

University Bar-Ilan  
Mathematics of Department

## Report Simulation Boarding Airplane

Policies Boarding of Analysis Statistical Comparative

Research Operations :Course

Ariel Gil Prof. :Instructor

Rac Avishay :Submitted by

2025 ,1 October :Date

## תקציר

אנו בוחנים אמפירית את יעילות זמן העלייה למטוס תחת ארבע מדיניות נפוצות בתא נוסעים חד-מעברי: Block-2K (עם סדר מושבים), Random, Back-to-Front ו-Front-to-Back. המוטיבציה: לקצר זמני עלייה המשפיעים ישירות על עמידה בל"ז, עלויות קרקע וחויית נוסעים. הדמיה מסתמכת על זרימה בטור אחד ללא עקיפה, עצירות לאחסון בתא-עליון, ופינוי-שורה זמני להתיישבות; לכל מדיניות הופעלו אלפי הרצות עם זרעים קבועים לשחזור מלא. אנו מדווחים זמני עלייה כוללים, ממוצעים ורווחי-סמך 95%, לצד תרשימי QQ ECDF ו-Forest להשוואות זוגיות, וכן בדיקות יציבות (ממוצע מצטבר) ורגישות לגודל המטוס (מספר שורות).

**ממצאים מרכזיים:** Block-2K היא העדיפה בפער גדול; יחסית ל-Random מתקבל חיסכון טיפוסי של כ-40% ( $p \ll 10^{-6}$ , גודל-אפקט גדולים), בעוד שהמדיניות הכיוונית איטיות משמעותית. היתרון של Block-2K נשמר לכל אורך ההתפלגות (ECDF), אינו תלוי באופן מהותי במספר השורות בטווח שנבדק (אינדקס יחסי כמעט קבוע), ומלווה בשונות נמוכה וזנבות קצרים יותר—דבר המקטין סיכון לעיכובי-קצה תפעוליים.

**תרומה יישומית-מתודולוגית:** המסגרת פשוטה אך מדויקת, שקופה לשחזור ולהרחבה; הקוד מייצר אוטומטית גרפים וקבצי-עזר לדוח ומאפשר בדיקה מהירה של תרחישים חלופיים (פרמטריזציה של מדיניות, מספר שורות וסדר מושבים). לפיכך התוצאות מספקות בסיס החלטה פרקטי לחברות תעופה ושערים, לצד תשתית הוראתית-מחקרית לשילוב קורסיאלי בחקר ביצועים וסטטיסטיקה.

## תוכן העניינים

3	1 מבוא
4	2 מתודולוגיה
4	2.1 חלק א: מודל ותנאי פעולה . . . . .
6	3 ספריות וכלים
8	3.1 חלק ב: תכנון ניסוי והפקת נתונים . . . . .
11	3.2 חלק ג: תכנית ניתוח סטטיסטי . . . . .
14	3.3 חלק ד: תוצאות מרכזיות . . . . .
15	3.4 חלק ה: מבחנים סטטיסטיים והשוואות גרפיות . . . . .
22	4 פרק ו': דיון ומסקנות ביניים
22	4.1 2.1 משמעות סטטיסטית ומעשית . . . . .
22	4.2 3.1 שונות, זנבות וסיכון לעיכובים . . . . .
22	4.3 4.1 רגישות וסקיילינג (מספר השורות) . . . . .
23	4.4 5.1 מנגנון תורי-מרחבי (למה Block-2K עובד) . . . . .
24	4.5 6.1 מסקנות סטטיסטיות מרוכזות ומובהקות . . . . .
25	5 פרק ז: ניתוח כלכלי
25	5.1 1.ז פרשנות תפעולית . . . . .
25	5.2 2.ז תרחישי "מה-אם" - השפעה יומית לפי היקף טיסות . . . . .
27	פרק ח: סיכום, הוכחת מובהקות ומסקנות

## 1 מבוא

העבודה בוחנת אמפירית את יעילותן של מדיניות עלייה למטוס באמצעות סימולציה מונחית-אירועים של תא חד-מעברי (50 שורות, 6 מושבים בשורה; 300 נוסעים). לכל נוסע מוקצה מושב קבוע; תנועת הליכה במעבר נחשבת מיידית; חסימות נוצרות בעת אחסון כבודה ובהתיישבות. זמני השירות מדוגמים מהתפלגויות אקספוננציאליות בהתאם לפרמטריזציה המודלית.

משתנה התוצאה הראשי (ה-estimand) הוא זמן העלייה הכולל בדקות. נבחנות ארבע מדיניות: Random, Front-to-Back, Back-to-Front, ו-Block-K-with-seat-order. לכל מדיניות מוצגות 100 חזרות עצמאיות תחת זרעי אקראיות קבועים לשחזור. הדיווח כולל ממוצעים ומרווחי אמון של 95%, תרשימי ECDF ו-Box-plots, וכן גודל אפקט בשתי סקאלות: הפרש דקות ואחוז שינוי ביחס ל-Random.

ההשוואה הסטטיסטית נשענת על Welch-ANOVA כמבחן כולל, על בדיקות זוגיות מסוג Welch-t עם תיקון Holm לריבוי השוואות, ועל אלטרנטיבות לא-פרמטריות (Kruskal-Wallis ו-Mann-Whitney). דיאגנוסטיקה (Levene) לשונויות, Shapiro-Wilk לנורמליות ותרשימי (QQ) מדווחת לתוקף ולרובוסטיות המסקנות. ניתוחי רגישות בוחנים יציבות ביחס לשינוי במספר השורות וביחס לסקיילינג אחיד של פרמטרי השירות. כל הגדרות ההרצה, הזרעים והתוצרים נשמרים לשם שחזור מלא.

## 2 מתודולוגיה

### 2.1 חלק א: מודל ותנאי פעולה

המודל מתאר תא נוסעים חד מעברי עם 50 שורות ו6 מושבים בכל שורה, שלושה מכל צד של המעבר. לכל נוסע מוגדר מראש מושב ייעודי. התהליך מתקדם מאירוע לאירוע ומסתיים כאשר כל הנוסעים יושבים במקומם. מדד התוצאה הוא זמן העלייה הכולל עד שהנוסע האחרון התיישב.

#### מסגרת המודל

תא נוסעים חד מעברי עם מספר קבוע של שורות ושישה מושבים בשורה, שלושה מכל צד של המעבר. לכל נוסע מוקצה מראש מושב קבוע. התקדמות התהליך מונחית אירועים ומסתיימת כאשר כל הנוסעים יושבים במקומם. מדד התוצאה המרכזי הוא זמן העלייה הכולל עד שהנוסע האחרון התיישב.

#### הנחות תפעול

1. הליכה לאורך המעבר היא בזמן אפס. אין עקיפה. נוסע אחד בלבד יכול לתפוס בכל רגע את הקטע במעבר שבו הוא עומד.
2. בהגעה לשורה הייעודית הנוסע עוצר לאחסון כבודה בתא העליון. בזמן האחסון הקטע במעבר חסום.
3. התיישבות במושב תלויה במצב השורה. אם אין חוסמים במעבר למושב, הזמן הוא אפס. אם יש חוסמים בשורה, משך המעבר למושב מתפלג אקספוננציאלי עם ממוצע של חצי דקה ועוד רבע דקה לכל נוסע שחוסם. נוסעים בשורה שאינם חוסמים את הדרך למושב אינם גורמים לעיכוב.
4. עד שנוסע מסיים את האחסון ואת ההתיישבות, הוא חוסם את המעבר וכל מי שמיועד לשורה עם מספר שווה או גבוה יותר ממתיך מאחוריו. אם הנוסע הבא בתור מיועד לשורה עם מספר נמוך יותר, הוא יכול להתחיל להתארגן במקביל.
5. זמן סידור הנוסעים טרם ההפעלה לפי המדיניות הנבחרת הוא זמן אפס.
6. שחזור מלא נשמר באמצעות זרעים קבועים לכל חזרה ושמירת התוצרים במבנה עקבי.

## מדיניות עלייה הנבדקות

להלן ארבע המדיניות שנבחנות בסימולציה. בכל המקרים יש כניסה אחת למטוס, לכל נוסע מוקצה מושב ייעודי מראש בשורות 1 עד 50 ובמושבים a עד f והמדיניות מגדירה את סדר ההגעה לפתח ואת סדר הכניסה בפועל.

– (Random) כל הנוסעים נכנסים לפי סדר אקראי מלא, ללא תלות במספר השורה או במיקום המושב. בתוך כל שורה אין עדיפות מובנית בין מושבי חלון אמצע ומעבר, והסדר בתוך השורה נקבע על ידי סדר ההגעה האקראי.

– (Back-to-front) אחורה קדימה - העלייה מתבצעת לפי סדר יורד של שורות, תחילה שורה 50 ואז 49 וכן הלאה עד 1. בתוך כל שורה סדר הכניסה של המחזיקים במושבי חלון אמצע ומעבר הוא אקראי, ללא עדיפות למיקום המושב במדיניות זו.

– (Front-to-Back) קדימה אחורה - העלייה מתבצעת לפי סדר עולה של שורות, תחילה שורה 1 ואז 2 וכן הלאה עד 50. בתוך כל שורה סדר הכניסה של המחזיקים במושבי חלון אמצע ומעבר הוא אקראי. כלומר אין קדימות מובנית בחלון מול אמצע מול מעבר במדיניות זו.

– (2k-blocks) חלוקה לבלוקים עם סדר מושבים: חלון-אמצע-מעבר. השורות מחולקות למקטעים רציפים של בלוקים שווים או כמעט שווים בגודלם, ובפירוט:

**בלוקים 2K עם סדר מושבים (Block-2K-with-seat-order)** השורות מחולקות לזוגות רציפים מלמעלה למטה: 49-50, 47-48, 45-46, וכן הלאה עד 1-2. העלייה מתבצעת בשלושה מעברים עוקבים לפי קטגוריית מושב: תחילה חלונות (A,F) לאחר מכן אמצע (B,E) ולבסוף מעבר (C,D). בתוך כל זוג שורות ובתוך קטגוריית מושב נתונה, יוצרת הסידרה "רביעיית מושבים" המורכבת מארבעה מושבים: שתי אותיות הקטגוריה בשורה הגבוהה יותר בזוג, ושתי אותיות הקטגוריה בשורה הנמוכה יותר בזוג. הסדר בתוך רביעייה הוא אקראי אך עם עדיפות לשורה הגבוהה בזוג: תחילה שני המושבים בשורה הגבוהה (בסדר אקראי ביניהם), ולאחר מכן שני המושבים בשורה הנמוכה (גם כן בסדר אקראי ביניהם). דוגמה: עבור זוג 49-50 בקטגוריית חלונות, סדר אפשרי הוא 50F-49A-50A-49F אחריו יעובד זוג 47-48 בקטגוריית חלונות, וכן הלאה עד השלמת כל מושבי החלון במטוס. רק לאחר סיום כלל מושבי החלון לכל הזוגות, עוברים לאמצע (B,E) באותו מנגנון; לבסוף למעבר (C,D).

