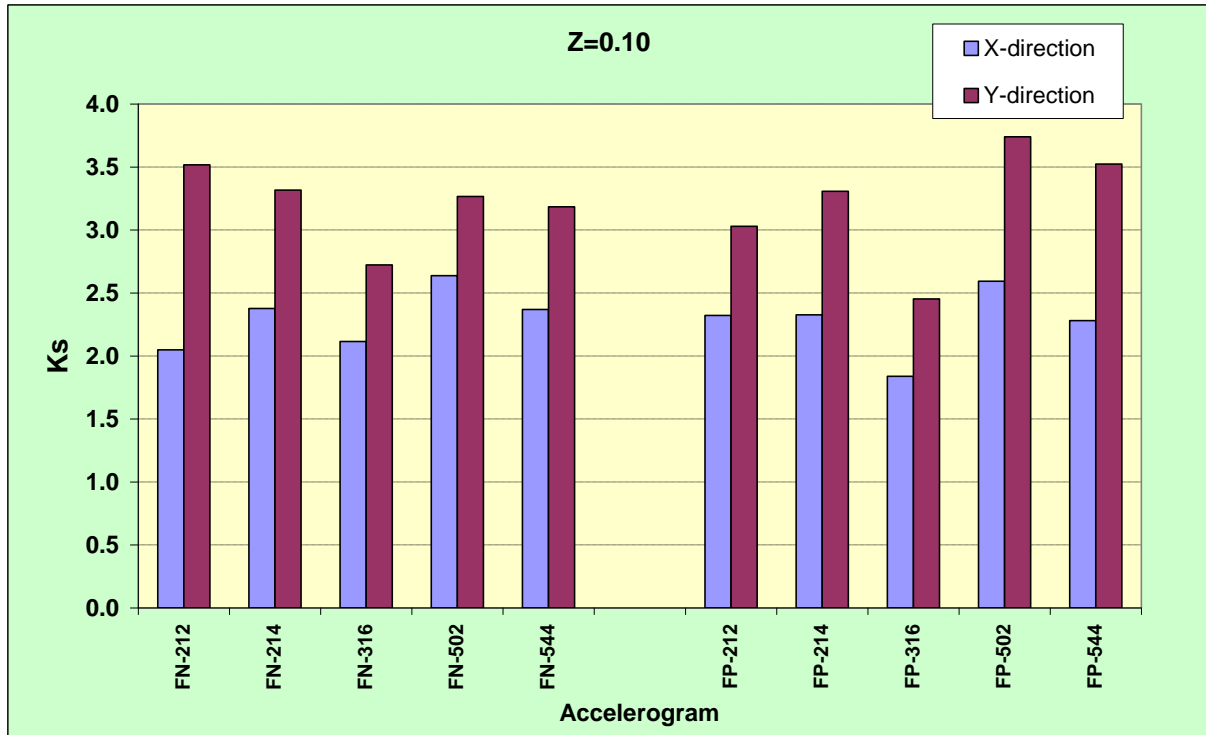
איור מס' 6.3.1: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומת הקרקע במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.1$



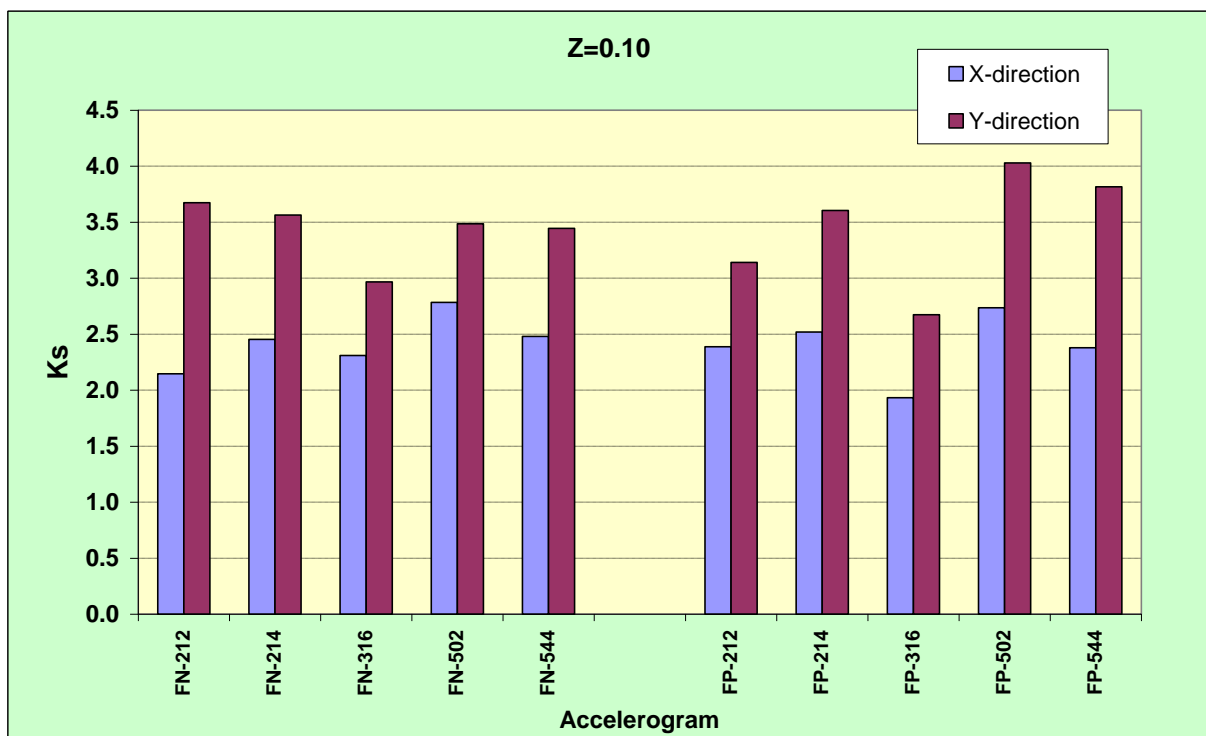
איור מס' 6.3.2: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הראשונה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.10$



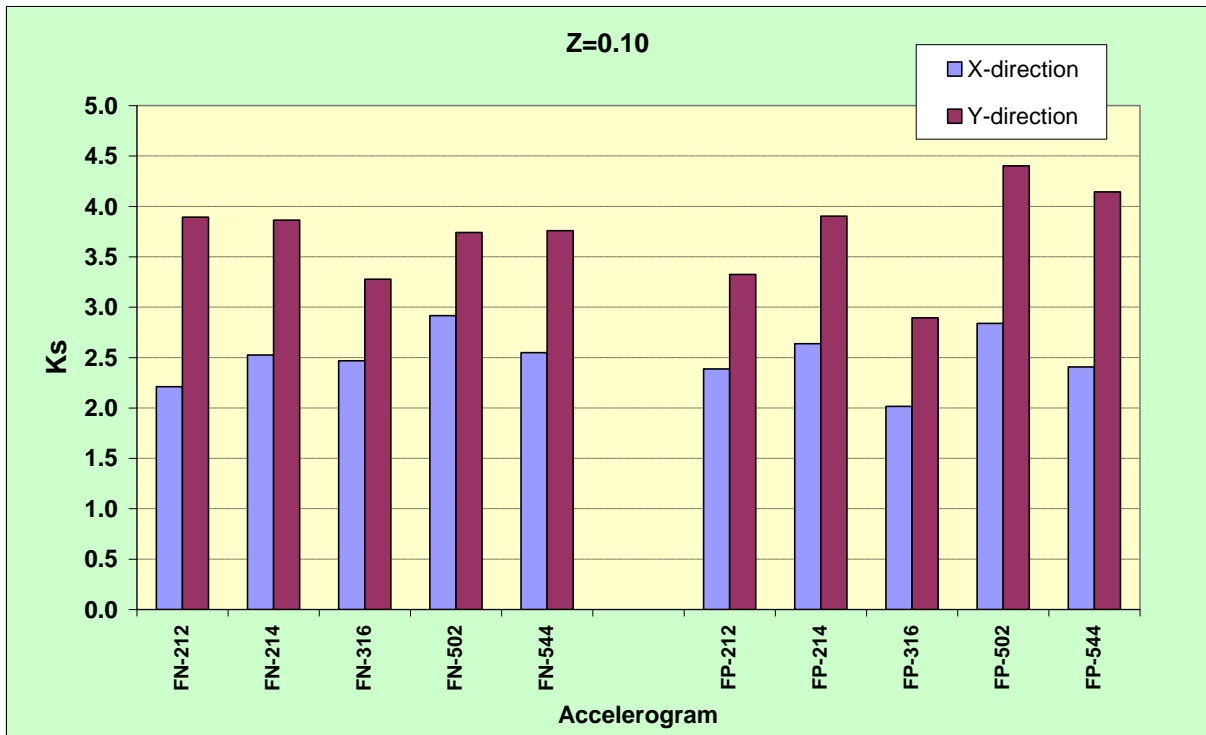
איור מס' 6.3.3: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השנייה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.10$



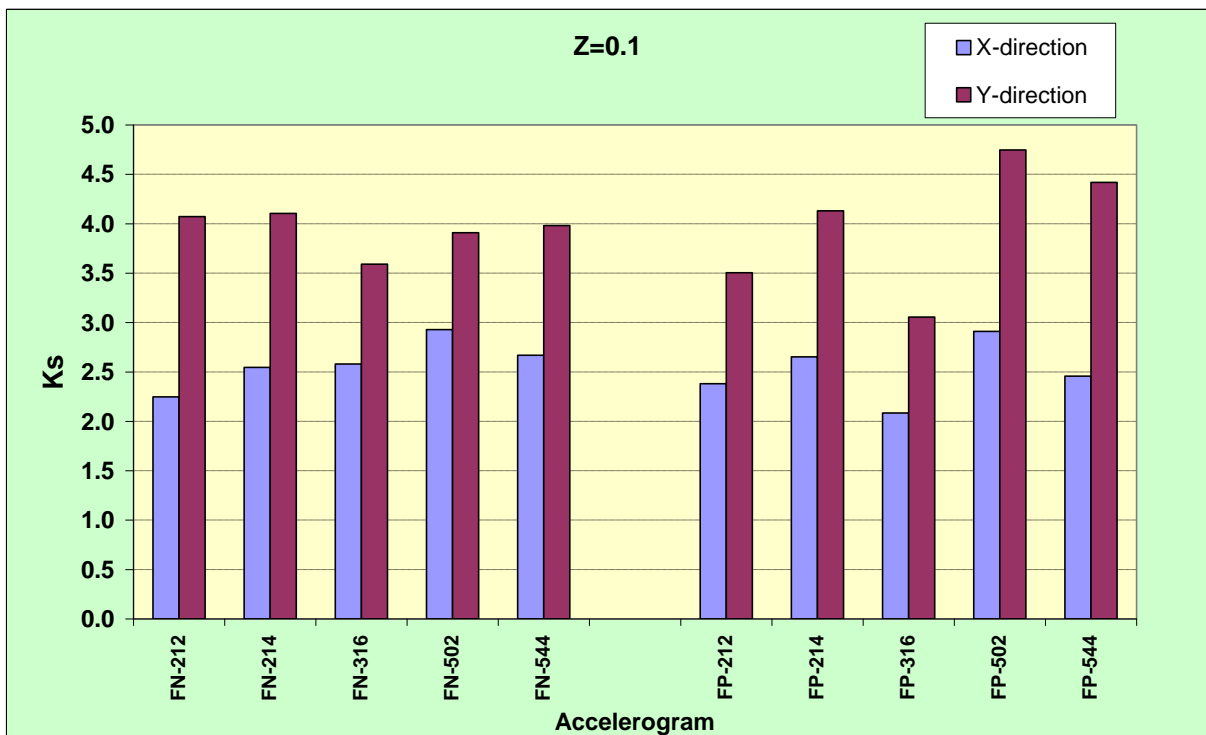
איור מס' 6.3.4: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השלישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.10$



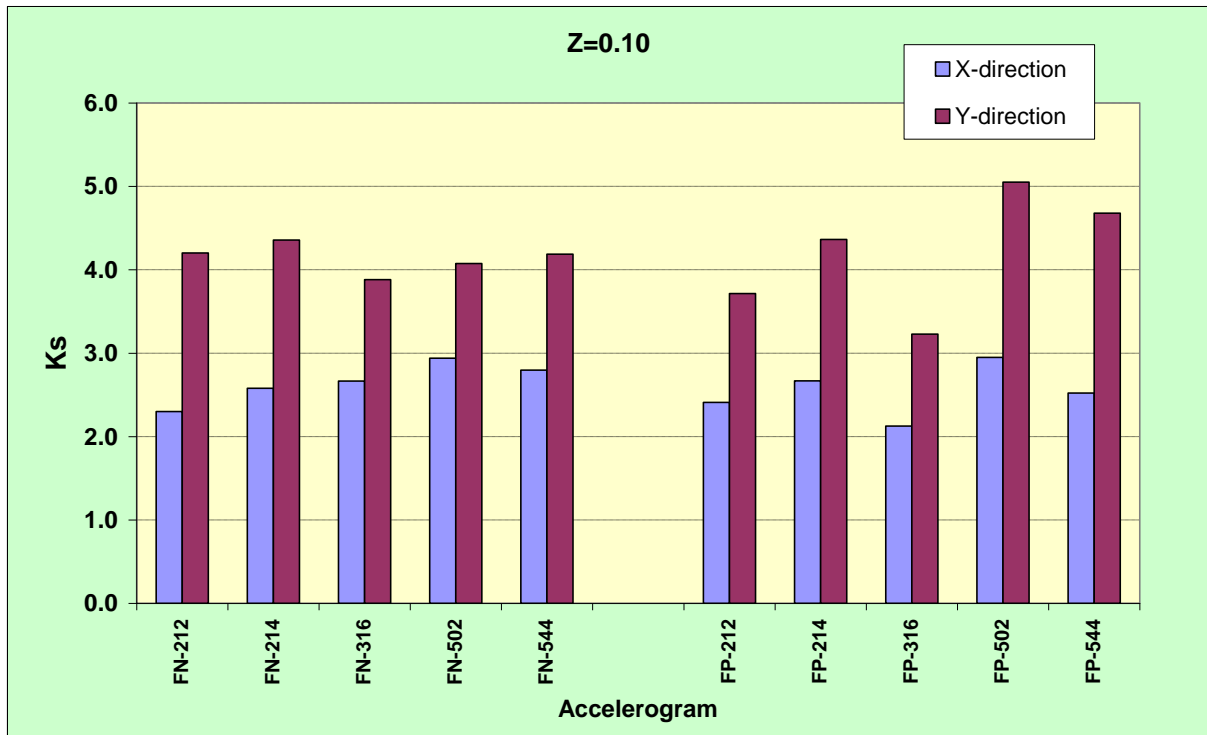
איור מס' 6.3.5: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הרביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.10$



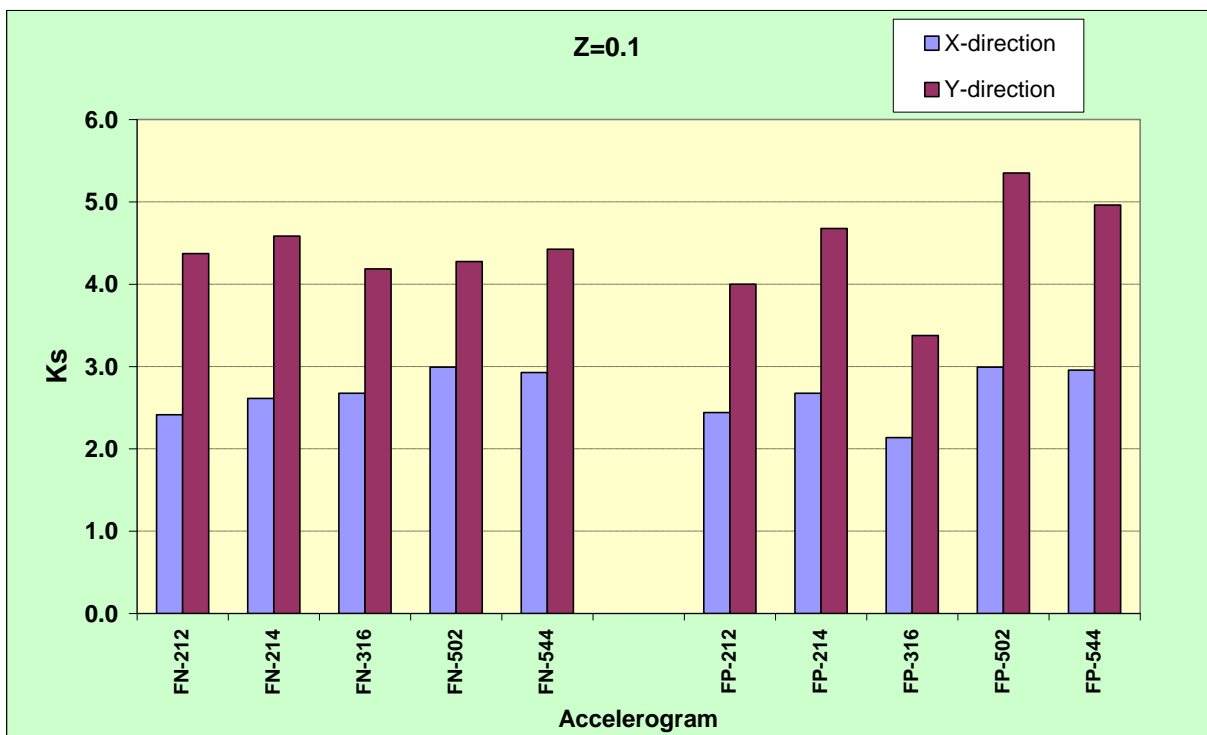
איור מס' 6.3.6: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה החמישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.10$



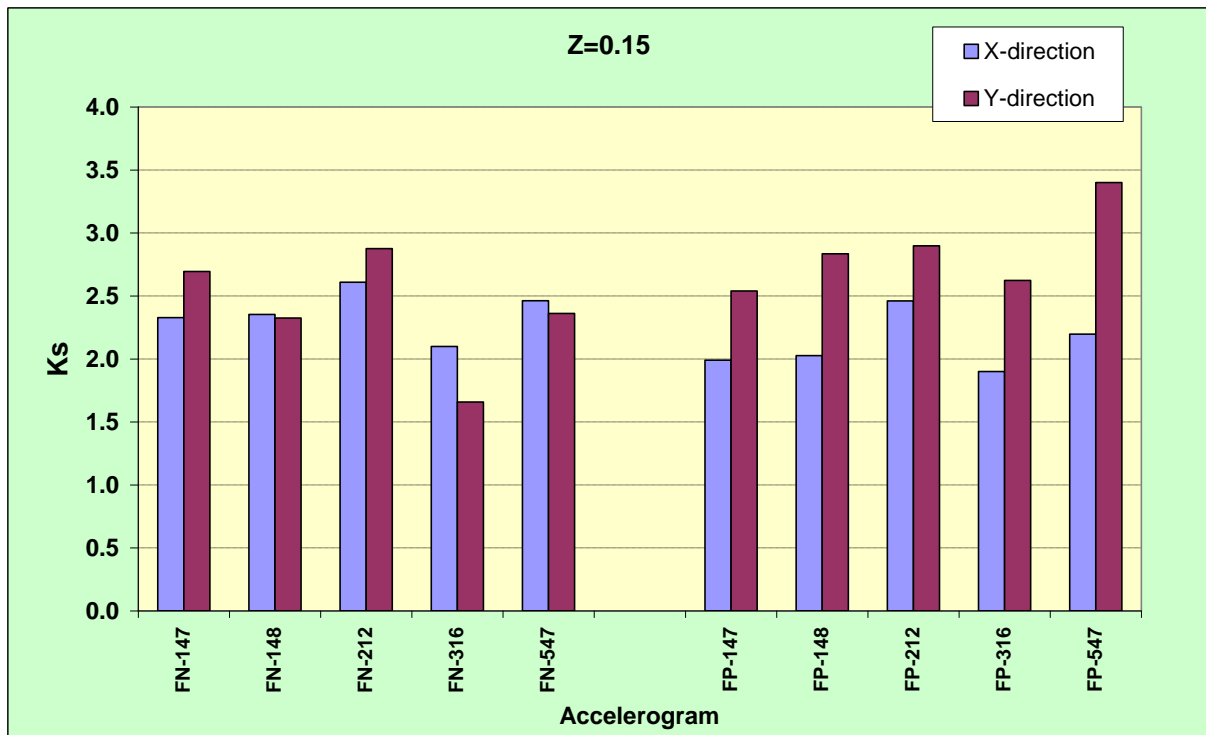
איור מס' 6.3.7: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.10$



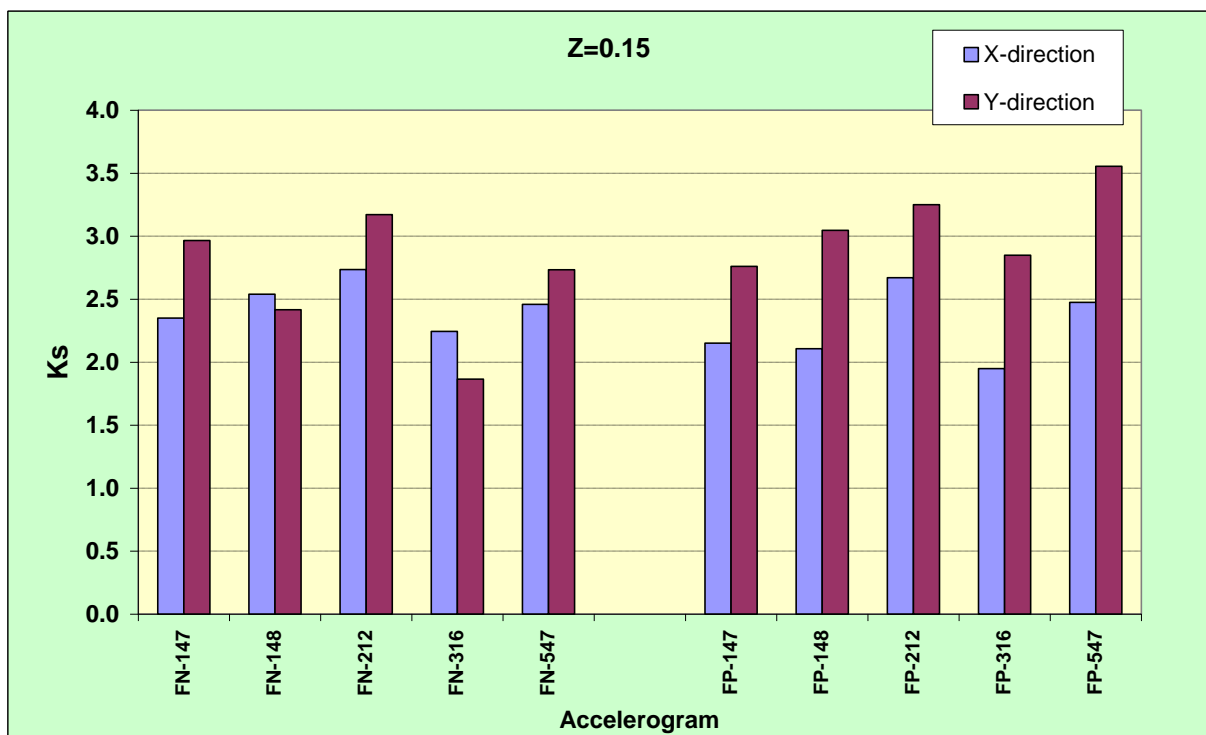
איור מס' 6.3.8: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.10$



