



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

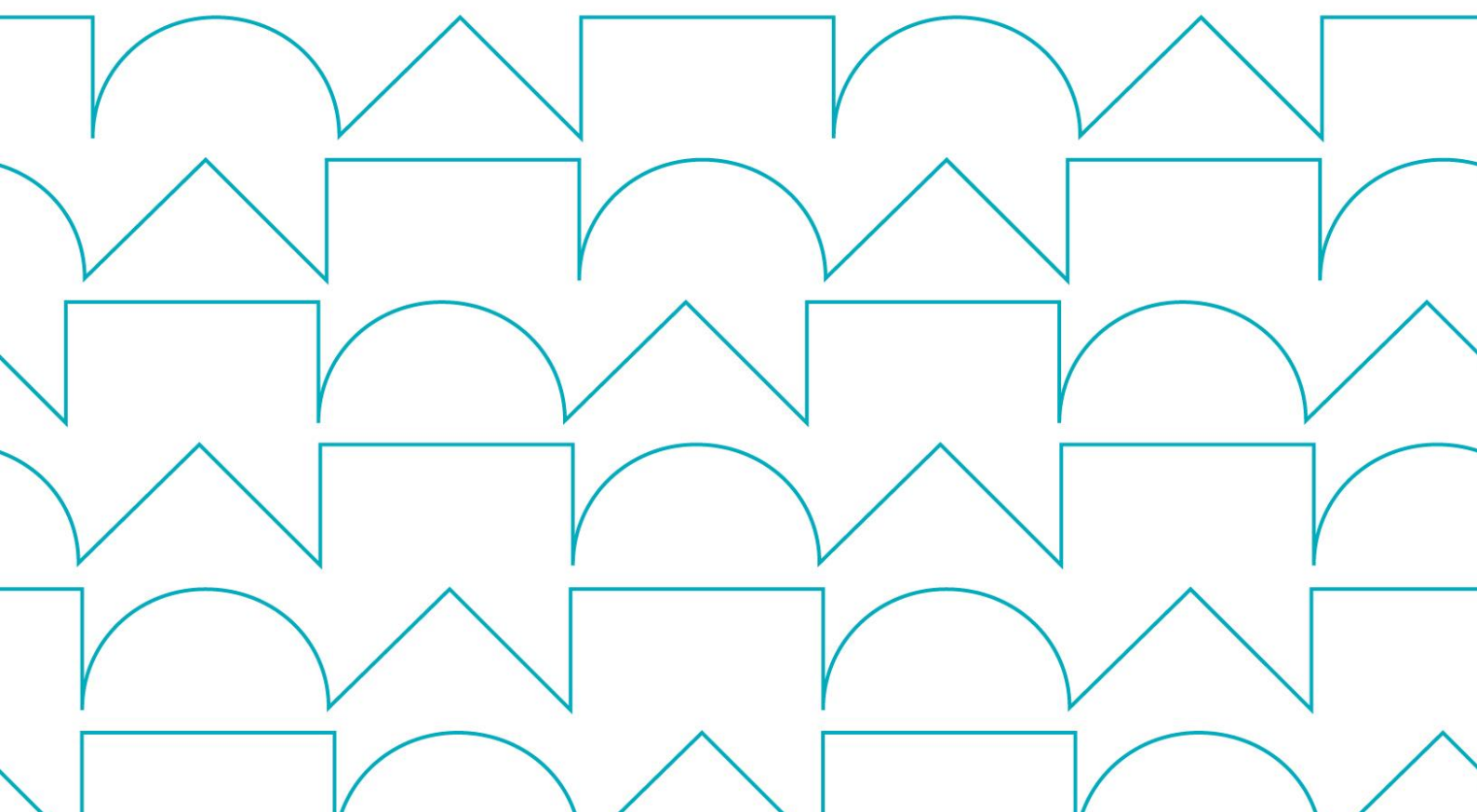
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



שילוב שיטות חדשניות מבוססות למידת מכונה לבקרת תכן כחלק מתהליך קבלת היתר בנייה

טניה בלוך מיין אלנוזהה רפאל זקס





Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2032516

שילוב שיטות חדשניות מבוססות למידת מכונה לבקרת תכן כחלק מתהליך קבלת היתר בנייה

ד"ר טניה בלוך אינג' מיין אלנוזה פרופ' רפאל זקס
שותפים: אינג' בני לחין אינג' עמית מימוני

מלווי מחקר: אדר' אסתי כהן-ליס מר יונתן אופק מר יהונתן אלעזר
מר רונן ברק מר אריאל שפילקה

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
מס' הזמנה 4502149512

Copyright © 2024 by
Tanya Bloch, Maen Alnuzha and Rafael Sacks
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

אוגוסט, 2024

חיפה

אב תשפ"ד

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

תוכן עניינים

1.	מבוא	8
2.	סקר ספרות	10
2.1.	בקרת תכן אוטומטית – יכולות, פוטנציאל וקשיים	10
2.2.	העשרה סמנטית ככלי תומך בקרת תכן	14
2.3.	למידת מכונה ולמידה על בסיס גרפים	17
3.	בקרת תכן אוטומטית כחלק מתהליך הרישוי	20
3.1.	היתר בנייה בישראל	22
3.2.	היתר בנייה בעולם – פיתוחים אחרונים	23
4.	מטרות המחקר	32
5.	ניסויים	33
5.1.	בטיחות אש – יישום בכלים קיימים	35
5.2.	מיגון – יישום באמצעות שיטה היברידית – למידת מכונה וחוקים לוגיים	44
6.	סיכום	62
7.	מסקנות והמלצות	64
8.	מראי מקום	67
9.	Abstract	75

רשימת איורים

11	איור 1 תהליך בקרת תכן אוטומטית כפי שתואר ב [9]
21	איור 2 מדרגות דיגיטציה ואוטומציה ברישוי, מתוך [49]
איור 3	דוגמא לבדיקת נגישות ב BIM clearly לקוח מהאתר
27	https://www.futureinsight.nl/clearly-bim?lang=en
איור 4	תצלום מסך מתוך פלטפורמת הרישוי באסטוניה, מתוך
28	https://eehitus.ee/timeline-post/bim-based-building-permit-procedure
איור 5	בדיקה על בסיס ווקסלים לבדיקת דרכי מילוט לקוח מתוך הדוח הסופי של הפרויקט
29	[84]
איור 6	תכנית קומה טיפוסית של המבנה ששימש לצורך ניסויים
35	
איור 7	המבנה הנבדק בתוך סוליברי
36	
איור 8	סיווג דלתות במודל בתוך תכנת סוליברי
38	
איור 9	סיווג חללים במודל בתוך תכנת סוליברי
39	
איור 10	סיווג אלמנטים אנכיים בתוך תכנת סוליברי
39	
איור 11	העשרה סמנטית באמצעות Dynamo
40	
איור 12	תכונות דלת החוץ ב Revit
40	
איור 13	קביעת פרמטרים המערכת החוקים לבדיקת דרכי מילוט
41	
איור 14	תוצאות בדיקת מרחקי מילוט אל היציאה
42	
איור 15	תוצאות בדיקת מרחקי מילוט אל מוצא בטוח
43	
איור 16	סימולציית פינוי מבנה בפלטפורמת Pathfinder
43	
איור 17	שלושת הקטגוריות לאחוז הקירות היורדים המוגדרים בתקנות
45	
איור 18	אופן חישוב היקף הקירות ההמשכיים לפי תקנות פקע"ר לתכנון אדריכלי של
מרחבים מוגנים	
46	
איור 19	תנאים נוספים לחישוב אחוז הקירות היורדים
46	
איור 20	הוספת אלמנטי "חדר" בתוך תכנת Revit
49	
איור 21	בידוד הקירות השייכים לחדר ממ"ד
50	
איור 22	יצירת סט התונים סינטטי לאימון המודל
52	
איור 23	מבנה אחד ושני ייצוגים אפשריים באמצעות גרף
53	
איור 24	ייצוג פירי הממ"דים כגרפים
53	
איור 25	תצלום מסך מתוך הייצוג של סט התונים הסינטטי
55	
איור 26	דוגמא למטריצת סמיכויות (משמאל) ושיוך התגים לקודקודי הגרף (מימין)
55	
איור 27	סוגי שגיאות במודלי למידת מכונה
57	
איור 28	תצלום מסך של תוצאות הבדיקה עובר עובי מינימלי של אלמנטי בטון בפיר
61	

רשימת טבלאות

טבלה 1	דרוג סעיפים במפרטי בקרה.....	34
טבלה 2	מיפוי דרישות המידע לצורך בדיקה.....	37
טבלה 3	מפוי דרישות מידע לבדיקת מיגון.....	48
טבלה 4	מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GraphSAGE הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטטיים.....	58
טבלה 5	מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GCN הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטטיים.....	58
טבלה 6	מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GAT הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטטיים.....	59
טבלה 7	מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GAT הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטטיים, כאשר ייצוג הגרף כולל רק קירות וחללים כקודקודים.....	59
טבלה 8	תוצאות סיווג קודקודים בגרף באמצעות אלגוריתם GAT על מודל המבחן.....	60

תקציר

בקרת תכן מתבצעת כחלק מתהליך הרישוי על מנת לוודא כי כל החוקים והתקנות הרלוונטיים המבטיחים את איכות הבנייה ובטיחות המשתמשים אכן נאכפים. למרות שהיתר הבנייה הוא אירוע נקודתי במחזור החיים של הבניין, יש לו השפעה רבה על לוח הזמנים ועל עלותו של פרויקט הבנייה. יוזמות רבות נבחנו ואף יושמו בישראל לשיפור תהליך הנפקת היתר בנייה. אחד השינויים המשמעותיים ביותר בתחום הוא תיקון לחוק התכנון והבנייה הישראלי, המכונה "תיקון 101". התיקון קורא לשיפור משמעותי באיכות הבנייה בישראל, תוך ייעול ופישוט ההליכים המעורבים. כחלק מהשינויים המיושמים, כמו במקומות רבים אחרים בעולם, גם ישראל עשתה מאמצים להחליף את תהליך בקשת ההיתר מבוסס הנייר בממשק דיגיטלי. עם זאת, כמו ברוב המדינות, ממשק דיגיטלי זה הוא למעשה מערכת ניהול מסמכים מותאמת עם זרימות עבודה מובנות ומגבלות זמן מוגדרות. המערכת, אשר נקראת 'רישוי זמין', תוכננה לתמוך בכל שלבי התהליך באופן מקוון. אולם, היכולות הטכנולוגיות הקיימות בתחום הינן גדולות ומשמעותיות יותר, ויכולות להביא את התהליך לא רק לדיגיטציה אלא גם לאוטומציה. שילוב כלים אוטומטיים בתהליך, במיוחד לצורך בקרת תכן, יכולה לתרום לקיצור משמעותי של תהליך הנפקת היתר בנייה ואף לביצוע בקרה מפורטת ומדויקת יותר.

מטרת מחקר זה היא להדגים את היכולות הקיימות בתחום, תוך בחינת הכלים הקיימים לבקרת תכן במקביל לפיתוח כלים חדשים מבוססים למידת מכונה על מנת להתגבר על מוגבלויות הכלים הקיימים. המחקר מתבסס על שני מקרי בוחן. מקרה הבוחן הראשון מתמקד ביישום באמצעות כלים קיימים ובחינת האפשרות להתאימם לתקנות בישראל. זאת תוך בחינה מעמיקה של רמת האוטומציה והדיוק שכלים אלה מאפשרים, ומיפוי המגבלות של כלים אלה. הניסויים על בסיס כלים קיימים התמקדו בבדיקת מרחקי מילוט כחלק מבקרה בנושא תקנות בטיחות אש. הבדיקות בוצעו באמצעות אחד הכלים המתקדמים הקיימים לצורך בקרת תכן אוטומטית, Solibri, המבוסס על ערכות כללים מקודדות מראש התואמות את תקן הבנייה הבינלאומי. מקרה בוחן זה הדגים את היכולת ליישם כלים קיימים לצורך בקרת תכן בישראל, אך גם הצביע על מספר מגבלות. אחת המגבלות של הכלי הוא בדרישות המידע הרבות שהמשתמש מתבקש להשלים בתהליך הבדיקה, מה שהופך אותו לאוטומטי למחצה. זאת בנוסף לצורך להתאים את ערכות הכללים לתקינה הישראלית, מה שעלול להיות לא טריוויאלי, במיוחד כאשר ערכת כללים דומות לא קיימת בתכנה.

במקביל לניסויים עם כלים קיימים, מקרה הבוחן השני התמקד בדרישות פקע"ר לממ"דים. כיוון שנושא המיגון הינו ייחודי לישראל, הוא אינו מטופל במסגרת הכלים הקיימים לבקרת תכן כלל. בגלל מורכבות הדרישות, מורכבות גיאומטרית וטופולוגית, מקרה זה טופל באמצעות גישה שונה לבקרת תכן. במקום ערכות החוקים המקובלות, במסגרת ניסוי זה פותח מודל למידת מכונה לתמיכה בביצוע בדיקה אוטומטית של התאמת התכן לדרישות עובי מינימלי של אלמנטי הבטון בפיר ממ"דים. בגלל התלות הרבה ביחסים השונים בין אלמנטי המבנה לביצוע הבדיקה, נבחרו כלים מתחום למידת המכונה באמצעות גרפים. התהליך כלל מספר שלבים:

- יצירה ותיוג של סט נתונים סינטטי שכלל דוגמאות של מרחבים מוגנים דירתיים שונים, כאשר כל דוגמא תויגה בהתאם לדרישות התקן. התיוג נעשה בהתאם לקטגוריות הנקבעות ע"י יחס הקירות ההמשכיים בכל ממ"ד (יחס הקירות הרציפים אשר מגיעים עד יסודות המבנה).

- בניית הגרף המתאר את הקשרים המרחביים בין רכיבי המבנה השונים. הגרף במקרה זה נבנה כך שכל צומת מייצג רכיב מבנה וקשתות מייצגות קשרים גיאומטריים בין הרכיבים.
- אימון מודל הלמידה על הנתונים הסינטיים במטרה לסווג את הממ"דים לפי אחוז הקירות ההמשכיים, ולבסוף שימוש בתוצאת הסיווג לבדיקת התאימות של אלמנטי הפיר לדרישות העובי המינימלי.

שני מקרי הבוחן הודגמו באמצעות מודל BIM של מבנה מגורים שהתקבל מהתעשייה. מקרה הבוחן בתחום המיגון הדגים יכולות מרשימות של כלים מעולם הבינה המלאכותית לצורך בקרת תכן אוטומטית. מתוצאות היישום על המודל על מבנה המגורים, ניתן לראות 46 אלמנטים אשר זוהו כלא עומדים בדרישות המינימום שבתקנות, כאשר 27 מתוכם הינם אלמנטים שלמעשה כן עומדים בדרישות. כלומר, תוצאות הבדיקה הובילו ל 27 מקרים שהם False Positives, בעוד שלא קיימים אלמנטים אשר לא עומדים בדרישות ולא זוהו בבדיקה, כלומר התוצאות אינן כוללות שגיאות מסוג False Negatives. למרות שכלים אלה אינם דטרמיניסטיים ואין ביכולתנו להבטיח דיוק של 100%, התוצאות הינן מבטיחות ומצביעות על האפשרות לשילוב כלי למידת מכונה בבקרת תכן ועל הצורך בהמשך מחקר בנושא.

האוטומציה של תהליכי הבדיקה מספקת מספר יתרונות חשובים, כאשר אוטומציה באמצעות למידת מכונה מאפשרת להתגבר על מספר מגבלות קיימות. ראשית, הגמישות המתקבלת בתהליכים מבוססים למידת מכונה מאפשרת ביצוע בדיקות מורכבות יותר מאלה הניתנות לבדיקה באמצעות מערכות של כללים, תוך העלאת רמת האוטומציה בתהליך. זה יאפשר לבודקים להתרכז במקרים החריגים הדורשים התערבות ידנית, במקום לבזבז זמן על בדיקות שגרתיות.

לסיכום, מחקר זה מדגים את הפוטנציאל ביעול תהליך בקרת התכן באמצעות חדשנות טכנולוגית. באמצעות שני מקרי בוחן, המחקר מצביע על מגבלות הכלים הקיימים, בעוד שהמקרה השני מדגים את היכולת של למידת מכונה להתמודד עם דרישות ייחודיות כגון דרישות פקע"ר לממ"דים. התוצאות מצביעות על הפוטנציאל של כלים מבוססי למידת מכונה לשיפור תהליך בקרת התכן. אולם, יש להמשיך ולפתח כלים אלו, ולבצע מחקרים נוספים על מנת לשפר את הדיוק, להעלות את רמת האוטומציה, ולהתאים את הכלים לדרישות המקומיות בצורה מיטבית.

1. מבוא

ענף הבנייה הוא ענף כלכלי מרכזי המשפיע על פיתוחה הפיזי של המדינה ועל פיתוח של מנופי צמיחה כלכלית. על פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה [1], בשנת 2023 הסתכמו תפוקות ענף הבנייה בישראל בסיום בנייתם של 15.7 מיליון מ"ר לייעודים שונים. להליכי הרישוי יש השפעה ישירה על פעילות הענף ולפיכך נודעת חשיבות רבה לייעולם ולאיכות הבקרה עליהם. עפ"י סקר הערכת מגמות בעסקים, 21% מהעסקים דיווחו כי אחד החסמים החמורים בביצוע פעולות של חברות בנייה הוא עיכובים בקבלת היתרים/אישורים [1]. יצוין כי הצורך לייעל את הליכי הרישוי ולהבטיח את איכות הבנייה נמצא על סדר היום הציבורי זה שני עשורים. בדצמבר 2003 פורסם דוח ועדת החקירה הממלכתית לעניין בטיחות מבנים אשר התייחס גם למצב הרישוי בארץ. אכן, שיפור ועדכון רגולציה ברישוי, הקמת מכוני בקרה ועוד נושאים אחרים הנוגעים לתהליך הרישוי היוו חלק מהחלטת הממשלה לקבל את המלצות הדו"ח בשנת 2006. בעקבות זאת, תיקון 101 לחוק התכנון והבנייה אשר נכנס לתוקפו בשנת 2014, והוא אחד מהתיקונים המשמעותיים ביותר שנעשו בחוק התכנון והבנייה מאז חקיקתו. אחת ממטרות התיקון הייתה לייעל ולפשט את הליכי הרישוי והבנייה בישראל.

כל פרויקט בנייה, בין אם תכולתו הקמת בניין, כביש או תשתית אחרת, שיפוץ או הריסת בניין או תשתית קיימת, מחייב קבלת היתר בנייה כמוגדר בחוק התכנון והבנייה (חוק התכנון והבניה, התשכ"ה- 1965). הליך זה נועד להבטיח כי הבנייה תהיה בהתאם להוראות התוכניות התקפות, ובהתאם לכל הוראה מחייבת אחרת בתחומים הרלוונטיים כגון בטיחות, מיגון וכד'. הוראות אלה נועדו להבטיח את איכות הבנייה, בטיחות המשתמשים, פונקציונליות והתאמה לצרכים. בדיקה של התכן על מנת לוודא כי הוא אכן עומד בכל הדרישות הינה חלק מתהליך קבלת היתר בנייה. בדיקה מפורטת וקפדנית של התכן תתרום להעלאת איכות התכנון והבנייה בישראל. נכון להיום, תהליך בקרת התכן מתבצע באופן ידני ע"י צוות מקצועי אשר הוסמך לכך. זהו תהליך ארוך ומורכב אשר דורש מקצועיות ומיומנות וגוזל זמן רב. כלים חדשניים לבקרת תכן אוטומטית יכולים לקצר משמעותית את זמן הבדיקה.

בקרת תכן אוטומטית יכולה לשפר משמעותית את תהליך קבלת ההיתר, להעלות את איכות התכנון והבנייה ולהבטיח עמידה בסטנדרטים גבוהים של בטיחות ואיכות. עם זאת, יש להתמודד עם האתגרים הטכנולוגיים והארגוניים כדי להבטיח יישום מוצלח. למעשה, אחד המכשולים הראשונים שטרם התמודדו אתו בישראל הוא הצורך במעבר לתהליך ממוקד מידע דיגיטלי, או במילים אחרות תהליך המבוסס על ייצוג דיגיטלי של התכן, כדוגמת מודל מידע בניין BIM. כלים אשר מאפשרים ביצוע חלק מבדיקות התכן הנדרשות בצורה אוטומטית ובהתבסס על מודל BIM קיימים כבר היום. אולם, כלים אלה מבוססים על כללי היסק לוגיים, הם מאפשרים בדיקה חלקית בלבד, ולא מגיעים לאוטומציה מלאה. יישום של אלגוריתמים שונים מתחומי הבינה המלאכותית בסביבת מידול מידע בניין הפך נפוץ במיוחד בשנים האחרונות. יישום מסוג זה יכול להיות יעיל גם לצרכים של בקרת תכן בצורה אוטומטית.

נקודת ההתחלה במחקר זה היא יישום BIM בתהליך, כלומר אנחנו מניחים שהמידע התכנוני מיוצג באופן דיגיטלי מלא, ונתון כמודל BIM. מחקר זה מחולק לשניים, בחלק הראשון נבדקת היכולת של כלים קיימים ליישום בישראל תוך התאמה לתקנים המקומיים. בחלק השני, המחקר בוחן כלים מתקדמים יותר המשתמשים בטכנולוגיות של למידת מכונה, במיוחד בתחום גרפים (Graph-based Machine Learning).

כלים אלה מאפשרים רמות אוטומציה גבוהות יותר ומסוגלים להתמודד עם תקנות ודרישות שלא נבדקו אוטומטית בעבר.

2. סקר ספרות

בקרת תכן אוטומטית היא תהליך של שימוש בתוכנת מחשב על מנת לוודא שפרויקט הנדסי מתוכנן עומד בכל החוקים, התקנים והתקנות הרלוונטיות. בפרק זה נציג את הספרות הרלוונטית בנושא בקרת תכן אוטומטית תוך מיקוד ביכולות של כלים קיימים וגם בחסרונות ובקשיים.

2.1. בקרת תכן אוטומטית – יכולות, פוטנציאל וקשיים

לרעיון של בקרת תכן אוטומטית היסטוריה ארוכה. בין המאמצים המוקדמים ביותר לאוטומציה, בתחילת שנות ה-60, הוא פיתוח של טבלאות החלטה [2] והגדרת אילוצים תכנוניים, כך שניתן להשתמש בהם כדי לקבוע האם תכן נתון מספק את כל האילוצים או לא [3]. השימוש בכלים אוטומטיים לבדיקת תכן תואר בשנת 1997 במאמרם של Han et al [4], תוך שימת דגש על כך שהשילוב של כלים אלה בתעשייה אפשרי רק לאחר פיתוח מודל סטנדרטי המספק מידע עשיר יותר מאוסף של שרטוטים.

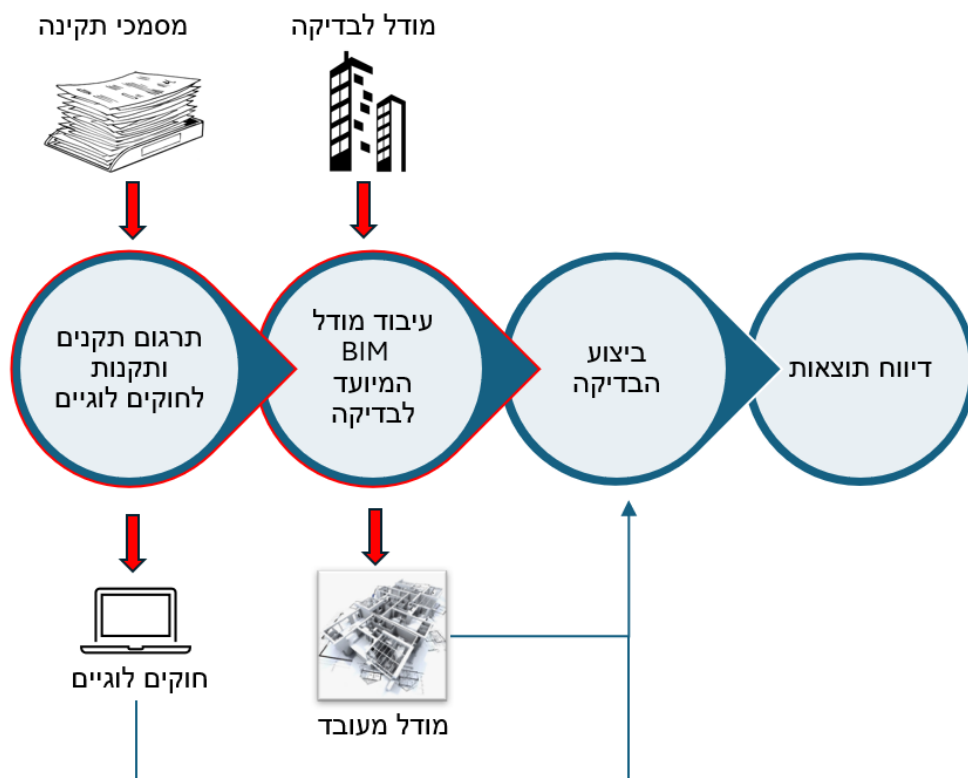
כלים מעולם ה-BIM במידה רבה אכן מספקים את בסיס המידע התכנוני הנדרש, אולם בגלל האופי המגוון המצופה מהמידע האגור במודלים אלה, הם לא תואמים לחלוטין את דרישות המידע של כלי בקרת תכן אוטומטיים. BIM, וסכמת המידע המקובלת לייצוג ושיתוף מידע (Industry Foundation Classes (IFC), טומנים בחובם את הפוטנציאל לספק את המידע הנדרש, אולם פוטנציאל זה טרם מומש במלואו [5].

ובכל זאת, נכון להיום, כלים קיימים לבקרת תכן מבוססים על מידע תכנוני המיוצג במודל BIM, ולרוב מקבלים כקלט קובץ IFC. דוגמא לכלי כזה היא ה-DesignCheck [6] שהוצגה כבר בשנת 2006, והיא פלטפורמה מבוססת כללים לוגיים אשר מקבלת קובץ IFC כקלט. בפועל, הפלטפורמה לא הצליחה להחליף את מאמץ הבדיקה הידני. למעשה, גם פלטפורמות מתקדמות יותר אשר מתוארות כאן בהמשך, לא לגמרי מצליחות לחלחל לשיטות העבודה המקובלות בתעשייה.

Beach et al. [7] חקרו את המכשולים המונעים את האימוץ הרחב של כלי בקרת תכן אוטומטיים בתעשייה, והציעו דרכים שונות לפתרון. סקרים שנעשו בעבודתם מצביעים על כך שהקשיים העיקריים כוללים, בין היתר, היעדר הגדרה של מודלים סטנדרטיים עבור בדיקת תכן אוטומטית. סכמת IFC היא סכמת נתונים עשירה המכילה מידע על מרכיבי הבניין במודל, תכונותיהם והיחסים ביניהם, כאשר הכל מיוצג בפורמט קריא למחשב [8]. זהו בסיס טוב לבניית פלטפורמת בקרת תכן אוטומטית כמערכת שמחילה שגרת חישוב מוגדרת מראש המופעלת על המידע המאוחסן ב-IFC, אך זה לא מספיק על מנת לטפל במגוון הרחב של התקנים והתקנות.

מערכות בדיקה מבוססות כללי היסק כוללות בדרך כלל ארבעה שלבים כמתואר בעבודתו של Eastman [9] (ראה באיור 1). התהליך מתחיל מתרגום של מסמכי תקינה לחוקים לוגיים הניתנים לקידוד, חוקים אלה מוגדרים מראש ומקודדים ישירות לתוך כלי הבדיקה. לאחר מכן, בהינתן מודל BIM לבדיקה, יש צורך בעיבוד מקדים של המודל על מנת להבטיח שכל המידע הנדרש להרצת שגרות החישוב המוגדרות מראש נתון בצורה מפורשת, ותואם את אופן ייצוג המידע המצופה באותן שגרות חישוב. לדוגמא, על מנת לבחון אם חדר שירותי נכים מתוכנן אכן עומד בכל הדרישות, יש להגדיר במפורש מהו אותו החדר שתוכנן כשירותי נכים. בפלטפורמות התכן כמו Revit ניתן היום ליצור אלמנט אבסטרקטי המייצג חדר בצורה אוטומטית,

בלחיצת כפתור. אולם, לצורך בקרת תכן עלינו גם לוודא שהחדר מתויג בצורה התואמת את החוקים הלוגיים וכל שגרות החישוב המקודדות בפלטפורמת בקרת התכן. כאן, אפילו טעות סינטקטית כמו איות לא נכון, יכולה להביא לזיהוי לא נכון של אלמנטים קריטיים לבדיקה ולכן לתוצאות בדיקה שגויות. רק לאחר עיבוד המודל ניתן להפעיל את שגרות החישוב, לבצע את הבדיקות הנדרשות ולקבל דיווח אמין של התוצאות. מיותר לציין כי מדובר במאמץ ידני לא מבוטל. יש אף הטוענים כי המאמץ הידני הנדרש לצורך בקרת תכן אינו מתמעט, אלא פשוט עובר מהבדיקה עצמה אל עיבוד התקנות ועיבוד המודלים, כך שהתרומה של כלים אלה הופכת ללא מספיק משמעותית [10]. יחד עם זאת, נכון להיום, זהו התהליך המקובל בכל פלטפורמות בקרת התכן הקיימות. לכן, נסביר את השלבים בפירוט ונסקור את המאמצים הקיימים בספרות שנועדו להתגבר על מכשול זה.



איור 1 תהליך בקרת תכן אוטומטית כפי שתואר ב [9]

השלב הראשון בתהליך הינו תרגום של חוקים, תקנים ותקנות לפורמט קריא למחשב. מיצוי הדרישות מתוך מסמכי טקסט הוא אתגר גדול ונחשב לאחד החסמים העיקריים לאוטומציה מקיפה של מערכות בקרת תכן [11]. כיום, הנושא מטופל לרוב בצורה ידנית. כלומר, מומחים קוראים את התקנים והתקנות, מזהים את הדרישות הרלוונטיות ומתרגמים את הדרישות לכללים לוגיים שניתן לבדוק באמצעות כלים ממוחשבים. בשלב זה נעשית הפשטה של הדרישות לשפה לוגית שניתן לעבוד איתה בצורה מתמטית או אלגוריתמית. הכללים נכתבים בשפת תכנות ייעודית במערכות מבוססות כללים. למרות הדיוק וההתאמה האישית שתהליך זה מאפשר, הוא דורש זמן רב ומאמץ משמעותי, וכולל אתגרים בשמירה על עדכניות הכללים, אחידות והימנעות משגיאות אנוש. הצורך במאמץ אנושי משמעותי לתרגום חוקים, תקנים ותקנות משפה טבעית לפורמטים קריאים למחשב מגביל מאוד את יישומם של כלי בדיקה אוטומטית לטווח רחב של דרישות תקן.

גישות שונות לעיבוד טקסט הוצעו ונחקרו על מנת לפרש את התקנות באופן אוטומטי. חלק מהעבודה מתמקדת בסיווג של המסמכים עצמם כהכנה לניתוח נוסף והפקת כללים לבקרת תכן אוטומטית. לדוגמה, Salama and El Gohary [12] הציעו גישה לסיווג סעיפי תקן באמצעות שילוב טכניקות סיווג טקסט ומודל למידת מכונה. אך זהו כמובן סיווג התחלתי של המסמך, ונדרשת עבודה רבה על מנת לתרגם כל אחד מהסעיפים במסמך לכללי היסק. טכניקות של עיבוד שפה טבעית, (Natural Language Processing (NLP, ממלאות תפקיד מרכזי בהקשר זה. לדוגמה, Zhang and El-Gohary [14], [13] חקרו את היעילות של ניצול תכונות תחביריות וסמנטיות של הטקסט להפקה אוטומטית של מידע רגולטורי ממסמכי התקינה. הם הדגישו את יעילות הגישה המוצעת באמצעות ניתוח חלקים מתוך התקן הבינלאומי לבטיחות אש והראו תוצאות מבטיחות עם דיוק של 95%. אולם, כדי לתמוך בתהליך בקרת תכן אוטומטי יש צורך לא רק להפיק מושגים מהמסמך הרגולטורי אלא גם להפוך את הדרישות להצהרות לוגיות. לצורך זה, הם הציעו [15] שיטת עבודה שמתחילה ביישום NLP להפקת מידע רגולטורי מתוך הטקסט, ולאחר מכן המרת המידע לסעיפים לוגיים באמצעות סט של כללים להתאמת תבניות. גם שיטה זו הודגמה באמצעות חלק מתקן הבנייה הבינלאומי והראו דיוק גבוה. אך נכון להיום, היישומים של שיטות אלה מוגבל לחלקים קטנים מתוך התקן הבינלאומי המתמקדים תמיד בדרישות המפורשות והפחות מורכבות.

למעשה, לא כל הדרישות הרגולטוריות ניתנות לפירוש אוטומטי, חלקן מורכבות מדי ודורשות הבנה אנושית. כדי לקבל תובנות על היכולת לטפל בדרישות השונות ללא התערבות אנושית הציעו Zhang and El-Gohary [16] גישה לסיווג דרישות רגולטוריות עפ"י היכולת לפרשן בצורה אוטומטית. ולאחר מכן, על מנת לאפשר ניתוח של דרישות מורכבות (כגון דרישות עם סעיפים מקוננים מרובים). הם בחנו שימוש בתבניות משפט ותבניות מסמך ואף שיטות למידת מכונה לא מונחית על מנת להפיק את התבניות הרלוונטיות [17] (הסבר על למידת מכונה לא מונחית יובא בתת הפרק הבא). הדיוק שהושג בשיטות אלה היה מבטיח אך מוגבל ועמד על 76%.

לסיכום, תרגום טקסטים רגולטוריים לכללי היסק הוא תהליך מורכב ומאתגר. תהליך זה, שמתבצע כיום בצורה ידנית, מצריך הבנה עמוקה של התקנים והתקנות, כמו גם יכולת טכנית לתרגם את הדרישות לכללים הניתנים לבדיקה אלגוריתמית. מחקרים מתקדמים מציעים פתרונות כגון שימוש בטכניקות של עיבוד שפה טבעית ולמידת מכונה לסיווג והפקת מידע רגולטורי ממסמכי טקסט, אך יישום פרקטי מלא של שיטות אלו עדיין רחוק מלהיות מושלם.

