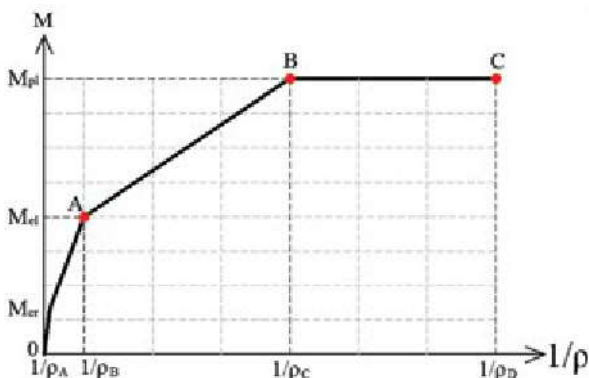


תכן משיכות מבנים לעמידות בפני רעידת אדמה

פרופ' יעקב איסחקוב, מהנדס שרון יהודה, פרופ' יורי ריבקוב
המחלקה להנדסה אזרחית, אוניברסיטת אריאל בשומרון

אלסטו-פלסטי בעומס מחזורי מתחלף בלא קבלת שבר פריך ברמת משיכות בינונית, והתפתחות מספר מערכות יציבות הכוללות מפרקים פלסטיים עם יכולת גבוהה לספוג אנרגיה ברמת משיכות גבוהה בזמן רעידת אדמה.



איור 1 - יחס מומנט-עקמומיות, קואורדינטה $A(M_{el}, \epsilon_{pl,el}/\epsilon_{el})$ מתאימה לרמת משיכות נמוכה, רמת $B(M_{pl}, \epsilon_{pl,pl}/\epsilon_{pl})$ רמת משיכות בינונית, רמת $C(M_{pl}, \epsilon_{pl,pl}/\epsilon_{pl})$ משיכות גבוהה [1]

גישות לתכן משיכות מבנים

באופן כללי קיימות מספר גישות לתכן של משיכות מבנים. גישה אחת היא לבחור את מקדם משיכות המבנה בהתאם לסוג המערכת הסטרוקטוראלית שמתכננים למבנה ולסוג החומר של המבנה, לתכנן את המבנה ופרטי המבנה, ולהעריך את העיבורים הציריים ואת העקמומיות של חתכי רכיבי המבנה על-ידי חישוב מתאים, כדי להבטיח ברמה נאותה ולבחון את הפרמטרים המחושבים לפי קיבולת חתכי הרכיבים על מנת לאשר כי התכנון מתאים לדרגת מקדם המשיכות שנבחרה ושמקדם המשיכות נבחר בצורה נכונה למבנה המתוכנן. במקרה בו נמצאה משיכות קטנה יותר מהמשיכות שנקבעה, חוזרים על האנליזה הסיסמית עם מקדם משיכות מתאים. גישה אחרת המתאימה למקרים מסוימים היא להשתמש בשיטות פשוטות להערכת האזורים המקומיים הקריטיים והרגישים במבנה בהם עלולים להיווצר פרקים פלסטיים, ולאחר שבוחרים באופן ראשוני את מקדם המשיכות המתאים למבנה, מחשבים ומתכננים את המבנה לכוחות סיסמיים (תכנון מפורט), מחשבים את ספיגת האנרגיה של המבנה בהתאם לתכנון המפורט ואת מקדם משיכות המבנה, ובמקרה בו נמצאה משיכות קטנה יותר מהמשיכות שנקבעה, מתכננים את הרכיבים הקריטיים באופן שיתאימו למשיכות שנקבעה וחוזרים על האנליזה הסיסמית במקרים שבהם מחליטים על שינויי גיאומטרי של רכיבים קריטיים. גישה נוספת היא לשער

הגדרה פורמאלית של משיכות מבנה היא יכולת המבנה, או רכיב במבנה, לספוג אנרגיה על-ידי התפתחות של עיבורים פלסטיים לפני הופעת הרס. מקדם משיכות המבנה הוא פונקציה של קונפיגורציה מבנית ושל גבולות העיבורים היכולים להתקבל בחתך רכיב מבנה ובחומר המבנה, כאשר תפקידו לאפשר למבנה להגיע למצב של נזק אנאלסטי (פלסטי ואלסטו-פלסטי) עם אזורים של פרקים פלסטיים, תוך עמידה בגבולות דפורמציות מתאימות, ומניעת היווצרות של פרקים פלסטיים מחוץ למקומות המיועדים לכך. המקור המועדף למקדם משיכות מבנים במערכת סטרוקטוראלית מוגדרת המתנגדת לרעידת אדמה הוא המצב הגבולי הרלוונטי של חומר המבנה, אשר נקבע באופן ספציפי בהתאמה לתכן לעמידות מבנים בפני רעידת אדמה (לדוגמה ת"י 413 דרישה לעיבור לחיצה מקסימאלי בשפת קיר 3.5% מבטון מזוין והגדלת עובי הקיר כאשר העיבור גדול מ- 1.5% ברמת משיכות גבוהה [2]).

הבחירה של מקדם משיכות המבנה בשלב תכן מוקדם בהתאמה לסוג המערכת הסטרוקטוראלית ולחומר המבנה, נושאת עימה דרישות לתכן המבנה ודרישות לתכנון מפורט של חלקי המערכת הסטרוקטוראלית על מנת להבטיח רמה צפויה של נזק אנאלסטי היכולה להתקיים במבנה ולהישמר באופן מהימן [9].

מקדם משיכות של חומר אלסטי ופלסטי בהתאמה. אידיאלי הוא היחס בין העיבור המקסימלי לבין העיבור האלסטי המקסימלי לפי הביטוי הבא [7]:

$$\mu = \epsilon_{pl}/\epsilon_{el} = (\epsilon_{pl,pl} + \epsilon_{pl,el})/\epsilon_{el} = 1 + \epsilon_{pl,el}/\epsilon_{el}$$

כאשר $\epsilon_{pl,pl}$ ו- $\epsilon_{pl,el}$ הם עיבור אלסטו-פלסטי בהתאמה. מאחר וספיגת האנרגיה הפלסטית של חתך קשורה בהיסטוריית העמיסה והדפורמציות, ביטוי מקובל יותר למקדם משיכות החתך יהיה [1]:

$$\mu = 1 + E_{pl}/E_{el} = 1 + 2\epsilon_{pl,el}/\epsilon_{el}$$

כאשר E_{pl} ו- E_{el} ספיגת אנרגיה אלסטית ופלסטית בהתאמה.

