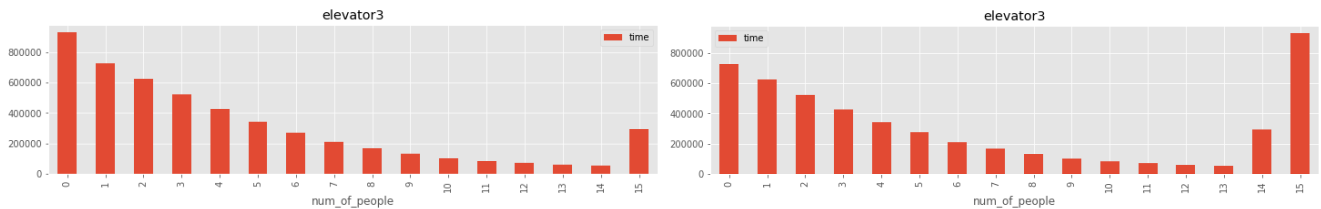


פרויקט בקורס סימולציה – חלק ב'

מקסים פומרנץ 322526963, אלון רגנשטיינר 205419716

אימות ותיקוף המודל

- במהלך העבודה על חלק ב' נחשפנו לשגיאה בקוד שגרמה לסטייה של נוסע 1 בתפוסת המעליות. כך יצא שכאשר המעלית הייתה ריקה, הנתון נספר בתור 15 נוסעים במקום 0 נוסעים, והעמודה של 15 נוסעים נסקה גבוהה. לצורך הדוגמה, הנה הגרף שקיבלנו עבור אחת המעליות (מימין טרום התיקון, משמאל לאחר התיקון):



- כעת, ניתן לראות כי הגרף מראה תמונה אחרת – במקום קפיצה גדולה ב-15 קיבלנו קפיצה בינונית, ובסך הכל ניתן לראות מגמה בגרף לכיוון ה-0. הנימוק שמצאנו לקפיצה ב-15 הוא שמצב של 15 נוסעים הוא מצב קיצון של המעלית – כאשר המעלית מלאה, אין אפשרות להוסיף נוסעים, כך שכל עוד הביקוש לעלות גבוה מהביקוש לרדת מהמעלית, המעלית תישאר עם 15 נוסעים. להבדיל, כאשר יש במעלית 14 נוסעים, אם הביקוש לעלות גבוה מהביקוש לרדת – הנתון יעלה ל-15 נוסעים. בנוסף, אם קיימת כמות גדולה של נוסעים בקומה, המעלית תכיל לכל היותר 15 נוסעים – לכן יש יותר מצבים בהם נגיע ל-15 נוסעים מאשר 14.
- במטרה להפוך את הסימולציה לגנרית וגמישה יותר, המרנו את מספר ההרצות הכתוב בקוד (100 בחלק א'), במשתנה. כמו כן, כעת החישובים מבוצעים ביחס למספר ההרצות ששמור במשתנה, ולא ביחס למספר קבוע (hard coded).
- יישרנו את כלל הגרפים לפי אותה סקאלה, כך שנוכל להבין את היחסים בין התצורות השונות בהתבוננות בגרף.

הגדרת תצורות

פירוט התצורות:

מעלית 4		מעלית 3		מעלית 2		מעלית 1		
מדיניות	ת' הפעלה	מדיניות	ת' הפעלה	מדיניות	ת' הפעלה	מדיניות	ת' הפעלה	
שבת	0,1-25	שבת	0,1-25	שבת	0,1-25	שבת	0,1-25	תצורה 1
אקספרס	0,1-25	אקספרס	0,1-25	שבת	0,1-25	שבת	0,1-25	תצורה 2
אקספרס	0,16-25	אקספרס	0,16-25	שבת	0,16-25	שבת	0,1-15	תצורה 3

1. מעלית שבת בתצורה גלובלית (כלומר, ללא הפרדה בין חלקי הבניין)

כחלק מניתוח פרק א' בעבודה, מצאנו שחלוקת הבניין לשני סקטורים מרכזיים גורמת לכך שנסיעות בין שני הסקטורים נמשכות מעל 5 דק' בחלק מהמקרים, ובאופן כללי ארוכות בצורה משמעותית. הערכנו שיש לכך שתי השלכות מרכזיות:

- תפוסת המעליות גדלה – נוסעים נאלצים לעלות על 2 מעליות לכל מעבר.
- שהות הנוסעים במערכת גדלה – נוסעים נאלצים להמתין ב-2 תורים, ולשהות זמן רב יותר בנסיעה במעליות, עקב הארכת המסלול (נוסע שרוצה לרדת נאלץ קודם לעלות, ולהפך).
- הארכת התור בקומת קרקע – התור של קומת הקרקע הוא התור עמוס ביותר בשעת השיא של הבוקר עם קצב של 550 נוסעים לשעה. על כן, הוספת כ-250 נוסעים נוספים מידי בוקר שמבקשים לנוע בין שני חלקי הבניין תגרום להארכת התור, והגברת קצב הנטישה של נוסעים אחרים בקומת הקרקע.

