

שדרוג סיסמי של מבנים להקטנת היסטים קומתיים ותאוצות אבסולוטיות

באמצעות בקרה פסיבית

ד"ר אורן לבן¹, פרופ' גרי דרגוש²

¹ הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

² University at Buffalo – The State University of New York

תקציר

במהלך שני העשורים האחרונים, אנו עדים לשינוי חד בגישה לתכן סיסמי בעולם. טכנולוגיות חדשות הקשורות להתקנים סופגי אנרגיה הוצגו ואף הבשילו לשימוש מעשי. בשעה ששינוי זה מהווה צעד גדול קדימה, הליך התכן נעשה מורכב יותר. לפיכך, קיים צורך בפיתוח גישות חדשות להערכה ולהשוואה של אלטרנטיבות שונות לתכן. ההיסט הקומתי שימש זמן רב כמדד פשוט לביצועי המבנה ברעידת אדמה. לאחרונה נראה כי תאוצה אבסולוטית מהווה מדד חשוב נוסף. לפיכך תכן סיסמי צריך שיתמקד בהקטנת שני מדדים אלו גם יחד. אולם, הקטנת מדדים אלו לרוב מייצגות מטרות מתחרות. בהליך תכן מסוג זה עולות שאלות רבות. למשל, האם ניתן למשל על ידי התרת היסטים קומתיים גדולים יותר במעט להקטין את התאוצות האבסולוטיות במידה ניכרת? מי מבין הטכנולוגיות החדשות מתאימה ביותר לאפליקציה נתונה? במטרה לענות על שאלות אלו ובד בבד לספק מסגרת חישובית כללית לתכן, פותחה גישת אופטימיזציה אבולוציונית למטרות מרובות לתכן בקרה פסיבית למסגרות גזירה. התוצאות המתקבלות מן הדוגמאות עונות על השאלות שהועלו קודם לכן כמו גם על שאלות נוספות.

רקע

על פי ועדת ההיגוי להיערכות לטיפול ברעידות אדמה, כתוצאה מכל אחד מתרחישי רעידת האדמה שלקחה בחשבון יינזקו כ-130 אלף מבנים בישראל ומתוכם 10,000 ייהרסו כליל. התחזיות הן לכ-16 אלף החגים ברעידת אדמה חזקה בישראל. לפיכך, במדינת ישראל, שדרוג סיסמי של מבנים בכלל, ומבנים בעלי חשיבות ציבורית מיוחדת בפרט, הוא כורח המציאות.

כאשר מדובר במבנים בעלי חשיבות ציבורית מיוחדת רמת העמידות הרצויה גבוהה יותר מן המקובל במבנים "רגילים". דרישה זו הובאה לראשונה בתקנות רשמיות בעולם כתוצאה מהחזק הכבד שנגרם