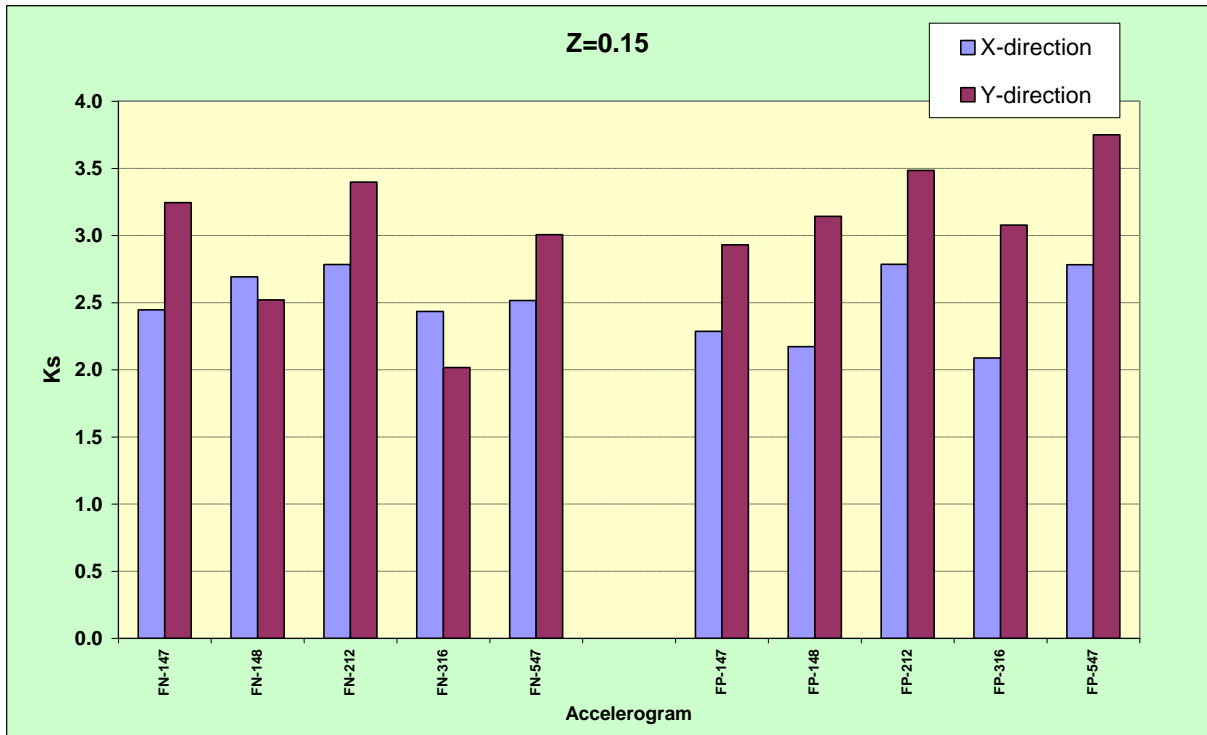
איור מס' 6.3.9: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומת הקרקע במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



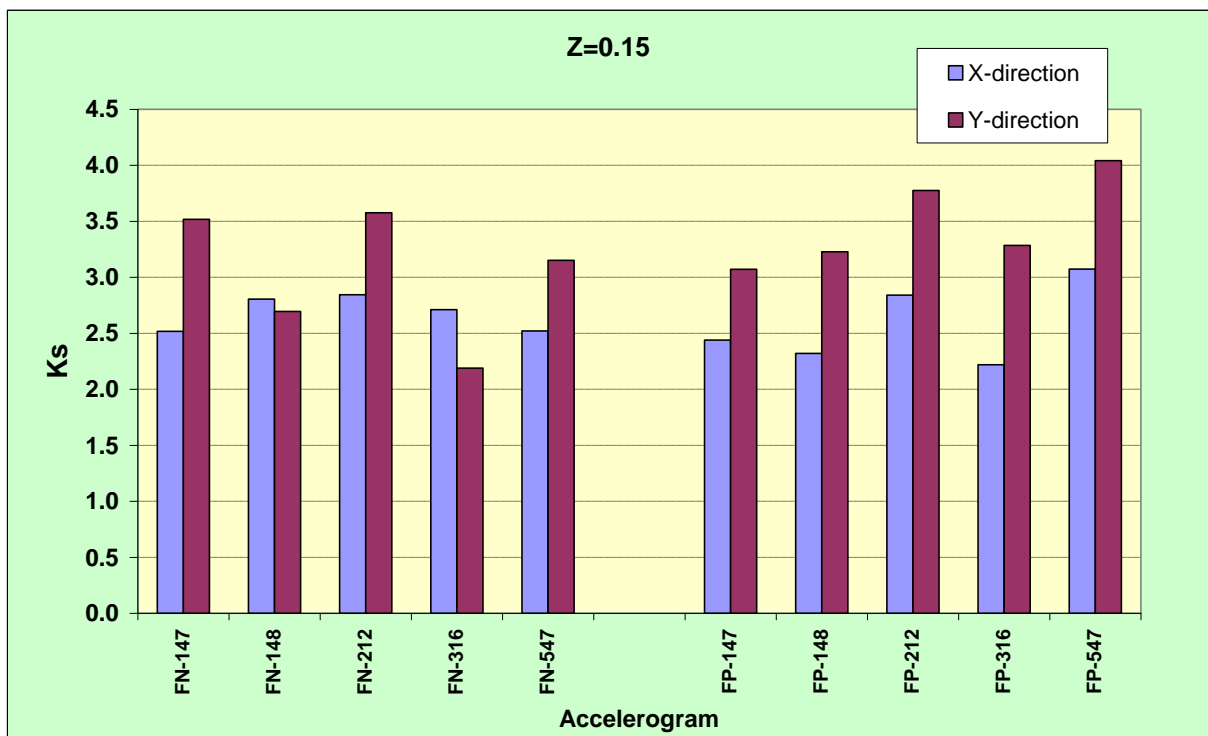
איור מס' 6.3.10: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הראשונה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



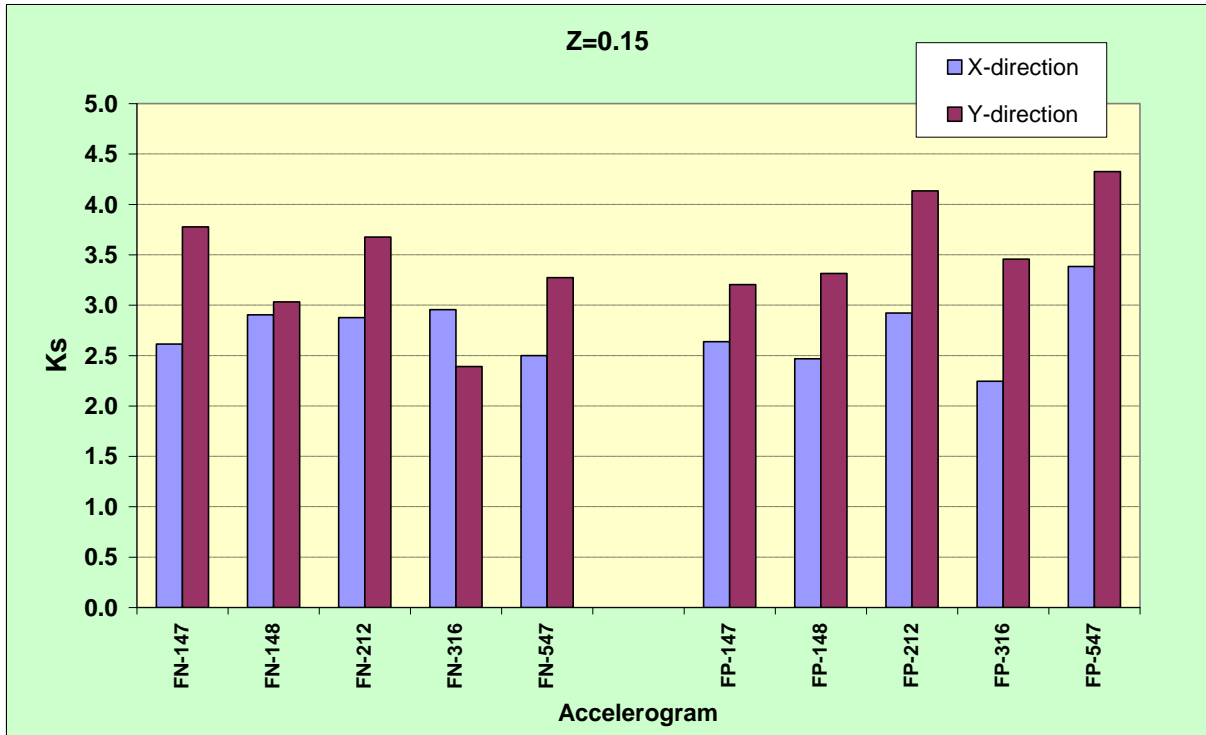
איור מס' 6.3.11: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השנייה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



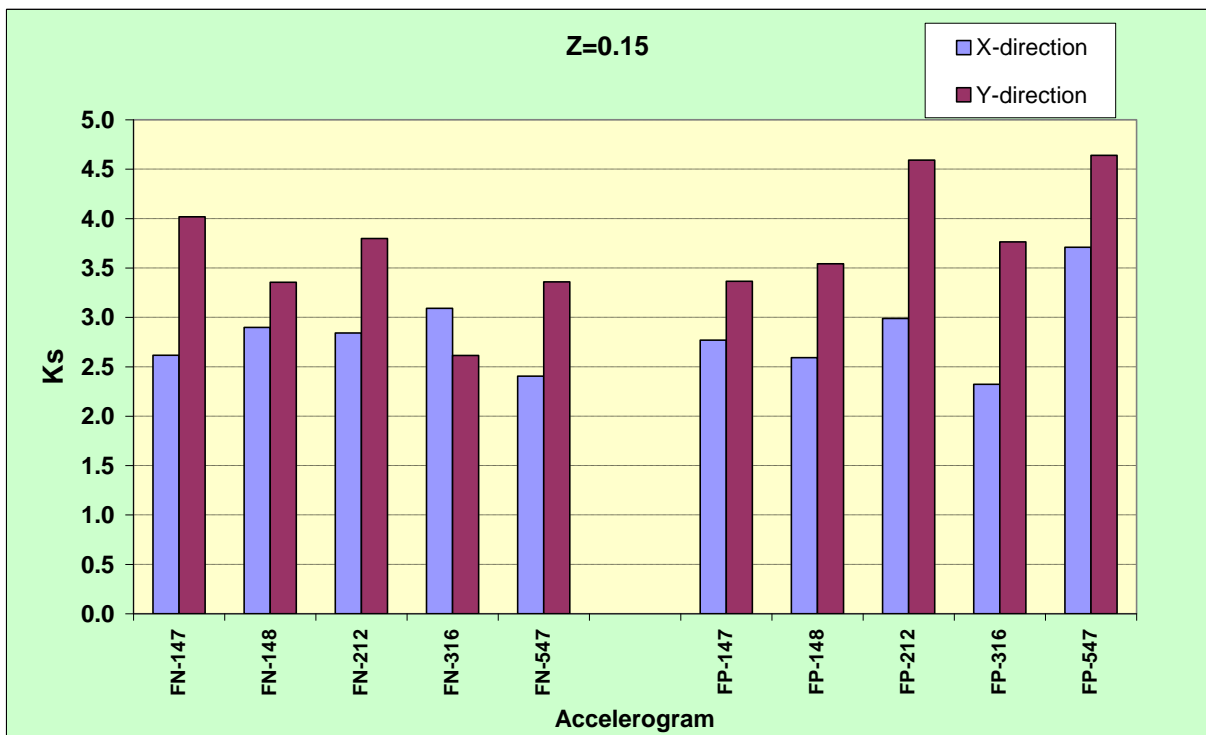
איור מס' 6.3.12: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השלישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



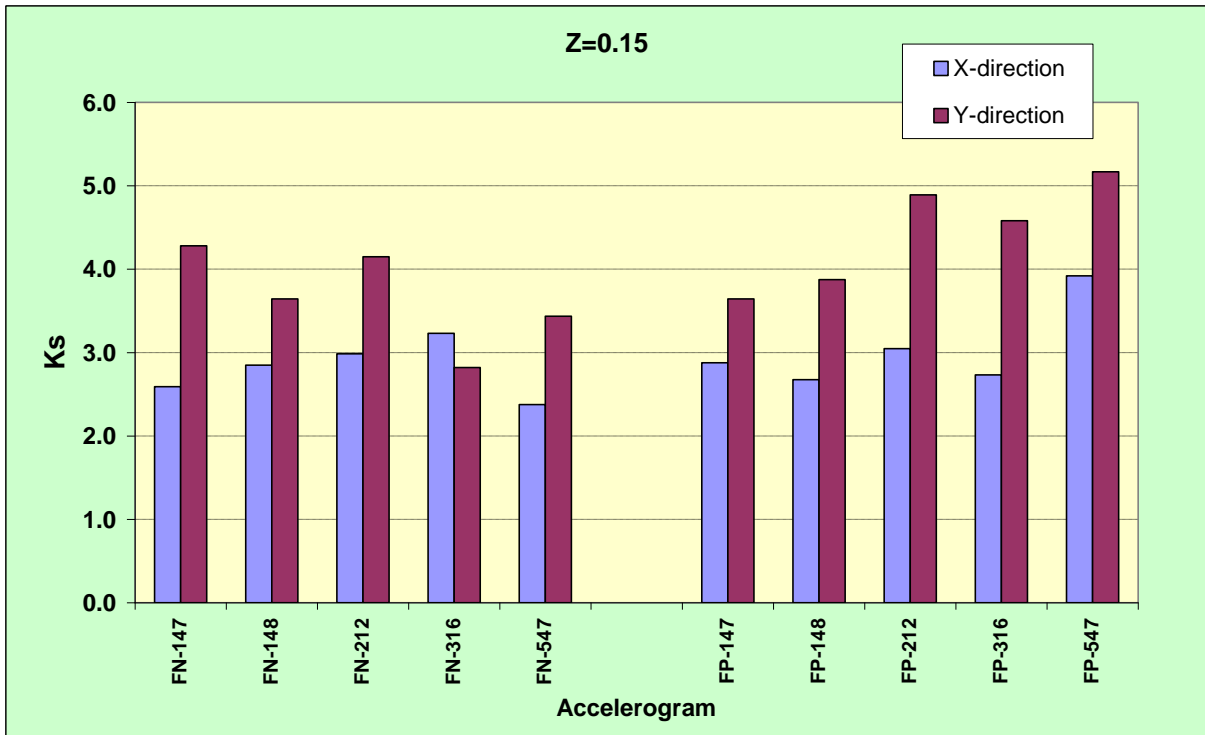
איור מס' 6.3.13: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הרביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



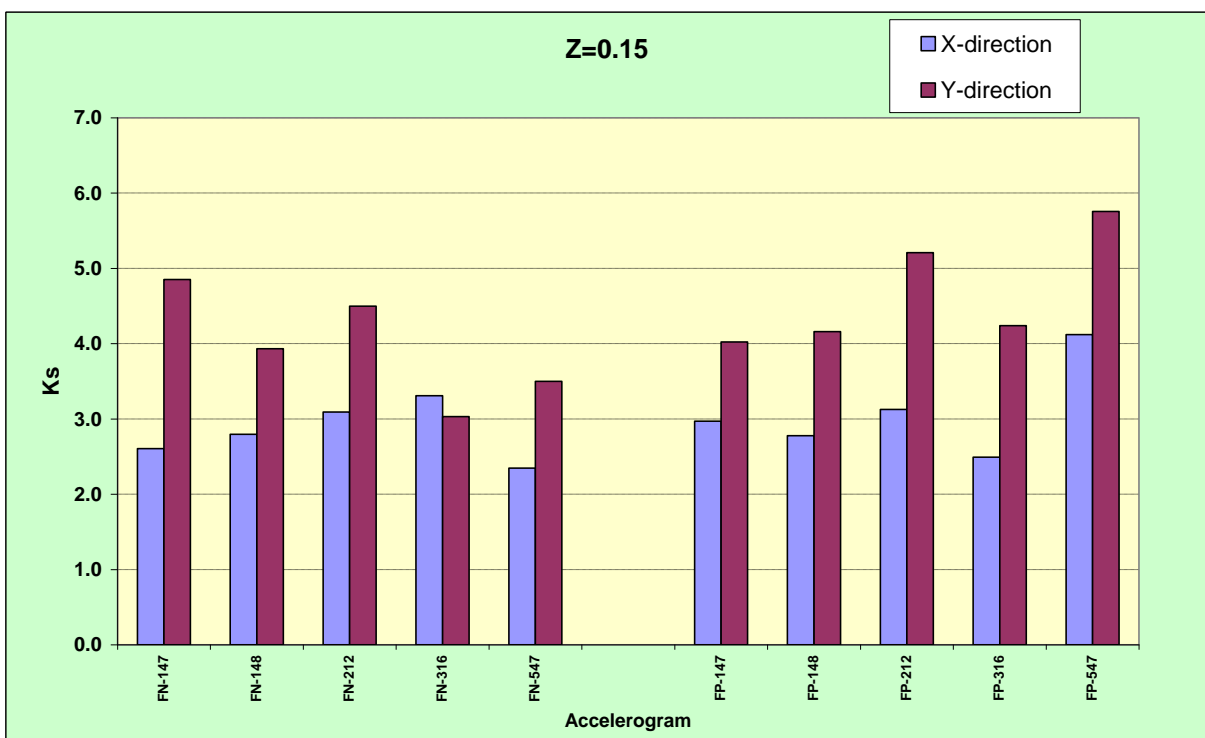
איור מס' 6.14: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה החמישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



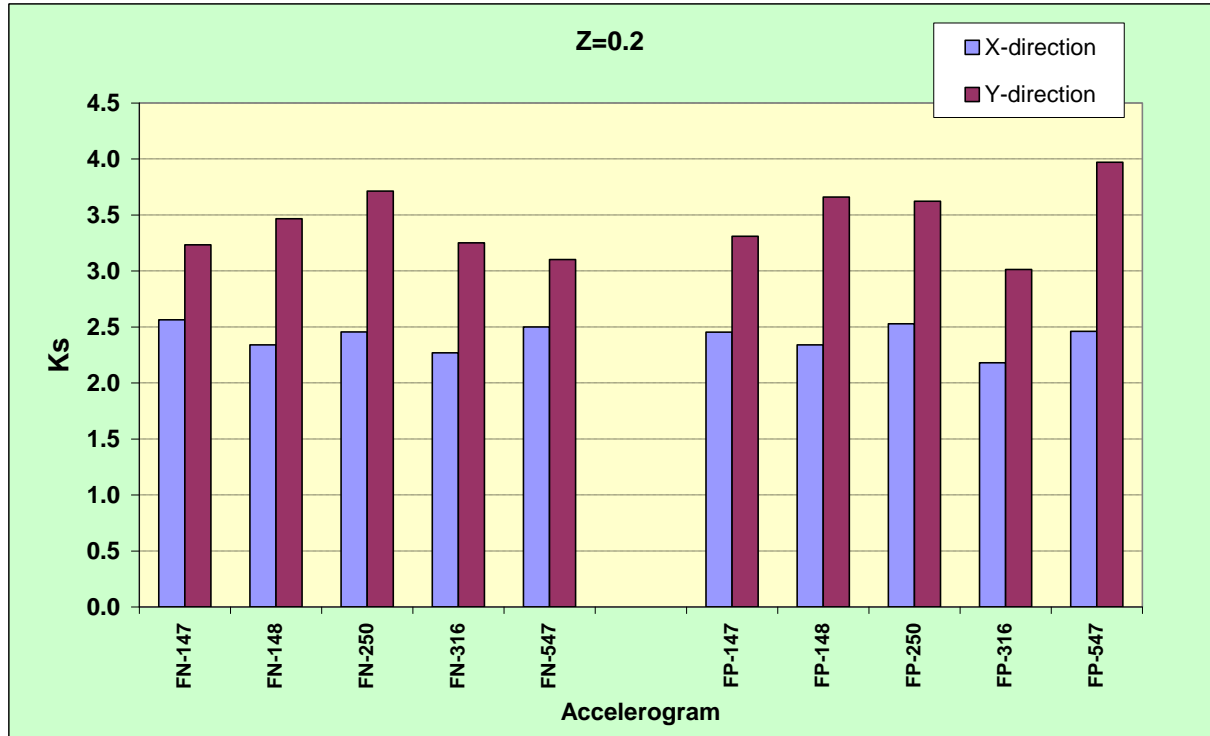
איור מס' 6.3.15: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.15$



