



# מאפיינים של גודש שגרתית בנתיבי איילון\*

ד"ר הלל בר-גרא\*\* ושי גרביני\*\*\*

תרשים 2 מקביל לתרשים 1, אלא שהוא מציג את הנתונים של מהירות ממוצעת עבור כל הנתיבים בתחנת גלאים במשך חמש דקות. כאן ניתן להבחין בבירור בירידת מהירות קלה יחסית בשעות הבוקר בחלקו הצפוני של הכביש (בין גלילות לשלום), ובירידת מהירות משמעותית הרבה יותר בשעות אחרי הצהריים, המתחילה בקצהו הדרומי של הכביש, מתארכת עד מחלף רוקח, ולאחר מכן מתקצרת ולבסוף נעלמת. ירידת מהירות זו נובעת מהיווצרות תור המגיע לאורך מרבי של כ-5 ק"מ בשעה 16:30.

במהלך העבודה נבחנו ונותחו תרשימים דומים עבור ימים רבים. ככלל המגמות המופיעות בתרשימים 1 ו-2 כפי שתוארו לעיל חוזרות על עצמן ברוב ימי החול. יחד עם זאת, קיימים שינויים לא מבוטלים בהיקפן של המגמות שתוארו לעיל. כמו כן, לא פעם ניתן להבחין בתרשימים אלה בחריגות משמעותיות הנובעות ברוב המקרים מתאונות ומאירועים אחרים בכביש. ההתייחסות במאמר זה היא לנתונים מימי חול בלבד, ללא חגים ואירועים מיוחדים. המשך המאמר מתמקד בגודש המשמעותי יותר בכביש זה, המתרחש כמעט בכל יום חול בשעות אחרי הצהריים בכיוון דרום.

## מצב הגודש

בספרות (Hall, 1992) מקובל לחלק את מצבי התנועה לשתי קטגוריות עיקריות, מצב גודש (congested) ומצב ללא גודש (uncongested). אחד המדדים העיקריים להבחנה בין מצבי התנועה השונים הוא מהירות הנסיעה (פולוס, 2001). הנתונים בתרשים 2 מראים כי הבחנה בין מצב גודש לבין מצב ללא גודש על פי מהירות הנסיעה עשויה לסייע רבות בניתוח התופעה העומדת בפנינו. מסקנה זו מתחזקת כאשר בוחנים את נתוני המהירות בתחנה בודדת לאורך שעות היום כדוגמת אלה המוצגים בתרשים 3. ברוב התרשימים מסוג זה ניתן להפריד בקלות בין שני המצבים, כאשר המעבר ביניהם כמעט מיידי. לאחר בחינה של כמאה תרשימים מימים שונים ומתחנות שונות, החלטנו לשייך מהירויות של 70 קמ"ש ומעלה למצב ללא גודש, ומהירויות של 50 קמ"ש ומטה למצב גודש. מהירויות הביניים סווגו למצבים באופן שיטתי על פי קריטריון מוגדר המתבסס על קירבתן למהירויות במדידות הסמוכות. קריטריון זה מסתמך בין היתר על ההנחה בדבר מעבר פאזה (phase transition) בערכי המהירות בין שני מצבי התנועה (Kemer, 1997). לאחר סיווג דגימות התנועה למצבים, ניתן לקבוע את זמני תחילת וסיום מצב הגודש בכל תחנה ובכל יום.

תרשים 4 מציג את ההסתברות להתרחשות גודש (המיוצגת על ידי הגוונים המופיעים בסקלה מימין) על פי השעה ביום (הציר האופקי) והמקום לאורך הכביש (הציר האנכי). תרשים זה מבוסס על 108 ימי חול בחדשים נובמבר 2001-מרץ 2002. לדוגמה, באזור לה-גרדיה בשעה 15:00, ההסתברות להתרחשות גודש על פי נתונים אלו היא

תופעת הגודש השגרתית (recurring congestion) מוכרת ממקומות רבים בארץ ובעולם. מערכת בקרת התנועה של נתיבי איילון אוספת נתונים רבים באיכות גבוהה המאפשרים לנתח את תופעת הגודש השגרתית בצורה מעמיקה. העבודה המתוארת במאמר זה התמקדה בגודש השגרתית בנתיבי איילון בכיוון דרום, המתרחש מדי יום בשעות אחרי הצהריים. על פי הנתונים מצבי התנועה מתחלקים לשניים, מצב גודש (תור) ומצב ללא גודש, הנבדלים באופן מובהק בעיקר במהירות הנסיעה המאפיינת אותם. הניתוח הסטטיסטי מציג את ההסתברות לגודש כתלות במקום ובזמן, וכן את השונויות והשינויים באורך התור המקסימלי בשנים 2000 ו-2002.

