

# תרומת הביומכניקה לאימון הספורטיבי

העין האנושית אינה מסוגלת לכמת תנועה, וגם צילום מהיר יתקשה לזהות בבירור את הפרמטרים המכניים של התנועה (מהירויות, כוחות, מומנטים ועוד). זהו בדיוק תפקידו של המומחה לביומכניקה. הוא יכול לזהות - בעזרת ניתוח ביומכני של התנועה - שגיאות של הספורטאי ואף לפרש את משמעות הנתונים ולייעץ למאמן כיצד ליישם את התיקון בשטח. שתי קפיצות למרחק של יוחאי הלוי נותחו מבחינה ביומכנית, וההשוואה ביניהן מציבה אתגר בפני המאמן והספורטאי - למצוא דרך לנצל את הפוטנציאל של המהירות האופקית.

**פרופ' זוד בן סירא** | חבר הסגל האקדמי  
המכללה האקדמית בווינגייט  
ben-sira@wincol.ac.il



**פרופ' משה איילון** | מנהל המעבדה לביומכניקה  
המכללה האקדמית בווינגייט  
m-ayalon@wincol.ac.il

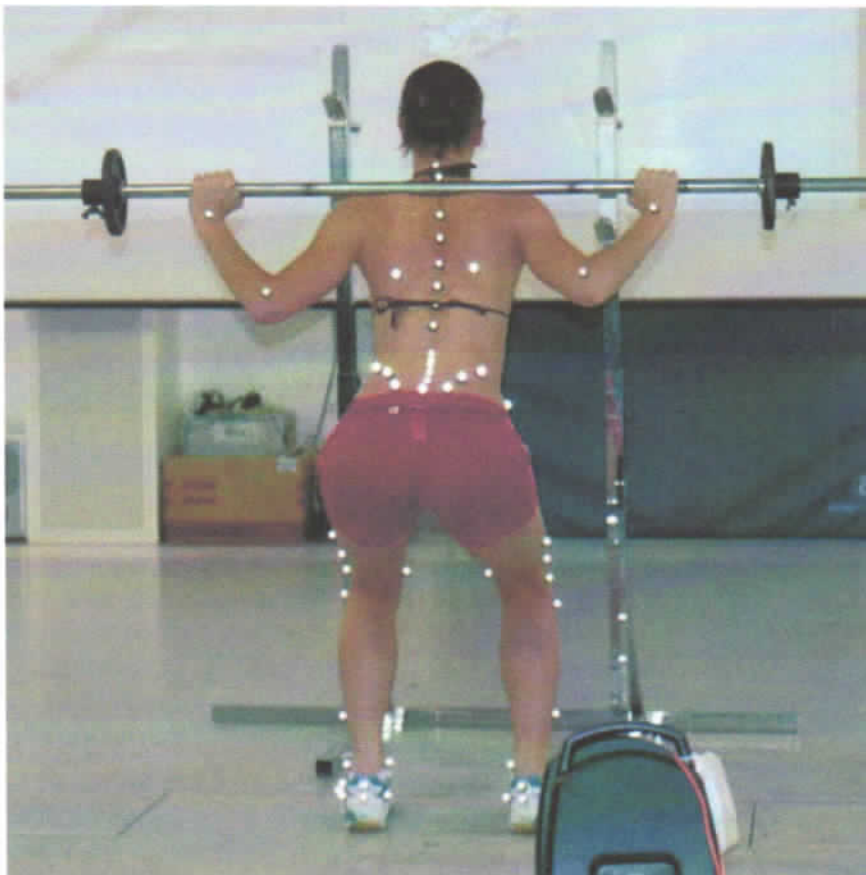


ביומכניקה הוא מדע העוסק, בין היתר, בחקר הכוחות הפועלים על גוף האדם בזמן פעילות גופנית ובהשפעתם על התנועה והעומסים הפועלים על הגוף. בספורט התחרותי, לעקרונות הביומכניים ישנם שני יישומים מרכזיים: א. השבחת הביצוע הספורטיבי להן. ב. מניעת פציעות או הפחתת הסיכון להן.