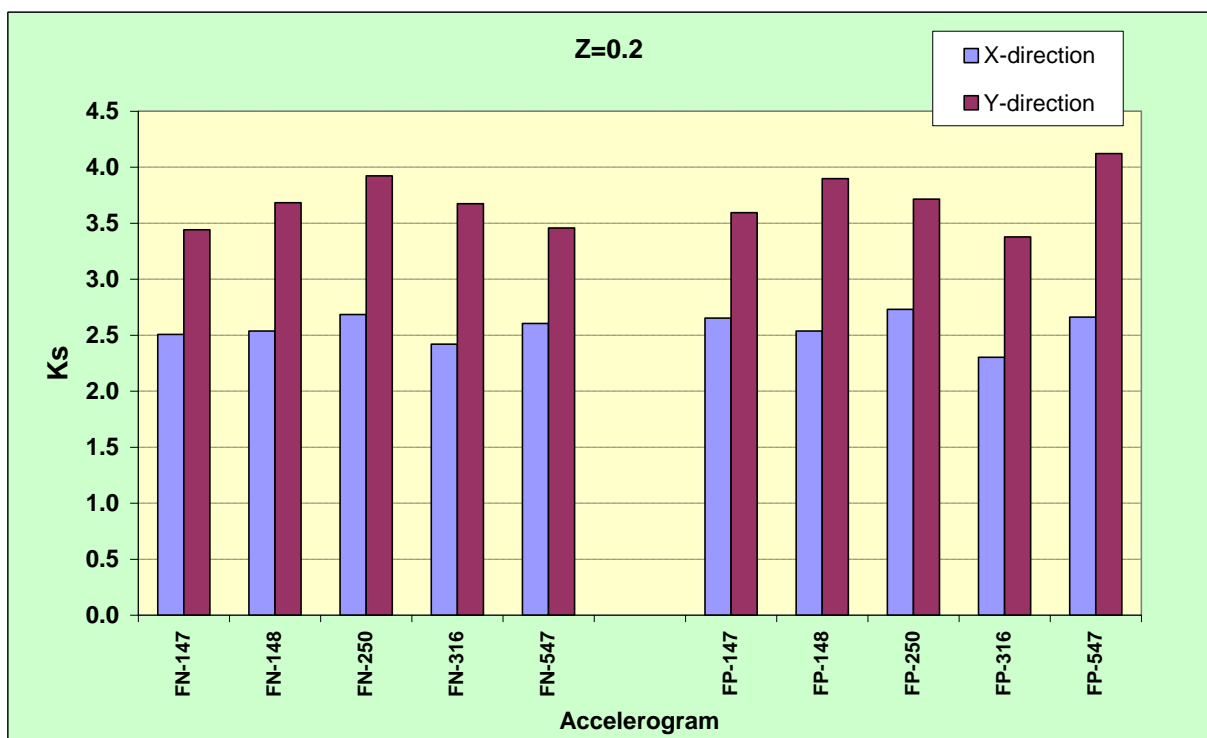
איור מס' 6.3.16: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.15$



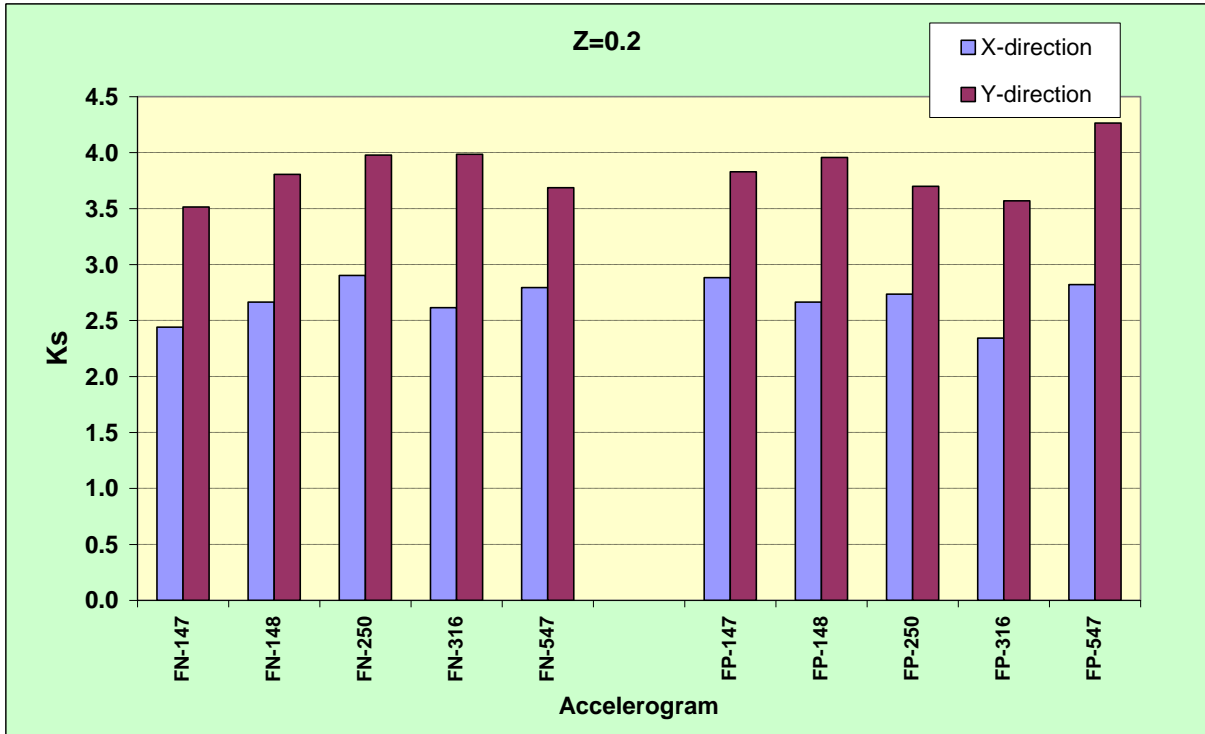
איור מס' 6.3.17: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומת הקרקע במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.20$



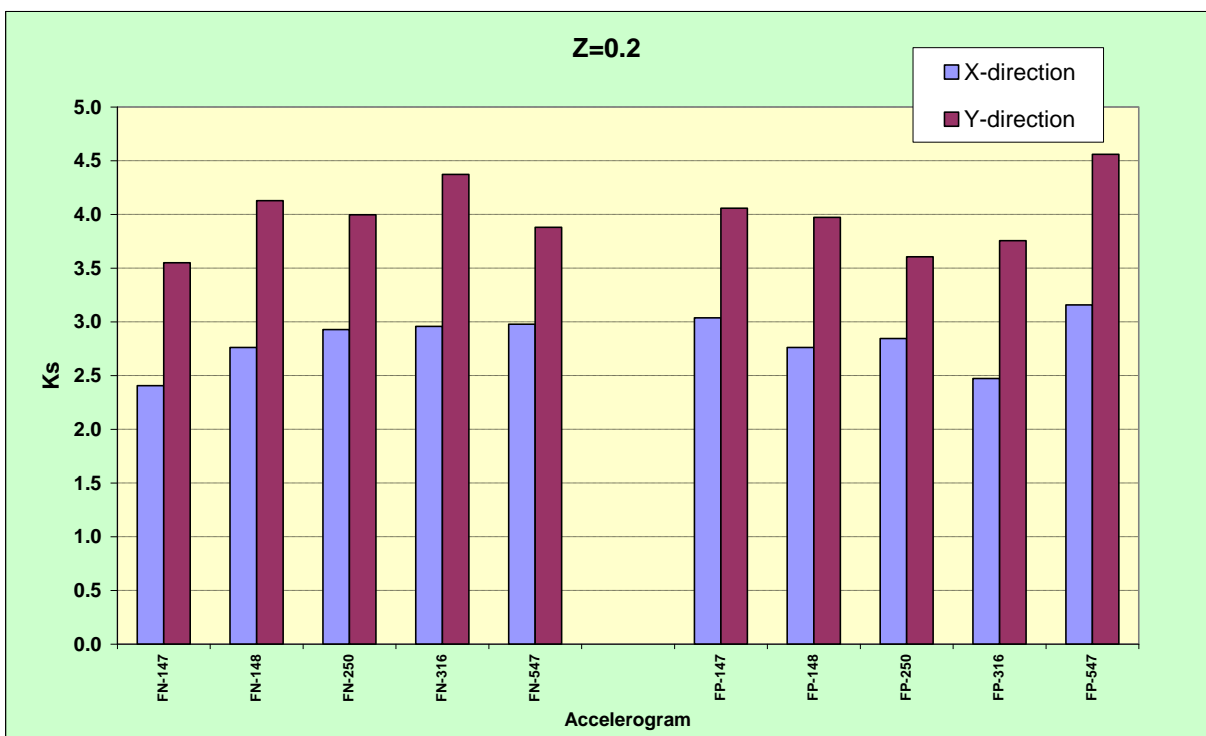
איור מס' 6.3.18: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הראשונה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.20$



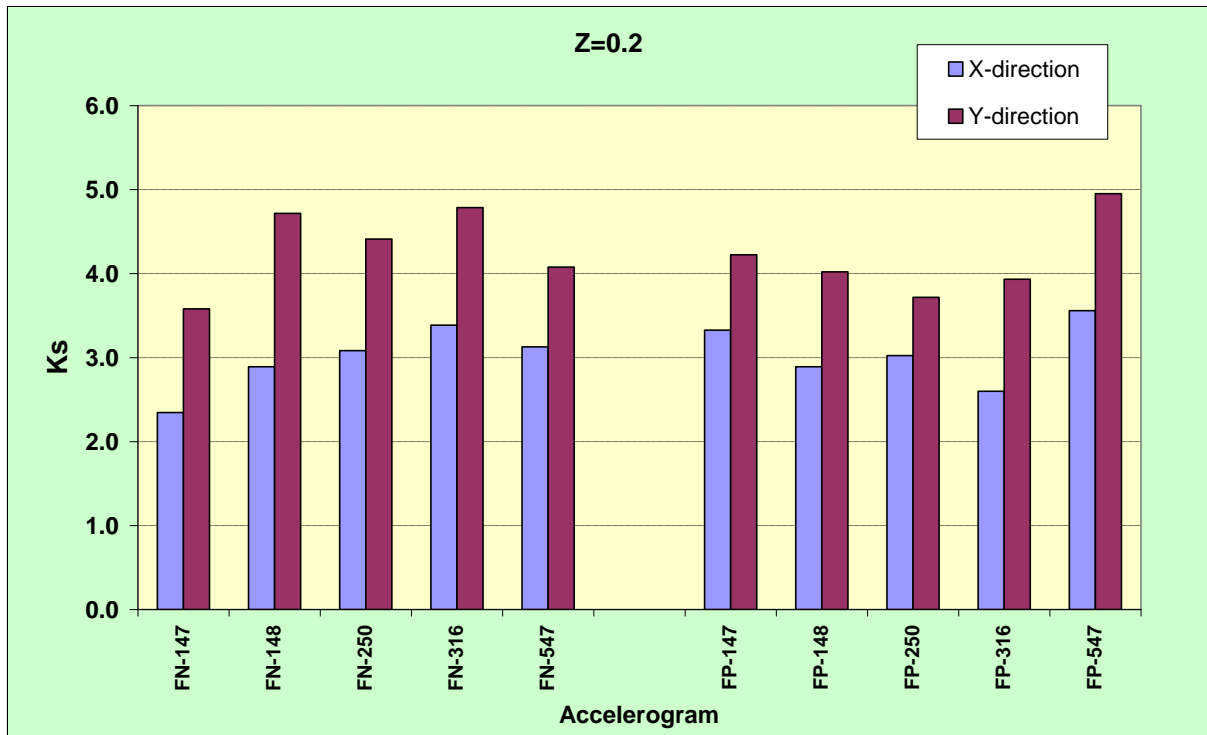
איור מס' 6.3.19: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השנייה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



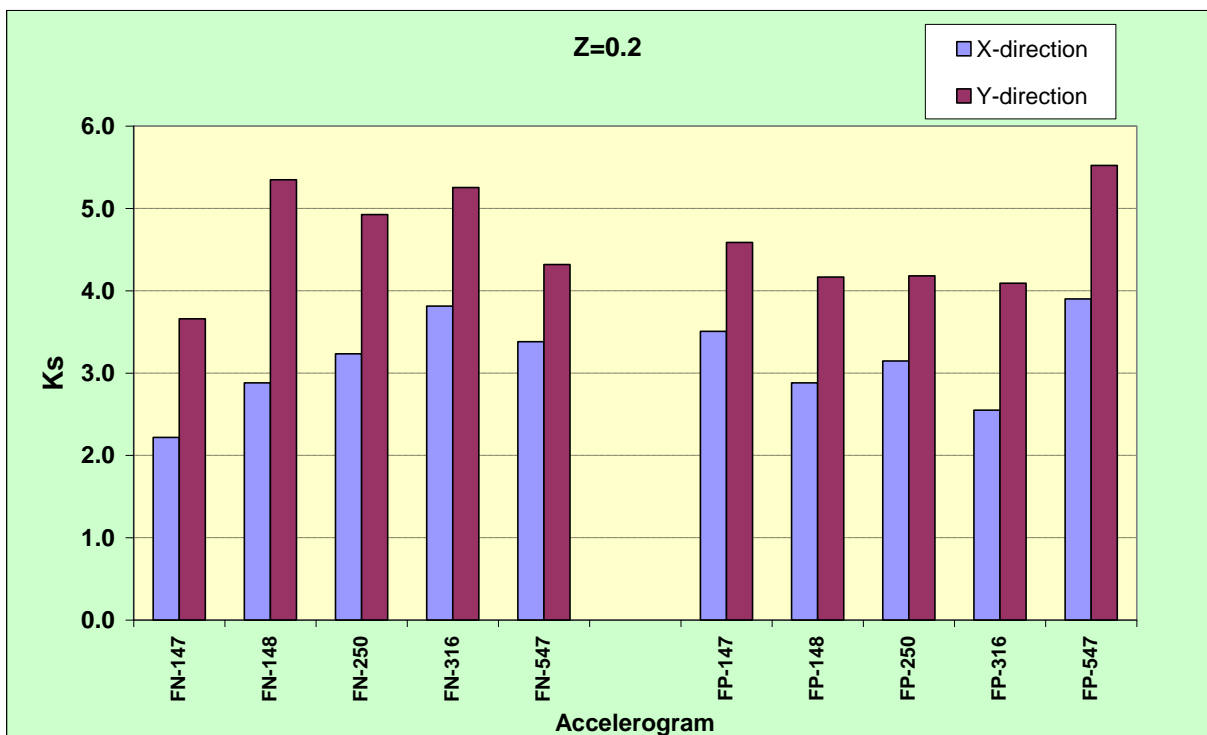
איור מס' 6.3.20: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השלישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



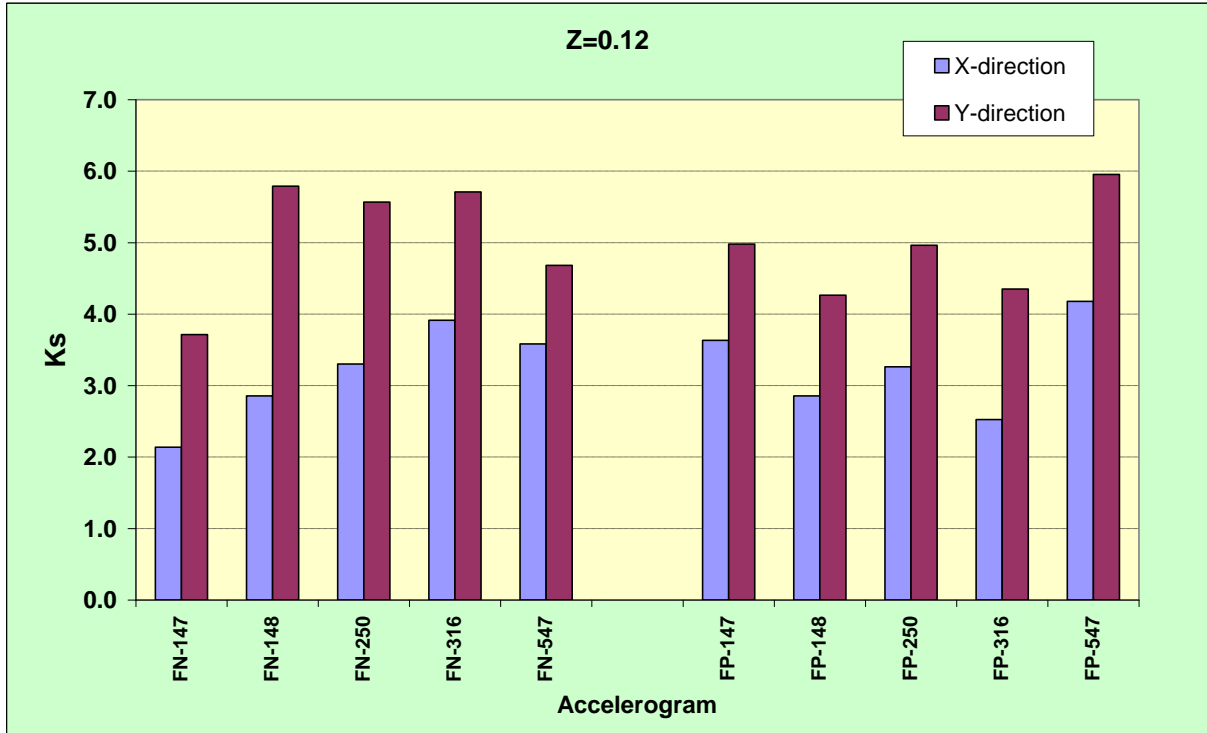
איור מס' 6.21: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הרביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



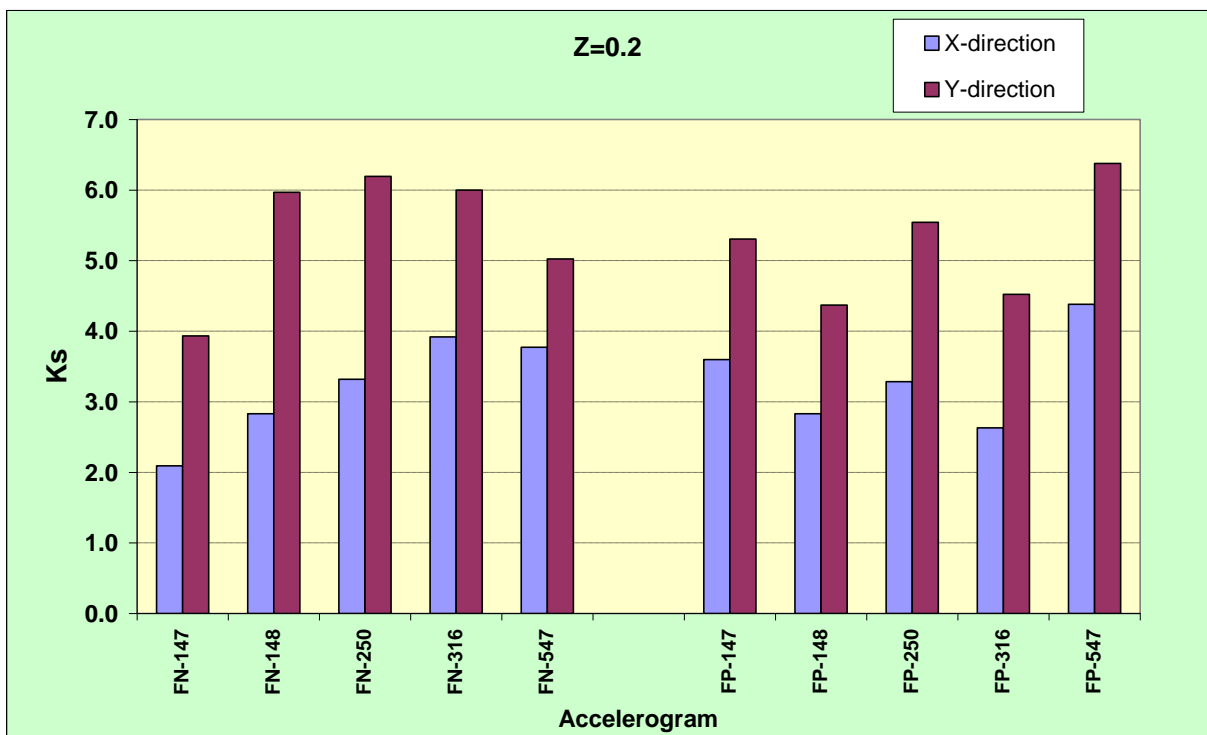
איור מס' 6.22: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה החמישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



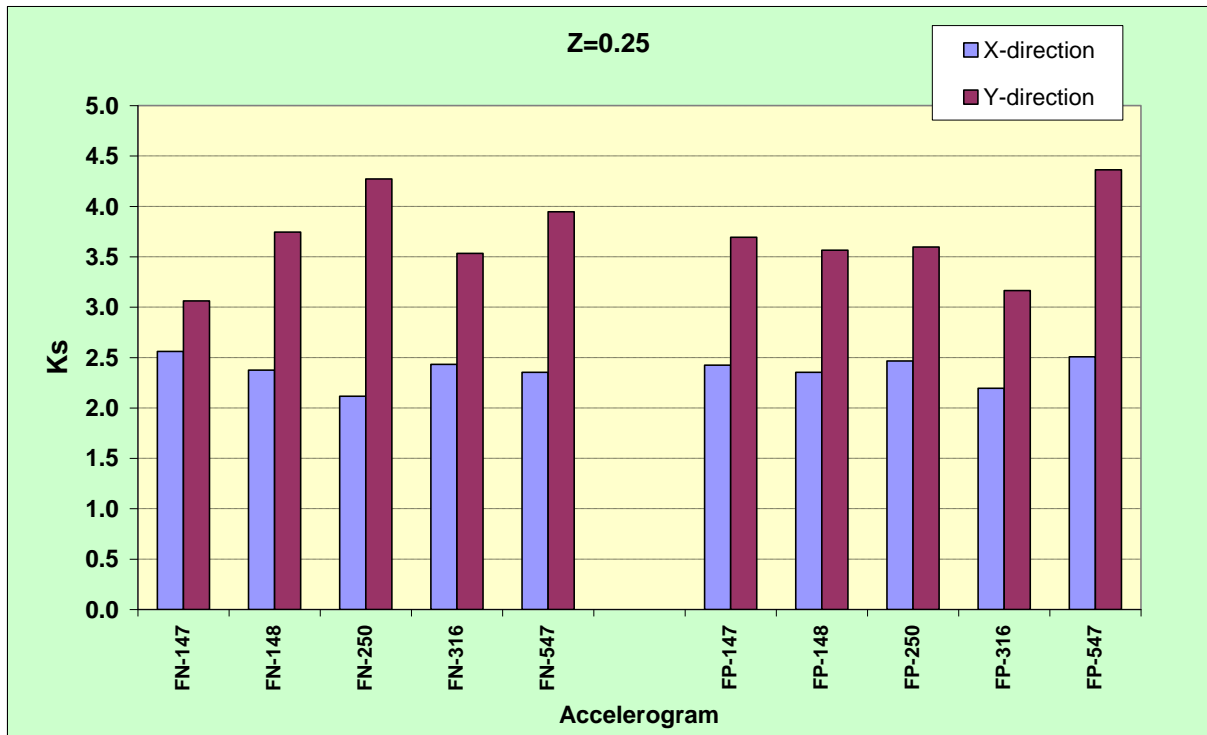
איור מס' 6.3.23: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