## נתוני מערכת בקרת התנועה של נתיבי איילון

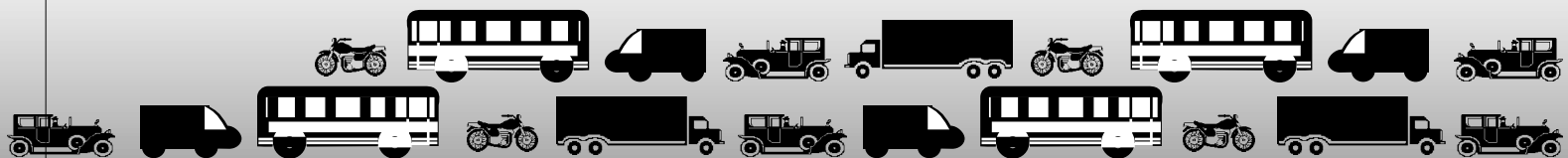
מערכת בקרת התנועה של נתיבי איילון מבוססת בעיקרה על תחנות גלאים אחת לכ-500 מטר לאורך כל נתיבי איילון. כל תחנה כוללת גלאי לולאה מגנטיים כפולים בכל אחד מנתיבי התנועה. גלאים אלה סופרים את כלי הרכב העוברים, וכן מודדים את מהירותם באופן ישיר. אחת לחמש דקות שומרת המערכת את מספר כלי-הרכב שעבר בכל גלאי ובכל תחנה, וכן את מהירותם הממוצעת. תרשים 1 מציג את הנתונים של נפח התנועה לאורך איילון דרום בתאריך 31.12.2001. הציר האופקי בתרשים מייצג את השעה ביום, והציר האנכי את אבן הדרך (ק"מ) לאורך הכביש. בכיוון הנסיעה דרומה יורדים מספרי אבן הדרך מ-26 בשעת הכוכבים, דרך 22.9 בגלילות, 13.7 בקיבוץ גלויות, וכלה ב-12.8 ביציאה מנתיבי איילון לכביש מספר 1. ספירת כלי-הרכב במשך חמש דקות תורגמה לנפח תנועה במונחים של כלי-רכב לשעה, עבור סך התנועה בכל הנתיבים. (בניתוח נתונים אלה יש לזכור שמספר הנתיבים אינו קבוע לאורך הכביש).

נתוני נפח התנועה המוצגים בתרשים 1 אינם מראים שינויים ניכרים לאורך רוב שעות היממה מ-6:00 ועד 22:00. כאשר בוחנים את השינויים לאורך הכביש ניתן להבחין במספר הבדלים, אך ברוב המקרים מדובר בהבדלים קלים למעט השינוי המשמעותי בנפח התנועה בין הקטע שמצפון לגלילות לקטע שמדרום לו.

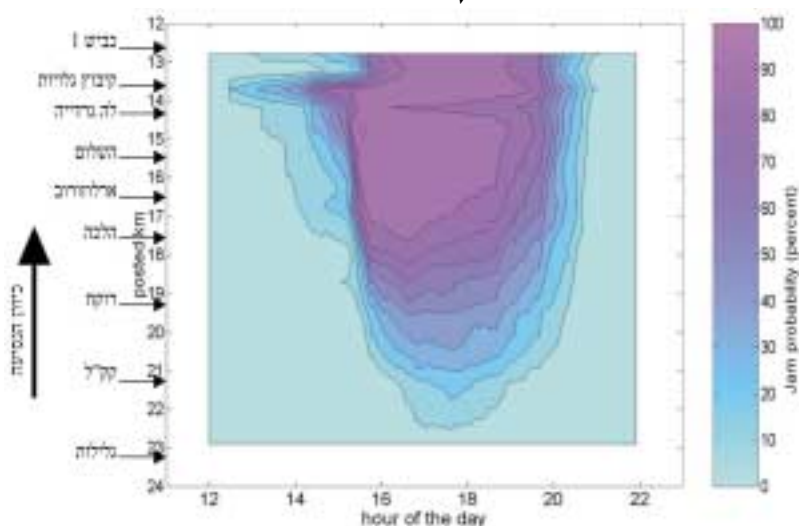
\* הנתונים לעבודה זו סופקו ע"י חב' נתיבי איילון בעזרתם האדיבה של צוות בקרת התנועה, יובל בלום, לב קרסילשיקוב וודון קוליץ. הכותבים מודים לפרופ' עדנה שכתמן על עזרתה בניתוח הסטטיסטי. עבודה זו מומנה בחלקה ע"י חב' אסטימושן בע"מ. ניתוח הנתונים והצגת המסקנות הם באחריותם הבלעדית של הכותבים.

