

הפחתה אקוסטית בתנועות בעברית בדיבור ספונטני

אסנת צוקר ונעם אמיר

1. מבוא

1.1 הפחתה אקוסטית בתנועות

1.1.1 רקע

כאשר תנועות נהגות יחד עם עיצורים כדיבור רציף, המאפיינים הספקטראליים של האות האקוסטי משתנים, כך שהמטרות האקוסטיות המאפיינות תנועות בבידור אינן מושגות. תופעה זו נקראת "החטאת המטרה" (Lindblom; target undershoot) (1963). תופעת החטאת המטרה נובעת מתהליכי הפקה, ועשויה להתבטא מבחינה אקוסטית גם ב'הפחתה בתנועה' (Harrington & Cassidy 1999; vowel reduction). הפחתות התנועה נחלקות לשני סוגים עיקריים: הפחתה לקסיקלית או פונולוגית, לעומת הפחתה אקוסטית או פונטית. הפחתה לקסיקלית מתרחשת כאשר תנועה בלתי מוטעמת ממומשת כתנועה המרכזית שווא (/ə/), ותנועת השווא הופכת לחלק מאפיין במילה נתונה. שינוי זה יתרחש בתנועות שאינן מוטעמות במילה (Fourakis 1991, Van Bergem 1995, Harrington & Cassidy 1999), ורק בשפות שהשווא בהן הוא חלק מהמערכת הפונולוגית של השפה (Van Bergem 1995). הפחתה אקוסטית היא נטייה של תדירויות הפורמנטים להחטיא את הערכים האידאליים של התנועה המבוקשת בדרך הגורמת לצמצום מרחב התנועות (Fourakis 1991). שלא כהפחתה הלקסיקלית, ההפחתה האקוסטית היא תופעת הפקה אוניברסלית, היכולה להתרחש בכל שפה (Van Bergem 1995). לפי הגישה הפונקציונלית, דוברים שואפים להעביר מסר בצורה אופטימלית ובמאמץ הפקתי מועט (Tobin 1997). הדובר מקיים למעשה שקלול-תמורות (trade-off) בין השאיפה לבהירות כדיבור לבין השאיפה להסכנות במאמץ. שקלול-תמורות זה מתרחש בעת שינויים בסגנון הדיבור: דיבור רהוט מופק במאמץ גדול יותר מאשר דיבור רגיל (Perkell *et al.* 2002). לפיכך אפשר להבין את תופעת ההפחתה האקוסטית באמצעות התאוריה של הפונולוגיה כהתנהגות האדם (טובין

הגורם כי שני גורמים מכתיבים את ההפקה הפונטית של האדם: הגורם התקשורתי והגורם האנושי. הגורם התקשורתי תורם ליצירת מספר רב של ניגודים תקשורתיים. לעומתו, הגורם האנושי שואף לחסוך במאמץ ההפקה. לפי תאוריה זו, אפשר לשער שתופעת ההפחתה האקוסטית בתנועות מונחית על ידי הגורם האנושי, והיא מבטאת את החתירה לחסכנות בהגייה, קרי זניחת השאיפה להגיע למנחים הנדרשים להפקת תנועות אידאליות לטובת תצורה ניטרלית יותר של מסלול הקול (Van Bergem 1995).

1.1.2 התהליכים המובילים להפחתה בתנועה

בספרות מוזכרים שני תהליכים המובילים להפחתה אקוסטית: מרכזו והידמות. מרכזו מתרחש כאשר התנועה זזה לכיוון מרכזי דמוי שווא במרחב התנועות. התאוריה בנושא המרכזו מבוססת על הרעיון שהתנועה שווא מופקת על ידי מעבר קול 'ניטרלי' – מצב מנוחה של אברי ההיגוי. תדירויות הפורמנטים של תנועה ניטרלית כזו יהיו במרכז מרחב התנועות. הידמות, לעומת זאת, גורמת לשינוי באיכות התנועה בעקבות השפעות הסביבה הפונטית של התנועה (Harrington & Cassidy 1999). אחת התוצאות של הידמות כזו יכולה להיות הפחתה בתנועה.

Joos (1948) בדק ספקטרוגרמות של הגאים באנגלית אמריקאית, וטען שההשפעה הממוצעת של עיצורים על התנועות היא באפקט מרכזו אנכי ואופקי (בערכי הפורמנטים הראשון והשני). לטענתו, "כל התנועות זזות בממוצע לכיוון הפונמה שווא כשהן באות במגע עם עיצורים" (שם: 103). לעומת זאת, Lindblom (1963) טען שמרכזו הוא למעשה תוצר של הידמות, המתרחשת כאשר הסביבה הפונטית "שוואית" באופייה – מצב מנוחה של אברי ההיגוי או תנועות מרכזיות, ולא דווקא תוצר של התקרבות לשווא הפונמי. בניסיון לפתור את המחלוקת בדק Van Bergem (1995) ומצא שמידת התזוזה בתדירויות הפורמנטים וכיוון התזוזה תלויים בסביבת העיצורים שבה התנועה מופקת. גם Pitermann (2000) מצא שערכי הפורמנטים הושפעו מהידמות ולא מאפקט של מרכזו. לפי מחקרים אלו, אפשר להסביר את תופעת המרכזו כ"תוצר לוואי" של הידמות: צורות מסוימות של הידמות יובילו לערכים מרכזיים של תדירויות הפורמנטים (Van Bergem 1995).

1.1.3 גורמים משפיעים

גורמים רבים עשויים להשפיע על קיום ההפחתה האקוסטית ועל שיעורה: ההטעמה בהברה, סוג ההברה (פתוחה או סגורה), הסביבה הפונטית, סוג המילה (מילת תוכן או מילת פונקציה), מיקום התנועה במילה, שכיחות המילה בשפה, מיקום הטעם במבע, סגנון הדיבור ומשתנים ספציפיים הקשורים לדובר (Van Bergem 1995).

ממחקרים שונים בנושא השפעת אורך התנועה, הטעם במילה וסגנון הדיבור על ההפחתה האקוסטית של תנועה עולות מסקנות שונות. Lindblom (1963) טען שככל שהתנועה מתקצרת גדל הסיכוי להחטאה של תדירויות הפורמנטים, משום שאברי ההגיייה אינם מספיקים להגיע למיקומם האידאלי. לעומת זאת, Fourakis (1991) מצא שירידה במשך התנועה יכולה להתרחש הן כתוצאה מקצב דיבור מהיר והן כתוצאה מאי־הטעמה, אולם התוזה בתדירויות ערכי הפורמנטים בהשפעת שני המשתנים האלה הייתה מזערית. מחקרים אחרים הראו שערכי תדירויות הפורמנטים של התנועות לא הושפעו באופן משמעותי משינויים בקצב הדיבור (Gay 1978). גם הושפעו מהטעמה על התנועה: בתנועות מוטעמות המאפיינים הספקטרליים היו מודגשים יותר (Engstrand 1988). אך הושפעו גם הושפעו מהטעמה על התנועה: בתנועות מוטעמות המאפיינים הספקטרליים היו מודגשים יותר (Engstrand 1988). גם Van Bergem (1995) מצא שתנועות מוטעמות נהגות באופן ברור יותר ולכן קרוב יותר לצורת המטרה מאשר תנועות בלתי מוטעמות. דבר זה תואם לטענתו של Lindblom (1963) שהפקת תנועות בהברות בלתי מוטעמות נעשית בהשקעת מאמץ מועט יותר, דבר העשוי להוביל להפחתה. במחקר אחר נבדק הקשר בין הפחתה אקוסטית לבין הטעמה מן ההיבט התפיסתי (Rietveld & Koopmans-van Beinum 1987). תוצאות המחקר העלו שתנועות ללא הפחתה ספקטרלית, אשר הוצגו לצד תנועות שעברו הפחתה ספקטרלית, נתפסו כמוטעמות. בנוסף לכך נמצא שבמערכת התנועות הנחקרת הניגודים בין תנועות בלתי מוטעמות קטנים מהניגודים בין תנועות מוטעמות.

גורם נוסף המשפיע על הפחתה בתנועות הוא הסביבה הפונטית. מודל 'החטאת המטרה' של Moon & Lindblom (1994) גורס כי השפעת הסביבה הפונטית על ערכי הפורמנטים תלויה במידת מעבר הפורמנט, קרי המרחק בין מיקום התנועה למיקום העיצור (מרחק "מיקום-מטרה", locus-target). הידמות משמעותית יותר תתרחש במרחקי "מיקום-מטרה" גדולים (Lindblom 1963, Moon & Lindblom 1994). Moon & Lindblom (שם) הראו במחקרם באנגלית אמריקאית שקיימת אינטראקציה בין "מיקום-מטרה" (ההבדל האקוסטי בין התנועה לבין הסביבה הפונטית שלה) לבין משך התנועה. הם מצאו שבמרחקי מיקום-מטרה משמעותיים בלבד יש השפעה של משך התנועה. מסקנת החוקרים היא שבהתאם למודל 'החטאת המטרה', הפחתה פונטית בתנועות היא תהליך תלוי משך וסביבה פונטית.

מחקרים נוספים בדקו כיצד התכונות השונות של הסביבה הפונטית משפיעות על מאפייני התנועות: במחקר של Stevens & House (1963), אצל Hillenbrand, Clark & Nearey (2001) על תנועות באנגלית אמריקאית נמצא שמקום חיתוכם של העיצורים השפיע על תדירויות הפורמנטים של התנועות הסמוכות להם יותר מאופן החיתוך ומן הקוליות. במחקר המשך נבדקה השפעת

הסביבה העיצורית על דפוס הפורמנטים בסביבות סימטריות (אותו עיצור משני צדי התנועה) ולא־סימטריות (עיצורים שונים משני צדי התנועה) בתנועות באנגלית אמריקאית. נמצא כי בתנאי הסימטרי העיצור הפותח את ההברה משפיע יותר מהעיצור הסוגר את ההברה, וכן שהתכונה המשפיעה ביותר של העיצור היא מקום החיתוך (Hillenbrand, Clark & Nearey 2001). במחקר נוסף, שבחן את השפעתם של סותמים קוליים על הפחתה בתנועות באנגלית אמריקאית, נמצא כי השפעת העיצור הקודם לתנועה גדולה מהשפעת העיצור לאחר התנועה (Ohnde & Sharf 1975). קיימת הסכמה בין חוקרים רבים שאכן לסביבה הפונטית יש תפקיד חשוב בתהליך ההפחתה בתנועה. לדברי Van Bergem (1995), תנועות שבסביבתן ישנן פונמות "תואמות", ישמרו על איכותן בתנאים לשוניים וחוק־לשוניים שונים. לעומתן, תנועות שבסביבתן ישנן פונמות "לא תואמות", יושפעו מהידמות שתגדל ככל שהדיבור יהיה פחות רהוט.

