
תזמון בפעולת המפרקים של / הגפיים התחתונות בעת נחיתה אנכית
Timing at the lower extremity joints in vertical landing /

Author(s): מושה איילון (תווי), אלברטו איילון, דוד בן-סירא, רוג'ר נתן, M. Ayalon (Tavi),
A. Ayalon, D. Ben-Sira and R. Natan

Source: *Movement: Journal of Physical Education & Sport Sciences* / כתב-עת:
1993, כסלו, (Vol. 2, No. 2), למדעי החינוך הגופני והספורט, כסלו, תשנ"ד / נובמבר, 1993,
pp. 93-113 (תשנ"ד / נובמבר, 1993)

Published by: Academic College at Wingate

Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/23631763>

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact support@jstor.org.

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



JSTOR

is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Movement: Journal of Physical Education & Sport Sciences* / כתב-עת למדעי החינוך הגופני והספורט

תזמון בפעולת המפרקים של הגפיים התחתונות בעת נחיתה אנכית

משה איילון (תוויו), אלברטו איילון, דוד בן-סירה, רוג'ר נתן

חשיבות הבלימה של כוחות ההלם בעת הנחיתה

אחת המטרות המרכזיות של החקירה בתחום הביומכניקה של הספורט היא לנתח את התנועות של גוף האדם כדי להבין את הזיקה, שבין יחסי הגומלין בפעולת חלקי הגוף השונים לבין השגת תוצאה סופית מיטבית. נחיתה אנכית הינה פעולה שכיחה, המאפיינת ענפי ספורט רבים. הנחיתה מתבצעת גם בעת פעילויות צבאיות כמו אימוני צניחה, מעבר מכשולים וכדומה. אצל ילדים זהו אלמנט תנועה שכיח, למשל בעת שהם נוחתים ממתקני שעשועים. **הנחיתה הסופית הרצויה היא כאשר תנועת הגוף האנכית נבלמת**, מבלי שהגוף נחשף לכוחות ההלם (כוחות התגובה בעת ההתנגשות עם הקרקע), העשויים לגרום נזקים לרקמות ולאיברים.

בנחיתות, העומסים הפועלים על הגוף בשל כוח התגובה ממשטח הנחיתה, עלולים להיות גדולים. כוח התגובה האנכי ממשטח הנחיתה (vertical ground reaction force). להלן, (VGRF), נמדד בערכים יחסיים למשקל הגוף (body weight). להלן (BW). לדוגמה, בנחיתה מקליטת כדור חוזר בכדורסל נמדדו ערכים ממוצעים של 6BW, כלומר, פי ששה ממשקל הגוף (Valiant & Cavanagh, 1985). בהתעמלות קרקע נמדדו ערכים של VGRF בסדר גודל של עד 14BW (Panzer, et al., 1988). בקרב נשים שנחתו מגובה של 0.8 מטר דווחו ערכי VGRF של 6.5BW (Ayalon & Ben-Sira, 1988). ילדים, הנוחתים מגובה של כחצי מטר, הגיעו ל-VGRF בסדר גודל של 15BW (Hinrichs, et

תאריכים: מפרקים; גפיים תחתונות; קפיצה; ביומכניקה.

al., 1985). חוקרים אלה מצאו, שכוחות התגובה המרביים בנחיתה מתפתחים בתוך פרקי זמן קצרים מאוד, של עד כ-0.05 שניות מהמגע הראשוני בקרקע. זאת, לעומת משך בלימה כולל של כ-0.15 שניות.

מנקודת השקפה בריאותית, חשיפת הגוף לכוחות ולמאמצים מכניים גדולים עלולה להוביל לפגיעות ברקמות שונות, כגון: בעצמות, במפרקים, בגידים ולגרום לכאבים בגב התחתון. מניעת פגיעות מסוג זה חשובה לכל, ובפרט לספורטאים, החשופים לפעילות גופנית עצימה וממושכת. בנחיתות אפשר למנוע, או לפחות להקטין, את הפגיעות שתוארו על ידי הפחתת עצמת הכוחות החיצוניים המרביים, הפועלים בעת הבלימה.

דרכים להפחתת כוחות ההלם

קיימות שתי דרכים עיקריות להפחתת הכוחות החיצוניים המרביים על הגוף בזמן הנחיתה:

★ **שימוש באביזרים**, כגון: ציפוי משטחי הנחיתה בחומר בולם זעזועים או שימוש בנעליים המותאמות לכך.

★ **שימוש בקואורדינציה תנועתית מתאימה**, שתכליתה לבלום את התנע של הגוף בהדרגה, תוך פריסת הכוחות בצורה מאוזנת, ככל האפשר, ובפרק זמן ממושך. המחקר הזה מתמקד ב**ניתוח ההיבטים, הקשורים לקואורדינציה במיומנות הנחיתה**.

הבלימה של כוחות ההלם או של כוחות ההתנגשות עם משטח הנחיתה, כפי שהם נמדדים בערכים של VGRF, יכולה להתבצע במגוון צורות, בהתאם לנסיבות הנחיתה. למשל, כאשר נוחתים על קפצית (טרמפולינה), שהיא משטח גמיש (אלסטי), אין כמעט תנועה במפרקי הגפיים התחתונות. כוחות ההלם נבלמים בעיקר על ידי הבד ועל ידי הקפיצים, שאליהם הוא מחובר. בשל גמישותם של אלה הבלימה מתרחשת תוך כדי מעבר של כבדת דרך ארוכה ובאופן הדרגתי, כך שעצמת הכוחות הפועלים בכל עת בין הבד לבין הנוחת, נמוכה יחסית. לעומת זאת, בנחיתה על משטח קשיח נוטים להתפתח כוחות הלם בעלי עצמות גבוהות בהרבה בתוך פרק זמן קצר מאוד. דרושה כפיפה במפרקים תוך מאמץ שרירי אקצנטרי כדי לאפשר בלימה הדרגתית יותר תוך הפחתה של כוחות ההלם המרביים.

אף ששני המקרים שהוצגו הם קיצוניים, הם מבהירים את הצורך בהתאמת טכניקת הנחיתה לנסיבות, ומסייעים להבחין – בעזרת עצמת ה-VGRF המרבית – בין נחיתה טובה ובין נחיתה גרועה, כפי שהנחיתות מוגדרות במחקר זה.

★ **נחיתה טובה**, פירושה נחיתה המאופיינת בערכים נמוכים יחסית של VGRF.

★ **נחיתה גרועה**, פירושה נחיתה המאופיינת בערכים גבוהים יחסית של VGRF.