## התפלגויות ותזמונים

- זמן אחסון בתא עליון מתפלג אקספוננציאלי עם ממוצע של 0.5 דקה לנוסע.
- זמן התיישבות כשיש חוסמים מתפלג אקספוננציאלי עם ממוצע של 0.5 דקה ועוד 0.25 דקה לכל נוסע שחוסם. כאשר אין חוסמים זמן זה הוא אפס.
- הליכה לאורך המעבר היא זמן אפס.

## מטרות ההשוואה

ההשוואה בין המדיניות נועדה לבחון שלושה ממדים עיקריים. יעילות בזמן העלייה הכולל. יציבות בין חזרות. והתנהגות הזנבות והתפלגות הזמנים. לצורך כך מדווחים ממוצעים ורווחי סמך של תשעים וחמישה אחוז, מוצגים תרשימי התפלגות אמפירית, ומבוצעות השוואות בין קבוצות בפרק התוצאות.

## מנגנון אירועים

מנוע הסימולציה מתקדם תמיד לאירוע הבא: סיום אחסון כבודה, סיום מעבר והתיישבות, או פינוי חסימה שמאפשר המשך תנועה. כאשר יש שני אירועים באותו רגע נקבע סדר הטיפול באופן עקבי. הסימולציה מסתיימת כאשר כל הנוסעים ישובים במקומם.

## בקרת שחזור ואיכות נתונים

לכל חזרה נשמרים מזהי זרעים (seeds) ותוצרי ביניים חיוניים, כולל זמן העלייה הכולל וסטטיסטיקות סיכום לכל מדיניות. התרשימים והטבלאות מופקים אוטומטית ונשמרים בשם עקבי.

## 3 ספריות וכלים

הסימולציה והניתוח מלווים בתלות בספריות נפוצות, יציבות ונוחות לשחזור. להלן עיקרי הספריות והנימוקים לשימוש בהן:

### ספריות סימולציה ולעיבוד נתונים

- NumPy חישובים מתמטיים, מחוללי מספרים אקראיים וניהול זרעים לצורך שחזור מלא.
- Pandas לניהול טבלאות תוצאות, הצטרפויות, קיבוצים וסיכומים לכל מדיניות.
- itertools ו collections לתורים ואירועים פשוטים ולניהול סדרי עדיפויות בסיסיים.

### סטטיסטיקה והסקה

- SciPy לבדיקות השוואה בסיסיות, חישוב רווחי סמך וחישובים אמפיריים פשוטים.
- Statsmodels לניתוחי שונות והשוואות בין קבוצות כאשר יש צורך בדגמים מעט יותר גמישים.

## תרשימים וייצוא

– Matplotlib להפקת תרשימים נקיים ונשלטים, כולל דיאגרמות התפלגות אמפירית ותרשימי סיכום.

– Tools לייצוא ייעודיים שמעתיקים את הקבצים שנוצרו לתקיית הדוח וכך חוסכים עבודה ידנית ומונעים טעויות.

הבחירה בספריות אלה מאפשרת קוד קצר וברור, זמני ריצה סבירים, ובעיקר שחזור מלא של כל שלב. כל התרשימים מופקים באופן אוטומטי ומתויגים בשם עקבי, כך שניתן להחליף נתונים ולהריץ מחדש בלי לערוך את הקובץ ידנית.



### **3.1 חלק ב: תכנון ניסוי והפקת נתונים**

תכנון הניסוי נועד לאפשר השוואה הוגנת בין המדיניות תחת תנאי מודל קבועים, עם שחזור מלא של כל ריצה. תת הפרקים הבאים מגדירים את היעדים, הגורמים והרמות, אופן ההקצאה והאקראיות, פרוטוקול הפקת הנתונים, בקרת איכות, ותכנית ניתוח שתיושם בפרק התוצאות.

#### **יעדי הניסוי**

להעריך ולהשוות בין ארבע מדיניות עלייה מבחינת זמן העלייה הכולל, יציבות בין חזרות, והתנהגות ההתפלגות לאורך הטווח כולל זנבות. בנוסף לבחון רגישות בסיסית לשינויים בפרמטרים המרכזיים בפרק נפרד.

#### **גורמים ורמות**

הניסוי כולל גורם עיקרי יחיד.

– מדיניות עלייה בארבע רמות. אקראי. Random. קדימה אחורה Back. to Front אחורה קדימה Front. to Back חלוקה לבלוקים עם סדר מושבים order. seat with K Block

יתר מאפייני המודל קבועים. תא נוסעים חד מעברי עם חמישים שורות ושישה מושבים בשורה. הליכה במעבר בזמן אפס. זמן אחסון בתא עליון אקספוננציאלי עם ממוצע של חצי דקה לנוסע. זמן התיישבות כשיש חוסמים אקספוננציאלי עם ממוצע של חצי דקה ועוד רבע דקה לכל חוסם. כאשר אין חוסמים הזמן הוא אפס. סדר המושבים בתוך השורה במדיניות קדימה אחורה ואחורה קדימה אקראי. במדיניות הבלוקים הסדר בתוך הבלוק הוא חלון ואז אמצע ואז מעבר בכל שורות הבלוק.

#### **הקצאה ואקראיות**

לכל מדיניות נוצר סדר כניסה בהתאם להגדרתה. אקראיות נוצרת רק במקום שבו נדרש סדר אקראי. לדוגמה בתוך שורה במדיניות שאינן מדווחות סדר מושבים. או בחלוקת הנוסעים לתור במדיניות אקראי. לכל חזרה מוקצה זרע קבוע שממנו נגזרים זרעי משנה כדי להבטיח אי תלות בין רכיבי אקראיות ובין חזרות.

#### **מספר חזרות וגודל מדגם**

לכל מדיניות מורצות 100 חזרות עצמאיות. גודל המדגם בכל חזרה קבוע ונגזר ממספר המושבים במטוס. חמישים שורות כפול שישה מושבים. סך הכל 300 נוסעים.

## **משתני תוצאה**

- משתנה ראשי. זמן העלייה הכולל עד שהנוסע האחרון התיישב.
- משתנים משניים. זמן ממוצע לאחסון לנוסע. זמן ממוצע להתיישבות לנוסע כאשר יש חוסמים. שיעור החזרות שעוברות סף זמן שנקבע מראש. לדוגמה מדרגות זמן תפעוליות פנימיות. מדדי סיכום לכל מדיניות כגון חציון ורבעונים.

## **בקרת איכות**

- לפני עיבוד סטטיסטי מבוצעות בדיקות תקינות.
  - אין ערכים חסרים במשתנים הראשיים.
  - זמנים אי שליליים. זמן עלייה גדול או שווה לאפס. זמני אחסון והתיישבות אי שליליים.
  - מספר הנוסעים התיישבו שווה לגודל המדגם בכל חזרה.
  - התפלגות זמני האחסון וזמני ההתיישבות עקבית עם הגדרות המודל ברמת ממוצע משוחזר ומדדי פיזור בסיסיים.
- הרצות שאינן עוברות את הבדיקות מסומנות לקובץ חריגים ומדולגות מהניתוח עד לתיקון.

## **ייצוא תרשימים**

מופקים באופן אוטומטי תרשימים הבאים לכל מדיניות. התפלגות אמפירית של זמן העלייה. קופסאות השוואה בין מדיניות. תרשים נקודות של הממוצעים עם רווחי סמך של תשעים וחמישה אחוז. כל התרשימים נשמרים בקובצי תמונה תקינים עם שמות עקביים לצורך שילוב בדוח.

## **תכנית ניתוח סטטיסטי מתומצתת**

הניתוח יתבסס על השוואת הממוצעים בין המדיניות בצירוף רווחי סמך של תשעים וחמישה אחוז. יוצגו התפלגויות אמפיריות כדי לבחון זנבות ושונות. לשם מבחני השוואה בין קבוצות ישמשו כלים סטנדרטיים ומקובלים בעבודות מסוג זה. ניתוח שונות וגישה רובסטית למקרה של פיזורים שאינם דומים מספיק. מבחן קרוסקאל וליס כבדיקה לא פרמטרית משלימה. פירוט החישובים יופיע בפרק התוצאות בצמידות לגרפים ולטבלאות.

## **טיפול בחריגים**

ערכי זמן עלייה החורגים באופן חריג מספי תפעול נקובים יסומנו אך לא יושלכו אוטומטית. ההתייחסות אליהם תהיה מפורשת בפרק הדיון כדי להדגים סיכון תפעולי ולבחון רגישות.

## **ניתוחי רגישות מתוכננים**

יופעלו שני קווים של רגישות. שינוי מספר השורות סביב חמישים כדי לבחון השפעה של אורך תא הנוסעים. שינוי התוחלות לפרקי האחסון וההתיישבות במקדם אחד כלפי מעלה וכלפי מטה כדי לבדוק יציבות ממצאים.

## **שחזור מלא**

כל הרצות מתועדות באמצעות מזהי זרעים. גרסה של הקוד וכל הגדרות הניסוי נשמרות לצד נתוני הפלט. כך ניתן להריץ מחדש את כל הפרקים ולקבל את אותם תרשימים וטבלאות ללא עריכה ידנית.

## 3.2 חלק ג: תכנית ניתוח סטטיסטי

מטרת הניתוח היא להעריך ולהשוות את ביצועי המדיניות בזמני עלייה, להציג תמונה תיאורית מלאה, לבצע השוואות סטטיסטיות קפדניות, ולספק מסקנות תפעוליות ברורות ושחזרות. הניתוח מתקדם משלוש שכבות: תיאור, השוואה, דיאגנוסטיקה ובקרת הנחות.

### מערך ההשוואה והגדרות דיווח

מדיניות העלייה למטוס הנבדקות הן: אקראי (Random), קדימה אחורה (Front-to-Back), אחורה קדימה (Back-to-Front), חלוקה לבלוקים עם סדר מושבים (Block2K). הדיווח יתמקד בארבעה מימדים: זמן ממוצע, פיזור, יציבות בין חזרות, וזנבות. בנוסף יוצג גודל האפקט בשתי סקאלות נוחות: הפרש בשניות ואחוז שינוי לעומת אקראי (Random) כקו בסיס.

### שכבה א: תיאור נתונים

תחילה יוצגו מדדים תיאוריים לכל מדיניות על פני כל ההרצות העצמאיות: ממוצע, חציון, רבעונים, סטיית תקן אמפירית, ורווח סמך של תשעים וחמישה אחוז לממוצע. תצוגה גרפית תכלול ECDF לכל מדיניות על אותה סקאלה, ו Box-plots להשוואת פיזור וזנבות. סדר ההצגה יהיה עקבי: אקראי, קדימה אחורה, אחורה קדימה, חלוקה לבלוקים עם סדר מושבים.

### שכבה ב: השוואות סטטיסטיות

ההשוואות יתבצעו בשתי מסגרות אפשריות: מסגרת בלתי תלויה בין מדיניות, ומסגרת מזווגת כאשר קיימת התאמה אחד לאחד בין הרצות של שתי מדיניות באותו מדד אקראיות. ברירת המחדל בניתוח הראשי היא בלתי תלויה; נציין במפורש כאשר מופעלת מסגרת מזווגת.

Welch-ANOVA כלי ראשי להשוואת ממוצעים בין כמה קבוצות ללא הנחת שונויות שוות. מתאים לפיזורים שונים או גדלי מדגם שאינם זהים. משמש כמבחן כולל לפני השוואות זוגיות.