דרגות משיכות: הכוח הסיסמי הפועל על המבנה מופחת ככל שדרגת המשיכות גבוהה יותר [2], בו-זמנית גדלה המורכבות של תכנון פרטי המערכת ומורכבות החישובים להערכה נאותה של משיכות המבנה. במבנים סדירים ברמת משיכות נמוכה, הדפורמציה האנאלסטית דורשת באופן כללי שימוש בכללים ובמפרטי תכנון סטנדרטיים, כדי לספק את הדרישות לקבלת העיבורים הנדרשים של החומר בזמן רעידת אדמה. במבנים ברמות המשיכות העליונות - בינונית וגבוהה (ובמבנים שאינם סדירים ברמת משיכות נמוכה), קיימות דרישות תכן מיוחדות כדי שהמערכת הסטרוקטוראלית תוכל לתפקד בתחום תגובה

תחת דפורמציות מחזוריות, והשפעות מאמצים גרביטציוניים על ספיגת האנרגיה בחתך בטון מזוין תחת עומס מחזורי. באופן כללי משיכות של חתך מבטון מזוין עם זיון רגיל URS מחושבת בהתאם לביטוי הבא:

$$\begin{aligned} \mu_{URS} &= U_{Mpl} / U_{el, ul} + 1 \\ &\text{כאשר ספיגת האנרגיה הפלסטית בחתך תהיה:} \\ U_{Mpl} &= U_{M1} + U_{M2} + U_{M3} = \\ &= M_{cr} [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + M_{cr, ul} [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] + \\ &\quad + M_{pl} [(1/\rho)_B - (1/\rho)_C] \end{aligned}$$

וספיגת האנרגיה האלסטית בחתך תהיה:

$$\begin{aligned} U_{Mpl} &= 0.5 \{ M_{cr} (1/\rho)_A + \\ &\quad + (M_{cr, ul} - M_{cr}) [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + (M_{pl} - M_{cr, ul}) [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] \} \end{aligned}$$

מקדם המשיכות במקרה בו קיים עיבור מתיחה פלסטי של מוטות הזיון ועיבור לחיצה של הבטון הלחוף יהיה:

$$\begin{aligned} \mu_{URS} &= 1 + 2 \{ M_{cr} [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + M_{cr, ul} [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] + \\ &\quad + M_{pl} [(1/\rho)_B - (1/\rho)_C] \} / \{ M_{cr} (1/\rho)_A + \\ &\quad + (M_{cr, ul} - M_{cr}) [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + (M_{pl} - M_{cr, ul}) [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] \} \end{aligned}$$

ובמקרה בו החתך מתוכנן עם זיון יתר (ORS), היחס מומנט-עקמומיות לא יכלול את החלק הפלסטי האידיאלי, ומקדם המשיכות במקרה של ORS יהיה:

$$\begin{aligned} \mu_{ORS} &= 1 + 2 \{ M_{cr} [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + M_{cr, ul} [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] \} / \{ M_{cr} (1/\rho)_A + \\ &\quad + (M_{cr, ul} - M_{cr}) [(1/\rho)_B - (1/\rho)_A] + \\ &\quad + (M_{pl} - M_{cr, ul}) [(1/\rho)_C - (1/\rho)_B] \} \end{aligned}$$

בעיית זיון סימטרי בחתך

ספיגת האנרגיה הפלסטית בחתך PED ומקדם המשיכות יהיו קטנים באופן ניכר במצב בו $\omega > 0.4$ בהשוואה למצב בו $\omega \leq 0.4$ [8]. בעמודים מבטון מזוין באזורים סיסמיים יש זיון סימטרי אשר מוביל למקרה של זיון יתר ORS. המשמעות היא שזה הגורם העיקרי לכשל של אלמנט לחוף ברעידת אדמה חזקה, למרות זאת הכרחי לתכנן זיון סימטרי בחתכים בשל התכונה המחזורית של כוחות רעידות אדמה.

$$\text{For } \omega \leq 0.4 \quad \varepsilon'_s = \varepsilon_s = 0.002, \quad \varepsilon_{s, max} \geq 0.002, \\ \sigma_s = \sigma'_s = f_s, \quad \sigma_c = f_c$$

לכן החתך הוא בעל זיון רגיל URS ומקדם המשיכות יהיה:

$$\mu_{URS} = \mu_{el}$$

$$\text{For } \omega > 0.4 \quad \varepsilon'_s = \varepsilon_s = 0.002, \quad \sigma'_s < f_s, \\ \sigma_s = f_{cr}, \quad \varepsilon_s < 0.002, \quad \sigma_c < f_c$$

ולכן החתך הוא בעל זיון יתר ORS ומקדם המשיכות יהיה:

$$\mu_{URS} = \mu_{ORS}$$

את המכניזמים הפלסטיים שיתפתחו במבנה על-ידי תכנון וניתוח של סכמות סטטיות אלטרנטיביות היכולות להתפתח במבנה, לאתר את האלמנטים הקריטיים שיגיעו למצב פלסטי בהתאם לחומר ולפרטי התכנון לפי חישוב העיבורים הפלסטיים וחישוב ספיגת האנרגיה הפלסטית, ולקבוע את מקדם משיכות המבנה כולו, בהתבסס על חשיבות האלמנט הקריטי ביחס למבנה כולו.

חלק או כל האלמנטים במערכת הסטרוקטוראלית הראשית הנושאת עומסים אנכיים וכוחות סיסמיים או אלמנטים אחרים, נדרשים לקבל דפורמציות אחידות עם המערכת הראשית, בה צריכים להתקבל דפורמציות פלסטיות הכוללות עיבורי לחיצה צירית, עקמומיות ועיבורי גזירה ופיתול.