הדעות בעולם הספורט חלוקות לגבי התרומה של הביומכניקה לספורט התחרותי. מצד אחד, ישנם המאמינים בחיוניות ובתרומה הממשית לספורט בכלל ולספורט התחרותי בפרט, ומצד שני יש לא מעט המאמינים כי ביומכניקה של הספורט תורמת מעט לביצועים ספורטיביים, ועיקר תרומתה בכך שהיא מעגנת, במונחים מדעיים, את מה שהמאמנים כבר גילו. במאמר זה ננסה לעמוד על הדרך והגישה שבהן הביומכניקה של ספורט יכולה לתרום באופן משמעותי להעלאת רמת הביצועים של ספורטאים.

**בתמונות: ניתוחים תנועתיים  
במעבדות לביומכניקה**





בדרך כלל, המאמן מכיר את התנועה היטב, אך בחלק גדול מהמקרים הוא אינו מכיר את העקרונות המכניים הרלוונטיים ואינו מנוסה ביישומם לשם ניתוח המיומנות מבחינה איכותית

המדע. האחרון משתמש בדרך כלל במונחים ובעקרונות ביומכניים. המאמן, לעומתו, משתמש בדרך כלל במונחים של הספורט הספציפי או בז'רגון של השטח, או אפילו במונחים עצמיים שפיתח כתוצאה מניסיונו. מציאת 'שפה משותפת' בין השניים היא חיונית הן בשלב תכנון הייעוץ הביומכני והן במהלכו. הבנת הממצאים על-ידי המאמן איננה באחריותו של אחד מהם בלבד אלא של שניהם יחד.

### זיהוי המשתנים הקריטיים

היבט מרכזי בהקשר זה הוא זיהוי המשתנים הקריטיים הרלוונטיים לניתוח התנועה. זהו תפקיד מרכזי וקשה, המוטל על הביומכניסט בהתאם לצרכים שהוגדרו על-ידי המאמן. עליו לזהות את המשתנים הקריטיים על-פי השכל הישר (הכרתו את העקרונות הכלליים של הביומכניקה) ועל-פי ספרות המחקר הספציפית למיומנות המוערכת. בהתאם למשתנים קריטיים אלה ייבחרו כלי המדידה, תדירות איסוף הנתונים ופרמטרים מתמטיים לניתוח הנתונים הכמותיים שנאספו. יש לאתר את המשתנים הקריטיים ביותר, המשפיעים על איכות התנועה, ולהבחין בין משתנים קריטיים להשבת המיומנות או להורדת הסיכון לפציעה לבין אלה שהשפעתם

יכולה לספק רק מענה מוגבל לזיהוי שגיאות טכניות בשלבים מתקדמים של המיומנות. אף המומחה לביומכניקה, שמכיר את העקרונות טוב יותר, עשוי להתקשות בניתוח איכותי של תנועה מורכבת של חלקי גוף שונים, המתרחשת במהירויות גבוהות. העין אינה יכולה לכמת את התנועה, וגם בצילום מהיר קשה לזהות בבירור את הפרמטרים המכניים של התנועה כגון מהירויות, תאוצות, כוחות, מומנטים, תנע, מתקף וכד', שהם קריטיים להבנת התנועה וגורמיה. כל אלה מצריכים ניתוח כמותי שעומד לרשותו של המומחה לביומכניקה. כאן תרומתו העיקרית לתהליך האימון.