על כן, החלטנו לנקוט בגישה שתבטל את ההפרדה בין שני חלקי הבניין, כך שהמעליות ינועו בצורה חופשית בין הקומות. מדיניות נסיעתן תהיה של מעלית שבת, כך שהן יעצרו בכל קומה וקומה. בכך אנו מצפים שישתפרו המדדים שצינו ברשימה הנ"ל.

2. מעלית אקספרס דינאמית בתצורה גלובלית

מתוך התבוננות בטבלת הביקושים ניתן לראות כי קיימות נסיעות בעלות ביקוש רב, בעוד שנסיעות אחרות בעלות ביקוש דל, בהתאם לשעות היום. כך לדוגמה ראינו כי בשעות השיא (בוקר, וערב) קיימות נסיעות רבות המשלבות את קומת הקרקע. על כן, החלטנו להשתמש במעליות אקספרס, אשר יוותרו על עצירות באחד מכיווני הנסיעה, בהתאם לשעה. לדוגמה, **בשעות הבוקר** מעלית אקספרס תעצור בכל הקומות בכיוון מעלה, אך כאשר תגיע לראש הבניין היא תרד ישירות לקומת הקרקע – כלומר, לאחר שהמעלית הורידה את כל הנוסעים שאספה בכיוון העלייה, תשוב במהרה לאסוף עוד נוסעים מקומת הקרקע העמוסה. **בערב המצב הוא הפוך**, כאשר המעלית תעצור בכל קומה בכיוון מטה, על מנת לאסוף את כל הנוסעים אל קומת הקרקע, ולבסוף כשתגיע לקומת הקרקע – תעלה במהרה לראש הבניין כדי לחזור ולאסוף את שאר הנוסעים. **בכל שעה אחרת** של היום כל המעליות פועלות כמעלית שבת. מדיניות אקספרס תגרום לכך שהמעלית תנוצל בצורה מיטבית לאיסוף נוסעים מקומת הקרקע, בעוד שכאשר היא תעלה, יתווספו אליה גם נוסעים אחרים שנוסעים בכיוון מעלה. כך אנו מצפים שהתורים בקומת הקרקע יתקצרו, ותפחת הנטישה. בנוסף, זמן השהות במערכת צפוי להתקצר ע"י קיצור התור לנוסעים הללו. על מנת לאפשר גם שירות רגיל בשעות העומס, הגדרנו כי מחצית מהמעליות יהיו מעליות אקספרס, ומחציתן מעליות שבת.

3. מעלית אקספרס דינאמית בתצורה מחולקת

בתצורה זו, בניגוד לתצורה הראשונה, הערכנו שלמרות שחלוקת הבניין לשני חלקים עשויה לגרום לפגיעה במדדים, היא גם עשויה להביא לחלוקת משאבים טובה יותר בין הקומות. מאחר והקומות 16-25 הינן קומות שהמעבר אליהן, ומהן, מבוקש יותר מקומות 1-15, חלוקת הבניין לשני חלקים תאפשר לנו להקצות יותר מעליות לחלק העליון. על כן, הקצנו 3 מעליות לחלק העליון, ומעלית אחת לחלק התחתון. את המעלית לחלק התחתון הגדרנו כמעלית שבת, בעוד ש-2 מתוך 3 המעליות של החלק העליון הוגדרו כמעליות אקספרס (בהתאם להסבר בסעיף הקודם). ע"י כך דאגנו שהשירות לקומות העליונות יהיה בעדיפות גבוהה יותר, כך שלהערכתנו ייווצרו פחות תורים בקומות ועומסים במעליות. בבחינה של אפשרויות פיצול נוספת, בקומה אחרת במקום קומה 15, מצאנו כי המאפיינים של תוחלת זמני ההגעה מכתביבים הפרדה בדיוק בקומה 15, שכן שם מתרחש שינוי עמוק בביקוש.