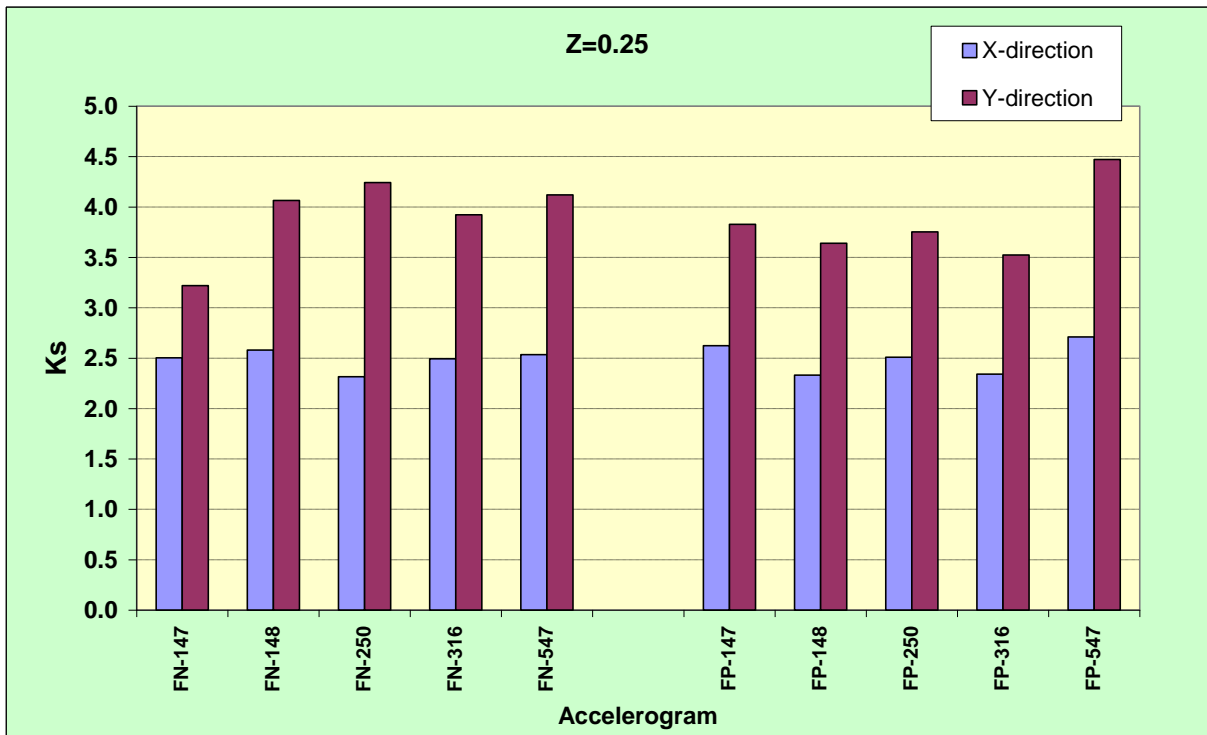
איור מס' 6.3.24: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



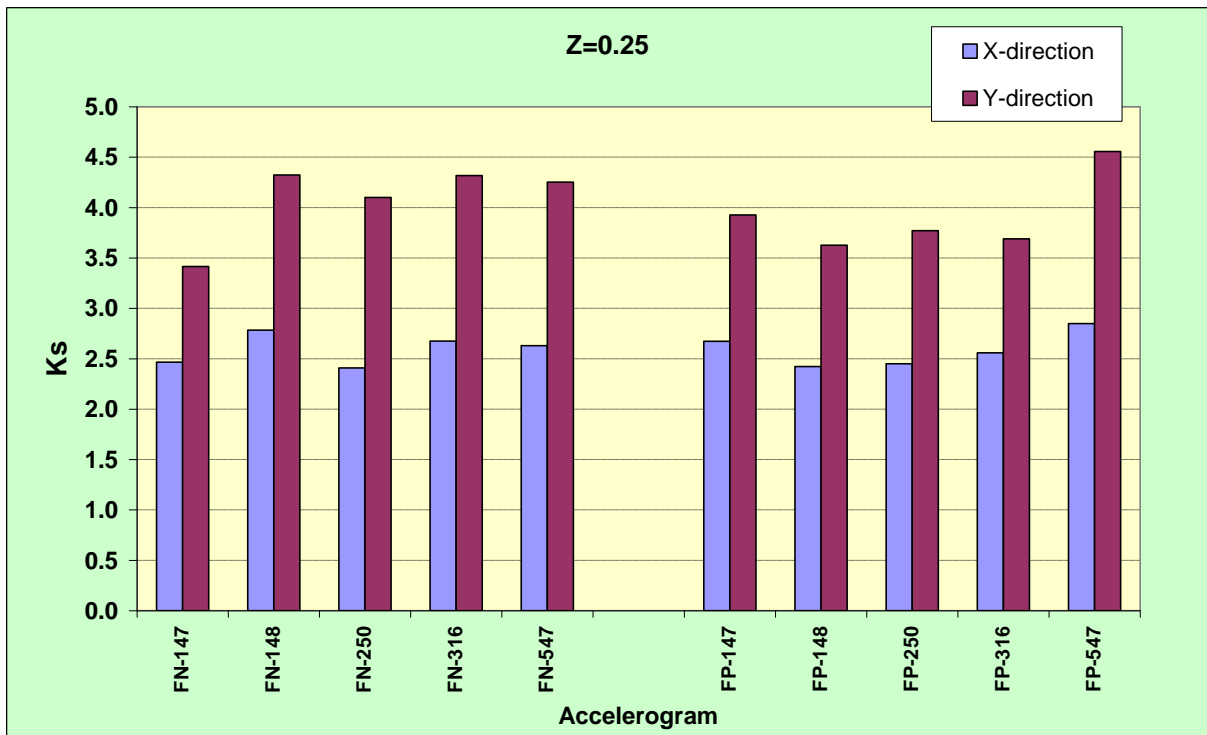
איור מס' 6.3.25: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומת הקרקע במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



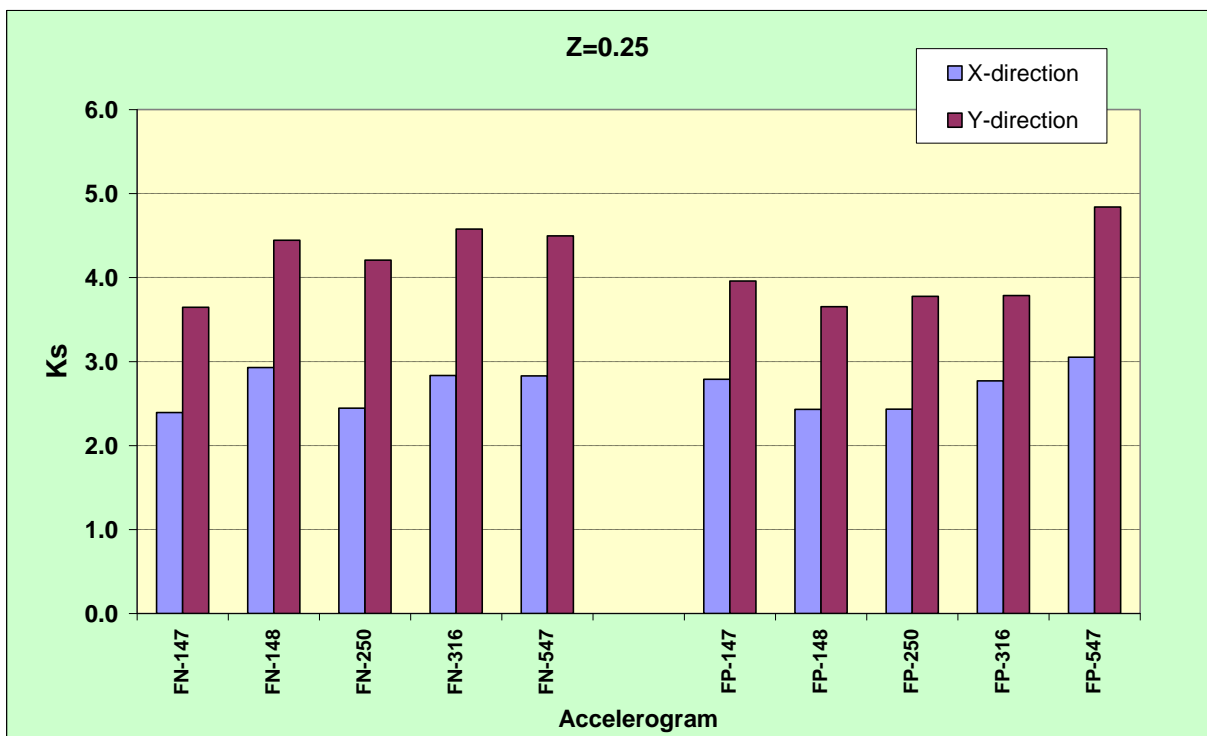
איור מס' 6.3.26: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הראשונה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



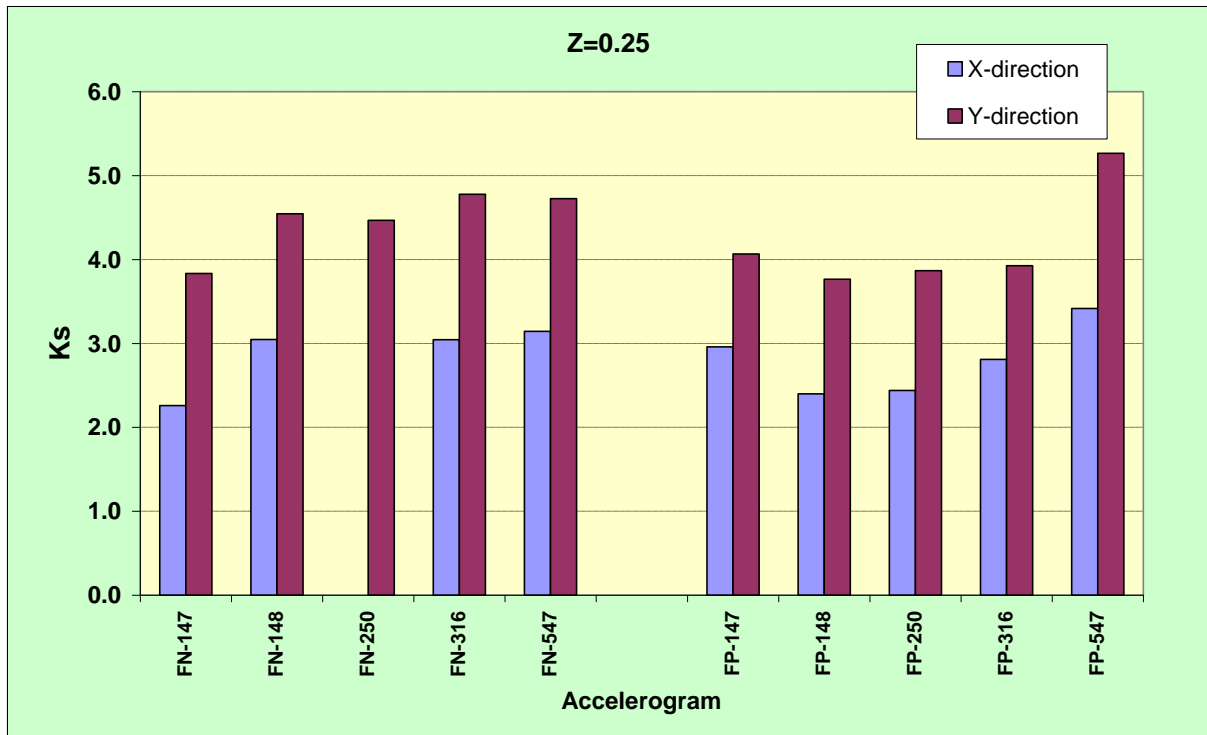
איור מס' 6.3.27: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השנייה במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



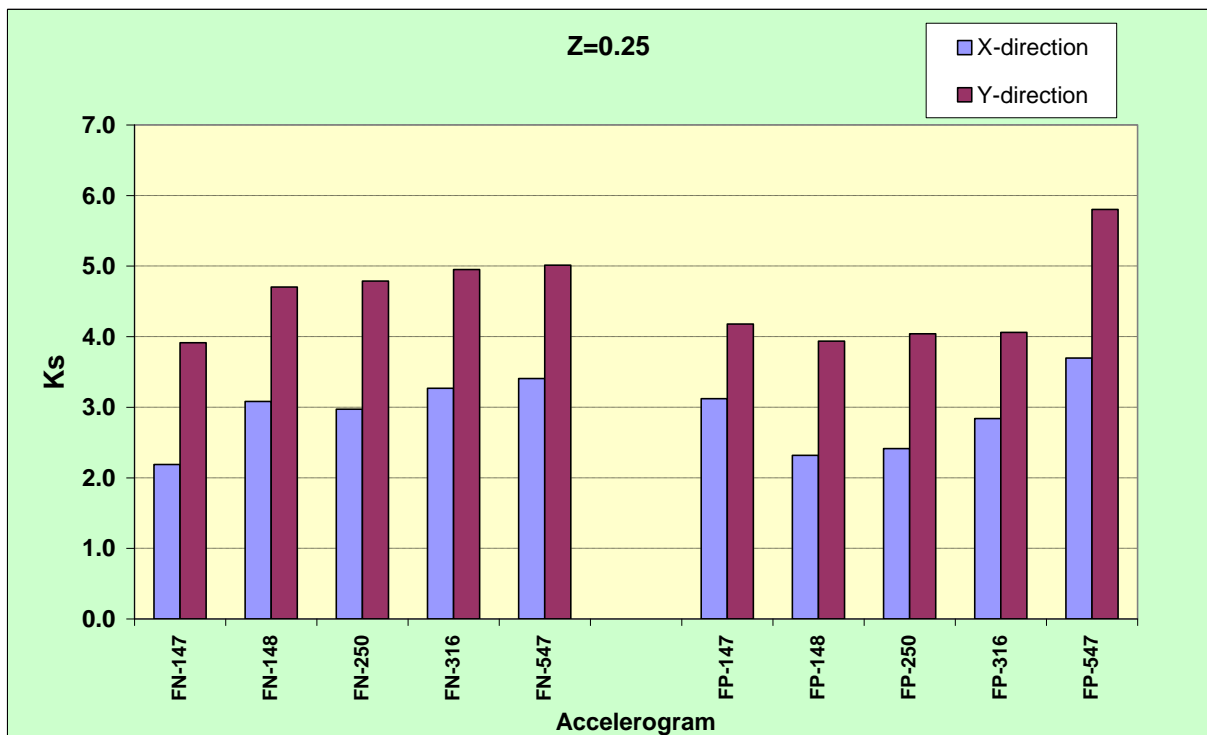
איור מס' 6.3.28: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השלישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



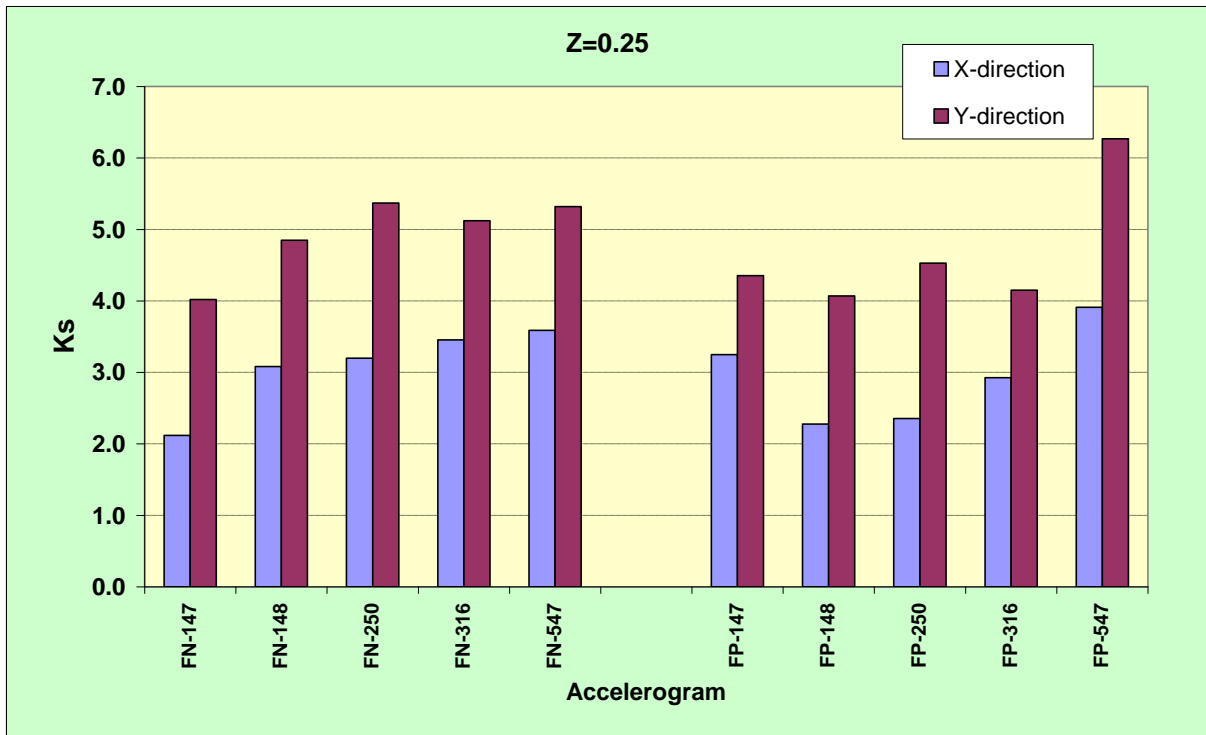
איור מס' 6.29: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה הרביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.25$



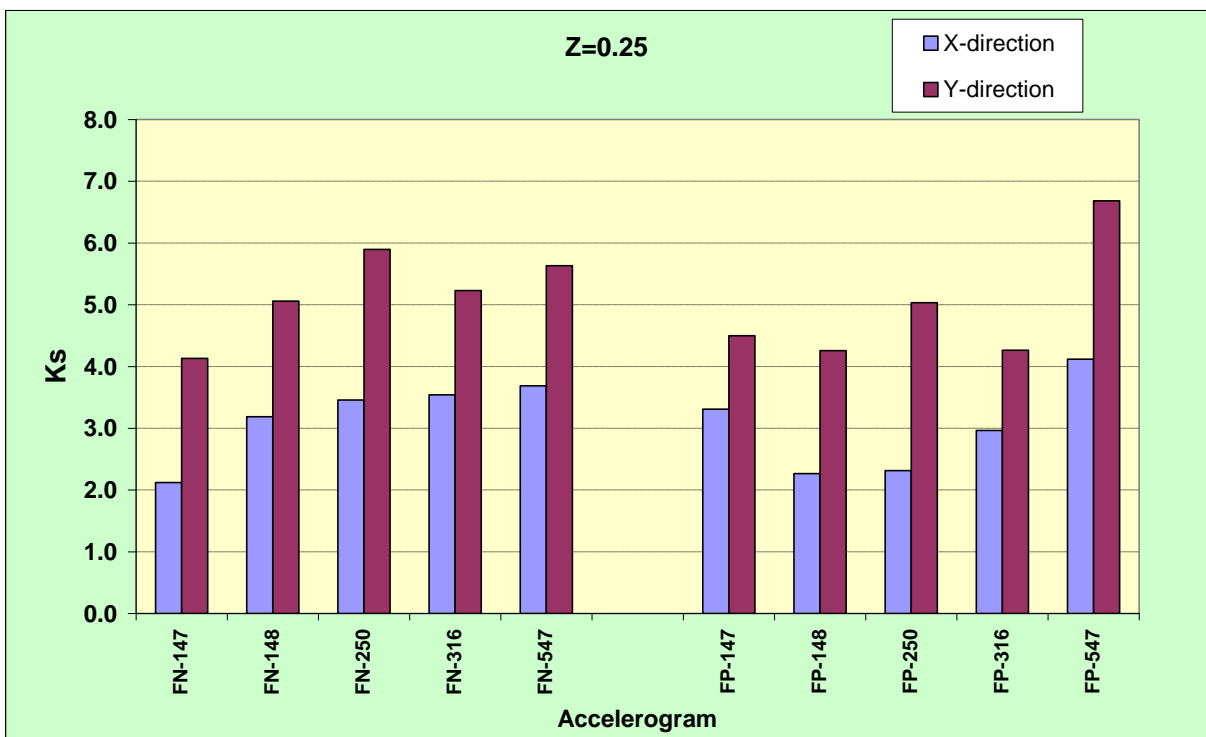
איור מס' 6.30: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה החמישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.25$



איור מס' 6.3.31: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השישית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



איור מס' 6.3.32: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה בקומה השביעית במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



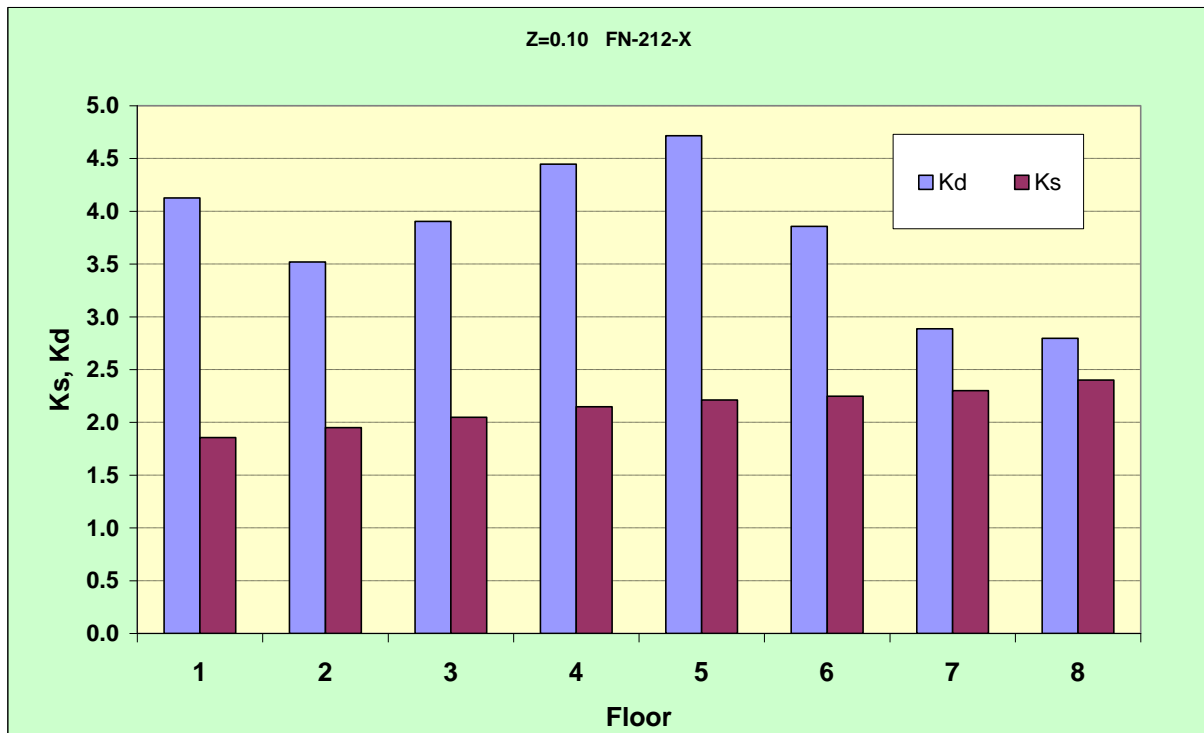
6.3.3 מתוצאות החישוב נובעות המסקנות הבאות:

* כוחות גזירה קומתיים מרבים נוצרים בעמודים בקומת הקרקע.