בדרך כלל יהיה אלמנט אחד או יותר במערכת הסטרוקטוראלית אשר מגבילים את מקדם משיכות המבנה בגלל המוגבלות יכולתם לקבלת דפורמציות פלסטיות. הגורם הקריטי הוא לדעת איזה אלמנטים מבניים ייכנעו קודם (בעלי מקדם משיכות הקטן ביותר) על-ידי דפורמציה פלסטית, במצב גבולי אולטימטיבי. לפיכך, לאלמנטים אלו בעלי פוטנציאל גדול יותר לקבלת פרק פלסטי, שנכנעו ראשונים, תהיה דרישה למשיכות מקומית גבוהה יותר ביחס לאלמנטים סטרוקטוראליים אחרים. אלמנטים בעלי פוטנציאל גדול יותר לקבלת פרק פלסטי אשר יגבילו את המשיכות של חלקי מבנה, או של המבנה בכללותו, יכולים להיות עמודים או קירות הקצרים ביותר במבנה במקרה של גיאומטריה זהה, קורות קצרות או קורות עם מרחקים קצרים יחסית בין אזורי הפרקים הפלסטיים הפוטנציאליים. במקרה של שורות של עמודים או קירות עם גובה קבוע יהיה זה העמוד או הקיר בעל העובי הגדול יותר, ובמקרה של קורות עם מפתחים קבועים, זו תהיה הקורה העבה יותר בה תידרש משיכות גדולה יותר.

מערכת משולבת

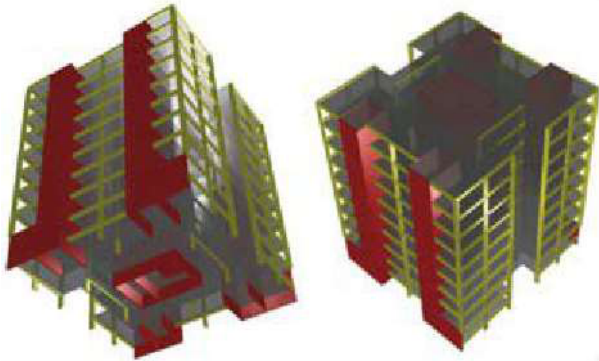
בכל בניין בו מתכננים שילוב של מערכות סטרוקטוראליות שונות, או מערכת הכוללת בתוכה מספר תתי מערכות מבנים, אנליזה רציונאלית תיקח בחשבון את הקשיחות היחסית של כל מערכת סטרוקטוראלית ומיקומם במערכת הסטרוקטוראלית הכללית, באופן שבו מתחשבים בעמידות הסיסמית של כל תת מערכת ושל כל רכיב בכל תת מערכת במצב גבולי אולטימטיבי [9].

באנליזה זו תינתן תשומת לב לקיבולת ספיגת האנרגיה הפלסטית השונה של כל רכיב מבני ושל כל מערכת סטרוקטוראלית בנפרד. משיכות המערכת תוגבל על-ידי האלמנטים הקריטיים שייכנעו קודם במבנה, אלמנטים בעלי הפוטנציאל הגדול יותר לקבלת פרק פלסטי, כאשר יש לשים לב כי אלמנטים בעלי פוטנציאל קטן יותר לקבלת פרק פלסטי, שייכנעו בשלב מתקדם יותר יהיו נתונים לכוחות סיסמיים גדולים יותר מהמתוכננים. כמו כן, מקדם משיכות המבנה עשוי להיות שונה בכיוונים שונים של פעולת רעידת אדמה.

חישוב ספיגת אנרגיה בחתכים מבטון מזוין

חישוב ספיגת האנרגיה של חתכי המבנה בוצע בהתחשבות המצבים הבאים [8]: הגדלת דפורמציות באופן מונוטוני, בעיית זיון יתר בחתך, בעיית זיון סימטרי בחתך, בטון מזוין לחוף

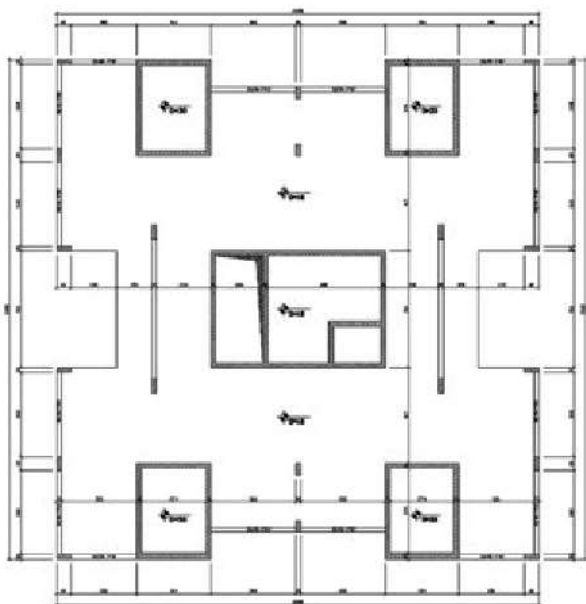
מבטון מזוין בעובי 16 ס"מ (ציור 4) שהוגדרו כדיאפרגמות אופקיות קשיחות במישורן.