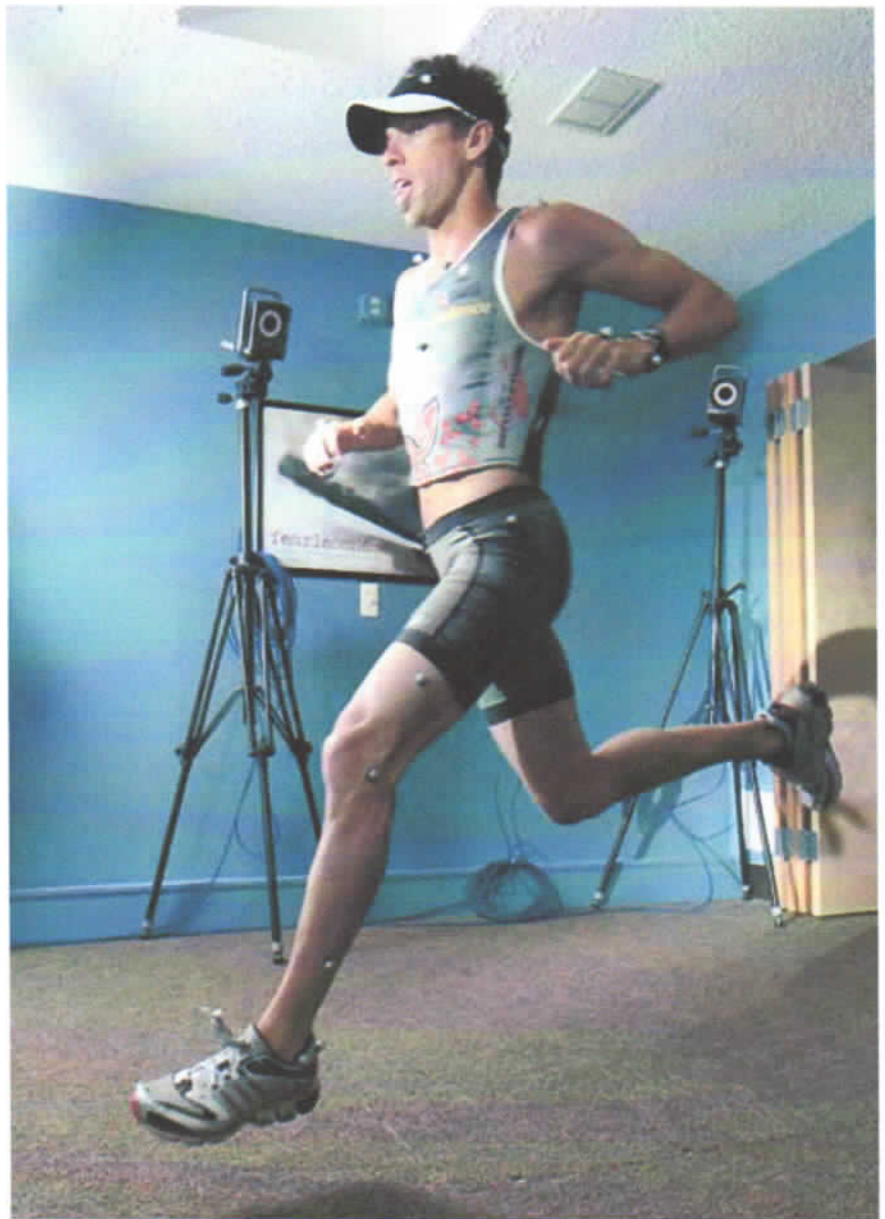
חשוב לציין כי הייעוץ הביומכני אינו תחליף לאימון, אלא מערך ייעוץ שמטרתו לתמוך בהחלטות המאמן. תרגום הממצאים הביומכניים לאסטרטגיית אימונים, הנחיות לשינוי התנועה ותרגילי עזר הם באחריותו של המאמן. כדי שייעוץ ביומכני יהיה אפקטיבי יש צורך להפוך את המידע הביומכני הכמותי למושגים, שעל-פיהם יכול המאמן לקבל החלטות באשר להתאמת דפוס תנועה ולתכנון תהליך האימון. לפיכך נחוצה טרמינולוגיה משותפת בממשק שבין המאמן לאיש