קואורדינציה תנועתית בנחיתה

בבואנו לנתח את טכניקת הנחיתה, יש לתת את הדעת כי גוף האדם אינו מקשה אחת, אלא מורכב מאיברים מספר, היכולים לנוע ביחס לאיברים האחרים. **מבחינה מכנית, ניתן לראות בגוף האדם מערכת רב חולליתית.** את החוליה ניתן לתאר מבחינה זו כאיבר קשיח יחסית, היכול לנוע סביב ציר (מפרק) בתנועה סיבובית. ניתוח ביומכני מתבסס לעיתים קרובות על מודל רב-חוליות של גוף האדם, שכן התנועה היחסית בין החוליות היא תוצר הן של הכוחות הפנימיים והן של הכוחות החיצוניים הפועלים על מערכת השלד. **במקרה של נחיתה, הפחתת כוחות ההלם תלויה בתיאום (קואורדינציה) מסוים, ייחודי מבחינת מורכבותו, בין החוליות השונות.**

בלימה בעת נחיתה, פירושה האטה של המהירות האנכית, שהגוף מגיע בה אל משטח הבלימה, עד לעצירה מוחלטת. על פי החוק השני של ניוטון, קיים קשר ישיר בין כוח התגובה האנכית מהקרקע (VGRF) ובין התאוצה (או התאוצה) של מרכז הכובד של כל הגוף. אולם, התאוצה של מרכז הכובד הכללי היא פונקציה של התאוצות של מרכזי הכובד של החוליות, היחידות, שהגוף מורכב מהן. **הבדלים בין ביצועי נחיתה שונים** כפי שבאים לידי ביטוי בערכי ה-VGRF של הביצועים האלה, **נובעים מהבדלים בפעולות גומלין דינמיות בין החוליות.** אלה מתרחשות במפרקים שבין החוליות והן משתנות בעצמתן ובתזמונן מביצוע אחד למשנהו. על פי גרוס ונלסון (Gross & Nelson, 1988), דפוס התנועה הכללי במפרקים בעת נחיתה הוא אחיד לכל האנשים. הוא מתחיל דיסטלית בכפיפה גבית בקרסול (dorsal flexion), לאחריה מתרחשת כפיפה בברך (knee flexion) ובסיום כפיפה בירך (hip extension). ואולם, **מאפייני התזמון** במפרקים בנחיתות, שבהן מתפתחים כוחות הלם גבוהים, בהשוואה לנחיתות שבהן התפתחו ערכי כוחות הלם נמוכים – לא נחקרו עדיין.

מטרת המחקר

מטרת המחקר לתאר את שרשרת התזמון של התנועות הסיבוביות במפרקי הגפיים התחתונות בעת נחיתה אנכית, תוך הדגשת ההבדלים בין נחיתות טובות לבין נחיתות גרועות.

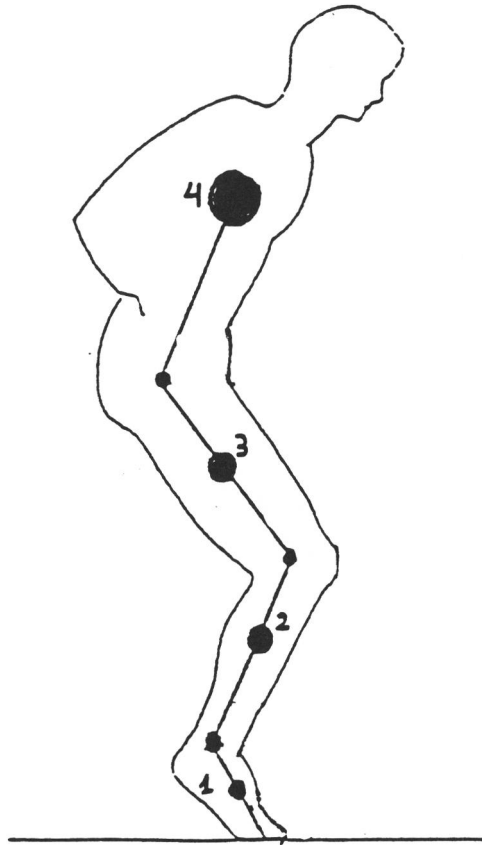
שיטת המחקר

ה נ ב ד ק י ם

השתתפו בניסוי 10 סטודנטים לחינוך גופני בגיל 22 עד 26. כל נבדק ביצע 10 נחיתות מגובה 0.6 מטר. הנבדקים תודרכו לנחות על שתי הרגליים, כשהידיים על המותניים, בטכניקה הנוחה להם. הנחיתות בוצעו ממתקן נחיתה מיוחד, שנבנה לניסוי זה. הנבדק עמד על משטח, שנשמט מתחתיו מיד לאחר הפעלה רצונית של לחצן, שהחזיק בידו. מתקן זה בא להבטיח, כי הנחיתה תהיה אנכית. הנבדקים השתמשו בנעלי ספורט אישיות בעת הבדיקות.

המודל המכני

לצורך ניתוח מכני של המיומנות נבחר מודל גוף ארבע חולייתית, שנותח במישור החיצו. החוליות במודל זה הינן: (1) כף רגל; (2) שוק; (3) ירך; (4) גו+גפיים עליונות+ראש. המודל מוצג באיור 1.



איור 1:
מודל ביומכני של הגוף

כלי המדידה

ההעתק הזוויתי במפרקים שבין החוליות נמדד באמצעות אלקטרוגוניומטרים (electrogoniometer) של חברת MIE, שהוצבו במפרקי הקרסול, הברך והירך של הגוף הימני. הניתוח הקינמטי של התנועה מתבסס על ההנחה שישנה סימטריה דו-צדדית בנחיתה, ולכן ניתן היה להסתפק בתיעוד של צד אחד בלבד. הכוחות המופעלים על כף