השלב השני בתהליך המתואר באיור 1 הוא הכנת מודל ה-BIM כקלט לבדיקה. מסקירת יישומים קיימים לבקרת תכן אוטומטית ניתן לראות כי השלב של חילוץ מידע ממודל הבניין הוא לעתים קרובות מקור לטעויות עקב מידול לא מדויק או לא נכון, או חוסר מידע שסופק על ידי המשתמש בשלב התכנון [9], [18]. יתרה מכך, יישומים של בדיקות אוטומטיות של התאמה לתקנים דורשות רמות גבוהות של מידע סמנטי שצריך להיות נתון בצורה מפורשת במודל. עפ"י עבודתם של Solihin and Eastman [19] ניתן להבחין בארבע רמות של דרישות רגולטוריות בהתאם לרמת המידע הסמנטי הדרוש לצורך ביצוע הבדיקות בצורה אוטומטית:

(א) דרישות המסתמכות על כמות קטנה של מידע סמנטי מפורש

(ב) דרישות המחייבות ערכים או תכונות נגזרות מתוך מידע קיים בקלות

(ג) דרישות המסתמכות על מבנה נתונים מורחב וחישובי ערכים או תכונות מורכבים

(ד) דרישות המחייבות "הוכחה של פתרון", כלומר דרישות שאינן מרשמיות

היישומים הזמינים כיום מתמקדים בעיקר בשתי הקבוצות הראשונות ועדיין דורשים מהמשתמש להשלים כל מידע חסר ולתקן מידע שגוי, כחלק מהכנת המודל לבדיקה. אחד היישומים המתקדמים והנפוצים ביותר היום עבור בדיקות אוטומטיות של התאמה לתקנים הוא Solibri [20]. Solibri היא מערכת המאפשרת ניתוח ובדיקה של מודלים בתלת-ממד (BIM) לצורך איתור בעיות תכנוניות, תאימות לתקנים ולתקנות, וזיהוי התנגשויות בין אלמנטים שונים במודל. המערכת מבוססת על סט קשיח של כללים מוגדרים שמבטאים חלק מהדרישות של תקן הבנייה הבינלאומי (IBC) [21]. הכללים המוכנים מראש מתמקדים בדרישות בטיחות אש, נגישות ודרישות כלליות כגון גודל חדרים מינימלי, מספר חדרים במבנה וכד'. בשנים האחרונות Solibri מציעה למשתמשים אפשרויות מתקדמות להרחבת הפונקציונליות של התוכנה והתאמה אישית באמצעות ה-API (Application Programming Interface). ה-API מאפשר למפתחים ולמשתמשים מנוסים לגשת למגוון רחב של שירותים וכלים בתוך Solibri, ובכך להוסיף או להתאים אישית את יכולות התוכנה בהתאם לצרכים הספציפיים של הפרויקט או הארגון. משתמשים יכולים לפתח כלים מותאמים אישית שמבצעים בדיקות ייחודיות המתאימות לדרישות הפרויקט הספציפי שלהם. יחד עם זאת, כדי להשתמש ב-API של Solibri, המשתמשים צריכים להיות בעלי ידע נרחב בשפות תכנות ובכתיבת קוד. על המשתמשים להבין היטב את הפונקציונליות והמבנה של Solibri כדי לכתוב קוד שמנצל את ה-API בצורה אפקטיבית. כמובן שהכרה טובה עם תהליכי עבודה ב-BIM והבנה עמוקה של הדרישות הרגולטוריות היא חיונית.

כלי דומה לבקרת תכן אשר עוסק בדרישות תקן מאוד דומות הינו SmartReview APR המאפשר למשתמשים לבדוק מודלים באופן ויזואלי, לאתר ולסמן בעיות ותקלות, ולנהל את תהליך התיקונים והאישור [22]. הכלי לא מאפשר התאמה אישית והוספה של מערכות כללים, אולם הוא ידידותי יותר למשתמש כיוון שממשק כתוסף לתכנת Revit. שתי התוכנות מספקות פתרונות מתקדמים לבקרת תכן אוטומטית, אך שתיהן דורשות מהמשתמשים להשלים ידנית כל מידע נדרש שאינו נתון באופן מפורש במודל, או שנתון באופן שאינו תואם את הייצוג המצופה במערכת הכללים המובנית של הכלי.

בספרות ניתן למצוא פיתוחים נוספים, כמו למשל שימוש ב-Dynamo על מנת לבצע בדיקות התאמה לתקן ישירות בתוך Revit. Dynamo הוא כלי תכנות ויזואלי שמאפשר להרחיב את היכולות של Revit ומאפשר יצירת אלגוריתמים מותאמים אישית לביצוע משימות מורכבות ואוטומטיות בתוך מודל ה-BIM. באמצעות ממשק גרפי אינטואיטיבי, משתמשים יכולים לגרור ולשחרר רכיבים שונים על מנת לבנות סקריפטים שמתממשים עם Revit. Dynamo תומך במגוון רחב של יישומים, כולל תכנון פרמטרי, וניתוחים גאומטריים שונים. Harrell and Mathews בחנו את השימוש ב-Dynamo לכתיבת קוד לבדיקת התאמה של המודל לדרישות בטיחות באירלנד [23]. הם הדגימו כי אכן ניתן לבצע חלק מהבדיקות ישירות בתוך Revit, אולם, גם במקרה זה, דיוק התוצאות נשען במידה רבה על איכות המודל ואיכות המידע התכנוני המסופק ע"י הממדלים. מחקרם של Karmakar and Delhi [24] בחן את המכשולים ביישום מערכות בדיקה מסוג זה בתעשיית הבנייה בהודו. הם זיהו כי אחד האתגרים המרכזיים לאימוצם בתעשייה הינו הדרישה לעיבוד

נתונים ידני של המודלים. המחקר הדגיש את הצורך בעיבוד נתונים אוטומטי, כולל מילוי דרישות מידע בצורה אינטליגנטית ללא התערבות המשתמש והעשרה סמנטית.

לסיכום, ניתן לראות אתגרים מרכזיים בתרגום תקנים לכללים לוגיים ובצורך בנורמליזציה של מודל ה-BIM לפני בדיקה. אלו הם למעשה שני השלבים הראשוניים בתהליך בדיקה מבוסס כללי היסק. שני השלבים הבאים הם ביצוע הבדיקה ודיווח התוצאות והם נחשבים לשלבים טכניים. תהליך התרגום של תקנים למסמכים רגולטוריים קריאים למחשב כולל מכשולים משמעותיים, כגון המורכבות הרבה והכמות העצומה של המסמכים הקיימים. בעיות כגון חוסר בהירות בדרישות הכתובות ואף סתירות בין המסמכים השונים מהווים בעיה לא רק לתרגום אוטומטי של הדרישות לכללים אלא גם לתרגום ידני ע"י מומחים. המאמצים המחקריים כוללים פיתוח טכניקות למידת מכונה וניתוח שפה טבעית (NLP) כדי להתמודד עם אתגרים אלו, אולם הם רחוקים מלהוות כלי יישומי במצבם הנוכחי.

מאמצים הושקעו גם בפיתוח יכולות להשלמת מידע חסר באופן אוטומטי ולהעשרה סמנטית של מודלי ה-BIM לצורך הכנת המודל לבדיקה. זאת מתוך הבנה כי נורמליזציה של מודלי BIM היא הכרחית על מנת להבטיח את דיוק המידע ואת האחידות שלו לפני ביצוע בקרת תכן אוטומטית. האתגרים העומדים בפני תחום זה מדגישים את הצורך בהמשך מחקר ופיתוח טכנולוגיות מתקדמות שישפרו את היכולת ליישם בקרת תכן אוטומטית בצורה רחבה ויעילה יותר. בהקשר זה, תחום למידת מכונה נראה כמבטיח במיוחד להמשך מחקר. מעבר לשימוש בלמידת מכונה לנורמליזציה של המודלים, השילוב של למידת מכונה ובינה מלאכותית יכול להביא לפיתוח אלגוריתמים מתקדמים שיכולים להחליף חלק מכללי ההיסק המסורתיים, ולאפשר ביצוע בדיקות תכן בהתבסס על למידה וחיזוי. למרות שזהו "חלום רחוק" נכון להיום, ההתפתחות בתחום היא מהירה ומבטיחה. ניתן להניח שבקרוב נוכל לראות יישומים פרקטיים שישפרו את היעילות והדיוק של בקרת התכן האוטומטית באמצעות למידת מכונה.

בפרקים הבא נסקור את המאמצים הקיימים באוטומציה של תהליך נורמליזציה של מודלי ה-BIM כקדם לבדיקת התאמה לתקנים באמצעות תהליך שנקרא העשרה סמנטית. לאחר מכן נסביר את הפוטנציאל של שימוש בלמידת מכונה לתמיכה בתהליכים אלה.

2.2. העשרה סמנטית ככלי תומך בקרת תכן

השימוש במידול מידע בניין, באופן תיאורטי, מאפשר תהליכים אוטומטיים של בדיקת התאמה לתקנים, התאמה לדרישות לקוח, אנליזות מבניות ואנליזות של צריכת אנרגיה. אחד הקשיים במעבר לתהליכים אוטומטיים מסוג זה הוא הצורך במידע מפורש, מעבר למידע הבסיסי שמתקבל בדרך כלל כאשר נבנה המודל. כך לדוגמא אנליזות אנרגיה דורשות מידע אודות החומרים ממנו עשויים האלמנטים השונים ומידת התנגדותם למעבר חום, החזרת אור של זכוכיות וכדומה. בנוסף, על מנת להשתמש בכל המידע הקיים במודל עלינו לוודא כי כל המידע יישמר בתהליך הייצוא ויוגדר בפורמט המתאים בשגרות הייבוא של תכנת האנליזה השונות. למרות השימוש בפורמט הפתוח IFC להעברת מידע בין התכנות השונות, עיקר המידע המועבר הינו אודות הצורה הגיאומטרית של האלמנטים המבניים והיחסים המרחביים בין האלמנטים. על מנת להשתמש במודל לצרכי אנליזה, בדרך כלל נדרש שלב של עיבוד כאשר המודל ישמש כבסיס גיאומטרי בלבד, וכל שאר המידע הנדרש יושלם באופן ידני.

פלטפורמות ה-BIM הקיימות אינן מסוגלות לפרש מידע שאינו מיוצג במפורש במודל, שכן הן חסרות את האינטליגנציה שיש למומחה בתחום לגבי המשמעות של הטופולוגיה, הפונקציה וההתנהגות של האלמנטים המיוצגים. המטרה הבסיסית של העשרה סמנטית של מודלי BIM היא להסיק באופן אוטומטי מידע חדש על סמך המידע המפורש המאוחסן במודל, ולספק ייצוג מפורש של המידע החדש כדי לאפשר שימוש בו ביישום או בתהליך היעד [25]. במחקר זה, תהליך היעד יהיה בדקיה אוטומטית של התאמה לתקנים.

קיימות גישות שונות להעשרה סמנטית של מודלי BIM. למשל, מאמצי מחקר רבים התמקדו ביישום שאילתות על המידע המיוצג ב-BIM כדי להסיק את המידע הבלתי מפורש המאוחסן במודל. שפות שאילתא ייחודיות ל-BIM, כמו [26] BIMQL ו-[27] QL4BIM, מאפשרות הפעלה של אופרטורים מרחביים על הייצוגים הגיאומטריים של אובייקטים בודדים במודל כדי להסיק מידע משמעותי המיוצג במודלים במרומו. עם זאת, תוצאות ההיסק מדווחות למשתמש אך לא מיוצגות כחלק ממידע הבניין, מה שמונע את השימוש במידע החדש בתהליכי המשך. באופן כללי, שיטות אלה נקראות הסקה דדוקטיבית, ואלה השיטות הנפוצות ביותר להעשרה סמנטית. הסקה דדוקטיבית היא תהליך של הסקת מסקנות מנומקות בצורה לוגית מן הכלל אל הפרט [28]. אחד הסוגים העיקריים של הסקה דדוקטיבית הוא חשיבה מותנית, שבה משתמשים בהנחות יסוד ועקרונות כלליים על מנת להסיק מהם מסקנות לגבי המקרה הפרטי, למעשה שימוש בכללים לוגיים (IF-THEN). זהו הבסיס למערכות מומחה שנועדו לחקות את יכולת קבלת ההחלטות של מומחה אנושי בתחום ספציפי [29].

מנוע ה-SeeBIM למשל [30] הוא כלי להעדרה סמנטית המתבסס על אותם עקרונות כשל מערכת מומחה. המערכת מכילה בתוכה ידע שנרכש ממומחים בתחום בצורה של הצהרות לוגיות. הפלטפורמה מקבלת קובץ IFC כקלט ומשתמשת בקבוצה מוגדרת מראש של כללים כדי להסיק מידע חדש על המודל. לאחר מכן, הפלטפורמה כותבת קובץ IFC חדש המכיל גם ייצוג של מודל הבניין המקורי וגם ייצוג של העובדות החדשות שהוסקו. המטרה הסופית של התהליך המתואר היא לספק ייצוג מפורש של כל המידע הנדרש בתוך קובץ ה-IFC החדש. ערכות הכללים במערכת מייצגות ידע של מומחים בתחום בצורה של הצהרות IF-THEN לוגיות המתבטאות בגיאומטריה של אלמנטים, תכונות, פונקציונליות וקשרים לאלמנטים אחרים, בדומה לשפות השאילתא הספציפיות לתחום שנחקרו בעבר. שימוש במערכת ה-SeeBIM הודגם לצורך העשרה סמנטית של מודל גשר אשר התקבל מסריקת לייזר של גשר קיים [31]. כלומר, המודל הראשוני הכיל רק גיאומטריה תלת-ממדית ללא כל מידע סמנטי, כולל סוגי אובייקטים, והועשר באמצעות ערכות כללים קפדניות. למרות שזה הוביל לתוצאות סיווג מדויקות, הליך כזה יכול להיות ארוך כאשר עוסקים במספר גדול של סוגי אלמנטים, ועלול להיות פחות יעיל כאשר הגיאומטריה של האלמנטים המסווגים אינה ייחודית מספיק.

אחד היתרונות העיקריים של מערכות מבוססות הסקה דדוקטיבית הוא שהן מספקות מסקנות מהימנות, אלא אם כן הכללים לא הוגדרו נכון או שהיו שגיאות בנתוני הקלט. במילים אחרות, אם מתחילים עם "אמת" אפשר להסיק רק אמיתות חדשות [32]. יתרון נוסף הוא שהכללים ניתנים לקריאה לא רק למחשב אלא גם למשתמש ולכן המסקנות ניתנות לפירוש ולאימות על ידי מומחים אנושיים [29]. למרבה הצער, שיטות אלה יובילו למסקנה רק במקרים שבהם ניתן לקבוע תוצאות צפויות קבועות ומוגדרות מראש על סמך קבוצה של עובדות ידועות [32] וזה אינו תמיד המצב כאשר מדובר על תכן מבנים. אחת הבעיות

החשובות איתן מתמודדות שיטות ההעשרה הסמנטית היא בעיית הזיהוי וסיווג אלמנטים. הרבה מהתכונות של אלמנטים מבניים ניתנות להסקה מתוך הזהות שלהם, ולכן יש חשיבות רבה בזיהוי וקטלוג נכון של כל האלמנטים במודל. בעוד שלא אלמנטים רבים ישנן תכונות גיאומטריות מובהקות המצביעות על זהות האלמנט (עמוד תמיד יהיה אנכי או קרוב לאנכי, קורה תהיה אופקית וכן הלאה) לא כך הדבר בכל האלמנטים הקיימים. ישנם אלמנטים מרחביים מופשטים אשר לא נבדלים הרבה בתכונות הגיאומטריות ושיטות מבוססות חוקים אינן יעילות במקרים אלה.

'חדר' הוא אלמנט מסוג זה, אשר בנוסף להיותו אלמנט מבני במודל הוא גם האלמנט הבסיסי ביותר בתכנון הבניין. לכן, ישנה חשיבות רבה לזיהוי וסיווג נכון של חדרי המבנה המתוכנן, הן לצורך בדיקת התאמה לתקנים והן לבדיקת התאמה לדרישות לקוח. הגיאומטריה של חדר בבניין היא דומה מאוד לכל סוגי החדרים כך שאין מספיק תכונות גיאומטריות שבאמצעותם ניתן להגדיר חוקים לוגיים לזיהוי הסוגים השונים. בעיה זו דורשת גישה אחרת לתהליך ההעשרה הסמנטית, אשר לא מסתמכת על חוקים לוגיים. עבודתם של Bloch and Sacks [33] מדגימה יישום של גישת למידת מכונה מונחית באמצעות שימוש באלגוריתם של רשת עצבית מלאכותית (ANN) לצורך סיווג חדרים במבנה מגורים. הרעיון בלמידה מונחית הוא לספק למכונה דוגמאות של אלמנטים עם תווית הסיווג שלהם ומטרת האלגוריתם היא לחזות את הסיווג של אלמנט חדש אשר לא נכלל בדוגמאות, כאשר כל חיזוי מתקבל עם רמת וודאות מחושבת. על מנת לנצל את המידע הרב הטמון ביחסים הטופולוגיים בין סוגי החדרים השונים, השימוש באלגוריתם נעשה בצורה איטרטיבית. באיטרציה הראשונה, האלגוריתם מקבל מידע אודות הגיאומטריה בלבד של החללים השונים בדירה. לאחר שמבוצע חיזוי ראשון, משתמשים בסיווג של החלל בעל רמת הוודאות המחושבת הגבוהה ביותר כדי לאפיין את היחסים הטופולוגיים של שאר החללים אליו, וכך גם בכל איטרציה נוספת מזוהה חלל נוסף. התהליך מופסק כאשר כל החללים בדירה מזוהים או כאשר רמת הוודאות הגבוהה ביותר יורדת מתחת לסף מוגדר מראש. עם זאת, הדיוק שהושג במקרה המבחן המוצג הוא רק 82% מכיוון שהוא מסתמך על מערך נתונים מוגבל מאוד. היכולת ליישם שיטות כאלה תלויה בזמינות של מערך נתונים גדול ומתוגיג של וריאציות תכנון. בעיה נוספת היא הכללה, שכן השיטה המוצעת הודגמה לסיווג חללים פונקציונליים בדירות מגורים בלבד, ולא נבדקה יישומה בסוגי מבנים אחרים.

ANN שימשו גם לסיווג של קומות בבניין לפי תפקידם והשימוש המיועד שלהם [34]. אותה עבודה גם מדגימה את השימוש בטכניקת למידה ללא פיקוח (הסבר בפרק הבא) לאיתור סיווגים שגויים בקובץ IFC. באופן דומה, Koo and Shin [35] הדגישו גישה לבדיקת שלמות ונכונות מיפוי המחלקות מהמודל עצמו לייצוג ה IFC. ניתן להתייחס לגישות המתוארות לעיל כטכניקות חשיבה אינדוקטיבית. חשיבה אינדוקטיבית היא דרך חשיבה לוגית, שבה נעשות הכללות על סמך ניסיון קודם. כלומר, המסקנות הן תחזיות לגבי מקרים חדשים המבוססים על תצפיות קודמות. אלגוריתמים של למידת מכונה הם אינדוקטיביים מטבעם מכיוון שהם מאומנים לספק תחזיות המבוססות על סט של דוגמאות. התוצאות המתקבלות הן הסתברויות ולא מובטח שהן תמיד נכונות. אולם, העבודות שהוזכרו לעיל הדגישו ביצועים טובים של אלגוריתמים שונים של למידת מכונה לשימושים שונים הרלוונטיים להעשרה סמנטית, כמו למשל לסיווג רכיבי בניין.

בעוד נתח גדול של מחקרים עסק בהעשרה סמנטית מתבססת על תכונות של אלמנטים בודדים, מידע על יחסים בין האלמנטים הוא בעל ערך רב בהקשר של מידע בניין. בניסיון לנצל מידע זה, Luo et al. [36]

הציגו מסגרת למידה עמוקה גיאומטרית לסיווג אובייקטי BIM. המסגרת כוללת שני חלקים: החלק הגיאומטרי שמתבסס על תכונות ברמת האובייקט הבודד, והחלק היחסי שמעבד נתונים יחסיים כדי ללמוד את דפוסי האינטראקציה בין אובייקטים שונים במבנה. למרות שהדגימו שיפור בדיוק הסיווג והגמישות, בעיות הקשורות לתיג שגוי אפשרי, אובדן נתונים יחסיים בקבצי IFC, הצורך במערכי נתונים מקיפים יותר שיכללו מגוון רחב של אובייקטי BIM ויחסייהם, מהווים אתגר להמשך הפיתוח.

שיטות חישוביות שונות להעשרה סמנטית לתמיכה בבדיקת תכן אוטומטית נותחו בעבודתם של Bloch and Sacks [37]. מחקר זה הגדיר ארבע קבוצות של משימות העשרה סמנטית שימושיות להכנת מודל BIM לבדיקה: משימות סיווג, משימות שיוך, משימות יצירה ומשימות חישוב. הגישות החישוביות להסקת מידע בכל אחת מהקבוצות יכולות להיות מגוונות, חלקן מבוססות על הסקה דדוקטיבית וחלקן מבוססות הסקה אינדוקטיבית. נראה כי השימוש בלמידת מכונה לצורך העשרה סמנטית של מודלים ככלי לתמיכה בבקרת תכן אוטומטית נושא פוטנציאל גבוה מאוד. בפרק הבא נסקור ונסביר באופן כללי מהי למידת מכונה, נפרט על הגישות השונות הקיימות ללמידת מכונה כגון למידה מונחית, למידה לא מונחית ולמידה באמצעות גרפים, ונבחן כיצד כל אחת מהן יכולה לתרום לתהליך העשרה סמנטית של מודלים ולבקרת תכן אוטומטית.

2.3. למידת מכונה ולמידה על בסיס גרפים

למידת מכונה (Machine Learning) היא תת-תחום של בינה מלאכותית (AI) המתמקד בפיתוח אלגוריתמים ומודלים שמאפשרים למערכות ללמוד ולהשתפר מביצועים קודמים על סמך נתונים היסטוריים, ללא צורך בתכנות מפורש. בלמידת מכונה, המערכת מקבלת נתונים, מזהה תבניות ומבצעת תחזיות או החלטות בהתבסס על הנתונים הללו. אחד הסוגים העיקריים של למידת מכונה הוא למידה מונחית (Supervised Learning), שבה המערכת לומדת ממערכת נתונים הכוללת דוגמאות המיוצגות באמצעות מאפיינים (features) ותוויות (labels). התהליך מתחיל באימון המודל על הנתונים המסומנים כדי ללמוד את הקשר בין הדוגמאות לתוויות, ולאחר מכן המודל מסוגל לחזות את התוויות של דוגמאות חדשות [38]. שימושים אפשריים בבקרת תכן אוטומטית כוללים סיווג מסמכים רגולטוריים או תיוג חלקים במודל BIM לפי קריטריונים שונים. סוג נוסף הוא למידה לא-מונחית (Unsupervised Learning), שבה המערכת לומדת ממערכת נתונים ללא תוויות ומנסה לזהות מבנים או תבניות בנתונים כמו קבוצות (clusters).

מודלים של בינה מלאכותית משיגים תוצאות מרשימות במגוון עצום של תחומים באמצעות אלגוריתמים אשר ניתן לחלק לשלוש קבוצות עיקריות: ראייה ממוחשבת, ניתוח שפה ודיבור, וניתוח תחזיתי. כאשר הסיבה העיקרית להצלחה בתחומים אלה נעוץ בעובדה שיש סדר ומבנה ברור לדאטה. בתחום ראייה ממוחשבת (Computer Vision) אלגוריתמי הבינה המלאכותית מציעים פתרונות מתקדמים לזיהוי ולניתוח תמונות ווידאו. כאן יש משמעות רבה למבנה הדאטה, תמונה מיוצגת על ידי מטריצה של פיקסלים ויש משמעות לקרבה של פיקסלים אחד לשני. על בסיס זה, רשתות עצביות כמו Convolutional Neural Networks מצליחות לבצע משימות כמו זיהוי אובייקטים וסיווגם באופן יעיל ובדיוק גבוה [39]. לניתוח שפה ודיבור פותחו אלגוריתמים מתקדמים לניתוח ולהבנת טקסטים מורכבים ואף לתרגום אוטומטי. טקסט מורכב ממשפטים שמורכבים ממילים, כאשר יש משמעות לסדר של המילים והמשפטים. המשמעות שיש לסדר הובילה לפיתוח רשתות מבוססות מנגנון ה-Attention - שהפך לכלי חשוב בעיבוד שפה [40].

לבסוף, בתחום הניתוח התחזיתי מתפתחים מודלים שנועדו לחזות מגמות ואירועים עתידיים בדיוק גבוה במגוון רחב של תחומים כמו כלכלה, תחזיות פוליטיות, מרקטינג, ואף תחזיות שבר של מערכות מבניות [41]. לעיתים, בתחומים מסוימים הדאטה אינו מסודר בצורה מוגדרת מספיק, מה שמקשה על הלמידה ובסופו של דבר על דיוק התוצאות. גם דאטה טבלאי לעיתים אינו מספיק כיוון שלרוב הקשר בין התאים השונים בטבלה לא מיוצג.

יישומי למידת מכונה לתעשיית הבנייה הוא תחום מחקר שצומח ללא הרף, במיוחד בעשור האחרון [42]. בניגוד לגישה הדדוקטיבית, יישומי למידת מכונה אינם מסתמכים על בסיס ידע. במקום זאת, המודלים מאומנים באמצעות דוגמאות. בשלב האימון הרעיון הוא לספק למכונה מופעים מתויגים רבים ככל האפשר על מנת ליצור מאוחר יותר מסווג המסוגל לסווג מופעים לא מתויגים שלא הוצגו במהלך האימון [38]. הגמישות שמודלים אלה מספקים היא אחד היתרונות הגדולים שלהם, שכן הם אינם מוגבלים לתרחישים מוגדרים מראש ולתוצאות אפשריות צפויות. עם זאת, בהקשר של בקרת תכן, עבודות קודמות בנושא מצביעות על מספר חסרונות עיקריים לשימוש בלמידה מונחית. חיסרון אחד הוא היעדר סט נתונים איכותיים ומתויגים לאימון. למעשה, היעדר מערכי נתונים גדולים באיכות טובה מזוהה כחסרון ומגבלה עיקריים למימושים אפשריים שונים של למידת מכונה בתחומים שונים, כולל בתחום הבנייה [43]. על מנת להתגבר על חיסרון זה, במערכת הבריאות למשל, חוקרים רבים מתמקדים ביצירת נתונים סינתטיים לצורך אימון המודלים [44], [45], [46]. באופן דומה, בתחום הבנייה, Neuhausen et al [47] עסק בהגדלת מערך נתונים קיים קטן עם נתונים סינתטיים כדי לאמן מודל למידה לניטור תנועת פועלי בניין באתר. כתוצאה מכך, מודל שאומן על קבוצת הנתונים המשופרת הוביל לתוצאות מדויקות יותר מהמודל שאומן על נתונים אמיתיים בלבד.

המגבלה השנייה בשימוש בלמידת מכונה לצורך בקרת תכן אוטומטית שהתגלתה במחקרים קודמים, היא שהצורה הטבלאית לייצוג נתונים כפיי שמצופה במודלי הלמידה הקלאסיים אינה מספיקה לייצוג מידע ברמת הפירוט הנדרשת לבדיקת התאמה לתקנים. בדרך כלל, מערך הנתונים הטבלאי מתרכז באלמנט מבנה בודד כשורה במערך הנתונים, כאשר לכל נקודת נתונים כזו ניתן להקצות רשימה של תכונות (בדרך כלל מייצגות כמה מאפיינים גיאומטריים או פונקציונליים של האלמנט). אולם, קשה לייצג יחסים מרחביים בין אלמנטי מבנה אלה מכיוון שכל שורת נתונים כזו במערך הנתונים היא לחלוטין בלתי תלויה בשורות האחרות. כל מבנה מורכב מקבוצה גדולה של אלמנטים. לאלמנט בניין בודד עשויים להיות קשרים מרחביים לכל האלמנטים המקיפים אותו, אך יכול גם להתייחס למערכת שונה של אלמנטים על ידי קשר פונקציונלי. סוגים אלה של יחסים ממלאים תפקיד משמעותי בדרישות הרגולטוריות השונות. בעוד שצורה טבלאית אינה מתאימה לייצוג יחסים מסוג זה, ניתן לייצגם בקלות באמצעות גרפים על ידי ייצוג אלמנטי הבניין כצמתים והיחסים השונים ביניהם כקשתות [48]. ההתקדמות האחרונה בתחום הבינה המלאכותית כוללת פיתוח של מודלים הנקראים Graph Neural Network (GNN) המסוגלים ליישם מודל למידה ישירות על מבנה נתוני גרף. מודלים מסוג זה שימושיים במיוחד כשמדובר בנתונים שיש להם מבנה יחסים מורכב, כמו ברשתות חברתיות.

ניתן לייצג באמצעות גרפים המון סוגים של אובייקטים, ויש מספר משימות שונות שניתן להתייחס אליהן. המשימות העיקריות בהן מתמקדים האלגוריתמים הינם סיווג צמתים, סיווג גרפים וחיזוי קשתות. הרעיון העיקרי של האלגוריתמים טמון בתהליך העברת הודעות (message passing) שמטרתו לשפר את הייצוגים

של הצמתים בגרף על ידי העברת מידע (הודעות) בין הצמתים השכנים. המטרה של תהליך זה היא לאפשר לכל צומת לקבל מידע מהצמתים הקרובים אליו בגרף, ובכך לשפר את ההבנה הכוללת של מבנה הגרף והתכונות שלו. בתחילת התהליך כל צומת בגרף מקבל ייצוג התחלתי, שהוא בדרך כלל וקטור של תכונות המאפיינות את הצומת. לדוגמה, אם הצמתים בגרף מייצגים אנשים, הייצוג ההתחלתי יכול לכלול מידע כמו גיל, מין ומיקום גיאוגרפי. באותה מידה, אם צומת מייצגת חדר במבנה, הייצוג ההתחלתי יכול לכלול נתונים על הפונקציונליות של החדר, גודל, מספר פתחים וכדומה. בכל איטרציה של התהליך, כל צומת מעביר "הודעות" לצמתים השכנים שלו. ההודעה היא למעשה וקטור של מידע שמחושב על בסיס הייצוג הנוכחי של הצומת. הצמתים השכנים מאחדים את כל ההודעות שהם קיבלו על ידי פונקציה מסוימת, כמו סכימה או ממוצע של ההודעות שהתקבלו. פעולה זו מאפשרת לצומת לקבל מידע מכל השכנים שלו בצורה מרוכזת. לבסוף, הייצוג של הצומת מתעדכן על בסיס ההודעות המאוחדות שהתקבלו ועל בסיס הייצוג הקודם של הצומת עצמו. תהליך זה חוזר על עצמו במספר איטרציות, כך שהמידע מועבר ומעודכן בצורה הדרגתית לאורך כל הגרף.

לצורך דוגמא, נניח שיש לנו גרף שמייצג רשת חברתית, כאשר כל צומת מייצג אדם וכל קשת מייצגת קשר חברתי בין אנשים. בתחילת התהליך, לכל אדם יש וקטור שמייצג את התכונות שלו (גיל, מין, מצב משפחתי, תחומי עניין וכו'). בכל איטרציה, כל אדם שולח הודעה לשכנים שלו עם מידע עליו. השכנים מקבלים את ההודעות מכל חבריהם, מאחדים את המידע, ומשתמשים בו כדי לעדכן את הייצוג שלהם. בצורה זו, כל אדם מקבל מידע נוסף על החברים שלו והחברים של החברים שלו לאורך מספר איטרציות. אם אנחנו רוצים לזהות אילו אנשים ישתייכו לקהילה מסוימת בתוך הרשת החברתית, נוכל להשתמש בייצוגים המעודכנים של הצמתים כדי לבצע סיווג זה.

הגרף הוא בעל משמעות רבה במיוחד במקרים בהם היחסים בין האלמנטים השונים הם מרכזיים להבנת המערכת כולה. במבנים, לאלמנטים שונים יש קשרים מרחביים ופונקציונליים המכתיבים את השימוש והתחזוקה שלהם. לדוגמה, חדרים סמוכים יכולים לחלוק קירות, מערכות אוורור ותשתיות חשמל. באמצעות גרף ניתן לייצג קשרים אלו בקלות ע"י ייצוג היחסים המרחביים בין החדרים. ניתן להוסיף לתכונות הצמתים מידע נוסף כמו גודל החדר, מיקום שקעים, מספר החלונות וכדומה. לקשתות ניתן להוסיף מידע כמו אורך המסדרון או סוג הדלת המקשרת בין החדרים. אלגוריתמי למידה מבוססים גרפים מסוגלים ללמוד לא רק מהתכונות של כל צומת בודד, אלא גם מהקשרים בינו לבין צמתים אחרים. זה מאפשר ללמוד ולחזות תופעות מורכבות שאינן ניתנות לזיהוי כאשר מתעלמים מהקשרים הללו.

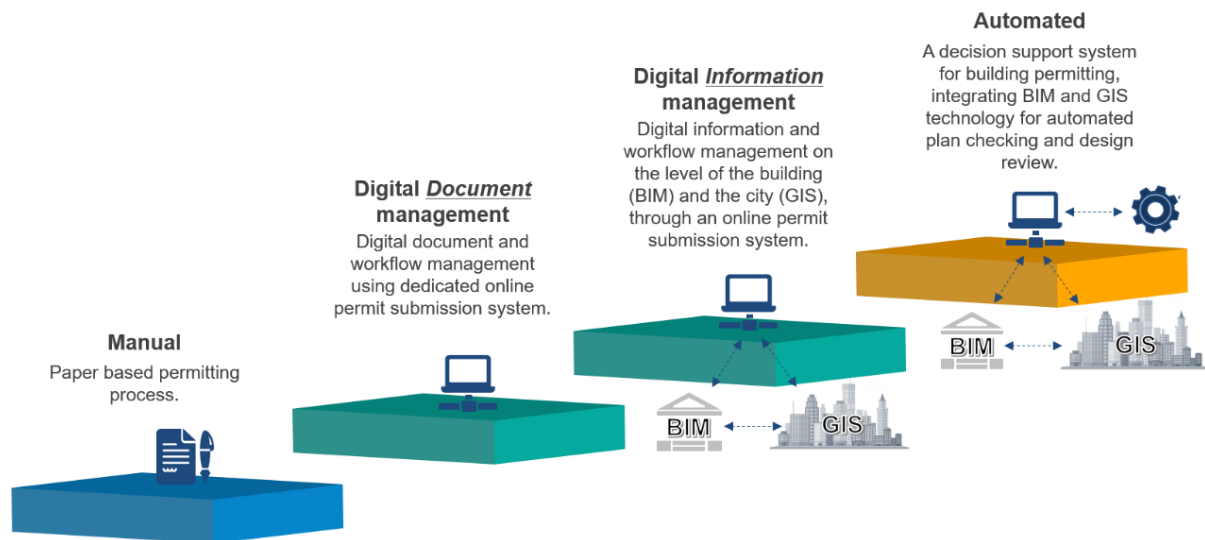
3. בקרת תכן אוטומטית כחלק מתהליך הרישוי

חשיבות תהליך הרישוי טמונה, בין היתר, בשמירה על בטיחותם של משתמשי הבניין הבודד וגם בהסדרת המרחב העירוני. עם זאת, התלות של התהליך במסגרת המשפטית, ריבוי הגורמים המעורבים בתהליך וחוסר השקיפות בהם התהליך בד"כ מאופיין, הופכים את תהליך הרישוי לסבוך ומורכב, ולעיתים ארוך משמעותית מהצפוי. לאור ההתקדמות הטכנולוגית המהירה ולאור הניסיון של תעשיית הבנייה לאמץ חדשנות, דיגיטציה של תהליכים בענף הבנייה הפכה לאחד הנושאים החשובים ביותר שנדונים לאחרונה. אין זה מפתיע כי נושא הדיגיטציה ברישוי מעורר עניין רב בשנים האחרונות גם כן, [52], [51], [50], [49], [56], [55], [54], [53]. אחד השינויים הטכנולוגיים המשמעותיים ביותר לענף הבנייה הוא האפשרות לקשר בין המימד הפיזי למימד הדיגיטלי. הקשר הזה ניתן להשגה ע"י שימוש בטכנולוגיית BIM אשר מהווה ייצוג דיגיטלי מלא של בנין המתקיים במימד הפיזי. כך ניתן לבחון מבנה לפני שהוא נבנה באמצעות סימולציות שונות, לנטר ביעילות את תהליך הבנייה בשטח ולקבל מידע בזמן אמת אודות תפקוד המבנה הקיים.