1.2 התנועות בשפה העברית

בעברית הישראלית המדוברת קיימות חמש תנועות: /u/ ,/o/ ,/i/ ,/e/ ,/a/. (Laufer 1999). מעטים המחקרים האקוסטיים שנערכו בנושא התנועות בשפה העברית. שורצולד (1972) ערכה השוואה בין תנועות דומות בעברית ובאנגלית אמריקאית, וקבעה שישנם הבדלים בהפקת התנועות בשתי השפות. לאופר (1977) בדק את ערכי הפורמנטים של התנועות בעברית בתנועות המופקות לכדן וכשהן משולבות במשפט, וזאת מפי דובר אחד.

במחקר קליני שעסק בבחירת טווחי תדירויות לשם כיוון יעיל של השתל הקוקלארי, מדרו (Aronson *et al.* 1996) את ערכי תדירויות הפורמנטים בחמש התנועות בעברית שהופקו כתנועה בודדת ובתוך מילה. לעומתם, Most, Amir & Tobin (2000) התמקדו בקביעת ערכים סטנדרטיים של תדירויות הפורמנטים בעברית. במחקר הזה נמדדו ערכי הפורמנטים במבועים מבודדים, שבהם התנועות הופיעו במילות טפל חד־הברתיות במשפט. לפי המדידות נקבעו נורמות בהתאם למין (גברים ונשים) ולקבוצות גיל (מבוגרים וילדים).

בעבודת התזה של מימון (2001) נבדקו השפעות ההטעמה וסביבות פונטיות שונות על איכות תנועות שהופקו בקריאה בקול רם. תוצאות המחקר העלו שמרבית השינויים בהשפעת הסביבה הפונטית התרחשו בפורמנט השני בתנועות הבלתי מוטעמות. עם זאת, קשה להסיק מסקנות גורפות ממחקר זה באשר לעברית הכללית לנוכח השתתפותם של דוברים בעלי מבטאים שונים (מבטא רוסי ומבטא ספרדי),

וכיוון שעבודה זו מתארת את השפעתם של כל תנועה או עיצור על התנועה הסמוכה להם. בדרך זו המידע רב ומפורט, אך אי־אפשר לראות מגמות או להעמיד הכללות. מחקרם של Amir & Amir (2007) ניסה להציע דרכי מדידה לתופעת ההפחתה בתנועות, וכן לבדוק את קיום התופעה בשפה העברית. במחקר נמצא שאכן מתרחשת הפחתה בתנועות בעברית, אך החוקרים לא דנו בגורמים השונים המשפיעים על הפחתה זו, ולכן המחקר אינו מסביר את התהליכים העומדים בבסיסה.

1.3 שיטות מדידה וכימות של הפחתה בתנועות

Blomgren, Robb & Chen (1998) השתמשו בשיטות אחדות למדידת הפחתה של מרחב התנועות כולו וכן למדידת הפחתה של תנועות בודדות. מרחב התנועות נמדד על ידי השטח הנוצר בין התנועות /u/-/i/-/a/ במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$. שיטה זו "מתעלמת" מן התנועות הנוספות הקיימות במאגר התנועות, ולכן מאבדת מידע חשוב. התבוננות בשטח מצולע התנועות כולו עשויה לתרום מידע חשוב באשר להשפעת מיקום כל אחת מן התנועות על מרחב התנועות.

מדדים של הפחתה בכל תנועה בנפרד כוללים את הפרש הפורמנטים (formant spacing), קרי ההפרש $F2 - F1$, וכן את ממוצע הפורמנטים $(F1 + F2) / 2$. כמו כן אפשר למדוד את המרחק האי־קלידי בין מיקום התנועה במרחב $F1 \times F2$ לבין מרכז הכובד (centroid) של משולש התנועות (Blomgren, Robb & Chen 1998). דרך נוספת היא למדוד את המרחק האי־קלידי שבין ההפקות של התנועה בתנאים שונים (לדוגמה, אותה תנועה הבאה בהברה מוטעמת ובהברה בלתי מוטעמת). בעבודה זו נשתמש במדדים של מרחב התנועות ובמדדים של תנועות בודדות, המפורטים להלן:

מדדים של מרחב התנועות

1. **שורש יחסי השטחים** (vowel area ratio) – Blomgren, Robb & Chen (1998)
הציעו למדוד את שטח משולש התנועות הנוצר בין התנועות הקיצוניות /u/-/i/-/a/ במרחב של תדירות $F1$ כפונקצייה של תדירות $F2$. באופן דומה אפשר לחשב את שטחו של מצולע התנועות הנוצר על ידי חמש התנועות בשפה העברית ואת יחסי השטחים בין מצולע התנועות המוטעמות, מצולע התנועות שאינן מוטעמות ומצולע התנועות שנהגו בדיבור מתוכנן, לפי Most, Amir & Tobin (2000).
2. **דמיון במרחב התנועות** (vowel space similarity) – כימות הדמיון בין מרחב התנועות כפי שנוצר מערכי הפורמנטים של תנועות מוטעמות ושל תנועות

בלתי מוטעמות, וכן בהשוואה לדיבור מתוכנן (כפי שנמדד על ידי Most, Amir & Tobin 2000). הדמיון מחושב על ידי מציאת ההתאמה הטובה ביותר בין המצולעים. לשם כך נעשה שימוש במדרד יחס הדמיון (similarity ratio), שהוא חישוב שיעור השינוי בקנה המידה (scaling factor), המשקף את ההתאמה הטובה ביותר בין מצולע התנועות המוטעמות לבין מצולע התנועות הבלתי מוטעמות באמצעות שינוי גודלו של המצולע (scaling) וסיבוכו, על פי מדרד של שגיאה ריבועית ממוצעת (לקריאה נוספת ראו Amir & Amir 2007). בחישוב זה נעשה שימוש גם במציאת קני המידה המציגים את ההתאמה הטובה ביותר בין מצולע התנועות בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) לבין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני.

מדדים של תנועות בודדות

1. הפחתה בתנועה בודדת – בעוד הדמיון במרחב התנועות מעיד על מידת ההפחתה של מרחב התנועות כולו, אפשר למדוד את מידת ההפחתה בכל תנועה בנפרד באמצעות החישובים האלה:
 - א. מרחק וזווית התזוזה – מדידת מרחק וזווית התזוזה בין תנועה מוטעמת לבין המקבילה הבלתי מוטעמת שלה על ידי חישוב המרחק האינקלידי והזווית בין שתי הנקודות במרחב $F1 \times F2$.
 - ב. יחסי המרחקים האינקלידיים – מדידת המרחק האינקלידי של התנועה ממרכז הכובד של מצולע התנועות וחישוב היחס בין המרחק האינקלידי של תנועה מוטעמת לבין המרחק האינקלידי של תנועה בלתי מוטעמת. בנוסף לכך אפשר לחשב את יחסי המרחקים האינקלידיים בין תנועות מוטעמות או בלתי מוטעמות לבין המרחק האינקלידי של התנועה בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000).
2. מידת הפיזור (increase in spread) – השוואה במידת פיזור הטעות (שטה "אליפסת הפיזור") בין תנועות שחולצו מהברות מוטעמות לבין תנועות שחולצו מהברות בלתי מוטעמות (Most, Amir & Tobin 2000).

2. שיטת המחקר

במחקר זה נבדוק, כאמור, את קיומה של תופעת ההפחתה האקוסטית במערכת התנועות בעברית בדיבור ספונטני. בנוסף לכך ננסה לברר מהם הגורמים המשפיעים על התופעה: האם קיום טעם בהברה נתונה והסביבה הפונטית של התנועה משפיעים

על ערכי הפורמנטים? על יסוד התוצאות ננסה לקבוע אם מתרחשת תופעת המרכז או תופעת ההידמות.

הדגימות נלקחו מהפקות של 10 דוברים (5 גברים ו-5 נשים). גילם הממוצע של הדוברים הוא 39 שנים בקבוצת הגברים (בני 26-52, $SD=11$) ו-28 שנים בקבוצת הנשים (בנות 23-32, $SD=3.7$). כל הדוברים הם ילידי ישראל המתגוררים בה, ועברית היא שפת אמם.

הקלטותיהם של חלק מהדוברים נלקחו ממאגר הנתונים מעמ"ד (Izre'el & Rahav 2004), שחלק ממנו הוא הקורפוס לספר זה. הקורפוס כולל הקלטות דיבור ספונטני שהוא חלק מחיי היום-יום של המוקלטים, ללא עירור אקטיבי של הדיבור (Amir & Amir 2007). בשל איכות ההקלטה ומידת התאמתה לניתוח אקוסטי נלקחו ממעמ"ד הקלטותיהם של שבעה דוברים בלבד (ארבע נשים ושלושה גברים), שאיכותן טובה.¹ בנוסף לכך הוקלטו במסגרת מחקר זה שלושה דוברים נוספים (אישה אחת ושני גברים) בדומה לאופן ההקלטה במעמ"ד. בסך הכול נדגמו 5,583 דגימות (tokens) של תנועות: 2,817 דגימות בקבוצת הגברים ו-2,765 דגימות בקבוצת הנשים. בטבלה 1 מפורט מספר הפקות של כל אחת מחמש התנועות בחלוקה לתנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות.

טבלה 1: מספר הפקות של כל תנועה מוטעמת ובלתי מוטעמת

	/i/	/e/	/a/	/o/	/u/	
גברים	288	353	539	248	96	מוטעם
	260	244	509	152	76	בלתי מוטעם
נשים	325	330	547	408	60	מוטעם
	216	217	477	154	83	בלתי מוטעם

אפשר לראות שקיים חוסר איזון בטבלה בין מספר הפקות של התנועות השונות וכן בין מספר הפקות המוטעמות לבין מספר הפקות הבלתי מוטעמות. הפקות נדגמו מקטע הקלטה באורך של כמה דקות, כך שייצוג התנועות בטבלה זו מייצג את שכיחות התנועות בקטעי ההקלטות שנדגמו. ייתכן שהדבר אף מצביע על שכיחות סוגי התנועות וההטעמה בשפה.

