
היבטים ביומכאניים בבעיטת כדורגל

דוד בן-סירא ומשה איילון

תקציר

מטרת המאמר היא לסקור את הספרות המדעית העוסקת בניתוח מכאני של מיומנות הבעיטה בכדורגל. במאמר נסקר הבסיס התיאורטי של ניתוח הבעיטה כמיומנות חבטה, ומתוארים רכיבי התנועה והמנגנונים בארגונה, כמו העברת התנע בין כף-הרגל לכדור, בניית התנע ברגל החובטת ותפקידיהם של הרגל התומכת, של פלג הגוף העליון ושל הגפיים העליונות בביצוע הבעיטה. הספרות ממוקדת ברובה בניתוח בעיטה נייחת בכף רגל מלאה כשהעצמה (מהירות יציאת הכדור) משמשת כקריטריון לטיבה. נדונות בה מגבלותיה של גישה זו ביחס למגוון המטרות של בעיטה במשחק ולכלל הסיטואציות המתקיימות בו. כן מודגשים היתרונות והחסרונות של היבטים מתודיים בחקר הבעיטה, דוגמת השימוש בהשוואה בין מדגמים שונים, בין בעיטה ברגל דומיננטית לבין בעיטה ברגל שאינה דומיננטית, השוואה בין שחקנים מיומנים לבלתי-מיומנים, או אילוצים במתכונת הניסוי, כמו האורך והזווית של הגישה בתנועה אל הכדור, גודל המטרה ומרחקה. הדיון הביקורתי כולל גם ניתוח של מגבלותיהם של כלי האיסוף וניתוח הנתונים שעליהם מתבססים מקצת המחקרים, כמו צילום בתדר נמוך, צילום דו-ממדי ושיטות לסינון האותות הנמדדים שעליהם מתבסס ניתוח התנועה.

תאריכים: בעיטה, כדורגל, ביומכניקה.

מבוא

כמו בכל משחקי הכדור האחרים, כך גם בכדורגל נדרשת שליטה בכמה מיומנויות יסוד המשמשות אמצעי להשגת מטרות המשחק. מיומנויות היסוד במשחק הכדורגל הן הבעיטה בכדור, עצירתו, הנגיחה, הובלת הכדור והוצאה ידנית של כדור חוץ, ומן השוער נדרשות מיומנויות ייחודיות נוספות. במשחקי הכדור מיומנויות היסוד מתבצעות לשם השגת מטרות מגוונות. בכדורגל הבעיטה משמשת למסירת הכדור לעמיתים בקבוצה, להתקדמות עם הכדור, להרחקתו במצבים מסוכנים ולניסיון להבקיע שער. כל אלה נחשבות, בדרך כלל, למיומנויות פתוחות (Gentile, 1972), דהיינו לאלה המתרחשות בתנאי סביבה המשתנים באופן קבוע, ונדרשת בהן בחירה בין דרכי פעולה שונות. חוקי המשחק אומנם גוזרים על השחקנים מגבלות מסוימות, אך עדיין נותרות בו אינספור אפשרויות להנעת הכדור ולכיבוש שער (Lees & Nolan, 1998). במשחק, הבעיטה מתבצעת בעצמות שונות, במצבים נייחים או כשהכדור בתנועה על הקרקע או באוויר, במנחי גוף שונים של הבועט ביחס למטרה, ובאילוצי זמן ומרחב התלויים במיקומם ובתנועתם של שחקני היריב ושל העמיתים לקבוצה. אי לכך, נדרשת מהשחקן יכולת להתאים את מיומנות היסוד למכלול רחב של מצבים ייחודיים (Ben-Sira, 1980). מכאן, שדפוס התנועה של הבועט אינו קבוע, ועליו להיות מותאם

למצב הכדור יחסית לרגל התומכת, לזמן העומד לרשות הבעט, לכיוון התנועה שלו ביחס לכדור ולחלק בכף הרגל (פנימי, גבי או חיצוני) שבו מתרחש המגע עם הכדור (Plagenhoef, 1971). הבעיטה מיושמת בצורות מגוונות גם בענפי ספורט אחרים, כמו בכדורגל אמריקאי ואוסטרלי, ברוגבי ובענפי קרב. מבנה ה"כדור" המוארך במשחקים האחרים, מטרות הבעיטה והנסיבות שבהן היא מתרחשת שונים מאלה שבמשחק הכדורגל, וכך גם תנועת הבעיטה. לכן על אף הדמיון בדפוס התנועה הכללי בין הבעיטות שבמשחקי הכדור השונים, דרושה זהירות בפרשנותם של הממצאים המסתמכים על ניתוח הבעיטה במשחקים האלה (Ben-Sira, 1980). בסקירה הזאת יש התייחסות למחקר מתחומי משחק אחרים, כשזו יכולה להועיל להבנה של סוגיית התנועה הנדונה.

הבנת התנועה של מיומנות יסוד חשובה לעיצוב הלמידה, לפיתוח יישומים מגוונים של המיומנות ולהכנה גופנית מתאימה של שחקנים. היא עשויה לתרום גם להבנת היבטים של בטיחות, של מנגנונים המובילים לפציעות ולדרך מניעתן (למשל, Plagenhoef 1971; Tol, Slim, van Soest, & van Dijk, 2002). חקר התנועה של מיומנות ספורטיבית פתוחה אינו פשוט כלל ועיקר. עליו להתייחס למגוון המצבים, הכלליים והייחודיים, שבהם המיומנות מיושמת. על אף זאת, חוקי התנועה מאפשרים לגזור הכללות לגבי מאפייני התנועה העיקריים של המיומנות. מטרתה של הסקירה הזו היא לבחון את המאפיינים המכאניים של הבעיטה בכדורגל, הן מן הבחינה התיאורטית והן מבחינת ראיות המחקר. הסקירה מוגבלת להיבטים המכאניים של תנועת הבעט, ומפאת קוצר היריעה אינה דנה במעוף הכדור, אלא רק במקום ובהיקף שהדבר נדרש. המיומנות הנחקרת ביותר בספרות היא הבעיטה בכף רגל מלאה (כר"מ) במצב ניח, ומטבע הדברים רוב הסקירה עוסקת בה. במקום שלא מצוין אחרת, מדובר בבעיטה זו. תצורות בעיטה אחרות, ובכלל זה בעיטה בפנים כף הרגל (פכ"ר), בעיטת בהונות ובעיטה מסובבת, נחקרו פחות. אין עבודות על בעיטה בכדור הנמצא באוויר, למעט עבודות הנוגעות לבעיטות בכדור הנזרק מהיד, כמו punt בכדורגל אמריקאי, בעיטות בכדורגל אוסטרלי או ברוגבי ובעיטה הדומה לבעיטת הרחקה של שוער בכדורגל.

הבעיטה כדפוס תנועה בסיסי

הבעיטה היא דפוס תנועה בסיסי המתפתח והמבשיל באופן טבעי במהלך הגדילה של ילדים, כפי שמתואר באופן איכותני על ידי Wickstrom (1957, 1977). אלה מאפייניו של דפוס תנועה בשל: תנועה מכינה, הכוללת הרצה בגישה אלכסונית של צעד אחד או יותר, ואחריה כפיפת ברך לאחור המשולבת בפשיטת הירך. ראשיתה של התנועה בכיוון הכדור היא בסיבוב אגן סביב הגף התומך, כפיפה בירך הבעטת תוך המשך כפיפת הברך ולבסוף, עצירת הירך תוך האצה מהירה וחזקה של השוק. ברגע המפגש בכדור הסיבוב בירך נעצר כמעט לחלוטין. במהלך המגע עם הכדור הברך כמעט ישרה. לאחר שיגור הכדור יש תנועת המשך שבמהלכה הגף מואט באופן הדרגתי. לפי Bloomfield ואחרים (1979), התפתחות הבעיטה אצל ילדות

מתרחשת בשישה שלבים טיפוסיים, ודפוס התנועה הבשל מושג על ידי 80% מהילדים בגיל 11.2 ולעתים אף בגיל 6. דפוס התנועה הכללי אופייני לכלל האוכלוסייה ולא דווקא לשחקנים מיומנים. זיהוי המאפיינים שהם ייחודיים לבעיטת מיומנים דורש ניתוח כמותי מפורט יותר. ברם אין די בו כדי לזהות את המרכיבים הקריטיים לבקרת התנועה ולרמת ביצוע גבוהה. מאפיין קונקרטי עשוי להיות אוניברסאלי לכלל הבעיטת, או לכל הבעיטות, ולא דווקא ייחודי לרמת מיומנות גבוהה. גישה השוואתית, כמו בין מיומנים ללא-מיומנים, או חשיפת הבעיטת לאילוצים שונים כמו לתהליך למידה, להדגשת מהירות מול דיוק, לבעיטה ברגל הלא-דומיננטית, לסוגי בעיטה שונים או לבעיטה בתנאי עייפות (לעומת רענונות) וניטור ההסתגלות התנועתית הנלווית ביחס להשגת מטרת התנועה, משמשים כמערכי ניסוי שנועדו לאתר את המאפיינים הקריטיים של מיומנות גבוהה.

מהי בעיטה טובה? – מדד מהירותו של שיגור הכדור

איכותה של בעיטה תלויה במידת השגת המטרה שלשמה היא מתבצעת. בין שמדובר בניסיון בעיטה לשער או בין שמדובר במסירה, למהירות התנועה של הכדור, לדיוק הגעתו למטרה ולתזמון יציאתו והגעתו, ערך רב בהשגת המטרה. ברוב המחקרים מהירות השיגור (מהירות היציאה) של הכדור, כמדד לעצמת הבעיטה, מהווה קריטריון ביומכאני לאיכותה. לכן חלק הארי של המחקר ממוקד במכאניקה של בעיטה בעצמה מרבית. בעוד ממד העצמה חשוב, הוא אינו בלבדי. דיוק ותזמון גם הם תנאים הכרחיים להשגת המטרה. זאת אף זאת, עצמה ודיוק באים זה על חשבון זה, כך שבאילוצי דיוק על הבעיטה להתפשר ולוותר על חלק מהעצמה כדי להבטיח דיוק סביר (Teixeira, 1999). נראה שמיקוד המחקר בבעיטה בעצמה מרבית במצבים נייחים והתבססות על מהירות שיגור כמדד עיקרי לאיכות הבעיטה, הם מטעמי נוחותם של החוקרים ואינם מייצגים בהכרח את החשיבות היחסית של עצמת הבעיטה בהשגת המטרות של מגוון הבעיטות במשחק.