מבנה הניסוי

הניסוי יכלול השוואה בין 3 תצורות שונות של המערכת. על מנת להפחית את כמות הרעש בניסוי, ננקוט במספר צעדים:

- נריץ כל תצורה עם מספר חזרות שווה – כך נקבל מבחן סטטיסטי מאוזן יותר, כאשר קיימת יותר הקבלה בין ההרצות.
- עבור כל תצורה ניצור **2 גרעינים** עבור חילול המספרים האקראיים – הגרעין הראשון ישמש את תהליך יצירת הגעת לקוח, והשני ישמש את תהליך קלקול המעלית יחד עם תהליך תיקון המעלית (זאת מאחר ושניהם תמיד יקרו אחד אחרי השני). ערכם של הגרעינים בכל חזרה יהיה מבוסס על אינדקס ההרצה הנוכחית, i , כך שגרעין הגעת לקוח יהיה i , וגרעין קלקול המעלית יהיה $i + n$, כאשר n מייצג את מספר החזרות. כך הרעש הנובע מהגרלת המספרים יפחת, שכן בכל הנוגע ליצירת נוסעים – קצב היצירה יהיה זהה בין כל התצורות, ובנוגע לתהליך הקלקול והתיקון – יהיה יותר דמיון בין ההרצות (אם כי ייתכן שעבור מודל מסוים שבו המעלית נוטה לעצור יותר, היא תתקלקל בשלב מוקדם יותר בהרצה, ובסך הכל תתקלקל יותר).
- לכל תצורה נשתמש באותם הגרעינים עבור אותם הימים, לפי הפירוט בסעיף הקודם, כך שבכל יום ויום של ההרצה ייעשה שימוש באותו סט של מספרים אקראיים בכל התצורות.

מספר החזרות הרצוי יחושב על ידי שימוש בנוסחה למציאת גודל מדגם¹ כתלות ברמת המובהקות הסטטיסטית (α) , ורמת הדיוק הדרושה (ϵ) . מאחר וסטיית התקן אינה ידועה, נשתמש באומדן לסטיית תקן (s) , על בסיס 5 חזרות של כל תצורה. לכל תצורה חישבנו את כמות החזרות הדרושה על פי כל אחד מהמדדים (זמן שהות במערכת, נטישה, ונוסעים במעלית), ובחרנו במספר הגדול מביניהם. ראשית התחלנו מ- $\alpha = 0.05$, $\epsilon = 0.001$, אך זה הוביל אותנו למספר הרצות בסדר גודל 10^{10} .

מדידת זמן הריצה הראתה כי זמן הריצה הינו כ-0.5 דק' ל-100 חזרות, תוך שנצפתה מגמה לינארית ככל שהגדלנו את כמות החזרות. על כן, נתון של 10^{10} חזרות איננו מציאותי. הגדרנו כי כ-2.5 דק' של זמן ריצה מהוות את החסם העליון, ולכן נאלצנו להפחית את רמת הדיוק

¹ תרגול 7 בקורס סימולציה, עמוד 1

(להגדיל את ε), כך ש- $\varepsilon = 1.6$ על מנת להקטין את זמן הריצה. לבסוף, בחרנו במספר הגדול מבין 3 ההרצות, כך שהתקבל $n = 596.49 \approx 597$.

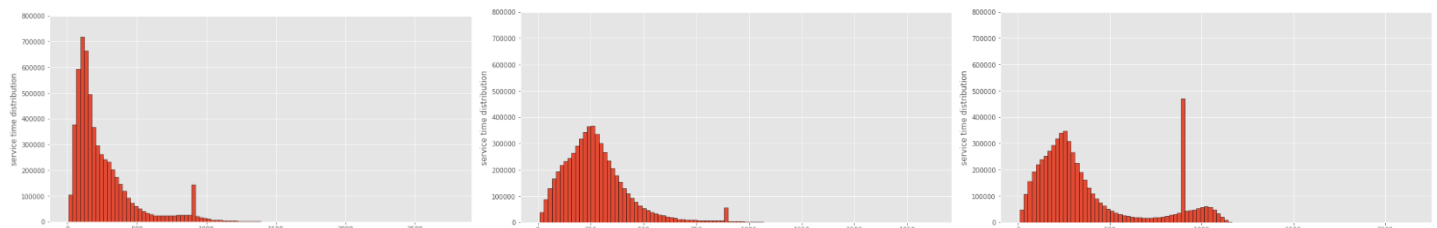
לאחר שנאסוף את הנתונים מ-3 התצורות, נבצע השוואה סטטיסטית ביניהן. לצורך כך, נבצע בדיקת Repeated Measures ANOVA, על מנת לראות האם קיימת שונות בין התוחלות. לאחר מכן, נבצע שני רב"סים מזווגים על מנת לדרג את התצורות.