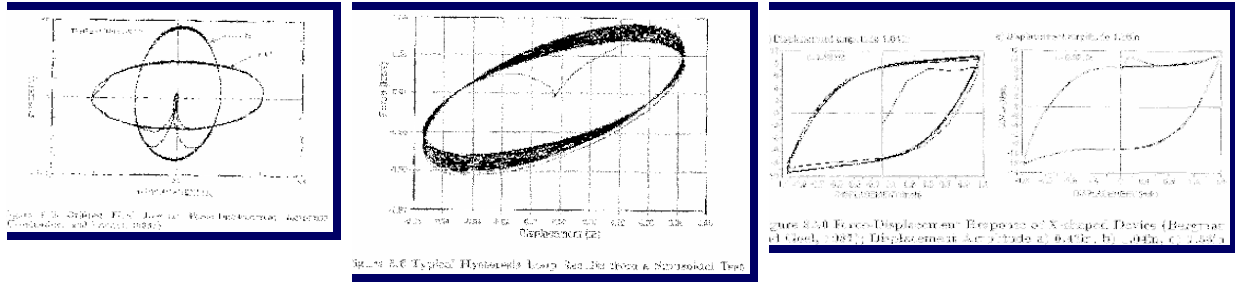
לבן, דרגוש

לבתי חולים רבים ברעידת האדמה סן פרננדו בשנת 1971. כתוצאה ממזק זה ארבעה בתי חולים פונו. בשל חוסר התפקוד של מערכת בתי החולים הוחלט במדינת קליפורניה כי על בתי חולים להישאר במצב בו הם יכולים לתפקד לאחר רעידת אדמה. לפי מיטב הידע באותה תקופה, מבני בתי חולים חדשים תוכננו עם חוזק גבוהה בכדי למנוע נזק מבני. מאוחר יותר, החוזק הגבוהה של מבני בתי חולים אלו הביא לכך שברעידת האדמה נורטרידג' ב-1994 הנזק המבני שנגרם להם היה אכן מזער. אולם, חוזקם הגבוהה של מבנים אלו הוביל לתאוצות אבסולוטיות גדולות של רצפות המבנים. כתוצאה מכך נגרם נזק כבד לאלמנטים שאינם מבניים (ציוד ומכשור רפואי, מערכת כיבוי, ונטילציה, צנרת וכו') הרגישים לתאוצות. כלומר, למרות שמבני בתי חולים רבים נשארו עומדים על תילם כמעט ללא סדק, 88% מן המיטות בבתי החולים באזור הרעש (13 בתי חולים) פונו בשל אותו נזק שאינו מבני. כתוצאה ממזקי רעידת נורטרידג' התגבשה גישה חדשה לתכן בתי חולים, מבנים מיוחדים ומבנים בכלל. לפי גישה זו בנוסף להגבלת ההיסטים הקומתיים יש למזער את התאוצות האבסולוטיות המורגשות בקומות השונות. זאת בכדי להגביל נזק שאינו מבני ולהבטיח את תפקוד המבנה לאחר הרעידה.

כפי שניתן ללמוד מלקחי רעידת נורטרידג', בגישת התכן האנטי סיסמי הקונבנציונלי הבטחת יציבות המבנה והגבלת התאוצות האבסולוטיות הן מטרות מנוגדות. כלומר באופן כללי, חיזוק מבנים והקשחתם מביא לעליה בתאוצות האבסולוטיות במבנה במקרה של רעידת אדמה. הצהרה זו נכונה בדרך כלל גם כאשר מדובר בגישות אחרות לתכן אנטי סיסמי. אולם, נראה כי גישות מתקדמות הכוללות בקרה פסיבית מסוגים מסוימים יש ביכולתן להביא להקטנת התאוצות האבסולוטיות בנוסף להבטחת יציבות המבנה ולהקטנה משמעותית של היסטים קומתיים.

כיום מוכרים מספר סוגים של התקני בקרה פסיבית, אשר ניתן לסווג לפי התנהגותם תחת עומס מחזורי לשלוש קבוצות עיקריות: מרסנים היסטרטיים, מרסנים ויסקואלסטיים ומרסנים ויסקוזיים (סקירה נרחבת ניתן למצוא ב-[1]). התנהגות זו מוצגת באיור 1. כפי שניתן לראות, המרסנים ההיסטרטיים מתנהגים בצורה ליניארית עד שהכוח מגיע לערך הכניעה וגודלו מוגבל. מרסנים אלו מבזבזים אנרגיה דרך כניעתם של מתכות ומוסיפים למבנה קשיחות ויכולת ספיגת אנרגיה. המרסנים הויסקואלסטיים, לעומת זאת, מוסיפים למבנה קשיחות וריסון ויסקוזי והמרסנים הויסקוזיים מוסיפים למבנה ריסון בלבד.

לבן, דרגוש



ג'

ב'

א'

איור 1: התנהגותם של מרסנים שונים תחת עומס מחזורי – א') מרסנים היסטרטיים ב') מרסנים ויסקואלסטיים ג') מרסנים ויסקואלסטיים וז') מרסנים ויסקואלסטיים.

טכנולוגיות חדשות אלו, הקשורות להתקנים סופגי אנרגיה, הוצגו ואף הבשילו לשימוש מעשי במהלך שני העשורים האחרונים. בשעה שפיתוח אמצעים מסוג זה והתקנתם במבנים מהווה צעד גדול קדימה, הליך התכן נעשה מורכב יותר. בשעה שהוצעו בספרות מתודולוגיות לתכן בקרה במבנים רובן התמקדו בסוג התקנים בודד ולכן לא ניתן להשוות בין ביצועי הבקרים השונים. בנוסף, המתודולוגיות הקיימות מתמקדות במטרת תכן אחת אשר בדרך כלל מבוססת על היסטים קומתיים. לפיכך, קיים צורך בפיתוח גישות חדשות להערכה ולהשוואה של אלטרנטיבות שונות לתכן. בנוסף, מטרת התכן המוגדות של הקטנת היסטים קומתיים מחד והקטנת תאוצות אבסולוטיות מאידך, מעלות שאלות רבות. למשל, האם ניתן למשל על ידי התרת היסטים קומתיים גדולים יותר במעט להקטין את התאוצות האבסולוטיות במידה ניכרת? מי מבין הטכנולוגיות החדשות מתאימה ביותר לאפליקציה נתונה?