בקרב גברים מיומנים רוב הממוצעים של מהירות השיגור של בעיטות בוצמה מרבית הם בין 20-30 m/s (ראה לוח 1). רוב הדיווחים מבוססים על נבדקים מעטים. בחלק מהפרוטוקולים מצוין שהנבדקים ביצעו מספר ניסיונות בעיטה, אך לניתוח נבחרה זו שלה העצמה הרבה ביותר. מובן שתוצאות מסוג זה הן מוטות, ובמקרים כאלה ממוצע קבוצתי אינו מייצג יכולת טיפוסית, אלא יכולת מיטבית. המקור לשונות הגדולה בערכים בין המחקרים הוא בחוסר אחידות בהגדרות המטלה (סוג הבעיטה, מספר צעדי הגישה, זווית הגישה), במספר הניסיונות, בסוג הכדור, במשטח ובהנעלה ובדרך מדידת המהירות. שני מחקרים מבוססים על מדגם גדול מ-20 של שחקנים ברמה גבוהה. בבעיטה למטרה המוצבת במרחק 20 מ', הממוצע של מהירות השיגור בקרב 25 שחקנים בליגה האנגלית הוא 27.1 m/s (Neilson & Jones, 2005). ב-75 בעיטות עונשין, שנבחרו מאליפות העולם וממשחקי קבוצות עילית, המהירות הממוצעת היא 32 m/s (Morya, Bigatao, Lees, & Ranvaud, 2004). בועט יחיד

יכול להגיע למהירויות גבוהות יותר, כמו למשל, 34 m/s (Asami & Nolte, 1983) ו-34.6 m/s (Ben-Sira, 1980) ו-36.8 m/s (Nunome, Ikegami, Kozakai, Apriantono, & Sano, 2006) בבעיטה ניחת בכדורגל אמריקאי (Zebas & Nelson, 1990). עצמת הבעיטה תלויה, בין השאר, במין הבועטים, בגילם וברמתם. שחקנים בועטים בעצמה רבה יותר משחקניות מהירות השיגור נמוכה אצל שחקניות ממהירותם של הגברים הן בצד הדומיננטי (86%) והן בצד הלא-דומיננטי (84%) (Barfield et al., 2002). אצל ילדים ובני נוער מהירות השיגור נמוכה מאשר אצל כדורגלנים מבוגרים. Lees & Nolan (1998) מדווחים, על פי עבודה של Day, על מהירויות בטווח 12-15.5 m/s אצל ילדים בני 8-14 שנים, ו-Luhtanen (1988) מדווח על 15-22 m/s אצל שחקנים בגיל 10-17 שנים. לעומת זאת ערכים דומים לאלה של מבוגרים (23.4 m/s בפכ"ר ו-28 בכר"מ) מיוחסים לשחקני נוער ברמה גבוהה (Nunome, Asai, Ikegami, & Sakurai, 2002). לא מובהר האם המקור להבדלים בין המגדרים ובין ילדים למבוגרים הוא במסה הגדולה יותר של הגברים, בכוח מוחלט רב יותר או ברמת מיומנות גבוהה יותר. שחקנים מיומנים בועטים בעצמה רבה יותר מלא-מיומנים (Asami et al., 1976; Ben-Sira, 1980; Shan & Westerhoff, 2005) ובעלות אנרגיה פחותה (Asami et al., 1976). מה המקור להבדלים בעצמת הבעיטה בין נבדקים שונים ובין בעיטות שונות של אותם נבדקים? מענה ראשוני לשאלה זו אפשר למצוא בניתוח תיאורטי של הבעיטה. אולם מאחר שלבועט יש דרגות חופש רבות לביצוע הבעיטה, יש לבחון עוד כיצד תנועה מיומנת מאורגנת בפועל במסגרת דרגות חופש אלה: בהיבטים אלה עוסקים חלקי המאמר הבאים.

לוח 1:

מהירות שיגור של כדור (כשלא מצוין אחרת, מדובר בבעיטה בכר"מ. שימוש בתדר דגימה גבוה במיוחד מצוין בסוגריים. השוואות מסומנות ב- / וטווחים ב -).

מקור	מהירות (m/s)	N	הערות
Asai et al., 2002	25.4	6	שחקני מכללה (4.5 kHz)
Asami & Nolte, 1983	29.9	6	4 מקצוענים + 2 חובבים
Asami et al., 1976	22.9	4	שחקנים מיומנים
	18.0	4	לא-מיומנים
Barfield et al., 2002	18.9/21.5	6	שחקניות – צד דומיננטי/לא דומיננטי
	23.6/25.3	2	שחקנים – צד דומיננטי/לא דומיננטי

המשך:

7 מקצועניים + 7 מכללה	14	26.2	Ben-Sira, 1980
לא-מיומנים	14	20.6	
שחקניות – בעיטה שטוחה/ גבוהה	7	13.5/17.0	Browder et al., 1991
מיומנים	7	20.1-15.2	Bull-Andersen et al., 1999
בעיטת עונשין בגישות שונות	1	22.3-20.6	Dicks & Kingman, 2005
חובבים – צעד גישה, זוויות גישה שונות	6	20.0-18.0	Isokawa & Lees, 1988
שחקניות מכללה – כר"מ/פכ"ר	11	14.4/14.6	Jonsdottir & Finch, 1998
חובבים – צעד גישה אחד, 90°, 45°, 0°	10	18.5/20.4/19.8	Kellis et al., 2004
Punt – שחקן מכללה – 20 בעיטות	1	25.8	Kermond & Konz, 1978
Punt – שחקן מכללה – 12 בעיטות	1	28.7	Kermond, 1979
כר"מ/בעיטת בהונות – הרצה: צעד אחד	11	23.0/23.4	Kristensen et al., 2004
שחקנים מנוסים – ניתוח 3D	8	24.5	Lees et al., 2004
שחקני מכללה – כר"מ/פכ"ר- 3D	6	22.5/28.6	Levanon & Dapena, 1998
בעיטות בכדורגל אוסטרלי	3	27.2-25.0	MacMillan, 1975
חובבים (לפני אימון)	16	25.9	Manolopoulos et al., 2004
סטודנטים לחנה"ג – עמידה/ כר"מ/הקפצה	77	25.3/26.7/19.8	Markovic et al., 2006
נוער – צד דומיננטי/לא דומיננטי	12	18.3/21.9	McLean & Tumilty, 1993
בעיטות עונשין – אליפות עולם וקב' עילית	75	32.0	Morya et al., 2004
ליגה האנגלית – ישיר/מסובב/ חיצוני	25	20.9/23.5/27.1	Neilson & Jones, 2005
שחקני נוער – כר"מ/פכ"ר, 3D	5	23.4/28.0	Nunome et al., 2002
שחקני נוער – צד דומיננטי/לא דומיננטי	5	27.1/32.1	Nunome, Ikegami et al., 2006

המשך:

כדורגל אמריקאי – גישה אלכסונית/ישירה		25.0/29.2	
נייח – גישה אלכסונית/ישירה	1	28.0/23.9	Plagenhoef, 1971
מתגלגל – גישה אלכסונית/ישירה		26.7/29.2	
הרמה לרחבה – גישה אלכסונית		26.8	
שחקנים אולימפיים	7	26.4	Robertson & Mosher, 1985
שחקנים מקצועניים – 2 צעדים 3D –	10	30.0-22.3	Rodano, & Tavana, 1993
שחקנים מיומנים	7	24.2	
בלתי מיומנים	8	16.9	Shan & Westerhoff, 2005
כף רגל מלאה ובהונות – צעד אחד	6	22.2	Sorensen et al., 2004
שחקניות מכללה	7	17.0	
שחקני מכללה	8	21.2	Tant et al., 1991
שחקני עילית – נייח/מתגלגל (1 kHz)	15	24.9/24.0	Tol et al., 2002
חובבים – בעיטת בהונות (4 kHz)	2	26-24	Tsaousidis et al., 1996
בעיטה נייחת בכדורגל אמריקאי	1	36.8	Zebas & Nelson, 1990
מיומנים	5	27.4	Zernicke & Roberts, 1978

ניתוח תיאורטי של הבעיטה

הבעיטה היא מיומנות חבטה, ומבחינה מכאנית ניתן להתייחס אליה כאל אירוע של התנגשות. כף הרגל מתנגשת בכדור במטרה להניע אותו במסלול ובתזמון שיאפשרו להשיג תכלית משחק מסוימת (מסירה, הבקעה, הרחקה). ניתן להניע את הכדור על ידי התנגשות באזורים שונים שלו באמצעות חלקים שונים של כף הרגל. נהוג לסווג בעיטות על פי חלק כף הרגל הפוגש בכדור; בעיטה בחלק הפנימי של כף הרגל (פכ"ר), בחלק החיצוני של כף הרגל, בבהונות, בעקב ובעיטה בכף רגל מלאה (כר"מ או instep kick בלועזית). בכר"מ המגע בכדור הוא באמצעות גב כף הרגל, על פי רוב בצדו המדיאלי.

באופן תיאורטי ניתן לאפיין תוצאות של התנגשות אלסטית בין שני גופים על ידי התנאים הפיזיקאליים של ההתנגשות. את מהירות השיגור של הכדור ניתן להעריך על פי עקרון שימור התנע (הנובע מהחוק הראשון של ניוטון) (Luhtanen, www.coachesinfo.com). לפי עקרון זה, במערכת שבה גופים מפעילים כוחות אלה על אלה, ובאין כוחות חיצוניים, נשמר התנע (momentum) הכולל בתום ההתנגשות (Hay, 1985). כששני גופים מתנגשים לאורך

אותו קו פעולה אפשר לתאר את ההתנגשות כך:

$$m_{\text{foot}} * V_{\text{foot/pre}} + m_{\text{ball}} * V_{\text{ball/pre}} = m_{\text{foot}} * V_{\text{foot/post}} + m_{\text{ball}} * V_{\text{ball/post}} \quad (1)$$

m היא מסת כל אחד מהגופים המתנגשים ו- V היא מהירותם הקווית ברגע המפגש ביניהם וברגע הניתוק. במהלך התנגשות אלסטית הגופים מפעילים זה על זה כוחות אשר גורמים בשלב הראשון למעוות של הגופים המתנגשים ואחר כך לחזרה למצבם המקורי (תקומה). בתהליך זה המהירות של כל אחד מהגופים משתנה, אך התנע הכולל נשמר. מכיוון שבמהלך ההתנגשות הכוחות שהגופים מפעילים זה על זה הם בעצמתם ומנוגדים בכיוונם (החוק השלישי של ניוטון), גודל השינוי בתנע של כל אחד משני הגופים הוא בהכרח זהה, והכיוונים שלהם מנוגדים (החוק השני של ניוטון) (Bull-Andersen, Dorge, & Thomsen, 1999). באין כוחות חיצוניים נוספים, עצמת הכוח הממוצעת הפועלת על הכדור בעת החבטה היא:

$$\bar{F} = \frac{m_{\text{ball}} * \Delta V_{\text{ball}}}{t} \quad (2)$$

כאשר ΔV_{ball} הוא השינוי במהירות הכדור במהלך החבטה, ו- t הוא משך המגע בין כף הרגל לכדור. אם במהלך ההתנגשות פועלים כוחות נוספים, למשל כוח שרירים, יש להוסיף את ההשפעה שלהם בהתאם לחוק השני של ניוטון. ברוב המחקרים ההנחה היא שנוכח זמן המגע הקצר בין כף הרגל לכדור, הכוחות החיצוניים זניחים. ברם כוחות לא מבוטלים כאלה מתועדים במהלך המגע בכדור (Tsaousidis & Zatsiorsky, 1996). לפיכך הנחה זו מוטלת בספק, ודרושה זהירות בפרשנות הממצאים המסתמכים על הנחת ההתנגשות האלסטית הטהורה. היחס בין הפרש המהירויות של גופים לפני ההתנגשות לבין זה שאחריה נקרא מקדם תקומה (coefficient of restitution), ונהוג לסמנו באות e (Hay, 1985).

$$-e * (V_{\text{foot/pre}} - V_{\text{ball/pre}}) = (V_{\text{foot/post}} - V_{\text{ball/post}}) \quad (3)$$

או,

$$-e = \frac{V_{\text{foot/post}} - V_{\text{ball/post}}}{V_{\text{foot/pre}} - V_{\text{ball/pre}}} \quad (4)$$

גודלו של e תלוי במאפיינים האלסטיים של החומרים של הכדור ושל כף הרגל. סימנו השלילי מבטא את העובדה שכיוון השינוי במהירות מנוגד לכיוון התנועה לפני ההתנגשות. מניתוח זה עולה שתוצאות בעיטה, שבה קו התנועה של הכדור וכף הרגל זהים, תלויות בשני משתנים עיקריים: בתנע של כף הרגל הבוטת בעת ההתנגשות ובמאפיינים האלסטיים של

הרגל והכדור. התנע של הרגל הבוטטת הוא מרכיב הכרחי בעצמת הבעיטה, אך הוא איננו מספיק. מיקום המגע בכדור והאלסטיות של כף הרגל והכדור קובעים באיזו מידה תנע זה "יועבר" אל הכדור בעת ההתנגשות הקצרה ביניהם.