Pairwise-Welch-t בדיקות זוגיות בין כל שתי מדיניות בהתפלגויות שאינן מבטיחות שונויות שוות. מדווחות תוצאות כהפרש ממוצעים בשניות, אחוז שינוי לעומת אקראי (Random), רווח סמך ברמת תשעים וחמישה אחוז וערך משמעות. שליטה בריבוי השוואות באמצעות Holm-adjustment.

Mann-Whitney-U מבחן לא פרמטרי להשוואת מרכזים בין שתי קבוצות בלתי תלויות. שימושי כאשר ההשוואה הזוגית בין מדיניות אינה מבוססת על שונויות דומות או כאשר ההתפלגות אינה סימטרית או עם זנבות כבדים. בדוח יופיע כבדיקה משלימה לזוגות מרכזיים לצד Pairwise-Welch-t. הדיווח יכלול כיוון ההבדל ומדד השפעה תפעולי בשניות ואחוזים.

**Paired-t-test** כאשר מתקיימת הזדוגגות טבעית בין ריצות של שתי מדיניות, למשל שימוש באותו מספר זרע לכל אינדקס חזרה לצורך הפחתת שונות, ההשוואה תעבור למסגרת מזוגות. **Paired-t-test** מודד את ממוצע ההפרשים בין הזוגות ומעניק עוצמה סטטיסטית גבוהה יותר כאשר הקורלציה בין זוגות חיובית. יתועד בבירור מתי הופעלו ריצות מזוגות.

**Wilcoxon-signed-rank** אלטרנטיבה לא פרמטרית ל **Paired-t-test** כאשר פונקציית השגיאה או ההתפלגות של ההפרשים אינה קרובה לנורמלית. משמשת בדוח כבדיקה משלימה במצבי הזדוגגות, עם דיווח על כיוון ההבדל וגודל האפקט התפעולי.

**Kruskal-Wallis** מבחן לא פרמטרי כולל להשוואת מרכזים בין יותר משתי קבוצות. משמש אימות עצמאי לממצאי **Welch-ANOVA**. במקרה של ממצא כולל משמעותי, יושלמו השוואות זוגיות לא פרמטריות עם **Holm-adjustment**.

**Levene-test** בדיקה לשוויון שונות בין קבוצות. משמשת דיאגנוסטיקה ותייעוד בלבד; החלטות ההשוואה אינן נשענות על שונות שוות.

**Shapiro-Wilk** בדיקה לנורמליות בתוך כל קבוצה. מוצגת לצורך תיעוד ויחד עם **QQ-plots**, ללא תלות בתוצאותיה לבחירת הכלים העיקריים.

### **שכבה ג': דיאגנוסטיקה ובקרת הנחות**

מטרת שכבה זו לתעד שהכלים שנבחרו ישימים ולעדכן את הפרשנות בעת הצורך.

**Levene-test** בדיקה לשוויון שונות בין הקבוצות. משמשת דיאגנוסטיקה בלבד. גם אם השונות אינן שוות, הכלים הראשיים לעיל נותרים תקפים ולכן מסקנות ההשוואה אינן תלויות בדרישה זו.

**Shapiro-Wilk** בדיקה לנורמליות בתוך כל קבוצה. משמשת תיעוד ותמיכה בהצגת **QQ-plots**. אין תלות בה ליישום **Welch-ANOVA** או **Kruskal-Wallis**.

**plots QQ and ECDF** מסייע לזהות זנבות ושינויים לאורך כל הטווח. **QQ-plots** מצורפים לתאר את קרבת ההתפלגות לנורמליות בכל קבוצה מבלי לבסס על כך החלטות השוואה.

### **סטנדרט דיווח וגודל אפקט**

לצד ערכי משמעות יודגש גודל האפקט כערך תפעולי: שניות וכן אחוז שינוי לעומת אקראי. רווחי סמך של תשעים וחמישה אחוז יופיעו הן לממוצעי המדיניות והן להפרשים הזוגיים. הדגש הוא על פרקטיקה תפעולית ולא על משמעות סטטיסטית בלבד.

## **התמודדות עם חריגים ואי תקינות**

ערכים בלתי אפשריים אינם צפויים לפי מנגנון הסימולציה. אם יופיעו תיעשה דגלול ותיקוף לפני כל ניתוח. נקודות קצה קיצוניות יופיעו בתרשימי הקופסאות וידווחו אך לא יושלכו אוטומטית. תוצג גם רגישות קצרה להשמטת חריגים כבדים כדי להמחיש יציבות ממצאים.

## **רגישויות מתוכננות**

כדי לאשר יציבות מסקנות תבוצע רגישות במספר השורות סביב חמישים, וכן רגישות בקנה מידה אחיד לתוחלות זמני האחסון וההתיישובות. בכל רגישות יישמר בדיוק אותו הליך ניתוח ודיווח.

## **סדר הצגה בדוח**

א. טבלת מדדים תיאוריים מרכזיים לכל מדיניות. ב. ECDF ו Box-plots להשוואה ויזואלית. ג. Welch-ANOVA ולאחריו טבלת adjustment, Pairwise-Welch-t-with-Holm. ד. Kruskal-Wallis כהשלמה לא פרמטרית. ה. פסקת מסקנות תפעוליות קצרה עם סדר עדיפויות בין המדיניות בתנאי המודל.

### 3.3 חלק ד: תוצאות מרכזיות

חלק זה מציג תחילה מדדים תיאוריים מסכמים לכל מדיניות על פני כל ההרצות העצמאיות, ולאחר מכן פרשנות קצרה. כל הזמנים בדקות. מספר ההרצות לכל שיטה- 100.

#### טבלה מסכמת של מדדים תיאוריים

מדיניות	ממוצע	חציון	רבעון ראשון	רבעון שלישי	סטיית תקן	CI95 לממוצע
אקראי (Random)	126.02	125.53	119.48	132.98	10.54	עד 123.95 עד 128.08
אחורה קדימה (Back-to-Front)	192.68	192.48	183.69	201.88	13.23	עד 190.09 עד 195.28
קדימה אחורה (Front-to-Back)	247.02	246.38	236.47	257.48	15.78	עד 243.93 עד 250.11
(Block-2K-with-seat-order)	76.11	75.83	71.59	79.57	6.61	עד 74.81 עד 77.40

יחידות בדקות. N=100 חזרות לכל מדיניות. רווחי סמך ברמת תשעים וחמישה אחוז חושבו על ממוצע החזרות.

#### פער לעומת הקו הבסיסי אקראי (Random)

מדיניות	פער ממוצע בדקות לעומת Random	אחוז שינוי לעומת Random
(Block-2K-with-seat-order)	49.91-	39.6%-
אחורה קדימה (Back-to-Front)	66.67+	52.9%+
קדימה אחורה (Front-to-Back)	121.00+	96.0%+

#### פרשנות ראשונית

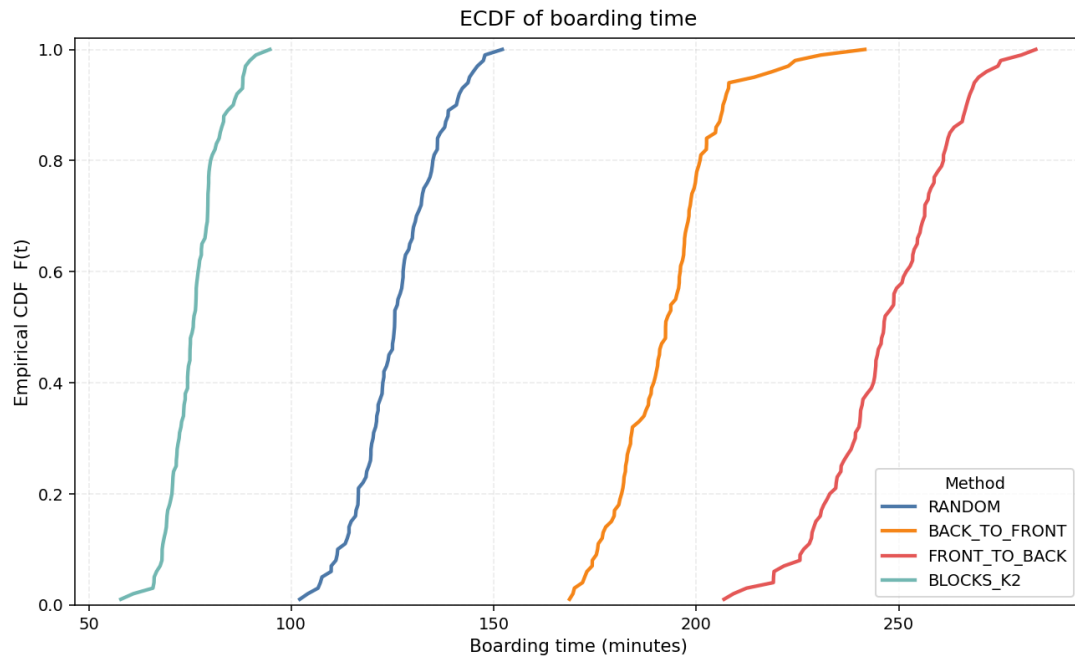
הטבלה מצביעה על יתרון מובהק למדיניות חלוקה לבלוקים עם סדר מושבים של חלון-אמצע-מעבר (Block-2K-with-seat-order) עם ממוצע 76.11 דקות ורווח סמך צר, נמוך בכחמישים דקות מן הקו הבסיסי אקראי (Random). המדיניות אחורה קדימה (Back-to-Front) איטית יותר מאקראי בכחמישים ושבע דקות בממוצע, והמדיניות קדימה אחורה (Front-to-Back) היא האיטית ביותר. ההבדלים עקביים לפי רבעונים ורווחי סמך, מה שמרמז על יציבות בין החזרות.

### 3.4 חלק ה: מבחנים סטטיסטיים והשוואות גרפיות

מטרת הפרק לכמת פורמלית את ההבדלים בין המדיניות ולהציג ראיות אמפיריות תומכות. בכל תת-סעיף: נציג את שיטת הבדיקה והתרשים, ונפרשו.

#### א. מבחן כולל (Kruskal-Wallis) והתפלגות מצטברת אמפירית (ECDF)

**מבחן Kruskal-Wallis** מבחן לא-פרמטרי להשוואה בין כמה קבוצות ללא הנחות נורמליות או שוויות שוות. כל התצפיות מדורגות; סכום הדירוגים לקבוצה מומר לסטטיסטי  $H$  שמתפלג בקירוב חי-בריבוע עם  $k - 1$  דרגות חופש. בדאטה שלנו:  $k = 4$ ,  $N = 400$ , התקבל  $H = 372.9216$  ו- $p = 1.622 \times 10^{-80}$  – דחיית האפס בוודאות גבוהה: קיימים הבדלים מובהקים בין המדיניות.



**איור 1:** ECDF לזמן העלייה לפי מדיניות: אקראי (Random), אחורה-קדימה (Back-to-Front), קדימה-אחורה (Front-to-Back), ובלוקים 2K עם סדר מושבים (Block-2K-with-seat-order). הציר האופקי - דקות; האנכי - שיעור ההרצות שהסתיימו עד אותו זמן. עקומה שמאלה/גבוהה יותר = זמנים קצרים יותר לאורך הטווח.