שיטת העבודה כללה תהליכי סגמנטציה ואנוטציה ידניים בעזרת תוכנת Praat. לכל תנועה יצרנו כמה מדרגות מידע (tiers): סוג התנועה, תעתיק המילה, אם התנועה

1 כל המעוניין להאזין לקטעי האודיו ממאגר מעמ"ד ששימשו במחקר, מוזמן לפנות למחברים לקבלתם.

באה בהברה מוטעמת או בלתי מוטעמת וכן זהות הדובר. מכל דובר נלקחו דגימות של כל תנועה בהטעמה ובלא הטעמה.

התנועות נבחרו על פי כמה קריטריונים: התנועה היא חד־תנועה (monophthong) ולא חלק מדו־תנועה (diphthong), התנועה היא גרעין של הברה הכוללת onset ולאחריה יש עיצור או שקט (לא נדגמו תנועות שבסביבתן הפונטית הצמודה באות תנועות), התנועה באה במילת תוכן, הריבור הנשמע הוא של הדובר הנבדק בלבד, הריבור הוא ללא אלמנטים נוספים המשפיעים על ההיגוי (לעיסת אוכל, צחוק וכדומה). לאחר השלמת תהליכי הסגמנטציה והאנוטציה נעשה מיצוי של ערכי הפורמנטים. ברוב המחקרים מיצוי הפורמנטים נעשה בשיטת (Linear Predictive Coding: LPC (Markel & Gray 1976), המיושמת בתוכנת Praat. החיסרון המשמעותי של פונקציית ה־LPC בתוכנת Praat הוא שיש לכוונן את הפרמטרים של התוכנה לכל דובר ולעתים לכל תנועה כדי לקבל תוצאות בעלות משמעות (Amir & Amir 2007). לנוכח הבעיות בשימוש בתוכנה זו, הניתוח האקוסטי במחקר זה נעשה לכל תנועה בנפרד בעזרת תוכנה ייעודית שנכתבה בשפת Matlab, בעזרת כוונן עדין (fine tuning) שעשתה פונטיקאית מנוסה.

מערך הניסוי וניתוח הנתונים

מערך הניסוי הוא רב־גורמי מעורב. המשתנים הבלתי תלויים הם: סוג התנועה (חמש התנועות בעברית) וטעם בהברה (תנועה מוטעמת או תנועה בלתי מוטעמת). בנוסף לכך נדגמו מיקומי החותכים האקטיביים של הסביבה הפונטית הקודמת לתנועה (קדמי, קורונלי או אחורי) בתנועה /a/ בלבד. זאת משום שלתנועה /a/ בלבד נאסף מספר גדול מספיק של דגימות. דבר זה אפשר ביצוע ניתוח סטטיסטי בחלוקה לשש קבוצות ניסוי – תנועות מוטעמות בשלוש סביבות פונטיות ותנועות בלתי מוטעמות בשלוש סביבות פונטיות. השערה אפשרית באשר לסיבה למספר הדגימות השונה של התנועות השונות היא שכוחותן בשפה. הסביבה הפונטית נקבעה לפי מקום החיתוך האקטיבי של העיצור הקודם לתנועה: (1) קדמי (דו־שפתי או שפתי־שיני); (2) קורונלי (בתר־מכתשי, מכתשי ושיני); (3) אחורי (וילוני או סדקי). הסביבות הפונטיות הנפרדות קובצו לשלוש קטגוריות לפי קרבה חיתוכית, כדי שיהיה מספר מספק של הפקות בכל קבוצה לשם ביצוע ניתוחים סטטיסטיים. המשתנים התלויים הם התדירות הבסיסית של התנועה וערכי שני הפורמנטים הראשונים.

הניתוחים הסטטיסטיים כללו ניתוח שונות עם מדירות חוזרות בשימוש במודל מעורב (המדירות החוזרות הן תנועה והטעמה בניתוחים הסטטיסטיים שנעשו על כל התנועות, וסביבה פונטית והטעמה בניתוחי התנועה /a/). ניתוחי ההשוואות המרובות נעשו לפי שיטת Hochberg (1974), המאפשרת תיקונים להשוואות

מרוכות. בניתוחי האפקטים הפשוטים (tests of effect slices) נעשה תיקון Sidak, המתחשב במספר ההשוואות שנעשו באותו ניתוח. ניתוחי השונות נעשו בנפרד בקבוצת הגברים ובקבוצת הנשים. ככל המבחנים הוגדרה רמת המובהקות כ- $p < 0.05$. שתי מטרות הוצבו לניתוחים הסטטיסטיים:

א. מציאת אפקט עיקרי של תנועה (חמש התנועות בעברית), אפקט עיקרי של הטעמה (תנועה מוטעמת ותנועה בלתי מוטעמת) ואינטראקציה בין תנועה להטעמה בהפקות חמש התנועות.

ב. מציאת אפקט עיקרי של הטעמה (תנועה מוטעמת ותנועה בלתי מוטעמת), אפקט עיקרי של סביבה פונטית (קדמית, קורונלית ואחורית) ואינטראקציה בין הטעמה לסביבה פונטית בהפקות התנועה $/a/$.

בנוסף לכך נעשה שימוש במבחן ווילקוקסון (Wilcoxon signed rank test) – מבחן א-פרמטרי למדגמים מזווגים. הניתוחים הסטטיסטיים נעשו לשם בדיקת ההבדל בין מצולע התנועות המוטעמות לבין מצולע התנועות הבלתי מוטעמות במדדים השונים (יחס שטחי התנועות ויחסי הדמיון).

הניתוחים הסטטיסטיים נעשו על ידי חישוב על פני דוברים (לאחר חישוב ממוצע לכל תנועה לכל דובר), מכיוון שחישוב על פני הפקות מגדיל את המדגם באופן מלאכותי ועלול להביא לתוצאות לא תקפות. לאור זאת, גם התוצאות התיאוריות המוצגות הן על פני דוברים. התוצאות מוצגות בהשוואה לערכים שדווחו על ידי Most, Amir & Tobin (2000), הנחשבים לערכים טיפוסיים לתנועות בעברית, המופקות בדיבור מתוכנן.

3. תוצאות

3.1 חמש התנועות

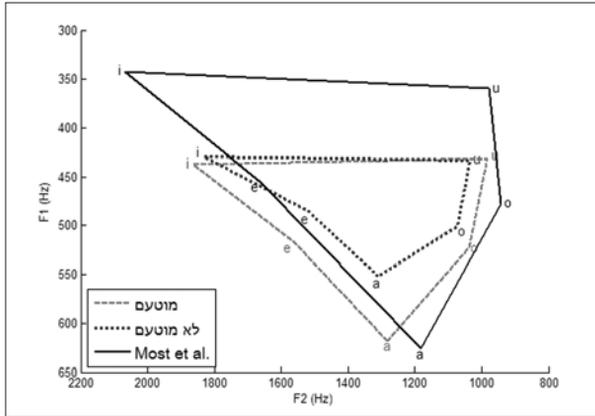
בטבלה 2 מוצגים הממוצעים וסטיות התקן של ערכי התדירות הבסיסית וערכי שני הפורמנטים הראשונים בקבוצת הגברים ובקבוצת הנשים בדיבור מתוכנן, לפי Most, Amir & Tobin (2000), ובדיבור ספונטני – תנועות מוטעמות ותנועות בלתי מוטעמות, כפי שנמצאו במחקרנו. מצולעי F1-F2, המבוססים על נתונים אלו, מוצגים בתרשימים 1-2.

טבלה 2: ממוצעי ערכי התדירויות (Hz) וסטיות התקן (בסוגריים) של התדירות הבסיסית ושני הפורמנטים הראשונים של חמש התנועות בעברית כדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) וכדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות)

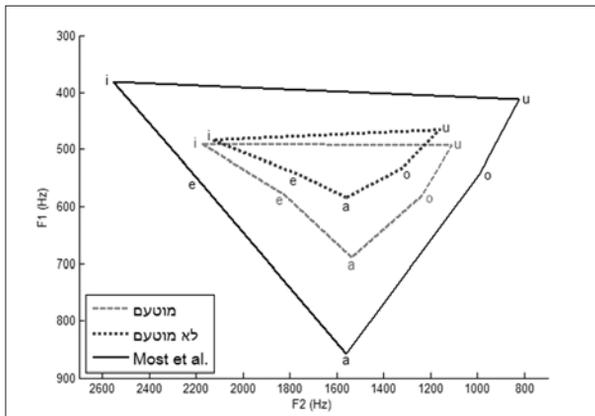
/i/	/e/	/a/	/o/	/u/			
142 (30)	136 (25)	134 (24)	141 (26)	146 (30)	Most et al.	f0	גברים
143 (31)	145 (27)	136 (30)	143 (24)	140 (18)	מוטעם		
143 (40)	145 (25)	132 (23)	138 (26)	128 (26)	בלתי מוטעם		
342 (30)	455 (40)	626 (48)	478 (46)	359 (31)	Most et al.	F1	
437 (55)	517 (57)	618 (57)	522 (69)	431 (47)	מוטעם		
430 (64)	485 (50)	552 (73)	500 (77)	433 (65)	בלתי מוטעם		
2068 (142)	1662 (171)	1182 (90)	944 (105)	979 (91)	Most et al.	F2	
1863 (91)	1562 (68)	1283 (74)	1038 (62)	984 (81)	מוטעם		
1833 (122)	1522 (82)	1310 (65)	1074 (80)	1034 (133)	בלתי מוטעם		
219 (31)	207 (33)	203 (26)	210 (27)	222 (38)	Most et al.	f0	נשים
228 (14)	224 (10)	222 (11)	228 (18)	236 (22)	מוטעם		
226 (10)	224 (15)	220 (8)	220 (5)	210 (17)	בלתי מוטעם		
381 (46)	548 (60)	859 (77)	542 (65)	411 (70)	Most et al.	F1	
490 (41)	580 (48)	689 (79)	581 (53)	493 (39)	מוטעם		
483 (36)	545 (46)	583 (77)	531 (54)	465 (35)	בלתי מוטעם		
2555 (145)	2200 (172)	1560 (115)	988 (90)	824 (90)	Most et al.	F2	
2177 (208)	1823 (111)	1537 (92)	1239 (94)	1108 (125)	מוטעם		
2132 (176)	1754 (80)	1559 (81)	1318 (137)	1161 (99)	בלתי מוטעם		

בהשוואה בין דיבור מתוכנן לבין דיבור ספונטני בקבוצת הגברים ההבדלים המשמעותיים ביותר הם בערכי F1 של התנועות הגבוהות /u/ ו-/i/ וערכי F2 של התנועה /i/. בקבוצת הנשים ההבדלים המשמעותיים ביותר הם בערכי F1 שלוש התנועות הקיצוניות במצולע התנועות (/a/, /u/, /i/) ובערכי F2 של כל התנועות למעט התנועה /a/.