השוואת חלופות

להלן תוצאות הניסוי:

מדד	תצורה 1	תצורה 2	תצורה 3
משך שהות ממוצע [שניות]	387.67	276.58	244.29
כמות נוטשים ביום [נוסעים]	720.28	86.03	198.96
תפוסת מעלית ממוצעת [נוסעים]	6.22	6.58	4.01

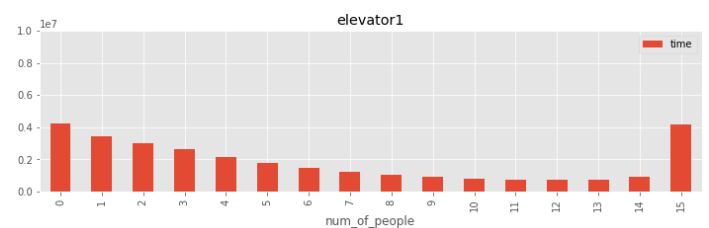
משך שהייה ממוצע לאדם (מימין 1, במרכז 2, משמאל 3), בסקאלה של בין 0 ל-1340 נוסעים:



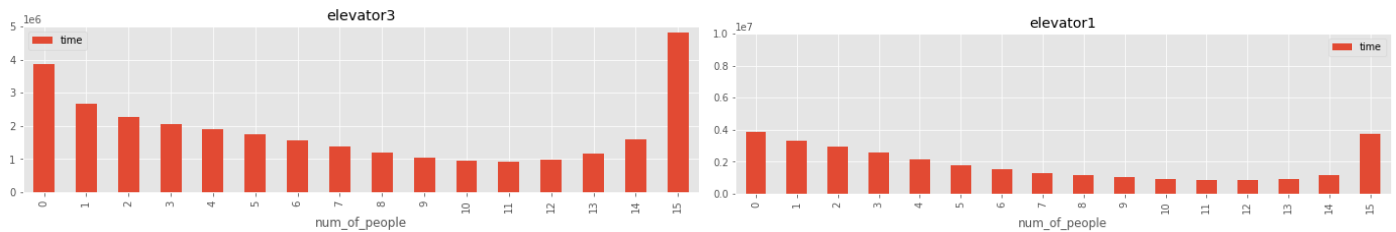
הנקודות הבולטות שאנו למדים מהגרפים הינן שיש אחוז נוטשים גבוה במיוחד בתצורה 1, ושמך השירות בתצורה 3 נדמה קצר יחסית.

התפלגות תפוסת המעליות:

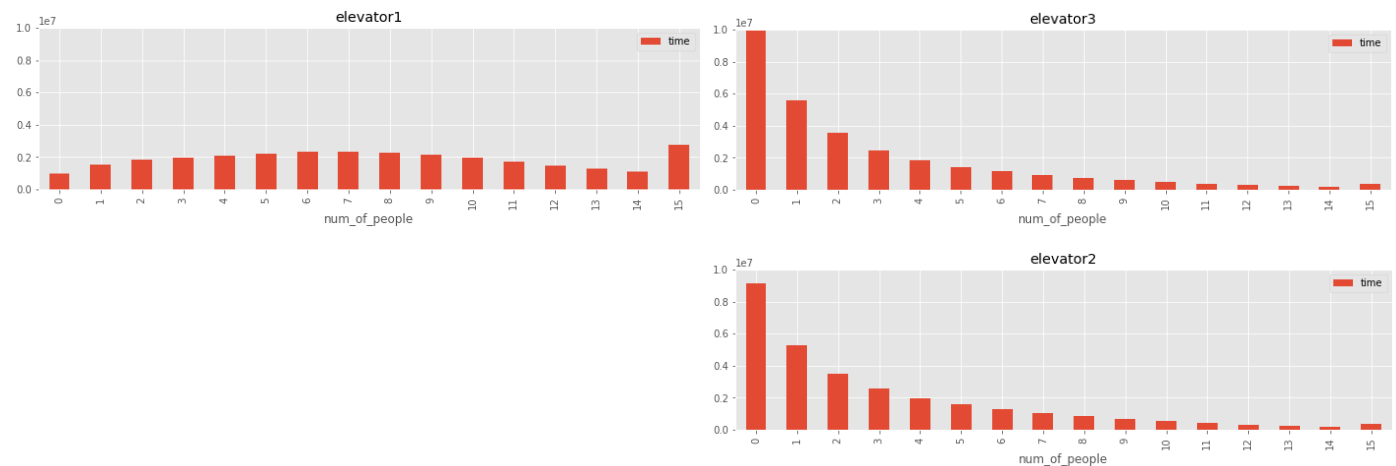
תצורה 1 – ארבעת המעליות זהות בתפקודן, ולכן התפלגות התפוסה שלהן דומה. ניתן לראות קפיצה עבור 15 נוסעים, בהתאם להסבר בסעיף התיקוף שבתחילת העבודה.