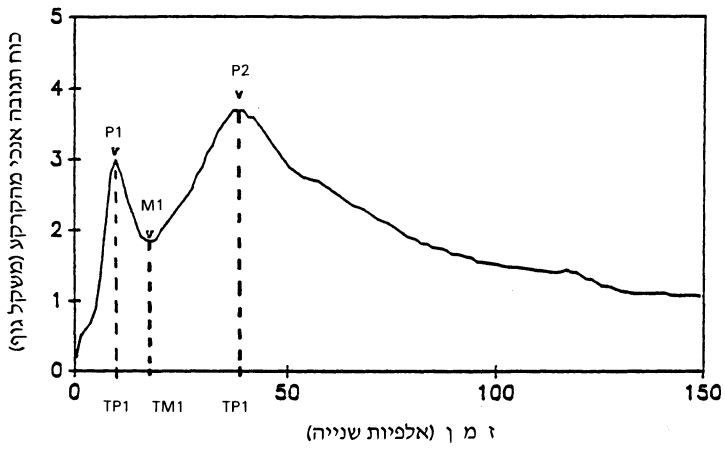
הרגל בזמן הבלימה נמדדו באמצעות **משטח כוח** (force plate) מתוצרת חברת Kistler דגם 9281b, המשולב עם יחידה אלקטרונית מדגם 9807Y9. גודל המשטח 0.4 x 0.6 מטר. המשטח שקוע ברצפת בטון, כך שחלקו העליון נמצא במישור אחד עם הרצפה. בעת הנחיתה נמדדו הכוחות הפועלים על המשטח בשלושת הכיוונים העיקריים: אנכי (vertical), קדמי-אחורי (anterior-posterior) וצידי (medial-lateral).

ניתוח התוצאות

הנתונים ממשטח הכוח ומהאלקטרונומטרים הועברו למחשב Tandy 4000 בעזרת ממיר אנלוגי-דיגיטלי (A to D converter) מתוצרת Metro Byte דגם DAS16. בשל הזמן הקצר של התרחשות הבלימה נבחר תדר דגימה של 2.5 קילו-הרץ לכל ערוץ. המהירויות והתאוצות הזוויתיות במפרקים חושבו על ידי גזירה של שינויי הזווית במפרק ביחס לזמן. התוצאות הוחלקו על ידי פילטר דיגיטלי מדרגה רביעית. דרך זו ננקטה בעקבות בטרוררת (Winter, 1990). התזמון בין הגונומטרים לבין משטח הכוח נעשה על-פי רישום זמן המגע הראשוני עם המשטח.

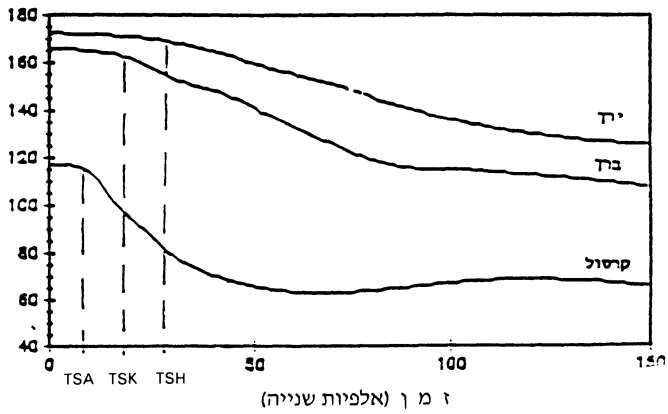
התוצאות

עקומה אופיינית של VGRF במהלך נחיתה אנכית, מוצגת באיור 2. **אפשר לחלק את עקומת הנחיתה לארבעה שלבים עיקריים:** מרגע המגע עם הקרקע עד השיא הראשון של כוח התגובה (P1); מ-P1 עד המינימום המקומי הראשון (M1); מ-M1 עד לשיא השני של כוח התגובה (P2); מ-P2 עד להתיצבות העקומה ברמה של 1BW. הזמנים מרגע המגע עם הקרקע ועד ל-P1, M1 ו-P2 בהתאמה, סומנו TP1, TM1, TP2 / בהתאמה.



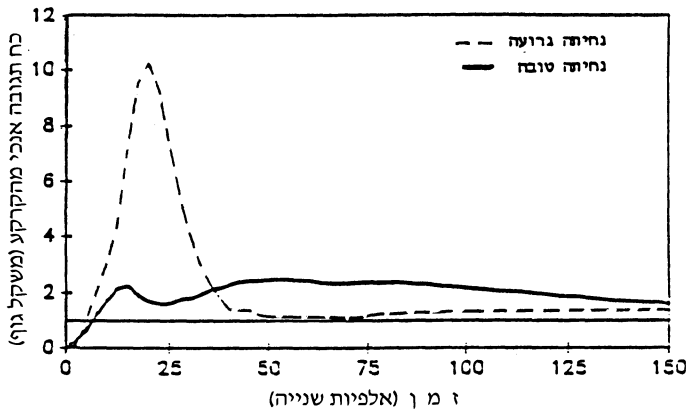
איור 2:

עקומה מייצגת של כוח התגובה האנכי מהקרקע (VGRF) בנחיתה אנכית



איור 3:

עקומה המייצגת את התנועה הזוויתית במפרקי הירך, הברך והקרסול בנחיתה אנכית



איור 4:

עקומת כוח התגובה האנכי מהקרקע (VGRF) בנחיתה טובה ובנחיתה גרועה

באיור 3 מתוארות עקומות מייצגות של התנועה הזויתית במפרקי הקרסול, הברך והירך. הזמנים של התחלת התנועה במפרקי הקרסול, הברך והירך, מיוצגים על ידי TSA, TSK ו-TSH, בהתאמה.

באיור 4 בולטים ההבדלים בין עקומת נחיתה טובה לבין עקומת נחיתה גרועה במיוחד. נחיתה טובה מאופיינת בעקומה חלקה, שבה הערכים של VGRF מרבי נמוכים יחסית, ובירידה הדרגתית וממושכת שב-1BW. לעומת זאת, נחיתה גרועה מאופיינת בעלייה מהירה ותלולה של ערכי ה-VGRF לערך גבוה ולאחר מכן בירידה תלולה יחסית של 1BW.

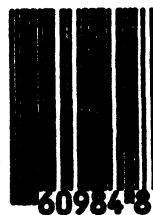
באיורים 5 עד 7 מוצגות התוצאות של הקינמטיקה במפרקי הקרסול, הברך והירך של שלושה נבדקים. כל איור כולל את הביצוע הטוב ביותר ואת הביצוע הגרוע ביותר של הנבדק.