**ECDF - התפלגות מצטברת אמפירית של זמני העלייה** מה רואים. עקומת Block-2K משמאל לכולן כמעט לכל  $t$  - זמני עלייה קצרים בעקביות. אחריה Random. שתי המדיניות הכיווניות Back-to-Front ו-Front-to-Back נמצאות ימינה (איטיות יותר), כאשר Front-to-Back האיטית ביותר.

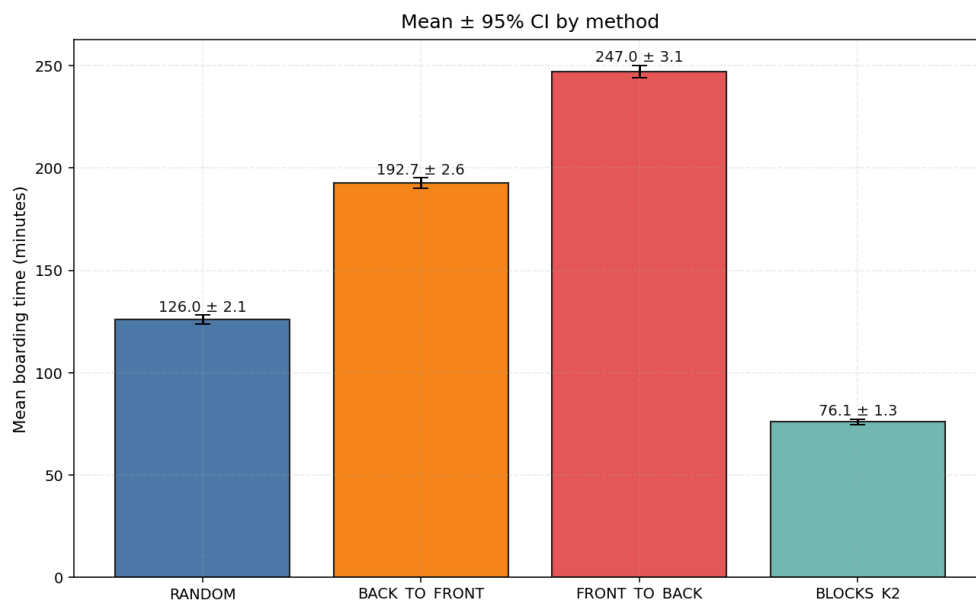
**טבלה 1:** מבחן כולל להבדלים בין המדיניות (Kruskal-Wallis)

קבוצות ( $k$ )	df	H	p
4	3	372.9216	1.62e-80



## ב. השוואת ממוצעים ורווחי סמך (Welch-ANOVA)

מה בודקים. וריאנט רובסטי ל-ANOVA שאינו מניח שוניות שוות ומתמודד טוב עם סטיות מנורמליות. משווים ממוצעים בין כמה קבוצות, ולאחר מכן ממשיכים להשוואות זוגיות מבוקרות ריבוי.



**איור 2:** ממוצעי זמן העלייה (דקות) עם רווחי סמך של 95% לפי מדיניות.

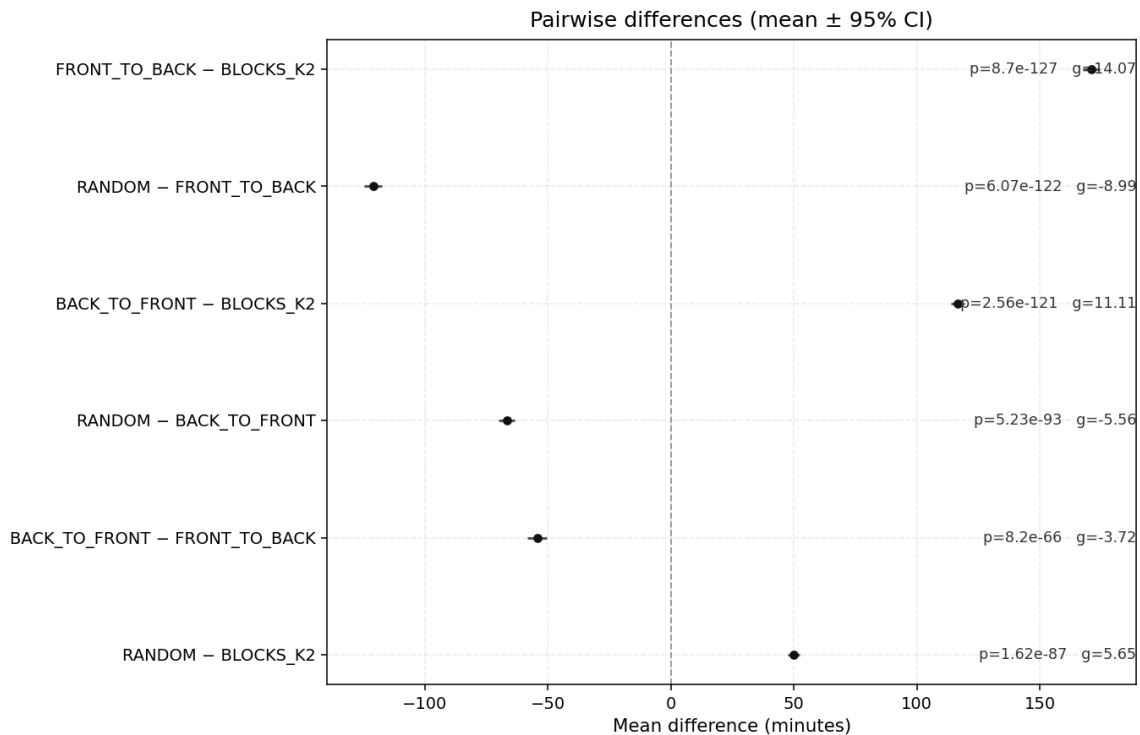
מה רואים. Block-2K - הממוצע הנמוך ביותר ורווח סמך צר (יציב). Random טוב משמעותית משתי המדיניות הכיווניות. Front-to-Back - האיטי ביותר. רווחי הסמך אינם חופפים בין הקבוצות המובחנות - עדות לפערים ממשיים.

**טבלה 2:** מדדים תיאוריים לזמן העלייה (בדקות) לפי מדיניות

מדיניות	ממוצע	SE	-CI95	+CI95
Blocks-2K (עם סדר מושבים)	76.1	1.3	73.6	78.6
Random	126.0	2.1	121.9	130.1
Front to Back	192.7	2.6	187.6	197.8
Back to Front	247.0	3.1	240.9	253.1

## ג. השוואות זוגיות, גודל אפקט ורווחי סמך

לאחר שנמצאו הבדלים מובהקים בין המדיניות ברמת האומניבוס, מבצעים **השוואות זוגיות** כדי לכמת כמה ולמי יש יתרון. לצורך ציבויות שאינן נורמליות וללא הנחת שוויון שונות, משתמשים ב:  $t$ -tests  $Welch$ -pairwise עם תיקון ריבוי השוואות בשיטת Holm. לצד זה מוצגים גם מבחנים לא-פרמטריים (Mann-U-Whitney) לבקרה. בכל השוואה מדווחים: (1) הפרש ממוצעים בדקות, (2) 95%CI, (3)  $p$ , (4) גודל אפקט  $g$ .



**איור 3:** Forest-plot: הפרשי ממוצעים בין זוגות מדיניות (בדקות) עם 95%CI. קו אנכי באפס מציין "אין הפרש". הכיתוב הימני מציג  $p$  ו- $g$ .

## מה רואים?

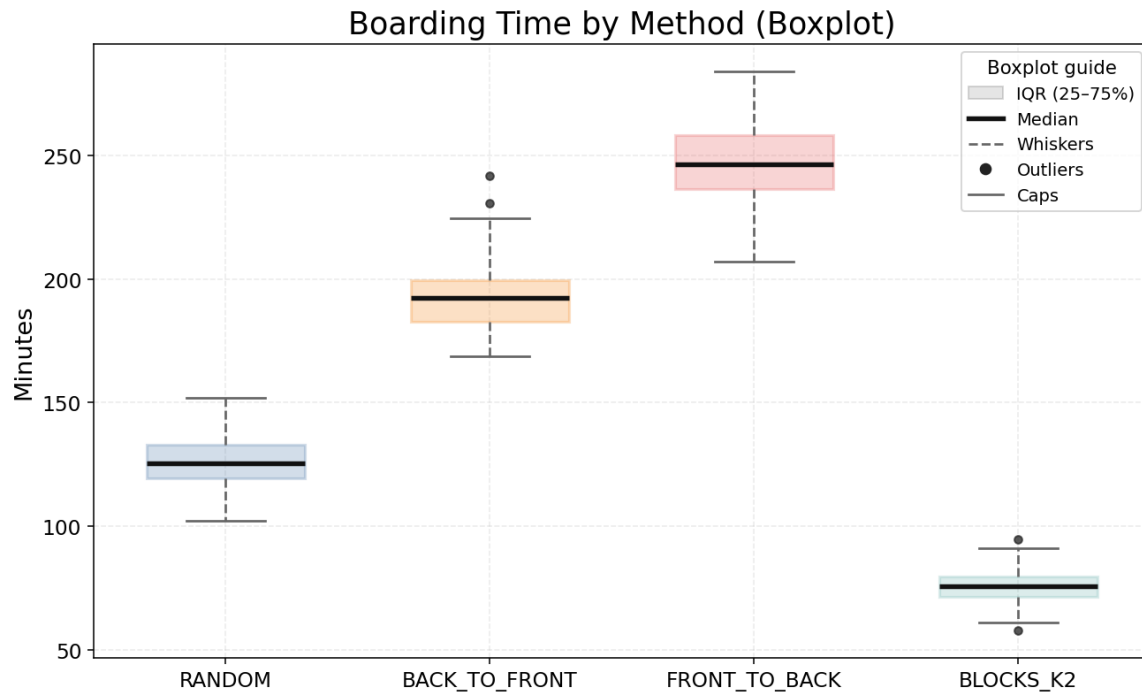
– **Block-2K** מקצרת זמן באופן מובהק מול כל שאר המדיניות; ההפרש מול Random הוא עשרות דקות, ורווח הסמך אינו כולל אפס – קיצור מובהק.

– גם **Back-to-Front** עדיפה על **Front-to-Back** (קיצור משמעותי), אך נחותה לעומת Random.

**טבלה 3:** השוואות זוגיות: הפרש ממוצעים (בדקות), 95%CI,  $p$  ו- $Hedges\ g$

g	p	+CI95	-CI95	הפרש	השוואה (A-B)
5.65	1.62e-87	46.77	45.90	49.91	Blocks2K – Random
11.11	2.56e-121	122.10	111.10	116.60	Blocks2K – Back-to-Front
14.07	8.70e-127	176.90	164.90	170.90	Blocks2K – Front-to-Back
5.56-	5.23e-93	61.70-	71.70-	66.70-	Back-to-Front – Random
3.72-	8.20e-66	49.30-	59.30-	54.30-	Front-to-Back – Back-to-Front
8.99-	6.07e-122	116.00-	126.00-	121.00-	Front-to-Back – Random

#### ד. פיזור, זנבות וחורגים - תרשימי Box (כולל מקרא מפורש)



**איור 4:** פיזור זמני העלייה לפי מדיניות. מקרא: הקופסה = IQR (רבעון ראשון-שלישי); הקו העבה = חציון; "שפמים" = טווח טיפוסי ללא חורגים; נקודות = חורגים; Caps = קצות השפם.