בבעיטה ניחת המהירות ההתחלתית של הכדור היא אפס. לכן התנע של כף הרגל, יחד עם מקדם התקומה, הם שקובעים את תוצאות ההתנגשות. למעשה, אין זה מדויק להתייחס למסה של כף הרגל בלבד כקובעת את התנע בהתנגשות משום שהיא אינה אלא חוליית קצה של מערכת רב-חולייתית פתוחה של הגף התחתון כולו. על כן מקובל להתייחס אל מסת הרגל הבוטטת במונחים של "מסת חבטה אפקטיבית" (effective striking mass) (Plagenhoef, 1971), שאותה ניתן לאמוד כלהלן:

$$V_{\text{ball}} = V_{\text{foot/pre}} * \frac{m_{\text{strike}} * (1 + e)}{m_{\text{strike}} + m_{\text{ball}}} \quad (5)$$

כאשר: m_{strike} היא מסת החבטה.

בבעיטה נפוץ מפגש אלכסוני בין כף הרגל לבין הכדור, שבו שניהם נעים בקווי פעולה שונים. תוצאות ההתנגשות האלכסונית מציינות לעקרונות שהוזכרו לעיל, אך חישובן מצריך ניתוח דו-ממדי או תלת-ממדי. בתום ההתנגשות האלכסונית הכדור צפוי לנוע על פי השקול בין התנע שלו ושל הרגל. זווית ההפרדות של שני הגופים תלויה במקדם התקומה ובזווית שבין שני מסלולי התנועה שלהם. הקורא, המעוניין בפירוט של חישוב המהירות והזווית של היציאה בהתנגשות אלכסונית, מופנה ל-Hay (1985).

כאשר קו התנועה של הרגל אינו עובר דרך מרכז הכובד של הכדור, ההשפעה על הכדור מורכבת יותר. במקרה כזה יש להתייחס בנפרד לשני רכיבי כוח, זה הפועל דרך מרכז הכובד של הכדור, הקובע את העצמה ואת הזווית של השיגור, וזה המסובב את הכדור סביב צירו. הסיבוב יכול להיות בכיוונים שונים: צידי (ימני או שמאלי), תחת, עילי או אלכסוני. לסיבוב השפעה הן על מסלול מעופו של הכדור והן על תוצאות של התנגשות עתידית במהלך מעופו בקרקע, בשחקן אחר או בעמוד השער. במהלך המעוף סיבוב הכדור מלווה בלחצי אוויר שונים בשני צידיו, שמסטים אותו ממסלול הפראבולה הצפוי על פי המהירות והזווית של השיגור. השפעה זו ידועה כ"אפקט מגנוס" (Hay, 1985). שחקני כדורגל מנצלים זאת בבעיטות "מסובבות" המיועדות לעקוף שחקן יריב החוסם את כיוון הבעיטה או חומה של שחקנים או בבעיטת קרן ישירה לשער (Bray & Kerwin, 2003; Carre, Asai, Akatsuka, & Haake, 2002; Carre, Haake, & Asai, 2004) (Cook & Goff, 2006). השפעה אחרת של סיבוב הכדור היא בעת התנגשות עם גוף נוסף במהלך המעוף. הסיבוב גורם לחיכוך בין משטח הכדור לבין הגוף האחר במהלך ההתנגשות ביניהם. במהלך המעוות והתקומה כוח החיכוך פועל לאורך משטח המגע בין שני הגופים

בכיוון מנוגד לכיוון הסיבוב. כך הוא משפיע על העצמה ועל זווית השיגור בתום ההתנגשות. למשל, במפגש בין הכדור לבין חלקו הפנימי של עמוד השער סיבוב כדור צידי יכול לקבוע אם הוא ימשיך במעופו לתוך השער או יחזור לשדה המשחק. באופן דומה מושפע מסלול המעוף לאחר בעיטה או נגיחה בכדור מסובב. על הבעט או הנוגח להביא את הסיבוב בחשבון בתכנון כיוון המפגש בכדור ועצמתו. לסיבוב הכדור השפעה גם על המפגש בקרקע. רכיב סיבוב צידי יכול לשנות את זווית היציאה של הכדור מהקרקע לאחר פגיעה בה ולהטעות את השוער. רכיב סיבוב תחתי גורם לכדור להינתז מהקרקע גבוה יותר ובאיטיות יחסית בעוד לרכיב סיבוב עילי השפעה הפוכה. בתכנון אלה ניתן לעשות שימוש במסירת הכדור, בעיקר לטווח בינוני וארוך.

לסיכום, בבעיטה נייחת המשתנים הקובעים את תוצאות הבעיטה הם אלה (Bull-Andersen et al., 1999; Plagenhoef, 1971): א. התנע של הרגל הבעטת במפגש עם הכדור המורכב ממשט הרגל וממהירותה; ב. מקדם התקומה, המבטא את האפקטיביות של "העברת" התנע אל הכדור במהלך החבטה בו. ערכו תלוי בתכונות האלסטיות של הכדור ושל כף הרגל. אלה של הכדור מוגדרות בחוקת המשחק. אלה של כף הרגל תלויים בסוג הבעיטה, במיקום המפגש בין הכדור לכף הרגל ובקשיחותה של כף הרגל במהלך המגע בכדור. בהנחה שמסת הרגל ותכונות הכדור קבועות, משתני המפתח לקביעת עצמת הבעיטה, הנתונים לשליטתו של הבעט, הם מהירות כף הרגל ברגע המפגש בכדור וקשיחות כף הרגל במהלכה (Bull-Andersen et al., 1999). הדיון שלהלן יבחן את שתי התכונות האלה.

המהירות של כף הרגל הבעטת

התנע של כף הרגל הבעטת תלוי במסת הרגל ובמהירותה. המסה היא משתנה אנתרופומטרי שלכאורה, אין לבעט שליטה עליו. אבל בשל המבנה הרב חולייתי והשרשרת הקינמאטית הפתוחה, ייתכן שמנח חוליות הגף התחתון במפגש משפיע על מסת החבטה האפקטיבית. סוגיה זו לא זכתה לתשומת לב במחקר. ההנחה הרווחת היא שהתנע תלוי בוויסות המהירות של כף הרגל בעת המפגש בכדור.

רוב הניסיונות לכמת את העברת התנע בעת הבעיטה מתבססות על ראיות לגבי מהירויות כף הרגל והכדור המתועדות באמצעות צילום מהיר. בטכנולוגיה זו הדגימה של תנועת כף הרגל ושל הכדור היא דיגיטאלית ודיוקה תלוי בתדר הצילום ובדרך חישוב המהירות. תדר צילום נמוך עשוי להוביל לשגיאה ניכרת בזיהוי העיתוי המדויק של המפגש והניתוק בין הרגל לכדור. שגיאה כזו אינה בטלה בשישים כשמדובר במשך אירוע קצר. בצילום בתדר של 4 kHz (Plagenhoef (1971) מדווח על זמן מגע של 0.008 שניות, דהיינו כ-33 תמונות של מגע בין הכדור לכף הרגל. יש להניח כי אותה בעיטה בתדר של 400Hz הייתה מניבה רק 3-4 תמונות של מגע. נהיר שבתדר כזה קשה לזהות במדויק את רגעי המפגש והניתוק. השגיאה בזיהוי יכולה להוביל לשגיאה באומדן העיתוי והמהירות של המפגש.

מספר חוקרים מדווחים על מהירות כף הרגל במפגש עם הכדור או בסמוך אליו (ראה לוח 2). מהירות כף הרגל במפגש נמוכה ממהירות השיגור. לשונות הרבה בין המחקרים כמה מקורות. חלקם משקפים שוני אמיתי בביצוע, כגון: הבדל ברמת היכולת של נבדקים מסוגים שונים או שוני בדרישות ובאילוצים של המטלה. אחרים משקפים הבדלים מתודולוגיים. למשל, הדרך שבה נמדדת מהירות כף הרגל משפיעה על האומדן של ערכה. אומדנים שונים מתקבלים מחישוב המהירות לפי מרכז הכובד של כף הרגל, לפי מפרק הקרסול או לפי הבהונות. איכון המדידה של המהירות מצוין בעמודה נפרדת בלוח 2. בחלק מהמחקרים לא מצוין כלל כיצד נמדדה המהירות. אצל Manolopoulos ואחרים (2004) מהירות הבהונות במפגש גדולה ב-7.8% מזו של הקרסול, ומגמה זו קיימת גם אצל שחקנים מקצוענים (Rodano & Tavana, 1993). דרך החישוב של מהירות כף הרגל ברגע המפגש עם הכדור גם היא אינה אחידה. נוכח גישות שונות לסינון האות הדיגיטלי שבאמצעותו נאמדת המהירות בצילום מהיר, ייתכן שחלק מהשונות, מקורו בהבדלים בדרך השימוש במתודולוגיה זו. המבקש להרחיב בהבנת המקורות של שגיאה בניתוח נתונים נומריים בבעיטה מופנה ל-Nunome, Lake ואחרים (2006).

באיזו מידה יכולה מהירותה של כף הרגל בעת החבטה להסביר את עצמת הבעיטה? ככלל, הראיות תומכות בקשר בין מהירות כף הרגל במפגש עם הכדור לבין מהירות שיגור הכדור. לפי Bloomfield ואחרים (1979), שלבי התפתחות מתקדמים ביכולת הבעיטה של ילדים באים לידי ביטוי במהירות גדלה של הרגל במפגש. Zernicke & Roberts (1978) מדווחים על מתאם של 0.96 בין שתי המהירויות. מתאם זה מתבסס על 45 בעיטות של 5 נבדקים שכל אחד מהם ביצע 5 ניסיונות בכל אחת מ-3 מהירויות: נמוכה, בינונית ומרבית. עדויות נוספות על הקשר בין שתי המהירויות כוללות מתאמים של 0.74 אצל שחקני כדורגל מקצועניים (Asami & Nolte, 1983), 0.52 בגישה של צעד אחד ובזוויות גישה שונות (Isokawa & Lees, 1988) ו-0.83 בבעיטות כרי"מ וכפ"ר (Levanon & Dapena, 1998). בקרב 10 שחקני כדורגל מקצועניים המתאמים בין מהירות השיגור לבין מהירויות הקרסול וראש ה-metatarsal החמישי הם 0.42 ו-0.49 בהתאמה בכלל הבעיטות שבוצעו (Rodano & Tavana, 1993). לטענתם, הדבר מצביע על כך שגורמים נוספים קשורים לעצמת הבעיטה, לדוגמה, מאפייני קשיחות הרגל ומנח כף הרגל יחסית לכדור. אולם כשמובאות בחשבון רק הבעיטות המוצלחות ביותר של 10 הכדורגלנים, המתאמים עולים ל-0.81 ו-0.69, בהתאמה. מכאן שלמהירות כף הרגל חשיבות רבה בבעיטות מוצלחות, אך בבעיטות מוצלחות פחות חשיבותה פחותה. קשר קווי בין שתי המהירויות מוצג גם על ידי Bull-Andersen ואחרים (1999), אך לא מדווחת עצמתו. בנתונייהם יש עירוב בין אלה של הרגל המועדפת לבין אלה של הרגל הלא-מועדפת. טווח מתאמים של 0.91-0.63 מוצג על ידי MacMillan (1975) לגבי כל אחד מ-3 נבדקים שביצעו 4 בעיטות שונות המקובלות בכדורגל אוסטרלי. הוא מסיק מכך, שדרושים משתנים נוספים להסברת השונות במהירות השיגור, ומציע את מאפייני המגע בין כף הרגל לכדור כאפשרויות להסבר כזה.