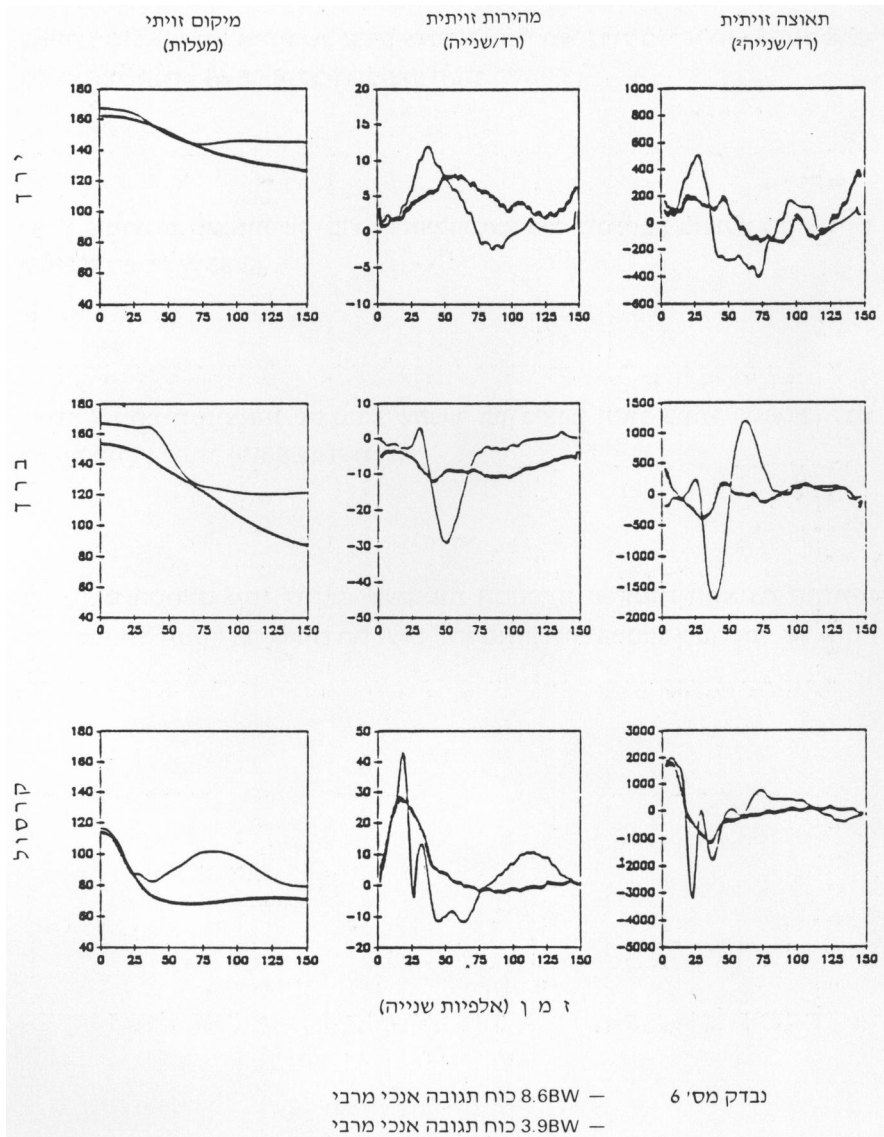
באיור 5 מובאות תוצאותיו של נבדק שנמצא אצלו פער גדול בערכי ה-VGRF המרבי בין הביצוע הגרוע (8.6BW) לבין הביצוע הטוב (3.9BW).

באיור 6 מוצגות תוצאות של נבדק, שאצלו נמצא פער בינוני בין ביצועיו הקיצוניים (6.2BW לעומת 3.3BW).

באיור 7 מוצגות תוצאות של נבדק שהפער בין ביצועו הטוב ביותר (2.0BW) לבין ביצועו הגרוע ביותר (2.8BW), הינו קטן.

בביצועים הטובים ניתן לזהות, שעקומות המהירות ועקומות התאוצה הזויתית חלקות יותר מאשר בביצועים הגרועים, והן מאופיינות במספר קטן יותר של שינויי כיוון.

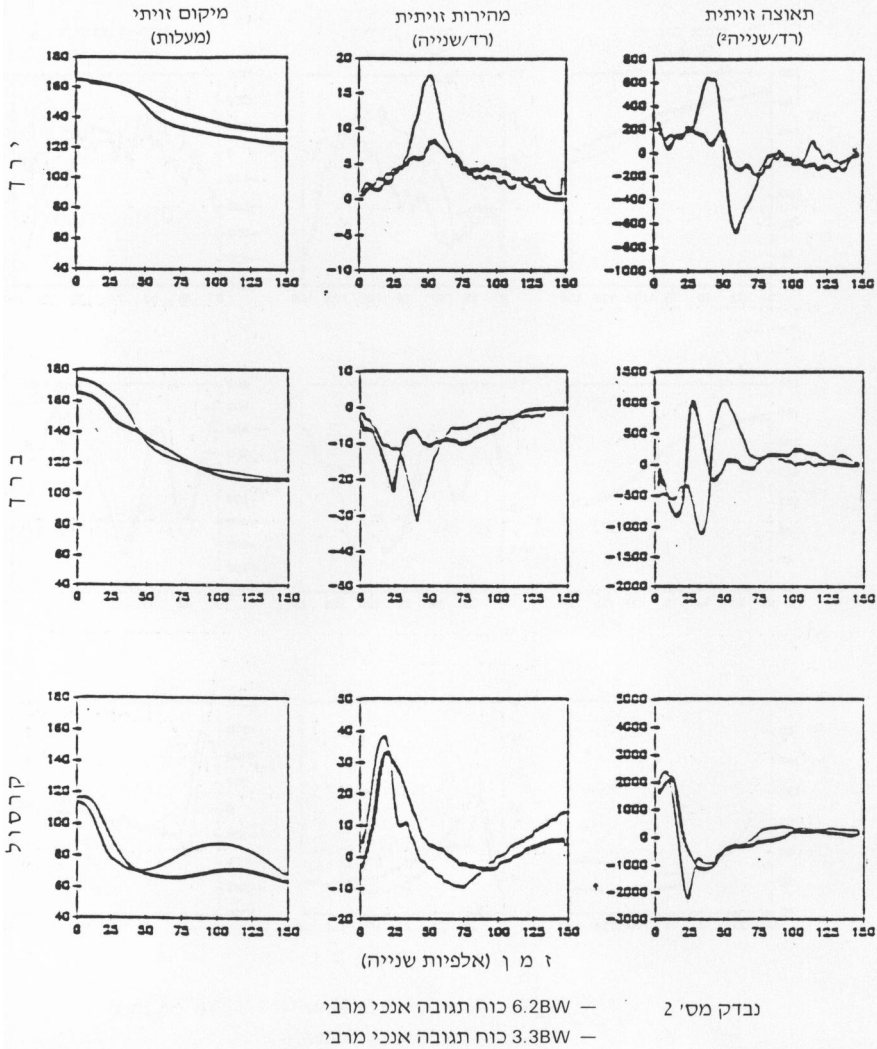




איור 5:

**הקינמטיקה של הביצוע הטוב ושל הביצוע הגרוע במפרקי הירד, הברך והקרסול
בנחיתה אנכית, של נבדק (הבדל גדול בין שני הביצועים)**

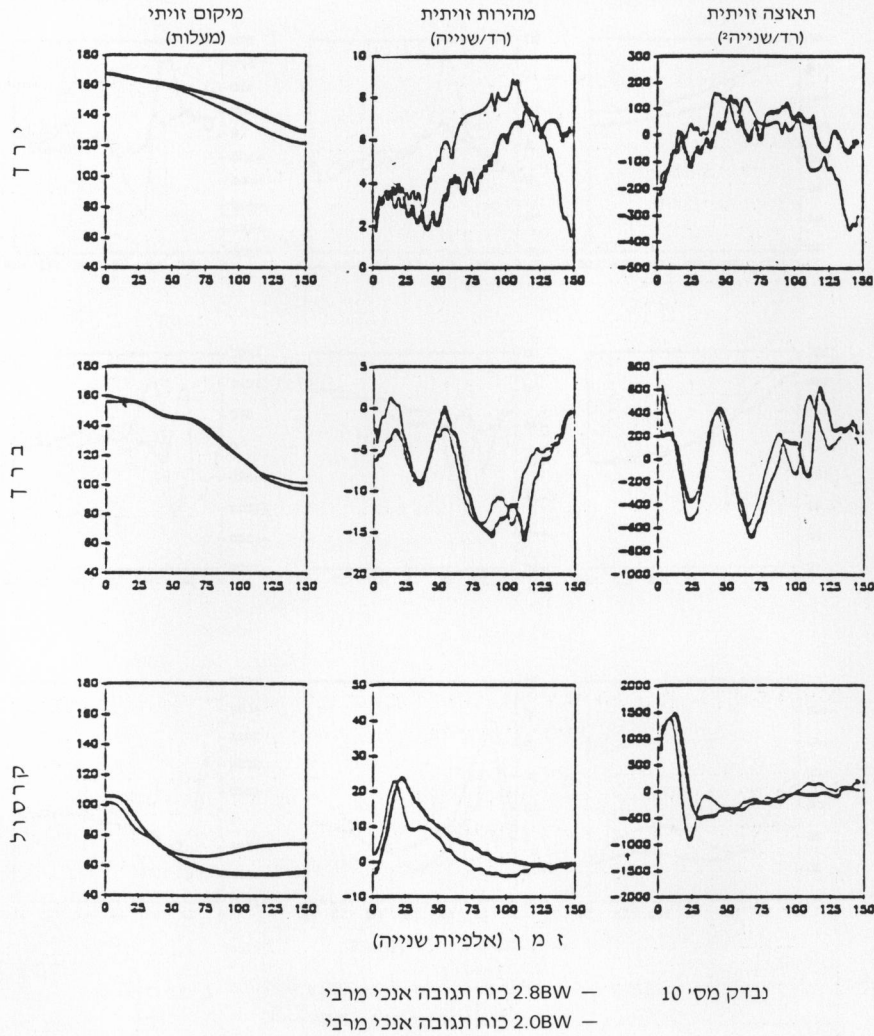
באיור 6, מוצגות התוצאות של נבדק, שהפער בין ערכי הביצוע הטוב ($3.3 \times BW$) לבין הביצוע הפחות טוב ($6.2 \times BW$), הינו טוב.



איור 6:

הקינמטיקה של הביצוע הטוב ושל הביצוע הגרוע במפרקי הירך, הברך והקרוסול בנחיתה אנכית, של נבדק (הבדל בינוני בין שני הביצועים)

באיור 7, מוצגות התוצאות של נבדק, שהפער בין ערכי הביצוע הטוב ($2.0 \times BW$) לעומת הביצוע הגרוע ($2.8 \times BW$), הינו קטן.



איור 7:

הקינמטיקה של הביצוע הטוב ושל הביצוע הגרוע במפרקי הירך, הברך והקרטול בנחיתה אנכית, מתוארת הקינמטיקה עבור הביצוע הטוב והביצוע הגרוע של נבדק (הבדל גדול בין שני הביצועים)

בלוח 1 מוצגים טווחי התאוצות הזויתיות של שלושת הנבדקים בניסיונותיהם הטובים ובניסיונותיהם הגרועים. בלוח 2 מוצגות המהירויות הזויתיות המרביות בנחיתות אלה.

לוח 1:

השוואה של טווח התאוצות הזויתיות במפרקי הגף התחתון, בין ניסיון טוב לבין ניסיון גרוע (שלושה נבדקים)

נבדק	VGRF מרבי (BW)	כפיפת ירך		כפיפת ברך		כפיפה גבית	
		תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)	תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)	תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)	תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)	תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)	תאוצה מרבית (רד/שנייה ²)
		שליטת חיובית	שליטת חיובית	שליטת חיובית	שליטת חיובית	שליטת חיובית	שליטת חיובית
6	3.9	+200	-180	+500	-500	+1800	-1000
	8.6	+500	-400	+1000	-1800	+1800	-3000
2	3.3	+200	-180	+1000	-700	+2000	-1000
	6.2	+600	-700	+1000	-1100	+2200	-2100
10	2.0	+140	-120	+200	-400	+1500	-500
	2.8	+140	-350	+400	-600	+1500	-800

לוח 2:

השוואה של המהירויות הזויתיות המרביות במפרק הגף התחתון, בין ניסיון טוב לבין ניסיון גרוע (שלושה נבדקים)

נבדק	VGRF מרבי (BW)	כפיפת ירך		כפיפת ברך		כפיפה גבית	
		מהירות מרבית (רד/שנייה)	מהירות מרבית (רד/שנייה)	מהירות מרבית (רד/שנייה)	מהירות מרבית (רד/שנייה)	מהירות מרבית (רד/שנייה)	מהירות מרבית (רד/שנייה)
6	3.9	7.0	*-10.0	28.0			
	8.6	12.0	-30.0	45.0			
2	3.3	7.0	-21.0	32.0			
	6.2	18.0	30.0	38.0			
10	2.0	7.0	-15.0	25.0			
	2.8	9.0	-14.0	22.0			

* הסימון השלילי בכפיפת הברך, נובע מכיוון תנועה הפוך לכפיפת הירך ולכפיפה הגבית בקרסול.