בהשוואה בין תנועות מוטעמות לבין תנועות בלתי מוטעמות כדיבור ספונטני ההבדל בערכי F1 גדל ככל שהתנועה נמוכה יותר (כמעט ללא הבדל בתנועות /i/ ו-/u/ והבדל גדול יותר בתנועה /a/). בערכי F2 אין כמעט הבדל בין תנועות מוטעמות לבין תנועות בלתי מוטעמות.



תרשים 1: מצולעי F1-F2 בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות) אצל גברים



תרשים 2: מצולעי F1-F2 בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות) אצל נשים

בהשוואה בין מצולעי התנועות המוטעמות לבין מצולעי התנועות הבלתי מוטעמות אפשר לראות בעיקר תזוזה של התנועה /a/ בשתי הקבוצות. לתנועה /a/ המוטעמת ערכי F1 גבוהים יחסית לתנועה /a/ הבלתי מוטעמת. למרות ההבדלים האלה צורת המצולעים נותרת דומה למדיי.

בהשוואה בין מצולעי התנועות בדיבור מתוכנן לבין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני אפשר לראות שצורת המצולעים נשמרת (פחות או יותר), אך מצולעי הדיבור הספונטני קטנים יותר ומרכזיים יותר במרחב הפורמנטים.

3.1.1 ניתוחים סטטיסטיים

הניתוחים הסטטיסטיים העלו את הממצאים הבאים (לממצאים המלאים ראו צנקר (2008):

זהות התנועה: לא נמצאה השפעה של זהות התנועה על ערכי התדירות הבסיסית. לעומת זאת נמצאה השפעה על ערכי F1, ונמצאו הבדלים מובהקים בין התנועות הגבוהות (/i/, /u/) לתנועות המרכזיות (/o/, /e/) ולתנועה הנמוכה (/a/). כמו כן נמצאה השפעה על ערכי F2: נמצאו הבדלים מובהקים בין חמש התנועות.

הטעמה: נמצאה השפעה על ערכי התדירות הבסיסית: בתנועות מוטעמות ערכי התדירות הבסיסית גבוהים יותר מאשר בתנועות בלתי מוטעמות. כמו כן נמצאה השפעה על ערכי F1: בתנועות מוטעמות ערכי F1 גבוהים יותר מאשר בתנועות בלתי מוטעמות. לא נמצאה השפעה של הטעמה על ערכי F2.

3.1.2 מדדים של מרחב התנועות

שורש יחס שטחי מצולעי התנועות

בטבלה 3 מוצגים שורשי היחסים בין שטח מצולע התנועות המוטעמות לבין שטח מצולע התנועות הבלתי מוטעמות ושורשי היחסים בין שטח מצולע התנועות בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) לבין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני.

טבלה 3: שורשי יחסי שטחי המצולעים בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות)

נשים	גברים	
1.4	1.3	שטח מצולע התנועות המוטעמות / שטח מצולע התנועות הבלתי מוטעמות
1.69	1.11	שטח מצולע התנועות בדיבור מתוכנן / שטח מצולע התנועות מוטעמות (יחס 1)
2.37	1.44	שטח מצולע התנועות בדיבור מתוכנן / שטח מצולע התנועות הבלתי מוטעמות (יחס 2)

אפשר לראות שיחס השטחים בין התנועות בדיבור מתוכנן לבין התנועות הבלתי מוטעמות גדול יותר מיחס השטחים בין התנועות בדיבור מתוכנן לבין התנועות

המוטעמות. בקבוצת הגברים שטח מצולע התנועות בדיבור מתוכנן גדול כמעט כמשטח מצולע התנועות המוטעמות, וגדול כמעט פי 1.5 משטח מצולע התנועות הבלתי מוטעמות. בקבוצת הנשים שטח מצולע התנועות בדיבור מתוכנן גדול כמעט פי 2 משטח מצולע התנועות המוטעמות, וגדול כמעט פי 2.5 משטח מצולע התנועות הבלתי מוטעמות.

במבחן ווילקוקסון נמצא הבדל מובהק ($p=0.002$) בין יחס 1 לבין יחס 2. ההבדל נמצא מובהק בחישוב בשתי קבוצות הנבדקים (גברים ונשים) יחד.

יחסי הדמיון

בטבלה 4 מוצגים השינויים בקנה המידה (scaling factor), שהביאו לדמיון המרבי בין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני (בתנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות) ובדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000).

טבלה 4: השינוי בקנה המידה לשם קבלת הדמיון המרבי בין המצולעים בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות)

נשים	גברים	
1.15	1.12	מצולע התנועות מוטעמות / מצולע התנועות הבלתי מוטעמות
1.69	1.29	מצולע תנועות בדיבור מתוכנן / מצולע תנועות מוטעמות (קנה מידה 1)
1.90	1.45	מצולע התנועות בדיבור מתוכנן / מצולע התנועות הבלתי מוטעמות (קנה מידה 2)

קיים דמיון רב בין מצולע התנועות המוטעמות לבין מצולע התנועות הבלתי מוטעמות. לעומת זאת, הדמיון בין מצולע התנועות בדיבור מתוכנן לבין מצולע התנועות הבלתי מוטעמות קטן יותר בהשוואה לדמיון בין מצולע התנועות בדיבור מתוכנן לבין מצולע התנועות המוטעמות. ההבדל בין מצולע התנועות בדיבור מתוכנן לבין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני גדול יותר בקבוצת הנשים.

במבחן ווילקוקסון נמצא הבדל מובהק ($p=0.0136$) בין קנה מידה 1 לבין קנה מידה 2. ההבדל נמצא מובהק בחישוב על פני שתי קבוצות הנבדקים (גברים ונשים) יחד.

3.1.3 מדדים של תנועות בודדות

מרחק זוויתי התזוזה

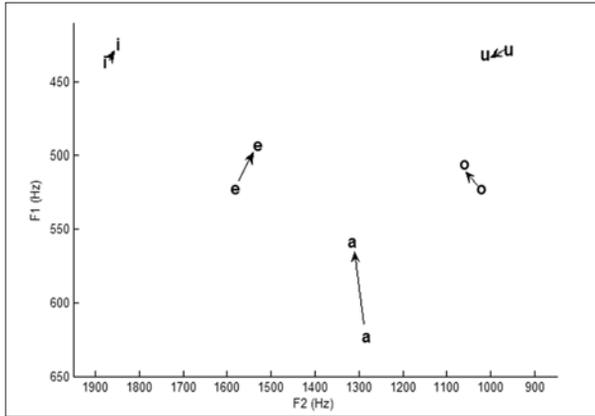
בטבלה 5 מוצגת מידת התזוזה בין תנועה מוטעמת לבין מקבילתה הבלתי מוטעמת. הדבר נעשה באמצעות חישוב מרחק איקלידי בין שתי הנקודות במרחב $F1 \times F2$. בנוסף, חושבה זווית התזוזה בין שתי הנקודות במרחב המייצגת את כיוון התזוזה.

טבלה 5: מרחק איקלידי (Hz) וכיוון התזוזה ($^{\circ}$) בין התנועות המוטעמות לבין התנועות הבלתי מוטעמות

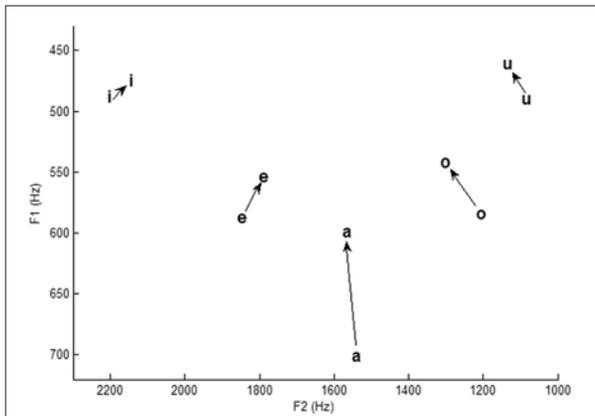
/i/	/e/	/a/	/o/	/u/		
31	51	72	43	50	מרחק	גברים
76	51	-22	-59	-93	זווית	
45	77	109	93	60	מרחק	נשים
81	63	-12	-58	-61	זווית	

בתרשימים 3-4 מוצגות התנועות המוטעמות והתנועות הבלתי מוטעמות במרחב הפורמנטים. כיוון החץ מראה על כיוון התזוזה מהתנועה המוטעמת לעבר התנועה הבלתי מוטעמת.

כפי שנראה בטבלה ובתרשימים, מרחק התזוזה של התנועה /a/ הוא המשמעותי ביותר מבין מרחקי התזוזה של התנועות. כפי שנראה מזווית התזוזה, כל התנועות הבלתי מוטעמות (למעט התנועה /a/) זזו במידות שונות לכיוון מרכזי יותר בממד $F2$, יחסית לתנועות המוטעמות. כמו כן, כמעט כל התנועות הבלתי מוטעמות זזו למיקום גבוה יותר בממד $F1$, יחסית לתנועות המוטעמות. מרחקי התזוזה גדולים יותר בקבוצת הנשים, אך חשוב לציין שגם מרחב התנועות עצמו גדול יותר בקבוצה זו.



תרשים 3: התנועות המוטעמות והתנועות הבלתי מוטעמות במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$ בקבוצת הגברים. כיוון החץ מן התנועה המוטעמת לעבר התנועה הבלתי מוטעמת



תרשים 4: התנועות המוטעמות והתנועות הבלתי מוטעמות במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$ בקבוצת הנשים. כיוון החץ מן התנועה המוטעמת לעבר התנועה הבלתי מוטעמת

הפחתה בתנועה בודדת - יחס בין תנועה מוטעמת לתנועה בלתי מוטעמת מדידת ההפחתה בתנועות בודדות נעשתה על ידי חישוב היחס בין המרחק האינדידי של התנועה המוטעמת ממרכז הכובד של מצולע התנועות המוטעמות לבין המרחק האינדידי של התנועה הבלתי מוטעמת ממרכז הכובד של מצולע התנועות הבלתי מוטעמות, כפי שמפורט בטבלה 6.