ציור 3 - בניין טיפוסי בן 8 קומות טיפוסיות ע"ג קומת קרקע וקומת מסד הכולל גרעין הקשחה מרכזי, 4 ממ"דים ומסגרת קורות ועמודים

תהליך ביצוע האנליזה

תהליך ביצוע אנליזת המבנה כולל את השלבים הבאים: האנליזה הראשונית שבוצעה היא אנליזה אלסטית ליניארית מרחבית (D3) תחת עומסים אנכיים. לאחר בדיקת תוצאות האנליזה של המבנה תחת עומסים אנכיים, בוצעה אנליזה מודאלית מלאה בהתאם לכל הדרישות המקובלות בפרקטיקה ההנדסית לצורך חישוב וניתוח הכוחות הסיסמיים הפועלים בכל רכיבי המבנה, בהתאם לת"י 413. האנליזות הראשוניות של המבנה תחת עומסים אנכיים בלבד והאנליזות המודאליות בוצעו באמצעות שני תכנות ייעודיות מסחריות: תכנת STRAP ותכנת ETABS, זאת על מנת לבדוק ולוודא את נכונות תוצאות האנליזות שבוצעו. כמו כן נערכה השוואה בין תוצאות האנליזות. באנליזה ההשוואתית נמצאו הבדלים בחישוב זמני מחזור התנודות הקטנים מ-3%. הבדלים אלו נובעים ככל הנראה משימוש באלגוריתמים שונים לחישוב הערכים והווקטורים העצמיים של המבנה. לאחר השלמת האנליזות המודאליות בוצע תכן מלא של כל האלמנטים הסטרוקטורליים במבנה (עמודים, קירות וקורות)



ציור 4 - תכנית קומה טיפוסית [4]

בטון מזוין לחוץ תחת דפורמציות מחזוריות

התנהגות דינאמית של חתך אלמנט מבטון מזוין RC תחת לחיצה (בטון תחת לחיצה ומוטות זיון במתיחה או לחיצה), מתחלקת לשני מצבים: מצב יש זיון רגיל URS ומצב בו יש זיון סימטרי SRS בחתך הבטון (ציור 2). ספיגת האנרגיה פלסטית היסטרטית תהיה:

$$HPED = k_h \cdot PED$$

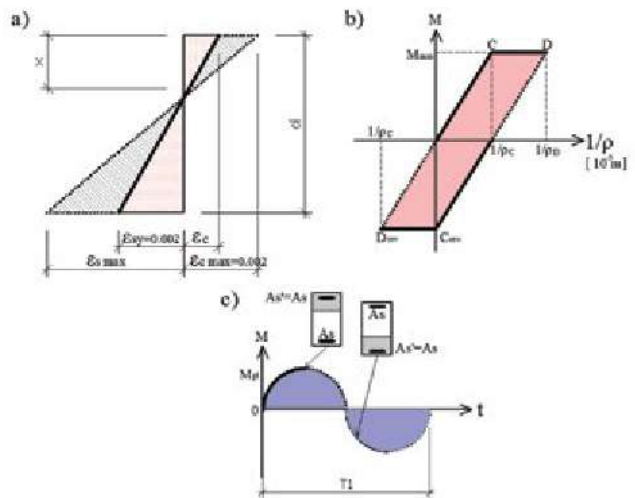
המקדם ההיסטירטי k_h במקרה של זיון רגיל URS משתנה מ-2/3 (בשני מחזורים, $n=2$) ל-1/2 (עבור $n=3$) ובממוצע 7/12, אז $HPED = 0.6 \cdot PED$.

במקרה זה מקדם המשיכות יהיה:

$$\mu_{HURS} = 1 + k_h \cdot U_{Mpl} / U_d$$

במצב בו יש זיון סימטרי SRS ספיגת האנרגיה הפלסטית PED בלולאות היסטרטציה של הפלדה הלחוצה והמתוחה לא תהיה שונה מהעמסה מונוטונית (ציור b,c), כלומר $k_h = 1$ ומקדם המשיכות יהיה:

$$\mu_{SRS} = \mu_{SRS} = 1 + \frac{1/\rho_d - 1/\rho_c}{0.5 \cdot 1/\rho_c}$$

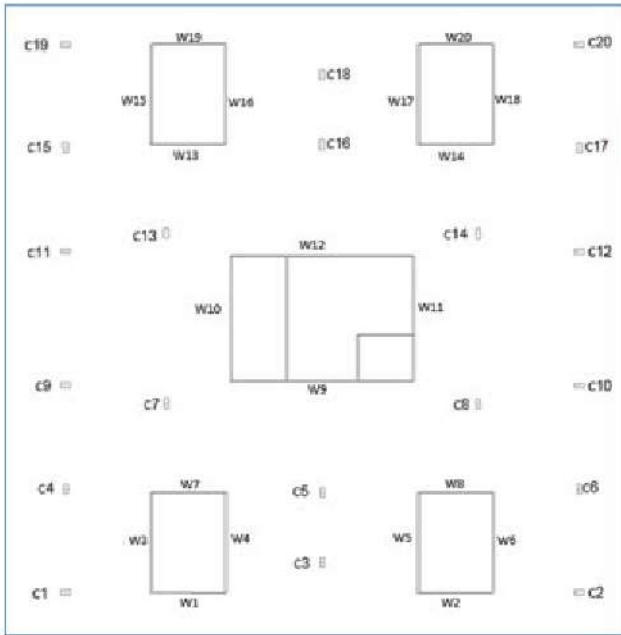


ציור 2 - דפורמציה מחזורית של חתך בטון מזוין RC עם זיון סימטרי: (a) יחס $\epsilon_c - \epsilon_s$, (b) יחס $M - 1/\rho$, (c) יחס $M - \theta$

דוגמה יישומית

לצורך יישום האנליזה המוצעת לחישוב מקדם המשיכות של הרכיבים הסטרוקטורליים (עמודים, קירות וקורות) המרכיבים מבנה מבטון מזוין, נבחר כדוגמה פרקטית מבנה רב-קומות טיפוסי מתוך מדריך לתכן מבנים לרעידות אדמה [3],[4] בן 9 קומות (קומת קרקע +8 קומות מגורים טיפוסיות) וקומת מסד נמוכה, שתוכנן באזור סיסמי חזק יחסית בארץ - בעיר טבריה. בכל קומה 4 דירות, שבכל אחת מהן מרחב מוגן דירתי (ציור 3).