\*\* ד"ר הלל בר-גרא, המחלקה להנדסת תעשייה וניהול, אוניברסיטת בן-גוריון. בעל תואר ראשון במתימטיקה, פיזיקה ומחשבים, תואר שני במתימטיקה (אוני' עברית), דוקטורט בהנדסה אורחית עם התמחות בתחבורה (University of Illinois at Chicago).

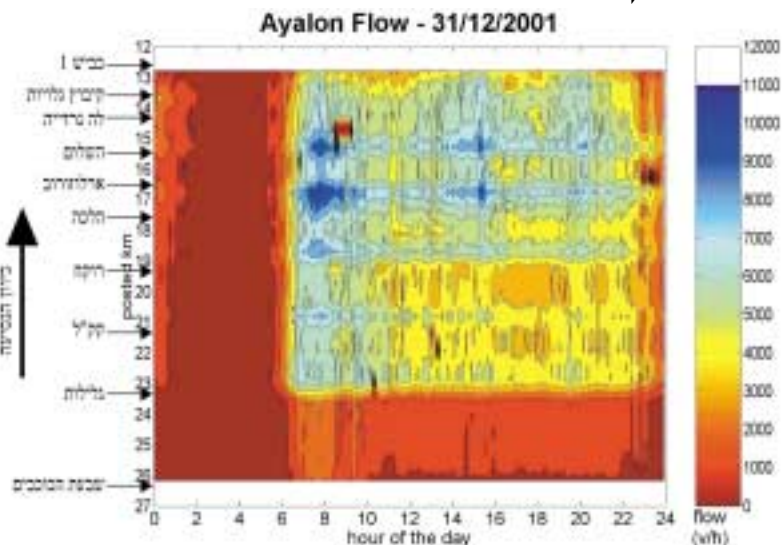
\*\*\* שי גרביני, המחלקה להנדסת תעשייה וניהול, אוניברסיטת בן-גוריון, סטודנט לתואר שני במסלול לתכנון ערים ואזורים, הטכניון.



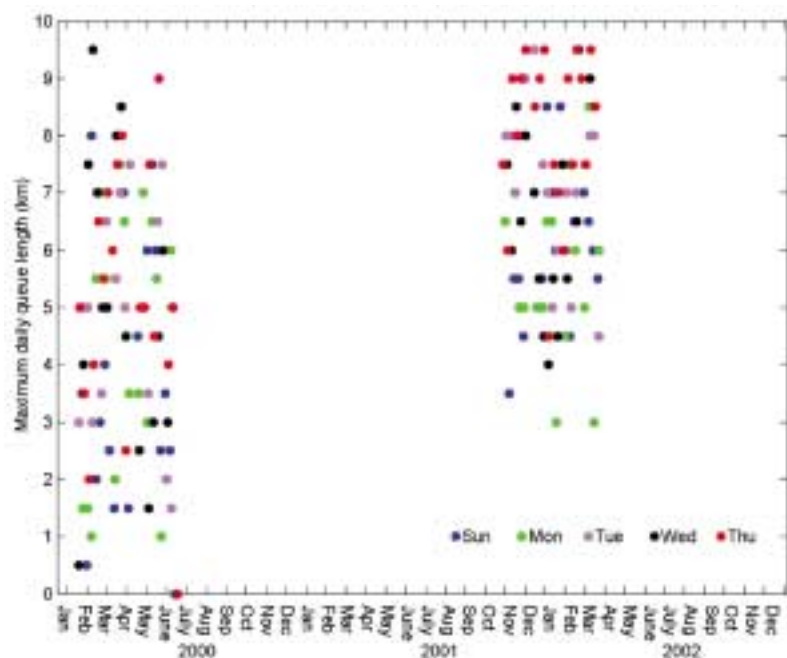
תרשים 4: הסתברות להמצאות במצב גודש כתלות בשעת היום ובמקום על-פי חודשים נובמבר 2001-מרץ 2002.