תצורה 2 – מימין ניתן לראות מעלית בתצורת שבת, ומשמאל מעלית אקספרס (2 המעליות הנותרות דומות, כל אחת לפי תפקודה). כאן קיימת קפיצה משמעותית ב-15 נוסעים עבור מעלית האקספרס. ייתכן שהנתון נובע עקב תכיפות ביקורים גבוהה יותר בקומת הקרקע העמוסה.



תצורה 3 – בכיוון השעון – מעלית אקספרס, מעלית שבת אשר משרתת קומות גבוהות, ומעלית שבת המשרתת קומות נמוכות.



לסיכום ההשוואה של התפלגות תפוסת המעליות, ניתן לראות כי בכל התפלגות קיימת קפיצה כשלהי עבור 15 נוסעים, המבטאת את מצב הקיצון של המעלית – כשהיא מלאה. עבור מעלית 1 בתצורה 3 ניתן לראות התפלגות קעורה יוצאת דופן מן השאר, הגם שהיא נמוכה לכל אורכה. להשערתנו הדבר נובע מאופי הקומות אותן היא משרתת 1-15, בעלות הביקושים הנמוכים יותר. בשאר ההתפלגויות ניתן לראות מגמות דומות, כאשר את מרבית הזמן הן מבלות ריקות, למעט המקרה של מעלית 3 בתצורה 2, אשר דנו בו בצמוד לגרף.

המדד שבאמצעותו החלטנו להשוות בין החלופות הינו **מדד זמן השהות במערכת**. זאת מאחר ולטעמנו הוא מבטא היטב את שביעות רצון המשתמש במערכת – ככל שהוא גדול יותר, כך שביעות הרצון פוחתת, ולהפך. בנוסף, נתון גדול יותר מבטא זמני המתנה ונסיעה ארוכים יותר – אלו נתונים שאנחנו מעוניינים למזער.

עבור בדיקת ה-ANOVA, קיבלנו כי $F_{emp} = 21057.53 > F_{cr} = 3$, נדחה את השערת האפס שלפיה כל התוחלות שוות ונסיק שתוחלות משך השהייה הממוצע לנוסע אינן שוות. על כן, נמשיך להשוואת הרב"סים על מנת לדרג את המדדים. תחילה מצאנו רב"ס להפרש התוחלות של תצורות 1 ו-2 ב-5% מובהקות, ולאחר מכן המשכנו לתוחלות 2 ו-3. מאחר והנתונים שמצאנו הספיקו כדי לדרג את התצורות, הפסקנו לאחר שני הרב"סים הנ"ל. להלן התוצאות:

$H_0: \mu_3 - \mu_2 = 0$	$H_0: \mu_2 - \mu_1 = 0$
$\{-33.63, -30.95\}$	$\{-112.37, -109.129\}$

מהנתונים עולה כי בשני המקרים התוחלות אינן שוות, מאחר וטווח הפרשן ב-5% מובהקות אינו כולל את 0. יתרה מכך, ניתן ללמוד כי עבור ההשוואה בין תצורות 2 ל-1, ההפרש שלילי במובהקות 5%, כך שבאותה מובהקות, תוחלת תצורה 1 גדולה מתוחלת תצורה 2. בדומה לכך, תוחלת תצורה 2 גדולה מתוחלת תצורה 3 עבור אותה מובהקות. לסיכום, $\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$ במובהקות של 5%.