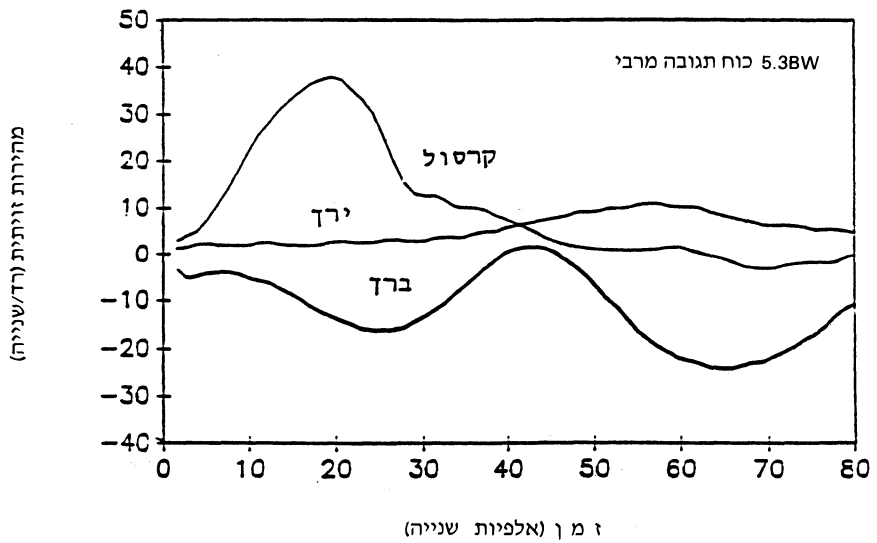
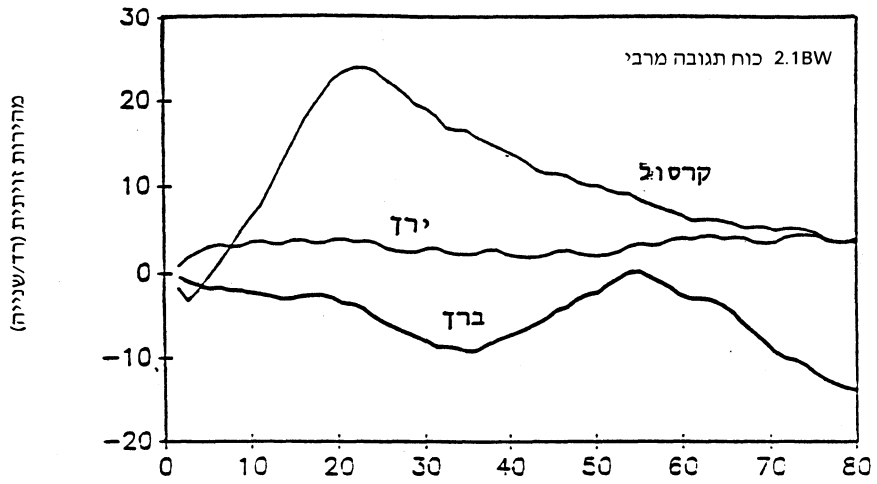
באיור 8 בולטים ההבדלים בתזמון התנועה של מפרקי הקרסול והברך בין נחיתה טובה לבין נחיתה טובה פחות. ניתן להבחין שהתזמון הוא על פי הסדר הבא:

- ★ האצה בקרסול
- ★ האצה בברך
- ★ האטה בקרסול
- ★ האטה בברך.

בנחיתה טובה, התחלת ההאצה בברך היא כמעט בו-זמנית להאטה בקרסול.

בנחיתה טובה פחות, התחלת ההאצה בברך מקדימה בצורה משמעותית את תחילת ההאטה בקרסול.

ההבדלים הללו בתזמון התאוצות והתאטות במפרקים מאפיינים את כל הנחיתות הטובות לעומת הנחיתות הגרועות, שנבדקו בעבודה זו. בירך לא נמצא דפוס ברור בתזמון, ובדרך כלל, נחיתה טובה מאופיינת בעוצמות ובשינויי מהירות קטנים יחסית.



איור 8:

הבדלים בתזמון של מפרקי הירך, הברך והקרסול בנחיתה אנכית

דיון

אילוצים וקשיים בקואורדינציה תנועתית יעילה בנחיתה

ממחקרים קודמים, שהתמקדו בנחיתה האנכית, עולה, כמסקנה כללית, הצורך בתיאום מורכב בין החוליות כגורם אפשרי להפחתת הכוחות הפועלים על הגוף בבלימה (Lees, 1981; Panzer, et al., 1988) תוצאות המחקר מתארות את תפקידן של תנועות הקרסול והברך בהפחתת עצמת כוחות ההלם, הפועלים על הגוף בנחיתות אנכית. אולם, השליטה בתיאום שבין המפרקים אינה פשוטה כלל ועיקר. בניתור אנכי נמצא, **שיעילות הביצוע פוחתת ככל שמשתתפות בו מספר חוליות רב יותר** (Luhtanen & Komi, 1978). ירידה זו הוסברה בכך, **שככל שדרגות החופש הן רבות יותר, כך גוברת המורכבות של הבקרה על התנועה**. ומכאן, שהאפשרויות לשגיאות בתזמון, רבות יותר.

מורכבות דומה אפשר למצוא בנחיתה האנכית. התזמון הבין-מפרקי מתרחש בפרקי זמן קצרים ביותר. הזמן הכולל, שהוגדר **כספיגת האימפקט** נמשך כ-0.15 עד 0.20 שניות (Lees, 1981). במשך זמן זה נבלם רוב התנע האנכי של הגוף. המחקר הזה מתמקד בפרק הזמן הראשוני של כלל הבלימה, **מרגע המגע עם הקרקע ועד להתפתחות השיא השני** (P2) בעקומת ה-VGRF. פרק זמן זה, שהוגדר כ-TP2, נמשך בין 0.04 ל-0.07 שניות. **בזמן קצר זה, צריך לבצע במפרקים תנועה מתוזמנת ומדויקת במטרה לבלום את המהירות של מרכז הכובד, כך שהכוחות שיפעלו על הגוף בשיא השני, יהיו מזעריים**. חשוב להדגיש, שזהו פרק זמן קצר מכדי לאפשר תיקונים רצוניים בתגובה למשוב תחושת (Marteniuk, 1976). על כן, פעולת השרירים מוכתבת על ידי תכנית מוטורית שעל המבצע להכין מראש בהתאם להערכתו את נסיבות ההתנגשות עם הקרקע. אלה כוללות את מהירות ההגעה, את המאפיינים האלסטיים של משטח הנחיתה, את תנוחת הגוף ביחס למשטח ואת התנחות היחסיות בין חוליות הגוף. קשיי השליטה בתנועה באים לידי ביטוי בשונות שבין הנבדקים ובשונות בין הניסיונות השונים אצל כל נבדק.