בחינת תכן בסביבה דיגיטלית וויזואלית תוך שילוב ושימוש במגוון מערכות מידע, כמו מערכות מידע גיאוגרפיות (GIS), תאפשר ביצוע בקרה מדויקת יותר תוך ראיית תמונה רחבה בקלות, כולל מאפייני הסביבה הבנויה ומאפייני התכן המוצע. יתרה מכך, ייצוג תכן באמצעות BIM מהווה פוטנציאל לאוטומציה של תהליך הבקרה. מאז החזון שהוצג עוד בשנת 1975 בעבודתו של Eastman [57] בהצגת מערכת אוטומטית לבדיקת התאמה לתקנים, מחקרים רבים עסקו בנושא, ואף פותחו כלים המאפשרים לבחון תכן נתון באמצעות מערכות של כללים [22], [20]. אולם, פוטנציאל זה לא ממומש עד סופו והכלים לא מיושמים בתעשייה, כך שנכון להיום הליך בקרת התכן מתבצע עדיין בצורה ידנית.

ענף הבנייה סובל מבעיית פריון נמוך. לפי הצעת דוח מקינזי [64] ניתן לשפר את פרודוקטיביות הבנייה באמצעות כלים דיגיטליים, אימוץ טכנולוגיות שונות, אוטומציה וחדשנות. שלושה כיוונים מוזכרים בדוח כהזדמנויות להגדלת הפריון; אחת היא תמיכה רובוטית לפעילויות ידניות באתר, השנייה היא יישום בנייה מודולרית וייצור מחוץ לאתר כולל הדפסת תלת מימד, ההזדמנות השלישית היא דיגיטציה של הליכי תכנון, רישוי וניהול. תחום הרישוי, למרבה הצער, טרם עבר תהליך של דיגיטציה במלואה, ואוטומציה כמעט ולא מאומצת בתהליך זה.

חשוב להבין את ההבדלים בין תהליכים דיגיטליים לתהליכים אוטומטיים ברישוי. אנו יכולים לזהות ארבע רמות שונות של דיגיטציה/אוטומציה ברישוי כפי שמתואר באיור 2. רשויות רבות ברחבי העולם נוטשות את תהליך הרישוי הידני המבוסס על נייר (הרמה הראשונה באיור), ומיישמות מערכת דיגיטלית מקוונת להגשת והנפקת היתרי בנייה (הרמה השנייה). עם זאת, מערכת זו מספקת רק כלי מתקדם לניהול מסמכים ותהליכים, וממשיכה להתבסס על מידע תכנוני בדו מימד בדיוק כמו ברמה הראשונה. למעשה, זה כרגע גם המצב בישראל לאחר המעבר למערכת המקוונת "רישוי זמין" המאפשרת הגשת בקשות להיתרי בנייה בצורה מקוונת. הרמה הבאה היא המעבר מניהול תהליכים בצורה דיגיטלית לניהול מידע דיגיטלי, זה כולל מידע תכנוני על הבניין המתוכנן וגם מידע על האינטגרציה של הבניין הבודד במסגרת העיר כולה. כאן ישנם שני אתגרים מרכזיים: האחד הוא אימוץ מערכת הגשת היתרים מבוססת BIM, והשני הוא אינטגרציה בין BIM ו-GIS. ברמה הגבוהה ביותר, התהליך הדיגיטלי משתלב עם כלים לתמיכה בקבלת החלטות, כגון כלי בדיקת תוכניות אוטומטי.



איור 2 מדרגות דיגיטציה ואוטומציה ברישוי, מתוך [49]

בשנים האחרונות, נושא המעבר של תהליכי רישוי לרמות גבוהות יותר של דיגיטציה מקבל תשומת לב רבה, גם במחקרים וגם בפרקטיקה. לרוב, המחקרים מתמקדים בהיבטים הטכניים והטכנולוגיים [65], [66] אך יחד עם זאת, האתגרים באימוץ ויישום טכנולוגיות מתקדמות בענף ובפרט במגזר הציבורי נחקרו בהרחבה גם כן. האתגרים של יישום BIM לרישוי הודגמו באמצעות מקרה בוחן של עיריית טאלין [67] והם כוללים מגוון של גורמים טכנולוגיים, ארגוניים וסביבתיים. עם זאת, במדינות שונות, האתגר המרכזי יכול להיות הרבה יותר בסיסי וזהו היעדר ידע. סקר שנערך בפלורידה בשנת 2021 [68] מצא ש-58% מבין בעלי התפקידים במגזר הציבורי ו-60% מבין הקבלנים ואנשי המקצוע בתחום התכנון שהשתתפו בסקר אינם מכירים את טכנולוגיית BIM. למרות שרוב אנשי המקצוע בתכנון תמכו ביישום BIM בתהליך הרישוי, כאשר נשאלו נציגי המגזר הציבורי לדעתם, רק 50% מהמשתתפים בסקר הביעו תמיכה בשילוב BIM ברישוי. יתרה מזאת, באמצעות ראיונות למיפוי תפיסות בעלי העניין על הגורמים המשפיעים על אימוץ BIM בתהליך הרישוי [56], הסיקו החוקרים כי הגורמים המשפיעים על אימוץ BIM בתהליך הרישוי שונים מהגורמים המשפיעים על אימוץ BIM בכל תעשיית הבנייה.

הצורך לייצג את המידע הנדרש בצורה מוסכמת בתוך מודלי ה-BIM על מנת לאפשר אוטומציה של הבדיקות בהתאם לתהליך הרישוי נחקר רבות, למשל בהקשר לרישוי של מבנים טרומיים [69]. דרישות המידע המדויקות שיאפשרו אוטומציה וייעול של תהליך הרישוי טרם הוגדרו. כמו כן, לא ברור אם הדרישות יהיו ניתנות להרחבה לרשויות מקומיות שונות ולסוגי מבנים שונים, למשל האם אותם כלים יהיו ישימים גם לבנייה באתר וגם למבנים טרומיים. בקרת תכן אוטומטית תלויה במידה רבה בנכונות המידע, שלמותו ובדיוקו, אך גם בהתאמת המידע התכנוני למידע הרגולטורי. לרוב, בדרישות תקן מורכבות נמצא מונח "רגולטוריים" שלא מיוצגים בדרך כלל במסמכי התכן ואף לא במודל ה-BIM. למשל, המונח "מוצא בטוח" מוגדר בתקנות בטיחות אש כ"חלק מדרך מוצא, המופרד משאר חלקי הבניין על ידי אלמנטים עמידים באש ודלתות אש והמוביל אל היציאה או אל מחוץ לבניין". זהו מונח שאין לו ייצוג מפורש במודל ה-BIM ולכן

לא ניתן לומר שהמידע אודות "מוצא בטוח" נתון באופן קריא למחשב כך שניתן להשתמש בו לצורך בדיקה. המתכננים והממדלים יוצרים את האלמנטים הבדידים כגון דלתות, קירות עמידים באש ועוד. כאשר בעל מקצוע אנושי מסתכל על המודל, הוא יודע להסיק מהו המוצא הבטוח. אולם, מבחינת המחשב, המידע הזה לא קיים מכיוון שהוא לא נוצר באופן מפורש במודל ה-BIM.

ישנן דרישות מידע בסיסיות יותר, כמו למשל סיווג ידוע מראש ומקובל של פונקציות החדרים השונים. זהו מידע שבדרך כלל המתכננים או הממדלים כן יוצרים במודל, אך נדרשת שכבה של סטנדרטיזציה על מנת שניתן יהיה להשתמש במידע זה בתהליך הבדיקה. במדינות שונות שבהן נעשתה עבודה לאימוץ BIM בתהליך הרישוי, הגדרת דרישות המידע היווה מאמץ מרכזי בתהליך. ההשקעה בהגדרת סטנדרטים ובקריטריונים ברורים למידע ב-BIM הייתה קריטית להצלחת התהליך ולאפשרות של בקרת תכן אוטומטית. יש לזכור כי יש איזון עדין בין כמות המידע שאנחנו יכולים לדרוש מהמתכננים להשלים לבין הערך שהם יכולים לקבל ממערכת בדיקה אוטומטית. אם המתכננים יצטרכו להשקיע מאמץ רב מדי כדי להשלים את כל דרישות המידע, המאמץ הנוסף לאו דווקא יצדיק את הערך הנוסף שהם יקבלו מבדיקה אוטומטית. במקרה כזה, המתכננים עשויים להעדיף לבצע את הבדיקות באופן ידני במקום להשקיע זמן ומאמץ בהשלמת המידע הנדרש. גם במדינות שעברו לעבודה עם BIM עשו עבודה קפדנית לבחירת הסעיפים שייבדקו אוטומטית. הבחירה באילו סעיפים להתמקד צריכה להתבצע כך שבאמת תהיה למערכת ערך מוסף ברור ומשמעותי. זה כולל זיהוי של הסעיפים הרגולטוריים והדרישות שתהליך הבדיקה האוטומטי יכול לטפל בהם בצורה יעילה, מבלי להעמיס על המתכננים יותר מדי דרישות מידע.

3.1. היתר בנייה בישראל

עפ"י דוח מבקר המדינה משנת 2021 [70] משך הזמן הממוצע לקבלת היתר בנייה עמד על 319 ימים במחצית השנייה של שנת 2019, ו 407 ימים עבור היתרים שכללו מתן הקלת או שימושים חורגים. גם עפ"י ניתוח של הבנק הבינלאומי, ישראל רחוקה מהמקומות הראשונים בדירוג מדד הקלות בקבלת היתרי בנייה העולמי וניצבה בקום ה 35 [71]. אין ספק כי התוצאה של הליך רישוי ארוך וסבוך מתבטאת בהגדלת עלויות ליזמים ובהתאם להגדלת מחירים עבור יחידות דיור חדשות.

ישראל נמצאת בברור במדרגה השנייה המתוארת באיור 2 - ניהול תהליך דיגיטלי. צעד משמעותי לכיוון הדיגיטציה ברישוי קרה עם המעבר למערכת רישוי זמין אשר עלתה לאוויר לראשונה ביוני 2013. זוהי מערכת מקוונת ארצית, שבאמצעותה מוגשות בקשות להיתרי בנייה, וכלל התהליך מתועד באופן אחיד, מה שמאפשר גם קבלת מידע לצורך בקרה. כיום, הגשת בקשות להיתר באמצעות מערכת רישוי זמין היא מחייבת ומהווה תחליף מלא להגשה המודפסת. ההתקדמות לרמות גבוהות יותר טומנת בחובה התמודדות עם אתגרים שאינם רק בעלי היבטים טכנולוגיים. בנוסף לאתגרי ההטמעה וההכשרה של המשתמשים, יש להתחשב גם בשינויים נדרשים בתהליכים עצמם, בשיתוף פעולה בין בעלי העניין השונים ובאינטגרציה של המערכות השונות. שיתוף פעולה זה הוא חיוני על מנת להבטיח שהמעבר לרמות גבוהות של דיגיטציה ואוטומציה יתרום לשיפור משמעותי בתהליך הרישוי.

היוזמות לשיפור הליך הרישוי בישראל בשנים האחרונות הן רבות. למשל, תיקון 101 לחוק התכנון והבנייה קבע כי יוקמו מכוני בקרה שירכזו את בקרת התכן. זאת כמסקנה מדוח וועדת זיילר אשר הצביע על כך כי הבדיקות שמבצעות הרשויות בשלב הרישוי ממוקדות באספקט המרחבי, וכי לא מתבצעות בדיקות מעמיקות מספיק אודות בטיחות המבנה המתוכנן. מכוני הבקרה הם גופים מקצועיים ומורשים שמטרתם

לוודא כי פרויקטי בנייה מתבצעים בהתאם לתקנים, לחוקים ולתקנות הבנייה הרלוונטיים. תפקידם לבצע ביקורת מקיפה על התכניות ועל תהליכי הביצוע בפועל, על מנת לוודא שהם עומדים בדרישות הקבועות בחוק. מכוני הבקרה מבצעים בדיקות בתחומים שונים, אך ארבעת הדיסציפלינות העיקריות המבוקרות במסגרתם הן קונסטרוקציה, בטיחות אש, אינסטלציה ומיגון. מטרת שילובם בתהליך ההיתר היא להבטחת איכות הבנייה, ולמניעת ליקויים ותקלות במהלך חיי המבנה. מכוני הבקרה למעשה ממשיכים ללוות את מגישי הבקשה גם לאחר קבלת ההיתר, בפיקוח על הבנייה באמצעות ביקורים באתר, אולם חלק זה הינו מחוץ לתחום העניין במחקר זה.

תהליך רישוי אופייני כולל בתוכו מספר חלקים, כאשר אחד מהם הינו בקרת התכנון המוצע ובחינת עמידתו בכל החוקים והתקנות הרלוונטיות. בישראל, התהליך כולל ארבעה שלבים עיקריים (לאחר קבלת תיק המידע): הגשת הבקשה להיתר וקליטתה בכפוף לבדיקת תנאי הסף, בקרה מרחבית, בקרת תכנון וקבלת כלל האישורים מהגורמים המאשרים, והנפקת ההיתר. עפ"י דוח מבקר המדינה משנת 2021 [70], מניתוח נתונים אודות מעל 7,000 היתרי בנייה, עולה כי שלב בקרת התכנון הינו השלב הארוך ביותר ומשכו כמחצית מהזמן הממוצע של כל ההליך. מחקר זה מתמקד בתהליך בקרת התכנון, ובפרט בתהליך הבקרה המתבצע במסגרת מכוני הבקרה.

3.2. היתר בנייה בעולם – פיתוחים אחרונים

רוב מדינות העולם דבקות בהליך רישוי בנייה ידני כנהוג שנים [72]. אולם, עם התקדמות הטכנולוגיה והשאיפה לדיגיטציה של ענף הבנייה [73] דיגיטציה של תהליך ההיתר הינה הצעד המתבקש הבא. אכן, השאיפה לדיגיטציה ואוטומציה של תהליך הרישוי גוברת בקרב עיריות ברחבי העולם. המאמצים מושקעים לרוב בשילוב מערכות מידע דיגטליות (הן מודלי BIM והן מערכות מידע גאוארפיות GIS) בתהליך ובפיתוח כלים לביצוע בקרת תכנון אוטומטית. למרות האתגרים והחסמים הרבים המעכבים שימוש נרחב במערכות מסוג זה, ישנן מדינות אשר מקדמות את המעבר לכלים דיגיטליים ואוטומטיים בהליך הרישוי ואף קרובים לחיוב הגשת בקשות בפורמט דיגיטלי (לא תכניות סרוקות אלא מודלים דיגיטליים של המבנים), וחלקן אפילו מיישמות זאת כבר.

ישנן מדינות בהן עולם הרישוי מתקדם הרבה מעבר לשימוש ב-BIM. בכל אחת מהן ישנם פיתוחים ברמה כזאת או אחרת לא רק של דיגיטציה, אלא גם של אוטומציה של התהליך. בפרק זה נסקור את הפיתוחים האחרונים בתחום במדינות השונות ואת הפלטפורמות בהן עושים שימוש.

סינגפור

סינגפור היא בין המדינות המובילות באימוץ BIM בתעשיית הבנייה. המעבר לשימוש ב-BIM החל בשנות ה-2010 המוקדמות, ובמהלך השנים פותחו ונחקקו תקנות שמחייבות את השימוש ב-BIM בפרויקטים שונים. הדרישות לשימוש ב-BIM התרחבו בהדרגה עד שבשנת 2017 השימוש ב-BIM הפך לחובה עבור כל הפרויקטים הממשלתיים.

נושא הרישוי הדיגיטלי החל להתפתח עוד בסוף שנות ה-90 עם פיתוח מערכת Construction and Real Estate Network (CORENET) [74], שנועדה לשפר את התקשורת ושיתוף הפעולה בין כל בעלי העניין בתעשיית הבנייה. CORENET היוותה פלטפורמה מרכזית לניהול ושיתוף מידע בקרב גורמי הרישוי,

היזמים, האדריכלים, המהנדסים והקבלנים. רשות (Singapore Building and Construction BCA Authority) בונה ומתחזקת את מערכת CORENET שממשיכה להתפתח ולפעול בהצלחה [75].

CORENET מורכבת משלושה מודולים: e-Submission, e-PlanCheck, e-Info. מערכת ה-e-Submission אשר הושקה בשנת 2001 היא מערכת מקוונת שנועדה לאסוף את כל המסמכים הקשורים לפרויקט במקום אחד. e-Info הוא אתר להצגת כל המסמכים הרשמיים על בנייה ונדל"ן בפורמט נתונים אחד באופן מקוון. כך בעלי תפקידים יכולים לגשת למסמכים אלה בכל זמן ומקום. e-Info משתמש בשפת XML להמרת מסמכים כתובים לפורמט הניתן לזיהוי על ידי מכונה ללא איבוד קריאותם האנושית. היא משמשת להעברת מסמכים לשימוש ביישומים שונים. מערכת e-PlanCheck היא החלק השאפתני ביותר ב-CORENET ומטרתו לאפשר בדיקה אוטומטית של מודלים כנגד חוקים, תקנים ותקנות רלוונטיות. CORENET משתמש בפורמט IFC בבדיקת מודלי הבניין, אולם לרוב פורמט ה-IFC מוגבל מבחינת המידע הסמנטי שהוא מייצג לכן המידע הדרוש לביצוע בקרת תכן אוטומטית יהיה ברוב המקרים חסר.

כדי להשלים את יכולות ה-IFC המוגבלות, חברת Nova Group פיתחה מודל בשם FORNAX שנועד להרחיב את המידע שנמצא ב-IFC [76]. FORNAX אינו מחליף את ה-IFC אלא לוקח מידע בסיסי על אובייקטים והגיאומטריה שלהם ממודל IFC ובאמצעות פעולות גיאומטריות מוסיף מידע כגון מידע מרחבי, מידע על יחסים עם אובייקטים אחרים, ומידע סמנטי אחר ומוסיף אותם למאגר שלו [62]. יש ציין כי החל מסוף שנת 2016 (לתכניות אדריכליות) וסוף שנת 2017 (לתכניות מערכות), ה-BCA מקבלת הגשות בפורמט BIM ולא מחייבת הגשת IFC. כמובן הכנת המודלים צריכה להיות לפי כללים מוגדרים מראש. השימוש במערכת e-PlanCheck יחד עם מודל FORNAX מוגבל כיום לסוגים מסוימים של בדיקות, במיוחד לתקנות בטיחות אש ונגישות. למרות שהמערכת מספקת אוטומציה ברמה מסוימת, עדיין קיימת תלות בתהליכי בדיקה ידניים עבור אספקטים מורכבים יותר.

עבודות הפיתוח ממשיכות גם היום, עם פיתוח והשקה של פרויקט CORENET X בשנת 2018 שנועד בסופו של דבר להחליף את מערכת CORENET [77]. נכון להיום, המערכת הושקה ומאפשרת הגשה על בסיס וולונטרי של פרויקטים חדשים. מתוכנן לחייב הגשה של פרויקטים חדשים במערכת החל מאמצע שנת 2025. כל פרויקטי הבנייה בסינגפור נבדקים על ידי 8 רשויות רגולטוריות מרכזיות, ביניהם רשות המים, כיבוי והצלה, תחבורה, סביבה, פארקים לאומיים, וכו'. הפרויקטים חייבים לקבל אישורי רגולציה מהרשויות הרלוונטיות בשלבי הפרויקט השונים. כיום, ניתן להגיש הצהרות נפרדות לרשויות שונות על פי התקדמות הפרויקט מה שמוביל לבעיות של חוסר התאמה. CORENET X ינצל טכנולוגיות נועד לשנות את תהליך האישור הרגולטורי כולו באמצעות מערכת אחודה ומשולבת. המערכת השיתופית הזו מאפשרת לצוותי הפרויקט לבחון יחד את המודל המתוכנן, לזהות קונפליקטים פוטנציאליים לפני הבנייה וליצור מודל BIM מתואם לאישור רגולטורי לפני הגשת הבקשה.

CORENET X צפויה לשנות את הפרקטיקה הנוכחית בסינגפור שבה יועצים מתמודדים בנפרד עם גורמים רבים בתהליך ולעיתים משתמשים בגרסאות שונות של מודל ה-BIM מול כל אחד מהגורמים מה שיוצר בעיות בתהליך. המערכת מתוכננת לאפשר ליועצים ולגורמים האחרים לשותף פעולה מראש כדי לייצר מודל

BIM מתואם אחד. יחד עם פיתוח המערכת פותח גם תהליך רישוי חלופי. התהליך החדש כולל שערי הגשה עיקריים לגופים הרגולטוריים השונים, אך מה שיוגש בשערים אלה מבוסס על המודל האחד שיוגש ויבדק במשותף על ידי כל הרשויות. דרישות ספציפיות של רשויות מסוימות (לדוג' פרטים טכניים של מרכיבי בניין) יוכלו להתווסף בשלבים מאוחרים יותר ולהיבדק על ידי הרשות היחידה הרלוונטית.

גם נושא בקרת התכן האוטומטית ממשיך להתפתח. מאז 2021, סינגפור מובילה מאמצים לפתח מערכת בקרת תכן אוטומטית מתקדמת ומקיפה יותר. מירב המאמצים כעת מושקעים בפיתוח Model View Definition (MVD) [8] לצרכים אלו, בהתבסס על תקן ה-IFC. MVD הוא מסמך המגדיר את הדרישות המידע שצריכות להיות במודל BIM כדי ליצור מערכת שניתן להשתמש בה לבדיקה אוטומטית של המודלים. במקביל לפיתוח ה-MVD, מתבצעת עבודה לזיהוי הדרישות שניתן לבדוק בצורה אוטומטית. הנ"ל כולל זיהוי כל הדרישות הרגולטוריות והתקנים שיש לבדוק, חלוקתם לקטגוריות שונות, ניתוח כל דרישה ובדיקת האפשרות לבדוק אותה בצורה אוטומטית, והגדרת דרישות המידע לצורך ביצוע הבדיקה. דרישות שניתן לבדוק בצורה חד-משמעית (כמו מידות פיזיות, חומרים מסוימים, תצורות וכו') מועדפות לבדיקה אוטומטית. ולבסוף פיתוח כלים ותוכנות כדי לאפשר את הבדיקות האוטומטיות בצורה יעילה ומדויקת.

פינלנד

בפינלנד החלו לבחון את השימוש ב-BIM להיתרי בנייה כבר בשנת 2018, כאשר כבר אז הליך ההיתר התבצע בצורה דיגיטלית ב 90% מהרשויות המקומיות. המעבר למערכות הגשה דיגיטליות בפינלנד קרה עוד ב 2015 על ידי שימוש בפלטפורמות Cloudpermit [78] ו-Trimble ePermit [79]. בשנת 2018 החלו בעבודה על פיילוטס ראשוניים לאישור היתר מבוסס IFC. חשוב לציין כי התעשייה בפינלנד מנוסה מאוד בעבודה ב BIM, וכי הממשלה תומכת מאוד באימוץ הטכנולוגיה. למעשה, כבר בתחילת שנות ה-2000, השימוש ב BIM התחיל להיות נפוץ בפרויקטים ציבוריים ופרטיים. הממשלה הפינית והרגולטורים בתעשיית הבנייה החלו לראות בטכנולוגיה זו כלי חיוני לשיפור תהליכי הבנייה ולחיסכון בזמן ובעלויות. בשנת 2007, פרסמה ממשלת פינלנד את "Guidelines for Building Information Modeling" אשר עודכנו לאחר מכן בשנת 2012 [80]. מסמך זה הגדיר את הדרישות לשימוש בטכנולוגיית BIM בפרויקטים ציבוריים, כולל תקנים לפתיחת קבצים, שיתוף מידע ואחסון נתונים. בערך משנת 2010 השימוש בטכנולוגיית BIM הפך לסטנדרט בתעשיית הבנייה בפינלנד.

במקביל, מוסדות אקדמיים ומרכזי הכשרה מקצועית החלו להציע תוכניות לימוד והכשרה מתקדמות בתחום מה שתרם להכשרת דור חדש של מומחים. אין זה מפתיע אם כן כי פינלנד ממשיכה להיות בחזית החדשנות בשימוש בטכנולוגיית BIM. המדינה משתפת פעולה בפרויקטים בינלאומיים ומובילה מחקרים ויוזמות בתחום. למשל, פינלנד הינה שותפה בפרויקט המחקר ACCORD שהוא פרויקט במימון תכנית Horizon Europe של האיחוד האירופי [81], שעוסק בדיגיטציה ואוטומציה של תהליכי הרישוי באמצעות שימוש ב BIM ו-GIS. הממשל והרגולטורים בפינלנד ממשיכים לעדכן את התקנים והנהלים ולקדם את השימוש בטכנולוגיות השונות בתחום. כעת, מתבצעת רויזיה משמעותית של חוק הבנייה אשר צפויה להסתיים בשנת 2025 ובכך מתוכנן לחייב הגשת בקשות להיתר באמצעות BIM עד שנת 2027.

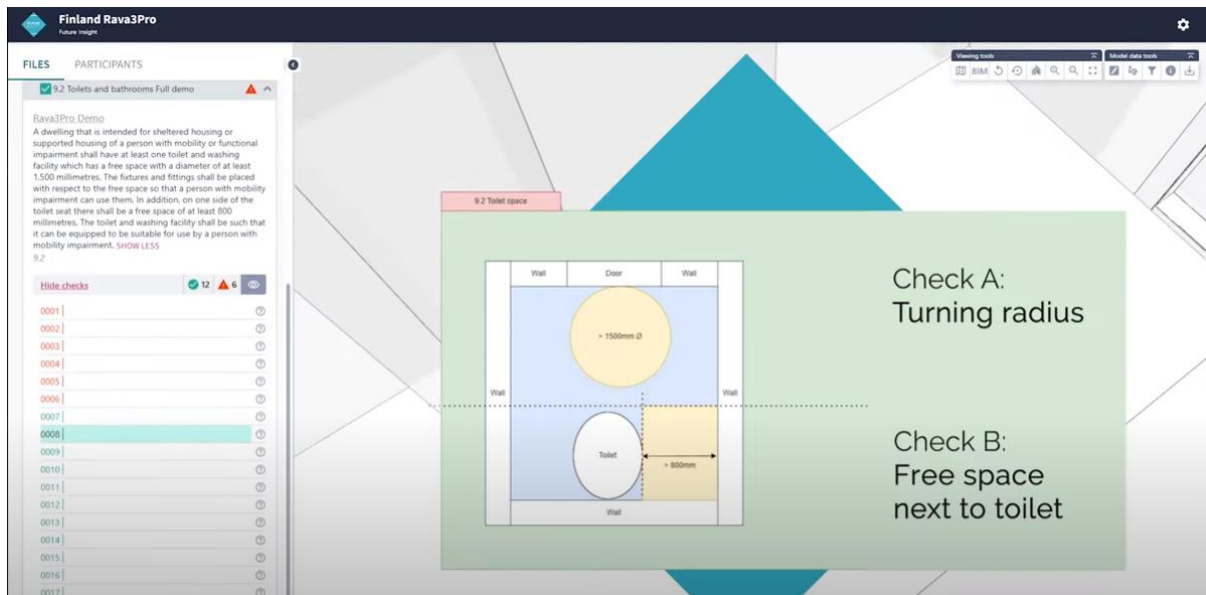
בשנת 2021 החל פרויקט RAVA3Pro המשתלב בתוך התמונה הרחבה של דיגיטציה של נתוני סביבה בנויה ציבורית ופרטית בפינלנד [82]. זוהי יוזמה פינית שמטרתה לפתח תהליך רישוי אוטומטי המתבסס על מודלי BIM. הפרויקט מנוהל על ידי עיריית הלסינקי וממומן על ידי משרד האוצר הפיני, בשיתוף עם 23 רשויות מקומיות נוספות. מטרת עיקריות של הפרויקט כוללות אוטומציה של בדיקת היתרי בנייה מבוססי BIM, יצירת פלטפורמה לשיתוף מידע מבוססת ענן שמחוברת למערכת המידע הלאומית לסביבה בנויה (המערכת נקראת RYTJ), וכן שילוב מלא של חילופי נתונים אוטומטיים עם מערכות ממשלתיות אחרות.

אחת השותפות המובילות בכל פרויקטי הפיתוח לאורך השנים, כולל בפרויקטים המוקדמים RAVA ו-RAVA2 אשר היו המאמצים הראשונים, וגם בפרויקט RAVA3Pro הינה Solibri. היא משחקת תפקיד מרכזי בפיתוח מערכת הבדיקה האוטומטית. כעת, אחד המאמצים המרכזיים הינו בהגדרת דרישות לקבצי IFC על מנת לתמוך ביכולת ביצוע הבדיקות. למעשה, זהו אחד הנדבכים החשובים במימוש מטרת הפרויקט. כדי שהמידע במודלים ייבדק אוטומטית, הנתונים חייבים להיות סטנדרטיים וניתנים לקריאה במכונה. כעת נעשים מאמצים על מנת להעמיק את ההבנה והיישום של פרטים נוספים נדרשים במערכי נתונים של IFC וזאת במטרה ליצור כללי בדיקה מפורטים ומתקדמים יותר.

כמוזכר קודם, לא כל פריטי המידע בתעשיית הבנייה מקבלים ייצוג בתקן IFC. זהו תקן בינלאומי המשמש כבסיס לחילופי נתונים, אך נדרש איזון בין הגעה לקונצנזוס רחב על סטנדרטים מקובלים לבין תמיכה במקרי שימוש ספציפיים. מכיוון שזהו תקן בינלאומי, הוא נוטה להיות גנרי וזאת כדי לאפשר אימוץ רחב בתעשייה. כתוצאה מכך, לצרכים כגון בקרת תכן אוטומטיות ההגדרות בתקן IFC לעיתים אינן מספקות. התקן מאפשר הוספת סמנטיקה נוספת לאובייקטים באמצעות למשל ערכות מאפיינים מוגדרות ע"י המשתמש, כך ניתן להוסיף מידע ספציפי לנתונים. בפרויקט RAVA3Pro עוסקים בהגדרת דרישות המידע הנוספות (מעל הישיות הסטנדרטיות ב IFC). כדי לנהל את הסיווגים והמאפיינים הנוספים, יצרה buildingSMART את פלטפורמת bSDD (buildingSMART Data Dictionary). ה-bSDD הוא מסד נתונים מקוון המארח מחלקות ומאפיינים סטנדרטיים, ערכים מותרים, תרגומים ויחסים שונים בין נתונים. מילון הנתונים של RAVA3Pro כולל מונחים הקשורים לניהול מערכת MEP (מכני, חשמל ואינסטלציה) ומודלים מבניים המתבססים על מינוחים לאומיים. כללים אלו נגישים דרך bSDD, ומאפשרים יישום בכלי תוכנה שונים, כולל תוכנות לבדיקות התאמה לתקנים.

כיום, ניתן להגדיר את דרישות המידע השונות באמצעות תקן Information Delivery Specifications (IDS) שמאפשר בקלות קריאת הנתונים הן ע"י בני אדם והן ע"י מכונה. זה מאפשר לבדוק את מודלי ה-BIM ולוודא כי אכן כל דרישות המידע מולאו באופן אוטומטי. לאחרונה Solibri השיקה מודול המאפשר לבצע בדיקה אוטומטית של איכות המידע במודל BIM.

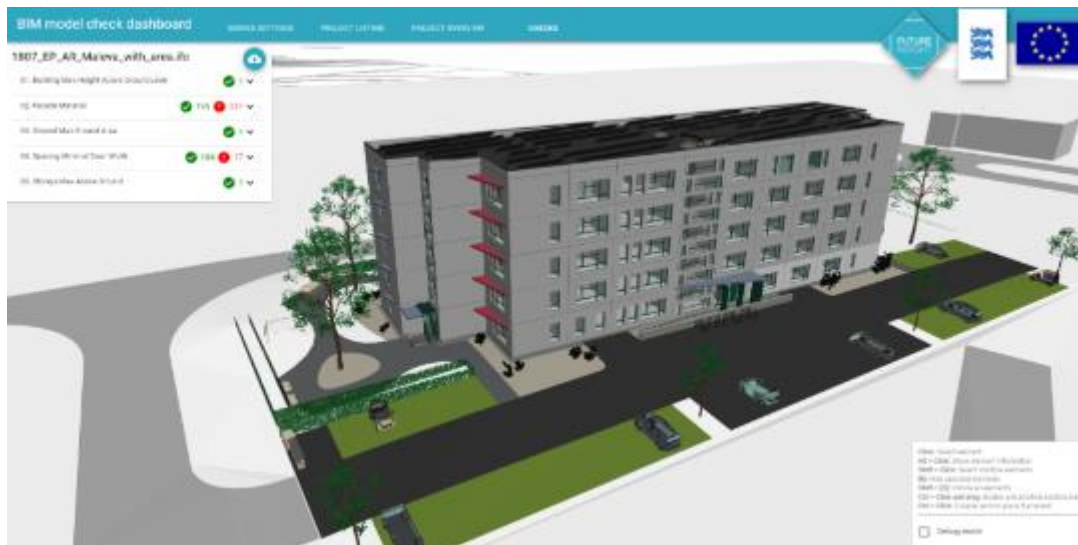
גם שיתוף הפעולה של פינלנד עם חברת Future Insight ו-Clearly.BIM [83] הוביל להדגמת ביצוע בדיקת IDS כדי לוודא שמודל ה-IFC עומד בדרישות שנקבעו. בנוסף, הודגמו בדיקות אוטומטיות המתמקדות בנגישות של חדר אמבטיה, מטבח, מסדרון ורוחב מינימלי של פתחים באמצעות Clearly.BIM כמתואר באיור 3.