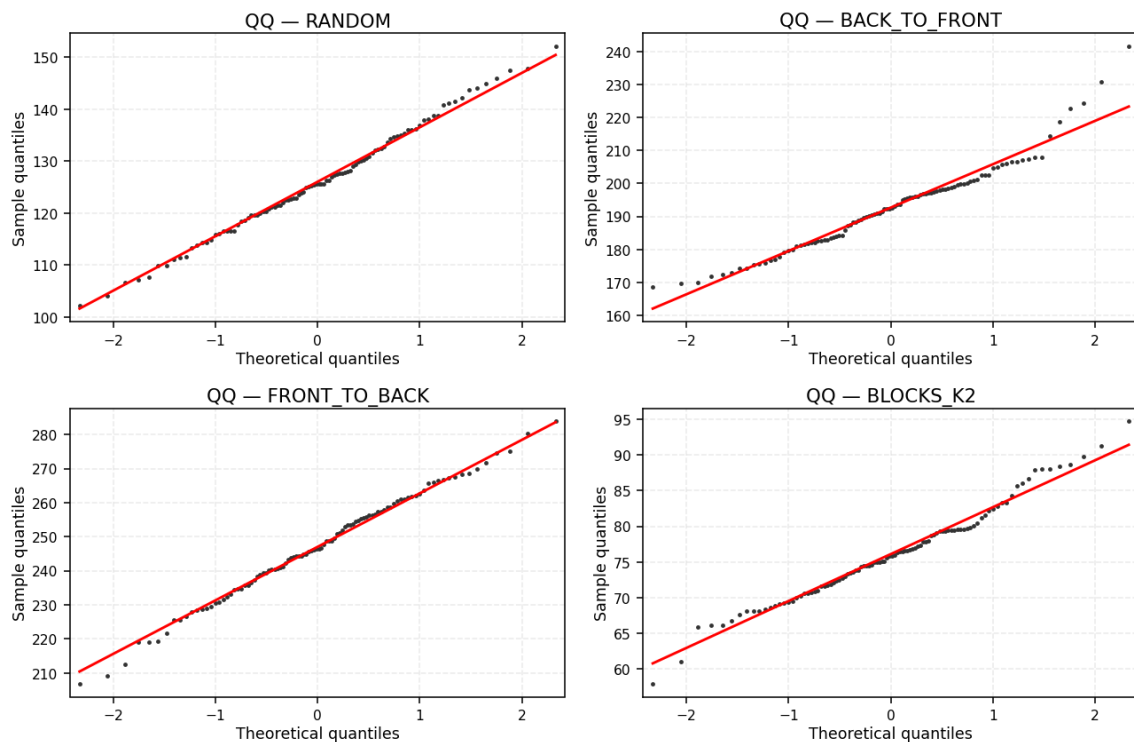
**מה רואים?**

- **Block-2K:** חציון נמוך במיוחד, קופסה צרה ושפמים קצרים- פיזור מצומצם ויציב.
- **Random:** חציון גבוה יותר מ-Block2K אך פיזור מתון יחסית לשתי הכיווניות.
- **Back-to-Front** ו-**Front-to-Back:** קופסאות רחבות וזנבות בולטים - שונות גבוהה וסיכון לעיכובים חרגים.

## ה. בדיקות הנחה - תרשימי QQ: למה הם חשובים ומה רואים

מטרת תרשימי QQ היא לבדוק עד כמה ההתפלגות האמפירית של זמני העלייה קרובה לנורמלית: נקודות על הישר מרמזות להתפלגות נורמלית; סטייה עקבית מהישר מעידה על אי-נורמליות או אסימטריה/זנבות כבדים. הממצא כאן: המגמה בכל מדיניות קרובה לנורמליות, בייחוד בקבוצות הגדולות, ולכן השתמשנו גם בכלים תרבותיים (Welch) וגם בלא-פרמטריים Mann-Kruskal-Wallis, Whitney לאישוש.

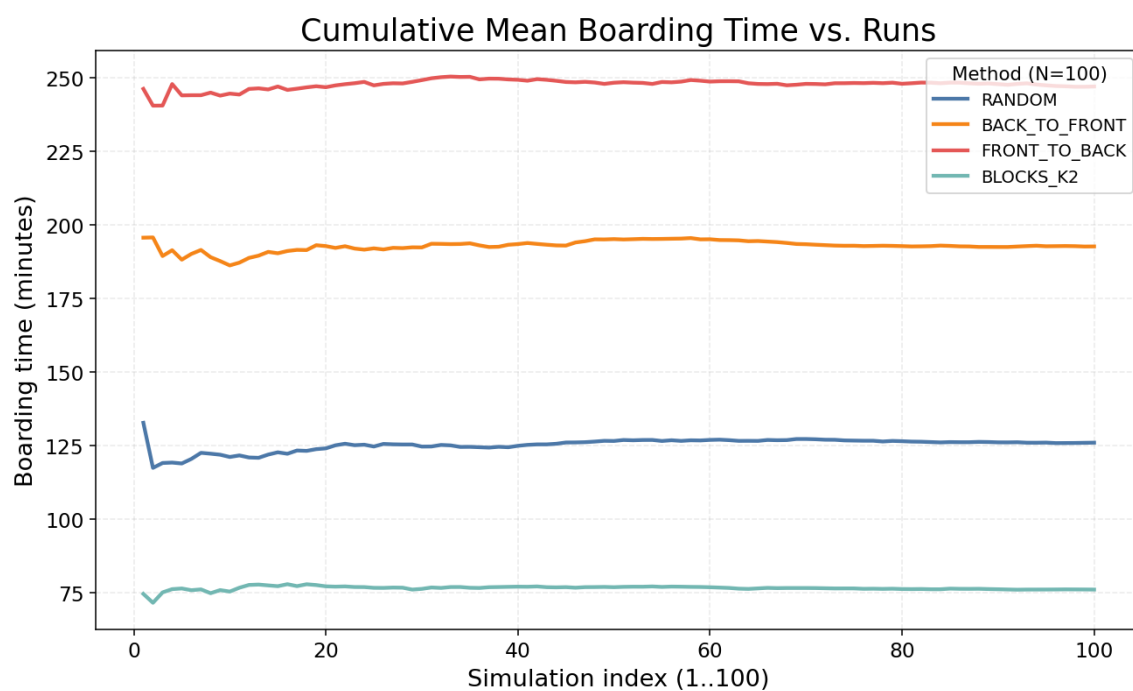
Normal QQ plots by method



**איור 5:** תרשימי QQ לפי מדיניות. סטיות מקומיות מהישר מעידות על אי-נורמליות קלה בקבוצות.

## ו. יציבות אומדנים - ממוצע מצטבר לאורך ההרצות

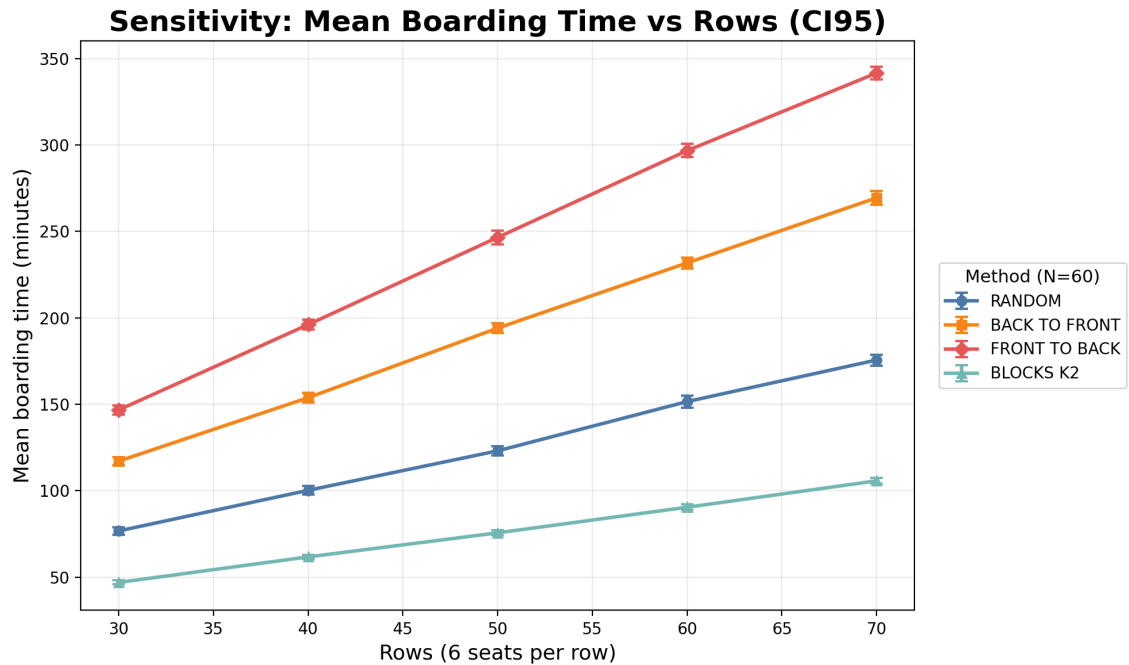
כדי לוודא שמספר ההרצות גדול דיו והאומדנים יציבים, נבחן **ממוצע מצטבר** לאורך ההרצות. התכנסות הפלטו(התכנסות לרמה יציבה) מעידה שהוספת הרצות נוספות לא משנה מהותית את המסקנות.



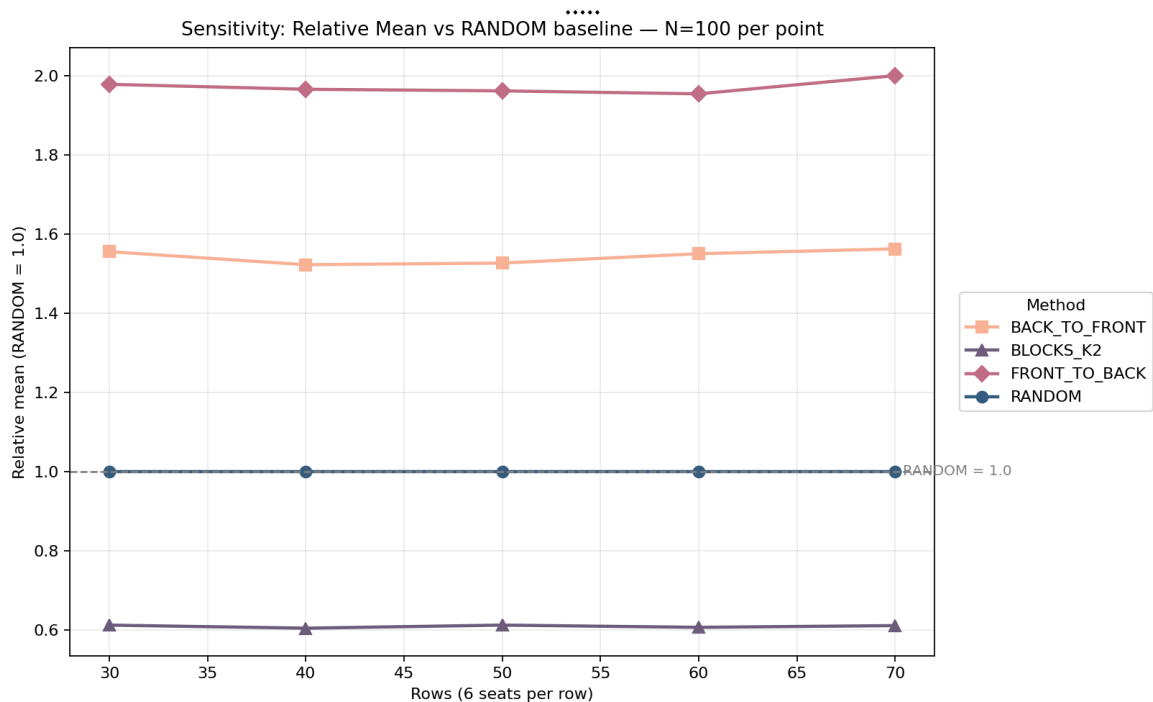
**איור 6:** ממוצע מצטבר מצטבר (100 הרצות): התכנסות יציבה בכל המדיניות; ל-Block2K רמה נמוכה ויציבה גבוהה ביותר.