### הביומכניסט והמאמן

אנשי הביומכניקה, כמו גם מאמנים וספורטאים, שותפים לאותן מטרות הישגיות, ולמרות זאת קיים עדיין פער בין החוקרים לבין אנשי השטח. המאמנים מעריכים בדרך כלל את ביצועי הספורטאי ואת יעילות תכנית האימון על בסיס תוצאות התחרות, מבחינה שדה ובדיקה ויזואלית איכותית. במקרים רבים, קריטריונים אלה מספקים את הצרכים, אך לעתים אין ביכולתם לזהות את המנגנונים המכניים של התנועה (אינטראקציה של תנועות במפרקים שונים) ומכאן הקושי בזיהוי שגיאות בביצוע. מצד שני, מומחי הביומכניקה 'מואשמים' במתן חשיבות יתר למתודולוגיה, ללא שימת דגש על חשיבה מעשית הניתנת להעברה וליישום בקלות לאנשי השטח.

ניתוח כמותי או איכותי של תנועה תלוי בהבנת העקרונות המכניים (חוקי ניוטון) ויישומם בהקשר של מגבלות גוף האדם ואילוצי דרישות התנועה הספציפית של התחום הספורטיבי. בדרך כלל, המאמן מכיר את התנועה היטב, אך בחלק גדול מהמקרים הוא אינו מכיר את העקרונות המכניים הרלוונטיים ואינו מנוסה ביישומם לשם ניתוח המיומנות מבחינה איכותית. גם הכרה של העקרונות הללו

יש לאתר את המשתנים הקריטיים ביותר, המשפיעים על איכות התנועה... תפקיד המאמן בהקשר זה הוא להצביע בפני הביומכניסט על נקודות תורפה שהוא מזהה בביצועי הספורטאי, על סמך ההיכרות עמו



הידועים אלא גם על הכרת הספרות והמשתנים שזוהו במחקר כקריטיים למיומנות זו או לכאלה הדומות לה.

### הליך ההתערבות

היבט נוסף הוא בחירת הליך התערבות. הספרות המדעית אינה משופעת בראיות לגבי עיצוב אסטרטגיית התערבות בטכניקת התנועה על בסיס פרמטרים ביומכניים. כמו כן, קיים קושי לקבוע עד כמה התערבות ביומכנית היא אפקטיבית בתהליך האימון, שכן האפקט של התערבות כזו אינו מבודד, והוא מעורב באפקטים אימוניים אחרים הכלולים בתכנית האימונים.

יש חשיבות לארגון ההתערבות לשינויים בתנועה בצורה היררכית. ספורטאי מתקשה להחיל כמה שינויים טכניים בו-זמנית. לכן על המאמן, בהתייעצות עם הביומכניסט, לקבוע סדר עדיפויות ולארגן על-פיו את שלבי ההתערבות. כך למשל, אין טעם להתערב בשלב הנחיתה של הקופץ למרחק, אם ישנם ליקויים טכניים בניתור שלו. יש להתחיל בשיפוץ המרכיב המקדים, שהוא גם הקריטי ביותר למרחק הקפיצה, ולאחר התאמתו להעריך מחדש את הליקויים בנחיתה.

### ייעוץ ביומכני

ייעוץ ביומכני כולל כמה היבטים חיוניים. ראשית, כלי מדידה לתיעוד כמותי של התנועה ולניתוחה. כלי המדידה העיקריים הם: תיעוד תנועות של חוליות הגוף וניתוחן באמצעות תהליך המבוסס על קינמטיקה הפוכה\* (Inverse Dynamic) (באמצעות צילום מהיר או מכשור אלקטרו-אופטי אחר); משטחי כוח המשמשים לתיעוד הכוחות

הכוללות מעוף, קשה להבנה על-ידי המאמן או הספורטאי. על הביומכניסט לאתר את הגורמים לוויסות משתנה זה (בדרך כלל פרמטרים של הניתור), כדי שבאמצעותם יוכל המאמן להנחות את הספורטאי.