מטרת העבודה

לעבודה זו שתי מטרות עיקריות. הראשונה היא פיתוח גישה לאופטימיזציה מרובת מטרות של תכן לשדרוג סיסמי באמצעות בקרים פסיביים. מטרתה השנייה היא לספק השוואה בין האלטרנטיבות השונות לשדרוג סיסמי בכדי לקבוע מי מבין סוגי המרסנים הוא המתאים ביותר למטרת תכן נתונה: בשעה שבדרך כלל המהנדס המתכנן בוחר את סוג המרסנים לצורך השדרוג על סמך האינטואיציה ההנדסית וניסיון העבר שלו, העבודה מספקת תשובה מדעית מבוססת לשאלה זו. בכך, העבודה מספקת למהנדס המתכנן כלים לבחירת שיטת השדרוג.

שיטות

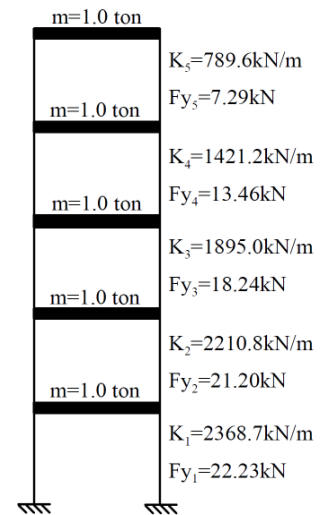
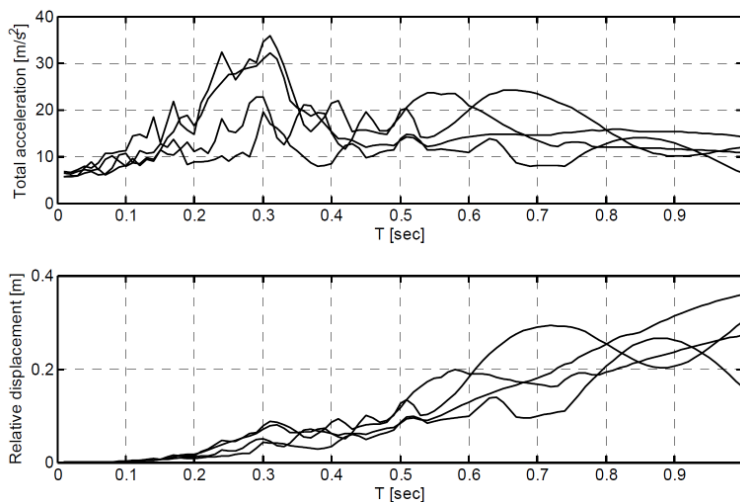
במטרה לענות על השאלות שהועלו ובד בבד לספק מסגרת חישובית כללית לתכן, פותחה גישת אופטימיזציה למטרות מרובות המבוססת על אלגוריתמים גנטיים (GA) לתכן בקרה פסיבית למסגרות גזירה כניעות. מרסנים כניעים בצורת אלכסונים מרוסני קריסה (BRB), מרסנים ויסקואלסטיים נוזליים (VF), ומרסנים ויסקואלסטיים (VE) נלקחו בחשבון כפתרונות תכן אפשריים. כמו כן נלקחה בחשבון גישת

לבן, דרגוש

התכן של הוספת מרסנים ויסקוזיים נזליים למבנה והחלשתו. מטרת התכן שנקחו בחשבון הן הקטנת ההיסטים הקומתיים (המרבי מכל הקומות) והתאוצות האבסולוטיות (המרבית מכל התקרות) במבנה בעמיסה אפשרית של אוסף רעידות אדמה נתונות. גישת האופטימיזציה שפותחה מביאה להערכת חזית פרטו. חזית זו מוגדרת מאוסף הנקודות במישור המטרות המייצגות פתרונות אופטימליים לפי פרטו. כל פתרון אופטימלי הוא כזה שלא קיים פתרון אחר שיביא לשיפור במטרה אחת מבלי להביא לערך פחות טוב במטרה אחרת לפחות.

תוצאות

בדוגמה זו שודרגה מסגרת גזירה כניעה בעלת זמן מחזור בסיסי של 0.5 שניות. המסגרת תוכננה כך שבצורת התנודה הראשונה ההזזה האופקית תהיה פרופורציונית לגובה. תסבולת הגזירה הקומתית חושבה לפי מעטפת כוח הגזירה המרבי שהתקבל בקומה הנדונה מתוך אנליזה ליניארית מחולקת ב-4.