הקשר בין כוחות ההלם לבין התזמון הבין-מפרקי

עקומת ה-VGRF משקפת את בלימת מהירותו של מרכז הכובד של הגוף מרגע המגע עם הקרקע. ניתן לקשור אירועים מרכזיים בעקומת ה-VGRF להתחלת התנועה

במפרקים של הרגליים (Tavi, 1991). על פי ממצאיו, יש לחלק את עקומת הבלימה לשני שלבים עיקריים:

★ **השלב הראשון.** הזמן עד לשיא הראשון (TP1) נע בין 6.5 ל-15.3 אלפיות השנייה. בפרק זמן זה התנועה הזויתית במפרקים היא מזערית. על כן ניתן להגדירו כשלב של **בלימה פסיבית**. תיאור זה תואם את **התדירות הגבוהה עם כוחות פסיביים**, ללא בקרה פעילה של מערכת השרירים (Nigg, Denoth & Neukomm, 1981).

★ **השלב השני.** מהתחלת התנועה בקרסול ועד לסוף הבלימה, הוגדר כשלב ה**בלימה האקטיבית** (Tavi, 1991). בשלב זה הבלימה נעשית על ידי תזמון הפעילות במפרקים בין החוליות השונות. נמצא, כי התנועות העיקריות מהשיא הראשון (P1) ועד לשיא השני (P2) הן במפרקי הקרסול והברך. הירידה בערכי ה-VGRF לאחר P1, מתוזמנת עם התחלת הכפיפה הגבית בקרסול, והעלייה לאחר M1 מתוזמנת עם התחלת הכפיפה בברך. הירידה לאחר P2 נוטה להיות מתוזמנת עם התחלת הכפיפה בירך, אם כי זאת באופן פחות ברור.

ואולם, כאשר עוסקים בבעיה של התיאום הבין-מפרקי, לא די לדון בזמני הפעולה במפרקים השונים. יש לנסות להבין גם את **איכות** הפעולה של המפרקים. כלומר, לבחון הן את התזמון בין המהירויות והתאוצות הזויתיות היחסיות במפרקים והן את הערכים של פרמטרים אלו.

במחקר הזה נמצא סדר כרונולוגי אופייני וקבוע למשתנים הקינמטיים בפרק הזמן שבין TP1 ל-TP2, כלהלן (איורים 5 – 8):

- ★ האצה בקרסול
- ★ האצה בברך
- ★ תאוטה בקרסול
- ★ תאוטה בברך
- ★ האצה בירך.

במשתנים אלה באים לידי ביטוי כמה הבדלים ברורים בין נחיתות טובות לבין נחיתות גרועות.

השוואה בין נחיתות טובות לבין נחיתות גרועות

בתחום שבין TM1 ל-TP2 קיימת זיקה בתזמון בין תאוצות ומהירויות זויתיות במפרקי הברך והקרסול לבין השיפוע של עקומת ה-VGRF. בנחיתה טובה (ערכי

VGRF מרביים נמוכים) מתרחשת התחלת ההאצה בברך כמעט בו-זמנית עם התחלת התאווה בקרסול. לעומת זאת, בנחיתה טובה פחות, קיים הפרש זמן ממושך יותר בין שני האירועים האלה (איור 8). האופי המהיר של תזמון פעולת הבלימה בין הקרסול ובין הברך, והרגישות לשינויים קטנים בתזמון, מקשים על הגדרת נורמות כמותיות להשוואת התזמון בביצועים טובים לעומת ביצועים טובים פחות. בביצוע טוב התזמון הוא ברור: **התחלת ההאצה בברך מתרחשת כמעט בו-זמנית עם התחלת התאווה בקרסול**. ביצועים טובים פחות ניתנים להגדרה על דרך השלילה. כלומר, ניתן להבחין, שהם שונים מתזמון בביצוע הטוב, אך לא ניתן למצוא חוקיות קבועה בין דפוסי ההתנהגות של הפרמטרים השונים לבין התוצאה. אין להוציא מכלל אפשרות, **שמספר הקטגוריות של ביצועים לא טובים הוא מרובה, ולכל אחד מהם מאפייני תזמון כושל שונים**.

כדי להדגיש יותר את הבעייתיות בהבנת התופעה יש לזכור, שהשרירים המשתתפים בתהליך הנחיתה, ואשר בעצם אחראיים לתזמון בתנועת המפרקים, הם ברובם שרירים דו-מפרקיים (Rectus Femoris, Gastrocnemius, Hamstrings). עקב הדו-מפרקיות, כל השרירים פועלים במשך כל זמן הבלימה. היות ופעילותם של השרירים הדו-מפרקיים גורמת לשינויים קינמטיים בכל שרשרת החוליות בו-זמנית, לא ניתן לבדוד את ההשפעה של קבוצת שרירים מסוימת במפרק מסוים. הסבר זה נתמך על ידי חוקרים אחרים (Zajac & Gordin, 1989) המציינים, כי פעילותם של שרירים רב-מפרקיים מאיצה לא רק במפרקים ששרירים אלו חוצים אותם, אלא גם במפרקים מרוחקים יותר. לפיכך, חריגות קטנות מתזמון אופטימלי בפעולות מסוימות של שרירים יכולות לגרום למגוון תוצאות קינמטיות במפרקים.