רוב המחקרים העוסקים באומדן הקשר בין שתי המהירויות מערבים מקורות שונים או הם לוקים במיעוט של נבדקים או של בדיקות. בניתוח משני של נתוני Ben-Sira (1980) המתאם הכולל בין מהירות השיגור לבין מהירות כף הרגל בקרב 14 מיומנים ו-14 לא-מיומנים הוא 0.57. בחישוב נפרד לכל אחת מן הקבוצות המתאמים הם 0.19- ו-0.54. בהתאמה. אי לכך ספק אם בקבוצה הומוגנית של מיומנים אפשר להסביר הבדלים בעצמת השיגור באמצעות מהירות כף הרגל במפגש. ייתכן שהיא עשויה להסביר חלק מהשונויות בשיגור בקרב לא-מיומנים. הטיעון הרווח, שהגדלת מהירות כף הרגל בעת המפגש היא דרך לוויסות של עצמת הבעיטה, היה יכול להיתמך, ולו חלקית, על ידי ראיות לגבי קשר תוך-אישי בין שתי המהירויות בבעיטות בעצמות תת-מרביות שונות. הספרות חסרה ראיות מסוג זה. בפרוטוקולים שבהם נדרש הנבדק לבצע מספר בעיטות, בדרך כלל נבחרת לניתוח הבעיטה "הטובה" ביותר, והאחרות נגזות. בעבודה הכתובה ביפאנית, שניתן למצוא רק תקציר שלה, Togari ואחרים (1972) מציגים מתאמים תוך אישיים גבוהים (0.86-0.94) בין מהירות הרגל במפגש לבין מהירות השיגור אצל 3 נבדקים שבעטו בעצמות שונות. ממצא זה תומך בהשערה שהוויסות של עצמת הבעיטה של כל יחיד קשור לוויסות המהירות של הרגל במפגש. בניגוד ל-Ben-Sira, חוקרים אלה מציגים גם קשר ליניארי בין שתי המהירויות, הן בקרב שחקנים מיומנים והן בקרב לא-מיומנים. הסיבה לכך היא שבכל אחת מתת-הקבוצות הם מערבים בעיטות של בועטים שונים ומהירויות בעיטה שונות. הטיעון, ששיפור בעצמת הבעיטה באמצעות אימון מושג על ידי הגדלת המהירות של כף הרגל, אינו יכול להסתמך על ראיות של קשר סטטיסטי, והוא טעון הוכחה אמפירית. ראיות לגבי הבדלים בין רגל דומיננטית ללא-דומיננטית או בין מיומנים ללא-מיומנים עשויות לתמוך בטענה זו. אך עיגונה הסופי מצריך מערך ניסויי שיעמיד במבחן את הקשר הסיבתי בין שני המשתנים.

מהירויות המפגש והשיגור חשופים להשפעות של אילוצים שונים. למשל, כשנחוץ להדגיש הן מהירות והן דיוק בשיגור, השילוב ביניהם מעלה את דרגת הקושי של המיומנות, והוא גורם לשיבוש של איכות התנועה (Lees & Nolan, 1998). כך, המהירות הממוצעת והמהירות המרבית של הקרסול נמוכות, וזמן התנועה הכולל ארוך בבעיטה בעצמה מרבית למטרה קטנה ומוגדרת לעומת מטרה גדולה וכללית יותר. במקרה של המטרה הקטנה התנועה מואטת באופן בולט לפני המפגש בכדור. לפיכך הדיוק בא על חשבון העצמה. הפתרון לאילוף של הקפדה על דיוק הבעיטה הוא בתנועה איטית יותר הבאה להבטיח מגע מדויק יותר בין הרגל הובעת לכדור (Teixeira, 1999).

לעתים מרחק השיגור רלבנטי יותר ממהירות השיגור, למשל, בבעיטות הרחקה של שוער. אלה לא קיבלו תשומת לב נאותה בספרות. בעיטות דומות בכדורגל אוסטרלי ואמריקאי נחקרו לא מעט, אלא שהן מתרחשות באילוצי משחק שונים לחלוטין, הן מבחינת מטרת הבעיטה והן בשל ייחודיות המבנה של ה"כדור". בניגוד לראיות הקודמות, לא נמצא קשר בעל ערך בין מהירות כף הרגל לבין מרחק השיגור ב-punt הנהוג בכדורגל אמריקאי

(Alexander & holt, 1974; Kermond, 1979). שניהם סבורים שאופי המגע בין כף הרגל לכדור חשוב ממהירותה במפגש. אפשר לבקר את הראיות הנוגעות למרחק הבעיטה בכך שהוא מותנה, בנוסף למהירות השיגור, גם בזווית השיגור. אבל יש לזכור שלא אחת המרחק הוא חלק ממטרת הבעיטה בכדורגל ושעצמת השיגור אינה אלא אמצעי להשגתה.

לוח 2:

מהירות כף הרגל סמוך למפגש עם הכדור (כשלא מצוין אחרת, מדובר בבעיטה בכ"מ. כשנעשה שימוש בתדר דגימה גבוה במיוחד, הוא מצוין בסוגריים).

מקור	מהירות (ms ⁻¹)	דרך המדידה	הערות
	25.6		מיומנים
Anderson & Sidaway, 1994	14.9	לא מפורט	לא מיומנים – קדם למידה
	21.9		לא מיומנים – לאחר למידה
Asai et al., 2002	23.1	1/3 קדמי כף הרגל	שחקני מכללה (5.4 kHz)
Asami & Nolte, 1983	28.8	לא מפורט	4 מקצוענים
	13.8		2 שחקנים – צד דומיננטי
	11.9	קרטול	6 שחקניות – צד דומיננטי
Barfield et al., 2002	12.2		2 שחקנים – לא דומיננטי
	9.9		6 שחקניות – לא דומיננטי
	18.7	מרכז כובד	7 מקצוענים + 7 מכללה
Ben-Sira, 1980	16.4		14 בלתי מיומנים
	18.6	½ מרחק קרטול – ראש metatarsal	7 שחקנים – צד דומיננטי
Dorge et al., 2002	17.0		7 שחקנים – לא דומיננטי
Kermond & Konz, 1978	22.3	בהונות	punt – כדורגל אמריקאי
Kermond, 1979	25.7	בהונות	punt – כדורגל אמריקאי
Lees et al., 2004	16.1	בהונות	8 שחקנים
	18.3	מרכז כובד	פכ"ר – 6 מכללה
Levanon & Dapena, 1998	21.6		כר"מ – 6 מכללה
MacMillan, 1975	23.7-23.3	מרכז כובד	כדורגל אוסטרלי – 3 שחקנים
	22.2	בהונות	16 חובבים לפני אימון
Manolopoulos et al., 2004	20.6	קרטול	16 חובבים לפני אימון

המשך:

פכ"ר – נוער	19.1	מרכז כובד	Nunome et al., 2002
כר"מ – נוער	20.3		
צד דומיננטי – 5 נוער	23.8	מרכז כובד	Nunome, Ikegami et al., 2006
צד לא דומיננטי – 5 נוער	20.6		
נייחת (4 kHz)	20.3	לא מפורט	Plagenhoef, 1971
כדורגל אמריקאי, אלכסונית	24.2		
מתגלגל גישה ישירה	21.6		
מתגלגל גישה אלכסונית	19.8	לא מפורט	Plagenhoef, 1971
נייח, גישה ישירה	19.8		
נייח, גישה אלכסונית	19.6		
הרמה, גישה אלכסונית	16.3		
10 מקצוענים	13.1	קرسול	Rodano & Tavana, 1993
	16.1	בהונות	
כדורגל וכדורגל אמריקאי	24-18	לא מפורט	Roberts & Metcalfe, 1968
בעיטת בהונות איטית	11.4		
בעיטת בהונות בינונית	15.4	מרכז כובד	Zernicke & Roberts, 1978
בעיטת בהונות מהירה	20.1		

שלבי הבעיטה

נתיבה ומהירותה של כף הרגל בתנועה אל עבר הכדור הן תוצר של תנועות מתוזמנות ברצף של הגוף כולו ושל חוליות הגף הבועט (MacMillan, 1976). אפשר להגדיר את מהירות כף הרגל כתוצאה של המהירות הקווית המוחלטת של מפרק הירך ושל המהירויות הסיבוביות היחסיות לו של חוליות הגף הבועט, דהיינו חוליית הירך ביחס למפרק הירך, השוק ביחס לחוליית הירך וכף הרגל ביחס לשוק. על פי Wickstrom (1975), תנועת היסוד בבעיטה מתחלקת לארבעה שלבים עיקריים שבאמצעותם כף הרגל מגיעה לחבטה בכדור:

1. תנועת הגף התחתון לאחור תוך פשיטה בירך וכפיפה בברך;
2. כפיפה בירך, תוך שמירה על ברך כפופה;
3. האטה בירך כשהיא משולבת בהאצה בברך עד למפגש בכדור;
4. תנועת המשך לעצירת הגף התחתון לאחר השיגור. שלבים 2 ו-3 בחלוקה זו מהווים מוקד עיקרי לחקר תנועת הבעיטה, בעיקר בנוגע לתיאום שבין מפרקי הירך והברך. להם יוקדש פרק נרחב בהמשך. אלא שחלוקה זו לוקה בחוסר של מרכיבים חשובים

בבעיטה. תמונה מלאה מצריכה להוסיף התייחסות לשלב מקדים, זה של הגישה אל הכדור והתייחסות לתנועות הגוף, האגן והגפיים העליונים בבעיטה.

מסלול הגישה לבעיטה

בבעיטה שאינה מהמקום משולבת הרצה מוקדמת או גישה לעבר הכדור. היא משמשת לפיתוח תנוע כללי בגוף המנוצל להגברה של עצמת החבטה. מהירות גבוהה של כף הרגל ברגע המפגש עם הכדור תלויה בבניית אנרגיה (מכאנית) בשלבים מוקדמים של התנועה (Lees & Nolan, 1998). לפי Stoner & Ben-Sira (1981), בצעד הקודם לבעיטה נבנית אנרגיה קינטית בתנועת הגוף כולו העולה בגוף הבועט והיורדת בשאר הגוף לקראת המפגש בכדור. דפוס זה זהה בבעיטות בעצמה מרבית ותת-מרבית. השינוי בחלוקת האנרגיה הקינטית בין חלקי הגוף יכול לרמוז על תהליך של העברת אנרגיה מכלל הגוף אל הגוף הבועט. אולם לא הוצגה הוכחה לקיומו של מנגנון כזה. עד גבול מסוים, צפוי שהארכת ההרצה תניב בעיטה חזקה יותר (Lees & Nolan, 1998). בהרצה של 5-8 צעדים אכן מהירות השיגור גדולה מאשר בבעיטה מהמקום (Opavsky, 1988). מכאן שלגישה לכדור יש חשיבות בבנייתה של עצמת הבעיטה. מצער שבחלק מהמחקרים לא מדווח על מספר צעדי הגישה בביצוע הבעיטה, ביניהם גם באלה שלבועט בחירה חופשית של נתיב הגישה ושל אורכו. חוסר התייעוד מונע אפשרות להתייחס למרכיב חשוב זה בעצמת הבעיטה. במקרים אחרים פרוטוקול הניסוי מאלץ את הנבדקים להתאים מספר צעדים או זווית גישה שנקבעים מראש. במקרים כאלה התוקף האקולוגי בעייתי.