רכיבי ההקשחה הראשיים של הבניין הם גרעין הקשחה מרכזי הכולל את פיר המעליות והמדרגות עם קירות מבטון מזוין בעובי 20 ס"מ, וארבעה ממ"דים עם קירות פנימיים בעובי 20 ס"מ וחיצוניים בעובי 25 ס"מ, שהוגדרו באנליזה כחתכי ארגז סגורים. בנוסף קיימת במבנה מערכת הקשחה משנית מסוג מסגרת המורכבת מעמודים בגודל 20/60 ס"מ וקורות 20/50 ס"מ. תקרות המבנה הן תקרות מקשיות שטוחות



ציור 6 – מספרי קירות עמודים בקומה טיפוסית

מקדם המשיכות של העמודים (20 – c1 ציור 6), חושב בשני מצבים של קביעת זיון מינימלי: במצב הראשון הזיון המינימלי של העמודים נקבע לפי ת"י 413 ות"י 466 (טבלה 1) ובמצב השני הזיון המינימלי נקבע לפי ת"י 466 בלבד. בתוצאות החישוב ניתן לראות כי ערך מקדם המשיכות המינימלי התקבל כ-3.52 ו-3.15 בהתאמה לשני המצבים, וערך מקסימלי כ-9.31 ו-14.06 בהתאמה.

Column Ductility Factor – IS 413																				
Floor	Column Numbers																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	---	---	3.52	3.52	4.25	3.52	4.03	3.52	3.52	3.52	3.52	3.75	3.66	3.52	3.52	4.54	3.52	3.88	---	---
1	---	---	3.54	3.61	4.32	3.62	3.29	3.10	3.23	3.22	3.02	3.02	3.28	3.78	3.61	4.27	3.62	4.04	---	---
2	3.88	3.68	3.81	3.53	3.22	3.53	4.35	4.37	3.8	3.90	3.60	3.83	4.46	4.34	3.53	5.34	3.53	4.34	3.87	4.81
3	4.03	4.06	3.72	3.53	3.57	3.58	3.86	3.88	3.68	3.70	3.70	4.06	4.8	3.86	3.58	5.58	3.58	4.32	4.02	5.71
4	4.28	4.23	3.9	3.62	3.52	3.88	3.84	3.73	3.84	3.83	3.87	3.81	3.54	3.52	3.62	3.32	3.61	4.32	4.23	6.24
5	4.36	4.23	4.87	3.79	3.62	3.78	3.23	3.26	4.06	4.08	4.07	3.41	3.24	3.27	3.79	3.68	3.78	4.79	4.58	6.89
6	3.32	3.34	3.44	4.66	3.32	4.08	4.54	4.12	4.23	3.78	3.59	3.58	4.58	4.12	4.22	4.34	4.28	4.39	4.85	7.84
7	3.56	3.66	4.26	4.13	4.38	4.54	4.12	4.23	3.78	3.59	3.58	4.58	4.12	4.22	4.34	4.28	4.39	4.85	4.85	8.02
8	3.84	3.36	3.82	4.38	4.34	4.62	4.66	4.69	4.51	4.72	4.53	3.51	4.86	4.88	4.99	4.82	4.82	5.82	5.82	8.73
9	3.87	3.87	4.09	4.77	4.82	4.77	3.84	4.81	4.48	4.53	4.48	3.82	3.84	4.86	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	8.89

$\mu_{min} = 3.52$ $\mu_{max} = 9.31$

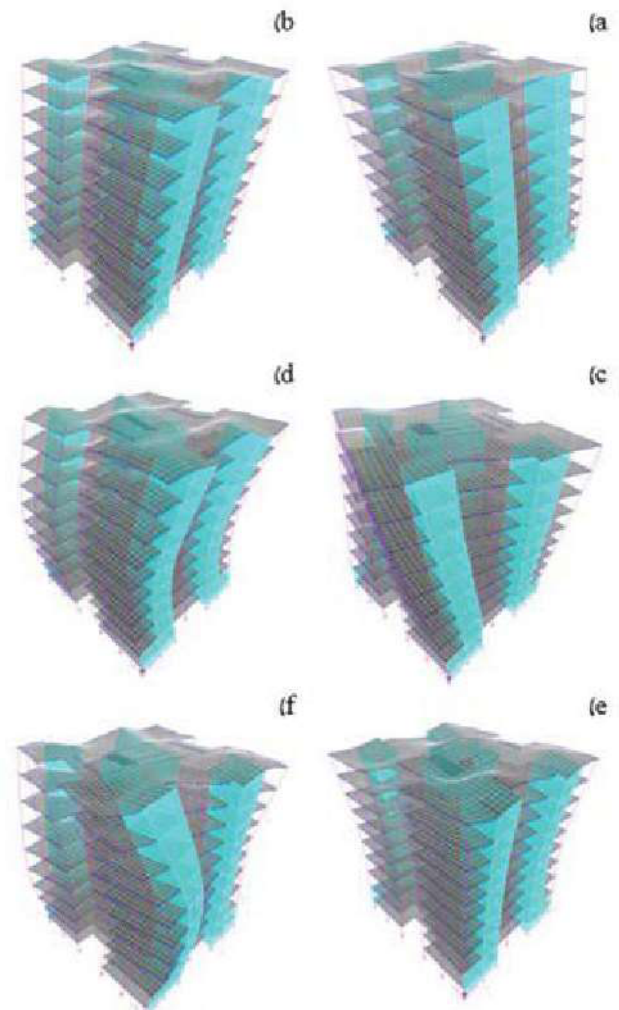
טבלה 1 – תוצאות חישוב מקדם המשיכות של העמודים

מקדם המשיכות של הקירות (w1-20 ציור 6), חושב גם לפי שני מצבים שהוצגו קודם. בתוצאות החישוב ניתן לראות כי ערך מקדם המשיכות המינימלי התקבל כ-3.99 ו-4.52 בהתאמה לשני המצבים, וערך מקסימלי כ-17.67 ו-15.85 בהתאמה.

גם מקדם המשיכות של הקורות חושב בשני המצבים שהוצגו קודם. בתוצאות החישוב ניתן לראות כי ערך מקדם המשיכות המינימלי התקבל כ-6.86 ו-10.2 בהתאמה לשני המצבים, וערך מקסימלי כ-6.86 ו-15.42 בהתאמה.