חלק ממשתנים אלה עשויים להיות בלתי ניתנים להשפעה, או ניתנים להשפעה קטנה יחסית (למשל, אנתרופומטרייה או מבנה שריר). מבין האחרים יש לאתר את אלה שניתנים לשינוי ולבחור את אלה שיכולים לחולל את השינוי המהותי ביותר. על-פי זאת, יש להכין תכנית התערבות היררכית לטיפול בהתאמות השונות הנדרשות. זיהוי המשתנים הקריטיים מבוסס לא רק על ניתוח, על-פי השכל הישר, של העקרונות המכניים

מזערית, או שהם תוצאה של משתנים אחרים. המשתנים הרלוונטיים הם אלה הקשורים ישירות לתוצאות התנועה ביחס למטרה התנועתית, ושינוי בהם יכול להוביל להשגת המטרות בצורה טובה יותר.

בהליך זה עשוי להיות תפקיד גם למאמן, שיצביע בפני הביומכניסט על נקודות תורפה שהוא מזהה בביצועי הספורטאי, על סמך היכרותו עמו. לא כל משתנה שנמצא קשור לאיכות התוצאה הוא קריטי או עיקרי להתערבות. משתנה כזה יכול להיות תוצאה של משתנה אחר, שלמעשה משפיע עליו ועל התוצאה כאחד, או שהוא עשוי להיות משתנה שקשה לפרשנות מבחינת העיצוב של שינוי תנועתי. כך למשל, יוסות של תנע סיבובי, שהוא קריטי בתנועות שונות

\* שיטה ביומכנית המקובלת ביותר בספרות המדעית הבין-לאומית, שבאמצעותה ניתן לחשב את הכוחות והמומנטים שנוצרים ופועלים בגוף האדם במהלך ביצוע מיומנות כלשהי.



לבחון את השפעת תכנית ההתערבות ואת הליטושים הדרושים לשם השבחת המיומנות. יש חשיבות למעקב ולניתוח מתמשך של תכנית ההתערבות כדי לזהות שינויים, שיפור או נקודות תורפה נוספות הנובעות מההתערבות.

### דוגמה לניתוח ביומכני: קפיצה למרחק של יוחאי הלוי

במסגרת ההכנות למשחקים האולימפיים בבייג'ין 2008 התבקשנו על-ידי היחידה לספורט הישגי לבצע ניתוח ביומכני לכמה אתלטים וביניהם לקופץ למרחק יוחאי הלוי. הצילומים בוצעו במסגרת אימון בהדר-יוסף. בשיחה מוקדמת התבקשנו להתמקד במשתנים הביומכניים בשלב הניתוח. המטרה התנועתית של הניתוח היא לאבד מינימום מהירות אופקית ובו-בזמן לפתח מקסימום מהירות אנכית. כמו כן, הניתוק מהקרקע צריך להתבצע כאשר מרכז הכובד גבוה ככל האפשר. נציג כאן השוואה בין שתי קפיצות. התוצאה של הקפיצה הראשונה היא 7.10 מטרים ושל השנייה 7.30 מ'. השאלה שנשאלה היא - **מה הם הגורמים הביומכניים בשלב הניתוח, שעשויים להסביר את ההפרש של 20 ס"מ בין הקפיצות?**