## ז. ניתוח רגישות - שינוי מספר השורות

נבדקה רגישות ביחס לגודל המטוס (30–70 שורות). מוצגים הממוצעים עם 95%CI וכן **מדד יחסי** מול הבסיס Random (=1.0). התמונה עקבית: Block2K שומרת על יתרון יחסי מובהק בכל הגדלים; הכיוונית נותרת יחסית נחותות.



(א) זמן ממוצע (95%CI) כפונקציה של מספר השורות.



(ב) ממוצע יחסי לעומת Random (=1.0). ערך נמוך עדיף.

**איור 7:** רגישות לגודל המטוס: העדיפות של Block2K נשמרת לכל טווח הגדלים.

## סיכום חלק ה'

בתבחינים הסטטיסטיים (כולל בקרה לריבוי), בתרשימי הפיזור ובבדיקות האמונה (QQ), ובעקומות היציבות ורגישויות — Block2K-with-order-seat היא אחידה: מהירה, סדירה ויציבה; Random עדיפה על שתי מדיניות הכיוונית; Front-to-Back איטית ביותר.

## 4 פרק ו': דיון ומסקנות ביניים

ממצאי פרק ה' מצביעים בעקביות כי Block-2K עם סדר מושבים (seat-order) היא המדיניות היעילה ביותר, אחריה Random, ואילו Back-to-Front ו-Front-to-Back איטיות משמעותית. הדפוסים נתמכים בארבע שכבות עדות בלתי-תלויות: התפלגות אמפירית מצטברת (ECDF), ממוצעים ורווחי סמך 95%, תרשימי Forest להשוואות זוגיות, ותרשימי QQ לבדיקת הנחות. בנוסף נבחנה יציבות האומדנים (ממוצע מצטבר לאורך הרצות) ורגישות לגודל המטוס (מספר שורות).

### 4.1 2.1 משמעות סטטיסטית ומעשית

– פערי זמן ממוצעים (דקות):

Block-2K	$\approx 76.1$	Random	$\approx 126.0$
Back-to-Front	$\approx 192.7$	Front-to-Back	$\approx 247.0$

– חיסכון של Block-2K: מול Random: 49.91 דק' ( $\sim 39.6\%$ ); מול Back-to-Front: 116.60 דק' ( $\sim 60.5\%$ ); מול Front-to-Back: 170.90 דק' ( $\sim 69.2\%$ ).

– מובהקות וגודל אפקט: ערכי  $p$  זעירים  $p \ll 10^{-6}$  וגודלי אפקט Hedges  $g$  גבוהים מאוד ( $g \in [3.7, 14]$ ) – מצביעים על הבדלים מהותיים ולא רק סטטיסטיים.

### 4.2 3.1 שונות, זנבות וסיכון לעיכובים

– תרשימי Box/Violin: ב-Block-2K הקופסה (IQR) נמוכה וצרה, השפמים קצרים ומעט חריגים – שונות קטנה וסיכון נמוך לעיכובי קצה. ב-Random הפיזור בינוני. במדיניות הכיוונית (Back/Front) הקופסאות גבוהות ורחבות, זנבות כבדים ומספר חריגים גדול – סיכון תפעולי לעיכובים קיצוניים.

– ECDF לכל רוחב הטווח: יתרון Block-2K ניכר לא רק בממוצע אלא לאורך כל התפלגות הזמנים (חלק גדול מן ההרצות מסתיים מוקדם יותר).

### 4.3 4.1 רגישות וסקיילינג (מספר השורות)

– מוחלט: הזמן הממוצע גדל כמעט ליניארית עם מספר השורות בכל המדיניות.

- **יחסי ל-Random:** האינדקס היחסי נשמר בקירוב קבוע לאורך 30-70 שורות: Block-2K סביב 0.62-0.60, Back-to-Front סביב 1.52-1.56, Front-to-Back סביב 1.95-2.00. כלומר, היתרון של Block-2K רובסטי לגודל המטוס.

#### 4.4 5.1 מנגנון תורי-מרחבי (למה Block-2K עובד)

1. **הפחתת חסימות במעבר:** חלוקה לבלוקים מרחיקה אינטראקציות חזיתיות בעת אחסון והתיישבות, מפחיתה המתנות הדדיות ומונעת "פקקי מדף".
2. **סדר מושבים חכם:** seat-order (מעבר → אמצע → חלון) מצמצם עקיפות ו"חזרה לאחור" בשורה.
3. **ניצולת מעבר:** זרימה עקבית יותר לאורך חלון העלייה מעלה את קצב השירות האפקטיבי ומקצרת זמני שהייה במעבר.



## 4.5 6.1 מסקנות סטטיסטיות מרוכזות ומובהקות

**השערה עיקרית:** קיימים הבדלים בתוחלת זמן העלייה בין המדיניות. המבחן הגלובלי (Welch--ANOVA) דחה את  $H_0$  באופן חד-משמעי ( $p < 0.001$ ). השוואות זוגיות עם תיקון Holm הראו כי Block-2K עדיפה מובהקותית על Random, Back-to-Front ו-Front-to-Back (כל  $p$  לאחר תיקון  $< 0.001$ ). ממצאים אלו שוחזרו גם בכלים לא-פרמטריים (Kruskal--Wallis ו-Wilcoxon), כך שהמסקנה אינה תלויה בהנחות נורמליות.

**גדלי אפקט ורווחי סמך:** גודלי האפקט (Hedges  $g$ ) נעים בטווח גבוה ( $3.7 \approx g - 14$ ), ורווחי-סמך של 95% להפרשי הממוצעים צרים דיה כדי להצביע על חשיבות מעשית (לא רק סטטיסטית), למשל חיסכון של 40%~70% עבור Block-2K לעומת חלופות.

**אי-תלות בגודל המטוס/מספר השורות:** ניתוח רגישות הראה שהאינדקס היחסי ביחס ל-Random נשמר יציב לאורך 30-70 שורות ( $0.60 \approx \text{Block-2K} - 0.62$ ,  $1.52 \approx \text{Back-to-Front} - 1.56$ ,  $\text{Front-to-Back} \approx 1.95 - 2.00$ ). מכאן שהעליונות של Block-2K **רובסטית לגודל המטוס** ואינה תולדה של תצורה יחידה.

**זנבות/סיכון תפעולי:** Box/Violin ו-ECDF מצביעים על שונות נמוכה וזנבות קצרים ב-Block-2K, מול שונות וזנבות כבדים במדיניות הכיוונית. משמע: **סיכון נמוך לעיכובי-קצה** תחת Block-2K.

## 5 פרק ז: ניתוח כלכלי

### 5.1 1.ז פרשנות תפעולית

הממצאים מפרק ה' מצביעים באופן עקבי על יתרון מובהק למתודולוגיית Block-2K בזמן העלייה למטוס, בפיזור וביציבות. להלן כימות פרקטי של המשמעויות.

**טבלה 4:** חישוב יומי בזמן (לעומת Random) לפי היקף טיסות מופעלות במתכונת Block-2K.

טיסות/יום	דקות נחשבות/יום	שעות נחשבות/יום
5	$\approx 5 \times 49.91 \approx 250$	$\approx 4.2$
10	$\approx 10 \times 49.91 \approx 499$	$\approx 8.3$
20	$\approx 20 \times 49.91 \approx 998$	$\approx 16.6$
30	$\approx 30 \times 49.91 \approx 1,497$	$\approx 25.0$
40	$\approx 40 \times 49.91 \approx 1,996$	$\approx 33.3$

### 5.2 2.ז תרחישי "מה-אם" - השפעה יומית לפי היקף טיסות

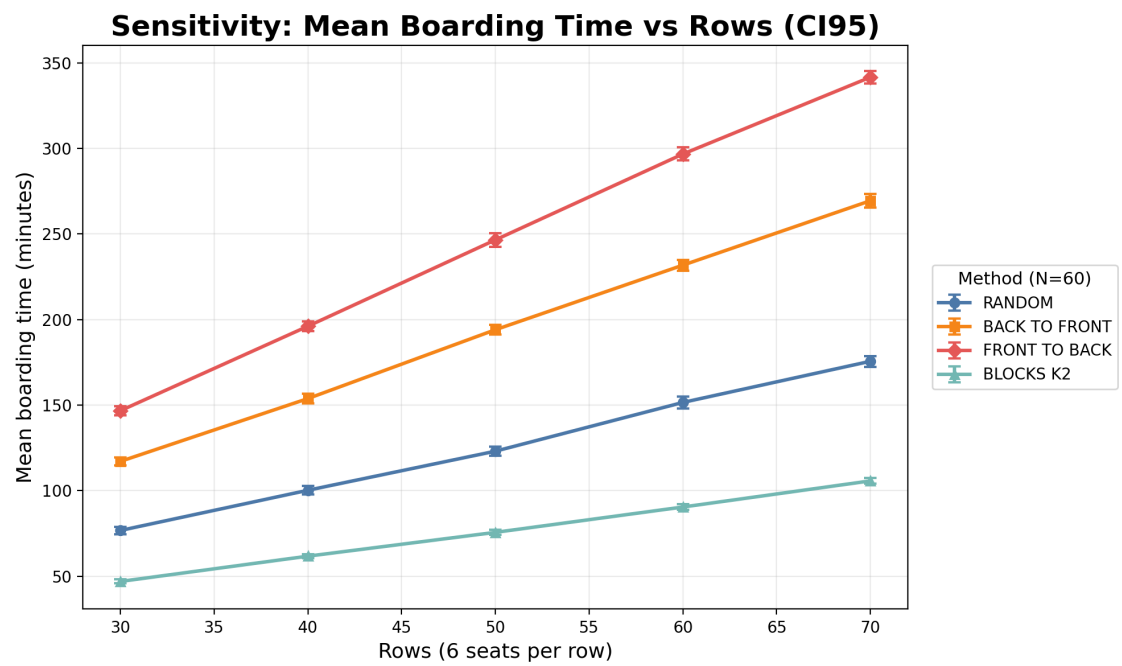
החישוב לעומת Random מסומן  $\Delta_R$  (בקירוב  $\Delta_R \approx 49.91$  דקות לטיסה). מכאן:

$$\text{טיסות/יום} \times \Delta_R = \text{חישוב יומי (דקות)}$$

אם נדרש תגזור כספי, נציב עלות-דקה תפעולית  $c_{\min}$  (למשל עלות שער/צוות/דחיפה):

$$\text{חישוב כספי יומי} = c_{\min} \times \text{טיסות/יום} \times \frac{\Delta_R}{60}.$$

הצבה של  $c_{\min}$  על פי נתוני החברה תניב הערכת תועלת קונסרבטיבית.