טבלה 6: היחס בין המרחק האינקלידי של תנועה מוטעמת לבין המרחק האינקלידי של תנועה בלתי מוטעמת

/i/	/e/	/a/	/o/	/u/	
1.085	1.292	1.532	1.098	1.142	גברים
1.103	1.441	1.933	1.267	1.108	נשים

אפשר לראות שערכי היחסים בטבלה גבוהים מ-1 בכל התנועות – המרחק האינקלידי של התנועות המוטעמות גדול מהמרחק האינקלידי של התנועות הבלתי מוטעמות. מידת ההבדלים במרחקים בין התנועות המוטעמות לבין התנועות הבלתי מוטעמות שונה בתנועות השונות. אפשר לראות שבתנועה /a/ מידת ההפחתה היא המשמעותית ביותר, הן בקבוצת הגברים והן בקבוצת הנשים. בתנועות /i/ ו-/o/ בקבוצת הגברים ובתנועות /i/ ו-/u/ בקבוצת הנשים מידת ההפחתה היא הקטנה ביותר.

הפחתה בתנועה בודדת - ביחס לתנועות בדיבור מתוכנן

חישוב נוסף של הפחתה בתנועות בודדות הוא היחס בין המרחק האינקלידי של תנועה מוטעמת או בלתי מוטעמת לתנועה המקבילה בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000). תוצאות החישובים מוצגות בטבלה 7.

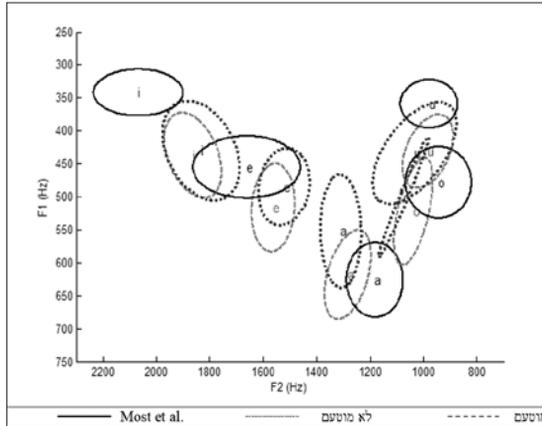
טבלה 7: היחס בין המרחק האינקלידי של תנועה בדיבור ספונטני (מוטעמת או בלתי מוטעמת) לבין המרחק האינקלידי של תנועה בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000)

/i/	/e/	/a/	/o/	/u/		
1.379	1.365	1.919	1.328	1.144	מוטעם	גברים
1.515	1.796	3.117	1.527	1.348	בלתי מוטעם	
1.639	2.392	2.557	2.559	1.421	מוטעם	נשים
1.835	3.490	5.670	3.509	1.580	בלתי מוטעם	

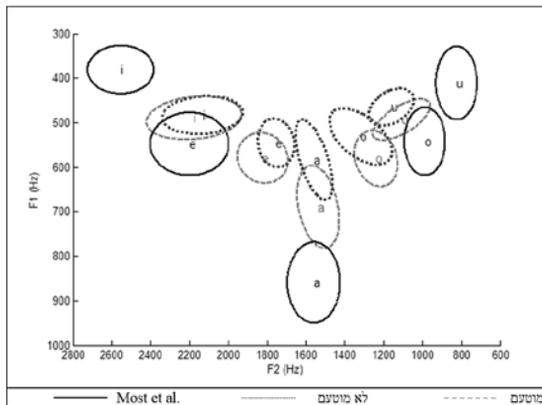
לפי נתונים אלו, כפי שנמצא בחישובי ההפחתה הקודמים, ההפחתה משמעותית יותר בתנועות הבלתי מוטעמות, בהשוואה לתנועות מוטעמות. ההפחתה בתנועה /a/ היא המשמעותית ביותר.

3.1.4 פיזור ערכי הפורמנטים

פיזור ערכי הפורמנטים מיוצג על ידי אליפסות הפיזור, המוצגות בתרשימים 5-6.



תרשים 5: אליפסות הפיזור בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות) אצל גברים



תרשים 6: אליפסות הפיזור בדיבור מתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ובדיבור ספונטני (תנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות) אצל נשים

אפשר לראות שאין חפיפה בין אליפסות התנועות שהופקו בדיבור מתוכנן. לעומת זאת, ניכרת חפיפה בין אליפסות התנועות שהופקו בדיבור ספונטני בתנועות /o/ ו-/u/. בקבוצת הגברים (תרשים 5) קיימת חפיפה חלקית בין התנועות /i/ ו-/e/, לעומת זאת, שהופקו בדיבור ספונטני לבין התנועה /e/ שהופקה בדיבור מתוכנן. לעומת זאת, קיימת הפרדה ברורה בין התנועה /i/ לבין התנועה /e/ בדיבור ספונטני. בתנועות /o/ ו-/u/ קיימת חפיפה חלקית בין אליפסות הפיזור כך שאליפסות התנועה /u/

בדיבור ספונטני חופפות לאלִיפסות התנועות /o/ ו־/u/ בדיבור מתוכנן. אליפסות התנועה /o/ בדיבור ספונטני חופפות בעיקר לאלִיפסת התנועה /o/ בדיבור מתוכנן ומעט מאוד לאלִיפסת התנועה /a/ בדיבור מתוכנן. אליפסות התנועה /a/ בדיבור ספונטני מופרדות כמעט לחלוטין מאלִיפסות שאר התנועות, וחופפות במעט לאלִיפסת התנועה /a/ בדיבור מתוכנן.

בקבוצת הנשים (תרשים 6) אפשר לראות הפרדה ברורה יותר בין התנועות השונות וכן אליפסות פיזור קטנות יותר, יחסית לקבוצת הגברים. אליפסות הפיזור של התנועה /i/ בדיבור ספונטני חופפות חלקית לאלִיפסת הפיזור של התנועה /e/ בדיבור מתוכנן; אליפסת הפיזור של התנועה /u/ המוטעמת חופפת חלקית לאלִיפסת התנועה /o/ בדיבור מתוכנן. באופן כללי, כל אליפסת הפיזור של הדיבור הספונטני ממורכזות יותר במרחב הפורמנטיים, בהשוואה לאלִיפסת הפיזור של דיבור מתוכנן. אליפסות הפיזור של התנועות שאינן מוטעמות ממורכזות יותר יחסית לאלִיפסת הפיזור של התנועות המוטעמות.

מידת הפיזור

שטחי אליפסות הפיזור של התנועות המוטעמות והתנועות הבלתי מוטעמות וכן היחס בין השטחים האלה מוצגים בטבלה 8. החישוב נעשה בכל ההפקות ולא בממוצעי הנבדקים, מאחר שלחלק מהנבדקים נמצאו רק הפקות אחדות של התנועה /u/. התייחסות לממוצעי הנבדקים הייתה גורמת לכך שנתוניו של דובר שהפיק מספר קטן של הפקות היו משפיעים על אליפסת הפיזור באותה מידה שבה השפיעו נתוניו של דובר שהפיק מספר גדול של הפקות. דבר זה היה מביא לתוצאות שאינן מייצגות נאמנה את המציאות.

שטחי אליפסות הפיזור של התנועות המוטעמות קטנים יותר משטחי אליפסות הפיזור של התנועות הבלתי מוטעמות (למעט התנועה /i/ בהפקות הנשים), וההבדל בין השטחים בולט יותר בקבוצת הגברים.

התנועות בעלות הפיזור הגדול ביותר הן תנועות בלתי מוטעמות (התנועה /i/ בקבוצת הגברים והתנועה /a/ בקבוצת הנשים). התנועות בעלות הפיזור הקטן ביותר הן תנועות מוטעמות (התנועה /o/ בקבוצת הגברים והתנועה /a/ בקבוצת הנשים). אליפסת הפיזור בקבוצת הנשים גדולות כמובהק מאלִיפסת הפיזור בקבוצת הגברים.

טבלה 8: שטחי אליפסות הפיזור (Hz^2) של התנועות בדיבור ספונטני (מוטעמות ובלתי מוטעמות) ויחסי השטחים

/i/	/e/	/a/	/o/	/u/		
65221	48527	47223	44577	51273	מוטעם	גברים
83451	59042	72006	71475	71530	בלתי מוטעם	
0.78	0.82	0.66	0.62	0.72	יחס השטחים מוטעם / לא מוטעם	
96306	73606	99955	79153	93789	מוטעם	נשים
89199	81629	111889	101222	98698	בלתי מוטעם	
1.08	0.90	0.89	0.78	0.95	יחס השטחים מוטעם / לא מוטעם	

3.2 התנועה /a/

בטבלה 9 מוצגים הממוצעים וסטיות התקן של ערכי F1 ו-F2 של הפקות התנועה /a/ בקבוצת הגברים ובקבוצת הנשים, בתנועות מוטעמות ובתנועות בלתי מוטעמות, בשלוש סביבות פונטיות שונות (קדמית, קורונלית ואחורית). קיים דמיון רב בין ערכי F1 של התנועות הבלתי מוטעמות בסביבות הפונטיות השונות. לעומת זאת, בתנועות המוטעמות קיים הבדל בערכי F1 בסביבות הפונטיות השונות – ערכי F1 בסביבה האחורית הם הגבוהים ביותר בהשוואה לשתי הסביבות הפונטיות האחרות. ערכי F1 של התנועות המוטעמות גבוהים מערכי F1 של התנועות הבלתי מוטעמות בשלוש הסביבות הפונטיות. באשר לערכי F2 – בסביבה קדמית הערכים נמוכים יותר מאשר בסביבות קורונלית ואחורית. בקבוצת הגברים ערכי F2 של התנועות בסביבות קורונלית ואחורית דומים מאוד, בעיקר בתנועות המוטעמות.