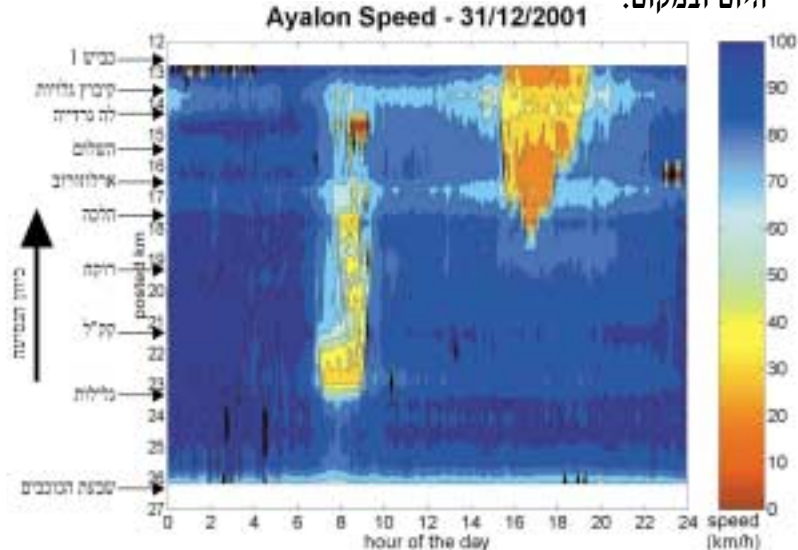
תרשים 1: נפח תנועה כולל (לכל הנתיבים) באיילון דרום כתלות בשעת היום ובמקום.



תרשים 5: אורכי תור יומיים מרביים (ק"מ) לאורך השנים 2000-2002.

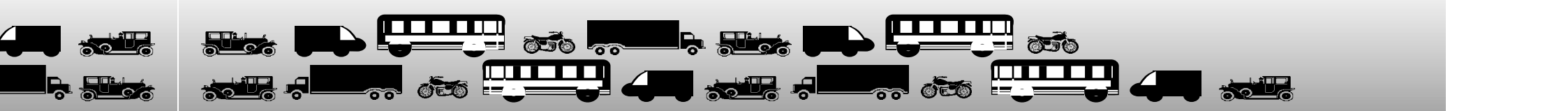


תרשים 2: מהירות ממוצעת (לכל הנתיבים) באיילון דרום כתלות בשעת היום ובמקום.



אם אכן כך הוא המצב, כלל לא ברור שפתרון הבעיה בקיבוץ גלויות יביא לשחרור הגודש בשעות השיא בכביש כולו. כפי שתואר לעיל, ההתנהגות הכללית של הגודש המתואר כאן דומה במאפייניה לתור, אשר מתחיל באזור קבוץ גלויות, ואולי אפילו בהמשך הכביש לכיוון מחלף גנות. אחד המדדים העיקריים לחומרה של גודש מסוג זה הוא אורך תור יומי מרבי, המוגדר כמרחק ממחלף קיבוץ גלויות לתחנה הצפונית ביותר בה נרשם גודש בכל יום. תוצאות אורך תור יומי מרבי עבור התקופות שנבדקו בעבודה זו (פברואר-יוני 2000, נובמבר 2001-מרץ 2002) מרוכזות בתרשים 5. כל נקודה בתרשים מייצגת אורך תור מרבי ביום חול אחד. (ימי שישי, שבתות, חגים וערבי חג אינם מוצגים כלל). ימי השבוע מיוצגים על ידי צבעים שונים. ההבחנה המרכזית מתרשים זה היא שקיימת שונות גבוהה מאד