איור 3 דוגמה לבדיקת נגישות ב clearly.BIM לקוח מהאתר <https://www.futureinsight.nl/clearly-bim?lang=en>

אסטוניה

הליך הרישוי באסטוניה מתבצע באופן מקוון משנת 2016. בשנת 2019 משרד הכלכלה האסטוני החל לנתח את האפשרויות לאוטומציה של תהליך היתר הבנייה באמצעות תהליך עבודה מבוסס BIM. נציין כי כבר בשנת 2018 הוחלה חובת שימוש ב-BIM בפרויקטי בנייה ציבוריים מעל גודל מסוים. צעד זה נועד לקדם את השימוש ב-BIM ולהפוך אותו לסטנדרט בתעשיית הבנייה. מטרת הפרויקט שהושק ע"י משרד הכלכלה היה לבחון את הדרישות הטכניות להטמעת תהליך מבוסס BIM המתממשק עם ה-EHR (מערכת רישום מבנים אסטוני), ובסופו של דבר להציג הוכחת היתכנות. הפרויקט נעשה בשיתוף עם חברת ייעוץ הולנדית Future Insight [83] ומומן על ידי תוכנית התמיכה ברפורמות מבניות של הנציבות האירופית. באמצעות clearly.BIM פותח פיילוט לרישוי מבוסס BIM שעושה שימוש ב-IFC. הפלטפורמה שהוצגה ניתנת לשימוש על ידי מבקשי הרישוי (לבצוע בדיקה עצמית מראש) וגם על ידי הבודקים ברשויות. הפלטפורמה זמינה ועובדת מתחילת שנת 2024 כפי שניתן לראות באיור 4.



איור 4 תצלום מסך מתוך פלטפורמת הרישוי באסטוניה, מתוך <https://eehitus.ee/timeline-post/bim-based-building-permit-procedure>

בשנת 2020 החלה אסטוניה בפיתוח כלי לבדיקות אוטומטיות של התאמת התכנון לתקנים ודרישות רגולטוריות שונות. אחד האתגרים המרכזיים היה להבטיח שהפלטפורמה תהיה תואמת לתקנים הפתוחים השונים ותוכל לעבוד עם סוגי קבצים ופורמטים שונים של מודלי BIM. בנוסף, כדי לבצע בדיקות אמינות, נדרש להבטיח שמודלי ה-BIM המוגשים יכללו נתונים מלאים ומדויקים. לכן, הצעד הראשון בפיתוח הכלי היה זיהוי כל הדרישות הרגולטוריות והתקנים הקיימים שצריך לבדוק בתהליך הרישוי. הדרישות חולקו לקטגוריות שונות במטרה לזהות את אלה הניתנים לאוטומציה במאמץ יחסית לא גדול. לאחר קביעת היעדים לאוטומציה, החלו בהגדרת דרישות המידע. דרישות המידע הללו הוגדרו על ידי ניתוח צרכי הבדיקה והגדרות התקן המקומיות והבינלאומיות, כמו גם על ידי שיתוף פעולה עם מומחים בתחום ועם הרגולטורים האסטוניים. הגדרת הדרישות כללה יצירת מסמכים מפורטים שקובעים אילו מאפיינים חייבים להיות בכל אלמנט של הבניין וכיצד יש לתייגם בצורה עקבית כדי לאפשר בדיקות אוטומטיות יעילות ואמינות.

התהליך התחיל מ-64 הצעות לדרישות שיש לבצע בצורה אוטומטית, לאחר בחינה מעמיקה, הוחלט כי רק מחצית מתוכם יעברו לפיתוח כי האחרים עלולים להיות מורכבים מדי, ו/או דורשים נתונים רבים מדי להשלמה ע"י המתכננים על מנת לאפשר את הבדיקה. כדי למנוע תלות רבה כל כך באיכות המידע במודלים הייתה העדפה לגישה מבוססת אלגוריתמים במקום שימוש בכללי היסק. אולם, הניתוח שבוצע מצביע גם על כך שחלק מהבדיקות תמיד יהיו מבוססות כללים, ולכן אין מנוס מהגדרת דרישות מידע בסיסיות להשלמה ע"י המתכנן.

למעשה, השיטה הנפוצה ביותר לביצוע בקרת תכן בצורה אוטומטית היא באמצעות שיטה מבוססת כללים. כך ערכים נבדקים על פי תכונות שמקושרות לאובייקטי BIM. החיסרון בכך הוא שתכונות אלו מוספות ידנית ע"י הממדלים או שלא מוספות כלל. חשוב שכל התכונות הללו ייקראו ויסווגו באותה צורה כדי לקבל את אותם תוצאות. לעיתים אפילו טעות סינטקטית כמו טעות כתיב יכולה להוביל לתוצאות בדיקה שגויות. לכן, על מנת לבצע בדיקות מבוססות כללים למגוון רחב של דרישות, יש להכין מפרטי BIM וסטנדרטים מפורטים מאוד ועל הממדלים להיצמד לסטנדרטים אלה בקפידה. דרך אחרת לבצע את הבדיקות היא בשימוש בגיאומטריה בלבד, אולם זה יכול להתאים לכמות בדיקות מאוד מוגבלת. למשל, ניתן לבצע חלק מהבדיקות באמצעות ווקסליזציה, כאשר נוצרת גיאומטריה חדשה באמצעות קוביות תלת מימדיות

שמתארות אלמנט רגולטורי, כמו בדיקת דרך המילוט המתוארת באיור 5. בשלב הנוכחי באסטרטגיה, ישנן 48 בדיקות המתבצעות בצורה אוטומטית, רובן הגדול באמצעות כללי היסק. את רשימת הבדיקות המיושמות המלאה ניתן למצוא בדו"ח הפרויקט הסופי [84].



איור 5 בדיקה על בסיס ווקסלים לבדיקת דרכי מילוט לקוח מתוך הדוח הסופי של הפרויקט [84]

דובאי

כבר בשנת 2014 החלה חובה בדובאי להשתמש ב-BIM בבניינים בגודל מסוים וגם בפרויקטים ממשלתיים [85]. בשנת 2016, עיריית דובאי השיקה את מערכת ה-Dubai Building Permit System (BPS), פורטל אינטרנטי המאפשר הגשת בקשות להיתרי בנייה, מעקב אחרי סטטוס הבקשה וקבלת האישורים הדרושים באופן מקוון. בשנת 2019, דובאי החלה בפיתוח כלי לבדיקות אוטומטיות של התאמת התכנון לתקנים ודרישות רגולטוריות שונות. בדובאי פותחה מפת דרכים מאוד מפורט לאימוץ BIM ואוטומציה בתהליך הרישוי שכוללת גם התייחסות נרחבת לנושא ההדרכה והתמקצעות של אנשי הרשות [86]. הצעד הראשון בפיתוח הכלי היה זיהוי כל הדרישות הרגולטוריות והתקנים הקיימים שצריך לבדוק בתהליך הרישוי. צוותי מומחים מתחומים שונים שיתפו פעולה במיפוי הדרישות והגדרת קריטריונים לבדיקה אוטומטית של כל דרישה. בדומה לפיתוחים שהוזכרו במדינות אחרות, גם בדובאי עסקו רבות בהגדרת סטנדרטים לשימוש ב-BIM ובדרישות המידע לצורך בקרת תכן אוטומטית. בשנת 2020 בוצעו בדיקות פיילוט בפרויקטים קיימים כדי לבחון את יעילות הכלי ולבצע התאמות ושיפורים נדרשים. תוצאות הבדיקות הפיילוט היו חיוביות והראו שיפור משמעותי ביעילות ובדיוק הבדיקות. לאחר הפיילוט המוצלח, הכלי שולב במערכת ה-Dubai BPS כדי לאפשר בדיקות אוטומטיות כחלק מתהליך הגשת הבקשה להיתר בנייה. כיום, ניתן להעלות קבצי IFC למערכת ואף להריץ את הבדיקות. החל מינואר 2024, חובה להגיש מודל BIM יחד עם בקשת הרישוי, אוטומציה של בדיקות טרם מיושמת.

יוזמות נוספות

במהלך השנים האחרונות, ג'נבה, אחת מהערים המרכזיות בשווייץ, מקדמת חדשנות בתחום הבנייה והרגולציה באמצעות אימוץ BIM בתהליך הרישוי. בשנת 2016, רשויות ג'נבה החליטו לאמץ את טכנולוגיית ה-BIM בפרויקטי בנייה ציבוריים. החלטה זו היוותה את הבסיס לשילוב ה-BIM בכל שלבי הפרויקט, החל מהתכנון ועד לניהול ותחזוקה של המבנים. בשנת 2018, ג'נבה השיקה מערכת רישוי דיגיטלית אשר משלבת את טכנולוגיית ה-BIM בתהליך הגשת הבקשות להיתרי בנייה. המערכת מאפשרת להגיש מודל דיגיטלי, לעקוב אחר סטטוס הבקשה ולקבל את האישורים הדרושים באופן מקוון. בשנת 2021, החלה ג'נבה בפיתוח כלים לבדיקות אוטומטיות של התאמת התכנון לתקנים ודרישות רגולטוריות שונות. בשנת 2022 בוצעו בדיקות פיילוט בפרויקטים קיימים כדי לבחון את יעילות הכלי ולבצע התאמות ושיפורים נדרשים. לאחר הבדיקות הפיילוט המוצלחות, הכלי שולב במערכת הרישוי הדיגיטלית של ג'נבה כדי לאפשר בדיקות אוטומטיות כחלק מתהליך הגשת הבקשה להיתר בנייה. המערכת פועלת מתחילת שנת 2024, אולם בקשות בודדות בלבד הוגשו עד כה.

וינה, בירת אוסטריה, אימצה את טכנולוגיית BIM בתהליכי הרישוי והבנייה במטרה לייעל תהליכים, לשפר את איכות הבנייה ולהבטיח עמידה בתקנים ודרישות רגולטוריות. חלק חשוב מהמאמץ הזה כולל את פרויקט BRISE (Building Regulations Information for Submission Involvement), שמטרתו לפתח כלים אוטומטיים לבדיקות תאימות לתקנים. פרויקט BRISE הוא יוזמה חדשנית שמובילה העיר וינה לפיתוח מערכת אוטומטית לבדיקת התאמת התכנון לתקנים כחלק מתהליך הרישוי הדיגיטלי. הפרויקט הושק בשנת 2019 ביוזמת עיריית וינה, בשיתוף עם מוסדות מחקר ואקדמיה מקומיים. מטרת הפרויקט היא לפתח מערכת אוטומטית שתאפשר בדיקה מהירה ומדויקת של תכניות בנייה דיגיטליות על פי תקני הבנייה המקומיים. כחלק מהפתרון המוצע בפרויקט מוצעים כלי מעולם הבינה המלאכותית, ואף שימוש במציאות רבודה לצורך בחינת בקשות להיתר [87]. תהליך של פיילוט לבחינת הכלים המפותחים החל באמצע שנת 2022.

בניו זילנד, מעבר להטמעת BIM בתהליך הרישוי, אחד הפרויקטים הבולטים בתחום זה הוא פרויקט ACABIM (Automated Compliance Assessment using Building Information Modeling). הפרויקט הוא יוזמה חדשנית שמטרתה לפתח מערכת אוטומטית לבדיקת התאמת התכנון לתקנים כחלק מתהליך הרישוי הדיגיטלי. אחד המאפיינים הייחודיים של הכלי הוא הייצוג של דרישות התקן באמצעות BPMN שהוא תקן גרפי להצגת תהליכים עסקיים. כלומר, הכלי מונע תהליכים, בהנחיה של האדם (המשתמש), מה שהופך את תהליך הגדרת הבדיקות ליחסית אינטואיטיבי [88]. הכלי טרם מיושם בתהליך הרישוי.

לסיכום, השאיפה לדיגיטציה ואוטומציה של תהליך הרישוי הולכת וגוברת בערים רבות ברחבי העולם, כאשר המאמצים מתמקדים בשילוב מערכות מידע דיגיטליות, במקביל לפיתוח כלים לבקרת תכן אוטומטית. למרות האתגרים והחסמים הרבים המעכבים את השימוש הנרחב במערכות אלו, ישנן מדינות המקדמות את המעבר לכלים אלה, ואף מחייבות הגשת בקשות בפורמט דיגיטלי כמודל BIM. יש לשים לב כי מדינות אלו עבדו לפי תוכניות ארוכות טווח ורב-שלביות והשקיעו מאמצים רבים בהגדרת מטרות ופיתוח מפות דרכים מפורטות. בפן הטכנולוגי ישנו מגוון של כלים אשר כל אחת מהמדינות מפתחת המיועדים להשתלב בתהליך הרישוי. מיפוי מדוקדק של הדרישות הרגולטוריות אשר ייבדקו אוטומטית ושל דרישות

המידע על מנת לאפשר בדיקות אלה היווה חלק נכבד בתהליך. עדיין, רובם הגדול של הכלים מבוססים כללי היסק מה שמגביל את כמות הדרישות הרגולטוריות הניתנות לבדיקה ומגדיל כמות דרישות המידע שיש לבקש מהממדלים.

4. מטרות המחקר

בהסתכלות על הפיתוחים האחרונים, בייחוד במדינות אשר לאחרונה החלו ליישם אוטומציה ברישוי, ניתן לראות בברור שהצעד הראשון צריך להיות אימוץ BIM בתהליך. על ידי שימוש ב-BIM, ניתן לייצר מודלים דיגיטליים מפורטים ומדויקים של מבנים, אשר מכילים מידע הנחוץ לא רק לתכנון ובנייה, אלא גם לרישוי ובקרה. מחקר זה אינו עוסק בנושא הטמעת BIM בתהליך הרישוי, אלא מניח כי מידע תכנוני דיגיטלי כבר זורם בתהליך. כלומר, אנו מתבססים על ההנחה כי התכנון נתון כמודל BIM, כך שלמעשה מחקר זה בוחן את המדרגה האחרונה בסולם הדיגיטציה ואוטומציה ברישוי המתואר באיור 2.

מטרת העל של מחקר זה היא להדגים את היכולות בתחום בקרת תכן אוטומטית, בהינתן מודל BIM, ביחס לתקינה הישראלית. בתוך כך, נבחן את ההיתכנות לשילוב כלי בדיקת תכן אוטומטית קיימים בתהליכי בקרת התכן בישראל. השאיפה היא לזהות ולבחון את הקשיים הקיימים היום בתהליך בקרת התכן, ולנתח את התאמתם לשימוש בכלי בדיקה אוטומטית, בהנחה כי כלים הקיימים בשוק בשילוב עם כלים אשר פותחו במחקרים קודמים בנושא, או לחילופין באמצעות פיתוח מזערי על בסיס כלים קיימים אלה יכולים לתת מענה לחלק מאתגרי הבקרה.

לעומת זאת, בדיקות אשר דורשות פירוש והבנה של סעיפי הבדיקה (דרישות התקן) ואו פרוש והבנה של הטופולוגיות המורכבות של הבניין (התכן), ידרשו פיתוח חדש על בסיס טכנולוגיות מתקדמות יותר, כגון טכנולוגיות מעולם הבינה המלאכותית. בעבודה זו נבחן גישות שונות לבקרת תכן אוטומטית במטרה להגיע לרמות גבוהות של אוטומציה בתהליך בקרת התכן, עבור מספר רחב של תקנות. אנו שואפים למנף את הידע הקיים בתחום שימוש במודלי למידת מכונה לבקרת תכן אוטומטית ולבחון שימוש בשיטות חדשניות דומות עבור תקנות מקומיות.

5. ניסויים

לצורך השגת מטרות המחקר נבחן השילוב של כלי בדיקה אוטומטיים (אוטומציה מלאה או חלקית) בתהליך בקרת תכניות בניין כפי שמבוצע במכוני הבקרה. כלי הבדיקה שנבחנו מתבססים על טכנולוגיות שונות מתחומי הבינה המלאכותית (שימוש בכללי היסק לוגיים, למידת מכונה מונחית, למידה באמצעות גרפים וכד'). על מנת להדגים היתכנות לשימוש בכלים מתקדמים אלה, בוצעה מבחינה מפורטת והדגמה של בדיקה אוטומטית עבור שני מקרי בוחן:

- מקרה בוחן ברמה א' - מתמקד בשימוש ביישומים מתקדמים קיימים לבקרת תכן אוטומטית. במקרה זה נבחנו התאמת הכלים הקיימים לדרישות התכנוניות בארץ, והאפשרות לשימוש בהעשרה סמנטית ככלי תומך בקרת תכן וזאת על מנת לשפר את רמת האוטומציה המושגת.
- מקרה בוחן ברמה ב' – מקרה בוחן זה מתרכז בפיתוח כלים המיישמים טכנולוגיות חדשות לבדיקת תכן באופן אוטומטי. כאן נבחנו האפשרות לשימוש בשיטות חדשניות מבוססות למידת מכונה לבקרת תכן, תוך שילוב תהליך של העשרה סמנטית כחלק מהבדיקה.

על מנת לאתר מקרי בוחן פוטנציאליים, בוצעו מספר ראיונות עם הבודקים מטעם מכון בקרה AIS שהינו שותף במחקר זה. הראיונות הראשוניים נועדו על מנת להבין את תהליך הבקרה וכיצד הוא משתלב בתוך תהליך הרישוי כולו, וגם להבין מה הן הדיסציפלינות בהן מתמקדות הבדיקות. המטרה הייתה לזהות את התקנות הנחשבות מאתגרות וגוזלות זמן בבדיקה ידנית ולבחור את מקרי הבדיקה העונים על מטרות המחקר. סדרת ראיונות עם בקרי המכון התקיימו במשרדי המכון בתאריך 14.12.2022.

במכוני הבקרה נבדקות ארבע דיסציפלינות עיקריות: בטיחות אש, קונסטרוקציה, אינסטלציה וביוב ומיגון. הדיסציפלינות אשר נבחרו עבור מחקר זה הן בטיחות אש ומיגון. בטיחות אש הוא נושא שעסקו בו רבות וקיימים כלי בדיקה אוטומטיים אשר מספקים פתרון לבדיקת חלק מהסעיפים על בסיס תקן הבנייה הבינלאומי, לכן דיסציפלינה זו מתאימה עבור מקרה בוחן א'. מיגון לעומת זאת, הוא נושא ייחודי לישראל ולכן אין בעולם כלים קיימים המתאימים לביצוע הבקרה, לכן נושא המיגון נבחר לצורך מקרה בוחן ב'. בהמשך לראיונות, נבחנו מפרטי הבקרה אשר מהווים את הנחיות הבקרה עבור המכון ויחד עם בקרי המכון נבחרו הסעיפים אשר מהווים אתגר בביצוע הבקרה. במסגרת זו נתבקשו הבקרים לדרג את סעיפי מפרט הבקרה בהתאם להסבר המופיע בטבלה 1.

טבלה 1 דרוג סעיפים במפרטי בקרה

בודק יקר, במסגרת מחקר בנושא אוטומציה של בקרת תכן אנו מנסים לאתר את נושאי הבקרה המורכבים לביצוע בצורה ידנית, ולבחון את האפשרות לביצוע בדיקות אלה בצורה אוטומטית. לצורך כך נבקשך להעריך כל אחד מהסעיפים במפרטי הבקרה עפ"י ניסיוןך האישי, ולדרגם עפ"י רמת הקושי והזמן הנדרש בביצוע הבקרה בצורה ידנית. שים/י לב, השאלון הוא אנונימי. תוצאות הסקר ינותחו וישמשו לצורך המחקר בלבד, מידע אישי לא נשמר ולא נעשה בו כל שימוש. להלן מספר הסברים למילוי השאלון:		
שאלה	תאור	הסבר
1	וידוא קיום מסמך או בקרת תכן	האם הסעיף מתייחס לבדיקת תוכן ההגשה בלבד, כלומר האם צורך מסמך/חישוב/נספח נדרש כלשהו (1) או לבקרת תכן (2). במידה וסימנת 1 אין צורך לענות על שאר השאלות לסעיף זה.
2	בדיקה מדגמית או מלאה	האם הבדיקה מבוצעת באופן מדגמי (1) או בצורה מלאה על כל חלקי המבנה (2)
3	דרגת מורכבות	הערך/העריכי עפ"י ניסיוןך האישי את דרגת מורכבות ביצוע הבדיקה בסולם 1-5, כאשר: 1 - מבטא סעיף פשוט ומהיר לבדיקה, 5 - מבטא סעיף מורכב ו/או סעיף המצריך זמן רב לביצוע הבדיקה. אנא התייחס/י הן למורכבות ההנדסית, למורכבות התקנות/תקנים ולזמן הנדרש לביצוע הבדיקה.
4	ריג'קטים	בממוצע, עפ"י ניסיוןך האישי, הערך/העריכי את היקף בעיות התכן המתגלות במהלך הבקרה, כשאשר: 1 - מבטא סעיף שלעיתים נדירות נמצא לא תקין, 5 - מבטא סעיף שברוב הפרויקטים מתגלה כלא תקין

שני מקרי הבוחן הודגמו באמצעות יישום הכלים לצורך בדיקה של מודל BIM שהתקבל מהתעשייה. במקרה זה, מודל המתאר מבנה מגורים בעל חמש יחידות דיור בכל קומה טיפוסית. תכנית קומה טיפוסית של המבנה מתוארת באיור 6. בנוסף לתשע הקומות הטיפוסיות, המבנה בעל שתי קומות חניה תת קרקעיות.



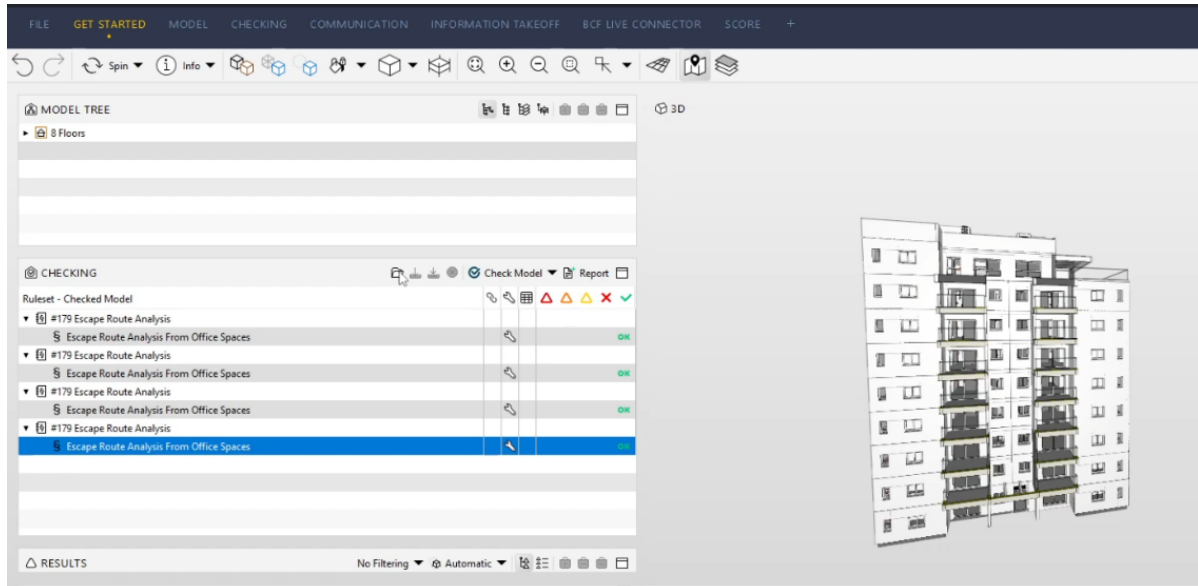
איור 6 תכנית קומה טיפוסית של המבנה ששימש לצורך ניסויים

5.1. בטיחות אש – יישום בכלים קיימים

כמוסבר לעיל, מקרה הבוחן הראשון שנבחר הינו מתוך דרישות בטיחות אש עם מיקוד בדרישות למרחקי מילוט ממבנה, בהתאם לתקנות בטיחות אש (קובץ התקנות, 6713 כ"ב באלול התשס"ח, 22.9.2008). כיוון שרבים עסקו בנושא בטיחות אש בעולם בעבר [89], [75], [23] וכיוון שבתכנות הקיימות היום ישנן יכולות לביצוע בדיקה אוטומטית של דרישות אלה (בהתאם לתקן הבנייה הבינלאומי [90]), ניתן לבחון את רמת האוטומציה המושגת בבדיקות הקיימות וגם את רמת הקושי בהתאמה של הכלים הקיימים לתקנים הרלוונטיים בארץ.

הפלטפורמה שנבחרה ליישום הבדיקה הינה [20] Solibri. זוהי אחת הפלטפורמות המתקדמות ביותר כיום לבדיקת מודלים בתחום הבנייה. היא מיועדת לא רק לבדיקת עמידה בתקנים, אלא גם לאבטחת איכות המודל ותיאום בין מודלים של דיסציפלינות שונות בפרויקט בנייה. Solibri מאפשרת לזהות מוקדם בעיות פוטנציאליות בתכנון ולספק דוחות מפורטים הכוללים הסברים. כך היא מסייעת לאדריכלים, מהנדסים וקבלנים לשפר את איכות הפרויקטים ולהבטיח עמידה מלאה בדרישות החוק והתקנים. התוכנה מבצעת ניתוח אוטומטי של מודלים תלת-ממדיים (BIM) המתקבלים כקובץ IFC, ובדיקות כנגד מערכות חוקים

מוגדרות מראש, המתייחסות להיבטים שונים כגון בטיחות אש, שלמות מבנית, נגישות ועוד, הכל בהתאם למוגדר בתקן הבנייה הבינלאומי. אחד היתרונות בתכנה הוא שבמידה ומערכת חוקים מתאימה כבר קיימת, ניתן עדיין לשלוט בפרמטרים של אותם חוקים ולהתאימם לתקנים המקומיים יחסית בקלות. אולם, זה דורש הבנה עמוקה לא רק של התקן המקומי, אלא גם של התקינה הבינלאומית שעליה מבוססים החוקים, וגם לעיתים הבנת ופרשון של התקנים לכדי החוקים הקיימים מה שלעיתים יכול להיות לא פשוט.



איור 7 המבנה הנבדק בתוך Solibri

הקלט לתכנה כאמור הוא קובץ IFC אשר מיוצא מתוך מודל ה-BIM. לטובת מקרה הבוחן, קובץ בגרסת IFC 2x3 coordination view יוצא מתוך תכנת Revit ויובא לתוך SOLIBRI כפי שניתן לראות באיור 7. לפני הייצוא יש לשים לב לטיב המידע המיוצא מהמודל. במיוחד הנקודות המפורטות בטבלה 2 צריכות להילקח בחשבון כאשר מדובר על יצוא לטובת בדיקת דרכי מילוט. טבלה 2 מפרטת את דרישות המידע כנגד המידע שמצאנו בפועל במודל הנבחן. ניתן לראות כי בעוד שאלמנטים פיזיים בסיסיים בדרך כלל ממודלים כראוי, כך שניתן להניח כי המידע הגאומטרי מדויק, מידע סמנטי עלול להיות הרבה פחות אמין. יתרה מכך, אלמנטים אבסטרקטיים כגון הייצוג הגאומטרי של חדרים במבנה, לא תמיד נוצרים ע"י המודלים. גם המידול של אלמנטים פיזיים אינו תמיד כמצופה. הסיבה למידול דלתות המרפסת תוך שימוש בקטגוריה לא נכונה נובעת מהקלות בלערוך משפחה מקטגוריית חלונות שדומה מאוד לדלת הזזה מזכוכית, על פני עריכה של משפחה מקטגורית דלתות. למרות שאנחנו, "המומחה האנושי", מבינים בקלות מה התפקוד של אותו אלמנט, מבחינת המחשב התפקוד המיוחס הוא של חלון ולא של דלת. יש לכך משמעות רבה לצרכים של בקרת תכן, כיוון שלמשל דלת יכולה להיחשב שחלק מדרך המילוט.

במודל BIM נוצרת סמנטיקה מסוימת באופן אוטומטי יחד עם יצירת האלמנטים הפיזיים. עם זאת, חלק ניכר מהמידע הסמנטי לא נוצר ישירות בתהליך יצירת האלמנט, ויש להוסיף אותו במיוחד. דוגמה לכך היא תיוג חדרים בהתאם לתפקודם במבנה. אמנם ניתן לצפות שרוב החדרים במודל יהיו מתויגים, אך אין חובה לעשות זאת, ואין הסכמה כוללת על שמות חדרים סטנדרטיים. הגיוון הקיים בתוכנות ה-BIM השונות והאפשרויות הרבות שהן מציעות מציבים אתגר נוסף כיוון שכל תוכנה עשויה לצפות לייצוג מידע בצורה שונה. לדוגמה, בפלטפורמה א' ייתכן שנדרש לסמן שירותי נכים באמצעות התג "נכים", בעוד שבפלטפורמה ב' הייצוג המצופה הוא "שירותי נכים". מצב זה יוצר בעיה כאשר יש צורך להשתמש בפלטפורמות BIM

שונות למטרות שונות בפרויקט אחד, כמו למשל בקרת תכן וניתוח המבנה באמצעות סימולציות. כל פלטפורמה עשויה לדרוש מידע שונה עבור אותם אלמנטים, כך שבכל מקרה המידע הנוצר בתוך הכלי התכנוני יצטרך לעבור עיבוד. כדי לבצע סטנדרטיזציה לדרישות המידע, למשל באמצעות שימוש בתבניות (templates), נדרש לחשוב מראש על מגוון הכלים שנרצה להשתמש בהם במהלך הפרויקט ולוודא שדרישות המידע בכלים אלה אינם סותרים אחד את השני.

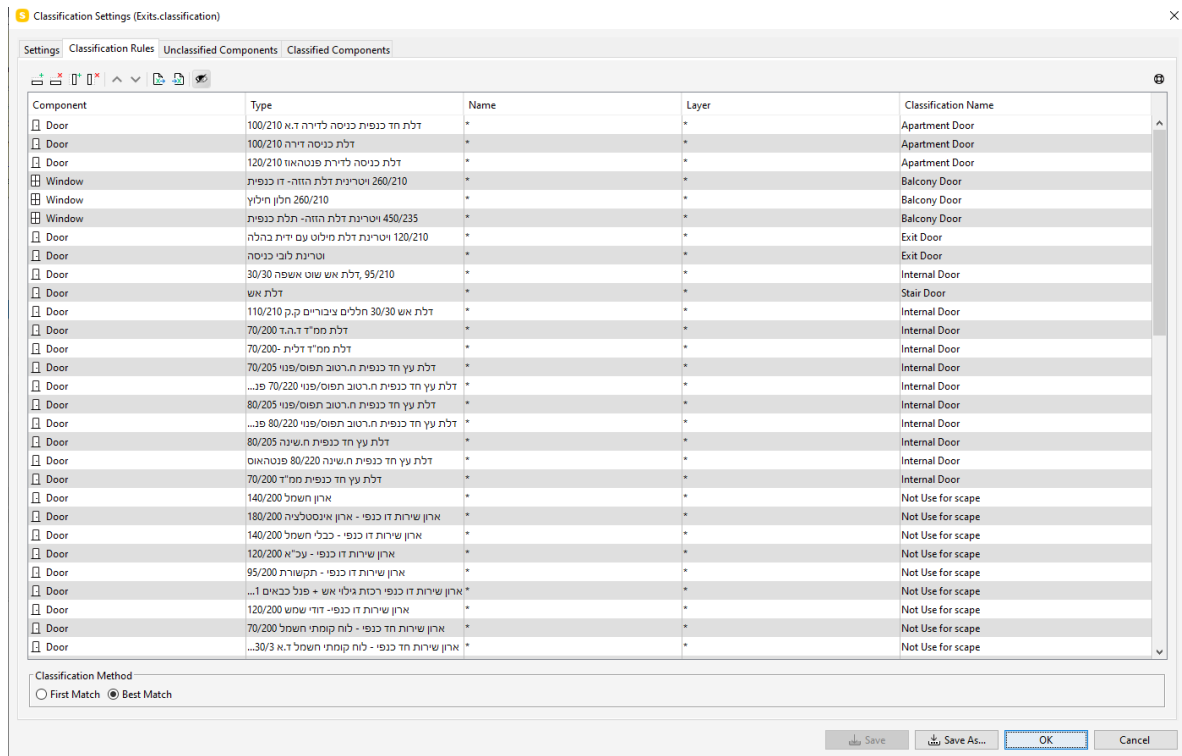
טבלה 2 מיפוי דרישות המידע לצורך בדיקה

מציב המידע במודל הקיים	דרישת מידע לצורך בדיקה
כ 80% מהחדרים הפנימיים במודל נוצרו בפועל בזמן המידול. תיוג החדרים נעשה בעברית מה שלא תואם את הסיווג המצופה ב-Solibri.	חדרים מוגדרים, כולל סיווג ותיוג מדויק
קטגוריזציה נכונה של רוב אלמנטי המודל. אולם, דלתות המרפסות מודלו כחלונות.	מידול נכון של אלמנטי מודל בסיסיים, ביחוד חדרים ודלתות למציאת דרכי מילוט אפשריות
קיים במודל.	מידול מדויק של אלמנטי סירקולציה אנכית (מדרגות ורמפות)
לא קיים במודל.	תיוג אלמנטים מפרדי אש והגדרת אזורי אש
לא קיים במודל.	תיוג דלתות יציאה מהבניין.