* המבנה המבודד עובד בתחום אלסטי וכוחות גזירה קומתיים נמוכים בהרבה מכוחות הגזירה הקומתיים במבנה לא מבודד למרות שהמבנה הלא מבודד מקבל דפורמציות פלסטיות גדולות. מסיבה זאת מקדם K_s עולה עם מספר קומה כי כוחות הגזירה במבנה לא מבודד קטנים עם עליה במספר הקומה והפחתתם עקב דפורמציות פלסטיות קטנה גם כן. מאותה הסיבה מקדם הפחתת הסטה קומתית K_d לבניין מבודד בהשוואה לבניין לא מבודד גדל בקומות נמוכות, בהן במבנה לא מבודד מתפתחות הסטות גדולות עקב דפורמציות פלסטיות הנגרמות על ידי כוחות גזירה גדולים.

לדוגמה באיור מס' 6.3.33 מוצגות תוצאות טיפוסיות של חישוב מקדם הפחתת כוחות גזירה קומתיים K_s ומקדם הפחתת הסטה קומתית K_d עבור רעידות אדמה חלשות יחסית ל- $Z=0.1$ (על פי אקסלרוגרמה FN-212 עם תאוצה לכיוון X).

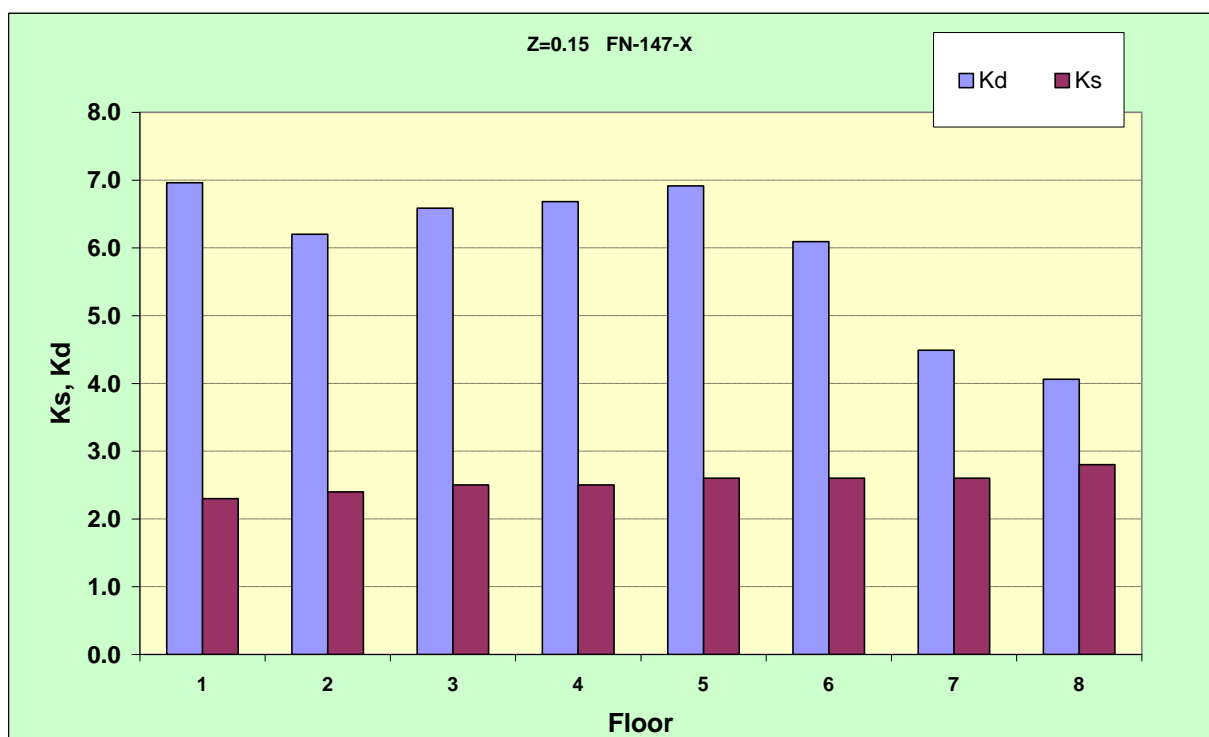
איור מס' 6.3.33: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי ומקדם הפחתת הסטה קומתית עבור אירוע רעידת אדמה על פי אקסלרוגרמה FN-212 ל- $Z=0.1$ עם תאוצה לכיוון X



ניתן לראות כי אפילו ברעידות אדמה חלשות יחסית במבנה לא מבודד מתפתחות דפורמציות פלסטיות גדולות וכתוצאה מכך הסטות קומתיות במבנה לא מבודד הן גדולות בהרבה מאשר במבנה מבודד, ובנוסף לכך הפרש זה גדל לקומות התחתונות מאשר לקומות העליונות. נהפוכו,

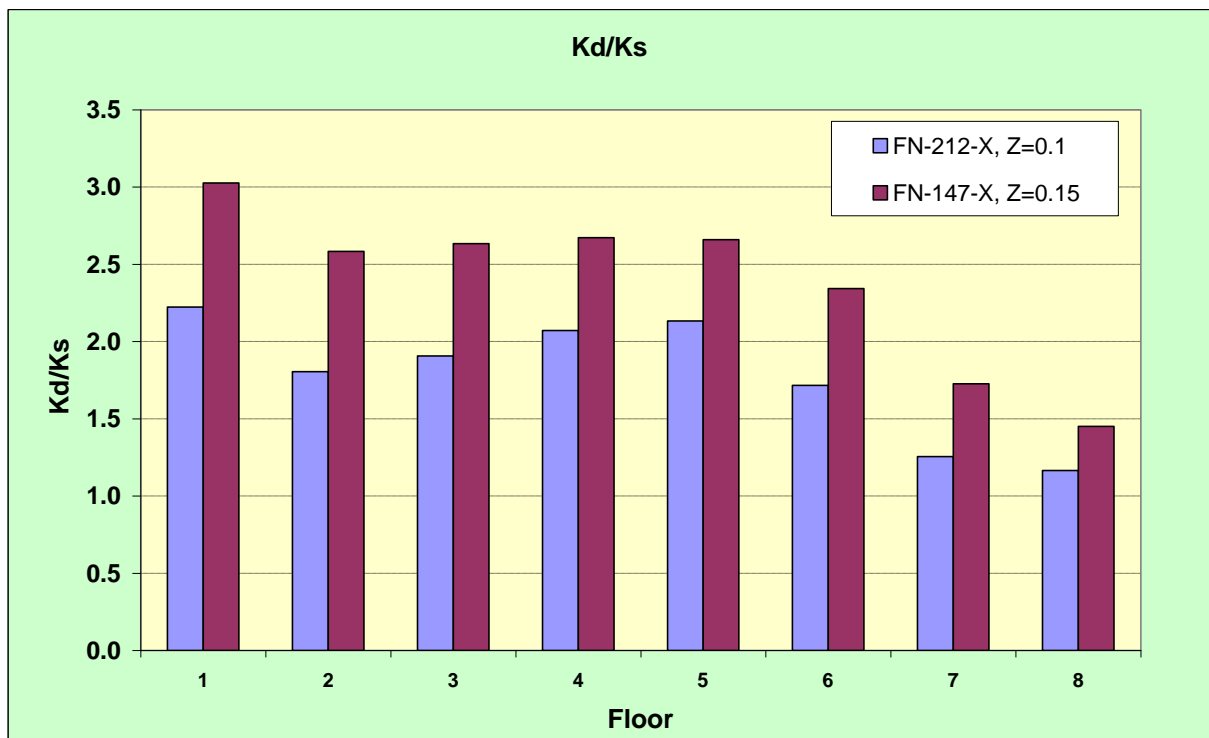
מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי קטן לקומות התחתונות בהשוואה לקומות העליונות, כי דפורמציות פלסטיות גדלות בקומות התחתונות של מבנה לא מבודד וגורמות להפחתה גדולה יותר של כוחות גזירה לקומות התחתונות מאשר לקומות העליונות - נטייה זאת מתגברת ברעידות אדמה בעוצמות חזקות יותר. לדוגמה באיור מס' 6.3.34 מוצגות תוצאות טיפוסיות של חישוב מקדם הפחתת כוחות גזירה קומתיים K_s ומקדם הפחתת הסטה קומתית K_d עבור רעידות אדמה חלשות יחסית ל- $Z=0.15$ (על פי אקסלרוגרמה FN-147 עם תאוצה לכיוון X).

איור מס' 6.3.34: מבנה 8F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי ומקדם הפחתת הסטה קומתית עבור אירוע רעידת אדמה על פי אקסלרוגרמה FN-147 ל- $Z=0.15$ עם תאוצה לכיוון X



המסקנות לעיל מאוירות בצורה בולטת עוד יותר באיור מס' 6.3.35, בו מופיע גודל K_s / K_d לקומות המבנה עבור דוגמת שתי רעידות אדמה חלשות יחסית. ניתן לראות כי אפילו לרעידות אדמה חלשות יחסית גודל K_d/K_s מגיע ל-2.5-3 לקומות התחתונות - הדבר שמצביע על התפתחות דפורמציות פלסטיות גדולות בקומות התחתונות במבנה לא מבודד.

איור מס' 6.3.35: מבנה 8F. יחס בין מקדמים Kd ו-Ks לקומות המבנה לרעידות אדמה חלשות



המסקנות לעיל שייכות למבנה 8F וזהות עבור כל המבנים שנבחנו, כפי שניתן לראות מהגרפים המוצגים למקדם הפחתת כוחות גזירה קומתיות ונתונים לתזוזות הקומות והסטות קומתיות.

פרק 7

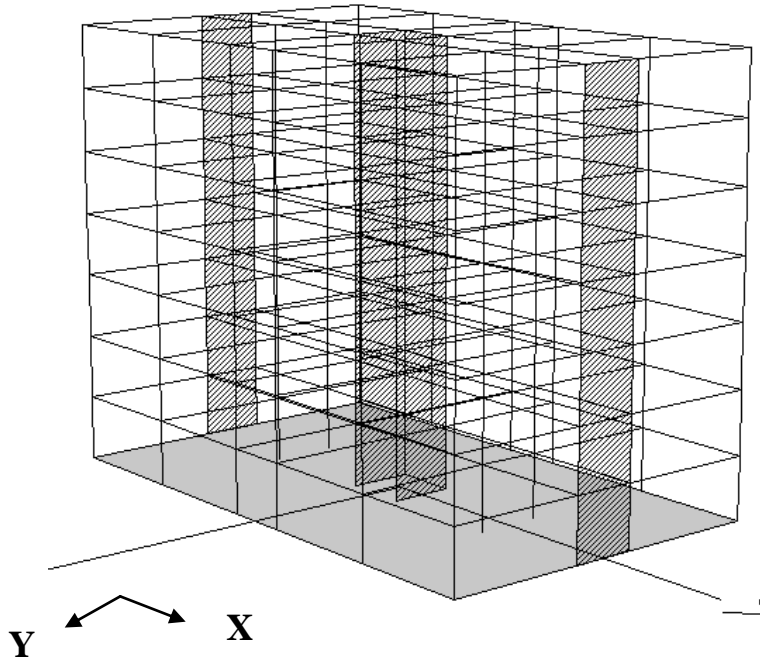
תוצאות החישוב. מבנה בית חולים 7F

7.1 סכימת המבנה

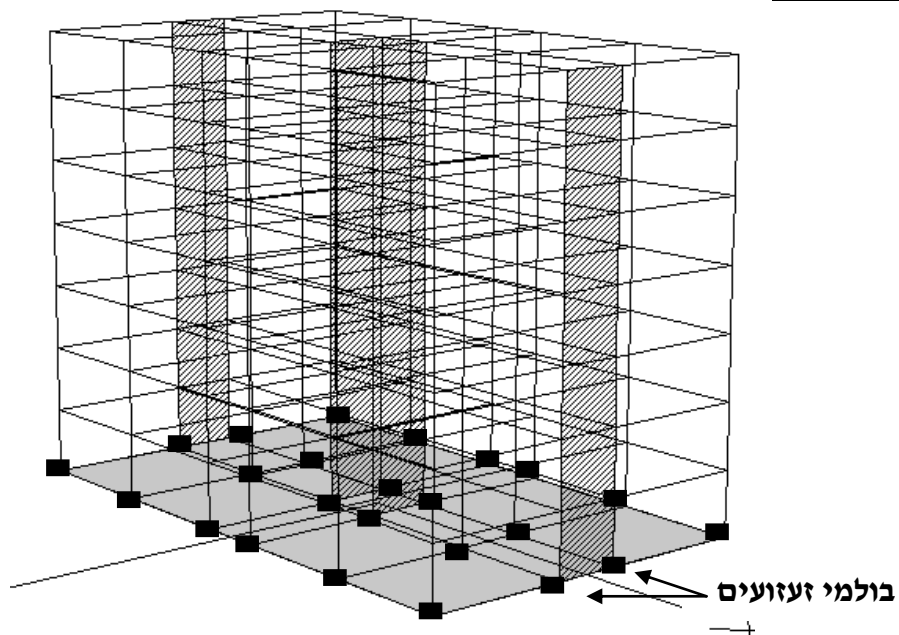
תכנית של קומה טיפוסית של המבנה מוצגת באיור מס' 3.1.3. סכימת המבנה במודל Stera 3D מופיעה באיור 7.1.1.

איור מס' 7.1.1: סכימת מבנה 7F במודל Stera 3D

מבנה לא מבודד



מבנה מבודד



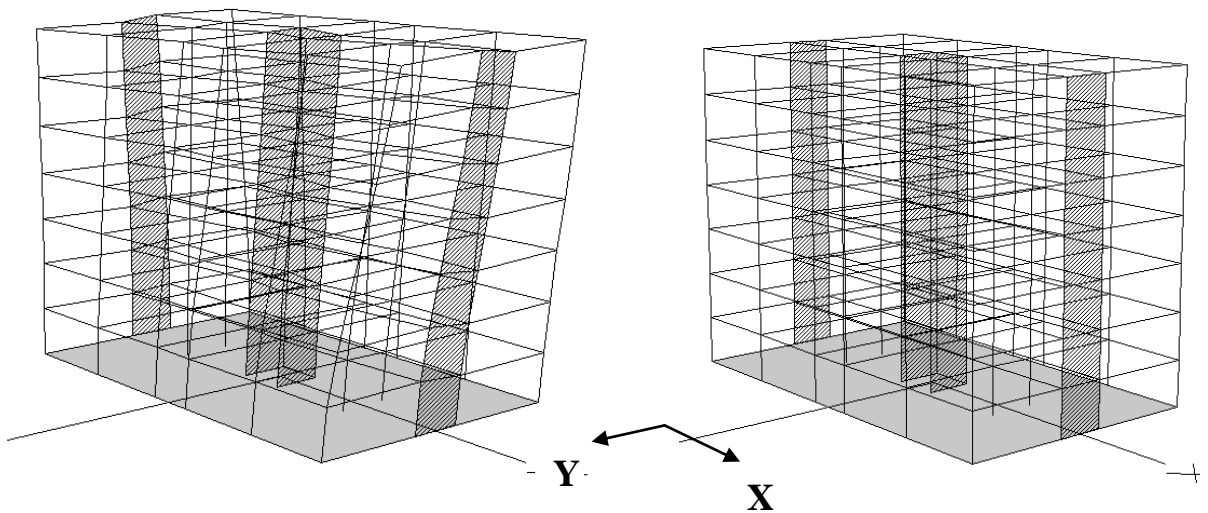
7.2 תקופות וצורות רעידות עצמיות

7.2.1 מבנה לא מבודד

תקופות וצורות רעידות עצמיות לשלוש התקופות הגדולות מוצגות באיור מס' 7.2.1. עבור הפיתול בתקופה 0.88 s , המבנה מוצג במצב תחילי וגם אחרי תזוזות הפיתול.

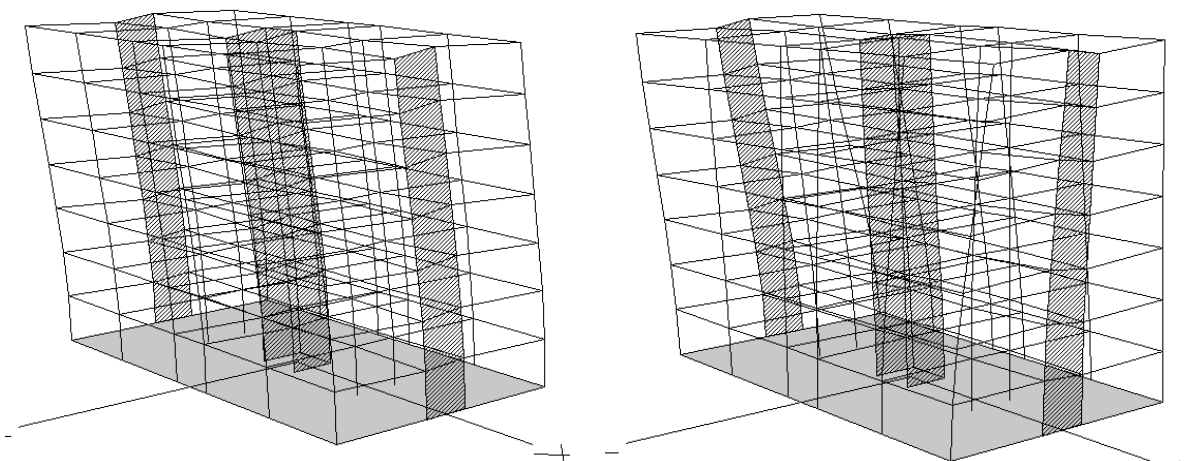
איור מס' 7.2.1: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 7F לא מבודד

פיתול, $T_1=0.88\text{ s}$



תזוזה לכיוון Y, $T_3=0.78\text{ s}$

פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_2=0.79\text{ s}$

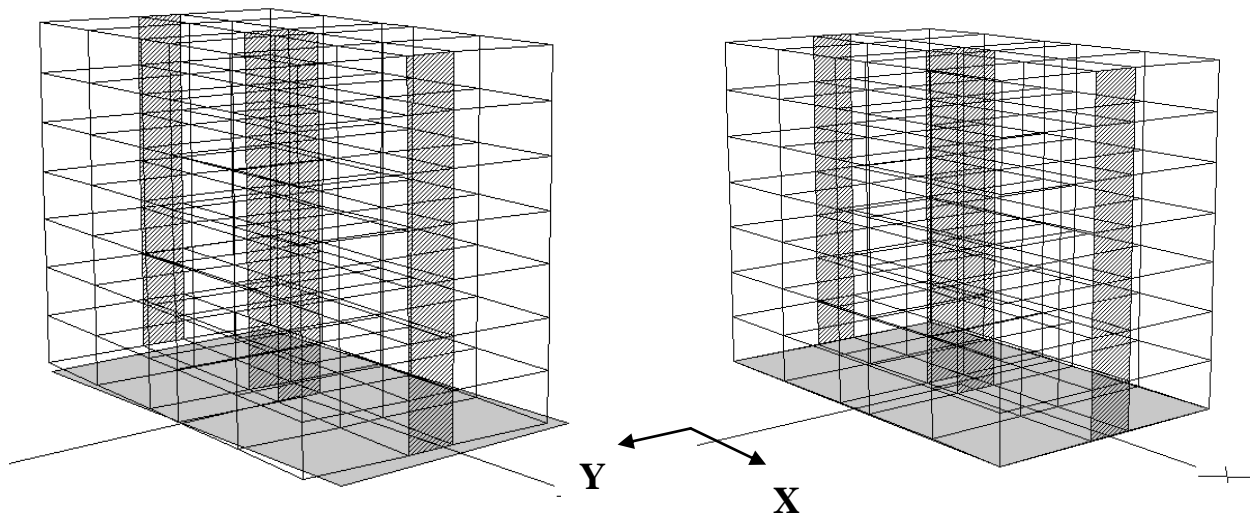


7.2.2 מבנה מבודד

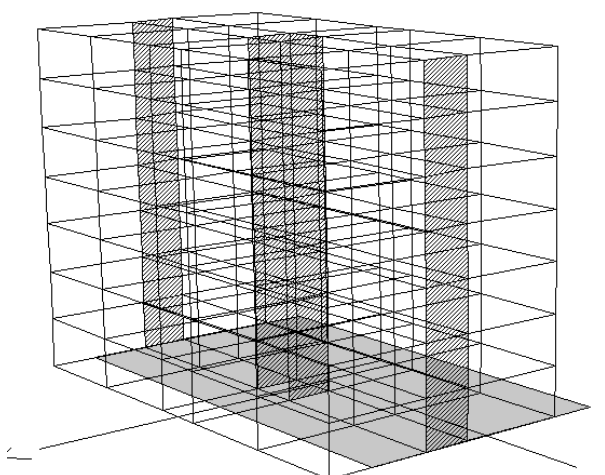
למבנה תוכננו בולמי זעזועים די קשיחים אשר מספקים את התקופה הבסיסית של 2.48 s . באיור 7.2.2 מוצגות תקופות וצורות רעידות עצמיות לשש התקופות הגדולות. ניתן לראות כי לשלוש מודות הרעידות הראשונות המבנה נע כגוף קשיח כמעט בלי דפורמציות ורק במודה הרביעית עם תקופה די קטנה של 0.51 s נוצרות דפורמציות, הסטות בין קומות, כוחות גזירה בעמודים ומומנטים.