עצמת הגישה אל הכדור משתקפת במאפייני הצעד האחרון. בבעיטות בעצמה מרבית הוא ארוך מאשר בעצמה תת-מרבית (בממוצע, 1.69 לעומת 1.50 מ'), אך אין ביניהם הבדלים מובהקים בזמן המעוף או התמיכה עד למפגש (Stoner & Ben-Sira, 1981). טווח התנועה הארוך יותר, ללא הבדל בזמן התנועה, מצביע על אנרגיה קינטית חזקה יותר של הגוף לקראת הבעיטה. אצל נבדק יחיד הצעד האחרון (טווח 1.51-1.60 מ') ארוך יותר בבעיטות עונשין שבהן מהירות השיגור גבוהה, ולהפך (Dicks & Kingman, 2005). אורך הצעד האחרון יחסית לגובה הבועט נדון אצל Ben-Sira (1980). אצל מיומנים הצעד היחסי ארוך מאשר אצל לא-מיומנים (99% לעומת 89% מגובה העמידה). ההבדלים בזמני המעוף (0.99 ו-0.107 שני, בהתאמה) והתמיכה עד לבעיטה (0.112 ו-0.119 שני) אינם מובהקים. גם כאן שילוב של תנועה ארוכה יותר בזמן דומה מצביע על מהירות תנועה גדולה יותר בקרב מיומנים. בשל חוסר ההבדל בזמני המעוף והתמיכה אפשר לשער שהפרמטרים האלה אינם קריטיים לעצמת הבעיטה או על כל פנים, אין בהם כדי להבדיל בין רמת מיומנות גבוהה לנמוכה. הצעד האחרון לפני הבעיטה מהיר מאד. הזמן הממוצע בין ניתוק הרגל הבועטת מן הקרקע לבין המפגש בקרב מיומנים בכר"מ הוא 0.211 (Ben-Sira, 1980), 0.221 (Nunome et al., 2002) ו-0.245 שני (Levanon & Dapena, 1998), ובפכ"ר 0.190 (Nunome et al., 2002) ו-0.210 שני

(Levanon & Dapena, 1998). בבעיטה בצעד גישה יחיד זמן הצעד ארוך יותר – מעל 0.4 שני (Kellis, Katis, & Gissis, 2004). נראה שגישה מוגבלת מצריכה זמן רב יותר לפיתוח התנע. למרות ההכרה בחשיבות הגישה אל הכדור בחלק מהמחקרים אין התייחסות לפרמטרים של צעדי הגישה, ואין בספרות אומדנים לעצמת הקשר בינם לבין איכות הבעיטה או ראיות מוצקות להשפעתם עליה.

הגף התומך

מקובל לחשוב שתפקוד הגף התומך משפיע על עצמת הבעיטה ועל כיוונה. בספרות האימון מודגש הצורך להעביר משקל לעבר הגף התומך. להערכת Stoner & Ben-Sira (1981), הגף התומך שותף בבלימת האנרגיה המכאנית של הגוף. אנרגיה זו נבנית בגישה אל הכדור כדי להשתמש בה להעצמת האנרגיה הקינטית בגוף הבעוט. הדרך שבה מתרחשת העברה כזו אינה מוצגת על ידי החוקרים הללו. היבט אחר המודגש בספרות בנוגע לרגל התומכת הוא מיקומה ביחס לכדור. במישור החזיתי מקובל להמליץ על הצבת כף הרגל 5-10 ס"מ לצד הכדור (Lees & Nolan, 1998). על פי Hay (1985), המלצות ממקורות שונים הקשורות לבעיטות נייחות בכדורגל אמריקאי הן בטווח 28-5 ס"מ. מבחינה אמפירית אין הסכמה ברורה באשר למרחק של כף הרגל התומכת מהכדור במישור החזיתי או החצי. שחקן מקצוען מציב את כף הרגל התומכת מעט מאחורי הכדור (Plagenhoef, 1971) ואצל שחקני נוער המרחק הממוצע הוא 38 ס"מ מאחורי מרכז הכדור ו-37 ס"מ לצדו (McLean & Tumilty, 1993). נראה שמרחק כף הרגל במישור החצי תלוי בסוג הבעיטה ובכוונה לבעוט בעיטה שטוחה או גבוהה (Lees & Nolan, 1998).

על כוחות תגובה מהקרקע בשלושת מישורי התנועה מדווח בניסויים אחדים. אצל שחקנים מקצוענים ממוצע השקול המרבי הוא 3.20 BW (משקל הגוף). התגובה האנכית המרבית מתרחשת בעת ההאצה מטה של הגוף הבעוט, כ-0.08-0.12 שני לפני המפגש בכדור, והוא נמוך יותר (2.04 BW) בעת המפגש (Rodano & Tavana, 1993). מטבע הדברים, הכוחות בכיוון האנכי הם הגבוהים ביותר. הממוצעים בספרות בערכי BW הם: 2.39 (Asami & Nolte, 1983), 2.69 (Rodano & Tavana, 1993), 2.22 בכר"מו-2.03 בפכ"ר לכדורגלניות (Jonsdottir & Finch, 1998), 2.23-2.07 בגישה של צעד אחד בזוויות 0°, 45° ו-90° (Kellis et al., 2004) וטווח של 1.93-2.36 אצל 50 שחקנים מקצוענים (Rodano, Cova, & Viganò, 1988). הערכים האנכיים דומים לאלה של ריצה בקצב תת-מרבי של התחלת ריצה או של שינוי כיוון בריצה. לפיכך אין לראות בעומס הכולל על הגף התומך חריג יחסית לפעולות ספורטיביות אחרות המשולבות במשחק הכדורגל בשכיחות גבוהה. בעצם תיעוד הכוחות האנכיים אין כדי להעיד על זיקתם לאיכות הבעיטה. לפי Tavana & Rodano (1993) אין הבדל בכוחות התגובה בין בעיטות מוצלחות לבין מוצלחות פחות, ולא נמצא קשר ביניהם לבין מהירות השיגור. זו עדות לכך שלכאורה, משתנה זה אינו קשור לאיכות הבעיטה. לעומת זאת Kermond & Konz (1978)

מדווחים על קשר שלילי ($r = -0.53$) בין כוח אנכי מרבי לבין מהירות השיגור ב-20 בעיטות punt בכדורגל אמריקאי אצל בועט מיומן. על פי דיווח זה, הם ממליצים למזער את עצמת הדחיפה של הקרקע בבעיטה. השוני בין שני הדיווחים נעוץ, כנראה, באופיין של הבעיטות. ה-punt מתבצע גבוה מעל הקרקע, ותנועת הרגל הבוטעת היא אנכית, בעוד בבעיטה נייחת בכר"מ התנועה של הרגל הבוטעת במפגש היא אופקית בעיקרה.

במישורים האחרים הכוחות נמוכים יותר. אלה כוחות חיכוך החשובים לייצוב הגוף לקראת הבעיטה ובמהלכה, כך שאין בעצמתם הנמוכה יחסית כדי להמעיט מחשיבותם. במישור החצי, שבו מתרחשת בלימה לפני הבעיטה, מדווח בספרות על כוחות של 0.5-0.7 BW (Isokawa & Lees, 1988; Roberts, Zernicke, Youm, & Huang, 1974; Rodano & Tavana, 1993). Rodano ואחרים (1988) מדווחים על ממוצע גבוה מזה (0.88 BW) אצל 50 כדורגלנים מקצועניים. ערכי הבלימה במישור החצי גבוהים מאלה של ריצה ישרה, אך נמוכים מאלה של שינוי כיוון או נחיתה (Kellis et al., 2004). אצל שחקניות הממוצעים (0.58 BW בכר"מ, 0.50 BW בפכ"ר) אינם שונים מאלה של גברים (Jonsdottir & Finch, 1998).

במישור החזיתי כוחות התגובה מהקרקע גבוהים בעת גישה צידית של 90° יחסית למיומנויות טיפוסיות שבהן עיקר התנועה הוא במישור החצי. תפקידם לבלום את התנועה הצידית יחסית לכיוון הבעיטה. הבלימה מתרחשת בעיקר בשלב הראשון של התמיכה, והיא קשורה, כפי הנראה, להטיה הנדרשת בתנועה הלא-סימטרית של הבעיטה ולזו הנובעת מגישה אלכסונית לכדור. אצל שחקניות (Jonsdottir & Finch, 1998) תועדו כוחות נמוכים יותר (0.27 BW כר"מ, 0.25 BW פכ"ר) מאשר אצל שחקנים מקצועניים (0.55 BW) (Rodano et al., 1988). לא ניתן לקבוע את הסיבה להבדל בין המגדרים. הוא יכול לנבוע מרמות מיומנות שונות, מטכניקה שונה שמקורה במבנה אנתרופומטרי שונה או מן העובדה שהשחקניות הוגבלו ל-2 צעדי הרצה. לסיכום, אין ראיות ברורות באשר לתפקיד שכוחות התגובה מן הקרקע ממלאים באיכות הביצוע של הבעיטה, למעט העובדה הכללית שהם מסייעים בבלימת התנע של הגוף כולו. נושא זה ראוי למחקר מעמיק יותר.

על תפקוד הברך בגף התומך מדווחים Kellis ואחרים (2004). הזווית בירך הרגל התומכת היא כ- 100° - 110° בתחילת התמיכה, והיא קטנה בהדרגה במהלך הבעיטה כשהכפיפה בברך מתרחשת בעיקר ב-40% הראשונים של התמיכה. זווית הכפיפה המרבית היא 52° - 69° (0° = פשיטה מלאה). במהלך התמיכה יש גם סיבוב חוצה משמעותי בברך. אין עדות ברורה לחשיבות הכפיפה בברך. במפגש בכדור מרכז הכובד של מיומנים נמוך באופן יחסי מזה של לא-מיומנים (53.6% מגובה עמידה לעומת 55.9%), העשוי להעיד כי הם יציבים יותר בעת הבעיטה (Ben-Sira, 1980). ייתכן שלברך התומכת תפקיד בכך. כן ייתכן שהנמכת מרכז הכובד קשורה להטיה של הגו בכיוון הרגל התומכת, כפי שנמצא על ידי אחרים, אך לא ניתן לקבוע זאת בבירור לפי הניתוח הדו-ממדי בעבודה זו.

פעילות השרירים ברגל התומכת (בזוויות גישה שונות לכדור: גישה ישירה, 45° ו- 90°)

מתועדת באמצעות מדידה אלקטרומיוגרפית (EMG) על ידי Kellis ואחרים (2004). biceps femoris פעיל ביותר לקראת התמיכה ובחלקה הראשון, ופעילותו דועכת במחצית השנייה של התמיכה. בגישות האלכסוניות רמת פעילותו מגיעה עד ל-45% MVC. פעילותו המוקדמת, לפני התמיכה, משקפת את תפקידו בבלימת התנע בעת המפגש בקרקע ובייצוב הברך התומכת בתחילת שלב התמיכה. תופעה זו, המוכרת כ-pre-contact activation, אופיינית להכנה של שריר השותף בבלימה לקראת מצבי התנגשות, כמו בריצה, בנחיתה ובמיומנויות חבטה אחרות. לפני הצבת הרגל התומכת על הקרקע פעילות פושטי הברך נמוכה, ונראה כי תפקידם בבלימה הוא שולי. הם פועלים בעצמות גבוהות (עד כ-85% MVC ב-vastus medialis וכ-70% ב-vastus medialis) ב-1/3 האמצעי של התמיכה ודועכים לאחר מכן. בחלק האמצעי של התמיכה מתרחשות ההאצות בירך ובברך, כוחות התגובה מן הקרקע גבוהים ביותר, ונראה שפעילותם זו דרושה כדי לתמוך בגוף ולרסן את התגובות הנובעות מהאצה.