באיורים 1 ו-2 (בעמוד הבא) ניתן לראות שבקפיצה שבה הושג מרחק

### לסיכום, ההליך של ייעוץ ביומכני לספורטאי כולל כמה שלבים עיקריים:

1. **זיהוי שגיאות או נקודות תורפה בביצוע על סמך ניתוח התנועה.** בהליך זה יש חשיבות לתיאום מושגים בין המאמן לביומכניסט ולהבנת המאמן את מהות השגיאה והגורמים לה. תפקידו של הביומכניסט הוא לפרש עבור המאמן את משמעות הנתונים מבחינת דפוס התנועה ביחס למטרה הספורטיבית, כך שהמאמן יוכל לתרגמה לתכנית התערבות אפקטיבית.
2. **זיהוי ההליכים הנדרשים לתיקון שגיאות.** כאן יש לגשר בין השינוי הנדרש בפרמטרים הביומכניים לבין עיצוב הגירוי והתוכן האימוני שצריך להוביל לשינוי בהם. מבחינת תכנון האימון, השינוי הנדרש עשוי לכלול גם פרמטרים לא ביומכניים כגון מרכיבים פיזיולוגיים או נירולוגיים (למשל, במקרה של צורך בשיפור מהירות תנועה).
3. **יישום תהליך תיקון השגיאות בתכנית האימון.** לתהליך זה אחראי המאמן, והביומכניסט יכול לשמש לו כיועץ. יש לזכור כי בתכנית אימונים כוללת של הספורטאי ישנם מרכיבים רבים, ועל המאמן להחליט מתי וכיצד לשלב את התיקון הטכני הנדרש ובהתאם לכך לתכנן את כלל תהליך האימון.
4. **הערכת האפקטיביות של ההתערבות.** חלק זה הוא חובה, אם מבקשים

הפועלים בין הגוף למשטח חיצוני; אלקטרומיוגרפיה המשמשת לניתוח הפעולה והתזמון של שרירים עיקריים המשתתפים במיומנות; דינמומטרים שונים למדידת כוחות; מדי תאוצה; אמצעים להתפלגות לחצים ועוד. לכל אחד מאמצעים אלה יתרונות וגם נקודות תורפה, שעל הביומכניסט לשקול אותן בהתאם לרלוונטיות ולתרומה של השימוש בהם לייעוץ הנדרש. לא אחת הביומכניסט משלב יותר מאמצעי אחד, בהתאם למשתנים הקריטיים לתנועה המנותחת.

בין הבעיות העיקריות ביישום ייעוץ ביומכני בספורט ניתן לציין את:  
א. יוקר המכשור הנדרש לניתוח תנועה והשימוש בו  
ב. משך הזמן הנדרש לניתוח תנועה ולפרשנותה.

על-אף הניתוח הממוחשב הקיים כיום, הרי בניתוח תנועה מורכבת, המבוססת על דיגיטציה של חוליות הגוף בתנועה הנדגמת, לא ניתן בדרך כלל לתת משוב מיידי בעת איסוף המידע או מיד לאחריו, ונדרש זמן לעיבוד הנתונים ולהערכת המשתנים הקריטיים לתוצאת הביצוע. קיצור התהליך בעתיד עשוי להוביל להגברת השימוש בו באימון.

הניתוח הביומכני של התנועה רלוונטי במיוחד לענפי ספורט שבהם התוצאה תלויה פחות במרכיבים טכניים של התנועה ובמשקלה, יחסית למקצועות תלויי יכולת פיזיולוגית, בעיקר יכולת אירובית. עם זאת, גם במקצועות אלה, כמו ריצה למרחקים ארוכים, לביומכניקה עשוי להיות תפקיד מרכזי בייצור הנעלה מתאימה, בזיהוי בעיות פתולוגיות והתאמת מדרסים מורדי סיכון ואפילו בזיהוי נקודות תורפה בפרופיל הכוח של הרץ כדי לחזק את נקודות התורפה שלו.

הביומכניקה חשובה ביותר להשבחת התנועה במיומנויות סגורות: כאלה המבוצעות בתנאי סביבה קבועים יחסית, שם ניתן להתאים דפוס תנועה אחיד וקבוע למטרה התנועתית. אך הביומכניקה חשובה גם בניתוח של מיומנויות פתוחות, שבהן האילוצים הסביבתיים אינם מצריכים התאמות שונות של התנועה, כמו במקצועות קרב או במשחקי כדור. גם בענפים אלה ניתן לזהות שגיאות בסיסיות במבנה התנועתי כגון בתנועות הניתוח והזריקה של שחקן כדוריד, תנועת שינוי כיוון של שחקן כדורגל, תנועת ניתוח של שחקן כדורעף או חבטת גב יד של שחקן טניס.