טבלה 9: ממוצעי ערכי התדירויות (Hz) וסטיות התקן (בסוגריים) של התדירות הבסיסית ושלושת הפורמנטים הראשונים של התנועה /a/ בעברית בדיבור פונטני בשלוש סביבות פונטיות בהברות מוטעמות ובלתי מוטעמות

סביבה אחורית	סביבה קורנלית	סביבה קדמית			
631 (52)	610 (57)	613 (74)	מוטעם	F1	גברים
558 (87)	540 (60)	558 (77)	בלתי מוטעם		
1308 (87)	1313 (73)	1198 (94)	מוטעם	F2	
1347 (98)	1374 (65)	1177 (91)	בלתי מוטעם		
710 (70)	673 (78)	689 (94)	מוטעם	F1	נשים
589 (93)	579 (70)	583 (63)	בלתי מוטעם		
1537 (112)	1616 (105)	1452 (92)	מוטעם	F2	
1574 (81)	1651 (101)	1422 (101)	בלתי מוטעם		

3.2.1 ניתוחים סטטיסטיים

הניתוחים הסטטיסטיים העלו את הממצאים הבאים (לממצאים המלאים ראו צנקר 2008):

סביבה פונטית: נמצאה השפעה על ערכי F1: הערכים גבוהים יותר בסביבה אחורית מבסביבה קורנלית; נמצאה השפעה על ערכי F2 – הערכים נמוכים יותר בסביבה קדמית מבסביבות קורנלית ואחורית.

הטעמה: נמצאה השפעה על ערכי F1: הערכים גבוהים יותר בתנועות מוטעמות מבתנועות בלתי מוטעמות; נמצאה השפעה על ערכי F2 אצל הגברים בלבד: אפשר לראות הבדל בין התנועות המוטעמות לבין התנועות הבלתי מוטעמות בעיקר בסביבה קורנלית.

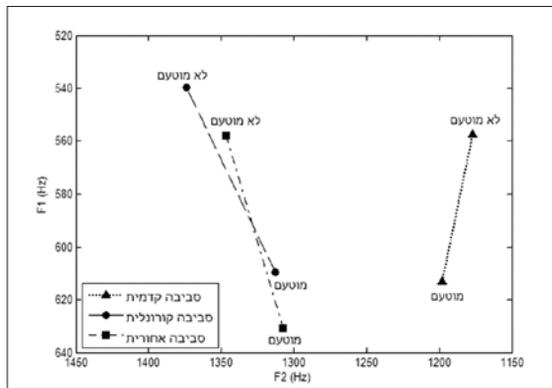
3.2.2 מדדים כמותיים של הפחתה בתנועה /a/

בטבלה 10 מוצגת מידת התזוזה בין תנועת /a/ מוטעמת לבין המקבילה הבלתי מוטעמת שלה בכל אחת מן הסביבות הפונטיות: קדמית, קורנלית ואחורית. ראשית חושב מיקומה של כל תנועה אצל כל דובר, לאחר מכן חושב הממוצע של כל הדוברים, ולבסוף חושב המרחק האינדיבידואלי בין התנועה המוטעמת לבין התנועה הבלתי מוטעמת ככל סביבה פונטית במרחב $F1 \times F2$.

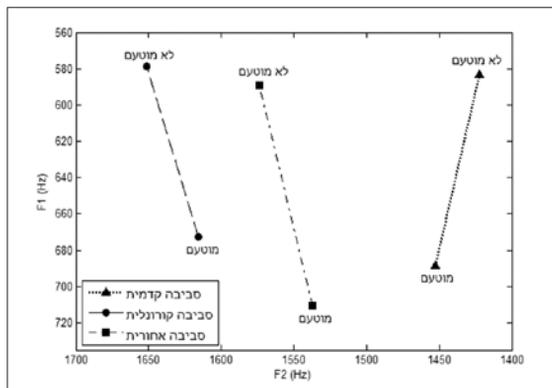
טבלה 10: מרחק איקלידי (Hz) בין התנועה /a/ המוטעמת לבין התנועה /a/ הבלתי מוטעמת בשלוש סביבות פונטיות

סביבה אחורית	סביבה קורונלית	סביבה קדמית	
82	92	58	גברים
126	100	110	נשים

בקבוצת הגברים המרחק הגדול ביותר בין התנועה המוטעמת לבין התנועה הבלתי מוטעמת הוא בסביבה קורונלית. בקבוצת הנשים המרחק הגדול ביותר בין התנועה המוטעמת לבין התנועה הבלתי מוטעמת הוא בסביבה אחורית.



תרשים 7: התנועה /a/ מוטעמת ובלתי מוטעמת במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$ בשלוש סביבות פונטיות בקבוצת הגברים



תרשים 8: התנועה /a/ מוטעמת ובלתי מוטעמת במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$ בשלוש סביבות פונטיות בקבוצת הנשים

בתרשימים 7-8 אפשר לראות את מקום התנועה /a/ במרחב הפורמנטים $F1 \times F2$ בתנועות מוטעמות ובלתי מוטעמות בסביבות הפונטיות השונות. גם בקבוצת הגברים וגם בקבוצת הנשים התנועות הבלתי מוטעמות ממוקמות גבוה יותר במרחב הפורמנטים בהשוואה למקבילותיהן המוטעמות בשלוש הסביבות הפונטיות. בסביבה הקורונלית ובסביבה האחורית התנועות הבלתי מוטעמות קדמיות יותר ממקבילותיהן המוטעמות. בסביבה הקדמית התנועה הבלתי מוטעמת אחורית יותר ממקבילתה המוטעמת.

בקבוצת הגברים ערכי $F2$ של התנועות בסביבה הקורונלית ובסביבה האחורית דומים בתנועות המוטעמות. בתנועות הבלתי מוטעמות בסביבות אלו נוצר מרחק קטן בין התנועות. לעומת זאת, בקבוצת הנשים ניכרת הפרדה ברורה בין התנועות – המוטעמות והבלתי מוטעמות – שהופקו בסביבות פונטיות שונות.

4. דיון

שאלת היסוד שהועלתה במחקר זה הייתה אם הנתונים האקוסטיים ישקפו את השונות בין התנועות השונות בשפה העברית. לפי הספרות הקיימת, ערכי $F1$ משקפים את גובה התנועה, ונראה כי תדירות הפורמנט הראשון גבוהה יותר ככל שהתנועה נמוכה יותר (Ladefoged 2001). ממצאי מחקרנו תואמים לקביעה זו: ערכי $F1$ של התנועה /a/ (תנועה נמוכה) גדולים יותר מערכי $F1$ של שאר התנועות; ערכי $F1$ של התנועות /u/ ו-/i/ (תנועות גבוהות) נמצאו קטנים מערכי $F1$ של שאר התנועות; ואילו ערכי $F1$ של התנועות /o/ ו-/e/ (תנועות אמצעיות) גדולים מערכי $F1$ של התנועות הגבוהות וקטנים מערכי $F1$ של התנועה הנמוכה. ההבדלים בין התנועות מובהקים, למעט בין זוג התנועות /e/-/o/ (תנועות אמצעיות) ובין זוג התנועות /u/-/i/ (תנועות גבוהות).

עוד עולה מן הספרות כי תדירות הפורמנט השני עולה ככל שהתנועה קדמית יותר (Ladefoged 2001). ממצאי מחקרנו תואמים גם לקביעה זו: ערכי $F2$ של חמש התנועות גבוהים יותר ככל שהתנועה קדמית יותר. ערכי $F2$ של התנועה /i/ (הקדמית ביותר) גדולים מערכי $F2$ של שאר התנועות; ערכי $F2$ של התנועה /e/ גדולים מערכי $F2$ של שאר התנועות, למעט התנועה /i/; ערכי $F2$ של התנועה /a/ גדולים מערכי $F2$ של התנועות /o/ ו-/u/; ערכי $F2$ של התנועה /o/ גדולים מערכי $F2$ של התנועה /u/ (התנועה האחורית ביותר).

שאלה מרכזית נוספת הייתה השפעת הטעם בהברה על המאפיינים האקוסטיים של התנועות. ההנחה המקובלת היא שעלייה בתדירות הבסיסית מעידה על הטעמה בהברה (Ladefoged 2001). בהתאם לכך, ערכי התדירות הבסיסית של התנועות

המוטעמות נמצאו גבוהים במובהק מערכי התדירות הבסיסית של התנועות הבלתי מוטעמות. בחינת הנתונים מעלה שיש לסייג ממצא זה, שכן ההבדלים הכמותיים בין התנועות המוטעמות לבין התנועות הבלתי מוטעמות הם קטנים, ונעים לרוב בין הברל אפסי לבין 8Hz. ייתכן שהאפקט המובהק שנמצא נובע ממספרן הרב של ההפקות שנבדקו, שהרי ככל שמספר ההפקות גדול יותר נדרש הברל משמעותי פחות לשם קבלת אפקט מובהק.

במחקר שבדק את המאפיינים האקוסטיים של התנועות ביונית (Fourakis, Botinis & Katsaiti 1999), נמצא שתנועות מוטעמות היו בעלות תדירות בסיסית גבוהה יותר מתנועות בלתי מוטעמות. ההפרשים בין התדירות הבסיסית של תנועות מוטעמות לבין התדירות הבסיסית של תנועות בלתי מוטעמות נעו בטווח של 15Hz-33Hz. ערכים אלו גבוהים יחסית להבדלים שנמצאו בעברית, אולי בשל השימוש בדיבור מתוכנן (רשימות מילים) ולא בדיבור ספונטני, כפי שנעשה במחקרנו.

לאור ממצאי מחקרנו עולה האפשרות שעלייה בתדירות הבסיסית אינה המאפיין היחיד של הטעמה בתנועות, וגם גובה התנועה בדיבור ספונטני עשוי לשמש רמז לקיום טעם בהברה. מחקרם של Rietveld & Koopmans-van Beinum (1987) בשפה ההולנדית מצביע על חשיבותה של הפחתה ספקטרלית בערכי F1 ו-F2 בתפיסה של הטעמה בתנועה. תנועות מופחתות פחות מן התנועות בסביבתן נתפסו כמוטעמות. חשוב להדגיש שהתדירות הבסיסית של התנועות במחקרם הייתה קבועה בכל הגירויים, וכי השיפוט בנוגע להטעמה התבסס על ערכי הפורמנטים בלבד.

במחקרנו נמצא שערכי F1 של התנועות המוטעמות היו גבוהים במובהק מערכי F1 של התנועות הבלתי מוטעמות בשלוש תנועות: /a/, /e/, /o/. בהתאם לכך אפשר לראות שהתנועות המוטעמות נמוכות במרחב הפורמנטים מהתנועות הבלתי מוטעמות. גם במחקר בשפה היוונית (Fourakis, Botinis & Katsaiti 1999) נמצאו ברוב התנועות ערכי F1 גבוהים יותר בתנועות המוטעמות בהשוואה לתנועות הבלתי מוטעמות.