התנועות בחלק העליון של הגוף: גו, אגן וגפיים

גם לחלק העליון של הגוף תרומה לעצמת הבעיטה. לפי Luhtanen (www.coachesinfo.com), בעת הבעיטה הגו מוטה לאחור ולעבר הגף התומך. ההטיה לכיוון הגף התומך מאפשרת טווח תנועה גדול יותר לאחור בירך ושילוב של סיבוב בגו בתנועה לפניים. כמו כן, ההטיה מרחיקה את הגו ואת הירך הבוטטת מן הכדור ומאפשרת בכך מפגש בטוח יותר בין כף הרגל לכדור, בלי סיכון לפגיעה בקרקע. גישה אלכסונית מסייעת לכך, כפי שידון בהמשך. חוקרים אחדים מצביעים על חשיבות תנועת האגן בבעיטה (Browder, Tant, & Wilkerson, 1991; Lees, Kershaw, & Moura, 2004; Levanon & Dapena, 1998; Roberts & Metcalfe, 1968). Lees ואחרים (2004) מדווחים על טווח תנועה גדול בתנועות החורגות מן המישור החצי: 123° בסיבוב האגן במישור האופקי, 91° בסיבוב קו הכתפיים במישור האופקי ו- 39° בהטיית הגו במישור החזיתי. טווחים אלה כוללים את תנועת המעקב. בין הנבדקים יש שונות רבה, ומכאן שארגון התנועה שונה מנבדק לנבדק. לפי Levanon & Dapena (1998), ברגע הניתוק מן הקרקע האגן מסובב לפניים (-17°), ללא הטיה צידית משמעותית (2°) ועם הפנייה גדולה לכיוון הרגל הבוטטת (42°). תנועת הבעיטה אחר כך כוללת סיבוב האגן לאחור והטייתו במישור החזיתי לכיוון הרגל התומכת, כך שבעת המפגש עם הכדור הזוויות הן 10° הטיה לאחור ו- 15° הטיה לכיוון הרגל התומכת. בתנועה משולבת גם הפנייה של האגן בכיוון של הרגל התומכת (טווח ממוצע 36°), כך שבעת המגע עם הכדור האגן מופנה באופן כללי לחזית (בממוצע 6° הטיה ימינה). מבחינת התזמון, מתיאורים אלה נראה שתנועת הסיבוב באגן מהווה חלק משרשרת האירועים המכניים את כף הרגל למפגש עם הכדור. Shan & Westerhoff (2005) מדמים את ההכנה לבעיטה ל"דריכה" של קשת, המורכבת משילוב של פשיטת יתר בירך הבוטטת, מהפניית הגו בכיוון הנגדי ומפשיטה והרחקה של

הירך בצד הלא בועט. דריכה זו מאפשרת, לטענתם, טווח תנועה גדול יותר לשרירי הגו, האגן והירך בביצוע הבעיטה. בהתאם לתכונה שלפיה במצב מוארך שריר מסוגל לייצר כוח רב יותר, יש למנגנון זה יתרון בהפעלת כוחות גדולים. תנועת הגף לפניו היא מעין שחרור של הקשת הדרוכה, והיא מלווה בכפיפת גו ובהפנייתו (סיבוב בכתפיים) בכיוון הרגל הבועטת בשילוב עם כפיפה וקירוב של הכתף בצד הרגל התומכת. על חשיבות פעולות החלק העליון של הגוף ניתן ללמוד מכך שמיומנים עושים בו שימוש רב יותר מלא-מיומנים, והדריכה מבחינה ביניהם בכפיפה/פשיטה של 65% בכפיפה/פשיטה של הגו ו-70% בהפניה האופקית שלו, בצעד הבעיטה לעומת הצעד הקודם, אך אצל לא-מיומנים אין שינוי משמעותי בתנועת הגו בין הצעדים. כמו כן אצל המיומנים טווח תנועה גדול יותר בתנועת הפיתול של קירוב הכתף הנגדית אל הירך של הרגל הבועטת. לטענת החוקרים, מבחינה סטטיסטית, הבדלים אלה בתנועה מסבירים 43% מן ההבדל בעצמת הבעיטה בין המיומנים ללא-מיומנים. הם רואים בתנועת מתיחה זו מפתח לבעיטה אפקטיבית המאפיינת מיומנים.

כפי שמתואר לעיל בנוגע לכתף, הגפיים העליונים שותפים לתנועת הבעיטה, אך תרומתם אינה מקבלת ביטוי נרחב במחקר. לפי Luhtanen (www.coachesinfo.com), תפקידם לשמור את מרכז הכובד מעל לרגל התומכת ולתרום לשמירת שיווי המשקל על ידי הגדלת מומנט ההתמדה של הגוף סביב הציר האנכי. לפי Shan & Westerhoff (2005), בצעד הבעיטה של מיומנים, בהשוואה לצעד הקודם לו, יש גידול בטווח הפשיטה/הכפיפה בכתף בצד הרגל התומכת מ-63° ל-158° ובהרחקה/קירוב מ-20° ל-36°. זו תנועה נגדית לסיבוב האגן ולתנועת הגף הבועט, וסביר שעצמתה קשורה קשר חיובי לעצמת הבעיטה. עם זאת לא ברור, אם הדגשת הפיתול בגו ובעבודת הידיים היא פעולה התורמת להגברת העצמה של הבעיטה או שהיא תוצאה שלה. שינוי זה בגפיים העליונים אינו קיים אצל לא-מיומנים. בצעד שבו מתרחשת הבעיטה, החריגה אצלם בטווחי התנועה של הגפיים העליונים מועטה, יחסית לצעד הגישה הקודם. לפיכך יש לשקול שילוב של עבודת ידיים בלימודי הבסיס של הבעיטה. העדויות הנוגעות לתנועות הגו, האגן והגפיים העליונים בעת הבעיטה הן תיאוריות בעיקרן, ואינן כוללות ראיות קונקרטיות לגבי המנגנון שלפיו הן תורמות לעצמת הבעיטה או לדיוקה. עניין זה טעון מחקר נוסף.

לא נמצא תיעוד לפעילות השרירים בגו ובגפיים העליונים, למעט דיווח יחיד של Orchard ואחרים (1999) שעל פיו, בשלב האחרון של פשיטת הברך בבעיטה בכדורגל אוסטרלי יש פעילות מוגברת של שריר הבטן (rectus abdominus). נוכח התנועה הרבה שתועדה בחלק העליון של הגוף תפקידם של שרירי הגו והגפיים העליונים בבעיטה טעון חקירה מעמיקה יותר.

גישה אלכסונית לכדור

זווית הגישה אל הכדור היא גורם משמעותי באיכות הבעיטה. גישה אלכסונית היא סממן חשוב של בשלות בגילים צעירים (Wickstrom, 1975). מסלול גישה אלכסוני אופייני לבעיטת כדור ניח בכדורגל (Lees & Nolan, 1998), כמו גם למסירות ארוכות טווח ולהרמת כדורים לרחבת היריב, והוא אופייני גם לבעיטות ניחות בכדורגל אמריקאי וברוגבי. גישה ישירה לכדור מכילה מגבלות מרחביות במפגש בין החלק הקרוב של גב כף הרגל לכדור. גודל הכדור ואורך הגף הבעיט אינם מאפשרים מפגש מיטבי ביניהם. מחד גיסא, חלק הכדור שבו מתבצע המפגש מוגבה מהקרע ומאיך גיסא, במצב של כפיפה כפית אורך הרגל הבעיטת גדול מזה של הרגל התומכת. במצב זה קיימת סכנה של התנגשות הבהונות בקרע או להתרחשות המפגש בחלק התחתון של הכדור עם החלק המרוחק של גב כף הרגל, באזור עצמות המסרק, שהוא החלק הקשיח פחות של כף הרגל. כדי להגיע למפגש בטוח עם הכדור בגישה ישירה הבעיט נאלץ לקצר את אורך הרגל הבעיטת על ידי כפיפה רבה בירך ובברך, וכך נפגעת המהירות המשיקית של כף הרגל. זאת ועוד, האגן ממוקם חזיתית לכיוון הבעיטה, ובמנח זה אין אפשרות להשתמש בו כבחוליה התורמת לעצמת הבעיטה. לעומת זאת גישה אלכסונית מאפשרת מנח של כפיפה כפית, מגע קשיח ומדויק יותר בין כף הרגל לכדור תוך השארת מרחב מספיק לפשיטה בירך ובברך (Plagenhoef, 1971). לפי Davids ואחרים (2000), תפקיד הגישה האלכסונית הוא לאפשר מנח גוף שבו ניתן לקיים טווח תנועה גדול באגן באמצעות הטיה של משקל הגוף בכיוון הרגל התומכת, הטיה המאפשרת הרמה של האגן בצד הגף הבעיט בעוד הברך התומכת כפופה. כך ניתן להתאים את כף הרגל במנח אלכסוני יחסית לכדור, ולפגוע בחלק האחורי של הכדור באמצעות החלק המדיאלי הגבוה של כף הרגל שהוא קשיח מהחלקים הרחוקים יותר של כף הרגל. Plagenhoef (1971) מראה בבירור שבגישה אלכסונית מהירות השיגור (28.0 m/s) גבוהה מאשר בגישה ישירה (23.9 m/s). להבדל במהירות השיגור יכולים להיות שני גורמים: מהירות כף הרגל וקשיחותה בעת המגע. כיוון שלא נמצא הבדל משמעותי במהירות המפגש בכדור (19.8 m/s) לעומת (19.6), הוא מסיק שמיקום כף הרגל יחסית לכדור, המבטיח מגע קשיח ביניהם, חשוב יותר ממהירות המפגש. Isokawa & Lees (1988) מראים שבגישה של צעד אחד, אין הבדל מובהק במהירות השיגור בין זוויות גישה של 0° , 15° , 30° ו- 45° ו- 90° , אך קיימת מגמה שלפיה ב- 30° מהירות כף הרגל גבוהה ביותר, וב- 45° מהירות השיגור גבוהה ביותר. על פי מגמה זו, הם ממליצים על זווית גישה שבין 30° ל- 45° לשם השגת עצמה מרבית בבעיטה ניחות. בניסוי זה מדובר בגישה של צעד אחד בלבד שבו ניתן ליצר תנע מוגבל. גם לפי Kellis ואחרים (2004), בגישה של צעד יחיד אין הבדל במהירות השיגור בין גישה ישירה, 45° ו- 90° . ייתכן שבגישה ארוכה מזו יתרון הגישה האלכסונית בהעברת התנע הגבוה יבלוט יותר. מהשוואה בין בעיטות עונשין של שחקן יחיד המבוצעות בגישות האלה: גישה לפי בחירתו (4 צעדים ו- 82°), האצה בצעד האחרון (4 צעדים ו- 82°), מהירות מתגברת לאורך כל ההרצה

4) צעדים ו-82°) וגישה בזווית שונה (3 צעדים ו-37.5°) מבחירתו המקורית עולה שבבחירה האישית מהירות השיגור גבוהה ביותר (Dicks & Kingman, 2005). ההשוואה לתנאי הניסוי האחרון בעייתית משום שלא ניתן לקבוע אם ההבדל בינו לבין הגישות האחרות נעוץ בזווית הגישה השונה או במספרם המועט של הצעדים.