יוחאי הלוי

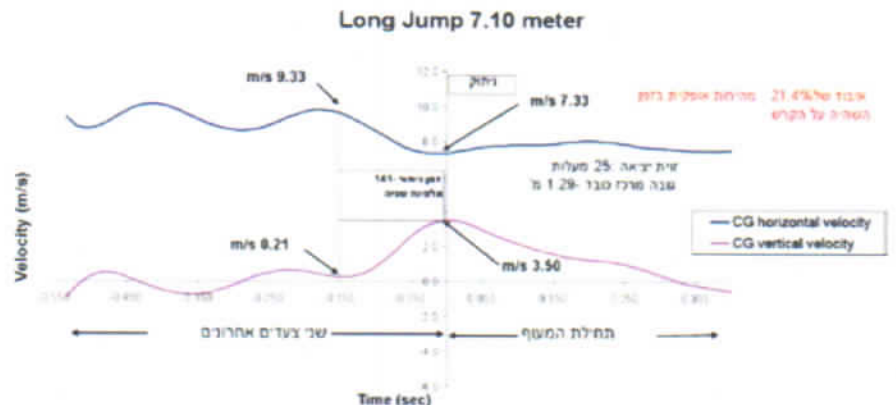
הפן המעשי של תוצאות הקפיצות של יוחאי הלוי הוא שאמנם קיים פוטנציאל הגעה לניתור במהירות אופקית גבוהה, אך זו מבוזבזת בניתור. לעומת זאת, הגעה במהירות איטית יותר משפרת את כל הפרמטרים האחרים ברגע הניתוק מן הקרקע

קצר יותר, המהירות האופקית בהגעה לניתור היתה גבוהה יותר (9.33 מ'/שנ' לעומת 8.89 מ'/שנ'), אך ברגע הניתוק מהקרקע המהירות האופקית בשני המקרים היתה זהה כמעט (7.32 ו-7.33 מ'/שנ'). המשמעות היא איבוד של 21.4% מהמהירות האופקית במקרה הראשון לעומת 17.6% במקרה השני. למרות זאת, התוצאה במקרה השני היתה טובה יותר. ההסבר לכך הוא:  
 א. במקרה השני הצליח הקופץ לפתח מהירות אנכית גבוהה יותר ברגע הניתוק (3.57 מ'/שנ' לעומת 3.50 מ'/שנ').  
 ב. מרכז הכובד ברגע הניתוק היה גבוה ב-8 ס"מ.  
 הפן המעשי של התוצאות הנ"ל, מבחינת

למצוא את הדרך לנצל את הפוטנציאל של המהירות האופקית. המשך המעקב של המאמן והביומכניסט אחר השינויים במרכיבי הניתור עשוי לספק משוב על השיפור של היבט ספציפי זה בניתור של הספורטאי. במקרה הנוכחי לא נערך מעקב נוסף.

המאמן, הוא שאמנם קיים פוטנציאל הגעה לניתור במהירות אופקית גבוהה, אך זו מבוזבזת בניתור. לעומת זאת, הגעה במהירות איטית יותר משפרת את כל הפרמטרים האחרים ברגע הניתוק. המסקנה מממצאים אלו היא כי האתגר הניצב בפני המאמן והספורטאי הוא

איור 1:  
ניתוח ביומכני של הקפיצה למרחק של יוחאי הלוי בתוצאה של 7.10 מ'



איור 2:  
ניתוח ביומכני של הקפיצה למרחק של יוחאי הלוי בתוצאה של 7.30 מ'