לפי הדרישות בתקן ישראלי ת"י 413 ולפי ת"י 466, ובנוסף חושב מקדם קיבולת ייתר (capacity factor) של כל הרכיבים. לאחר תכנון כל האלמנטים וקביעת כמויות הזיון וסידור מוטות הזיון בהתאם למגבלות והדרישות לגבי כל הרכיבים במבנה (עמודים, קירות וקורות) הנתונות בת"י 413 ות"י 466, חושבה ספיגת האנרגיה הפלסטית והאנרגיה הכוללת של כל רכיבי המבנה בנפרד.

עם ניתוח התוצאות המודאליות שהתקבלו בשתי תוכנות החישוב, ניתן חהבחין בגתובת פיתול המתאימה למבנים סדירים – ציור 5 (מקדמי השתתפות צורות תנודה קטנים מ-5% כאשר מגדירים תוספת אקסצנטריות אקראית). צורת התנודה של פיתוח המבנה התקבלה בתנודה השלישית והשישית לפיתול מסדר ראשון וסדר שני עם מקדמי השתתפות (η) של צורות התנודה בחישוב התגובה הכוללת של המבנה בתחום שבין 2.1% ל-3.8% בהתאמה לצורות התנודה ולכיווני החישוב X ו-Y. צורת התנודה הראשונה והרביעית התקבלו בכיוון Y בכפיפה מסדר ראשון וסדר שני עם מקדמי השתתפות של 64.7%, 64.9% ו-16.4%, 17.3% בהתאמה. צורת התנודה השנייה והחמישית התקבלו בכיוון x בכפיפה מסדר ראשון וסדר שני עם מקדמי השתתפות של 62.8%, 62.7% ו-4.7%, 2.0% בהתאמה.



ציור 5 – צורות תנודה של המבנה: a תנודה ראשונה, b תנודה שנייה, c תנודה שלישית, d תנודה רביעית, e תנודה חמישית, f תנודה שישית

שהגדיר את משיכות הקומה. סדר התפתחות הפרקים הפלסטיים בכל קומה במבנה דורג מהמשיכות הנמוכה ביותר לגבוהה ביותר בסדר עולה כפי שניתן לראות בטבלה 5. מאחר והמבנה שנבחר הוא מבנה בעל גיאומטריה סימטרית ביחס לצירים ניצבים וכל רכיב מבנה (עמוד, קיר וקורה) מזוהה ב-4 טיפוסים פרט לגרעין הקשחה מרכזי, דירוג ההתפתחות הפרקים הפלסטיים חולק לקבוצות של 4 רכיבים, כפי שניתן לראות בטבלה 5 ו-6 לקירות ולעמודים בהתאמה.

Floor Wall Hinge Sequence																				
Floor	Wall Numbers																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	9	9	10	1	4	10	—	—	7	8	8	5	—	—	10	2	3	10	9	9
1	9	9	10	1	4	11	—	—	7	5	8	6	—	—	10	2	3	10	9	9
2	4	2	1	11	11	6	10	10	13	9	12	14	10	10	7	11	11	5	3	1
3	4	2	10	9	12	6	13	13	15	14	17	16	13	13	1	7	11	5	3	1
4	4	3	16	10	15	12	6	5	17	18	19	20	8	7	14	9	13	11	2	1
5	4	3	14	12	14	11	7	8	6	16	15	3	9	9	14	12	13	10	2	1
6	5	5	6	6	6	6	5	4	4	1	7	1	2	4	4	6	6	6	5	5
7	7	7	1	1	1	1	5	5	2	4	1	3	6	6	1	8	1	1	1	5
8	5	5	6	6	6	6	4	4	2	7	1	3	4	4	6	6	6	6	5	5
9	5	5	6	6	6	6	4	4	2	7	1	3	4	4	6	6	6	6	5	5

מפרקים 9-12 (צהוב)
מפרקים 5-8 (כתום)
מפרקים 1-4 (אדום)

טבלה 5 – סדר התפתחות הפרקים הפלסטיים בקירות הקשחה בכל קומה במבנה

Floor Column Hinge Sequence																				
Floor	Column Numbers																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0				1	3	6	3	10	8	2	2	2	4	10	9	3	7	3	5	
1				1	3	7	4	11	9	2	2	2	5	11	10	3	8	4	4	
2	8	6	3	1	4	1	14	11	2	2	2	9	13	10	1	5	1	12	7	15
3	12	10	1	1	2	1	9	5	6	7	7	13	9	4	1	3	1	13	11	14
4	11	9	1	5	1	4	3	2	6	7	7	13	3	1	5	1	4	12	10	14
5	15	12	16	7	5	6	1	3	8	10	9	11	2	4	7	5	6	14	13	17
6	11	12	10	8	6	7	1	4	9	10	9	16	2	3	8	5	14	10	13	17
7	12	13	15	7	5	6	1	3	11	10	10	16	1	2	8	4	14	9	16	17
8	12	14	16	9	6	10	1	3	7	8	7	17	1	2	11	4	10	5	15	18
9	10	9	13	7	1	7	4	14	5	6	5	2	4	14	8	8	12	1	11	1

מפרקים 9-12 (צהוב)
מפרקים 5-8 (כתום)
מפרקים 1-4 (אדום)

טבלה 6 – סדר התפתחות הפרקים הפלסטיים בעמודים בכל קומה במבנה

סיכום ומסקנות (חלקי)

- היכולת של המערכת המבנית לקיים דפורמציות אנאלסטיות מכומתת בדרך כלל על-ידי מקדם משיכות המבנה μ . עם זאת, מקדם משיכות המבנה μ לבדו לא אמור לייחד דרישות למשיכות לאזורים פלסטיים פוטנציאליים של המבנה. דרישות למשיכות של אזורים פלסטיים פוטנציאליים הם פונקציה של מכניזם פרקים פלסטיים ורמת משיכות המבנה.
- העיבורים של החומר באזור הפלסטי הקריטי צריכים להיות מעורכים על-ידי חישוב מתאים כדי להבטיח ברמה נאותה את קבלת העיבורים הצפויים מהמבנה. משיכות המבנה עשויה להיות שונה בכיוונים שונים של פעולת רעידת אדמה. תכנון קיבולת ספיגת האנרגיה של מבנה