המסקנה המתבקשת היא שעבור המדד על פיו אנו בוחנים את החלופות – זמן השהייה במערכת, קיבלנו כי זמן השהייה המיטבי מתקבל עבור התצורה ה-3, הרי היא "מעלית אקספרס דינאמית עם חלוקה" ©. במקום השני, נמצאת תצורה 2.

סיכום ומסקנות

כשהתחלנו לחקור את נושא המעליות, הרגשנו כי חלוקת הבניין לשני חלקים היא עניין מסורבל ומגושם. חשבנו שמדובר באילוץ מיותר, שיש להתיר. על כן, בבואנו לבחון תצורות נוספות, ראשית התחלנו מבחינת תצורות הפעלה חסרות חלוקה, אשר יאפשרו למעליות לזרום לכל חלקי הבניין, מתוך מחשבה שהדבר ימנע מסעות מיותרים בין חלקי הבניין, וכך ישפר את מדדי השירות.

עם זאת, בהמשך נוכחנו לגלות כי דווקא תצורת ההפעלה המחולקת מביאה לתוצאות הטובות ביותר מבין החלופות – ניתוח סטטיסטי הראה כי מחד, התוחלות של שלושת התצורות אינן שוות, ומאידך, תצורה 3 מעניקה לנו משך שירות קצר יותר מהשתיים האחרות, במובהקות של 5%. הדירוג הראה כי בהמשך נמצאת תצורה 2, ובסוף – תצורה 3.

אנו מייחסים את אופן הדירוג לכך שבעוד ששתי המעליות האחרות נאלצות לתור לכל קומה וקומה, כולל הקומות הפחות מבוקשות, המעליות בתצורה 3 מחולקות בצורה המאפשרת חלוקת משאבים הגיונית יותר בין חלקי הבניין, כך שכל קומה מקבלת כמות מתאימה של עצירות מעלית. להשערנו, כמות הנוסעים הנעים בין חלקי הבניין קטנה מספיק כדי שזו לא תשפיע בצורה משמעותית על אורך התורים ותפוסת המעליות – ולכן חלוקת הבניין אינה מהווה בעיה עבור זמני השירות. קרי, הנוסעים אשר נאלצים לקחת 2 מעליות מהווים מיעוט, אשר אינו משפיע בצורה משמעותית על המדדים.

בכל הנוגע לתצורה 2, אנחנו רואים כיצד מדיניות האקספרס הדינאמית תורמת לתנועת הנוסעים ביחס למדיניות השבת, תוך קיצור זמן השהות במערכת, ואף שיפור בכמות הנוטשים.

עם זאת, אנו משערים שדירוג התוצאות, כפי שהוא כרגע, הוא פועל יוצא של טבלת הביקושים, ומהווה מאין תמונת מראה שלה. ייתכן מאוד שבעת שינוי עתידי כלשהו בהרגלי הביקושים, במידה והביקושים יתאזנו בין הקומות, נעדיף תצורה גלובלית או לחילופין חלוקה של הבניין במיקום קרוב יותר למרכז הבניין (קומה 13 לדוגמה). בנוסף, ייתכן ששינוי כזה יגרום לכך שיותר נוסעים יבקשו לנוע בין שני חלקי הבניין, עד אשר נעדיף תצורה ללא הפרדה (גלובלית), המאפשרת תנועה ישירה בין כל קומה וקומה.

לבסוף, אנחנו מעריכים כי התצורה המובילה היא אמנם מובילה מבין ה-3 שיצרנו, אך ניתן לשפרה אף יותר. לדוגמה, ייתכן שאופן הקצאת מעליות דינאמי, בין שבת ואקספרס, יביא להקצאת משאבים מדויקת יותר אשר תביא לשיפור במדדים. בנוסף, ייתכן שקביעת נקודת החלוקה בבניין בקומה אחרת תשפר את המדדים, בניגוד להשערנו הראשונית שפיצול בקומה 15 הוא אופטימלי, זאת מטעמים של חלוקת משאבים מדויקת יותר גם כן. מעבר לכך, במחקרי המשך יהיה ניתן להגיע לתוצאות מדויקות יותר באמצעות סימולציה הבודקת אלפי קומבינציות, ורצה על פני מספר ימים. לתוך סימולציה כזו נזין מערך של אפשרויות אשר יקיף מספר גדול של אפשרויות, תוך שימוש בהיריסטיקות כדי לצמצם את כמות האפשרויות הכלליות. בנוסף, למידת מכונה עשויה לבוא לעזרתנו למציאת תצורת ההפעלה + מדיניות האופטימליות.