איור מס' 7.2.2: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 7F מבודד

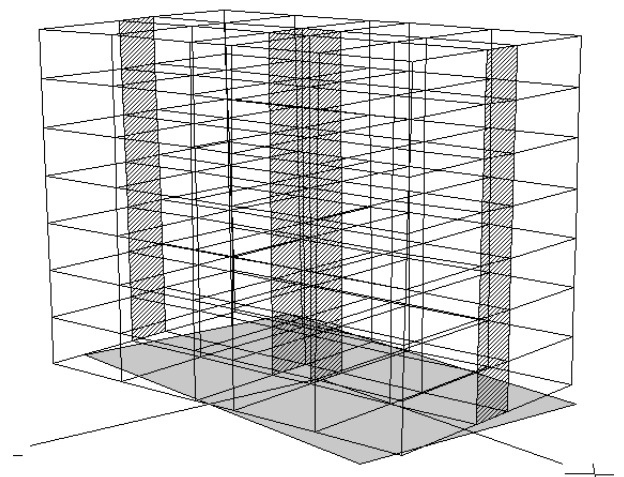
X תזוזה לכיוון X, $T_1=2.48\text{ s}$



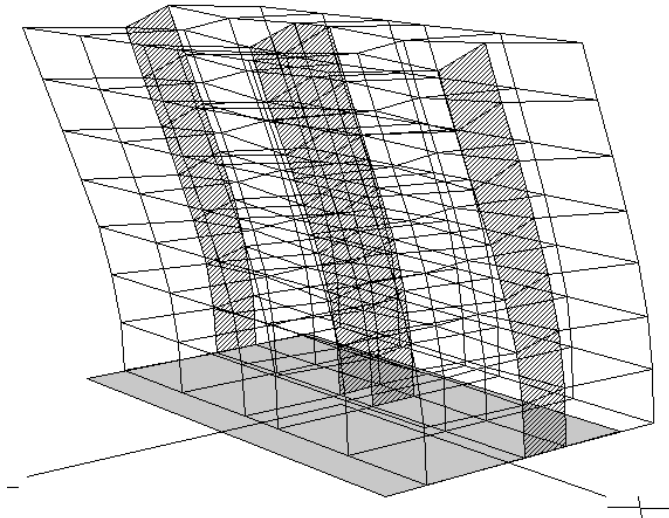
Y תזוזה לכיוון Y, $T_3=2.46\text{ s}$



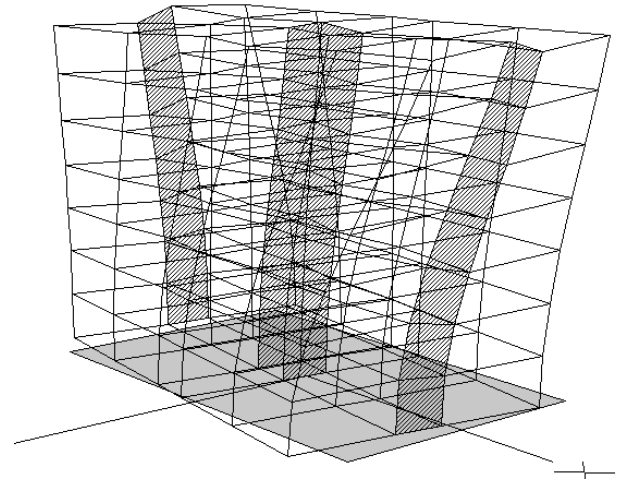
פיתול, $T_2=2.46\text{ s}$



Y פיתול ותזוזה לכיוון, $T5=0.48\text{ s}$

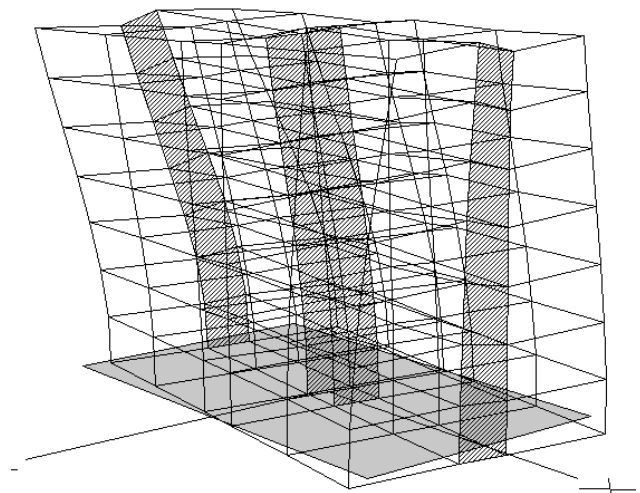


X פיתול ותזוזה לכיוון, $T4=0.51\text{ s}$



Y X

פיתול, $T6=0.47\text{ s}$



7.3 הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי

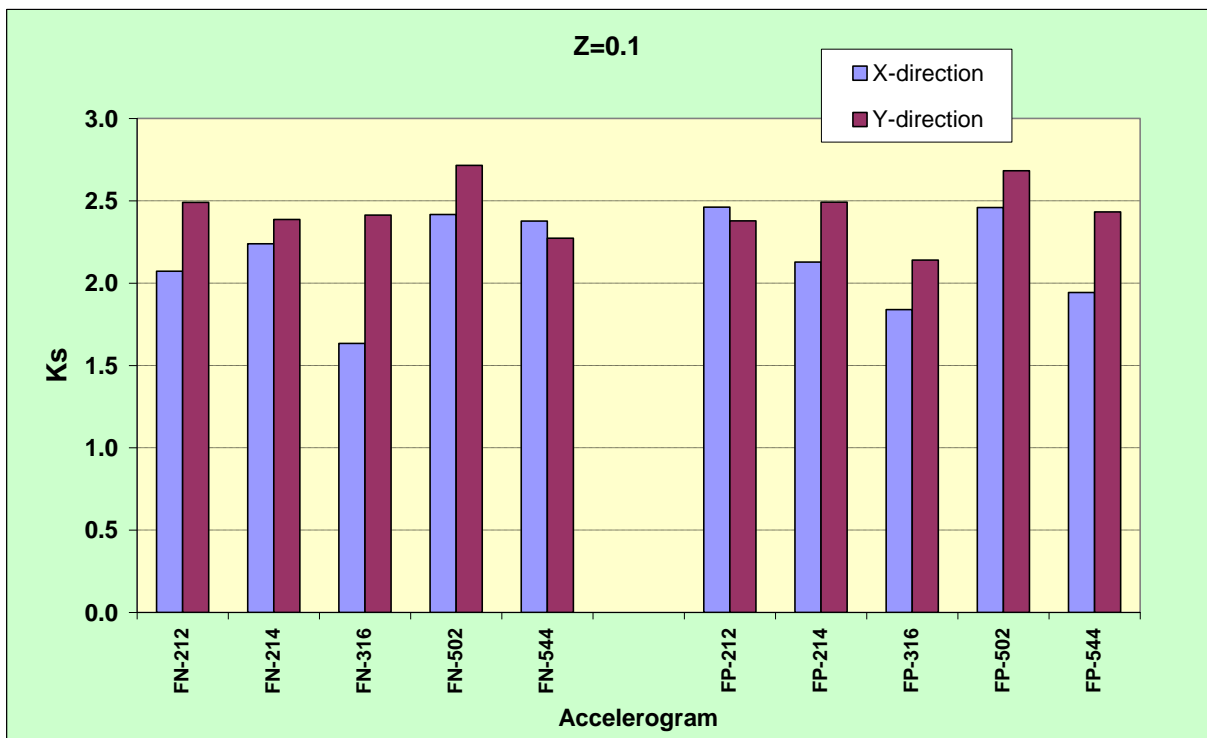
7.3.1 נעשה שימוש בבולמי זעזועים עם מקדם $K_p/K_e=0.1$ שמספקים בליעת אנרגיה גדולה.

7.3.2 מתוצאות החישוב נובעות המסקנות הבאות (ראה גם סעיף 6.3.3):

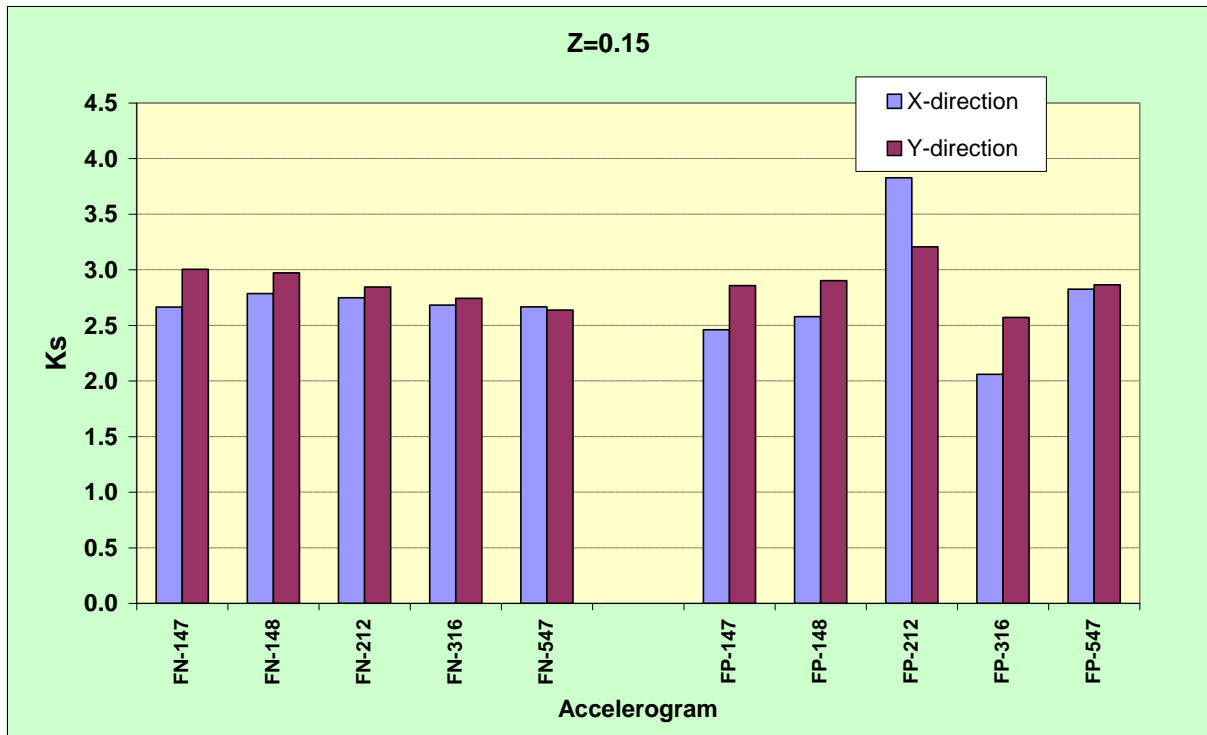
* כוחות גזירה קומתיים מרבים נוצרים בעמודים בקומת הקרקע.

* המבנה המבודד עובד בתחום אלסטי וכוחות הגזירה הקומתיים נמוכים בהרבה מכוחות הגזירה הקומתיים בבניין לא מבודד למרות שהבניין הלא מבודד מקבל דפורמציות פלסטיות גדולות.

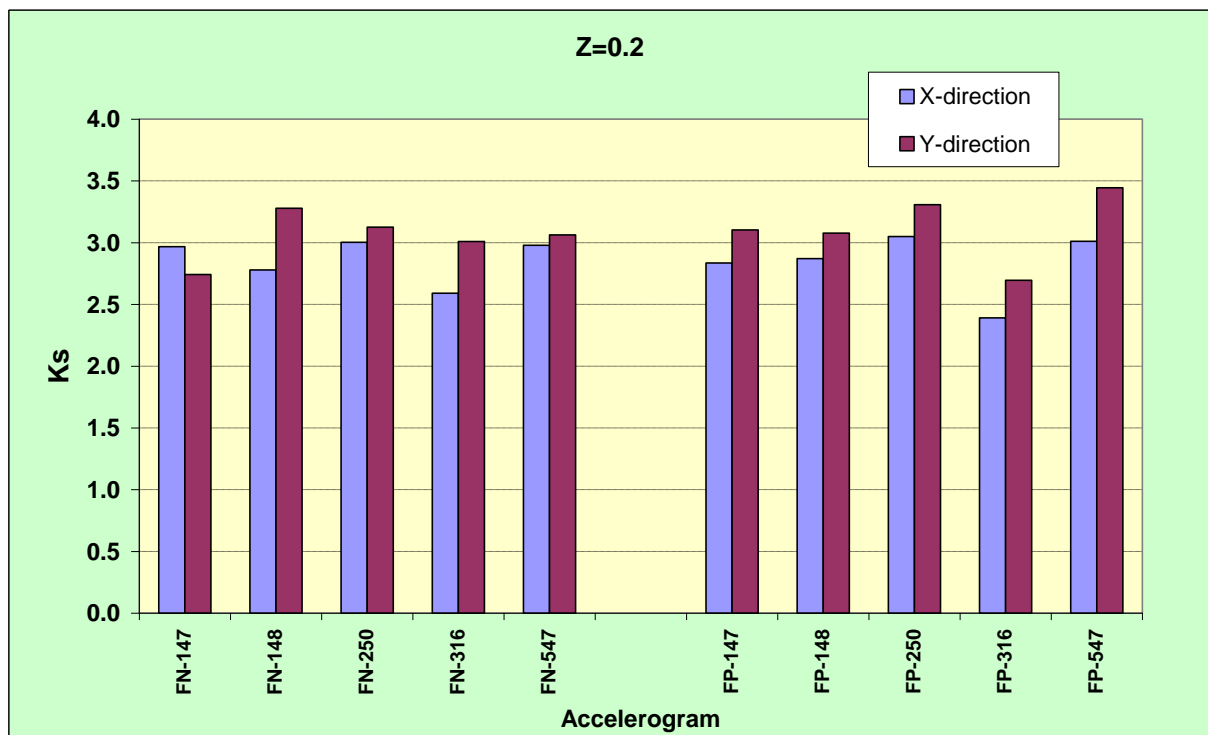
איור מס' 7.3.1: מבנה 7F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.1$



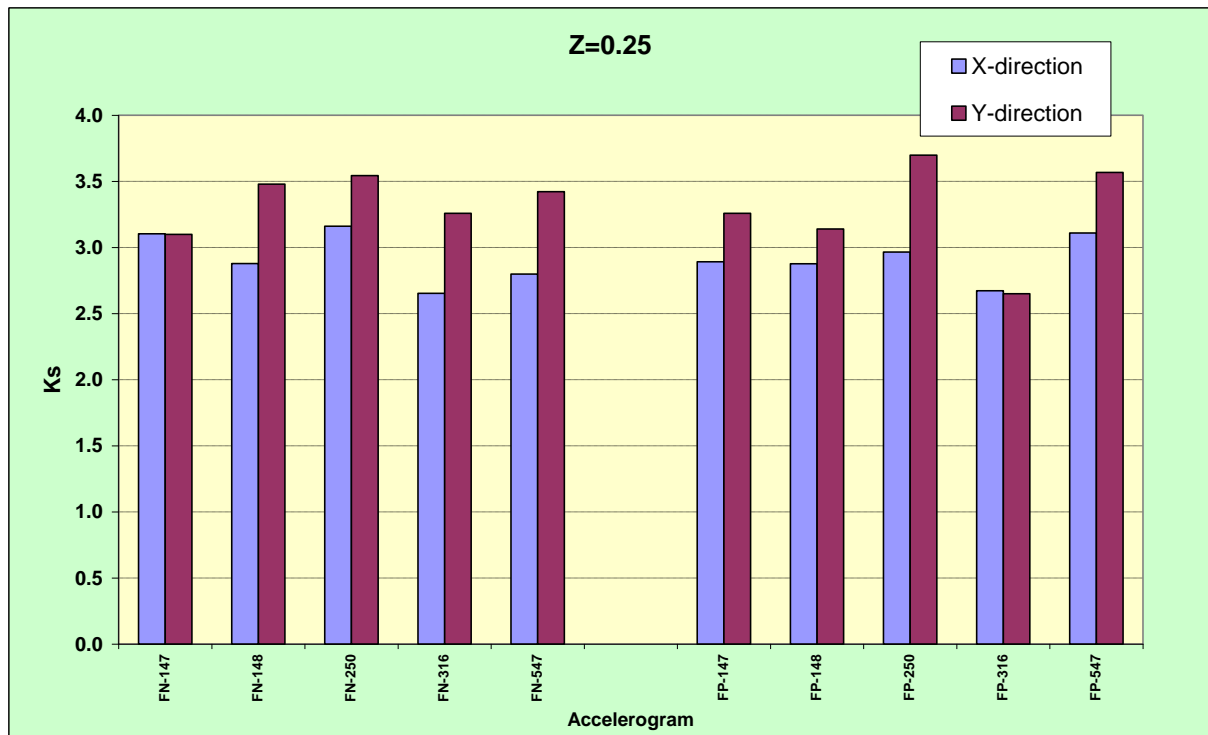
איור מס' 7.3.2: מבנה 7F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.15$



איור מס' 7.3.3: מבנה 7F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.20$



איור מס' 7.3.4: מבנה 7F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.25$



פרק 8

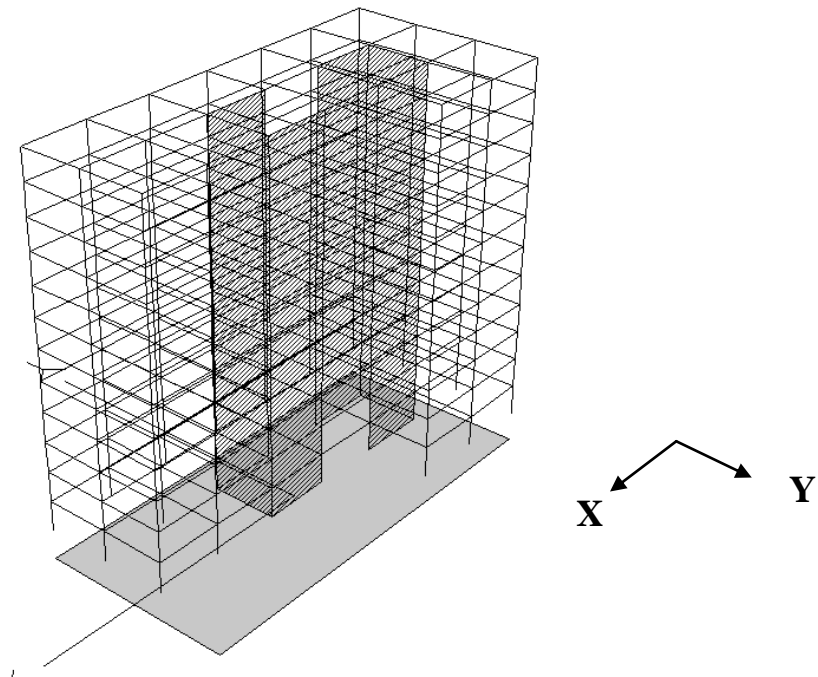
תוצאות החישוב. מבנה משרדים 12F

8.1 סכימת המבנה

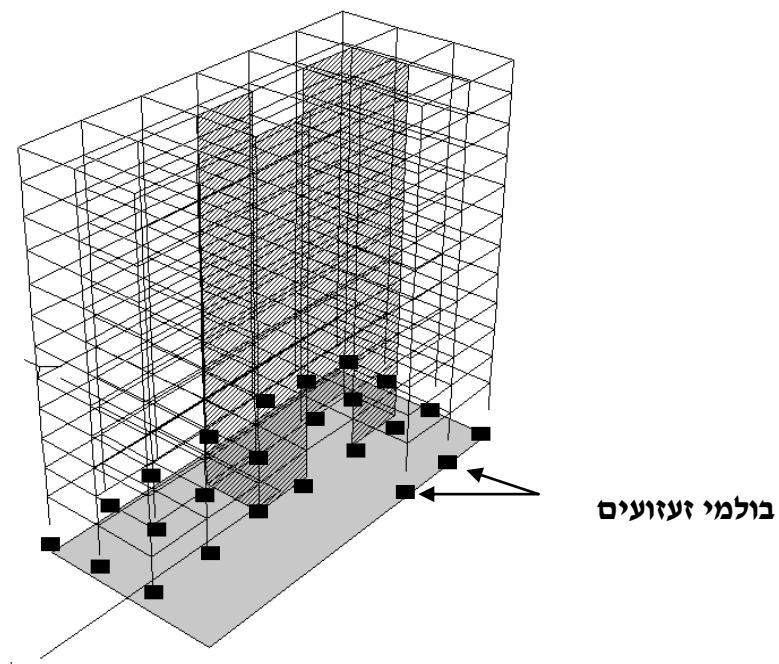
תכנית של קומה טיפוסית של המבנה מוצגת באיור מס' 3.1.4. סכימת המבנה במודל Stera 3D מופיעה באיור 8.1.1.

איור מס' 8.1.1: סכימת מבנה 12F במודל Stera 3D

מבנה לא מבודד



מבנה מבודד



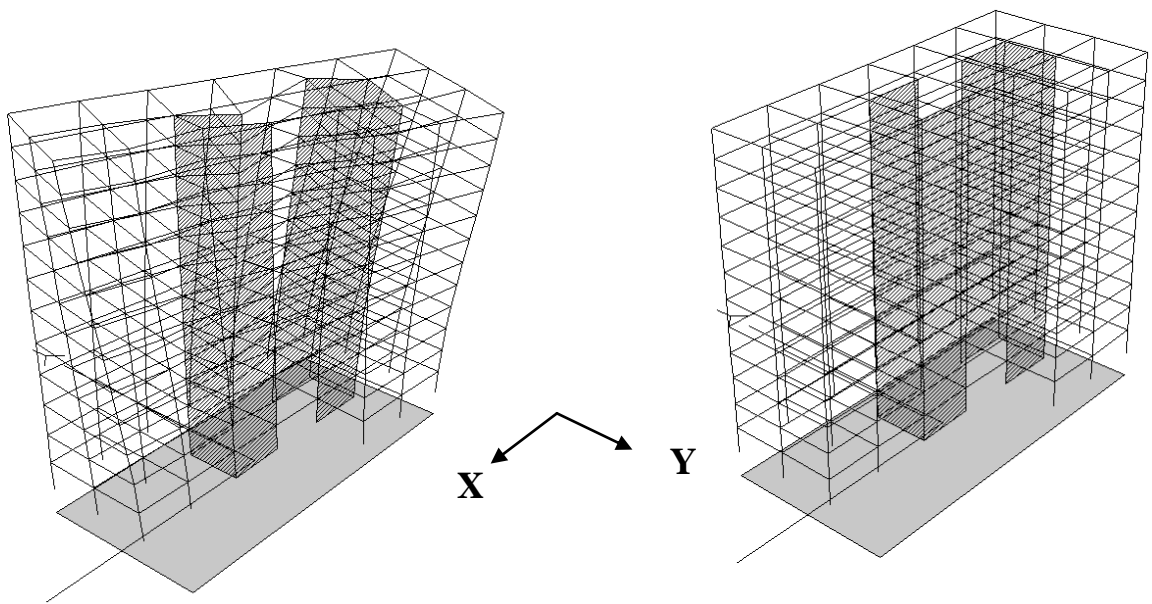
8.2 תקופות וצורות רעידות עצמיות

8.2.1 מבנה לא מבודד

תקופות וצורות רעידות עצמיות לשלוש התקופות הגדולות מוצגות באיור מס' 8.2.1. עבור מודה בסיסית עם תקופה של 1.02 s, המבנה מוצג במצב תחילי וגם אחרי תזוזות הפיתול.