אין הבדל בין גישות של 0°, 45° ו-90° בדפוס הקינמאטי של מפרק הירך הבוטט, ודפוס הפעילות של vastus lateralis, vastus medialis ו-biceps femoris דומה בכולן (Kellis et al., 2004). לדעתם, זו ראייה לכך שהמכאניקה של הבעיטה דומה בזוויות גישה שונות. מבחינת כוחות התגובה מן הקרקע, ככל שזווית הגישה חורגת מקו הבעיטה, כוחות הבלימה בכיוון התנועה קטנים, והכוחות הצדיים גדלים (Isokawa & Lees, 1988; Kellis et al., 2004). ממצא זה תואם את השכל הישר נוכח ההבדל בין כיוון התנועה של הבעיטה לבין כיוון הבעיטה. לפי Kellis ואחרים, הבלימה החצית גבוהה וממושכת יותר ב-90°, והבלימה הצידית גבוהה יותר הן ב-45° והן ב-90° (מישור חצי: 0.39, 0.37 ו-0.59 מ-BW, כוח צדי: 0.65, 0.77 ו-0.83 מ-BW). בנוסף, בגישה אלכסונית הסיבוב חוצה בברך התומכת (30°) יותר מכפול מאשר בגישה ישירה. לדעתם, זה מצביע על עומס גדל בברך, ככל שהגישה אלכסונית יותר. הם מעלים חשש לסכנה של התרחשות סיבוב חוצה המשולב בפשיטה מלאה בברך, שיכול להוביל לפציעה. לכן הם מדגישים את חשיבותה של כפיפת הברך בגישה האלכסונית. עם זה לטיעוני הסיכון אין ראיות מכאניות ברורות שלפיהן העומסים בברך אכן מהווים סיכון בריאותי. זווית הגישה מותאמת לכיוון הבעיטה. לפי Williams & Griffiths (2002), ניתן לעשות בה שימוש כדי לחזות את כוונות הבעיטה. הם מצאו שכאשר בעיטת העונשין מכוונת לצד הרגל הבעוטת, זווית הגישה (35°) גדולה יותר מאשר בבעיטה לצד הנגדי לרגל הבעוטת (23°), ושההבדל ניכר גם בזוויות האגן ב-0.8 שני אחרונות לפני הבעיטה. מידע מסוג זה עשוי לשמש שוערים בניסיון לזהות את כיוון הבעיטה.

תנועת הגף הבעוט לעבר הכדור

הארגון התנועתי של הגף הבעוט לפנים הוא ברצף פרוקסימאלי-דיסטאלי או מן המרכז החוצה. כלומר, סדר התנועה של חוליות הגף הוא מהחוליות הקרובות למרכז הגוף אל הרחוקות ממנו (Ben-Sira, 1980; Browder et al., 1991; Davids, Lees, & Burwitz, 2000; Dicks & Kingman, 2005; Dorge et al., 1999; Dunn & Putnam, 1988; Levanon & Dapena, 1983; Nunome, Ikegami et al., 2006; Plagenhoef, 1971; Putman, 1983). הרצף מתבטא בהתחלת התנועה בסיבוב האגן, לאחריה צירוף תנועת הירך ולבסוף תנועת השוק. בספרות עיקרון זה מכונה לא אחת "חיבור כוחות" או "חיבור של מהירויות בין החוליות" (Robertson & Mosher, 1985). האגן מקדים את הירך במעט מאוד, ותחילת תנועתם היא כמעט בו-זמנית (Browder et al., 1991). לפיכך בחלק זה אין דפוס פרוקסימאלי-דיסטאלי ברור. ההיבט הבולט ביותר ברצף הוא בחוליות הירך והברך. לפי Dorge ואחרים (2002),

הגף הבעוט הוא שרשרת קינמאטית פתוחה, שבה החוליות פועלות בתנועה הדומה להצלפה. כלומר, תנועת הבעיטה מתחילה בהאצת הירך, ובערך כשזו מגיעה לשיא מהירות הסיבוב, מופיעה האצה בברך כשהירך מאטה במקביל. לרצף תנועה זה בין הירך והשוק מיוחסת חשיבות רבה (Dorge et al., 1999; 2002), והוא זוכה לתשומת לב נרחבת בספרות המחקר. לפי Browder ואחרים (1991), התזמון היחסי בין האגן, הירך והברך נשמר בבעיטות שונות למרות הבדלים בעצמת הבעיטה ושינויים קינמאטים הנלווים לכך. מסקנתם היא שהבעיטות מקבעות את מרכיבי התזמון היחסי בין החוליות ושההתאמות לאילוץ בעיטה שונים מתרחשות במאפייני אחרים, כמו בטווח התנועה ובמהירותה. לא ברור האם הסתגלות כזו קיימת גם בבעיטות המבוצעות כמיומנות פתוחה.

מאפייני התנועה בירך

בספרות יש התייחסות לפרמטרים שונים של תנועת הירך. הסקירה מתמקדת בעיקרים שבהם. טווח התנועה במפרקי הגף הבעוט הוא משתנה מרכזי בהתפתחות דפוס התנועה הבסיסי. בשלבים הראשונים ילדים נוטים לבעוט כשהברך ישרה וקשיחה, אך ככל שהמיומנות מתפתחת הטווח ארוך יותר הן בברך והן בירך (Bloomfield, Elliot, & Davies, 1979). טווח התנועה בפשיטה-כפיפה במפרק הירך מוצג כחיוני לפיתוח תנועה מהירה בירך ובברך (Lees & Nolan, 1988). להנחה שככל שטווח התנועה גדול יותר, כך אפשר לפתח תנע רב יותר אין ראיות של ממש. בבעיטה למטרה רחוקה (45 מ') טווח התנועה בירך (76°) גדול רק במעט לעומת טווח זה בבעיטה תת מרבית (25 מ' ו-69°) (Stoner & Ben-Sira, 1981). גם בטווח התנועה בברך לא נמצא הבדל בין שתי הבעיטות. בקרב כדורגלניות טווח התנועה בברך ובירך אף קצר יותר בבעיטה שעצמתה גבוהה מאשר בבעיטה שעצמתה נמוכה יותר (Browder et al., 1991), והבעיטות האיכותיות יותר מאופיינות בטווח תנועה גדול יותר, דווקא בסיבוב האגן ובזמן כולל של תנועה קצר יותר. יתר על כן, ממילא הבעוט לא משתמש במלוא טווח התנועה האפשרי בירך. טווחי התנועה המדווחים בספרות אינם אחידים. בחלק מדווח על ממוצעים שבין 38° ל-76° (Anderson & Sidaway, 1994; Ben-Sira, 1980;); בחלק אחר הטווח הוא בין 72° ל-135° (Shan & Westerhoff, 2005; Tant & Wilkerson, 1991). הבדל עיקרי בין שני סוגי הדיווח הוא שהראשון מתייחס לכפיפה בירך עד למפגש בכדור, ואילו השני כולל גם את תנועת המעקב בירך. קיימת הטרוגניות רבה בערכים המדווחים. אפשר ליחס אותה לשוני ברמות המיומנות של הנבדקים ובסוגי הבעיטה ומטרותיה וכן להבדלים בדרכי המדידה. חלק מהאומדנים מתבסס על ניתוח דו-ממדי, ואחרים על ניתוח תלת-ממדי. בנוסף, בצילום מהיר המיקום המדויק של מפרק הירך קשה לזיהוי, והתבססות על צילום להגדרת הזווית במפרק זה עשויה להכיל שיעור שגיאה בלתי מבוטל. תנועת הדריכה לאחור בירך היא פשיטת יתר. על פי ניתוח תלת-ממדי, ממוצע הפשיטה

המרבית הוא 29° - (Levanon & Dapena, 1998), ועל פי ניתוח דו-ממדי – 37° בקרב מיומנים ו- 23° בקרב לא-מיומנים (Ben-Sira, 1980). פשיטת היתר מעידה על הגמישות הרבה הנדרשת במפרק זה. מבחינת תזמון, המומנט המרבי בירך מתרחש בתום הדריכה, כשהתנועה הופכת מפשיטה לכפיפה (Roberts et al., 1974; Dorge et al., 1999; Nunome et al., 2002). בשלב זה ההאצה בירך מרבית (Roberts et al., 1974), והברך עדיין כפופה. באופן דומה, מומנט הפשיטה המרבי בברך מתרחש בסיום הכפיפה והמעבר לפשיטה (Dorge et al., 1999; Roberts et al., 1974). בירך, כמו בברך, לאחר שינוי הכיוון מתרחשת האצה עד למהירות מרבית שבמהלכה המומנט במפרק יורד בהדרגה. בהקשר זה, Roberts ואחרים (1974) מצטטים את טענתו של Dillman שעל פיה, כוח שריר גבוה פועל בטווח קצר יחסית בעת שינויי הכיוון במפרק כשהמהירות נמוכה. הירידה במומנט בהמשך התנועה מיוחסת ליחס בין כוח למהירות בשריר (Nunome, Ikegami et al., 2006).

האצת הירך מגבירה גם את המהירות של חוליית השוק הנלווית אליה. אצל שחקני נוער ובוגרים, הממוצעים של מהירות הסיבוב המרבית במפרק הירך הם $739\text{--}1071\%$ (Anderson & Sidaway, 1994; Ben-Sira, 1980; Levanon & Dapena, 1998; Nunome et al., 2002). טווח הזמן בין תחילת הכפיפה בירך לבין המפגש בכדור קצר, והוא מחייב תכנון מראש של התנועה. הוא אינו ארוך דיו כדי להשתמש במשוב ויזואלי במטרה לבקר את התנועה במהלכה. לפי Levanon & Dapena (1998), התנועה לפני בירך מתחילה בממוצע 0.14 שני לפני המפגש בכדור, ולפי Ben-Sira (1980) ממוצע משך זמן זה הוא 0.115 שני. Shan & Westerhoff (2005) מחלקים את התנועה בירך לשני שלבים: כפיפה מהירה, שמשכה הממוצע כ- 0.09 שני, וייצוב הירך הנמשך כ- 0.035 שני נוספות עד למפגש בכדור. השלב הראשון מסתיים כשהברך מעל לכדור. בשלב השני מתרחשת ההאצה בברך. המסה של הגף הבועט ושינוי המהירות הגדול המתחולל בזמן קצר מאוד, מצריכים מאמץ ניכר של כופפי הירך (Dorge et al., 1999; Robertson & Moshier, 1985). המהירות המרבית בירך מתרחשת סמוך לכפיפה המרבית בברך (Tant, Browder, & Wilkerson, 1991), שתורמת להקטנת מומנט ההתמדה בירך ומקלה בכך על האצתה. ברגע המפגש בכדור תרומת חוליית הירך למהירות כף הרגל נמוכה. היא נעה במהירות סיבוב נמוכה ושני קצותיה, מפרקי הירך והברך, נעים במהירויות קוויות נמוכות (MacMillan, 1976; Roberts & Metcalf, 1968; Shan & Westerhoff, 2005). לפי Huang ואחרים (1982), תנועה הסיבוב בירך נעצרת כמעט לחלוטין כשהברך נמצאת מעל לכדור, והשוק מואצת לעבר הכדור. מהירות הסיבוב בירך ברגע המפגש אף מדווחת לעתים כשלילית (Aitchison, 1983; Putnam, 1983; Lees, 1983). המהירות הנמוכה בירך מאפיינת גם בעיטות ברגל הלא-דומיננטית (Dorge et al., 2002). המהירות הקווית של הירך בעת המפגש בכדור נמוכה (0.56 m/s) ומטה (Bull-Andersen et al., 1999). אצל שחקנים מקצוענים היא 1.98 m/s . בממוצע כשהמהירות בברך אצלם כמעט כפולה – 3.7 m/s (Rodano & Tavana, 1993). נתוני השחקנים המקצוענים אינם תומכים בהנחה שהברך והירך מקובעים לחלוטין במפגש

בכדור, אך הם מוכיחים שמהירות המפרקים הפרוקסימאלים נמוכה יחסית למהירות כף הרגל (13.12 m/s בקרסול). בקרב חובבים המהירויות הקוויות של הירך ושל הברך גבוהות יותר (בממוצע 3.8 ו-5.8), אך הן עדיין נמוכות לעומת כף הרגל (Manolopoulos et al., 2004). אולי גודלן משקף רמת מיומנות נמוכה יותר של החובבים, לאמור: את אי הצלחתם לייצב את הירך בעת הפשיטה בברך. מהירות הסיבוב בירך במפגש בכדור נמוכה באופן ניכר ממהירות הסיבוב המרבית בירך בכר"מ (110 %/s לעומת 760) ובפכ"ר (330 %/s לעומת 800) (Levanon & Dapena, 1998).