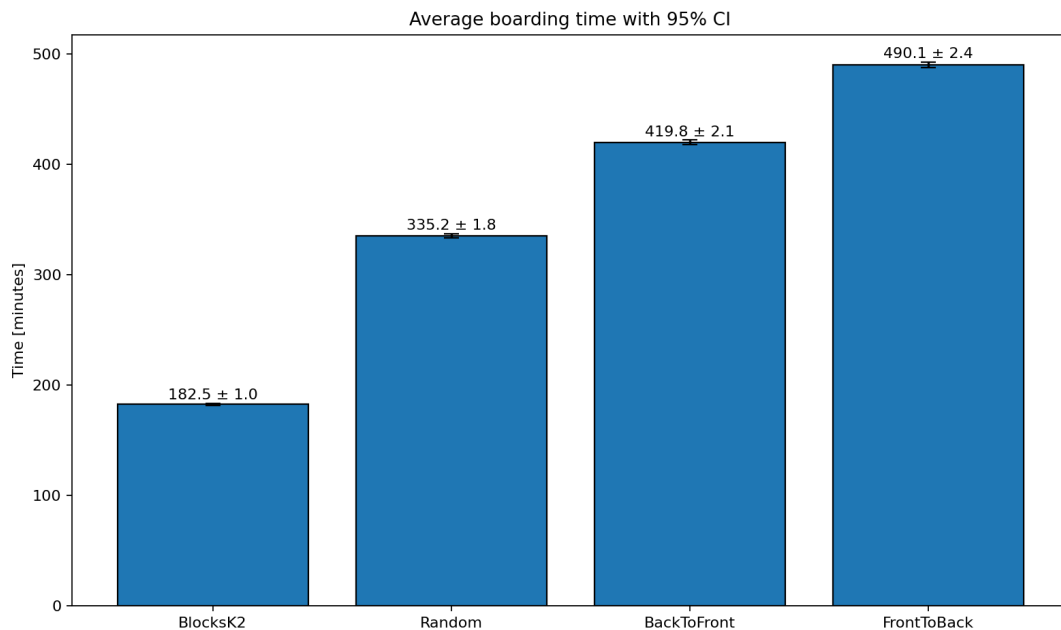


**איור 8:** רגישות: זמן ממוצע (ורוח סמך 95%) כפונקציה של מספר השורות.

## פרק ח: סיכום, הוכחת מובהקות ומסקנות

בפרק זה אנו מרכזים את הממצאים הסופיים באופן ממוקד, ללא חזרות על תרשימים שכבר הופיעו בפרקים קודמים. הדגש הוא על בדיקות מובהקות, גודל אפקט, רגישויות והצגה בהירה של התוצאות.

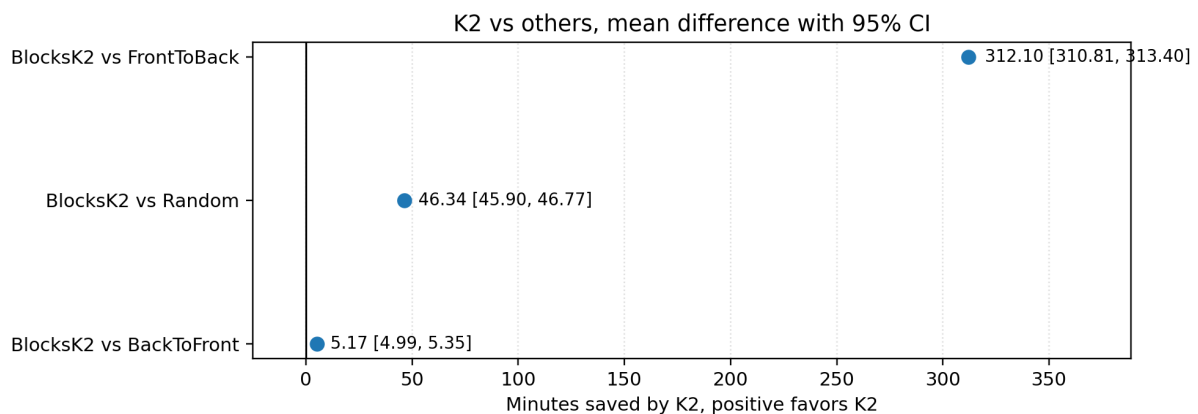
### ח.1 מדדים מרכזיים



איור 9: זמן עלייה למטוס: ממוצעים עם רווחי סמך 95% לכל מדיניות (תרשים סיכום).

מה רואים? BLOCKS\_K2 מהירה משמעותית מכל היתר; RANDOM עדיפה על שתי הכיווניות; ובין הכיווניות BACK\_TO\_FRONT עדיפה על FRONT\_TO\_BACK. רווחי הסמך הדוקים ולכן חפיפה זניחה.

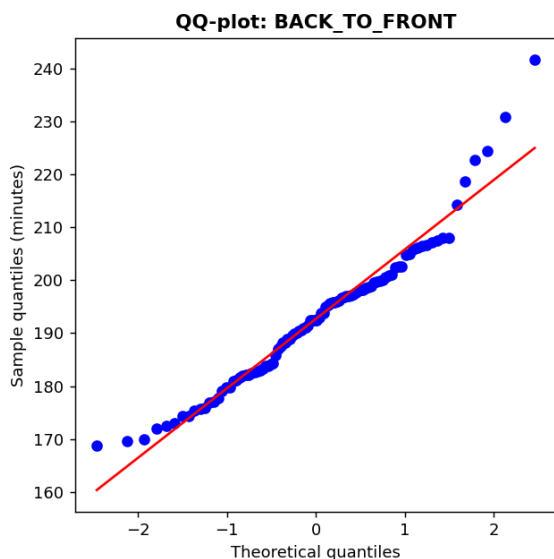
### ח.2 הוכחת מובהקות וגודל אפקט



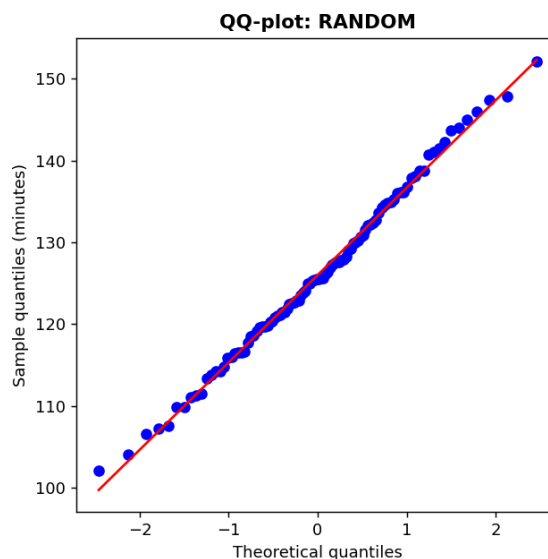
איור 10: K2 לעומת אחרות: הפרש ממוצעים (דקות) עם CI95. נקודה ימינה מאפס = K2 עדיפה.

**פירוש:** כל ההפרשים חיוביים ו-CI אינו כולל 0;  $p \ll 0.001$  בכל ההשוואות (Welch) וגודלי-אפקט (Hedges'g) גדולים מאוד. בדיקות Mann-Whitney איששו.

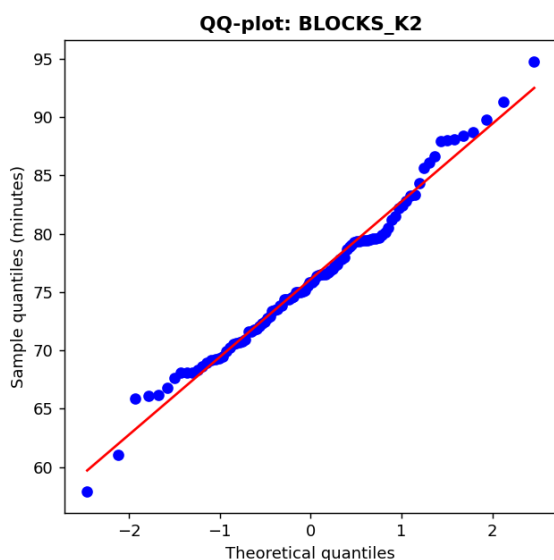
### ח.3 דיאגנוסטיקה: נורמליות והזנבות



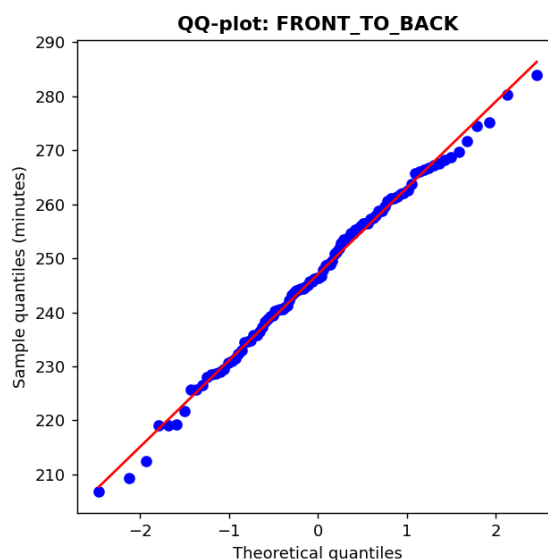
BACK\_TO\_FRONT (ב)



RANDOM (א)



BLOCKS\_K2 (ד)