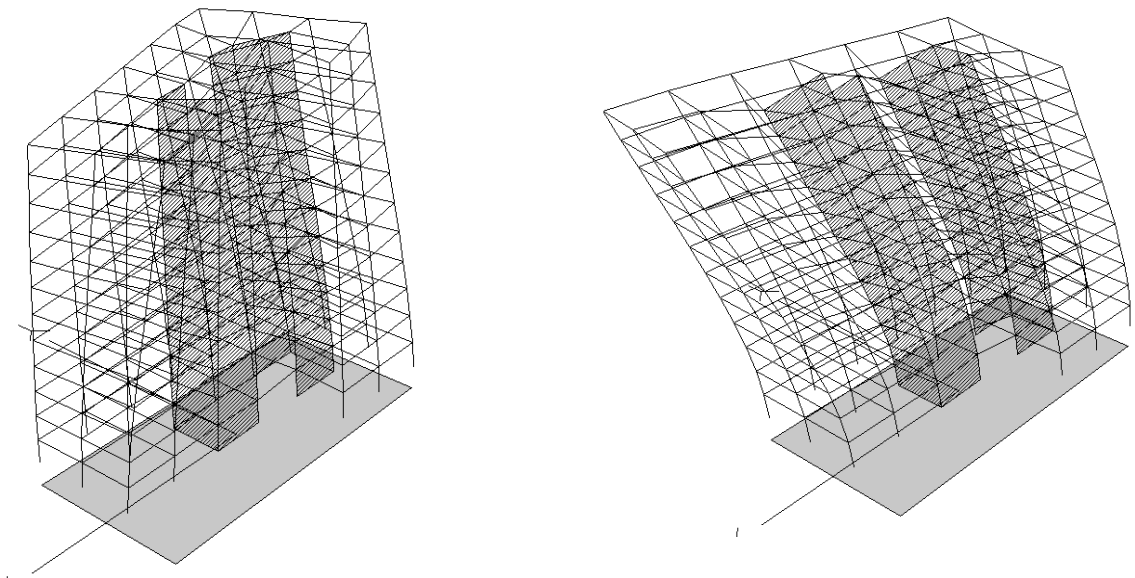
איור מס' 8.2.1: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 12F לא מבודד

Y , $T_1=1.02s$, פיתול ותזוזה לכיוון



X , $T_3=0.86 s$, תזוזה ופיתול

X , $T_2=0.91 s$, תזוזה לכיוון

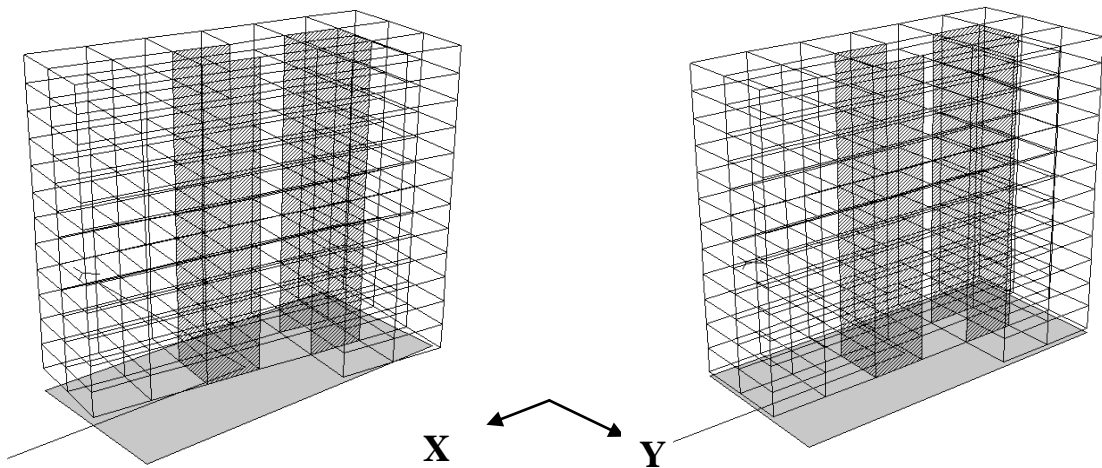


8.2.2 מבנה מבודד

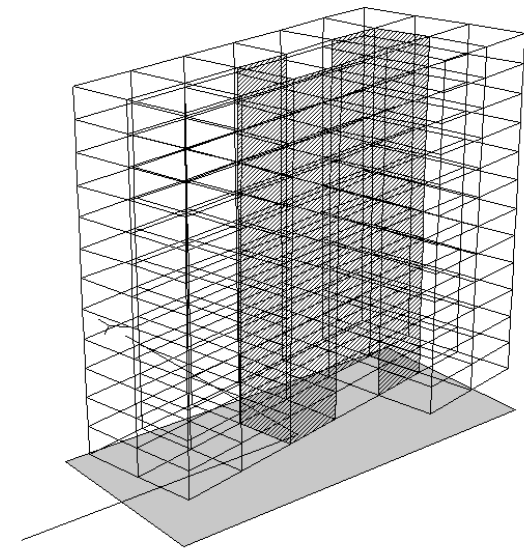
למבנה תוכננו בולמי זעזועים גמישים אשר מספקים תקופה בסיסית של 2.99 s . באיור 8.2.2 מוצגות תקופות וצורות רעידות עצמיות לשש התקופות הגדולות. ניתן לראות כי לשלוש מודות הרעידות הראשונות המבנה נע כגוף קשיח כמעט בלי דפורמציות ורק במודה הרביעית עם תקופה די נמוכה של 0.56 s נוצרות דפורמציות, הסטות בין קומות, כוחות גזירה בעמודים ומומנטים.

איור מס' 8.2.2: תקופות וצורות רעידות עצמיות של מבנה 12F מבודד

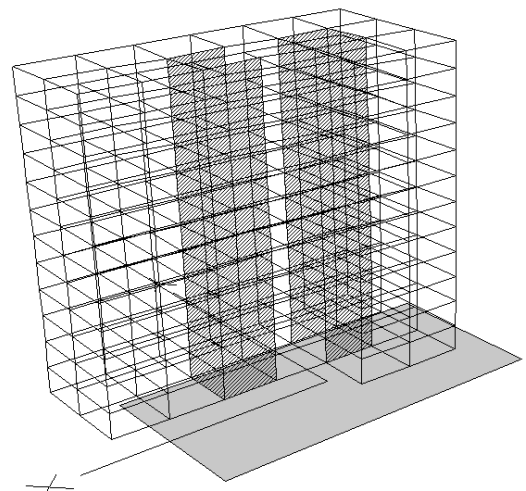
פיתול, $T_1=2.99\text{ s}$



פיתול ותזוזה לכיוון X, $T_3=2.96\text{ s}$

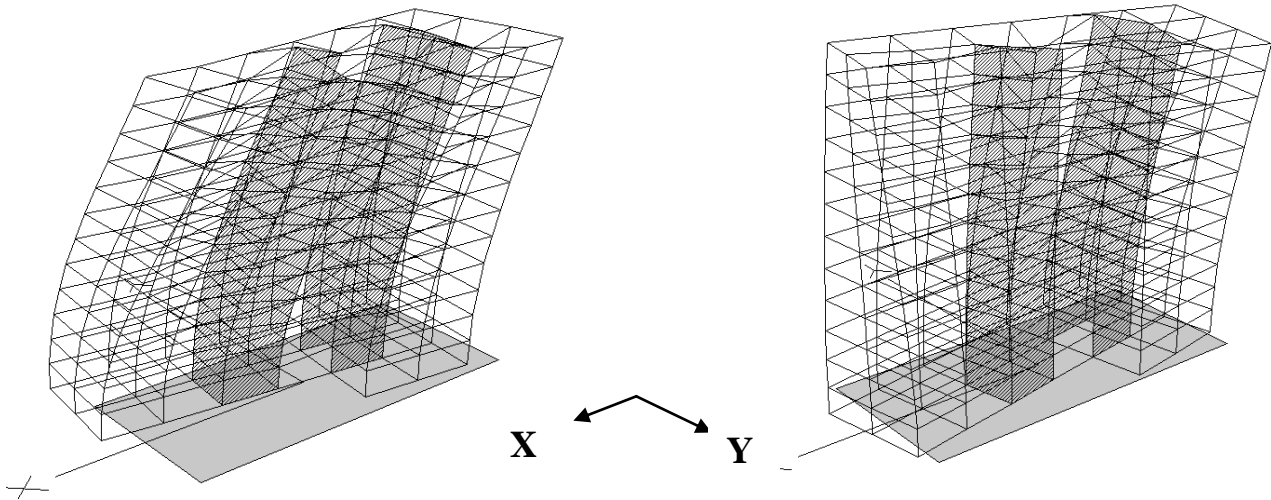


פיתול ותזוזה לכיוון Y, $T_2=2.96\text{ s}$

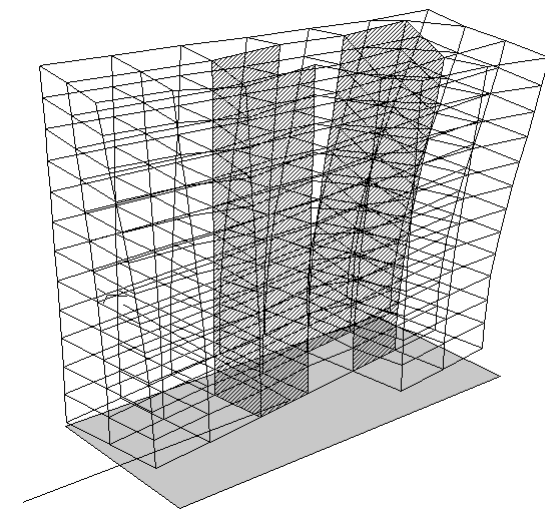


X פיתול ותזוזה לכיוון $T5=0.55$ s

Y פיתול, $T4=0.61$ s



Y פיתול ותזוזה לכיוון $T6=0.52$ s



8.3 הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי

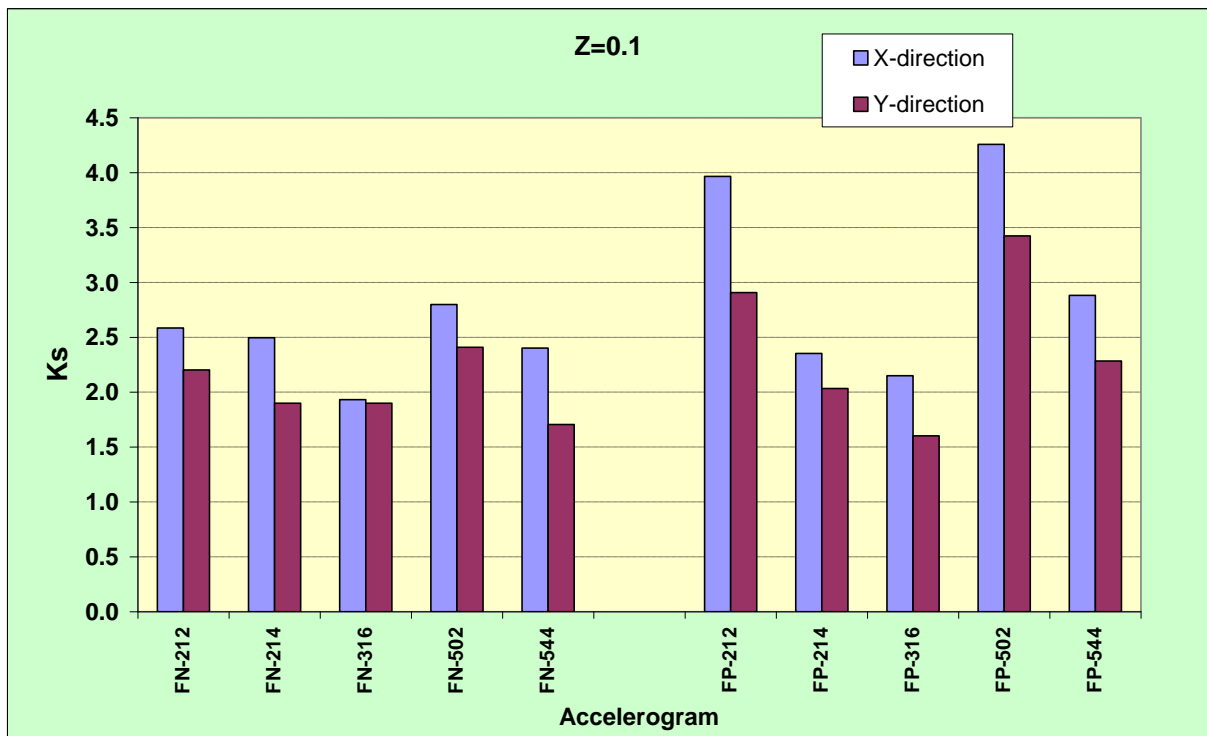
8.3.1 נעשה שימוש בבולמי זעזועים עם מקדם $K_p/K_e=0.1$ שמספקים בליעת אנרגיה גדולה, קשיחות אופקית נמוכה ותקופה בסיסית כמעט 3 שניות.

8.3.2 מתוצאות החישוב נובעות המסקנות הבאות:

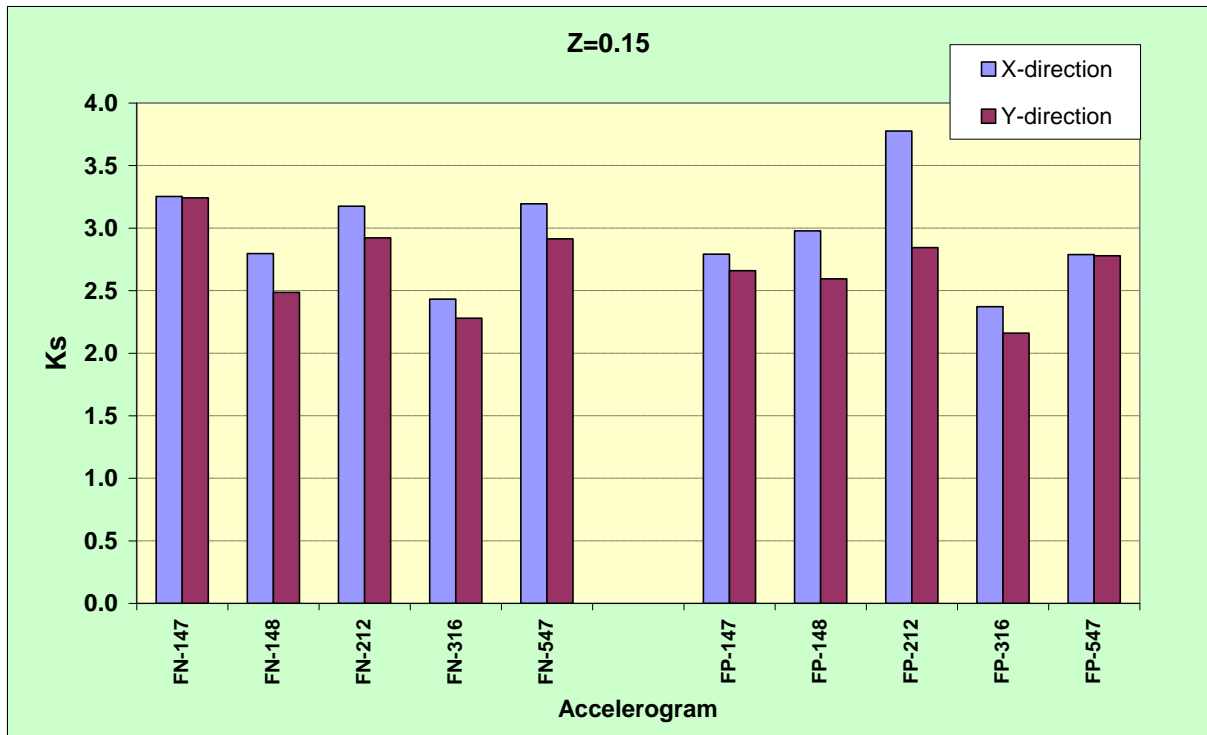
* כוחות גזירה קומתיים מרבים נוצרים בעמודים בקומת הקרקע.

* המבנה המבודד עובד בתחום אלסטי (ראה סעיף 6.3.3) וכוחות הגזירה הקומתיים נמוכים בהרבה מכוחות הגזירה הקומתיים במבנה לא מבודד למרות שהמבנה הלא מבודד מקבל דפורמציות פלסטיות גדולות.

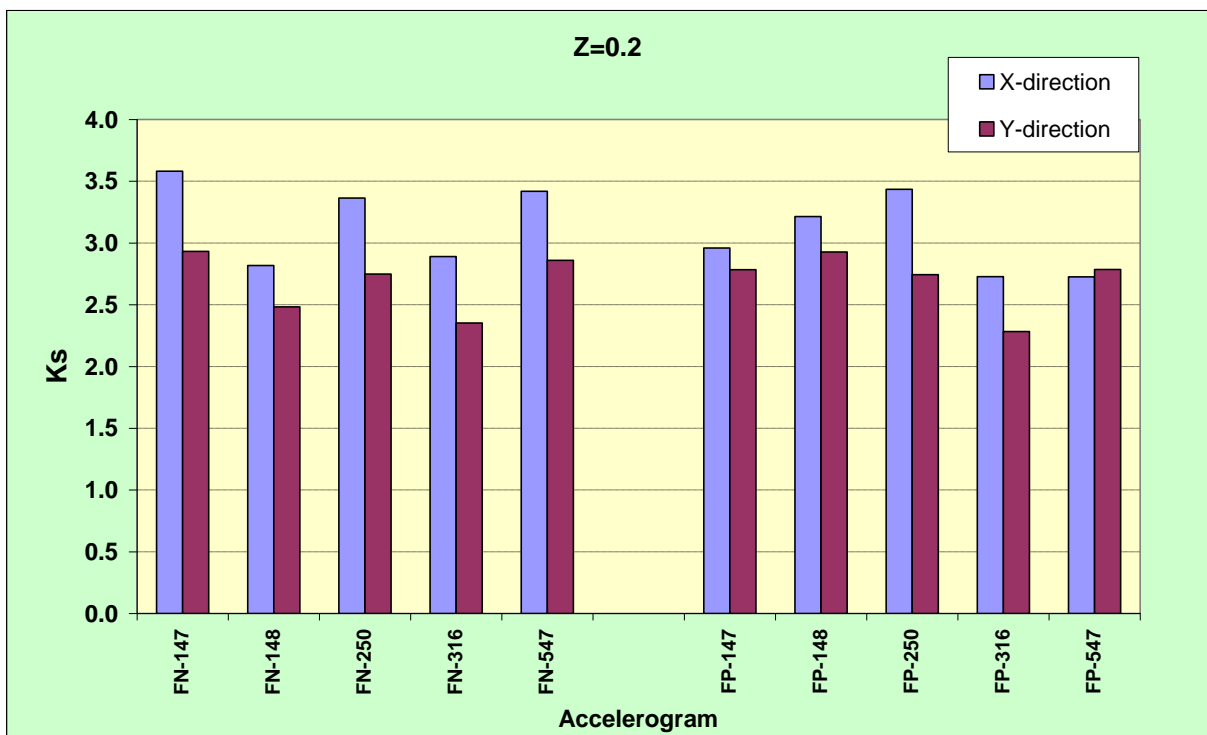
איור מס' 8.3.1: מבנה 12F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלרוגרמות ל- $Z=0.1$



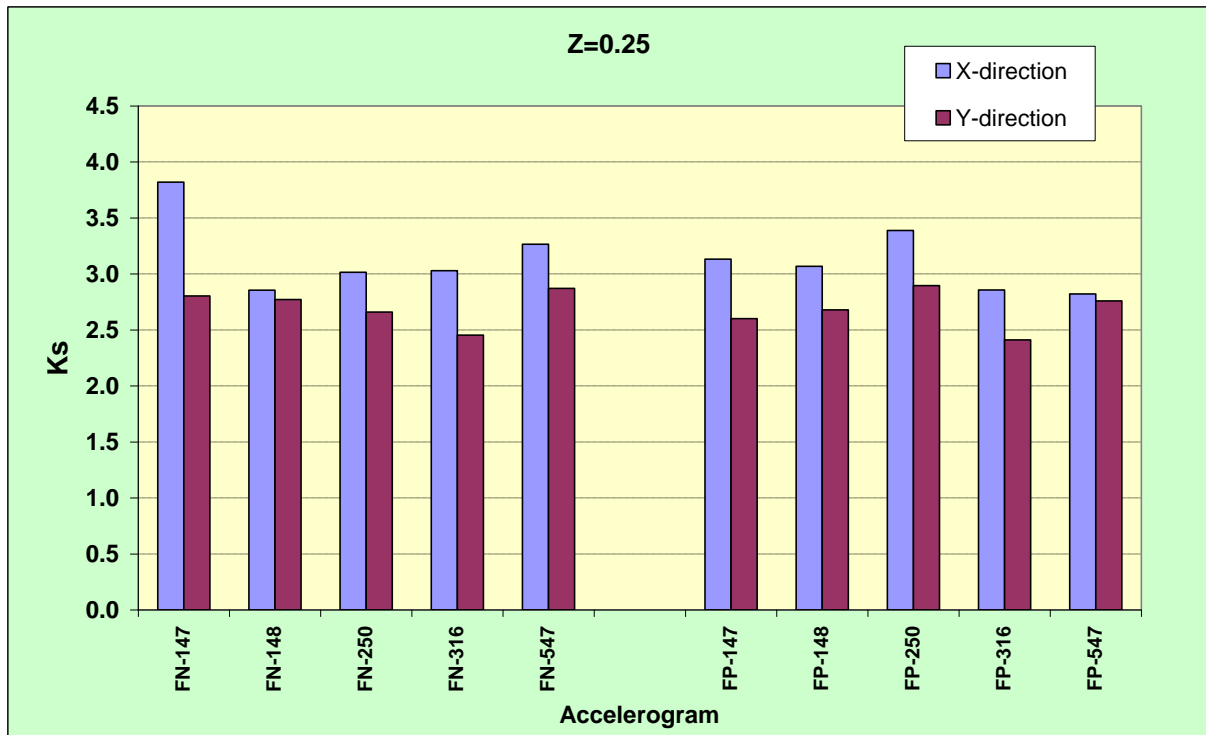
איור מס' 8.3.2: מבנה 12F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.15$



איור מס' 8.3.3: מבנה 12F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.20$



איור מס' 8.3.4: מבנה 12F. מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי מרבי במבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד. אקסלוגרמות ל- $Z=0.25$



פרק 9

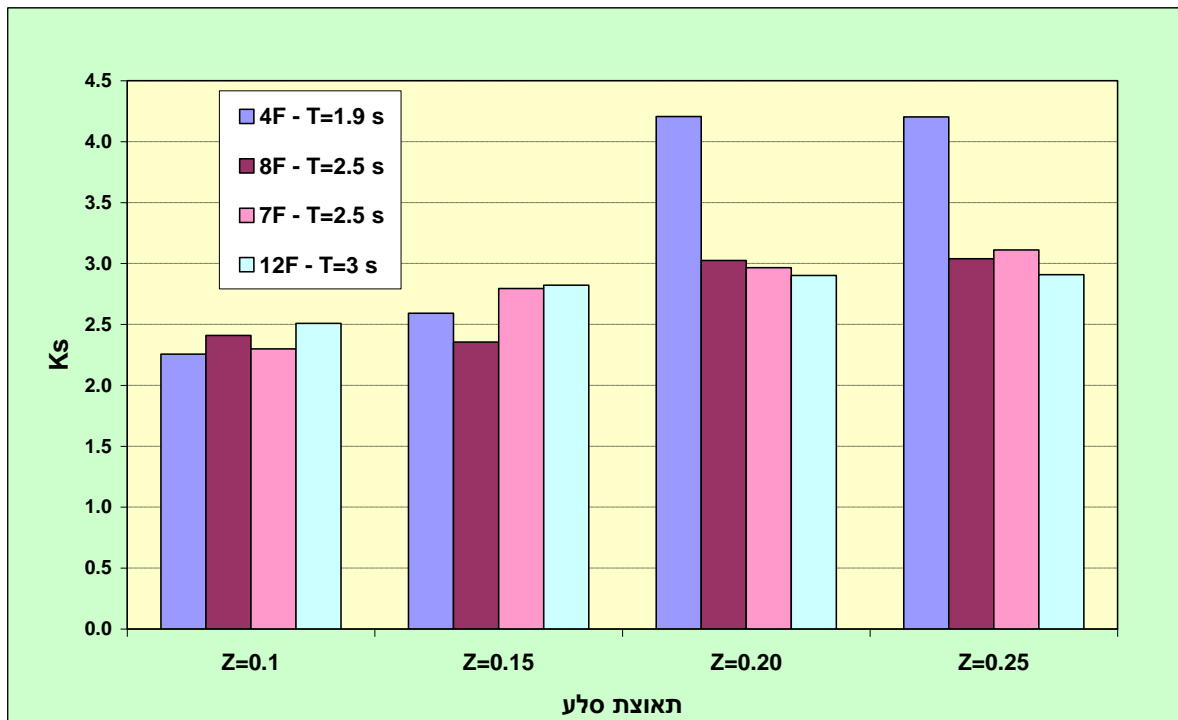
ניתוח תוצאות חישובים והמסקנות

מתוצאות החישובים נובעות המסקנות הבאות:

9.1 בידוד רעידות סיסמי הינו אמצעי יעיל, כשיתרונותיו גדלים עם עוצמת רעידת אדמה בהשוואה לאמצעים אחרים.