ב'

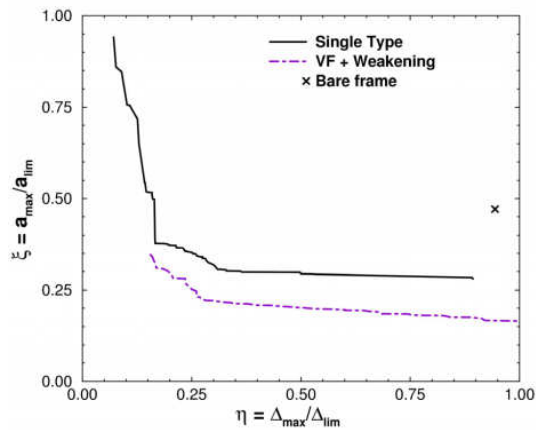
א'

איור 2: א' מסגרת גזירה כניעה ב' ספקטרומי פסוודו תאוצה והזזה עבור אוסף הרעידות הנבחר.

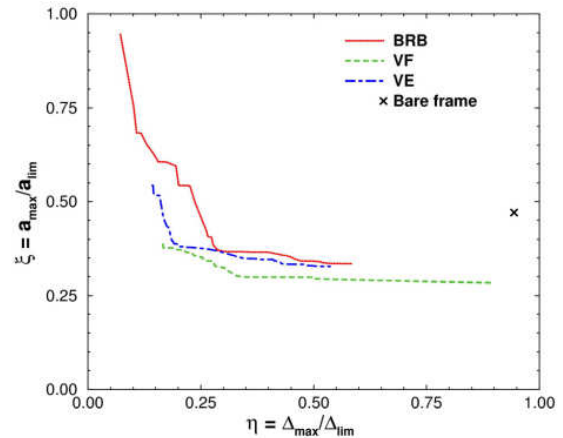
כיוון שהיסטים קומתיים מרביים ותאוצות אבסולוטיות מהוות מטרות מנוגדות ניתן לקבל חזית פרטו עבור שתי פונקציות אלו כך שהפתרונות שיתקבלו ייצגו את הפתרונות הפיסיקליים הטובים ביותר ללא אילוץ כספי. איור 3א' מציג את חזית פרטו שהתקבלה עבור תכן הלוקח בחשבון שימוש בכל אחד מסוגי המרסנים בנפרד. כפי שניתן לראות, בתכנון נכון כל סוגי המרסנים יכולים להביא להקטנה של שתי המטרות במקביל. בנוסף, מרסנים ויסקוזיים יעילים יותר בהקטנה סימולטנית של שתי המטרות לעומת המרסנים האחרים. עוד ניתן לראות כי קיים אזור רחב שבו הקטנת ההיסטים באופן ניכר מביאה להגדלה זניחה בתאוצות. איור 3ב' מציג את חזית פרטו שהתקבלה כאשר בכל תכן נתון מותר השימוש בסוג

לבן, דרגוש

מרסן בודד ובנוסף כאשר נלקחה בחשבון הגישה לפיה המבנה מוחלש אך מרסנים ויסקוזיים מותקנים עליו. כפי שניתן לראות הגישה של החלשת המבנה והוספת ריסון ויסקוזי יעילה יותר בהקטנה סימולטנית של היסטים ותאוצות לעומת שאר הגישות (לפחות עבור המבנה שבדוגמה).



ב'



א'

איור 3: חזית פרטו (ציר אופקי – היסט קומתי מרבי, ציר אנכי – תאוצה אבסולוטית מרבית) א' שדרוג על ידי סוג מרסנים בודד בכל תכן ב' שדרוג על ידי סוג מרסנים בודד מול החלשה וריסון.

מסקנות

הוצגה גישה חדשה של תכן אופטימלי מרובה מטרות לשדרוג סיסמי של מסגרות גזירה באמצעות בקרה פסיבית. לפי הדוגמה נראה כי בשעה שבתכנון נכון כל סוגי המרסנים יכולים להביא להקטנה סימולטנית של היסטים קומתיים ושל תאוצות אבסולוטיות, מרסנים ויסקוזיים יכולים לעשות זאת ביעילות גבוהה יותר. בנוסף נראה כי הגישה של החלשת המבנה וריסונו יעילה אפילו יותר בהקטנה סימולטנית של היסטים ותאוצות.

מראי מקום

1. Soong, T. T., Dargush, G. F. (1997) Passive energy dissipation systems in structural engineering. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.