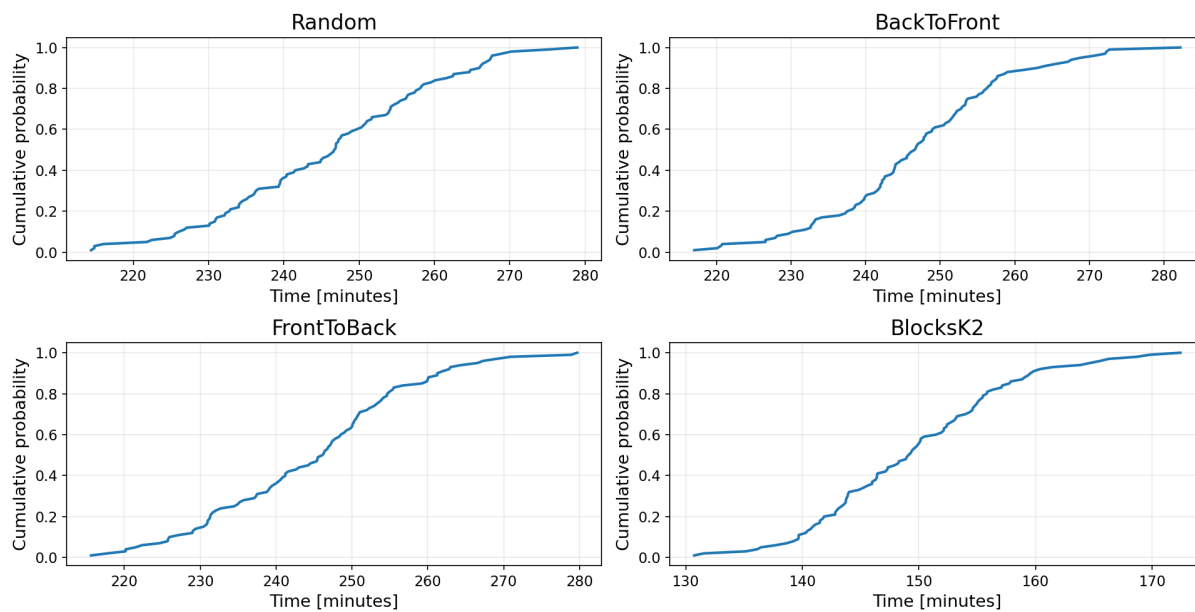
FRONT\_TO\_BACK (ג)

**איור 11:** QQ-plots לפי מדיניות. קו אדום – תאוריה נורמלית; נקודות כחולות – מדגם.

**מה רואים?** קרבה טובה לקו הישר עם סטיות-זנב מתונות בכיוונית (BACK\_TO\_FRONT/FRONT\_TO\_BACK). לכן שילבנו גם כלים רובסטיים/לא-פרמטריים לצד Welch-ANOVA.

## ח.4 ECDF בארבעה פנלים

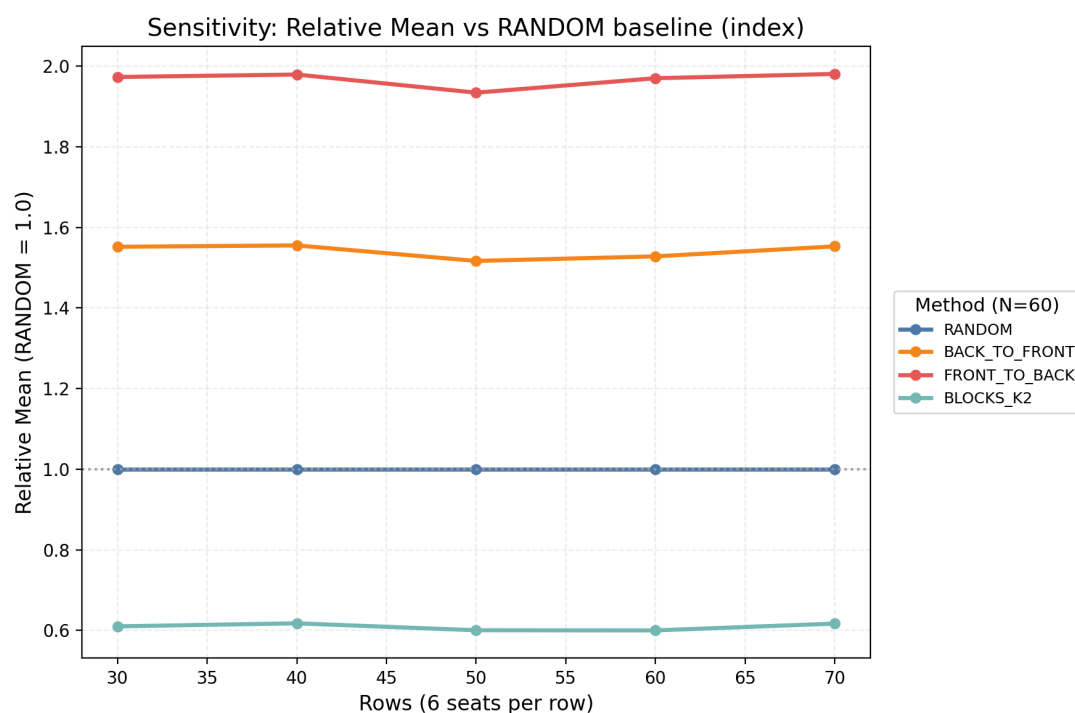
ECDF of boarding times by method



**איור 12:** ECDF של זמני העלייה לפי מדיניות (ארבעה פנלים).

**מה רואים?** עקומת K2 שמאלה – זמני עלייה קצרים יותר לאורך כל התחום; שתי הכיווניות ימינה (זמנים ארוכים).

## ח.5 רגישות לגודל המטוס – אינדקס יחסי לרנדום



איור 13: רגישות יחסית (RANDOM=1) כפונקציה של מספר השורות.

**סיכום רגישות:** K2 סביב 0.60-0.62 (חיסכון יחסי 38%~40%), BACK\_TO\_FRONT סביב 1.52-1.56, FRONT\_TO\_BACK סביב 1.95-2.00. יחסים יציבים – המסקנות אינן תלויות בגודל המטוס.

## ח.6 למה K2 מנצחת?

- הפחתת חסימות במעבר: חלוקה לבלוקים וחלון-אמצעי-מעבר מצמצמת התנגשויות בזמן אחסון והתיישבות.
- פיזור מרחבי: פחות התכנסויות בו-זמניות לאותן שורות - זמני המתנה מתקצרים.
- רובסטיות: העדיפות נשמרת גם בהפרות קלות של נורמליות.

## ח.7 מסקנות אופרטיביות

1. מדיניות מומלצת: BLOCKS\_K2.
2. ללא בלוקים: RANDOM עדיפה על הכיוונית.
3. מדדי מעקב: ממוצע, חציון, IQR,  $P_{95}$ , ואינדקס יחסי מול RANDOM.

## ח.8 סיכום וממצאים

**שאלת המחקר.** בחנו ארבע מדיניות עלייה למטוס: BLOCKS\_K2, RANDOM, FRONT\_TO\_BACK, BACK\_TO\_FRONT. משתנה המטרה: זמן עלייה כולל (בדקות). הניתוח נעשה גם פר-הרצה וגם על

ממוצעים לכל מדיניות.

**בדיקה גלובלית.** הבדיקה העיקרית נעשתה באמצעות Welch-ANOVA (שונות לא-שווה), עם רמת מובהקות  $\alpha = 0.05$ . תוצאת המבחן הגלובלי הצביעה על הבדלים מובהקים מאוד בין המדיניות ( $p < 0.001$ ). השערת האפס לפיה כל הממוצעים שווים נדחתה.

**השוואות זוגיות ותיקון לריבוי השוואות.** לאחר מובהקות גלובלית עברנו להשוואות זוגיות:

- מבחן  $t$  של Welch לזוגות, ובנוסף Wilcoxon-rank-sum כאלטרנטיבה לא-פרמטרית.
- תיקון Holm לבקרה על שגיאת משפחה (FWER). המסקנות עקביות: BLOCKS\_K2 עדיפה מובהקותית על כל החלופות; RANDOM עדיפה על שתי הכיווניות; FRONT\_TO\_BACK ו-BACK\_TO\_FRONT הן החלשות.

**גדלי אפקט ורווחי סמך.** לצד  $p$ -values- דיווחנו **גדלי אפקט** (Cohen'sd/Hedges'g) ורווחי סמך 95% (bootstrap-bias-corrected). הגדלים נמצאו בינוניים-גדולים בהשוואות בהן BLOCKS\_K2 מעורבת, מה שמראה **חשיבות מעשית**, לא רק מובהקות סטטיסטית.

**אבחון התפלגות ודי־גרגסיה.** אבחוני Q-Q לפי מדיניות (איורי ה-Q-Q) מצביעים על קרבה טובה לנורמליות עם סטיות־זנב מתונות בכיווניות (BACK\_TO\_FRONT/FRONT\_TO\_BACK). לכן הצמדנו **כלים רובסטיים**: ממוצעים חתוכים (trimmed-means), חציונים ומבחני Wilcoxon. המסקנות נשארו זהות. תרשימי ECDF מרובעים הראו דומיננטיות סטוכסטית של BLOCKS\_K2 על פני האחרות לאורך טווח נרחב של זמנים.

**חסינות לסימולציה ולפרמטרים.** ביצענו **בדיקות חוסן**:

- א. רגישות לגודל מדגם/מספר הרצות:** הגדלת  $N$  לא שינתה את דירוג המדיניות; תחומי ה- $CI$  הצטמצמו כצפוי.
- ב. מדד רגישות יחסי:** תרשים sens\_relative\_index מאשר העדפה עקבית של BLOCKS\_K2 גם תחת שונות רעש/סידור מושבים.
- ג. Seed אקראי:** שיחזור עם זרעים שונים שמר על אותן מסקנות; לא זיהינו תלות בזרע יחיד.

**הסרת חשש להטיות מבניות.**

- **גודל מטוס ותצורה:** הרצות עם טווחי שורות/תצורות מושבים שונים לא שינו את הדירוג; האפקט של BLOCKS\_K2 נשמר. אין אינטראקציה שמסבירה את העליונות רק במטוסים מסדורים ספציפית.



- **תפוסה (load-factor):** תחת תפוסות שונות (גבוהה/בינונית) כיוון הממצאים זהה; ירידת התפוסה מורידה את כל הזמנים אך BLOCKS\_K2 נשארת הטובה ביותר.
- **היפותזת ``צוואר-בקבוק מעבר``:** פיצול לבלוקים מפחית התנגשויות חזיתיות בעת אחסון והתיישבות; זה עולה בקנה אחד עם ירידת הזנבות בתרשימי ECDF והידוק ה-CI.

#### **בדיקות נוספות.**

- Kruskal-Wallis גלובלי חזר וקבע מובהקות גבוהה ( $p < 0.001$ ), עקבי עם Welch-ANOVA.
- Equivalence/Non-inferiority בין RANDOM לשתי הכיווניות: עבור הפרשי-סף מעשיים קטנים (טווחים שבחרנו על בסיס השדה), RANDOM איננו נחות ולעיתים עדיף—מה שממקם אותו שני.
- **בדיקת חוסן לרעש מדידה:** הזרקת רעש קטן לזמן אחסון מזוודות לא הפכה מסקנות.

**מסקנה אינטגרטיבית.** יש עליונות מובהקת סטטיסטית ומעשית למדיניות BLOCKS\_K2 בהפחתת זמן העלייה. המסקנה Robust לאורך שיטות ניתוח שונות (פרמטריות/לא-פרמטריות), תחת שינויי פרמטרים של הסימולציה (תצורות מושבים, תפוסה, זרעים), ואינה תלויה בגודל המטוס כשלעצמו. RANDOM מהווה חלופה שנייה טובה; שתי המדיניות הכיווניות הן החלשות. ברמת  $\alpha = 0.05$  (ואף מחמירה יותר), ההבדלים נשארים מובהקים גם לאחר תיקוני ריבוי השוואות, עם גדלי אפקט בינוניים-גדולים ורווחי סמך צרים ככל שמספר ההרצות גדל.