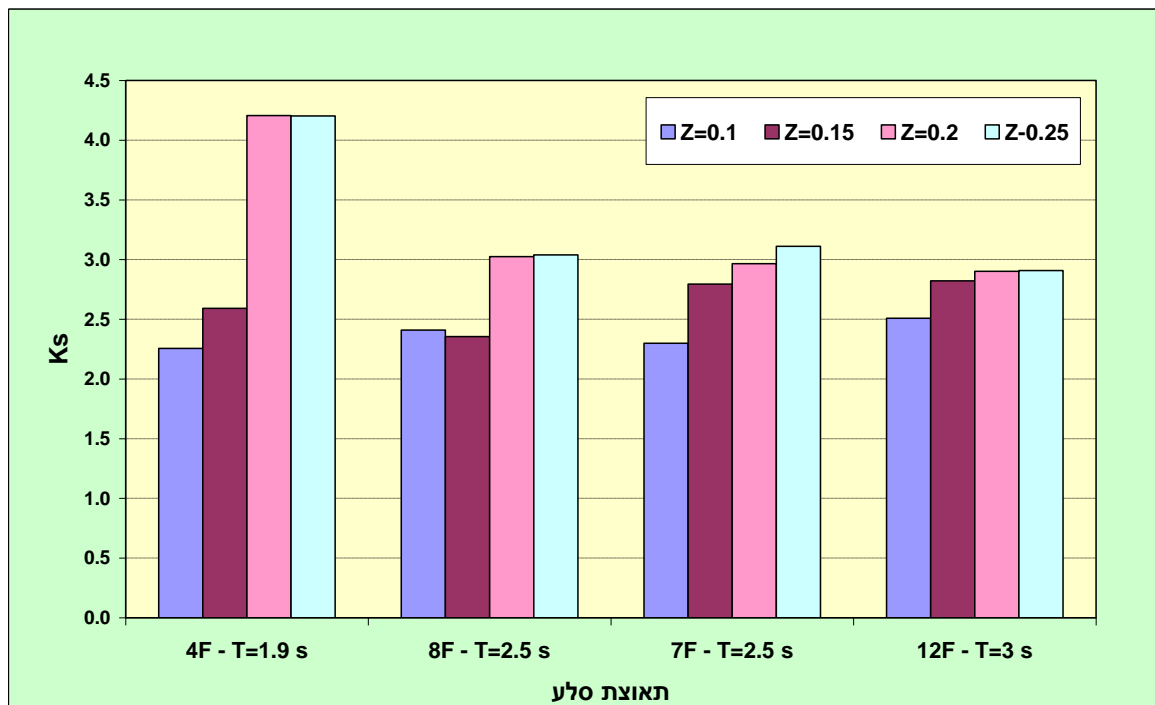
9.2 באמצעות בידוד סיסמי ניתן למנוע דפורמציות פלסטיות בעת רעידת אדמה במבנים טיפוסיים במדינת ישראל. בידוד מרעידות מאפשר להפחית בצורה משמעותית את כוחות הגזירה הקומתיים בהשוואה לכוחות הגזירה שנוצרים במבנים לא מבודדים שבהם מתפתחות דפורמציות פלסטיות משמעותיות. משום כך, מבנים מבודדים לא רק יעמדו ברעידות אדמה, אלא יעברו את אירועי רעידות אדמה ללא נזק קונסטרוקטיבי. באיור 9.1 מוצג ממוצע של מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי לאוסף אקסלרוגרמות לרעידות אדמה עם תאוצת הסלע של 0.1-0.25 לארבע סוגי מבנים שנבחנו.

איור מס' 9.1: מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי לאוסף אקסלרוגרמות לרעידות אדמה עם תאוצת הסלע של 0.1-0.25



9.3 למבנים יחסית נמוכים, עד 3-5 קומות, ניתן להשתמש בבולמי זעזועים קשיחים המספקים תקופה בסיסית למבנה מבודד פחות מ-2 שניות. משום כך גם בולמי זעזועים קשיחים יספקו בידוד רלוונטי לרעידות אדמה הצפויות בארץ (לפי ת"י 413) וזאת בלי כל נזק קונסטרוקטיבי למבנה. לצורך בידוד מבנים אלה מתאימים גם בולמי זעזועים מסוג **HDRB** וגם בולמי זעזועים מסוגים **LRB** או **FPS** אשר מספקים מקדם ריסון אפקטיבי ופיזור אנרגיה גבוהים יותר, ובכך מפחיתים כוחות ומומנטים הנוצרים במבנה (ראה איור מס' 9.2).

איור מס' 9.2: מקדם הפחתת כוח גזירה קומתי לאוסף אקסלרוגרמות לרעידות אדמה עם תאוצת הסלע של $Z=0.1-0.25$



9.4 למבנים גבוהים יותר, בעלי 6-10 קומות ניתן להשתמש בבולמי זעזועים בקשיחות בינונית, המספקים תקופה בסיסית כ-2.5 שניות. למטרה זאת ניתן להשתמש בבולמי זעזועים מסוגים שונים כתלות בתאוצות הקרקע הצפויות.

9.5 בולמי זעזועים גמישים, המתוכננים לתקופה בסיסית של 3 שניות ויותר, מאפשרים לבדד מבנים גבוהים מ-10-12 קומות, למבנים כאלה, במיוחד כשהתקופה הבסיסית של המבנה המבודד היא גדולה, כדאי להשתמש בבולמי זעזועים, בעלי מקדם ריסון אנרגיה גבוה – בולמי זעזועים מסוגים **LRB** או **FPS**.

9.6 במחקר זה מאפייני אקסלרוגרמות של תאוצת קרקע באזורים שונים בארץ, ששמשו לחישובים, נקבעו למקדם שתית (מקדם הגברה) סטנדרטי לפי ת"י 413 לקרקע טיפוסית בארץ. כידוע, מקדם ההגברה לתכן מתקבל בהתבסס על בדיקת הקרקע באתר ספציפי ולעיתים קרובות הוא גבוה בצורה משמעותית מאשר מקדם ההגברה הסטנדרטי לפי ת"י 413. במקרים אלה יש לתכנן מבנים לתאוצות הקרקע גבוהות יותר ויחד עם זאת בידוד מרעידות, עקב תכונותיו המתוארות לעיל, צפוי להיות פתרון קונסטרוקטיבי יעיל להגנת המבנים מפני רעידות אדמה גם באזורים עם הגברה חריגה.

פרק 10

היבטים כלכליים של בידוד רעידות סיסמי

10.1 כללי

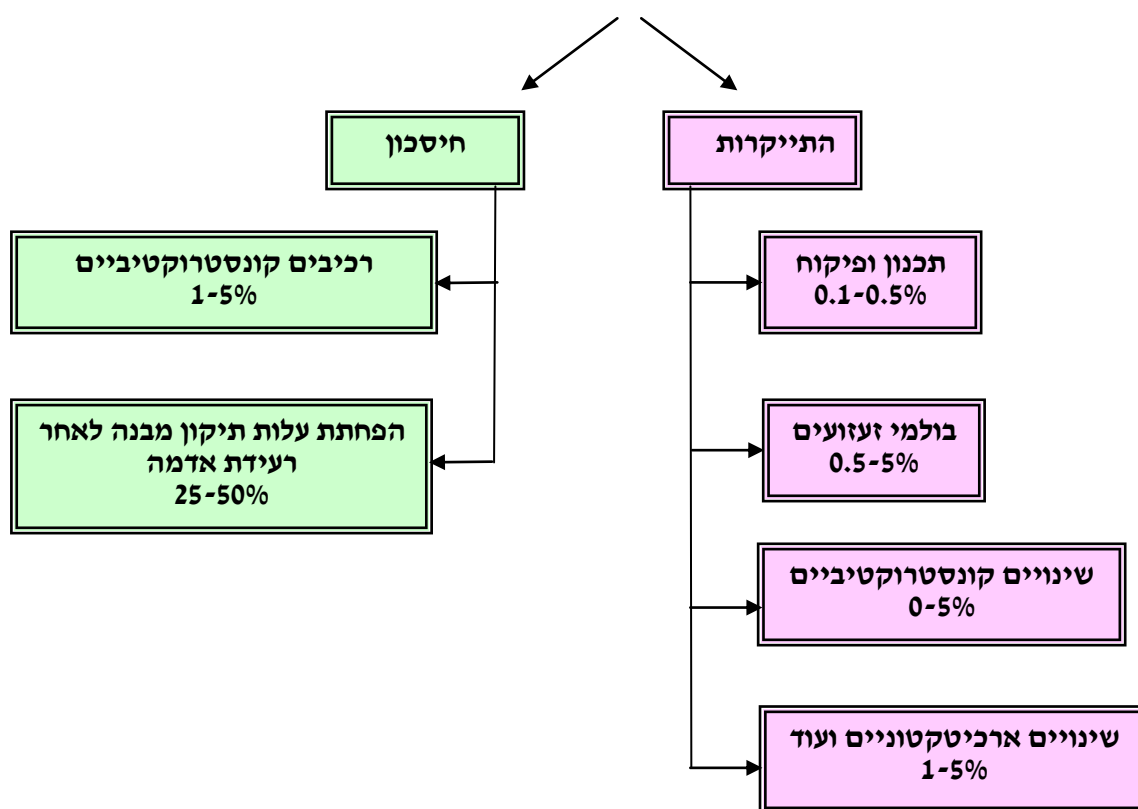
- תחום שימוש בבידוד רעידות סיסמי מתואר בפרק 1, וניתן לשייכו לשתי קבוצות:
- * מבנים בהם לא ניתן להשתמש באמצעים אחרים למיגון מפני רעידות אדמה, למשל במבנים לשימור, ו/או מבנים נוספים שעבורם נזקים קונסטרוקטיביים אינם מקובלים.
 - * בכל המקרים האחרים בידוד רעידות סיסמי מתקניים עקב סיבות כלכליות, ולמבנים אלה שייך מגוון רחב של מבני מגורים, משרדים, תעשייה ועוד, המפורטים בפרק מס' 1.

לאור העובדה שזאת בארץ חסר ניסיון בהקמת מבנים מבודדים מפני רעידות אדמה, ויש ניסיון די מוגבל בשימוש באמצעים אחרים למיגון מפני רעידות אדמה, להלן תיאור קצר של תוצאות ניתוח כלכלי של בידוד רעידות סיסמי, אשר נצבר במדינות בעלות ניסיון רב בנושא (ראה [4]).

10.2 היבטים כלכליים של בידוד רעידות סיסמי

היבטים כלכליים עבור בידוד רעידות סיסמי מוצגים באיור מס' 10.1 ומתוארים להלן.

איור מס' 10.1 רכיבים כלכליים של בידוד רעידות סיסמי (לפי ספרות מקצועית)



10.2.1 עלות תוספת עבודות תכנון ופיקוח למבנה מבודד בהשוואה למבנה לא מבודד

תכנון למבנים מבודדים הוא ככלל יותר מורכב מאשר למבנים לא מבודדים ולכן עלות התכנון עבור

מבנים מבודדים גבוה יותר, וזאת למרות שלמבנים מבודדים קטן היקף עבודות תכנוניות למבנה קונסטרוקטיבי עצמו הודות להיעדר צורך לספק עמידה במשיכות. בנוסף לכך, ככלל גדלה עלות של פיקוח עקב עלות נוספת עבור פיקוח על בולמים עצמם וגם על הרכבתם באתר עבודה. נתונים בספרות מקצועית מצביעים על כך שעלות תוספת תכנון ופיקוח נעה בתחום של כ- 0.1-0.5 % מעלות הבניה ותלויה במורכבות התכנון, מקצועיות וניסיון של צוות התכנון- עלות תכנון של צוותים מנוסים היא נמוכה יותר. סביר להניח שעלות התכנון בארץ תרד עם רכישת ניסיון מקומי בנושא.

10.2.2 עלות בולמי זעזועים

עלות בולמי זעזועים עצמם נעה בטווח רחב כתלות בסוג ודגם של בולמי הזעזועים, ומושפעת מגודל ותזוזה מרבית (תקופה בסיסית) אותה מספקים הבולמים. לפי נתונים בספרות המקצועית עלות של בולם אחד נעה בטווח של \$ 500-10,000 כאשר תוספת עלות של בולמי הזעזועים למבנה מבודד נעה בתחום 0.5-3.0 % ויכולה להגיע במקרים מסוימים ל- 5 % מעלויות הבניה.

10.2.3 תוספת עלות שלד עקב עבודת קונסטרוקציה הנדרשת להתקנת בולמי זעזועים

תוספת עלות התקנה תלויה בסכמה קונסטרוקטיבית של מבנה, סוגי יסודות המשפיעים על תנאי התקנת בולמי הזעזועים. במקרים כאשר אין צורך בשינויים קונסטרוקטיביים משמעותיים בקומת הקרקע, תוספת עלות תהיה נמוכה יחסית, אבל במקרים אחרים, למשל במקרה שיש להוסיף רכיבים קונסטרוקטיביים בקומת הקרקע, תוספת העלות יכולה להגיע ל- 5 % מעלויות הבניה.

10.2.4 תוספת עלות עקב שינויים ארכיטקטוניים, מערכות מבנה ואלמנטים לא קונסטרוקטיביים

תוספת עלות נגזרת מצורך לספק תזוזה "חופשית" מתוכננת של המבנה בעת רעידת אדמה, אשר דורשת פתרונות ארכיטקטוניים לכניסות, פירי מעליות, חדרי מדרגות, חיבורים גמישים לצינורות ומערכות בניין נוספות. לפי ניסיון קיים בחו"ל תוספת עלות לפתרונות אלה תהיה כ- 1-3 % ובמקרים מסוימים יכולה להגיע ל 5 % מעלויות הבניה.

10.2.5 חיסכון עבור רכיבים קונסטרוקטיביים עקב שימוש בבידוד רעידות סיסמי

התקנת מבנים על בולמי זעזועים מאפשרת לחסוך בעלות רכיבים קונסטרוקטיביים, אשר אינם נדרשים לשאת כוחות דינאמיים גדולים הנוצרים במבנה, ואינו נדרש פתרון קונסטרוקטיבי המספק משיכות ומקדם הקטנת הכוחות המתוכננים. כמו כן, שימוש בבידוד מרעידות סיסמי מאפשר לחסוך עולת של אמצעים אחרים (קירות הקשחה, זיון, רכיבי עיגון, אמצעי ריסון ועוד) אשר מספקים עמידות סיסמית למבנה לא מבודד. חיסכון זה נערך בספרות מקצועית ב כ- 0-5 % מעלויות הבניה. החיסכון הגדול מיושם במבנים שעוברים תהליך שיקום, כי קונסטרוקציה של מבנים אלה בדרך כלל לא מאפשרת משיכות והפחתת כוחות דינאמיים עקב דפורמציות פלסטיות.

10.2.6 חיסכון עקב מזעור עלות הנזק הנגרם למבנה עקב רעידת אדמה

כאמור בולמי זעזועים מתוכננים למניעת נזק למבנה שעלותו בדרך כלל גבוה מאוד. לפי ניסיון בין לאומי רב של תיקון מבנים לאחר רעידות אדמה, שימוש בבידוד סיסמי מאפשר למנוע נזק אשר מוערך ב כ- 25-50% מעלות המבנה.

בהתאם לאמור לעיל ניתן לסכם את נתונים כדלקמן:

* **התוספת הכוללת עבור עלות הקמה של מבנה מבודד** בהשוואה למבנה לא מבודד נעה בתחום בין 3.5%- ועד 12%+, כך שיכול להיות גם חיסכון מסוים וגם התייקרות בשלב הבנייה.

* **חיסכון לשיקום/תיקון נזקים במבנה לאחר רעידת אדמה** יהיה בתחום 25-50%

* הערכה אינה מתייחסת למצב קריסה של מבנה שעלות הקמתו מחדש והוצאות נלוות כגון: אובדן נפש ורכוש, הוצאות ביטוח, פינוי פסולת וכ"ד כמובן גבוהה יותר.

* הגבלת החיסכון נובעת מהערכה של אי כדאיות תיקון מבנים שניזוקו יותר מ 50% מעלות בנייתם.

10.2.7 היבטים כלכליים אחרים

בשל העדר מידע מקומי אמין, הדו"ח אינו דן בהיבטים כלכליים הקשורים לביטוח מבנים אשר מהווה מרכיב משמעותי בהערכת כדאיות כלכלית, אך ברור למדי שהנושא רק יגדיל כדאיות שימוש בבידוד רעידות סיסמי, דוגמת יפן שבה מבנים מבודדים סיסמית זוכים להנחה כ-30% בפרמיות ביטוח.

העלויות ניזקי רעידת אדמה עלו מאז תחילת המאה ה-21. סטנדרטים סוציו אקונומיים, רמת חיים גבוהה יותר וכתוצאה מכך גם הפסדים במונחים כספיים הם גבוהים יותר (ברמת פגיעה נתונה) למדינות מפותחות מבחינה כלכלית. בחינה הראשונית של הנזקים שנגרמו על ידי רעידת האדמה בהאיטי מבוססת על נתונים כלכליים ודמוגרפיים (August 2010 Economic Journal) מוערכת כ- 8.1 מיליארד דולר עם תמ"ג 1,300 דולר לנפש, לעומת 32,000 דולר תמ"ג לנפש בישראל 2012, כתוצאה מכך פגיעה דומה בישראל תעלה במונחים כספיים הרבה יותר. ניסיון בין לאומי מרעידות האדמה האחרונות מראה שאפילו בתנועת קרקע מתונה מבנים קונבנציונליים הבנויים בהתאם לתקינה, עלולים להינזק ולגרום להפסדים כלכליים וחברתיים גדולים.

במדינות מפותחות קיימת מודעות רבה לנושא מבנים מבודדים סיסמית, ליעילותם ולתרומתם לא רק מבחינת בטיחות החיים, אלא גם מבחינה כלכלית וחברתית.

שימוש נכון בבידוד סיסמי מעניק חיסכון בעלויות של אלמנטים מבניים, חיסכון בהחלפת תכולה לאחר האירוע, מצמצם עלויות תיקון אשר מזעריות או כלל אין קיימות במבנים מבודדים סיסמית ומעניק יתרון בתפקוד מידי של מבנים ועסקים שתרומתם ופעילותם רציפה חשובה למשק במיוחד בעת ולאחר אירוע רעידת אדמה.

ביבליוגרפיה

1. Constantinou M. others. Lred-based analysis and design procedure for bridge bearing and seismic isolators. University at Buffalo. September 2010.
2. Eurocode 8. Seismic design of buildings
3. FEMA 274. Ch 09. Seismic Isolation and Energy Dissipation
4. FEMA 389. 2004 RISK MANAGEMENT SERIES
5. FEMA 750. 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. Ch 17. Seismic design requirements for seismically isolated structures.
6. FEMA Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.
7. Fenves G. Modeling and characterization of Seismic Isolation Bearings. U.S. Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, 1998
8. Kelly T. Base Isolation of Structures Design Guidelines. Holmes Consulting group Lt., 2001.
9. Kelly T. In Structure Damping and Energy Dissipation. Design Guidelines. Holmes Consulting group Lt., 2001.
10. Kelly T. Based Evaluation of Buildings Analysis. Nonlinear Pushover. Design Guidelines. Holmes Consulting group Lt., 2001.
11. Mayes R., Naeim F. Chapter 14. Design of structures with seismic isolation, 2003.
12. Maurer Seismic Isolation Systems. Products and Technical information, 2003.
13. Naeim F., Kelly G. Design of Seismic Isolated Structures. John Wily \$ Sons, 1999.
- 14 Naeim F., Martin J. Advanced Technology in Housing Construction.
15. Priestley M. Displacement-Based Seismic Design of Structures. Ch. 9. Structures with isolation and added damping, 2008.
16. Seismic Isolation and Energy Dissipating Devices. HITEC, 1999.
17. Takewaki I. Preliminary report of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). 2011 12(5):327-334
18. Wang Yeng-Po. Fundamentals of Seismic Base Isolation.
19. הכנת בסיס מידע על הבנייה הקיימת בישראל שלב א' – בנייני מגורים
ד. ינקלבסקי. שוורץ א. ליבוביץ י. אופיר