לעומת זאת, במחקר בשפה העברית (מימון 2001) לא נמצאה השפעה זו של הטעמה על ערכי הפורמנטים. השערת המחקר של מימון (שם) הייתה שערכי הפורמנטים יהיו גבוהים יותר בתנועות המוטעמות בהשוואה לתנועות הבלתי מוטעמות, שכן "אם התדירות גבוהה יותר בהברה המוטעמת, אזי המעצבים אמורים אף הם להיות גבוהים יותר" (שם: 24). להנחה זו מימון אינה מביאה סימוכין כלשהם. בנוסף לכך, לפי מודל מקור-מסנן, הקשר בין התדירות הבסיסית (המקור) לבין ערכי הפורמנטים (המסנן) אינו כה ישיר ופשוט. מימון אף לא מדרה את ערכי התדירות הבסיסית של התנועות הנבדקות, אלא את ערכי הפורמנטים בלבד. השערתה של מימון לא אוששה – בעבודתה לא נמצא הברל מובהק בערכי

F1 בין תנועות מוטעמות לבין תנועות בלתי מוטעמות, למעט בתנועה /a/. אף בערכי F2 לא נמצא הבדל מובהק בין ערכי F2 של התנועה המוטעמת לבין ערכי F2 של התנועה הבלתי מוטעמת, למעט בתנועה /e/ אצל חלק מן הדוברים. בחינתן של תנועות יחידות מעלה שחלה תזוזה של התנועות הבלתי מוטעמות אל מרכז מרחב הפורמנטים, אך התנועות השונות אינן מושפעות באותה מידה מקיום טעם בהברה. ממצאי המחקר מראים שההפחתה המשמעותית ביותר התרחשה בתנועה /a/. הסבר אפשרי לכך הוא שתנועה נמוכה משמעה הגעה למנח לשון ולסת נמוכים. מנח זה דורש תנועה (ארטיקולטורית) משמעותית יותר במעבר מהעיצורים השכנים לתנועה, בהשוואה להפקת תנועה גבוהה יותר. לפי Flemming (2005), ניגודים של גובה התנועה יתבטלו קודם שיתבטלו ניגודים של אזוריות התנועה או של עיגול השפתיים. ניגודים אלו מנוטרלים ראשונים מכיוון שהפקתן של תנועות נמוכות היא זו שהופכת לקשה יותר בהברות שאינן מוטעמות. Flemming (שם) משתמש בנתונים ממחקר בשפה האיטלקית (Albano Leoni *et al.* 1995) אצל Flemming (2005) כדי להראות שהתנועה הנמוכה ביותר במאגר התנועות הבלתי מוטעמות גבוהה יחסית לתנועה הנמוכה ביותר במאגר התנועות המוטעמות. דבר זה מחזק את ההשערה שלפיה בתנועות /a/ בלתי מוטעמות, שבהן מושקע פחות מאמץ הפקתי, יש סיכוי גבוה יותר להחטאת מטרה בהשוואה לתנועות גבוהות יותר, שלשם הפקתן לא נדרשת תנועה משמעותית של הלסת. בהתאם לכך, לא נמצא במחקרנו הבדל משמעותי בין התנועות הגבוהות (/i/ ו-/u/), שהופקו בהברות מוטעמות ובלתי מוטעמות.

מנתוני מדד הפיזור אפשר לראות שלרוב הפיזור גדול יותר בתנועות הבלתי מוטעמות בהשוואה לתנועות המוטעמות. דבר זה מצביע על אופן הפקה מאורגן ומתוכנן פחות של תנועות בלתי מוטעמות, יחסית לתנועות מוטעמות. Van Bergem (1994) טוען שכאשר הדובר מתכוון להפיק את תנועת המטרה, אך הוא אינו משקיע את המאמץ הנדרש להפיקה בצורתה המלאה, קיימת אפשרות של הפחתה בתנועה. ישנם שלושה גורמים הקובעים את מידת השקעת המאמץ בהפקת הברה: רמת הטעמה, סגנון דיבור ושכיחות המילה שבה ההברה באה. כאשר התנועה אינה מוטעמת הסיכוי להפיק את תנועת המטרה קטן, ולפיכך ההפקות עלולות להיות דומות פחות זו לזו. הסבר נוסף הוא שהתנועות הבלתי מוטעמות מושפעות יותר מסביבתן הפונטית, ולפיכך מפוזרות יותר במרחב הפורמנטים. דבר זה מחזק את ההשערה שהידמות היא התהליך שביסוד ההפחתה האקוסטית בתנועות.

ההשפעה של הטעם בהברה אינה חלה רק על נתוני התנועות הבודדות, אלא גם על מרחב התנועות כולו. מצולעי התנועות הבלתי מוטעמות קטנים בשטחם ממצולעי התנועות המוטעמות. דבר דומה נמצא בשפה היוונית, שבדומה לעברית

גם היא בעלת מערכת של חמש תנועות: /u/, /o/, /i/, /e/, /a/ (Fourakis, Botinis 1999 & Katsaiti). כאמור, ההפחתה המשמעותית ביותר התרחשה בתנועה /a/, ולכן ההבדל בין מצולע התנועות המוטעמות לבין מצולע התנועות הבלתי מוטעמות נובע בעיקר מהשינוי בערכי F1 של התנועה /a/. כמו כן בחישוב היחסים בין מצולע התנועות בדיבור מתוכנן לבין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני נמצא כי מצולעי התנועות המוטעמות קרובים יותר בשטחם למצולעי התנועות בדיבור מתוכנן.

מבדיקת יחסי הדמיון בין המצולעים עולה שכדי להגיע לדמיון המרבי בין מצולעי התנועות בדיבור ספונטני לבין מצולעי התנועות בדיבור מתוכנן יש צורך בשינוי משמעותי יותר במצולעי התנועות הבלתי מוטעמות. דבר זה מראה על כך שמרחב התנועות המוטעמות דומה יותר למרחב התנועות בדיבור מתוכנן גם בצורתו ולא רק בגודלו, בהשוואה למרחב התנועות הבלתי מוטעמות.

עד כה דנו בממצאים הנוגעים לקיומה של תופעת ההפחתה האקוסטית. מה בנוגע לתהליכים אשר בכסיס ההפחתה: מרכזו או הידמות? השוואה בין מצולעי התנועות המוטעמות לבין מצולעי התנועות הבלתי מוטעמות מראה מרכזו של מצולעי התנועות הבלתי מוטעמות, בעיקר בתנועה הנמוכה /a/ ובתנועות האמצעיות /e/ ו-/o/. לעומת זאת, בהפקות התנועה /a/ בסביבות הפונטיות השונות נראית מגמה של הידמות בערכי F2 של ההפקות הבלתי מוטעמות. אפשר לראות הבדל גדול יותר בין ערכי F2 של התנועות הבלתי מוטעמות בסביבות הפונטיות השונות, בהשוואה להבדלים בין ערכי F2 של התנועות המוטעמות בסביבות הפונטיות השונות. כך לדוגמה, בקבוצת הגברים ההפרש בין ערך F2 של התנועות המוטעמות בסביבה קדמית לבין ערך F2 של התנועות המוטעמות בסביבה קורונלית הוא 115Hz. לעומת זאת, ההפרש בין ערך F2 של התנועות הבלתי מוטעמות בסביבה קדמית לבין ערך F2 של התנועות הבלתי מוטעמות בסביבה קורונלית הוא 197Hz. דפוס זה של הפרשים גדולים יותר בערכי F2 בין התנועות הבלתי מוטעמות קיים בערכי F2 בכל הסביבות.

לא נמצא תהליך של מרכזו התנועות הבלתי מוטעמות, בהשוואה לתנועות המוטעמות, אלא להפך – התנועות הבלתי מוטעמות הושפעו מסביבתן הפונטית ונמצאו במיקומים קיצוניים יותר בממד F2 במרחב הפורמנטים, בהתאם להשפעת הסביבה הפונטית המסוימת. דבר זה מעיד על תהליך של הידמות פונטית של התנועות הבלתי מוטעמות, בהשוואה לתנועות המוטעמות. ממצא דומה מצא Van Bergem (1995) במבדק שערך על התנועה /ε/ בהולנדית – התווזה במיקום כל הפקה הייתה תלויה בסביבה הפונטית שבה הופקה. המסקנה העולה היא שהמרכז הנראה בחלק מן התנועות במצולעי התנועות יכול לנבוע ממיצוע השפעותיהן של

סביבות פונטיות שונות על התנועות. תדירויות הפורמנטים של תנועות בסביבה פונטית אחת מסוימת אינן בהכרח מתמכזות אלא מושפעות מסביבתן המסוימת. למרות כל הממצאים שפורטו עד כה, יש להזכיר כמה בעיות מתודולוגיות שעולות בחקר דיבור ספונטני. באופן טבעי בדיבור שזכה קיימות השמטות של תנועות ועיצורים (Farnetani 1997). במחקרו של Johnson (2004) על דיבור שמופק במהלך שיחה (conversational speech), כ-25% מהמילים נמחק סגמנט אחד או יותר. במהלך תהליכי הסגמנטציה והאנטוציה במחקר זה היה קושי רב לסמן את גבולות התנועות, שכן התנועות היו קצרות כל כך במשכן במקרים מסוימים, שהיה קושי להפרידן מן הפונמות השכנות. מעבר לכך, תנועות מסוימות הושמטו כמעט לחלוטין ולא היה אפשר לסמנן כלל. לפיכך, התנועות שנדגמו במחקר זה היו תנועות שבהן התאפשר לזהות בבירור יחסי את גבולותיהן. קרוב לוודאי אפוא שהיו מקרים של הפחתה אקוסטית משמעותית יותר שלא נדגמו. לכן אפשר לומר שנתוני מחקר זה מראים על עצם קיומה של תופעת ההפחתה האקוסטית מבחינה איכותית, אך בהערכה כמותית של מימוש התופעה יש להביא בחשבון שנתונים של הפחתה קיצונית בתנועות לא בהכרח יוצגו במחקר.