כל אחת מהשורות בטבלה 2 מגדירה מידע נדרש לצורך ביצוע הבדיקה אשר צריך להיות מסופק ידנית במהלך הבדיקה בתוך תכנת SOLIBRI וזאת באמצעות חוקי סיווג ייעודיים הניתנים להגדרה בתוך התכנה. שלב ראשון לאחר ייבוא קובץ ה- IFC ולאחר בחירת מערכת חוקים רלוונטית הינו לספק את כל דרישות המידע אלה בהתאם להגדרות בתוך Solibri. הכלי דורש קיטלוג של אלמנטי הבניין הרלוונטיים לבדיקה הנבחרת. בהתאם, על המשתמש לסווג רכיבי בניין למחלקות המוגדרות מראש בתכנה. ארבעה סוגי אלמנטים עיקריים הינם בעלי משמעות עבור בדיקת דרכי מילוט: חללים, חלונות, דלתות ומדרגות. עבור חללים, חלונות ודלתות, הסיווג כולל יצירת קובצי CSV המפרטים את כל שמות הרכיבים והקטגוריות המתאימות. היתרון בתהליך עבודה זה הוא כי ניתן לשמור את קובץ ה- CSV לשימושים הבאים. כיוון שהמידע שמספקים בשלב זה נרשם אך ורק בתוך תכנת SOLIBRI ולא בתוך המודל, במקרה ויש צורך לבצע שינויים תכנוניים במודל נדרש לחזור לתכנת המידול (Revit במקרה הזה) ולייצא קובץ IFC חדש. קובץ זה שוב לא יכלול את הקטגוריזציה המבוקשת. שימוש בקובץ הגדרות חיצוני, כמו CSV, חוסך את הצורך להגדיר את הקטגוריזציה שוב ושוב עם כל בדיקה מחדש, בהנחה כמובן שהשינויים במודל מבוצעים בהתאם.

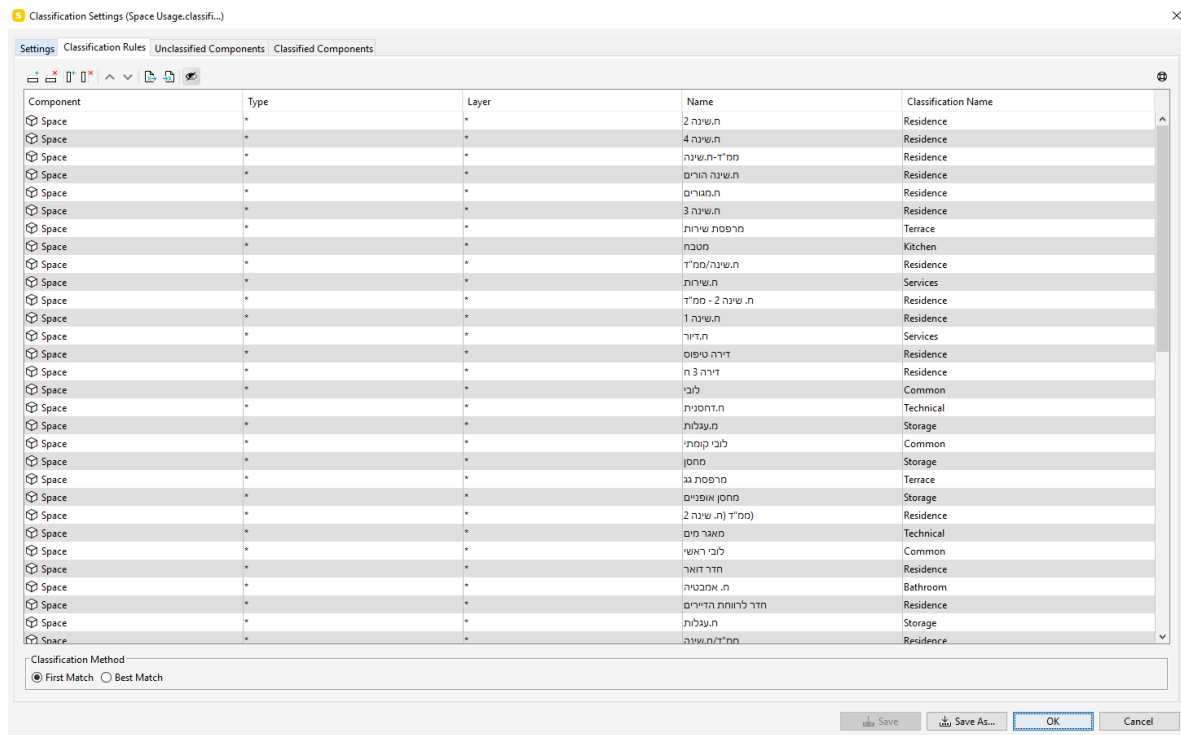
כפי שניתן לראות באיור 8, דלתות מסווגות לזיהוי יציאות מהמבנה לעומת דלתות פנימיות וכמו כן לזיהוי דלתות כניסה לדירה ודלתות של ארונות שירות. דלתות שלא משמשות לדרך מילוט, כמו דלתות של ארונות שירות, יוחרגו מהבדיקה והחללים המחוברים הרלוונטיים, כמו פירים טכניים, יוסרו גם כן. סיווג החללים

במבנה הינו בעל משמעות רבה היות והוא יגדיר גם את התפוסה המיועד של כל חלל (מספר נפשות למ"ר) בהתאם לפרמטרים הקבועים ב-Solibri אשר מבטאים את ההגדרות התקן. ניתן לראות דוגמא לסיווג החללים במודל המבחן שלנו באיור 9. דרכי מילוט אנכיות המוגדרות ע"י אלמנטי מדרגות והחלל בו המדרגות נמצאות יסווג גם כפי שניתן לראות באיור 10. הדבר האחרון שעלינו להגדיר הינו אזורי האש במבנה, מה שבוצע במקרה זה בצורה ידנית. לאחר מכן, דלתות היציאה מוגדרות בקטגוריה נפרדת המבוססת על משימת סיווג הדלתות, הן מסמנות יציאות סופיות המשמשות כנקודות יעד למדידות מרחק המילוט.

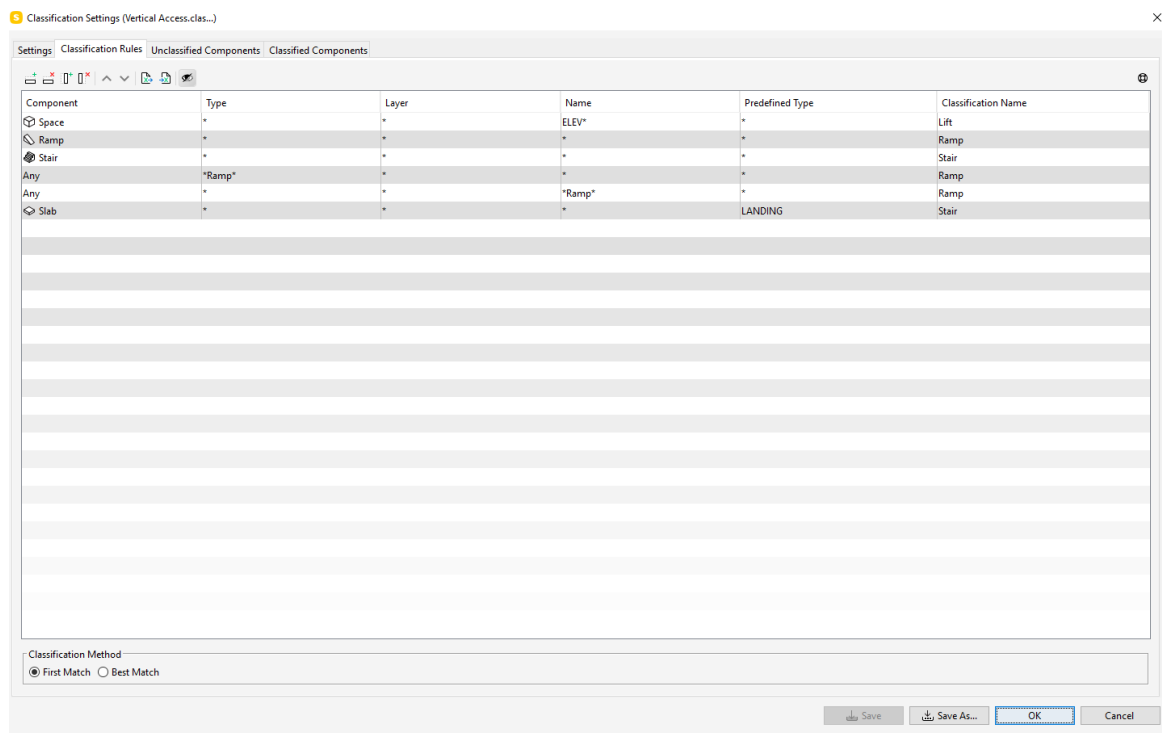


איור 8 סיווג דלתות במודל בתוך תכנת Solibri

נציין כי התוכנה מספקת אפשרויות מוגדרות מראש להקצאת אזורים מוגני אש על ידי התייחסות לכל הקירות והעמודים כמחיצות עמידות באש ללא קשר לסוג החומר או ייעוד החללים. כלומר, נדרשת בחירה ידנית של חללים להגדרה נכונה של אזור האש. כדי להפוך תהליך זה לאוטומטי, Solibri מציעה ממשק API שמאפשר עריכת כללי סיווג מתקדמים מותאמים. פיתוח כלי מבוסס API לזיהוי אוטומטי של קירות, עמודים וחללים בדירוג אש מסוים בהתבסס על תכונות כמו סוג החומר עשוי ליצור אזורי אש המקיפים את כל החללים ולהקצות אזורי אש נכונים. אולם, חשוב לציין כי העבודה עם ה-API של Solibri אינה פשוטה ודורשת מיומנויות טכניות מתקדמות. בראש ובראשונה, יש צורך בהבנה מעמיקה של שפת התכנות שבה משתמשים לכתיבת הסקריפטים. בנוסף לכך, יש צורך בהיכרות עם הממשק הספציפי של Solibri ועם האופן שבו הוא מנהל נתונים ומבצע אינטראקציה עם מודל ה-BIM. כלומר, יש צורך לוודא כי האלגוריתמים מזהים בצורה נכונה את כל האלמנטים הדרושים ומסווגים אותם בהתאם לכללי הבדיקה. יתרה מזאת, יש לוודא שמתמודדים כראוי עם כל סוגי האלמנטים והחללים במודל, ושאינן מקרים יוצאי דופן שאינם מטופלים כראוי.



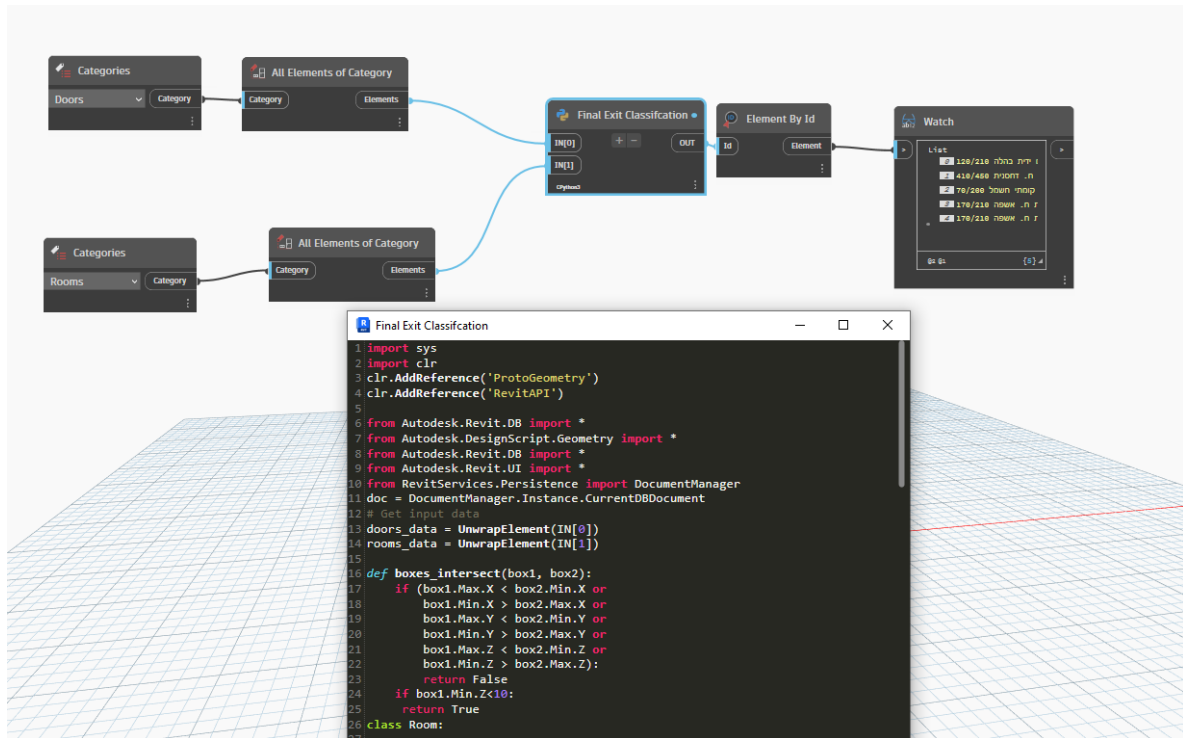
איור 9 סיווג חללים במודל בתוך תכנת Solibri



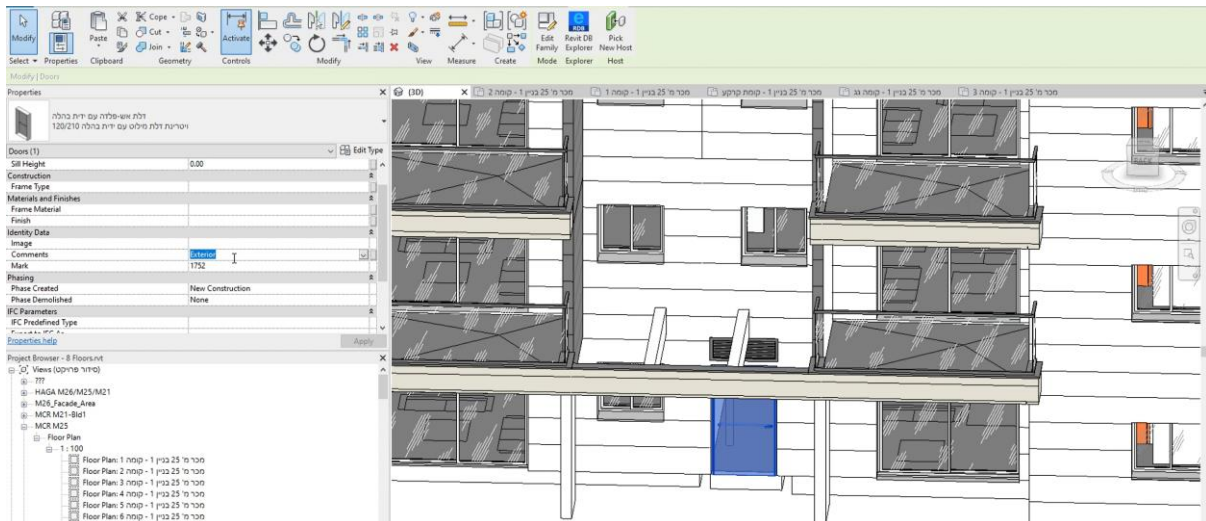
איור 10 סיווג אלמנטים אנכיים בתוך תכנת Solibri

נכון להיום, לא ניתן לנצל את יכולות ההעשרה הסמנטית הקיימות במלואן על מנת לתמוך בעבודה עם כלים כמו Solibri. הכלי הקיים בנוי בצורה כזו שהמשתמש יתבקש לוודא שמידע שנקרא מתוך ה-BIM הינו תקין ולבצע שינויים כנדרש, לא ניתן לדלג על שלב זה. אולם, היכולות קיימות. לדוגמא, על מנת לזהות אוטומטית דלת כדלת יציאה מבניין ניתן להשתמש במערכת חוקים יחסית פשוטה. להגדרת היציאה הסופית, פיתחנו

סקריפט Dynamo ב Revit אשר בוחן דלתות ביחס לחללים איתם הן גובלות. דלתות שאינן גובלות בין שני חללים מוגדרים, כלומר, הן מובילות החוצה, יתווגו כדלתות יציאה כפי שניתן לראות באיור 11.



איור 11 העשרה סמנטית באמצעות Dynamo



איור 12 תכונות דלת החוץ Revit

לאחר תהליך ההעשרה, המידע הנוסף יופיע בתוך המודל עצמו כמתואר באיור 12, וניתן להשתמש בו ללא כל פעולה נוספת. היתרון כאן הוא שמערכת החוקים היא גנרית לחלוטין ומסתמכת אך ורק על מידע גיאומטרי בסיסי שאנחנו בטוחים כי ניתן לצפות לקבל בצורה מדויקת במודלים.

PARAMETERS

General

Space Classification: Space Usage

General Requirements

Classification Name	Travel Distance	Area/Occupant	Exit Count	Start Point
WC	30.00 m	18.00 m ²	1	Corner
Services	30.00 m	18.00 m ²	1	Corner
Security	30.00 m	18.00 m ²	1	Corner

Route

Routing Method:  Stair Length: 

Shared Route Length Multiplier: 1 Stair Height Multiplier: 4

Check that Doors Open in the Direction of Escape: ☐

Exit Doors

Exit Door Classification: Exits

Classification Name	Exit Type
Apartment Door	Exit Door
Apartment Exit Door	Exit Door

Fire Zones

Fire Zone Priorities

Vertical Access

Vertical Access Classification: Vertical Access

Classification Names of Stairs Used for Escape

Stair

איור 13 קביעת פרמטרים המערכת החוקים לבדיקת דרכי מילוט

לאחר השלמת כל דרישות המידע, על מנת להתאים את הבדיקה לתקינה בישראל נדרש לשנות את הפרמטרים בהם משתמש סט החוקים של התכנה ואף ליצור חוקים נוספים. הגדרת הפרמטרים כרוכה בהגדרה מרחבית של חללי המבנה שיש לבדוק על ידי הוספת החללים (המסווגים כבר) לקטגוריה הכללית. כמו כן, יש לציין גם את נקודת ההתחלה לחישובי המרחק כדלת או כפינה של כל חלל בהתבסס על המוגדר בתקנות הרלוונטיות. כמו כן, יש להגדיר את המרחק המרבי המותר עבור כל חלל בהתאם לדרישות התקן, ניתן לראות דוגמא להגדרות באיור 13. לאחר מכן, דלתות היציאה המשמשות כנקודות יעד, מוגדרות בקטגוריה נפרדת המבוססת על סיווג הדלתות שבוצע קודם. לבסוף, המדרגות (אשר גם כן סווגו קודם לכן), מוקצות לקטגוריית הגישה האנכית. הגדרת הפרמטרים המלאה מקשרת את האלמנטים האדריכליים המסווגים כזוגות מוצא-יעד לבדיקת מרחק המילוט. כאן נוצרות ארבע ערכות כללים נפרדות לבדיקת התרחישים השונים המוגדרים בתקנות:

1. מרחק המילוט המירבי מכל נקודה בתוך כל יחידת דיור אל דלת הדירה לא יעלה על 30 מ'.
2. המרחק מדלת הדירה אל מקום מוגן לא יעלה על 30 מ'.
3. סה"כ מרחק המילוט מכל נקודה ביחידת הדיור עד ליציאה לא יעלה על 50 מ'.
4. המרחק מהאזור המוגן (חדר מדרגות מבטון) עד לדלת היציאה מהבנה לא יעלה על 15 מ'.

תוצאות הבדיקה עבור מודל המבחן שלנו מתוארות באיור 14 המתאר את הבדיקה כנגד דלת היציאה מהמבנה, ובאיור 15 המתאר את המרחקים אל המוצא הבטוח. ניתן להבחין באחד היתרונות הגדולים של Solibri באמצעות איורים אלה, וזה הויזואליזציה שהתכנה מספקת והאפשרות ליצירת דוחות מפורטים בהתבסס על תוצאות הבדיקה. התכנה מאפשרת לבחון את תוצאות הבדיקה ויזואלית על בסיס המודל, כך שאפשר בקלות לטפל בבעיות שעולות. חלק חשוב מאוד בפרויקט BIM הוא התקשורת בין כל הגורמים

המעורבים, כולל תקשורת יעילה בנוגע לבעיות או אי התאמות במודלים. ב Solibri ניתן להפיק דוחות שמכילים את המידע הרלוונטי כולל קישור לרכיבים המעורבים בבעיות. ניתן להקצות טיפול בבעיות למשתתפים הרלוונטיים ולייצא אותם כקובץ BCF (BIM Collaboration Format) שהוא פורמט התקשורת הרשמי בפרויקטי BIM, כמו גם כגיליון אלקטרוני פשוט.

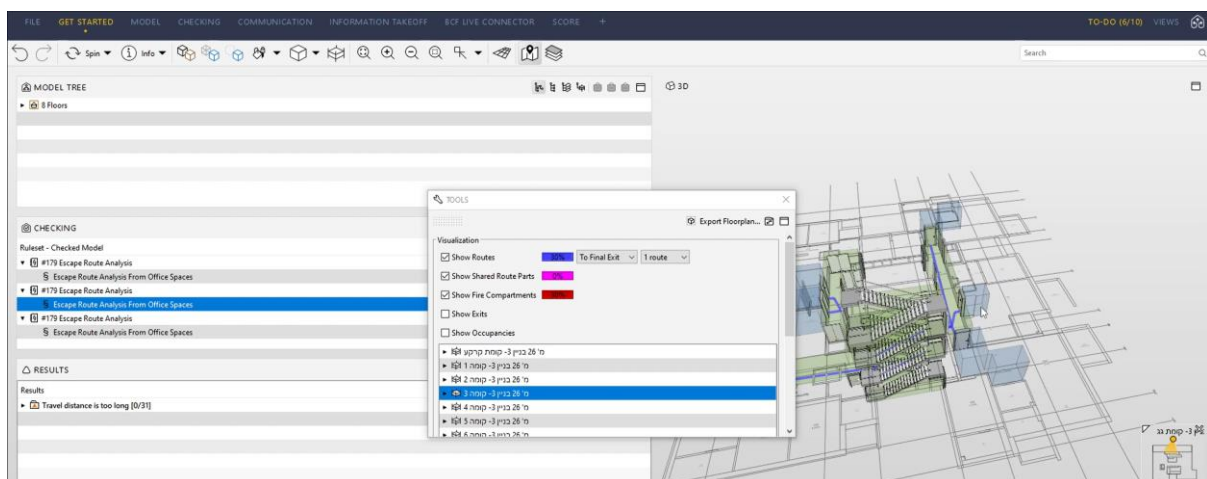
נציין כי לצורך הבדיקה נבחנו שני תרחישים:

תרחיש 1 - בניין ללא מחיצות אש.

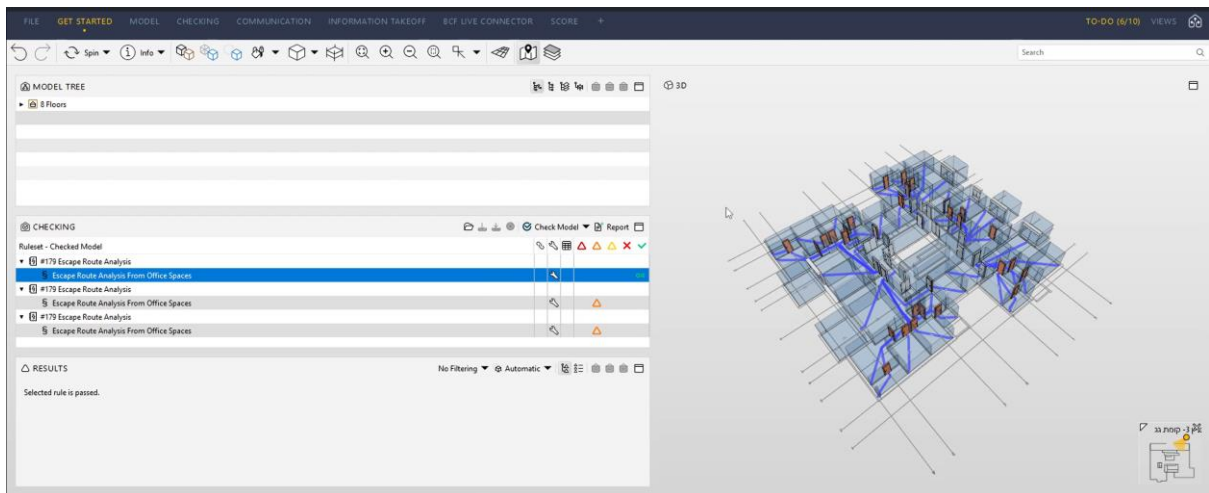
בתרחיש זה, קירות חדר המדרגות הינם ללא דירוג עמידות באש, למשל מחיצות עשויות בלוק. בתרחיש זה, מכיוון שקירות המדרגות לא היו מדורגים באש, התוצאות הראו כי 60% מהחללים חרגו מהמרחק המצטבר המקסימלי מהנקודה הרחוקה ביותר בדירה עד לדלת היציאה הסופית.

תרחיש 2 – חדר מדרגות מוגן אש.

בתרחיש זה, הבניין נבנה עם מחיצות אש בחדר המדרגות. בתרחיש זה, כל החללים עמדו במרחקים המקסימליים המותרים, והבניין נמצא כעומד בדרישות התקן.



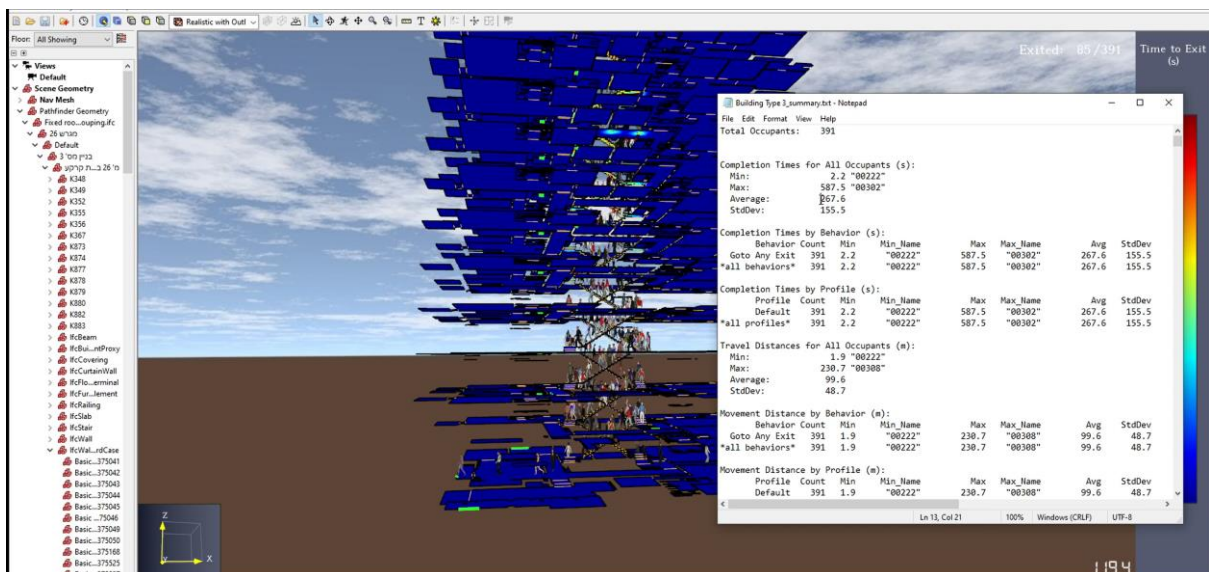
איור 14 תוצאות בדיקת מרחקי מילוט אל היציאה



איור 15 תוצאות בדיקת מרחקי מילוט אל מוצא בטוח

ישנם כלים נוספים שנותנים מענה לנושא בטיחות אש אולם הם פועלים בצורה דומה מאוד ל-Solibri. למשל, SMARTreview APR גם היא תוכנה לבדיקות תכן אוטומטית המבוססת על חוקים לוגיים התואמים לתקן הבנייה הבינלאומי. התכנה מתמקדת בבדיקות תאימות לבטיחות אש, נגישות, ועוד. ההבדל העיקרי בין פלטפורמה זו ל-Solibri הוא בכך שהיא אינה פלטפורמה עצמאית אלא פועלת כתוסף לתכנת Revit.

כלי קצת שונה אשר גם נבחן במסגרת זו הינו ה-Pathfinder אשר נועד לביצוע סימולציה של מציאת דרכי מילוט ממבנה. ניתן באמצעות הכלי למדוד כמה זמן לוקח לפנות בניין במקרה חרום (איור 16). כאן, אין התייחסות לתקנים ודרישות מרשמיות, אך היתרון הוא שניתן להכניס למשוואה את התנהגות של אנשים בזמן חרום. גם כאן, המידע עובר באמצעות קובץ IFC מה שגורר לעיתים בעיות, כמו למשל אי דיוק בהכנסת המידע. במקרה שלנו, כפיי שצוין בטבלה 2, דלת היציאה למרפסת מודלה באמצעות משפחה של חלונות ולכן זוהתה בעיה בסימולציה כאשר לאנשים הנמצאים במרפסת לא קיימת דרך מילוט.



איור 16 סימולציית פינוי מבנה בפלטפורמת Pathfinder

לסיכום, הכלים הקיימים ניתנים להתאמה לתקינה המקומית בקלות כאשר מדובר על תקינה בינלאומית מקבילה. אולם, כתיבת מערכת חוקים חדשה הינה תהליך מסובך, דורש ידע הן בתכנות והן ידע עמוק בתקינה והבנה עמוקה של דרישות המידע החדשות שהממדלים יאלצו לקחת בחשבון. מעבר לכך, עלות הרישיונות לכלים כגון Solibri היא גבוהה. הם מצריכים ידע נרחב, לא מעט יכולות טכניות והדרכה נרחבת לצורך שימוש נכון ויעיל. שימוש בכלי לא תמיד אינטואיטיבי ולעיתים דורש לפרשן את התקינה הבינלאומית וגם את מערכת החוקים הקיימת ולבצע התאמות.

מגוון הבדיקות אשר מקבלות מענה באמצעות מערכת חוקים קיימת בתכנה הוא מוגבל גם כן. לא כל הדיסציפלינות העיקריות בהן עוסקים מכוני הבקרה מקבלים התייחסות. למשל, אין כל התייחסות לנושא של אינסטלציה ובוודאי שאין עבודה על נושאים ייחודיים לארץ כגון מיגון. גם נושא הקונסטרוקציה לא נבדק בכלים הקיימים. עיקר המיקוד הוא נושאים של בטיחות, נגישות, וקואורדינציה בין מודלים. יתכן שהדבר נובע מהדרישות לבדיקות במהלך הרישוי במקומות אחרים בעולם, כי הרי אלו הנושאים שבהם עוסקים מכוני בקרה במדינות כמו פינלנד לדוגמא.

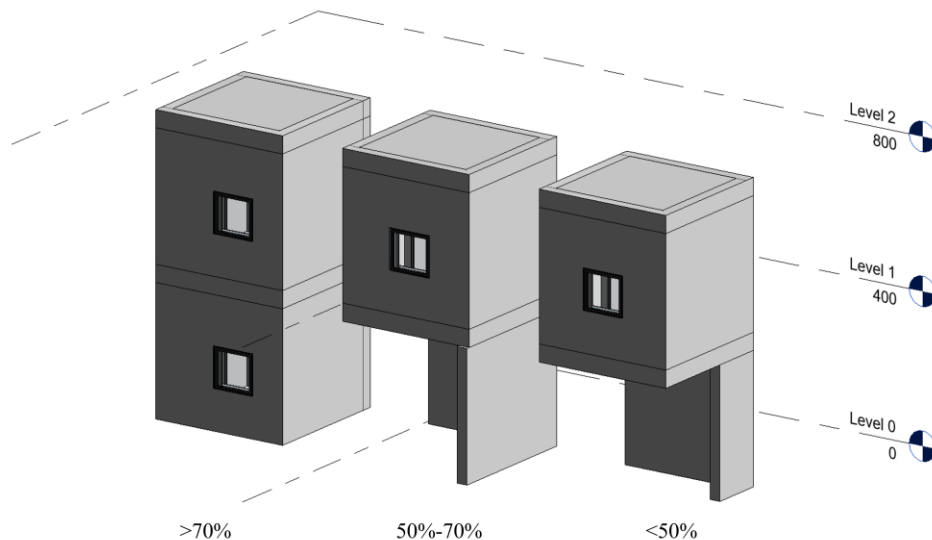
5.2. מיגון – יישום באמצעות שיטה היברידית – למידת מכונה וחוקים לוגיים

הנחיות פיקוד העורף לממדי"ם כוללות חלק אדריכלי וחלק הנדסי. מקרה בוחן זה מתמקד בפרק מתוך הדרישות האדריכליות אשר מדבר על נושא ירידת קירות וקביעת עובי מינימלי של אלמנטי בטון. חשוב לציין כי מקרה הבוחן שנבחר נועד להוות אתגר ולאפשר לחוקרים לבחון לאיזה רמת אוטומציה נוכל להגיע באמצעות פיתוחים עתידיים ושימוש באלגוריתמים של למידת מכונה ולא רק בשיטת ההיסק הלוגי שעליה מבוססים הכלים הקיימים ורוב עבודות המחקר בתחום. לכן, אנו לא מתמקדים בדרישות היחסית פשוטות המדברות על גודל מינימלי של חדר הממ"ד, גודל החלונות והדלתות וכדומה. מקרה הבוחן מתמקד בבדיקה אוטומטית של עובי אלמנטי הבטון הנדרש אשר מושפע באופן ישיר ע"י יחס הקירות ההמשכיים אשר יורדים ומגיעים עד היסודות.

ההנחיות קובעות כי קירות המרחבים המוגנים יהיו רציפים לכל גובה הבניין לטובת יצירת מגדל מוגן. היה וקיימת סטייה ברציפות המגדל כתוצאה מהסטת קירות או פתיחת פתחים, יש להמשיך עד ליסודות את קירותיו ההיקפיים של כל מרחב מוגן ב 70%- לפחות מאורך היקפם. אך בתקנות נקבע כי במקרים בהם קיימת בעיה תכנונית המונעת תכן בהתאם לדרישה זו ניתן להפחית את שיעור ירידת הקירות ליסודות מ 70%- מאורך הקירות ההיקפיים של המרחב המוגן ועד ל 50%- לכל הפחות. בנוסף לכך, במידה והתנאים ההנדסיים לא מאפשרים המשך הקירות עד ליסודות המבנה בשיעור של 50% מאורך הקירות ההיקפיים של המרחב המוגן, ניתן לבצע תקרת מעבר (טרנספורמציה).

למעשה, ניתן לראות שלוש אפשרויות תכנון הקירות היורדים בהתאם לתנאים ההנדסיים הקיימים, כפי שמתואר סכמתית באיור 17.