Wall Ductility Factor - IS 413																				
Floor	Wall Numbers																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	14.82	14.82	14.82	4.81	4.82	14.82	—	—	12.71	10.88	14.79	10.78	—	—	14.82	4.81	4.79	14.82	14.82	14.82
1	14.82	14.82	14.82	3.89	4.20	14.82	—	—	14.27	11.82	14.73	13.88	—	—	14.82	4.81	4.81	14.82	14.82	14.82
2	4.47	4.44	4.83	17.04	17.04	4.79	14.79	14.79	17.48	17.83	17.83	17.47	14.79	14.79	4.82	17.04	17.04	4.75	4.47	4.41
3	5.26	5.23	5.97	5.91	6.03	5.84	14.79	14.79	15.98	15.84	17.53	16.83	14.79	14.79	5.92	5.84	5.96	5.79	5.22	5.18
4	6.83	7.34	8.00	7.70	7.95	7.76	7.11	7.08	12.4	12.41	12.8	16.83	7.29	7.18	7.60	7.63	7.80	7.71	6.82	6.71
5	6.18	6.21	11.84	11.84	11.84	11.84	6.88	6.70	8.37	11.84	11.87	7.30	6.88	6.88	11.84	11.84	11.84	11.84	11.84	11.84
6	14.82	14.82	15.84	15.84	15.84	15.84	14.79	14.79	12.8	12.8	14.55	13.87	14.79	14.79	14.79	15.84	15.84	15.84	14.82	14.82
7	14.82	14.82	15.84	15.84	15.84	15.84	14.79	14.79	13.21	13.88	13.87	13.47	14.79	14.79	14.79	15.84	15.84	15.84	14.82	14.82
8	14.82	14.82	15.84	15.84	15.84	15.84	14.79	14.79	13.22	13.88	13.87	13.47	14.79	14.79	14.79	15.84	15.84	15.84	14.82	14.82
9	14.82	14.82	15.84	15.84	15.84	15.84	14.79	14.79	13.22	13.88	13.87	13.47	14.79	14.79	14.79	15.84	15.84	15.84	14.82	14.82

טבלה 2 – תוצאות חישוב מקדם המשיכות של הקירות

מקדם המשיכות של קומות המבנה

מקדם המשיכות הקומתי של המבנה נקבע בהתאם לרכיב בעל המשיכות הנמוכה ביותר בכל קומה במבנה כפי שניתן לראות בטבלה 3 ו-4.

Floor ductility factor	Floor
4.40	9
4.86	8
4.12	7
3.69	6
3.53	5
3.52	4
3.53	3
3.53	2
3.54	1
3.52	0

טבלה 3 – מקדם משיכות קומתי

Floor ductility factor - IS 413				
Floor	Wall	Column	Beam	Min' floor ductility
0	4.61	3.52	6.83	3.52
1	3.99	3.54	6.83	3.54
2	4.41	3.53	6.86	3.53
3	5.18	3.53	6.86	3.53
4	6.51	3.52	6.86	3.52
5	7.00	3.53	6.86	3.53
6	10.80	3.69	6.86	3.69
7	13.17	4.12	6.86	4.12
8	11.30	4.86	6.86	4.86
9	13.17	4.40	6.86	4.40

טבלה 4 – תוצאות חישוב מקדם המשיכות הקומתי

סדר התפתחות הפרקים הפלסטיים

ניתן לראות בתוצאות האנליזות שבוצעו שהפרקים הפלסטיים הראשונים במבנה שנבדק, יתקבלו תחילה בקירות של קומה הראשונה של המבנה (קומת הקרקע), משיכות הקיר בעל ספיגת האנרגיה הפלסטית הנמוכה ביותר נמצא בקומה הראשונה (טבלה 2). לאחר מכן יתקבלו פרקים בקומה השנייה (קומה טיפוסית ראשונה), ורק לאחר זאת יתקבלו פרקים בקומת המסד של המבנה. מכאן בסדר עולה מהקומה השלישית עד לקומה העליונה. הקיר בעל המשיכות הנמוכה ביותר בכל קומה הוא הקיר

6. Influence of Various Reinforced Arrangements and of Gravitation Stresses on Hysteretic Behavior of RC Sections - Iakov Iskhakov, Yuri Ribakov. European Earthquake. Engineering 2005 No' 3.
7. NZS 1170.5 (New Zealand Standard) - Structural design action part 5 - Commen (Supplement to NZS 1170.5). seismic actions and rules for buildings 2002.



פרופסור יעקב איסחקוב

בוגר האוניברסיטה להנדסה אזרחית במוסקבה בשנת 1961. קיבל תואר שלישי באותה האוניברסיטה ב-1966. פרופסור חבר משנת 1972 ופרופסור מן המניין משנת 1990 באוניברסיטה טכנולוגית ברושנבה, (טדג'יקיסטאן). ראש המחלקה למבני בטון מזוין באותה האוניברסיטה מ-1968 עד 1977 ומ-1987-1982. פרסם 9 ספרים ויותר מ-100 מאמרים בירחונים בינלאומיים, פרקים בספרים ובכנסים בינלאומיים. זכה לשלוש מדליות של תערוכת הישגים במשק לאומי בבריה"מ. עלה לארץ ב-1992. הצטרף לסגל המחלקה להנדסה אזרחית באוניברסיטת אריאל בשומרון ב-1995. פרופסור חבר משנת 2007 ופרופסור מן המניין משנת 2013. תחום מחקריו כולל מבני בטון, מבנים מרחביים ועמידות מבנים ברעידות אדמה.