רק כ-50%, בעוד שחצי שעה לאחר מכן ההסתברות עולה כמעט ל-100%. במחלף ארלוזורוב מתרחש תהליך דומה בין השעות 15:20 ל-15:50, כלומר כעשרים דקות מאוחר יותר. תרשים 4 מראה גם כי בטווח השעות 13:00-15:00 קיימת סבירות גבוהה להתרחשות גודש באזור מחלף קיבוץ גלויות, בעוד שבמעלה ובמורד הזרם מנקודה זו התנועה זורמת בחופשיות. נתונים אלה מחזקים את ההשערה המקובלת שקיימת בעיה הנדסית הגורמת לגודש תנועה שגרתי במחלף קיבוץ גלויות גם בשעות שאינן שעות השיא. אחת משאלות המפתח העומדות בפני המהנדסים היא האם פתרון הבעיה הנדסית במחלף קיבוץ גלויות יביא לשחרור הגודש בשעות השיא בכביש כולו. הגודש בשעות 15:00-16:00 נראה כהתארכות של תור המתחיל בקיבוץ גלויות. אלא שבין השעות 16:00-20:00 מתקיים מצב גודש גם במורד הזרם מנקודה זו. ייתכן וגודש זה הוא תוצאה של התארכות תור מכביש מס' 1 אל תוך נתיבי איילון, הנובע מסיבות שאינן תלויות במחלף קיבוץ גלויות.



טבלה 1: ממוצע רב-שבועי של אורך תור יומי מרבי (ק"מ) כתלות ביום בשבוע, בתקופות שונות.

ראשון	שני	שלישי	רביעי	חמישי
4.23	4.19	4.59	5.61	5.53
6.00	5.66	7.20	6.63	8.1

### מסקנות

בעיות של גודש שגרתי בכלל ותורים בפרט אופייניות לכבישים מהירים במקומות רבים בארץ ובעולם. נתונים איכותיים הנאספים על ידי מערכות בקרת תנועה מתקדמות מאפשרים לנתח תופעות אלו בצורה מעמיקה. עבודה זו מציעה הגדרה שיטתית למצב הגודש, המאפשרת אפיון כמותי וניתוח סטטיסטי מסודר של התופעה. באופן מיוחד התמקדה עבודה זו בניתוח אורך התור היומי המרבי. מצאנו שקיימת שונות גבוהה מאד במצב התנועה מיום ליום. שונות זו מעמידה בספק מסקנות המתקבלות מניתוח נתוני תנועה של "יום מייצג", ומחייבת איסוף נתונים לאורך מספר רב של ימים בכל עבודה בנושא זה. כמו כן, קיומה של שונות כה גבוהה מדגיש את החשיבות של מערכות מתקדמות שיספקו לנהגים מידע עדכני ומדויק לגבי מצב התנועה בכביש.

בנוסף מצאנו שבמהלך שלוש השנים האחרונות חלה הרעה משמעותית במצב התנועה המתבטאת בתוספת של כ-2 ק"מ לאורך התור היומי המרבי. כמו כן ניתן לראות מהניתוח הסטטיסטי שקיימים הבדלים בין ימי השבוע השונים, ובפרט שאורך התור המרבי בימי חמישי ארוך מזה של ימי ראשון. יחד עם זאת חשוב להדגיש שההבדל בין ימי השבוע מסביר רק חלק קטן מהשונות הכוללת באורכי התור.