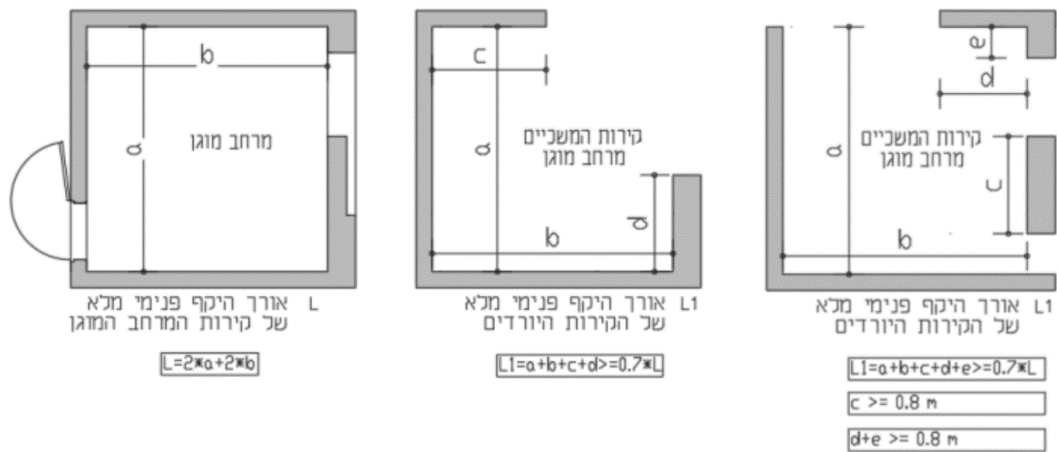
1. לפחות 70% מאורך היקפם של קירותיו ההיקפיים של כל מרחב מוגן הינם רציפים ומגיעים עד היסודות
2. בין 50%-70% מאורך היקפם של קירותיו ההיקפיים של כל מרחב מוגן הינם רציפים ומגיעים עד היסודות
3. פחות מ 50% מאורך היקפם של קירותיו ההיקפיים של כל מרחב מוגן הינם רציפים ומגיעים עד היסודות



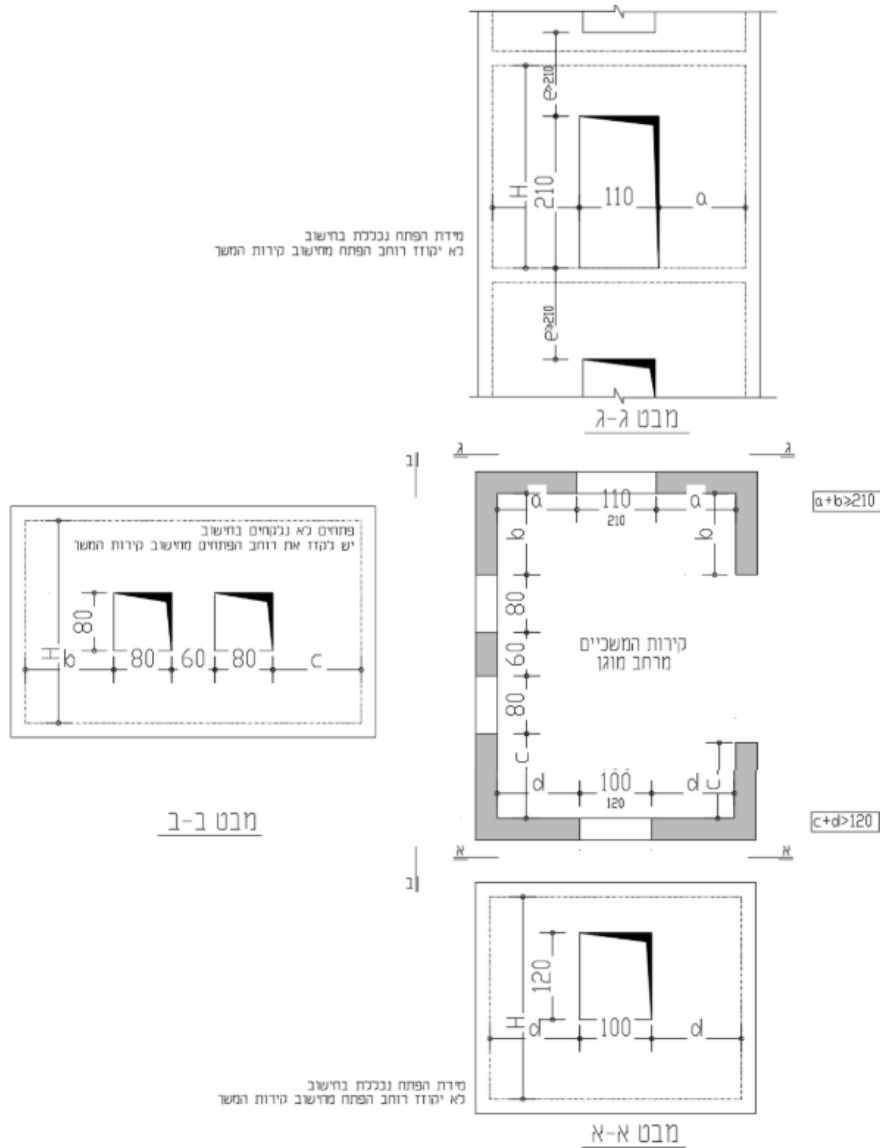
איור 17 שלושת הקטגוריות לאחוזי הקירות היורדים המוגדרים בתקנות

בכל אחד מהמקרים, האלמנטים של פירי הממד"ים כפופים לדרישות מעט שונות. לכן, חישוב היקף הקירות היורדים הינו נקודת המוצא לביצוע בקרת התכן. עם זאת, אופן החישוב אינו פשוט, והוא מצריך הבנה מעמיקה של התנאים המוגדרים בתקנות לצורך החישוב. ניתן לראות דוגמאות לתנאים אלה באיור 18 ובאיור 19 הלקוחים מהתקנות.

התקנות קובעות כי יש לבצע את החישוב ביחס למידות הפנים של המרחב המוגן. כמו כן, קטע קיר המשך בו קיים פתח לא יילקח בחשבון בחישוב היקף קירות ההמשך, אלא אם הוא עומד בתנאים מסוימים. כאשר מדובר בחלונות תנאים אלה מתייחסים לשטח הפתחים, היחס בין גובה לרוחב, מרחק בין הפתחים, מרחק בין קצה חופשי של קיר לפתח, רוחב מצטבר של פתחים בקיר בודד. עבור דלתות יש להתחשב בשטח הפתח, ובתנאי שלא קיימים פתחים נוספים במרחק הקטן מגובה פתח הדלת לכל הכיוונים. האיורים הלקוחים מתוך התקנות ממחישים עד כמה החישוב יכול להיות מורכב ומסורבל. תרגום ההנחיות לחוקים לוגיים כפי שמקובל בפלטפורמות של בקרת תכן אוטומטית יסתכם במערכת ארוכה מאוד ומסורבלת של לולאות. יתרה מכך, על מנת להפעיל את החישוב יהיה צורך לגשת למידע רב אודות הגיאומטריה של אלמנטים בפיר הממד"ים אך גם לטופולוגיה של הפיר, מה שעלול להוות אתגר בפני עצמו.



איור 18 אופן חישוב היקף הקירות ההמשכיים לפי תקנות פקע"ר לתכנון אדריכלי של מרחבים מוגנים, מתוך תקנות פקע"ר



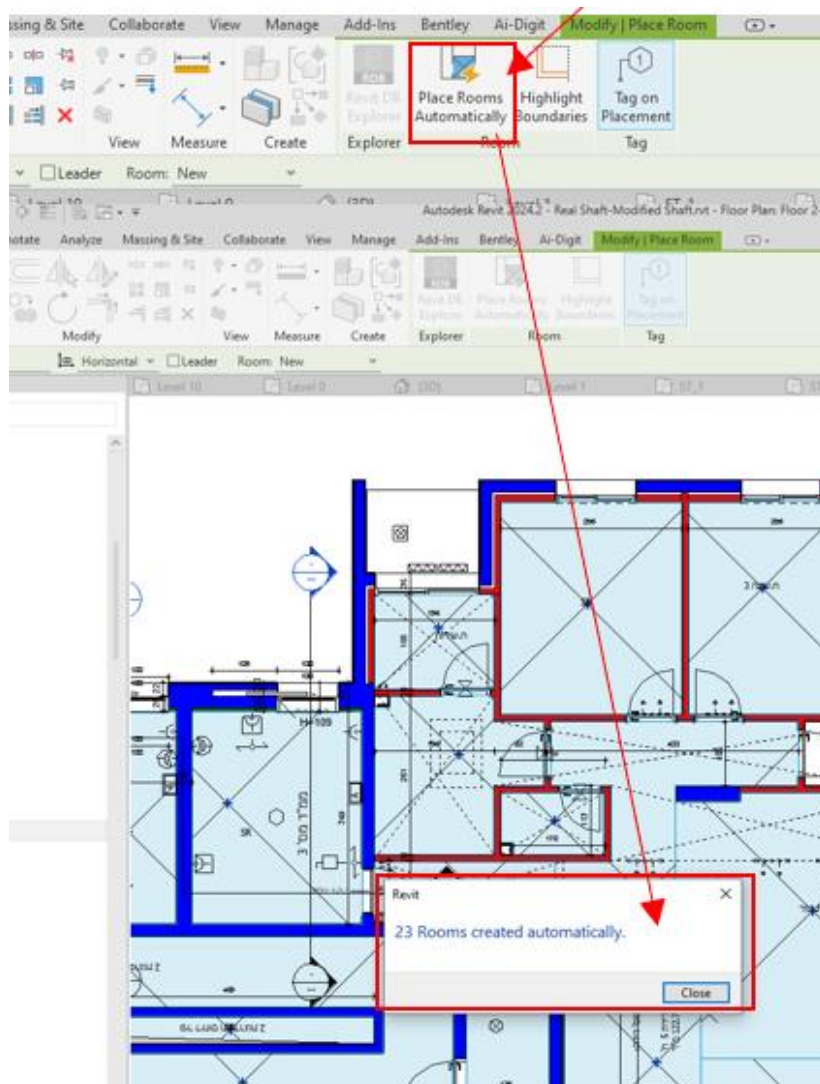
איור 19 תנאים נוספים לחישוב אחוז הקירות היורדים, מתוך תקנות פקע"ר

תהליך בדיקה מוצע

במחקר זה אנו שואפים לרמות אוטומציה גבוהות יותר מאלה המתאפשרות בכלים הקיימים. ישנו מספר לא מבוטל של משימות העשרה סמנטית הנדרשות על מנת לאפשר את הבדיקה בצורה אוטומטית. זאת כמובן בהנחה כי דרישות מידע אלה לא חלות על המתכננים או לחילופין כי איננו סומכים על המידע במודל. תהליך הבדיקה המוצע אם כן, מתבסס על היכולת שלנו לחלק את הבדיקה למשימות קטנות, רובן משימות העשרה סמנטית, כאשר המשימה האחרונה בשרשרת הינה בדיקה בינארית פשוטה "תקין"/"לא תקין". הרעיון המרכזי הוא לאפשר לשלב שיטות מתקדמות בתהליך כדי להתמודד עם המשימות בצורה מיטבית.

לצורך בדיקה זו אנו נדרשים למידע רב ועשיר שנתון בצורה מפורשת במודל. ניתן לתרגם דרישות מידע אלה למשימות העשרה כפי שמפורט בטבלה 3. אנו נתמקד במשימת העשרה שעיקרה לסווג את פיר הממד"ים לאחת משלושת הקטגוריות המוגדרות בהנחיות פקע"ר, קרי מעל 70% מהקירות ההמשכים מגיעים עד היסוד, בין 50%-70% מהקירות מגיעים עד היסוד, ומקרה בו מתחת ל 50% מהקירות ההמשכיים מגיעים עד היסוד. זוהי משימת ההעשרה המורכבת ביותר ברשימה והחשובה ביותר לביצוע הבדיקה. אולם חשוב לציין כי המשימות האחרות ניתנות לפתרון וחלקם אף נפתרו במחקרים קודמים. למשל, לצורך הגדרת גיאומטריית חללים ניתן להשתמש ישירות ב Revit. בהתבסס על נורמות המידול הנפוצות, מודלים לא תמיד כוללים אלמנטים אבסטרקטיים אשר מבטאים את גיאומטריית החדרים במבנה. היעדר גיאומטריה פיזית מונע למשל שיוך מפורש של אלמנטים רלוונטיים לאותו חלל, ואף לבדוק דרישות בסיסיות כמו גודל החלל. במקרה שלנו, לא ניתן יהיה לשייך את קירות המרחב המוגן אל חדר המרחב המוגן. Revit משלבת פקודת ברירת מחדל שנועדה ליצור אובייקטים של חדרים בצורה אוטומטית כפי שניתן לראות באיור 20.

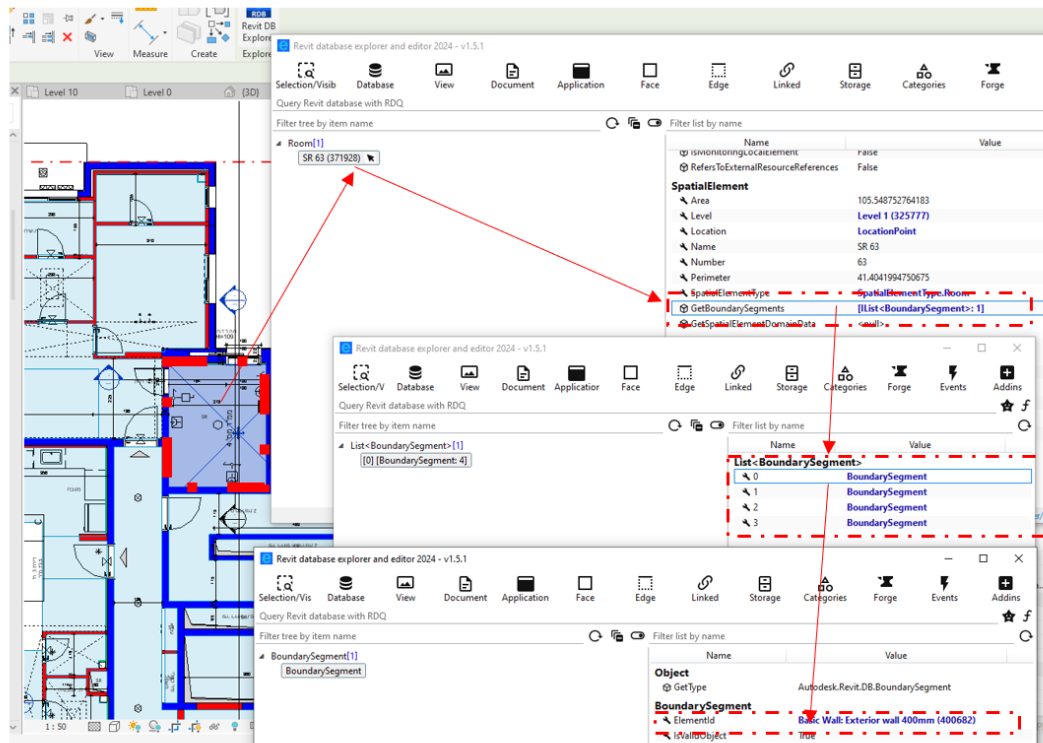
#	משימה	תיאור	טכניקת העשרה
1	הגדרת גיאומטרית חללים	הוספת תיאור גיאומטרי מפוש לחללי המבנה	פקודות עריכה בתוך Revit מאפשרות להשלים גיאומטריה לכל חלל סגור במודל בצורה אוטומטית
2	שמות חדרים	סיווג פונקציות החדרים במבנה בהתאם לרשימה נתונה	עבודה קודמת בתחום מצביעה על היתרון של שימוש בלמידת מכונה לזיהוי חללים
3	זיהוי קירות מרחבים מוגנים	קישור ישיר של קירות המרחב המוגן אל חלל המרחב המוגן	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
4	זיהוי חלונות ודלתות מרחבים מוגנים	קישור ישיר של חלונות ודלתות המרחב המוגן אל חלל המרחב המוגן	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
5	זיהוי תקרות מרחבים מוגנים	קישור ישיר של תקרות המרחב המוגן אל חלל המרחב המוגן	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
6	קביעת כיוון	קביעת כיוון הקירות במרחב (האם בכיוון X או בכיוון Y)	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
7	מיקום אנכי	קביעת המיקום האנכי של כל אלמנט (מעל הקרע/מתחת לקרקע)	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
8	סיווג קירות מרחב מוגן	סיווג קירות לחיצוני/פנימי/משותף	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
9	קביעת מספר קירות החיצוניים בחדר	מספר הקירות החיצוניים ששייכים לכל מרחב מוגן	כללי היסק על בסיס ניתוח גיאומטרי
10	חישוב אחוז קירות יורדים	סיווג החללים לשלוש קבוצות בהתאם לאחוז ירידת הקירות	GNN



איור 20 הוספת אלמנטי "חדר" בתוך תכנת Revit

זיהוי ותיוג החדרים עפ"י הפונקציה שלהם במנה הינה משימה מורכבת יותר. לעתים קרובות, חללים מתויגים בתוויות שגויות או שמות שאינם משקפים במדויק את השימוש המיועד של החלל. יתרה מכך, על מנת לאפשר בדיקה אוטומטית, על התוויות להתאים לאלה שבהן נעשה שימוש בסט החוקים לבדיקה. מחקר קודם התייחס לאתגר זה על ידי שימוש במתודולוגיות שונות, כולל GNN כפי שתואר בעבודתם של Wang et al. [91], וטכניקות למידת מכונה מסורתיות כפי שנדונו על ידי Bloch and Sacks [33]. לכן, אנו פועלים תחת ההנחה שבעיה זו נפתרה בעבר ושכל החללים במודל כבר מזהים כהלכה ומתויגים בהתאם לתפקודם במבנה. יש לשים לב כי זו אחת המשימות אשר תדרוש אימון מודל מראש, בין אם הוא מבוסס למידה קלאסית או למידה על בסיס גרפים.

כדי לזהות ולבודד את הקירות המגדירים חללים בתוך פיר הממד"ים התבססנו על ניתוח גיאומטרי של הנתונים המיוצאים מ-Revit. על ידי שימוש באלמנטי גבולות החלל, נוכל לזהות את כל הקירות המגדירים חדר מסוים ולתייג אותם בהתאם, ניתן לראות דוגמא לתיוג כזה באיור 21. באופן דומה, כדי לזהות את התקרה המשויכת לכל חדר, הסתמכנו על ההצטלבויות בין התיבות החוסמות (Bounding Box) של החדרים ושל התקרות. זאת על מנת לא להיות תלויים בשם המפלס או הגובה, מכיוון שאנו שואפים ליצור שיטה ישימה אוניברסלית שאינה מניחה שתכונות אלו מוגדרות במדויק בכל מודל.



איור 21 בידוד הקירות השייכים לחדר ממ"ד

רובן של משימות ההעשרה שלעיל נפתרו באמצעות ניתוח גיאומטרי של אלמנטי המודל בשילוב כללי היסק לוגיים. המשימה המורכבת ביותר והחשובה ביותר היא סיווג החללים בהתאם לאחוז הקירות היורדים. ההחלטה להשתמש בלמידת מכונה על בסיס גרפים לצורך הסיווג נובעת ממספר שיקולים. ראשית, מורכבות החישוב המצריכה התחשבות בפרמטרים ושיקולים מיוחדים, הופכת את האוטומציה של החישובים למשימה מסובכת ומאתגרת במיוחד. הצורך להתחשב ביחסים השונים בין האלמנטים במודל, כמו הקשרים האנכיים בין קירות לחללים והקשרים האופקיים בין קירות לפתחים, מסבכים את התהליך עוד יותר. אוטומציה של תהליך החישוב בשיטות מסורתיות תגזול זמן רב ותוביל לשרשרת ארוכה של לולאות מקוננות. הצורך להתחשב ביחסים בין האלמנטים מציב אתגר גם עבור גישות למידת מכונה קלאסיות, כיוון שהפורמט נתוני האימון צריך לאפשר ייצוג התכונות והיחסים הנדרשים בין אלמנטים במודל.

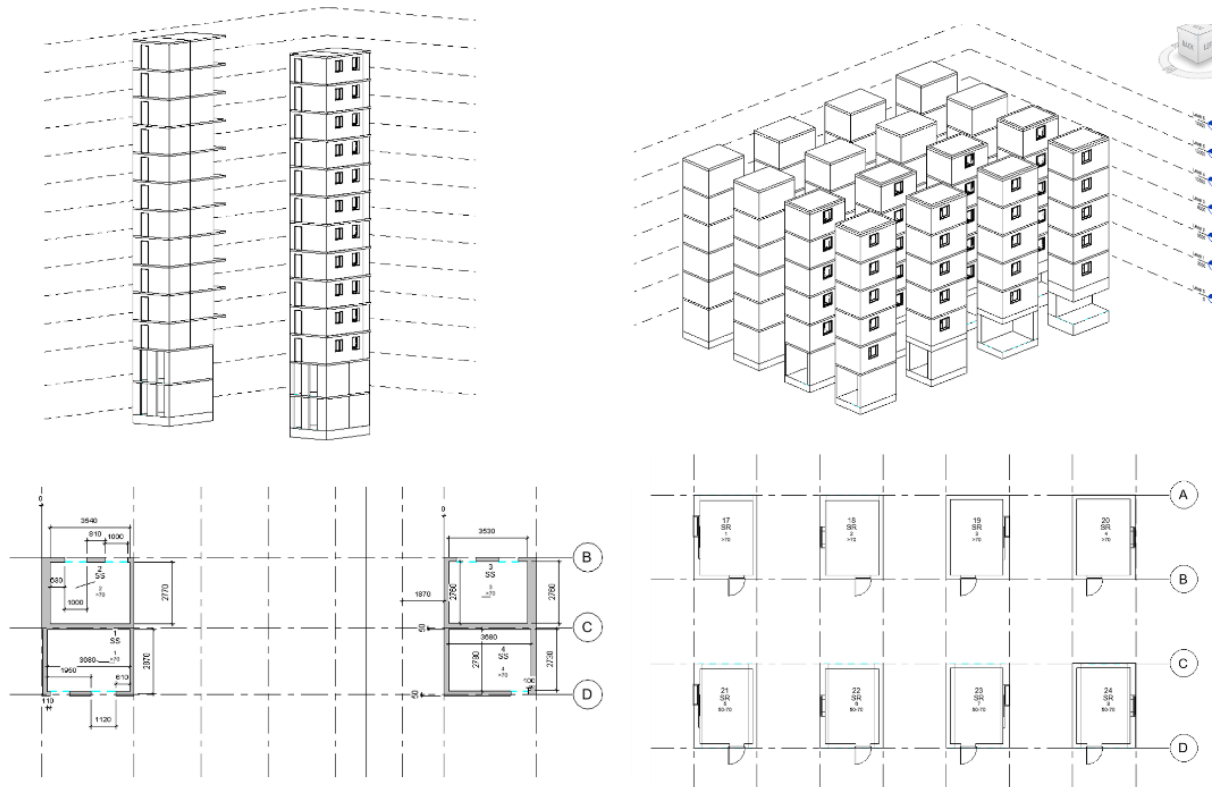
במטרה להתגבר על אתגרים אלו, נדרשת שיטה שתאפשר לנו לייצג ואף להשתמש בקשרים המורכבים בין אלמנטים במודל והפרמטרים שלהם. קשרים אלה ניתן לייצג באמצעות גרף, וניתן למנף את המידע המיוצג בגרף באמצעות אלגוריתמי למידת מכונה הפועלים ישירות על הגרף. GNN הוא מודל למידת מכונה מונחית, השלב המרכזי בתהליך הוא האימון של מודל הלמידה, שהוא אחד מהשלבים המאתגרים ביותר. בגלל הקושי הרב לאסוף מודלים אמיתיים, הן בגלל הנטייה של אנשי התעשייה שלא לשתף, והן בגלל העובדה כי מודלים קיימים יצטרכו בכל מקרה לעבור איבוד ותיוג, בחרנו לעקוב אחרי התהליך שהוצג בעבודתם של Bloch et al. [61] אשר הראו כי ניתן לאמן מודל GNN על סט נתונים סינטטיים ולהשתמש במסווג לצרכים אמיתיים לצורך בקרת תכן אוטומטית. זאת בהנחה ובתנאי שסט הנתונים הנוצר מדמה בצורה טובה את המציאות. כלומר שאנו מצליחים לייצג את מרבית אלטרנטיבות התכן אותן פוגשים סביר שנקבל מהמתכננים בשלבי הגשת בקשה להיתר.

יצירת מאגר נתונים סינטי ליימון

כפי שניתן לראות מעבודות קודמות בנושא, לצורך יצירת מאגר נתונים סינטי יעיל ליימון מודל שישמש בהמשך לבדיקת מודלים שמגיעים מהתעשייה, יש לחקות כמה שניתן את נורמות התכנון הקיימות. לצורך כך נבחנו מודלי BIM של מבני מגורים הקיימים בידי החוקרים ונבחנו מספר דוחות בקרה שקיימים במכון הבקרה. למרות הדרישות האדריכליות לתכנון מרחבים מוגנים, ניתן לראות מגוון רחב של קונפיגורציות במיוחד כאשר מתחשבים בפיר הממד"ים כולו וביחס שלו לקירות היורדים. למשל, מרחבים מוגנים של שתי דירות סמוכות יכולים להיות צמודים זה לזה, כלומר יש להם קיר משותף, ויכולים להיות מבודדים. מבנה המרחב הבודד יכול לכלול ארבע קירות ויותר מה שכמובן משפיע גם כן על בדיקת הקירות היורדים. מידע מסוג זה אודות תצורות פוטנציאליות הוא חיוני ליצירת מאגר נתוני ליימון.

כיוון שהנתונים שמעניינים אותנו הם נתונים אודות פירי הממד"ים בלבד, ובתנאי שזה כולל גם מרחבים שאינם מרחבים מוגנים אשר נמצאים בגבולות הפיר, תהליך יצירת הנתונים הסינטיים התמקד ביצירת מודלים של פירים קירות יורדים בלבד. הנ"ל נעשה בשיטתיות על מנת להבטיח שמאגר הנתונים ייתן ביטוי למגוון רחב של תצורות תכן אפשריות. בשלב הראשון הוכן סט ראשוני של דגמים תואמים את כל דרישות התקן. בתהליך יצירת המודלים נוסף ייצוג מפורש של כל המידע הנדרש לצורך הבדיקה כפי שמפורט טבלה 3. מידע זה כולל גם את התיוג של הנתונים, כלומר תיוג החדרים וקירות בהתאם לאחוז הקירות היורדים וזאת על בסיס חישוב.

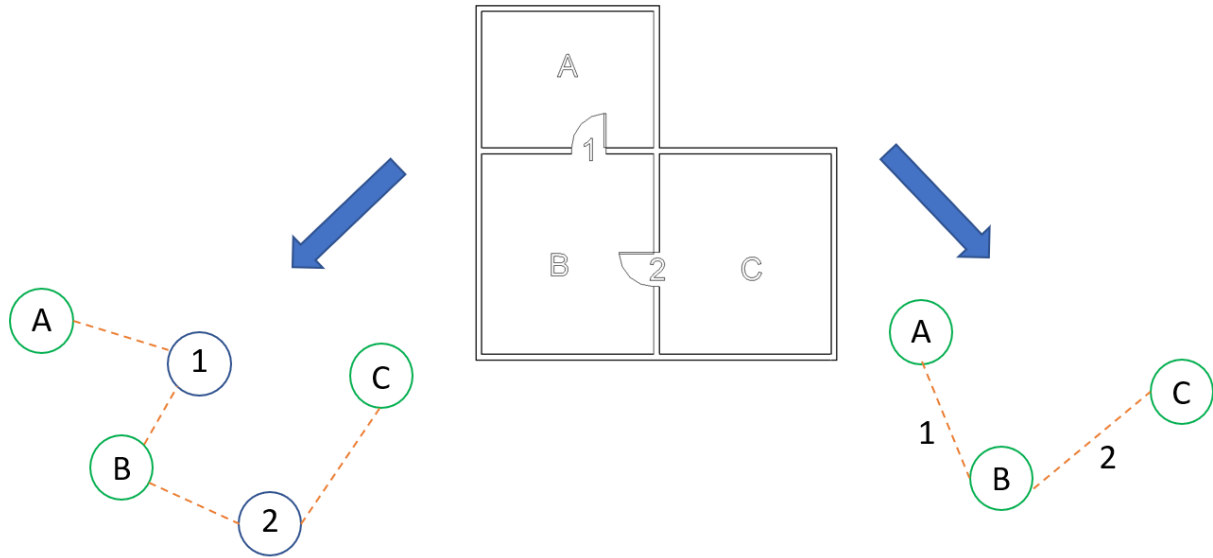
בשלב השני השתמשנו במודלים בסיסיים אלה כדי ליצור מגוון תרחישים לפתחים בתוך קירות הפיר, בייחוד בקירות היורדים. פתחים אלה תוכננו כדי לעמוד בתקנות הנדרשות, תוך שמירה על אורך החיבור כפי שהוא בדגמי הבסיס. כלומר גם דגמים אלה תואמים את דרישות התקן. בשלב השלישי התמקדנו במקרים מורכבים יותר, כולל ייצוג קירות בעלי ממדים דומים אך אורכי חיבור שונים עקב שינויים בפתחים, ומודלים שלא תואמים את דרישות התקן. בסופו של התהליך נוצרו 710 מודלי BIM של פירי ממ"דים כולל הקירות המשכיים אשר יורדים עד היסודות. מתוך הדגמים הללו, 83% הם פירים בודדים ללא קירות משותפים ביניהם, 17% מהדגמים מייצגים תרחישים של קיר משותף כמתואר באיור 22.



איור 22 יצירת סט הנתונים הסינטי לאימון המודל

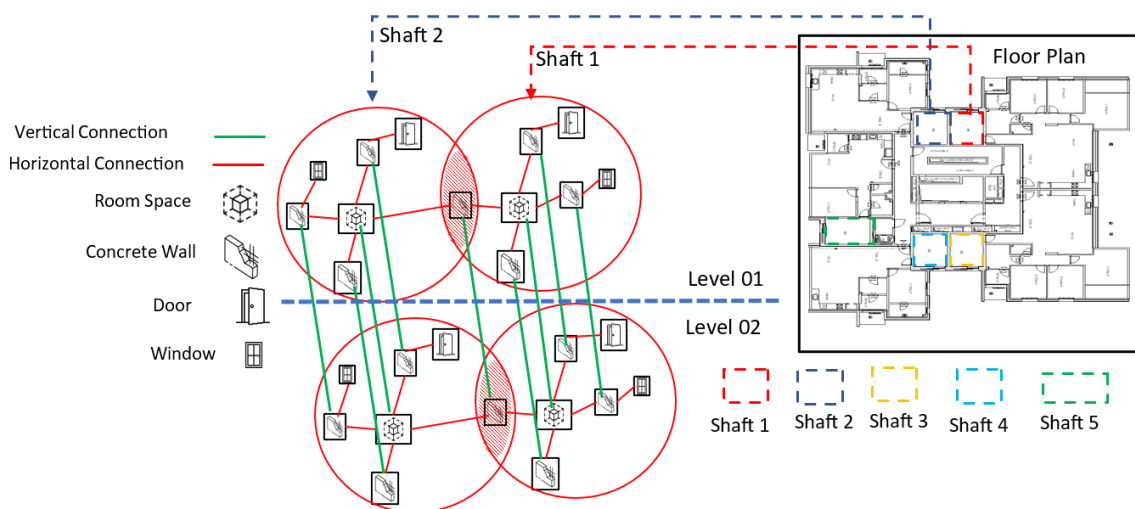
מבנה הדאטא

לאחר יצירת הדאטא הסינטי, המודלים תורגמו לייצוג באמצעות גרפים. גרף בנוי ממספר רכיבים בסיסיים: קודקודים (nodes) וקשתות (edges). במקרה שלנו, כל קודקוד מייצג אלמנט מבני מסוים, כמו קירות, חלונות, דלתות או חללים במבנה, כאשר לכל קודקוד יש מאפיינים המגדירים אותו, כגון מיקום גיאומטרי, סוג החומר, מידות ועוד. הקשתות מייצגות את הקשרים בין הקודקודים, כמו למשל קשרים בין חללים לדלתות. חשוב לשים לב כי גם למבנה הפשוט ביותר יש מספר אפשרויות לייצוג הגרף, למשל דלת יכולה לייצג קשת או לחילופין יכולה לייצג קודקוד. אם נתבונן באיור 23, ניתן לראות כי אותו מבנה בדיוק ניתן לייצג באמצעות שני גרפים שונים. יתרה מכך, בעוד שבאיור 23 אנו מתייחסים אך ורק למבנה הבסיסי של הגרף, הרי גם המאפיינים המקושרים לקודקודים יכולים להיות שונים, כך שלמעשה יש אוסף גדול של פתרונות (גרפים) אפשריים לייצוג מבנה בודד. כל ייצוג, הן של מאפיינים ובמיוחד של הקשרים בין הקודקודים, ישפיע רבות על הביצועים והיעילות של רשת ה-GNN.



איור 23 מבנה אחד ושני ייצוגים אפשריים באמצעות גרף

ישנה חשיבות רבה לאופן בניית הגרף ונדרש להגדיר הן את המאפיינים המקושרים לקודקודי הגרף והן את הקשרים הנדרשים בין הקודקודים וזאת בהתאם למידע שמבקשים להדגיש ולנתח. למשל, ניתן ליצור גרף שבו הקודקודים מייצגים חללים והקשתות מייצגות פתחים ביניהם, מה שיאפשר ניתוח של תנועת אנשים במבנה אך הוא לא יהיה רלוונטי לבעיה בה אנו מתמקדים. גרף אחר יכול לכלול קודקודים המייצגים קירות והקשתות מייצגות את החיבורים בין הקירות ובין הקירות לחללים, לצורך ניתוח רציפות אנכית של קירות. נדרש תהליך איטרטיבי, ניסוי וטעיה על מנת לקבוע את מבנה הגרף האופטימלי ואת ארכיטקטורת ה-GNN המתאימה. מספר תצורות גרפים שונות נבחנו במקרה שלנו, כאשר העיקרית בהן כוללות גרף בעל קודקודים המייצגים את קירות פיר הממד"ים, חללי הממד"ים, דלתות וחלונות, כאשר הקשרים האנכיים בין הקירות והקשרים בין הקירות לחדרים נתונים כקשתות. ניתן לראות ייצוג זה באיור 24. תצורה אחרת של גרף במקרה שלנו כללה אך ורק חללים וקירות כקודקודים, ואילו חלונות ודלתות יוצגו כמאפיינים של הקירות.