מהנדס שרון יהודה

בעל משרד לתכנון קונסטרוקציות מבנים, הנותן שרותי תכנון, אנליזות מבנים, יעוץ הנדסי, פיקוח עליון, ניהול ופיקוח O.E והתממשקות הנדסה אזרחית להנדסת מכונות. בעל תואר שני M.Sc. בהנדסה מכאנית מאוניברסיטת ת"א משנת 2011, ותואר ראשון בהנדסה אזרחית מאריאל בשנת 2003 בהצטיינות. עבד בתחילת הדרך 7 שנים כשכיר בשני משרדי תכנון שונים בתחום תכן מבנים ממגוון סוגים והתמחה בתכן קונסטרוקציות מבנים מורכבים וגדולים עם אנליזות בתהליכי אופטימיזציה ותכן סיסמי. חבר מן המניין בוועדת מומחים הנדסית במסגרת ועדת ההיגוי להיערכות מדינת ישראל לרעידת אדמה, ראש מגמה להנדסה אזרחית בקריה ללימודי הנדסה באפקה ת"א, ומרצה מן החוץ באוניברסיטת אריאל. משרת כאיש מילואים במערך ההדרכה של בה"ד 16 בפקע"ר ומדריך בקורסי מהנדסי מיגון וחילוף.



פרופסור יורי ריבאקוב

בוגר האוניברסיטה למשק מים והגנת הסביבה ברובנו, אוקראינה, במגמה לתכן מבנים בשנת 1991, בהצטיינות יתירה. סיים מסלול ישיר לדוקטורט בטכניון בשנת 2001. משנת 2000 חבר סגל בכיר במחלקה להנדסה אזרחית באוניברסיטת אריאל בשומרון. פרופסור חבר משנת 2009, פרופסור מן המניין משנת 2014. ראש המחלקה להנדסה אזרחית משנת 2011 עד 2014. פרסם 5 ספרים מקצועיים ומעבר ל-100 מאמרים בירחונים בינלאומיים, פרקים בספרים וכנסים בינלאומיים. תחום מחקריו כולל בקרת תגובת מבנים לרעידות אדמה על-ידי בידוד סיסמי ומרסנים ומבני בטון.

ניתנת ליישום בהתחשבות בתכונות ומאפיינים של בניינים הכוללים שילוב של מערכות סטרוקטוראליות שונות.

- גורם חשוב אשר משפיע על כושר ספיגת האנרגיה של חתך בטון מזוין RC, כולל התחשבות בזיון יתר, זיון סימטרי, דפורמציה אולטימטיבית של זיון מתיחה, מאמצים גרביטציוניים וכיו"ב, הוא היפוך הכיוון של הכוחות הסיסמיים בכל מחצית שנייה של מחזור, המוביל בהתאמה לשינוי סימן ערכי המאמצים של הזיון. באזורים סיסמיים רבים, האיזור תחת לחיצה בחתך הבטון יהיה בעל זיון יתר והאיזור תחת מתיחה יהיה בעל זיון דל. במקרה זה הזיון תורם מעט מאוד לספיגת האנרגיה, ויכולת ספיגת האנרגיה הפלסטית PED של החתך ומקדם המשיכות יפחתו באופן משמעותי.
- זיון סימטרי בחתך הבטון מזוין מקטין את יכולת ספיגת האנרגיה הפלסטית של רכיבי מבנה, ומהווה את הסיבה העיקרית לכשל של אלמנטים לחוצים ברעידת אדמה חזקה. עם זאת זיון סימטרי בחתכים הכרחי בשל התכונה המחזורית של כוחות רעידות אדמה.
- כמויות ופרטי זיון שחושבו ותוכננו לפי פרוצדורה תקנית בהתאם לרמת המשיכות שנבחרה למבנה, לא מביטחים את קבלת משיכות חתכי המבנה. הבטחת קבלת משיכות חתכי הרכיבים הסטרוקטוראליים במבנה שנבדק, תתקבל רק על-ידי תכנון של משיכות המבנה של כל חתך במבנה.
- הבטחת עמידותו של מבנה בזמן רעידת אדמה תהיה, בין היתר, על-ידי הבטחת משיכות רכיבי המבנה. קיימת חשיבות גבוהה לחישוב מקדם המשיכות של כל חתך במבנה הנתון לכוחות סיסמיים לצורך הבנת המבנה ותכנון במבנה להבטחת עמידותו בזמן רעידת אדמה. ללא חישוב ספיגת האנרגיה הפלסטית של חתכי הרכיבים הסטרוקטוראליים וחישוב מקדם המשיכות של כל חתך במבנה, לא ניתן לחזות מראש את המיקומים בהם יתפתחו פרקים פלסטיים בזמן רעידת אדמה ולא את סדר התפתחות הפרקים.
- ניתן להשפיע על יכולת ספיגת האנרגיה של חתכי בטון על-ידי התערבות ושינוי כמויות הזיון בחתך, כאשר השפעה זו תהיה מוגבלת.
- תהליך האנליזה לחישוב ספיגת האנרגיה של רכיבים מבניים ניתן ליישום באופן אלגוריתמי, היכול לשמש את המהנדסים העוסקים בתכנון עמידות מבנים ברעידת אדמה.
- באופן כללי התקבל, שקורות משיכות יתר באופן משמעותי מעמודים. תוצאה זו רלוונטית ביותר למקרים בהם מתכננים מבנה מסגרות, בהם יש צורך להבטיח קבלת פרק פלסטי בקורה לפני קבלת פרק פלסטי בעמוד.
- במבנה שנבדק, הכשל הראשוני בזמן רעידת אדמה יתרחש בקומת הקרקע של המבנה ולא בקומת המסד.

מראי מקום

1. ספיגת אנרגיה פלסטית, משיכות ותסבולת של אלמנטי בטון מזוין - יעקב איסחקוב.
2. תקן ישראלי 413 - תכן עמידות מבנים ברעידת אדמה.
3. מדריך לתכן מבנים לרעידות אדמה - כרך א' - יעקב גליק.
4. עמידות מבנים ברעידות אדמה - מבוא ומושגים כלליים - יעקב איסחקוב.
5. Dynamics of Structures - theory and applications to earthquake engineering, Prentice Hall, 2007. Anil Chopra.