בנוסף לתזמון, יש חשיבות גודל של הפרמטרים הקינמטיים במפרקים בשלבי ההאצה ובשלבי ההאטה. נמצאו **הבדלים ברורים בערכים של התאוצות ושל המהירויות הזוויתיות בין נחיתות טובות לבין נחיתות גרועות של אותו נבדק**. למשל, במקרה של נבדק מס' 6 (לוח 1), אובחנו הבדלים גדולים בערכים של ה-VGRF בין הביצועים. ההפרשים בערכי התאוצה הזוויתית בקרסול מגיעים עד לכדי 40%, ואף ההפרשים בין המהירויות הזוויתיות בקרסול בערכיהם המרביים, נמצאו קרובים ל-40%. לעומת זאת, **בהשוואה בין יחידים, שנחתו נחיתות טובות לבין אחרים, שנחתו נחיתות טובות פחות, לא ניתן להתייחס לגדלים המוחלטים של התאוצות ושל המהירויות משום שקיימת שונות רבה בין הנבדקים**. עדות לכך ניתן למצוא בהשוואה בין נבדק מס' 6 לבין נבדק מס' 10 (לוח 1). כמעט שאין הבדל בערכי התאוצה הזוויתית בברך בין הביצוע הטוב של נבדק מס' 6 לבין הביצוע הגרוע של

נבדק מס' 10 למרות ההבדלים המשמעותיים בערכים של ה-VGRF. את תשומת הלב יש למקד בשינויים היחסיים אצל אותו נבדק: בין הנחיתות, שבהם ערכי ה-VGRF גדולים לבין הנחיתות, שבהם ערכי ה-VGRF קטנים. מסקנה זו מובילה להערכה, שבנוסף ליכולת האישית ביישום המיומנות, יש לכל נבדק אסטרטגיה של נחיתה אישית ייחודית. אסטרטגיה זו קשורה, קרוב לוודאי, למאפיינים אנטומיים, פיזיולוגיים ופסיכולוגיים של המבצע.

בהשוואה בין נחיתות טובות לבין נחיתות גרועות, ניתן להתייחס גם לצורה הכללית של העקומות. התנע האנכי, שיש לבלום בנחיתה מסוימת, נקבע על ידי מהירות הפגיעה בקרקע. מבחינה תיאורטית, כדי שהנחיתה תהיה טובה, רצויה חלוקת כוח מאוזנת. כלומר, שהתאווטה של מרכז הכובד של הגוף תאופיין בערכים נמוכים ושווים (או דומים), ככל שניתן, במשך כל זמן הבלימה. באיורים 5 עד 7 העקומות של הפרמטרים הקינמטיים בנחיתות טובות חלקות יותר (כלומר, מאופיינות בשינויי כיוון מעטים), מאותן העקומות בנחיתות הגרועות, שהן גליות יותר (שינויי כיוון רבים יותר). התאוצה של מרכז הכובד נקבעת, בכל עת, על ידי הערכים הקינמטיים היחסיים בין החוליות. עקומות קינמטיות, המאופיינות בשינויים רבים במהירויות ובתאוצות הזוויתיות, משקפות תופעה של פיצוי בערכים גבוהים על ערכים נמוכים יחסית. עובדה זו תוביל בהכרח לעקומה של נחיתה גרועה.

סיכום

מתוצאות מחקר זה ניתן ללמוד על המורכבות של מיומנות הנחיתה. העמקה בניתוח הקואורדינציה, המאפיינת נחיתות טובות, מבליטה כמה גורמים קינמטיים, הקשורים לאיכות הביצוע. אולם, בהערכת חשיבותם היחסית של הפרמטרים הקינמטיים האלה, לא ניתן להפריד את הפרמטרים למרכיביהם ולטעון, שפרמטר מסוים חשוב יותר מפרמטר אחר, או שתנועת מפרק אחד דומיננטית יותר מתנועת מפרק אחר. ממצאים אלה עולים בקנה אחד עם השגותיו של ווינטר (Winter, 1984), שמצא בביצועים חוזרים, כי סך כל המומנטים התומכים הוא עקבי יותר מאשר כל אחד מהמומנטים היחידים. משתמע מכך, כי אצל כל פרט, הארגון של התנועה אינו תלוי בייצוב משתני תנועה יחידים, אלא בדפוס הרב-משתני, שהוא שילובם של משתני התנועה היחידים. במחקר זה נמצא דפוס כזה במכלול הפרמטרים הקינמטיים בקרסול ובברך. נראה, בשלב זה, שהדרך היחידה להבנתה ולשיפורה של מיומנות הנחיתה היא על ידי בחינת התזמון של המשתנים הקינמטיים על פי בסיס איכותי, דהיינו בחינה של מאפייני הרישומים הקינמטיים ביחס למודל שתואר.

רשימת המקורות

- Ayalon, A. & Ben-Sira, D. (1988) The mechanical changes during learning of a landing skill through various feedback methods. In: G. Groot, P.A. Hollander, P.A. Huijing & G.J. Van Ingen Schenau (Eds.), **Biomechanics, XI-B** 679-684 Amsterdam: Free University Press.
- Hinrichs, R., Werner, P.H., Rink, J.E., Jackman, T.W. & Josephs, R.A. (1985). Impact forces upon landing from a height in children. **Journal of Biomechanics, 14**, 135-142.
- Gross, T.S. & Nelson, R.C. (1988) The shock attenuation role of the ankle during landing from a vertical jump. **Medicine and Science in Sports and Exercise, 20**, 506-515.
- Lees, A. (1981). Methods of impact absorption when landing from a jump. **Engineering in Medicine, 10**, 204-211.
- Luhtanen, P. & Komi, P. (1978). Segmental contribution to forces in vertical jump. **European Journal of Applied Physiology, 38**, 181-188.
- Marteniuk R. G., (1976). **Information processing in motor skills**. New-York: Holt, Rinehart and Winston.
- Nigg, B.M., Denoth, J. & Neukomm, P.A. (1981). Quantifying the load on the human body: Problems and some possible solutions. In: A Morecki, K. Fidelius, K. Kedzior & A Wit (Eds.), **Biomechanics, VII-B**, 89-99. Baltimore University Park Press.
- Panzer, V.P. Wood, G.A. Bates, B. T. & Mason, B. R. (1988). Lower extremity loads in landing of elite gymnasts. In: G. Groot, P. A. Hollander,, P. A. Huijing, & G.J. Van Ingen Schenau (Eds.), **Biomechanics, XI-B**, 727-735. Amsterdam: Free University Press.
- Tavi, M. (1991). A dynamic model of the human body in vertical landing. Unpublished doctoral dissertation, Ben-Gurion University, Beer-Sheva.

- Valiant, G. A. & Cavanagh, P. R. (1985). A study of landing from a jump: Implication for the design of a basketball shoe. In: D. A. Winter, R. W. Norman, R. P. Wells, K. C. Hayes & A. E. Patla (Eds.), **Biomechanics IX-B**, (117-122). Illinois: Human Kinetics Publishers.
- Winter, D. A. (1990). **Biomechanics of Human Motion**, New York: John Wiley & Sons.
- Zajac, F. E. & Gordin, M. E. (1989). Determining muscle's force action in multi-articular movement. **Exercise and Sport Sciences Reviews**. 17, 187-230.