איור 24 ייצוג פירי הממד"ים כגרפים

באמצעות בחינה מדוקדקת של פרמטרי המודל ותהליך ידני לקביעת יחס הרציפות האנכית עבור החדרים המוגנים, הגענו למסקנה שהקואורדינטות של התיבות החוסמות של האלמנטים (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} , Z_{max}) הן תכונות קריטיות והן הוגדרו כחלק מהמאפיינים המקושרים לקודקודים בגרף. תכונות אלה מאפשרות ל-GNN להבין את הקשרים המרחביים בין אלמנטים במודל, ומאפשרות זיהוי קואורדינטות חופפות עם הבסיס. בנוסף, אילוצים הקשורים למידות הפתחים (רוחב, גובה ושטח), הם חיוניים וכן שימשו כמאפיינים המקושרים לקודקודי הגרף. ברשימת המאפיינים נכללות גם תכונות המזהות את סוגי הקודקודים (חללים, קירות, דלתות וחלונות) יחד עם מזהה ייחודי עבור כל אלמנט. במקרים שבהם פרמטר אינו חל על סוג קודקוד מסוים, הוא מיוצג כערך אפס. איור 25 מציג חלק קטן ממאפייני הקודקודים מתוך סט הנתונים הסינטטי. הקשתות בגרף מיוצגות באמצעות מטריצת סמיכויות, שאת חלקה ניתן לראות באיור 26. מטריצת הסמיכויות במקרה שלנו מגדירה את הקשרים האנכיים והאופקיים בין קירות הנמצאים במגע, קשרים בין קירות המקיפים את חדר הממ"ד אל חדר הממ"ד, והקשרים בין פתחים לקיר בו הם נמצאים. המשותף בין ייצוג המאפיינים לייצוג הקשתות הוא המזהה הייחודי שניתן לכל קודקוד בגרף (ID), באמצעותו יוצגו גם התגיות לכל אלמנט (כפי שניתן לראות בחלק הימני של איור 26). התגיות נקבעו בצורה ידנית באמצעות חישוב אחוז הקירות היורדים לקירות הבודדים בפיר הממ"ד וגם לקירות המקיפים כל ממ"ד (כלומר אחוז הקירות היורדים לחדר).

קבוצה 1 - מתייחסת לאחוז המשכיות אנכית גדול מ-70%.

קבוצה 2 - מתייחסת לאחוז המשכיות אנכית בטווח של 50% עד 70%.

קבוצה 3 - מתייחסת ליחסי המשכיות אנכית נמוכים מ-50%.

חשוב לציין שהסיווגים הללו חלים אך ורק על קירות וחללים, שהם אלמנטי המטרה בקביעת עובי הבטון לרכיבים מבניים בפירי הממ"ד. עם זאת, כיוון שחלונות ודלתות מיוצגים כקודקודים בגרף, הם יסווגו גם כן, מכיוון שהאלגוריתם מסווג את כלל הקודקודים בגרף נתון. על מנת לספק תיוג הגיוני לכל סוגי הקודקודים בגרף, הוספנו קטגוריה נוספת:

קבוצה 4 – זוהי למעשה תווית דמה המיועדת למקרים שבהם סיווג לפי אחוז ההמשכיות האנכית אינו ישים, כלומר היא מתייחסת באופן ספציפי לדלתות וחלונות.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	ID	Xmin	Ymin	Xmax	Ymax	Zmin	Zmax	Area	Length	Height	Width	Space	Wall	Door	Window
2	3237271	-6.42513	5.562957	-6.17513	9.562957	0	2.85	11	3.9	3	0	0	1	0	0
3	3248961	-6.30013	5.562957	-3.45013	5.762957	0	2.85	8	2.75	3	0	0	1	0	0
4	3250091	-3.65013	5.662957	-3.45013	8.262957	0	2.85	7	2.6	3	0	0	1	0	0
5	3268231	-6.45013	5.562957	-6.15013	9.562957	3	5.35	8	3.775	2.5	0	0	1	0	0
6	3268871	-6.30013	9.312957	-3.45013	9.562957	3	5.35	6	2.75	2.5	0	0	1	0	0
7	3271271	-3.65013	5.562957	-3.45013	9.437957	3	5.35	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
8	3272021	-6.30013	5.562957	-3.55013	5.762957	3	5.35	4	2.75	2.5	0	0	1	0	0
9	3273301	-6.45013	5.562957	-6.15013	9.562957	5.5	7.85	8	3.775	2.5	0	0	1	0	0
10	3273311	-6.30013	9.312957	-3.45013	9.562957	5.5	7.85	6	2.75	2.5	0	0	1	0	0
11	3273321	-3.65013	5.562957	-3.45013	9.437957	5.5	7.85	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
12	3273331	-6.30013	5.562957	-3.55013	5.762957	5.5	7.85	4	2.75	2.5	0	0	1	0	0
13	3273981	-6.45013	5.562957	-6.15013	9.562957	8	10.35	8	3.775	2.5	0	0	1	0	0
14	3273991	-6.30013	9.312957	-3.45013	9.562957	8	10.35	6	2.75	2.5	0	0	1	0	0
15	3274001	-3.65013	5.562957	-3.45013	9.437957	8	10.35	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
16	3274011	-6.30013	5.562957	-3.55013	5.762957	8	10.35	4	2.75	2.5	0	0	1	0	0
17	3274231	-6.45013	5.562957	-6.15013	9.562957	10.5	12.85	8	3.775	2.5	0	0	1	0	0
18	3274241	-6.30013	9.312957	-3.45013	9.562957	10.5	12.85	6	2.75	2.5	0	0	1	0	0
19	3274251	-3.65013	5.562957	-3.45013	9.437957	10.5	12.85	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
20	3274261	-6.30013	5.562957	-3.55013	5.762957	10.5	12.85	4	2.75	2.5	0	0	1	0	0
21	3274481	-6.45013	5.562957	-6.15013	9.562957	13	15.5	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
22	3274491	-6.30013	9.312957	-3.45013	9.562957	13	15.5	7	2.75	2.5	0	0	1	0	0
23	3274501	-3.65013	5.562957	-3.45013	9.437957	13	15.5	9	3.775	2.5	0	0	1	0	0
24	3274511	-6.30013	5.562957	-3.55013	5.762957	13	15.5	5	2.75	2.5	0	0	1	0	0
25	3333631	-4.82213	4.782957	-3.97813	5.99733	2.97	5.09	1.414	0	2.02	0.7	0	0	1	0

איור 25 תצלום מסך מתוך הייצוג של סט הנתונים הסינטטי

Edges

	A	B
1	Source	Target
2	3640441	3642381
3	3642381	3643451
4	3643451	3643641
5	3643641	3644661
6	3644661	3644811
7	3640511	3642421
8	3642421	3643481
9	3643481	3643681
10	3643681	3644691
11	3644691	3644851
12	3640541	3642451
13	3642451	3643511
14	3643511	3643711
15	3643711	3644721
16	3644721	3644881
17	3640571	3642481
18	3642481	3643541
19	3643541	3643741
20	3643741	3644751
21	3644751	3644911

Classes

	A	B
1	ID	Label
2	3237271	1
3	3248961	1
4	3250091	1
5	3268231	1
6	3268871	3
7	3271271	2
8	3272021	1
9	3273301	1
10	3273311	3
11	3273321	2
12	3273331	1
13	3273981	1
14	3273991	3
15	3274001	2
16	3274011	1
17	3274231	1
18	3274241	3
19	3274251	2
20	3274261	1
21	3274481	1

איור 26 דוגמא למטריצת סמיכויות (משמאל) ושיוך התגים לקודקודי הגרף (מימין)

כמוסבר קודם לכן, תצורת הגרף ומאפייני הקודקודים לא נבחרו בצורה רנדומלית, אלא הם תוצאה של בחינה מעמיקה (תוך כדי תהליך האימון) של דיוק מודל הלמידה בהינתן קומבינציה מסוימת של תצורת גרף, מאפיינים וארכיטקטורת הרשת. ארכיטקטורת הרשת מתייחסת למבנה ולארגון של שכבות הרשת והחיבורים ביניהם במודל. באופן כללי, זה יכלול את שכבת הקלט שבה הקודקודים יקבלו את המאפיינים

ההתחלתים שלהם, מספר שכבות חביות שבהן מתבצע תהליך "העברת ההודעות", שכבות אלו מעדכנות את הייצוג של כל קודקוד על ידי שילוב המידע מהקודקוד עצמו ומהקודקודים השכנים לו בגרף. ניתן להשתמש במנגנונים שונים להעברת הודעות, קביעת המנגנון היא גם חלק מארכיטקטורת הרשת. לבסוף, בשכבת הפלט המודל מספק את התחזית או הסיווג הסופי עבור כל קודקוד. ישנם מספר היפר פרמטרים בתוך ארכיטקטורת הרשת, שהם פרמטרים שקובעים את מבנה ותפקוד המודל ומוגדרים מראש על ידי המתכנן ולא נלמדים במהלך האימון. הם משפיעים על אופן הפעולה של האלגוריתם והמודל, וקביעתם בסופו של דבר נעשית על בסיס שלב האימות (Validation). למשל, מספר השכבות הוא היפר פרמטר של המודל, בעוד שיותר שכבות מאפשרות למודל ללמוד קשרים מורכבים יותר, הן יכולות גם להוביל להתאמה יתרה לנתוני האימון וחוסר יכולת של המודל לבצע הכללה ולספק חיזויים (פרדיקציות) מדויקים. ישנם היפר פרמטרים רבים אשר נקבעים באותה הצורה, גודל אצווה, קצב למידה, פונקציית האקטיבציה ועוד.

תהליך האימות הוא קריטי לבחירתם של פרמטרים אלה. לצורך כך, סט הנתונים חולק רנדומלית בצורה הבאה: 70% מהנתונים שימשו כנתוני אימון, 15% מהנתונים שימשו לאימות המודל במהלך האימון כדי לכוון את ההיפר פרמטרים, ו 15% מהנתונים שימשו לבדיקה הסופית של המודל לאחר האימון. במהלך האימון, המודל נבדק כל הזמן באמצעות נתוני האימות, כאשר ההיפר פרמטרים מתעדכנים במטרה לשפר את ביצועי המודל על סט האימות. כאשר מקבעים את ארכיטקטורת הרשת, המודל נבדק באמצעות סט נתוני המבחן המהווה אוסף נתונים שאינו נחשף למודל במהלך האימון או האימות, ולכן מספק מדד מדויק על יכולת ההכללה של המודל. התוצאות מספקות אינדיקציה על איך המודל צפוי לפעול בהינתן נתונים חדשים. כלל התהליך של אימון, אימות ובדיקה הוא איטרטיבי, כאשר לעיתים קרובות נדרש לחזור על השלבים הללו כמה פעמים כדי לשפר את ביצועי המודל. זה כולל בין היתר שינויים בארכיטקטורת המודל, בחירת המאפיינים, ותצורת הגרף. יש לזכור כי במקרה שלנו סט נתוני המבחן הינו קבוצה מתוך סט הנתונים הסינטטי, ולכן יש חשיבות רבה למדוד את ביצוע המודל גם על נתונים אמיתיים.

נציין כי התרגום של סט המודלים לתצורת הגרפים המתאימה נעשה באופן אוטומטי. הנתונים יוצאו ממודלי Revit באמצעות תוסף המאפשר ייצוא של כל המאפיינים הקשורים לאלמנטים במודל לפורמט Excel. לאחר מכן פותחו סקריפטים ב-Python למיפוי והפקת מאפייני המודל כפי שהוגדר בתצורת הגרף הנדרשת. אותו הקוד גם טיפל במשימה המורכבת יותר של הגדרת הקשתות שמחברות את קודקודי הגרף באמצעות הגדרת מוצא ויעד. בנוסף, יוצא מידע אודות התיבות החוסמות של האלמנטים מה שאיפשר לנו לקשר בין הקירות לחללים אותם הם מגדירים בצורה מפורשת. עבור חיבורים בין קירות לדלתות או חלונות, ניצלנו את מידע ה-hostID המשוך לחלונות ולדלתות, שהתייחס למזהה הקיר בו נמצאים פתחים אלו. חיבורים אנכיים בין קירות התבססו על חפיפות בקואורדינטות של התיבות החוסמות אשר הצביעו על קישוריות אנכית. בתום תהליך זה, נוצרו שלושה קבצי CSV עבור נתוני האימון: קובץ המכיל את מזהי הצמתים עם המאפיינים המשויכים להם (איור 25) קובץ המפרט את הקשתות עם מזהי המקור והיעד (איור 26) וקובץ שלישי המכיל את מזהי הצמתים עם תוויות הסיווג המתאימות להם (איור 26).

לאחר הכנת הנתונים, החל שלב האימון. לצורך היישום, נבחרה ספריית PyTorch בשל גמישותה, יעילותה וטווח הכלים הנרחב שהיא מציעה. במהלך האימון בחננו בצורה איטרטיבית מספר סוגים של מודלי GNN ומספר תצורות גרף.

תוצאות

לפני שנציג את תוצאות הערכת הביצועים של מודלים שונים שנבחנו נסביר בקצרה את המדדים המשמשים להערכה זו. בתחום למידת מכונה, ישנם מספר מדדים המשמשים להערכת הביצועים של מודל סיווג. המדדים העיקריים הם Precision, Recall, וציון F1. בנוסף ניתן להסתכל על מדד כללי יותר הנקרא Accuracy (דיוק), שהוא אמנם נותן הערכה כללית עד כמה המודל הוא מדויק אבל הוא לא מצביע על טבע השגיאות שהמודל עושה, מה שיכול להיות קריטי במיוחד בתחום כמו בקרת תכן. נבחין תחילה בין מספר מונחים חשובים המשמשים לתיאור התוצאות של הסיווג ואת שגיאותיו. סוגי השגיאות מיוצגות במה שנקרא "מטריצת בלבול", כפי שמתואר באיור 27, והיא מאפשרת לבחון בקלות את סוגי השגיאות שהמודל עושה.

		Predicted	
		Positive	Negative
Actual	Positive	<u>True positive (TP)</u>	<u>False negative (FN)</u>
	Negative	<u>False positive (FP)</u>	<u>True negative (TN)</u>

איור 27 סוגי שגיאות במודלי למידת מכונה

True Positive (TP) - הוא מצב שבו דוגמא מסווגת נכון כחיובית כאשר היא אכן חיובית במציאות. אם נניח שאנחנו בודקים אם מבנה מסוים עומד בתקנות בטיחות אש, אזי True Positive מצב בו המודל מסווג את המבנה כ"לא עומד בתקנות", והוא אכן אינו עומד בתקנות במציאות.

False Positive (FP) - הוא מצב שבו המודל מסווג דוגמה כחיובית כאשר היא שלילית במציאות. כלומר, מבנה שעומד בתקנות מסווג ע"י המודל כ"לא עומד בתקנות". בהקשר של בקרת תכן, זו שגיאה שאנו יכולים לאפשר מתוך הנחה כי תכן אשר מסווג כלא תקין יועבר לבקרה ע"י מומחה אנושי.

False Negative (FN) - הוא מצב שבו המודל מסווג דוגמה כשלילית כאשר היא חיובית במציאות. למשל, כאשר מבנה אשר במציאות אינו עומד בתקנות, מסווג ע"י המודל כ"תקין". זהו סוג השגיאה המסוכן ביותר כיוון שיכולות להיות לו השלכות על בטיחות המשתמשים במבנה.

True Negative (TN) - זהו מצב שבו המודל מסווג נכון דוגמה כשלילית כאשר היא אכן שלילית במציאות. כלומר, מבנה שעומד בכל התקנות אכן מסווג ע"י המודל כ"תקין".

על מנת לחשב את המדדים המשמשים להערכת הביצועים של מודל, נשתמש בנוסחאות הבאות:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

ציון F1 מכמת את ההשפעה של שני המדדים לכדי ציון אחד משוכלל, שהוא למעשה הממוצע ההרמוני של Precision, Recall. הוא מחושב באופן הבא:

$$Precision = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

כעת לאחר שאנו מבינים את מדדי ההערכה, נציג את תוצאות המודלים השונים אשר נבחנו במסגרת מחקר זה. לצורך הצגת תוצאות האימון העיקריות נתמקד בתצורת הגרף המתוארת באיור 24, אשר שימש לאימון מספר מודלי GNN שונים. תחילה נבחן אלגוריתם GraphSAGE [92]. מאגר הנתונים חולק באופן אקראי ל-70%, 15%, ו-15% עבור אימון, אימות ומבחן כדי להעריך את יכולת המודל להכליל על נתונים שלא נראו בעבר. שלב האימון בוצע באופן איטרטיבי לצורך כיוון היפר-גרמטרים על בסיס הביצועים על קבוצת האימות. כמו כן, הוחל קריטריון עצירה מוקדמת כדי למנוע התאמת יתר לנתוני האימון. לאחר השלב האיטרטיבי, ביצועי המודל הוערכו באמצעות סט המבחן אשר לא חשוף למודל בזמן האימון.

תוצאות הסיווג אשר סיפק המודל מתוארות בטבלה 4.

טבלה 4 מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GraphSAGE הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטיים

	Predicted	Actual			
		>70%	50-70%	<50%	NA
	>70%	3580	2	196	0
	50-70%	515	143	6	0
	<50%	637	86	555	0
	NA	0	0	0	2025

כאשר עיקר מדדי ההערכה הינם :

Precision = 80.46%, Recall=81.38%, F1=78.93%

באותו האופן נבחן אלגוריתם ה Graph Convolutional Network (GCN) [93]. תוצאות הסיווג של המודל מתוארות בטבלה 5 שלהלן.

טבלה 5 מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GCN הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטיים

	Predicted	Actual			
		>70%	50-70%	<50%	NA
	>70%	3652	46	49	0
	50-70%	221	407	14	0
	<50%	191	3	1082	0
	NA	0	0	0	2080

כאשר עיקר מדדי ההערכה הינם :

Precision = 93.30%, Recall=93.23%, F1=92.97%

ולבסוף נבחן גם אלגוריתם ה Graph Attention Network (GAT) [94], תוצאות הסיווג של המודל מתוארות בטבלה 6 שלהלן.

טבלה 6 מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GAT הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטיים

	Predicted	Actual			
		>70%	50-70%	<50%	NA
	>70%	3650	62	66	0
	50-70%	196	449	190	0
	<50%	74	3	1201	0
	NA	0	0	0	2025

כאשר עיקר מדדי ההערכה הינם :

Precision = 94.47%, Recall=94.58%, F1=94.40%

בין האלגוריתמים השונים שנבחנו, ניתן לראות כי GAT היה היעיל ביותר, והשיג תוצאות מרשימות בכל מדדי ההערכה. לכן, המשכנו ליישם את האלגוריתם כדי לחקור גם תצורות שונות של גרף. כפי שצוין קודם, תוויות קודקודי הגרף כללו ארבע קבוצות, כאשר הקבוצה הרביעית שימשה כתווית דמה עבור קודקודים שמייצגים חלונות ודלתות. תצורת גרף אחרת שנבחנה, מתקבלת כאשר הנתונים הקשורים לחלונות ודלתות אינם מיוצגים כקודקודים על הגרף, אלא מוסבים למאפיינים של הקירות בהם הם נמצאים. כתוצאה מכך, מתקבלת תצורת גרף חדשה, אשר בה רק חללים וקירות מוצגים כקודקודים, ולכן יש צורך רק בשלוש תגיות התואמות את הגדרת הקבוצות של אחוז הקירות היורדים המוגדרת בתקנות. כאשר אותו אלגוריתם GAT מופעל לאימון תצורת הגרף החדשה, מתקבלות תוצאות שונות, כפי שמתואר בטבלה 7.

טבלה 7 מטריצת הבלבול עבור אלגוריתם GAT הנבחן על נתוני מבחן שהם חלק מהנתונים הסינטיים, כאשר ייצוג הגרף כולל רק קירות וחללים כקודקודים

	Predicted	Actual		
		>70%	50-70%	<50%
	>70%	3677	74	53
	50-70%	178	463	20
	<50%	41	5	1214

כאשר עיקר מדדי ההערכה הינם :

Precision = 93.33%, Recall=93.52%, F1=93.33%

כפי שניתן לראות, הקומבינציה אשר הניבה את המודל המדויק ביותר מתבססת על תצורת גרף הכולל ייצוג של חלונות ודלתות כקודקודים, וארכיטקטורת המודל מתבססת על GAT. קומבינציה זו נבחנה גם לצורך סיווג מודל המבחן (איור 6) כחלק מבדיקת תקינות עובי האלמנטים בפיר הממדיים. המודל מכיל חמישה פירי ממדיים, כאשר מתוכם ישנם שני זוגות של פירים מחוברים, כלומר פירים בעלי קיר משותף. תרגום

מודל ה Revit לתצורת הגרף המוגדרת כפי שנדרש בוצע באופן אוטומטי באמצעות Dynamo. לאחר קבלת הגרף והזנתו למסווג GAT המאומן הופק קובץ CSV שכלל את הסיווגים החזויים לכל קודקוד. לצורך בחינת התוצאות, אחוז הקירות היורדים במודל המבחן חושב ידנית ובוצעה השוואה לסיווגים החזויים. התוצאות מתוארות בטבלה 8.

טבלה 8 תוצאות סיווג קודקודים בגרף באמצעות אלגוריתם GAT על מודל המבחן

		Actual			
		>70%	50-70%	<50%	NA
Predicted	>70%	208	6	6	0
	50-70%	9	21	9	0
	<50%	23	2	32	0
	NA	0	0	0	102

המסווג השיג דיוק של 86.84% בכל רכיבי הבניין, כולל חללים, קירות, חלונות ודלתות. חשוב לציין כי המחקר התמקד בעיקר בבדיקת נכונות עובי אלמנטי הבטון בפיר הממד"ים, כאשר למעשה סיווג אחוז ההמשכיות של קירות בודדים אינו רלוונטי לצורך בדיקה זו. יחס ההמשכיות האנכית הכולל לכל חלל הוא הגורם המשמעותי לצורך בדיקה זו. לאחר ניתוח נוסף, שיעורי הדיוק לחללים בלבד (מבלי להתחשב באלמנטים האחרים) הגיעו למעשה ל-90.77%, עבור קירות בודדים בלבד 80.47%, ועבור חלונות ודלתות 100%.

תוצאות הסיווג למעשה מגדירה את סט התנאים שצריך להתקיים כנדרש בתקנות. כלומר, כל קבוצה של יחס ההמשכיות האנכית לחללים בפיר מגדירה חוקים מסוימים עבור העובי המינימלי של אלמנטי הבטון בפיר. לכן השלב האחרון בתהליך הוא יישום סט החוקים המתאים לכל אחת מהקבוצות עבור החללים בהתאם לתוצאות הסיווג שסיפק ה GNN. שלב זה יושם באמצעות קוד Python המקבל את המודל ואת תוצאות הסיווג מה GNN עבור כל אלמנט בפיר כקלט, ומפעיל מערכת חוקים בהתאם. כתוצאה מהתהליך, בסה"כ 46 אלמנטים זוהו כלא עומדים בדרישות המינימום שבתקנות, כאשר 27 מתוכם הינם אלמנטים שלמעשה כן עומדים בדרישות. כלומר, תוצאות הבדיקה הובילו ל 27 מקרים שהם False Positives בעוד שלא קיימים אלמנטים אשר לא עומדים בדרישות ולא זוהו בבדיקה, כלומר התוצאות אינן כוללות שגיאות מסוג False Negatives. ניתן לראות תצלום מסך מתוך תוצאות הבדיקה באיור 28.

```

Step 4: Adding wall count columns...
D:\AIDigits\OneDrive - Ai Digits\Code Compliance Checking\Latest documents\Data\Code Check\Code check revision
error of pandas. Value '0.47' has dtype incompatible with int64, please explicitly cast to a compatible dtype
df.at[index, 'Max Wall Thickness'] = max_wall_thickness
Step 5: Mapping wall IDs to room IDs...
Step 6: Adding room association column...
Step 7: Saving intermediate DataFrame to Excel file...
Step 8: Loading intermediate Excel file...
Step 9: Performing compliance checks for walls...
Wall ID: 332810 is not compliant due to: Wall (ID: 332810) width less than 500
Wall ID: 332818 is not compliant due to: Wall (ID: 332818) width less than 500
Wall ID: 375041 is not compliant due to: Wall (ID: 375041) width less than 500
Wall ID: 375049 is not compliant due to: Wall (ID: 375049) width less than 500
Wall ID: 375050 is not compliant due to: Wall (ID: 375050) width less than 500
Wall ID: 586448 is not compliant due to: Wall (ID: 586448) width less than 500
Wall ID: 850270 is not compliant due to: Wall (ID: 850270) width less than 500
Wall ID: 850341 is not compliant due to: Wall (ID: 850341) width less than 500
Wall ID: 854360 is not compliant due to: Wall (ID: 854360) width less than 500
Wall ID: 854901 is not compliant due to: Wall (ID: 854901) width less than 500
Wall ID: 1509219 is not compliant due to: Wall (ID: 1509219) width less than 500
Wall ID: 1511277 is not compliant due to: Wall (ID: 1511277) width less than 500
Wall ID: 1646444 is not compliant due to: Wall (ID: 1646444) width less than 500
Wall ID: 2303605 is not compliant due to: Wall (ID: 2303605) width less than 500
Wall ID: 2304239 is not compliant due to: Wall (ID: 2304239) width less than 500
Wall ID: 3992658 is not compliant due to: Wall (ID: 3992658) width less than 500
Wall ID: 3993120 is not compliant due to: Wall (ID: 3993120) width less than 500
Wall ID: 3993122 is not compliant due to: Wall (ID: 3993122) width less than 500
Wall ID: 3993180 is not compliant due to: Wall (ID: 3993180) width less than 500
Wall ID: 3993264 is not compliant due to: Wall (ID: 3993264) width less than 500
Wall ID: 3993265 is not compliant due to: Wall (ID: 3993265) width less than 500
Wall ID: 3993266 is not compliant due to: Wall (ID: 3993266) width less than 500
Wall ID: 3993320 is not compliant due to: Wall (ID: 3993320) width less than 500
Wall ID: 3993432 is not compliant due to: Wall (ID: 3993432) width less than 500
Wall ID: 3993437 is not compliant due to: Wall (ID: 3993437) width less than 500
Wall ID: 3994343 is not compliant due to: Wall (ID: 3994343) width less than 500
Wall ID: 3994351 is not compliant due to: Wall (ID: 3994351) width less than 500
Wall ID: 3994864 is not compliant due to: Wall (ID: 3994864) width less than 500
Wall ID: 3994866 is not compliant due to: Wall (ID: 3994866) width less than 500
Wall ID: 3995016 is not compliant due to: Wall (ID: 3995016) width less than 500
Wall ID: 3996221 is not compliant due to: Wall (ID: 3996221) width less than 500
Wall ID: 3996850 is not compliant due to: Wall (ID: 3996850) width less than 500
Wall ID: 3998827 is not compliant due to: Wall (ID: 3998827) width less than 500
Wall ID: 4000357 is not compliant due to: Wall (ID: 4000357) width less than 500
Wall ID: 4000361 is not compliant due to: Wall (ID: 4000361) width less than 500
Wall ID: 4000363 is not compliant due to: Wall (ID: 4000363) width less than 500
Wall ID: 4082095 is not compliant due to: Wall (ID: 4082095) width less than 500
Wall ID: 4082274 is not compliant due to: Wall (ID: 4082274) width less than 500
Wall ID: 4119654 is not compliant due to: Wall (ID: 4119654) width less than 500
Wall ID: 4119655 is not compliant due to: Wall (ID: 4119655) width less than 500
Wall ID: 4119663 is not compliant due to: Wall (ID: 4119663) width less than 500
Wall ID: 4119684 is not compliant due to: Wall (ID: 4119684) width less than 500
Step 10: Saving intermediate DataFrame to Excel file...
Step 11: Loading intermediate Excel file...
Step 12: Loading intermediate Excel file...
Step 13: Checking intersection between floors and rooms...
Intersection Check Complete
Step 14: Performing compliance checks for floors...
SS room's floor thickness (ID: 652257) below maximum wall thickness. Not compliant.
SS room's floor thickness (ID: 814941) below maximum wall thickness. Not compliant.
SS room's floor thickness (ID: 897417) below maximum wall thickness. Not compliant.
SS room's floor thickness (ID: 3994720) below maximum wall thickness. Not compliant.
Step 15: Saving final DataFrame to Excel file...

```

איור 28 תצלום מסך של תוצאות הבדיקה עבור עובי מינימלי של אלמנטי בטון בפי

לסיכום, במסגרת הניסוי, פותח ובוצע תהליך בדיקה אוטומטית עבור התאמה של רכיבי מבנה במודל לתקנות פקע"ר עבור ממ"דים. התהליך כלל מספר שלבים מרכזיים: הגדרת תכונות הקודקודים והקשרים בגרף, בניית הגרף, יצירה ותיוג של סט נתונים סינטטי לאימון GNN, אימון מודלים של GNN, ויישום לבדיקה של מודל המבחן אשר התקבל מהתעשייה. הניסוי הדגים את הפוטנציאל של שימוש ב-GNN לבדיקת התאמה של רכיבים מבניים במודלים תלת-ממדיים, והראה את היכולות והאתגרים של גישה זו לייעול תהליכי הבקרה.

6. סיכום

בעבודה זו הצגנו שתי גישות שונות לבדיקת בקרת תכן אוטומטית ובדיקת התאמה לתקנות, שכל אחת מהן מתמקדת בהיבטים שונים של דרישות רגולטוריות. במהלך הניסוי עם Solibri חקרנו את היעילות של כלי מבוסס חוקים, תוך התמקדות ביכולות ליישם כלי זה עבור בדיקה של תקנות בישראל. חקר המקרה שהוצג מתבסס על בדיקת תאימות לתקנות בטיחות אש, ספציפית מרחקי מילוט. כאחד הכלים החזקים הקיימים היום בשוק, ל Solibri ישנן יכולות לא מבוטלות בתחום בקרת התכן והיא אכן מאפשרת גמישות מסויימת בהגדרת חוקי הבדיקה. הראינו כי ניתן להתאים את ערכות החוקים הקיימות לתקנות מקומיות, אולם הדבר נכון בהנחה כי קיימת ערכת חוקים המבוססת על תקנות בינלאומיות דומות. במקרים בהם זהו לא המצב, יש לתכנת את ערכות החוקים באמצעות ה API המסופק ע"י Solibri וזהו תהליך לא פשוט אשר דורש ידע עמוק בתכנות וגם ידע רגולטורי נרחב. באופן כללי, השימוש בתכנה דורש הבנה מעמיקה של ערכות החוקים והגדרות הפרמטרים, דבר שידרוש הכשרה למשתמשים.

למרות יכולותיה, היעילות של בדיקות באמצעות התכנה תלוי מאוד בטיב המידע המיוצג במודלים. היעילות של Solibri מוגבלת במידה מסוימת על ידי טיב המידול, נכונות, שלמות ודיוק המידע המיוצג במודלים. לעיתים קרובות מידע חיוני, במיוחד מידע סמנטי, עלול להיות חסר מה שמצריך עיבוד מקדים של המודל על מנת לאפשר את הבדיקה. למשל, מודל מקרה הבוחן שלנו כלל אמנם הגדרה גיאומטרית של רוב החדרים במודל, אך מירב הגבולות בין החדרים (boundary lines) נוצרו בצורה לא מדויקת (חלקם כקווים כפולים למשל) מה שהקשה על עיבוד המידע לצורך חילוף נתונים. בעיה נוספת במודל המבחן היא דלתות הזזה למרפסות אשר נוצרו באמצעות משפחה של חלונות ב-Revit, מה שגרם להן להופיע כפתחים של חלונות במקום כדלתות ב- Solibri וגם ב-Pathfinder. ללא עיבוד מקדים ותיקון אי הדיוקים, תהליך הבקרה הוביל לתוצאות לא נכונות. עיבוד בצורה ידנית הוא אמנם מדויק, אך הוא מצריך לא מעט עבודה ידנית, מה שהופך את תהליך הבדיקה לאוטומטי למחיצה. אחד היתרונות הבולטים של כלים אלה הוא שניתן להשתמש בהם ללא תלות בכלי המידול, כיוון ששיתוף הנתונים נעשה באמצעות קובץ IFC.

במקרה השני, חקרנו גישה היברידית חדשה המשלבת למידת מכונה למשימות העשרה, ובדיקות מבוססות חוקים לצורך בדיקת התאמה לתקנות פקע"ר עבור ממ"דים. במקרה זה, התקנות עצמן ייחודיות לישראל ולכן לא מטופלות באמצעות הכלים הקיימים, וכמו כן התקנות מורכבות ומציגות תנאים התלויים במידה רבה לא רק במידע גאומטרי, אלא גם ביחסים הטופולוגיים המורכבים בין אלמנטי המבנה. בעוד שחלק מהתקנות כגון מידות החדרים המוגנים, גודל דלתות וחלונות וגובה חדרים, ניתנים לבדיקה ישירה באמצעות שיטות מבוססות חוקים, תנאים המתבססים על יחס הרציפות של הקירות היורדים מהווים אתגר גדול. הגישה ההיברידית המוצעת מתמקדת בשני היבטים עיקריים: פישוט התהליך, וביצוע הבדיקה ברמת אוטומציה גבוהה, בשאיפה לתהליך אוטומטי לחלוטין. הדבר נעשה על ידי החלת בדיקות מבוססות חוקים פשוטות לצורך הבדיקה הסופית, ובאותו זמן שילוב טכניקות מתקדמות מתחום למידת המכונה להעשרת המודל.

מודלי למידה מבוססים גרפים הראו תוצאות מבטיחות בביצוע משימות סיווג הדורשות באופן מסורתי מאמצים רבים. רמת הדיוק שהושגה גבוהה, אך יש לזכור שמודלים של למידת מכונה הם לא דטרמיניסטיים ולעולם לא יובילו לדיוק של 100%. למרות שרמות הדיוק הנוכחיות עשויות לא להיות מושלמות (מסווג ה-GAT עלה בביצועיו על האחרים עם דיוק מבחן של 94.58%), התוצאות המבטיחות שהושגו במחקר זה

מעודדות פיתוח מתמשך בתחום זה, שכן זה יכול להוביל להתקדמות משמעותית באוטומציה של תהליכי בקרת תכן מורכבים. אחד הכיוונים החשובים להמשך הוא הרחבה ושיפור הדאטה הסינטטי לאימון. מודלים מבוססי למידת מכונה דורשים כמויות גדולות של דאטה לאימון, ודאטה סינטטי יכול למלא תפקיד מכריע בכך. מחקר זה נותן אינדיקציה לכך שהדיוק המתקבל מאימון על דאטה סינטטי יכול להיות גבוה, אך ככל שהמורכבות של הדאטה הסינטטי עולה, כך קשה יותר לייצר ולתייג אותו. יש צורך להרחיב את מאגר הדאטה הסינטטי כך שיכלול מקרים מגוונים יותר ומורכבים יותר, מה שיסייע בשיפור יכולות הסיווג של המודלים. לחילופין, ניתן לפעול לאיסוף נתונים אמיתיים, כלומר מודלי BIM המגיעים מהתעשייה, לכדי מאגר נתונים לאומי אשר ישמש לפיתוחים עתידיים בתחום למידת מכונה לצרכים מגוונים בענף הבנייה.