### מראי מקום

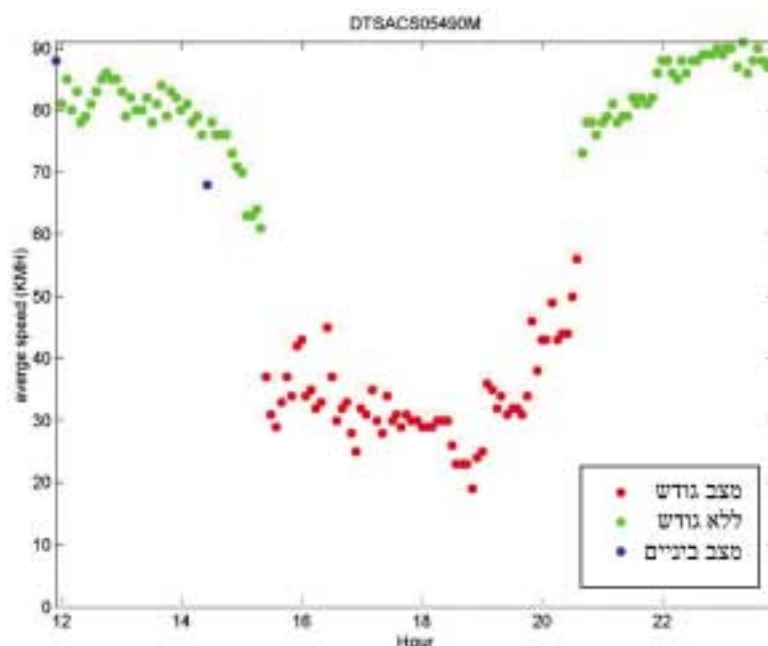
Hall, F. L. (1992). Traffic Stream Characteristics, In: Traffic Flow Theory, Ed. N. Gartner, Chapter 2, pp 1-24.

Kerner, B.S and H. Rehborn (1997), Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow. Physical Review Letters, Volume 79(20), pp. 4030-4033.

פולוס א. (2001), "מהו גודש ומדוע מתפוקת התנועה?", **תנועה ותחבורה** 64, 38-40.



תרשים 3: מהירות בתחנה 200 מטר דרומית לגשר לה-גרדיה כתלות בשעה, 2.11.2000. החלוקה למצבי התנועה נקבעת על-פי מהירות, בצירוף קריטריון קרבה למהירויות בזמנים סמוכים.



באורך התור המרבי. מכאן נובעות שתי מסקנות מרכזיות: האחת היא שבניתוח בעיות תנועה כגון זו יש צורך לבחון את התופעות לאורך מספר רב של ימים, ולא ניתן להסתפק ב"יום מייצג". המסקנה השנייה היא שעקב השונות הגבוהה היכולת של נהגים לצפות את תנאי הנסיעה בכביש על סמך ניסיון העבר מוגבלת ביותר, ולפיכך קיים צורך ממשי במערכות מידע לנהגים המבוססות על נתוני זמן אמת.

למרות השונות הגבוהה באורך התור המרבי בין יום אחד למשנהו, ניתן להבחין בתרשים 5 בהשפעה של מספר גורמים. ראשית, ניתן לראות שכלל התורים בתקופה נובמבר 2001-מרץ 2002 (ממוצע 6.77 ק"מ, סטיית תקן 1.61 ק"מ) ארוכים מהתורים בתקופה פברואר-יוני 2000 (ממוצע 4.47 ק"מ, סטיית תקן 2.41 ק"מ). הפרש זה מובהק סטטיסטית (ההסתברות לקבל תוצאה זו באופן מקרי, תחת הנחת  $H_0$  שלא קיים הבדל, היא  $p=1E-12$ ). לכאורה ייתכן שהבדל זה נובע בחלקו מהשפעות של עונתיות, שכן הנתונים מתייחסים לחודשים שונים במהלך השנה. הבדיקה הסטטיסטית מראה שההבדלים בין השבועות השונים בכל אחת מהתקופות בנפרד אינם מובהקים. אי לכך, סביר להניח שהשפעות העונתיות אינן משמעותיות במקרה זה. המסקנה הסבירה יותר היא שקיימת מגמה כללית של התארכות התורים הנובעת ככל הנראה מעלייה בנפחי התנועה לאורך השנים.

השפעה נוספת ניכרת ליום בשבוע. כפי שניתן לראות בטבלה 1 התורים לקראת סוף השבוע, ובעיקר בימי חמישי, ארוכים מהתורים בתחילת השבוע, ובעיקר בימי ראשון. בשתי התקופות שנבדקו התורים המרביים בימי חמישי ארוכים בערך בשליש מהתורים המרביים בימי ראשון. בתקופה נובמבר 2001-מרץ 2002 הבדלים אלה מובהקים סטטיסטית ( $p=7.2E-5$ ). בתקופה פברואר-יוני 2000 קיימת שונות גבוהה באופן משמעותי, שונות זו בשילוב עם העובדה שבערכים מוחלטים ההבדלים באורכי התורים קטנים יותר, גורמת לכך שהבדלים אלה אינם מובהקים סטטיסטית ( $p=0.31$ ).