פרט נוסף שיש להביא בחשבון הוא שנתוני הדיבור המתוכנן (לפי Most, Amir & Tobin 2000) ונתוני הדיבור הספונטני מבוססים על דוברים שונים, שהוקלטו בתקופות זמן שונות ובמסגרת מחקרים נפרדים. ההנחה שבבסיס ההשוואות במחקר זה היא שמדידותיהם של Most ועמיתיה (שם) מייצגות את התכונות האקוסטיות של התנועות בעברית בדיבור מתוכנן. תוקף מחקר זה יגדל אם יתקבלו תוצאות דומות בהשוואה בין המאפיינים האקוסטיים של התנועות בעברית בדיבור מתוכנן ובדיבור ספונטני, שיופקו על ידי אותו דובר.

בנוסף לכל זאת, יש לסייג את יכולת הכללת התוצאות. כפי שעולה מן ההבדלים שפורטו בין דיבור ספונטני לדיבור מתוכנן, קשה להסיק מסגנון דיבור אחד באשר לסגנון דיבור שונה, ולפיכך, ממצאינו תקפים לדיבור הספונטני בלבד.

כפי הנראה, תופעת ההפחתה האקוסטית בתנועות היא תופעה שכיחה מאוד בדיבור בחיי היום-יום, ולמרות זאת אנחנו מצליחים לתקשר ולהבין זה את זה. קיימת אפשרות שהפחתה בתנועה היא אפילו חיונית לשם הפקת דיבור טבעי ומובן (Van Bergem 1995). אף על פי שהגיוני להניח שמובנות הדיבור היא מרבית רק כאשר מופקות תנועות 'אידאליות', דבר זה אינו נכון. מאזינים לעתים קרובות מצפים לתנועות מופחתות במילים מסוימות. במקרים אלו ההפחתה בתנועה יכולה לשמש כרמז לזיהוי נכון של מילים אלו. אזי מובנות הדיבור היא המרבית רק כאשר לכל התנועות יש רמת הפחתה מתאימה לתנאי הדיבור המסוים (Van Bergem 1995).

הרחבת הידע בנוגע לתהליכי הפקת דיבור בהקשרו הטבעי עשויה אף לתרום בתחום טכנולוגיות הדיבור בכלל ומערכות של דיבור מסוננת בפרט. אחת השאיפות העיקריות של תחום טכנולוגיות הדיבור היא שהדיבור יהיה מובן ובה בעת טבעי ואנושי. במערכות רבות הדיבור אכן בעל מובנות גבוהה, אך אינו נשמע טבעי מספיק. סיבה אפשרית לכך היא שבמערכות המבוססות על מודלים (כדוגמת formant speech synthesis) אין מובאות בחשבון תופעות המתרחשות בדיבור יום-יומי (Rank 2002), ולפיכך עלול להיווצר דיבור שנהגה בהגזמה (Van Bergem 1995). שיטות חדשות יותר ליצירת דיבור מסוננת (כדוגמת concatenative speech synthesis) מתייחסות להיבטים האנושיים בהפקת דיבור ביצירת מערכות דיבור מסוננת (Rank 2002). אחד מההיבטים הללו הוא תופעת ההפחתה בתנועות. על ידי מידול התופעה אפשר יהיה להגדיל את טבעיות הדיבור המסוננת (Duez 2002, Widera 2002). שורת סיכום אחרונה: הדיבור הוא קרוב לוודאי האמצעי החשוב ביותר לתקשורת בין אנשים. ככל שידגל הידע בנוגע לתהליכים השונים המתרחשים בעת הדיבור היום-יומי, כך תגדל התרומה להבנת ההיבטים והתחומים הקשורים בדיבור ולפתוחם – במחקר, בקליניקה ובטכנולוגיה.

5. ביבליוגרפיה

- טובין י'. 1996. "פונולוגיה כהתנהגות האדם: מבוא". ד"ש: דיבור ושמיעה 8. 1-18.
 לאופר א'. 1977. "תיאור פונטי של תנועות". לשוננו מא. ירושלים. 117-143.
 מימון י'. 2001. השפעות סביבתיות על תנועות בעברית: בחינה אקוסטית. עבודת גמר לקראת תואר מוסמך. אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, באר-שבע.
 צנקר א'. 2008. הפחתה אקוסטית Acoustic Reduction בתנועות בעברית כדיבור ספונטני. עבודת גמר לקראת תואר מוסמך. אוניברסיטת תל-אביב, תל-אביב.
 שורצולד א'. 1972. "תנועות בעברית ובאנגלית: מחקר ספקטרוגרפי", בלשנות עברית חפ"שית 6. 1-11.
 Amir N. & Amir O. 2007. "Novel measures for vowel reduction and their application to spontaneous Hebrew speech". *Proceedings of the 16th International Congress of Phonetic Sciences* 52. Saarbrücken.
 Aronson L., Rosenhouse J., Rosenhouse G. & Podoshin L. 1996. "An acoustic analysis of Modern Hebrew vowels and voiced consonants". *Journal of Phonetics* 24. 283- 293.
 Blomgren M., Robb M. & Chen Y. 1998. "A note on vowel centralization in stuttering and nonstuttering individuals". *J. Speech Lang. Hearing Res.* 41. 1042-1051.
 Duez D. 2002. "Reduction and assimilatory processes in conversational French speech implications for speech synthesis". In: E. Keller, G. Bailly, A. Monaghan, J.

- Terken & M. Huckvale (eds.). *Improvements in Speech Synthesis. Cost 258: The Naturalness of Synthetic Speech*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. 228-236.
- Engstrand O. 1988. "Articulatory correlates of stress and speaking rate in Swedish VCV utterances". *J. Acoust. Soc. Am.* 83. 1863-1875.
- Farnetani E. 1997. "Coarticulation and connected speech processes". In: W. L. Hardcastle & J. Laver (eds.). *The Handbook of Phonetic Sciences*. Oxford: Blackwell. 371-404.
- Flemming E. 2005. "A phonetically-based model of phonological vowel reduction". Available at: <http://web.mit.edu/~flemming/www/paper/vowelred.pdf>.
- Fourakis M. 1991. "Tempo, stress, and vowel reduction in American English". *J. Acoust. Soc. Am.* 90. 1816-1827.
- Fourakis M., Botinis A. & Katsaiti M. 1999. "Acoustic characteristics of Greek vowels". *Phonetica* 56. 28-43.
- Gay T. 1978. "Effect of speaking rate on vowel formant movements". *J. Acoust. Soc. Am.* 63. 223-230.
- Harrington J. & Cassidy S. 1999. *Techniques in Speech Acoustic*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Hillenbrand J. M., Clark M. & Nearey T. M. 2001. "Effects of consonant environment on vowel formant patterns". *J. Acoust. Soc. Am.* 109. 748-763.
- Hochberg Y. 1974. "Some conservative generalizations of the T-method in simultaneous inference". *Journal of Multivariate Analysis* 4. 224-234.
- Johnson K. 2004. "Massive reduction in conversational American English". *Spontaneous Speech: Data and Analysis. Proceedings of the 1st session of the 10th international symposium*. The national international institute for Japanese language, Tokyo, Japan. 29-54.
- Joos M. 1948. "Acoustic phonetics". *Language* 24. 1-136.
- Izre'el S. & Rahav G. 2004. "The corpus of Spoken Israeli Hebrew (CoSIH). Phase I: The Pilot Study". *LREC*.
- Ladefoged P. 2001. *A Course in Phonetics*. Fourth edition. Harcourt Brace Jovanovich.
- Lindblom B. 1963. "Spectrographic study of vowel reduction". *J. Acoust. Soc. Am.* 35. 1773-1781.
- Laufer A. 1999. "Hebrew". *IPA Handbook of the International Phonetic Association*. Cambridge University Press. 96-99.
- Markel J. D. & Gray A. H. 1976. *Linear Prediction of Speech*. Berlin: Springer Verlag.
- Matlab, The Mathwork Inc. 3 Apple Hill Drive, Natick MA.
- Moon S. E. & Lindblom B. 1994. "Interaction between duration, context, and speaking style in English stressed vowels". *J. Acoust. Soc. Am.* 96. 40-55.

- Most T., Amir O. & Tobin Y. 2000. "The Hebrew vowel system: Raw and normalized acoustic data". *Language and Speech* 43, 3. 295-308.
- Ohnde R. N. & Sharf D. J. 1975. "Coarticulatory effects of voiced stops on the reduction of acoustic vowel targets". *J. Acoust. Soc. Am.* 58. 923-927.
- Perkell J. S., Zandipour M., Matthies M. L. & Lane H. 2002. "Economy of effort in different speaking conditions. I. A preliminary study of intersubject differences and modeling issues". *J. Acoust. Soc. Am.* 112. 1627-1641.
- Pitermann M. 2000. "Effect of speaking rate and contrastive stress on formant dynamics and vowel perception". *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 6. 3425-3437.
- Rank E. 2002. "Concatenative speech synthesis using SRELP". In: E. Keller, G. Bailly, A. Monaghan, J. Terken & M. Huckvale (eds.). *Improvements in Speech Synthesis. Cost 258: The Naturalness of Synthetic Speech*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. 76-85..
- Rietveld A. C. M. & Koopmans-van Beinum F. J. 1987. "Vowel reduction and stress". *Speech Communication* 6. 217-229.
- Tobin Y. 1997. *Phonology as Human Behavior: Theoretical Implications and Clinical Applications*. Durham, N. C.: Duke University Press.
- Van Bergem D. R. 1994. "Reflections on aspects of vowel reduction". *Proceedings of the Institute of Phonetic Sciences of the University of Amsterdam* 18. 95-110.
- Van Bergem D. R. 1995. *Acoustic and Lexical Vowel Reduction*. Ph.D. dissertation. Studies in Language and Language Use. Vol. 16. University of Amsterdam.
- Van Son R. J. J. H. & Pols L. C. W. 1990. "Formant frequencies of Dutch vowels in a text, read at a normal and fast rate". *J. Acoust. Soc. Am.* 88. 1683-1693.
- Van Son R. J. J. H. & Pols L. C. W. 1992. "Formant movements of Dutch vowels in a text, read at a normal and fast rate". *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 1. 121-127.
- Widera C. 2002. "Vowel reduction in German read speech". In: E. Keller, G. Bailly, A. Monaghan, J. Terken & M. Huckvale (eds.). *Improvements in Speech Synthesis. Cost 258: The Naturalness of Synthetic Speech*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. 186-195.