7. מסקנות והמלצות

לאחר סקירת הספרות, הראיונות שנערכו במכון הבקרה ויישום הבדיקות שהוצגו לעיל, ניתן להסיק מסקנות הן במישור הטכני של ביצוע בדיקות מסוג זה והן במישור הכוללני אודות תהליך הדיגיטציה ברישוי בישראל. כפי שניתן לראות מתוצאות מחקר זה, הרבה דברים ניתנים להשגה כבר היום. אולם שינוי משמעותי של המידע הזורם בתהליך הרישוי נדרש על מנת לנצל יכולות אלה בתהליך. התלות הארגונית, התהליכית וגם הרגולציה עלולות להוות אתגר משמעותי במעבר לדיגיטציה מלאה ולאוטומציה בתהליך הרישוי. על מנת להתגבר על אתגרים אלה, נדרשת גישה מקיפה הכוללת התייחסות לא רק לפיתוח טכנולוגיות, אלא גם לפן התהליכי.

אחד המפתחות המרכזיים הוא המידע שזורם בתהליך והמערכת שבה המידע זורם. נכון להיום, חסרה אחידות בתהליך הבקרה, כל גוף מסתמך על מערכות משלו, כולל מכון הבקרה שעובד על מערכת מחוץ לרישוי הזמין, וזה גורם להרבה חוסר התאמה. מעבר למערכת אחודה מבוססת BIM ואינטגרציה עם מערכות מבוססות GIS יובילו לא רק לשיפור משמעותי בניהול המידע, אלא גם לניצולו לטובת תהליכים אוטומטיים מתקדמים. המחקר מצביע על כך שהפוטנציאל קיים, ועם ההתמקדות וההשקעה הנכונים, ניתן לשפר את תהליכי הרישוי ולהביא אותם למאה ה-21 בצורה יעילה ומתקדמת.

במובן הרחב, כדאי ללמוד לעומק על הנעשה בעולם, אך חשוב לעשות זאת תוך הבנה של הקונטקסט. מה שונה במצב במדינות האחרות לעומת ישראל, למשל מה מידת הידע הטכני בנושאי BIM בסקטור הציבורי, מה ניתן לעשות כדי להתגבר על פערי ידע קיימים וכו'. העולם אמנם מתקדם בנושאי שימוש ב-BIM ברישוי, אך למעט סינגפור שלה יש ניסיון רב, ברוב המקומות בעולם היישום נמצא ממש בחיתולים עם מספר פרויקטים בודדים שעברו רישוי באמצעות BIM. ניתן לצפות כי בעיות יחלו לצוץ בקרוב ויש מקום ללמוד ולהפיק לקחים. מבחינת המאמצים במדינות שונות לאימוץ טכנולוגיית BIM בתהליך הרישוי, ניתן לראות שההתקדמות הניכרת במדינות אלו נובעת מהובלה ממשלתית חזקה ותכנון מקדים, עם מפת דרכים ברורה המגדירה את המטרות ואבני הדרך לאורך כל שלבי המעבר ל-BIM בתהליך הרישוי וגם לאוטומציה. בישראל, לעומת זאת, חסרה מפת דרכים דומה, וזו אחת ההמלצות העיקריות.

מפת דרכים ברורה תספק תכנון מקיף ומסודר, המגדיר את המטרות, אבני הדרך והשלבים שיש לעבור לאורך כל התהליך. זה חשוב כי מעבר לפיתוח מערכת מבוססת BIM, נדרש תיאום והבנה בין כל הגורמים המעורבים – מהממשלה, דרך הרשויות המקומיות ועד למתכננים והקבלנים. יצירת מפת דרכים תסייע למנוע בלבול ותקלות, תעודד הכשרה מקצועית ותספק תשתית תומכת שתבטיח מעבר חלק ויעיל. כדי לעשות זאת נכון, יש להתחיל במיפוי המצב הקיים היום – להבין את הקשיים הקיימים, הפערים בידע הטכני, החסמים, והצרכים הייחודיים של השוק המקומי. לאחר מכן, יש להקים ועדה בין-משרדית הכוללת נציגים מכל הגורמים הרלוונטיים – כולל משרד השיכון, משרד הפנים, הרשויות המקומיות, ארגונים מקצועיים, נציגי התעשייה וגם מפתחי תכנה. יש ליצור שיתופי פעולה עם חברות פיתוח טכנולוגיות בתחום ה-BIM ולעבוד יחד איתם לפיתוח כלים מתקדמים מותאמים לצרכים המוגדרים. חשוב להסתמך על ניסיון וידע מצטבר בתחום הבנייה בישראל ולהתאים את הפתרונות לצרכים המקומיים, תוך למידת הצלחות ומכשולים במדינות אחרות והתאמת הלקחים למציאות הישראלית. הוועדה תוביל את התהליך, תגדיר את האסטרטגיה הכוללת, תעצב את מדיניות ההכשרה וההסברה, תוביל את הפיתוח ותוודא שכל הגורמים מעורבים ומשתפים פעולה.

חשוב לקחת בחשבון את רמת האוטומציה שאנחנו שואפים להשיג, ולהגדיר זאת מראש, למרות שאוטומציה תהיה אפשרית רק בסוף התהליך. כלומר, השינויים שמבוצעים כיום צריכים לקחת בחשבון את החזון ארוך-הטווח של שילוב כלים אוטומטיים בתהליך. זה ישליך ישירות על דרישות המידע, הסטנדרטים החדשים ושינויי הרגולציה הנדרשים. לשימוש בכלים אוטומטים יתרונות רבים, הם יספקו מסגרת אחידה וברורה, מה שיגביר את השקיפות והאמון בתהליך הרישוי. עם זאת, חשוב להבין שזה תהליך שלוקח זמן, יש להגדיר שלביות על בסיס אותו חזון ארוך טווח כחלק מאותה מפת דרכים.

אספקט שיש לשים אליו לב הוא הרגולציה עצמה. לא תמיד אפשר לתרגם תקנים קיימים אחד לאחד לבדיקה אוטומטית. או לחילופין, על מנת להתייחס לתקינה כפי שהיא עלול להידרש פתרון מורכב מאוד שעלול גם לא לספק את הדיוק הרצוי. לעיתים, שינויים מינוריים בתקינה יכולים לפתור את הבעיה. אחד הדברים עליהם נדרש לתת את הדעת הוא אילו מהחוקים, תקנים ותקנות חשוב לנו לבדוק בצורה מהירה ואוטומטית, במקביל לניתוח מפורט של התקנות עצמן מיפוי הסעיפים אותם ניתן לבדוק בצורה אוטומטית. מסקירת המצב במדינות אחרות, ניתן לראות כי מיפוי התקנות והגדרת דרישות המידע היוו נתח חשוב וגדול בעבודה. גם כאן, יש צורך להגדיר במדויק את הדרישות, כאן עולות שאלות בנוגע לרמת האוטומציה שאליה נרצה להגיע על מנת להפיק את הערך המקסימלי מהכלים המתקדמים. כמו כן, יש להגדיר את רמת הדיוק המקובלת. כאן יש שאלה עמוקה יותר, כי הרי אין לנו דרך להשוות את הביצועים של כלים מעולם למידת המכונה לביצועי הבדוק האנושי. אמנם ברור כי גם הבדוק האנושי אינו יכול להיות מדויק ב 100%, נכון לעכשיו לא קיים benchmark שניתן להשוות אליו את התוצאות.

באופן כללי, סרבול ברגולציה מקשה גם על התכנון וגם על הבקרה ולכן יש לשאוף לפישוט הדרישות עד כמה שניתן. שינוי שנעשה לאחרונה בישראל הוא למשל ביטול ההפרדה בין שטח עיקרי לשטח שירות. עקב החובה להפריד, היתר נדרש לפרטי פרטים של המבנה הנובעים מעקרון חלוקת שטחי הבניה לשטחים לשימוש עיקרי ושטחי שירות. הנ"ל האריך ואף סיבך את התכנון, ובמיוחד האריך את שלב בדיקת היתרי הבניה במסגרתה נבחן כל מטר בבניין ונקבע לאיזה סוג שטח יש לסווג אותו. ההסתכלות על שטח בנוי במקום שטח עיקרי ושטחי שירות, מפשטת מאוד גם את תהליך התכנון וגם את תהליך הבקרה. כמובן שגם ביצוע הבקרה באופן אוטומטי בעתיד, תהיה כעת פשוטה הרבה יותר. יוזמות לטיפול בדרישות הרגולטוריות קיימות כבר היום, למשל קוד הבנייה, אבל התרומה שלהן לא מספיק משמעותית. האוגדן קיים אבל הוא לא כולל את כל המקצועות, למשל אין בו קונסטרוקציה בכלל. תיאורטית הוא אמור לגרום להסדרה אבל העבודה עליו לא הסתיימה. בנוסף, אם קוד הבנייה רק יפנה להנחיות הקיימות, אזי התרומה שלו לא גדולה. חשוב לבדוק באופן ביקורתי את החקיקה עצמה, את הסטנדרטים והמפרטים בקשר לדרישות BIM וכל זה במבט על השרשרת כולה ובשיתוף כל הגורמים המעורבים בתהליך.

בפן הטכנולוגי, לאחר מיפוי סעיפי התקנות לאיתור הסעיפים שאוטומציה שלהם תוביל לערך הרב ביותר, יש לבחון את כלי הבדיקה יותר לעומק בהקשר של אותם סעיפים. כפי שניתן לראות ממחקר זה, התאמה של הכלים הקיימים לקונטקסט המקומי היא אפשרית אך לא תמיד טריוויאלית. יתרה מכך, השימוש בכלים הקיימים הוא לא אינטואיטיבי וידרוש הכשרה של כל המעורבים בתהליך. לכן ההמלצה היא לעבוד על פיתוח כלי המיועד לשימוש בישראל. הראינו במחקר זה כי באמצעות שילוב שיטות מתקדמות בתהליך הבקרה, ניתן לבצע בדיקות בצורה אוטומטית גם לדרישות מורכבות גיאומטריות וטופולוגיות ברמת אוטומציה גבוהה ביותר. יש טעם להמשיך ולחקור כיוון זה ולשלב טכנולוגיות של בינה מלאכותית ולמידת מכונה בבדיקות תאימות התכנון לתקנים ו/או לצרכים של העשרה סמנטית. על מנת לתמוך בפיתוחים אלה, מומלץ להקים מאגר נתוני תכן לאומי שישמש לאימון מודלי הלמידה, הכולל מידע תכנוני דיגיטלי (מודלי

BIM). מאגר מידע מנוהל ומתוחזק היטב יהיה בעל ערך הן לצורך פיתוח עתידי בתחום בקרת תכן, והן לצרכים אחרים של ענף הבנייה בישראל.

לסיכום, נדרש ניתוח אסטרטגי של המצב הקיים על מנת לגבש תכנית ארוכת טווח. אותה תכנית, או מפת דרכים, צריכה להיות מבוססת על שלביות הן בפיתוח הכלים והפלטפורמות והן היישום שלהם בתעשייה. למשל, ניתן להתחיל מפיילוטים בשיתוף רשות מקומית, לאחר מכן לאפשר הגשת מודל וולונטרי ורק בסוף לחייב הגשה ב-BIM. פיתוח כלי הבדיקה יכול להתבצע במקביל ובתנאי שמתבצעת עבודה מפורטת ומעמיקה למיפוי התקנות והגדרת דרישות המידע. בשלבי הביניים, ניתן לחשוב על תהליך שבו הכלים זמינים למתכננים עצמם ומתאפשרת בדיקה עצמית לפני הגשת בקשה להיתר. שיתופי פעולה מחקריים ובינלאומיים חשובים בהקשר זה, כדי ללמוד מהניסיון שמתחיל להצטבר בעולם ולהביא טכנולוגיות מתקדמות לארץ.

8. מראי מקום

- [1] Central Bureau of Statistics (CBS), "Construction Begun and Completed in 2023." Accessed: Mar. 07, 2024. [Online]. Available: https://www.cbs.gov.il/he/mediarelease/DocLib/2024/089/04_24_089b.pdf
- [2] S. J. Fenves, "Tabular Decision Logic for Structural Design," *J. Struct. Div.*, vol. 92, no. 6, pp. 473–490, Dec. 1966, doi: 10.1061/JSDEAG.0001567.
- [3] S. J. Fenves and W. J. Rasdorf, "Treatment of engineering design constraints in a relational database," 1982.
- [4] C. S. Han, J. Kunz, and K. H. Law, "Making automated building code checking a reality," *Facil. Manag. J.*, pp. 22–28, 1997.
- [5] J. Dimyadi and R. Amor, "Automated Building Code Compliance Checking—Where is it at," *Proc. CIB WBC*, pp. 172–185, 2013.
- [6] L. Ding, R. Drogemuller, M. Rosenman, D. Marchant, and J. Gero, "Automating code checking for building designs-DesignCheck," 2006.
- [7] T. H. Beach, J.-L. Hippolyte, and Y. Rezgui, "Towards the adoption of automated regulatory compliance checking in the built environment," *Autom. Constr.*, vol. 118, p. 103285, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103285.
- [8] "BuildingSMART." Accessed: Jul. 14, 2021. [Online]. Available: <http://www.buildingsmart-tech.org/>
- [9] C. Eastman, J. Lee, Y. Jeong, and J. Lee, "Automatic rule-based checking of building designs," *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 8, pp. 1011–1033, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002>.
- [10] R. Amor and J. Dimyadi, "The promise of automated compliance checking," *Dev. Built Environ.*, vol. 5, p. 100039, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100039.
- [11] J. Zhang and N. M. El-Gohary, "Integrating semantic NLP and logic reasoning into a unified system for fully-automated code checking," *Autom. Constr.*, vol. 73, pp. 45–57, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2016.08.027.
- [12] D. M. Salama and N. M. El-Gohary, "Semantic Text Classification for Supporting Automated Compliance Checking in Construction," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 1, p. 04014106, Jan. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000301.
- [13] J. Zhang and N. El-Gohary, "Automated Regulatory Information Extraction from Building Codes : Leveraging Syntactic and Semantic Information," in *Construction Research Congress*

- 2012, West Lafayette, Indiana, United States: American Society of Civil Engineers, May 2012, pp. 622–632. doi: 10.1061/9780784412329.063.
- [14] J. Zhang and N. El-Gohary, “Extraction of construction regulatory requirements from textual documents using natural language processing techniques,” in *Computing in Civil Engineering (2012)*, 2012, pp. 453–460.
- [15] J. Zhang and N. M. El-Gohary, “Automated Information Transformation for Automated Regulatory Compliance Checking in Construction,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 4, p. B4015001, Jul. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000427.
- [16] R. Zhang and N. M. El-Gohary, “A Clustering Approach for Analyzing the Computability of Building Code Requirements,” in *Construction Research Congress 2018*, New Orleans, Louisiana: American Society of Civil Engineers, Mar. 2018, pp. 86–95. doi: 10.1061/9780784481264.009.
- [17] R. Zhang and N. El-Gohary, “Unsupervised Machine Learning for Augmented Data Analytics of Building Codes,” in *ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2019, pp. 74–81.
- [18] C. Preidel and A. Borrmann, “Automated Code Compliance Checking Based on a Visual Language and Building Information Modeling,” in *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2015, p. 1.
- [19] W. Solihin and C. Eastman, “Classification of rules for automated BIM rule checking development,” *Autom. Constr.*, vol. 53, pp. 69–82, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>.
- [20] Solibri, “Solibri Model Checker (SMC).” Accessed: Mar. 13, 2017. [Online]. Available: <https://www.solibri.com/>
- [21] International Code Council, Ed., *International Building Code 2015*, First. Country Club Hills, Ill: International Code Council, 2014.
- [22] SMARTreview APR, “SMARTreview APR.” Accessed: Jul. 06, 2017. [Online]. Available: <https://www.smartreview.biz/home>
- [23] R. Harrell and M. Mathews, “Could Autodesk Revit Be Automated for Code Compliance Checking and Demonstration with A Focus on Fire Safety Regulations?,” 2018.
- [24] A. Karmakar and V. S. K. Delhi, “Requirements of Machine Learning and Semantic Enrichment for BIM-Based Automated Code Compliance Checking: A Focus Group Study,” in *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering*, vol. 357, S. Skatulla and H.

- Beushausen, Eds., in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 357. , Cham: Springer International Publishing, 2024, pp. 65–74. doi: 10.1007/978-3-031-35399-4_6.
- [25] T. Bloch, “Connecting research on semantic enrichment of BIM - review of approaches, methods and possible applications,” *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 27, pp. 416–440, Apr. 2022, doi: 10.36680/j.itcon.2022.020.
- [26] W. Mazairac and J. Beetz, “BIMQL An open query language for building information models,” *Adv. Eng. Inform.*, vol. 27, no. 4, pp. 444–456, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.aei.2013.06.001.
- [27] S. Daum and A. Borrmann, “Checking spatio-semantic consistency of building information models by means of a query language,” in *Proc. of the Intl Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 2013.
- [28] R. J. Sternberg, K. Sternberg, and J. S. Mio, *Cognitive psychology*, 6th ed. Belmont, CA: Wadsworth/Cengage Learning, 2012.
- [29] B. S. Todd, *An introduction to expert systems*. in Technical monograph PRG, no. 95. Oxford: Oxford Univ. Computing Laboratory, Programming Research Group, 1992.
- [30] M. Belsky, R. Sacks, and I. Brilakis, “Semantic enrichment for building information modeling,” *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 261–274, Apr. 2016, doi: 10.1111/mice.12128.
- [31] R. Sacks *et al.*, “SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition,” *Autom. Constr.*, vol. 90, pp. 134–145, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.02.033.
- [32] R. D. King, “Rise of the robo scientists,” *Sci. Am.*, vol. 304, no. 1, pp. 72–77, 2011.
- [33] T. Bloch and R. Sacks, “Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models,” *Autom. Constr.*, vol. 91, pp. 256–272, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.018.
- [34] T. Krijnen and M. Tamke, “Assessing Implicit Knowledge in BIM Models with Machine Learning,” in *Modelling Behaviour*, M. R. Thomsen, M. Tamke, C. Gengnagel, B. Faircloth, and F. Scheurer, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 397–406. doi: 10.1007/978-3-319-24208-8_33.
- [35] B. Koo and B. Shin, “Applying novelty detection to identify model element to IFC class misclassifications on architectural and infrastructure Building Information Models,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 391–400, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jcde.2018.03.002.
- [36] H. Luo, G. Gao, H. Huang, Z. Ke, C. Peng, and M. Gu, “A Geometric-Relational Deep Learning Framework for BIM Object Classification,” in *Computer Vision – ECCV 2022 Workshops*, vol. 13807, L. Karlinsky, T. Michaeli, and K. Nishino, Eds., in *Lecture Notes in Computer Science*, vol.

13807. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 349–365. doi: 10.1007/978-3-031-25082-8_23.
- [37] T. Bloch and R. Sacks, “Clustering Information Types for Semantic Enrichment of Building Information Models to Support Automated Code Compliance Checking,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 6, p. 04020040, 2020.
- [38] S. B. Kotsiantis, I. Zaharakis, and P. Pintelas, “Supervised machine learning: A review of classification techniques,” in *Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering: Real World AI Systems with Applications in EHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies*, IOS Press, 2007.
- [39] A. Voulodimos, N. Doulamis, A. Doulamis, and E. Protopapadakis, “Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,” *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2018, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1155/2018/7068349.
- [40] A. Vaswani *et al.*, “Attention is all you need,” *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 30, 2017.
- [41] W. W. Eckerson, “Predictive analytics,” *Extending Value Your Data Warehous. Invest. TDWI Best Pract. Rep.*, vol. 1, pp. 1–36, 2007.
- [42] Y. Pan and L. Zhang, “Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends,” *Autom. Constr.*, vol. 122, p. 103517, 2021.
- [43] A. Zabin, V. A. González, Y. Zou, and R. Amor, “Applications of machine learning to BIM: A systematic literature review,” *Adv. Eng. Inform.*, vol. 51, p. 101474, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.aei.2021.101474.
- [44] J. Dahmen and D. Cook, “SynSys: A Synthetic Data Generation System for Healthcare Applications,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1181, Mar. 2019, doi: 10.3390/s19051181.
- [45] J. Jordon *et al.*, “Hide-and-seek privacy challenge: Synthetic data generation vs. patient re-identification,” in *NeurIPS 2020 Competition and Demonstration Track*, PMLR, 2021, pp. 206–215.
- [46] G. Soltana, M. Sabetzadeh, and L. C. Briand, “Synthetic data generation for statistical testing,” in *2017 32nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, IEEE, 2017, pp. 872–882.
- [47] M. Neuhausen, P. Herbers, and M. König, “Using Synthetic Data to Improve and Evaluate the Tracking Performance of Construction Workers on Site,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 14, p. 4948, Jul. 2020, doi: 10.3390/app10144948.
- [48] J. Zhou *et al.*, “Graph neural networks: A review of methods and applications,” *ArXiv Prepr. ArXiv181208434*, 2018.

- [49] T. Bloch and J. Fauth, "The unbalanced research on digitalization and automation of the building permitting process," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 58, p. 102188, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102188.
- [50] P.-O. Olsson, J. Axelsson, M. Hooper, and L. Harrie, "Automation of Building Permission by Integration of BIM and Geospatial Data," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 7, no. 8, p. 307, Jul. 2018, doi: 10.3390/ijgi7080307.
- [51] E. Onstein and M. G. Tognoni, "'Building permits' as proof of concepts in merging GIS and BIM information: a case study," presented at the BIM 2017, Alicante, Spain, May 2017, pp. 155–166. doi: 10.2495/BIM170151.
- [52] S. Chognard, A. Dubois, Y. Benmansour, E. Torri, and B. Domer, "Digital Construction Permit: A Round Trip Between GIS and IFC," in *Advanced Computing Strategies for Engineering*, vol. 10864, I. F. C. Smith and B. Domer, Eds., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 10864. , Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 287–306. doi: 10.1007/978-3-319-91638-5_16.
- [53] K. Shahi, "Evaluation of current construction permitting process in city of Toronto and future of permitting in the global construction industry," PhD Thesis, University of Toronto (Canada), 2018.
- [54] F. Noardo *et al.*, "Unveiling the actual progress of Digital Building Permit: Getting awareness through a critical state of the art review," *Build. Environ.*, vol. 213, p. 108854, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108854.
- [55] N. O. Nawari and A. Alsaffar, "The Role of BIM in Simplifying Construction Permits in Kuwait," in *AEI 2017*, Oklahoma City, Oklahoma: American Society of Civil Engineers, Apr. 2017, pp. 855–866. doi: 10.1061/9780784480502.072.
- [56] K. Ullah, E. Witt, and I. Lill, "The BIM-Based Building Permit Process: Factors Affecting Adoption," *Buildings*, vol. 12, no. 1, p. 45, Jan. 2022, doi: 10.3390/buildings12010045.
- [57] C. Eastman, "The use of computers instead of drawings in building design," *AIA J.*, vol. 63, no. 3, pp. 46–50, 1975.
- [58] A. S. Ismail, K. N. Ali, and N. A. Iahad, "A review on BIM-based automated code compliance checking system," in *2017 International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [59] D. Guo, E. Onstein, and A. D. L. Rosa, "A Semantic Approach for Automated Rule Compliance Checking in Construction Industry," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129648–129660, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3108226.

- [60] C. Eastman, "Automated Assessment of Early Concept Designs," *Archit. Des.*, vol. 79, no. 2, pp. 52–57, Mar. 2009, doi: 10.1002/ad.851.
- [61] T. Bloch, A. Borrmann, and P. Pauwels, "Graph-based learning for automated code checking – Exploring the application of graph neural networks for design review," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 58, p. 102137, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102137.
- [62] W. Solihin, N. Shaikh, X. Rong, and K. L. Poh, "Beyond interoperability of building model: A case for code compliance checking," in *BP-CAD Workshop*, Carnegie Mellon University, 2004.
- [63] P. Pauwels and S. Zhang, "Semantic rule-checking for regulation compliance checking: an overview of strategies and approaches," in *32rd international CIB W78 conference*, 2015.
- [64] F. Barbosa, J. Woetzel, and J. Mischke, "Reinventing construction: A route of higher productivity," McKinsey Global Institute, 2017.
- [65] D. Piazza, M. Röck, G. Malacarne, A. Passer, C. Marcher, and D. Matt, "BIM for public authorities: Basic research for the standardized implementation of BIM in the building permit process," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019, p. 012102. doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012102.
- [66] D. Guler and T. Yomralioglu, "Reviewing the literature on the tripartite cycle containing digital building permit, 3D city modeling, and 3D property ownership," *Land Use Policy*, vol. 121, p. 106337, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.landusepol.2022.106337.
- [67] K. Ullah, C. Raitviir, I. Lill, and E. Witt, "BIM adoption in the AEC/FM industry – the case for issuing building permits," *Int. J. Strateg. Prop. Manag.*, vol. 24, no. 6, pp. 400–413, Oct. 2020, doi: 10.3846/ijspm.2020.13676.
- [68] M. Messaoudi and N. O. Nawari, "Virtual Permitting Framework (VPF) for Alternate Care Sites (ACS): Planning in the Wake of Coronavirus Pandemic," in *Computing in Civil Engineering 2021*, Orlando, Florida: American Society of Civil Engineers, May 2022, pp. 474–481. doi: 10.1061/9780784483893.059.
- [69] M. Messaoudi and N. O. Nawari, "Virtual Permitting Framework for Off-site Construction Case Study: A Case Study of the State of Florida," in *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, vol. 98, E. Toledo Santos and S. Scheer, Eds., in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 98. , Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 757–771. doi: 10.1007/978-3-030-51295-8_52.
- [70] state comptroller, "Streamlining thhe permitting procss," 2021. Accessed: Apr. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Pages/Reports/7098-10.aspx?AspxAutoDetectCookieSupport=1>

- [71] The world bank, "Doing buisness." Accessed: Apr. 19, 2023. [Online]. Available: <https://archive.doingbusiness.org>
- [72] J. Fauth, T. Bloch, and L. Soibelman, "Process model for international building permit benchmarking and a validation example using the Israeli building permit process," *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2023.
- [73] E. Papadonikolaki, I. Krystallis, and B. Morgan, "Digital transformation in construction-Systematic literature review of evolving concepts," 2020.
- [74] T. Foo Sing and Q. Zhong, "Construction and Real Estate NETwork (CORENET)," *Facilities*, vol. 19, no. 11/12, pp. 419–428, Nov. 2001, doi: 10.1108/EUM0000000005831.
- [75] Ö. Balaban, E. S. Y. Kilimci, and G. Cagdas, "Automated code compliance checking model for fire egress codes," in *Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, 2012, pp. 117–125.
- [76] "Nova Group." Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.nova-hub.com/e-government/>
- [77] "CORENET X." Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www1.bca.gov.sg/regulatory-info/building-control/corenet-x>
- [78] "CloudPermit." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://cloudpermit.com/>
- [79] "Trimble ePermit." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://upa.trimble.com/en-eu/products/trimble-eservices-permit>
- [80] "Common BIM Requirements 2012." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: https://wiki.buildingsmart.fi/en/04_Guidelines_and_Standards/COBIM_Requirements
- [81] "ACCORD." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://accordproject.eu/>
- [82] "RAVA3Pro." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://kirahub.org/en/rava3pro-en/>
- [83] "Future Insight." Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.futureinsight.nl/?lang=en>
- [84] "BIM bases permit procedure. Developement of a software solution for the BIM based model checking service.," Final work report, Jul. 2021. [Online]. Available: <file:///C:/Users/bloch/OneDrive%20-%20Technion/%D7%9E%D7%A9%D7%A8%D7%93%20%D7%94%D7%91%D7%99%D7%A0%D7%95%D7%99%20%D7%95%D7%94%D7%A9%D7%99%D7%9B%D7%95%D7%9F/Final-work-report-second-phase-BIM-based-permit-procedure%20Estonia.pdf>
- [85] D. Mehran, "Exploring the Adoption of BIM in the UAE Construction Industry for AEC Firms," *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 1110–1118, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.144.

- [86] Dubai Building permit development committee, "Roadmap to create the ideal digital construction ecosystem for Dubai." Accessed: May 30, 2024. [Online]. Available: https://bim.geodubai.ae/Documents/Dubai_BIM_Roadmap.pdf
- [87] C. Schranz, H. Urban, and A. Gerger, "Potentials of Augmented Reality in a BIM based building submission process," *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 26, pp. 441–457, Jul. 2021, doi: 10.36680/j.itcon.2021.024.
- [88] J. Dimyadi, G. Thomas, and R. Amor, "Enabling automated compliance audit of architectural designs," in *Proc., 51st Int. Conf. of the Architectural Science Association (ANZAScA)*, 2017, pp. 387–396.
- [89] E. A. Delis and A. Delis, "Automatic fire-code checking using expert-system technology," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 141–156, 1995.
- [90] International Code Council, *International Fire code 2018*, Third. U.S.A, 2019.
- [91] Z. Wang, R. Sacks, and T. Yeung, "Exploring graph neural networks for semantic enrichment: Room type classification," *Autom. Constr.*, vol. 134, p. 104039, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104039.
- [92] W. L. Hamilton, R. Ying, and J. Leskovec, "Representation Learning on Graphs: Methods and Applications," *CoRR*, vol. abs/1709.05584, 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1709.05584>
- [93] T. N. Kipf and M. Welling, "Semi-supervised classification with graph convolutional networks," *ArXiv Prepr. ArXiv160902907*, 2016.
- [94] P. Veličković, G. Cucurull, A. Casanova, A. Romero, P. Lio, and Y. Bengio, "Graph attention networks," *ArXiv Prepr. ArXiv171010903*, 2017.

9. Abstract

Part of the building permitting process is to ensure that the design adheres to all relevant laws, regulations and standards. Although the permitting process is only a single event in a building's lifecycle, it can significantly impact the project's timeline and cost. Numerous initiatives have been examined in Israel to improve the building permit issuance process, and some have even been implemented. One of the most significant changes in this field is the amendment to the Israeli Planning and Building Law, known as "Amendment 101." This amendment calls for a significant improvement in construction quality, while streamlining and simplifying the processes. As part of these changes, as in many other countries around the world, Israel has also made efforts to replace the paper-based permit application process with a digital process. However, like most countries, this digital interface is essentially a customized document management system with predefined workflows and time constraints. The Israeli digital system for building permitting was designed to support all stages of the permitting process. Although advanced technological capabilities already exist, not only for digitalization, but also for partial automation of the process, specifically of the design review stage, they have not been widely adopted nor implemented in Israel. Integrating tools for automated code checking within the permitting process can contribute to a significant reduction in time required for issuance of building permits, and even enable more detailed review.

This research aimed to demonstrate the existing capabilities in the field by examining existing tools, their strengths and limitations. In parallel, novel machine learning-based tools for code checking were developed to address the limitations identified in the existing rule-based platforms. The research is based on two case studies. The first case study focuses on implementing existing tools and examining the possibility of adapting them to Israeli regulations. This involves an assessment of the level of automation and accuracy these tools provide, as well as identifying their limitations. The second case study focused on the requirements for security rooms, as defined by Israeli standards.

Our first test case focused on escape routes as part of fire safety regulations. Solibri, being one of the most advanced platforms for automated code checking today, was implemented to automatically check if a given design complies with the maximum travel distances for evacuation. Solibri is based on pre-coded rule sets that conform to the International Building Code. This case study demonstrated the ability to customize and apply existing tools for design review in Israel, based on Israeli regulations, but also highlighted several limitations. One limitation of the tool is the extensive information requirements that the user is asked to

supplement during the checking process. This involves significant manual work and makes the checking process only semi-automated. Additionally, the platform is not easy to use, adapting the rule sets to Israeli standards can be difficult and require extensive regulatory knowledge and code writing abilities.

As stated above, the second case study focused on the requirements for security rooms. Since these are unique requirements to Israel, they are not addressed within the existing tools for automated code checking. Due to the geometric and topological complexity of the regulations, this case was addressed using a different approach to code checking. This consists of decomposing the compliance check into a set of semantic enrichment tasks and deploying suitable techniques for each task. We tested this approach by checking compliance with concrete dimension requirements for security shafts in the context of Israeli Home Front Command regulations. In the developed approach, graph-based learning techniques played a crucial role in handling complex semantic enrichment tasks. Specifically, a Graph Neural Networks (GNN) model was trained and implemented for classifying security rooms based on the ratio of vertical continuity of the walls associated to each of the security rooms.

The process included several steps: creation and labeling of a synthetic dataset comprising different configurations of security shafts. Elements of each shaft were labeled according to the regulations, based on the three categories of wall continuity ratio: more than 70%, 50-70%, and less than 50%. The building models of the security shafts were translated automatically to their graph representations, where each node represents a building component, and edges represent topological relationships between components. The synthetic data set was used for training a GNN model to perform a node classification task, where the target is to classify the nodes representing security rooms into the three categories of wall continuity ratio. Finally, the trained model was utilized as part of a code checking routine for a BIM model of a residential building received from the industry.

Both case studies were demonstrated using the same BIM model of a residential building obtained from the industry. The implemented hybrid approach, partially relying on graph-based learning, demonstrated promising results. In the final check of minimal width requirements for structural elements, 46 elements were identified as not meeting the minimum width requirements, 27 of which did in fact meet the requirements. In other words, the testing results led to 27 false positives, while all elements that were not compliant to the regulation were identified correctly (i.e. there were no false negatives). Although machine learning tools are not deterministic and we cannot guarantee 100% accuracy, the results are promising and

indicate the potential for integrating machine learning into design review and the need for further research in this area.

To conclude, the flexibility offered by machine learning-based processes allows for more complex checks than those possible with rule-based systems, thereby expanding the scope of regulations that can be checked automatically, while also increasing the level of automation in the process. Such tools will enable inspectors to focus on exceptional cases requiring manual intervention rather than spending their time on routine checks. This research demonstrated the potential for improving the design review process by implementing innovative technologies. Through the two case studies, the research highlighted the limitations of existing tools, especially the need for extensive manual preprocessing. The second case demonstrated the ability of machine learning to handle unique and complex regulatory requirements. Continued development of these tools and further research are needed to improve accuracy, increase automation levels, and optimally adapt tools to local requirements.



Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2032516

Machine Learning Based Approaches for Automated Design Review as Part of the Permitting Process

Dr. Tanya Bloch Eng. Maen Alnuzha Prof. Rafael Sacks

Copyright © 2024 by Tanya Bloch, Maen Alnuzha and Rafael Sacks
The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

August 2024

National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel | המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003
Fax: 972-4-8324534 .פקס | Tel: 972-4-8292242/3 .טל | e-mail: nbri@tx.technion.ac.il
<http://nbri.net.technion.ac.il>