הסמיכות בעיתוי בין ההאטה בירך לבין ההאצה בברך עשויה להצביע על קשר בין שני האירועים או אף על מנגנון הדדי להעברת תנע בין הירך לשוק. האצת הברך ועצירת הירך מתרחשים זמן קצר לפני המפגש בכדור ובסדר הזה. שיא מהירותו של הסיבוב בירך מתרחש פחות מ-0.05 שני בממוצע לפני המפגש עם הכדור – 0.049 שני לפי Ben-Sira (1980), 0.040 שני לפי Levanon & Dapena (1998), ו-0.02-0.03 שני לפי Tant & Wilkerson (1991). תזמון כזה מאפיין גם ילדים ובני נוער מיומנים (Too & Hoshizaki, 1984). Roberts & Metcalfe (1968) מוצאים חוסר הגיון בכך שתנועת הירך מואטת, ואינה תורמת למהירות כף הרגל ברגע המפגש בכדור. לפי השערה מוקדמת, האטה אקטיבית בירך תורמת, בדרך כלשהי, להאצת השוק ובכך להעצמת המהירות של כף הרגל (Plagenhoef, 1971). סברה רווחת היא שהאטה אקטיבית בירך גורמת לתגובה נגדית במפרק הברך ובכך למומנט המאיץ את השוק (Alexander, 1983). תהליך כזה של "העברת תנע" בין חוליות באמצעות האטה של חוליה פרוקסימאלית הגורמת להאצה של חוליה דיסטאלית משול לפעולת "הצלפה" של שוט, והוא מוצע גם לגבי תנועות זריקה (למשל, Plagenhoef, 1974; Toyoshima, Hoshikawa, Miyashita, & Oguri, 1971; או חבטה (למשל, Plagenhoef, 1979; Gowitzke, 1971). מנגנון כזה נראה אטרקטיבי נוכח קיומן של ראיות למומנט פשיטה בירך, ממש לפני המפגש בכדור (Luhtanen, 1988; Robertson & Mosher, 1985; Zernicke & Roberts, 1976). בהתאם להסבר זה צפוי שעצירה אקטיבית תתבסס על מאמץ אקצנטרי גבוה של פושטי הירך. לכאורה, מנגנון של האצת החוליה הרחוקה – השוק, באמצעות מאמץ אקצנטרי של פושטי הירך, נראה אלגנטי מבחינה ביומכאנית. ואולם הוא אינו נתמך בראיות באשר למומנט פשיטה בירך או לפעילות של פושטי הירך הצפויים על פיו בעת שמתרחשת ההאטה. פושטי הירך פעילים מאוד דווקא בתנועת הדריכה לאחור, אך פעילותם יורדת באופן בולט לקראת התנועה לפנים ובמהלכה (McCrudden & Reilly, 1993; Orchard, Walt, McIntosh, & Garlick, 1999). כך, במהלך כל תנועת הירך לפנים, הפעילות ב-biceps femoris וב-gluteus maximus נמוכה (Dorge et al., 1999). פעילות מוגברת מעט של פושטי הירך מופיעה בשלב מאוחר מאוד, ממש לפני המפגש בכדור (Robertson & Mosher, 1985), והיא מלווה במומנט קטן של פשיטה בירך (Putnam, 1993), אך היא מתרחשת הרבה לאחר ההאטה בירך. תופעה זו תידון בחלק על התנועה בברך.

לעומת הסברה על העצירה האקטיבית של הירך, קיימת טענה הפוכה, שלפיה הפשיטה בברך היא שמאטה את הסיבוב בירך (Dunn & Putnam, 1988; Nunome et al., 2005; Nunome, Ikegami et al., 2006). במהלך התנועה אל הכדור המומנט בירך הוא מומנט כפיפה (Nunome, Ikegami et al., 2006). בהתמכות על ניתוח מומנטים במפרק מצריכה זהירות רבה. ההאטה בירך וההאצה בברך. ההסתמכות על ניתוח מומנטים במפרק מצריכה זהירות רבה. חישובם מתבסס על אומדני תאוצות הידועות כמשתנה בעייתי כשמתמכים על דיגיטציה ועל הליכי גזירה נומרית של נתוני המרחב המתקבלים ממנה ביחס לזמן. בנוסף, יש לזכור שערך המומנט לא משקף את עצמת המאמץ של השרירים במפרק, אלא מהווה מומנט שקול (נקרא "מומנט נטוי") לכלל המומנטים הפועלים במפרק. כך, לא ניתן לתעד באמצעות מומנט נטו מומנטים מנוגדים בעקבות מאמץ שרירים אנטגוניסטים (co-contraction). הדבר מצריך זהירות בפרשנות של ערכים שמדווח עליהם בספרות (Lees & Nolan, 1998) ובוודאי שאין להסיק מהם לגבי עצמת הפעילות של שרירים ספציפיים במפרק. במקרה הזה, הראיות הישירות (באמצעות EMG) לגבי הדומיננטיות של כופפי הירך במפרק במהלך כל הכפיפה תומכות בהבחנה הנוגעת למומנטים ומחזקות אותה. הם פעילים במאמץ אקצנטרי לעצירת הפשיטה לאחור, ואחר כך במאמץ קונצנטרי לכפיפה בירך (Robertson & Mosher, 1985). iliopectoralis גבולות גבוהות במשך כל הכפיפה לפני, ובכלל זה בעת ההאטה בירך וכך גם rectus femoris המצטרף מעט מאוחר יותר (Dorge et al., 1999).

מה אם כן ההסבר להאטה בירך? המומנט היחיד שיכול להסביר את ההאטה בירך הוא תגובת חוליית הירך לפשיטה בברך. מנגנון זה מתועד גם בבעיטה בעצמה תת-מרבית (Dunn & Putnam, 1988) ובמיומנויות אחרות, שבהן משולבת תנועה של טלטול הגף התחתון לפני, כמו ריצה והליכה (Putnam, 1991), וכן בתנועות זריקה וחבטה (Putnam, 1993). ההאטה בירך היא, למעשה, תגובה פסיבית נלווית לפשיטה האקטיבית בברך ולא להפך (Nunome, Ikegami et al., 2006). לפיכך מכלול הראיות שולל את ההשערה לגבי האטה אקטיבית של הירך באמצעות פושטי הירך, ותומך בהשערה כי ההאטה היא תגובה לפשיטת הברך. אך אליה וקוץ בה. ההסבר הזה עומד בסתירה לוגית, לכאורה, לעובדה שהירך היא מקור האנרגיה העיקרי לבעיטה. לפי Robertson & Mosher (1985) ממוצע העבודה המכאנית המתבצעת בירך גבוה בהרבה מזה שבברך, ומומנט הכפיפה המרבי בירך גדול בצורה ניכרת מזה שבמפרקים האחרים (Dorge et al., 1999; Nunome et al., 2002; Nunome, Ikegami et al., 2006). על כן אצל מיומנים הממוצעים בכרי"מ הם 309-220 Nm בירך לעומת 161-90 Nm בברך ו-22-23 Nm בקרסול. ככל שעצמת הבעיטה גדלה, גדל המומנט במפרק הקרוב בקצב מהיר יותר מאשר במפרק הרחוק ממנו (Zernicke & Roberts, 1978). בבעיטות ברגל הלא-דומיננטית (Nunome et al., 2006) בפכ"ר (Nunome et al., 2002) ואצל ילדים (Luhtanen, 1988) המומנטים נמוכים יותר, אך מגמתם דומה. על פי הנאמר לעיל, המאמץ העיקרי בבעיטה הוא בכפיפת הירך, וניתן לייחס לה

חשיבות עיקרית בתרומה לעצמת הבעיטה. אלא שתרומה כזו עומדת בסתירה פרדוקסאלית להאטה הפסיבית שלה לאחר מכן, שלכאורה מייתרת את תרומתה למהירות כף הרגל בעת המפגש בכדור.

אם כן, מה תפקיד ההאצה בירך? ניתן לטעון שההאצה בירך מקנה לשוק הנספחת אליה במצב כפיפה מהירות סיבוב ראשונית, שעליה מתווספת לאחר מכן המהירות הנובעת מהפשיטה בברך. הקדמת התנועה בירך לזו של הברך היא הגיונית נוכח האינרציה הגבוהה יותר של הגף הנועט סביב מפרק זה. אבל בטיעונים מסוג זה אין כדי לסבר את הדעת לגבי חשיבות ההאטה, שכן באופן תיאורטי היה אפשר לבצע את הבעיטה ללא האטה כזו ולתאם את התנועה כך שמהירות שתי החוליות תהיה מרבית בעת המפגש בכדור. הסבר אפשרי נוסף הוא שתפקיד ההאצה הוא להעצים את הפשיטה בברך. התגובה הבין חולייתית להאצת הירך היא כפיפה בברך המשמשת כהכנה לפשיטתה אחר כך (Putnam, 1993). פעולה זו מעצימה את מתיחת האגוניסטים לפני שיתופם בפשיטת הברך, ובכך היא מגבירה את עצמת הכיווץ של הפושטים (Roberts & Metcalfe, 1968) על פי המנגנון הידוע כ"מחזור מתיחה-כיווץ" (Bober, Putnam, & Woodworth, 1987). תרומה אפשרית נוספת, שלא נדונה בספרות אך ראויה בהחלט לבדיקה, היא שהתנע בירך משמש לייצוב הברך על ידי מניעת תנועה לאחור של החלק הקרוב של השוק בעת האצת הברך. לפי השערה זו, ככל שעצמת הפשיטה בברך גדלה, כך דרוש תנע גדול יותר בחוליה הקרובה כנגד נטיית הברך לנוע לאחור.

בספרות המקצועית מוצע לכוון את הברך לעבר הכדור בעת המפגש עמו. עמדה זו נתמכת אף על ידי Plagenhoef (1971), והוא כולל אותה כהנחיה לביצוע אפקטיבי של בעיטה. במפגש עם הכדור הזווית בירך היא כפיפה קלה יחסית למצב האנטומי (0°). בכרימ הממוצעים בקרב מיומנים הם 31° (Ben-Sira, 1980), 22° (Levanon & Dapena, 1998) ו-9° (Rodano, & Tavana, 1993). מכאן שהבועט המיומן אינו מנצל חלק ניכר מטווח הכפיפה האפשרי, וחלק ניכר מהטווח שמנוצל על ידו, מקורו בפשיטת היתר בירך. באופן תיאורטי, ניצול מלוא טווח התנועה מיותר שכן ההאצה העיקרית היא בתחילת הכפיפה, ומרגע שמהירות הסיבוב גדלה, יכולת הכופפים לייצר מתח ולהמשיך להאיץ את הירך זניחה. ההעדפה להתחיל את הכפיפה במנח של פשיטת יתר כרוכה, כנראה, בעצמה ההתחלתית הגבוהה יותר המתאפשרת בתגובה למתיחה המוקדמת של הכופפים. אפשרות נוספת היא שטווח התנועה שנותר בלתי מנוצל, משמש כדי להבטיח עצירה של הגף הנועט בתנועת מעקב הדרגתית לאחר שיגור הכדור. לנימוק זה קשה למצוא תמיכה ממשית, שכן הבועט אינו מגיע בדרך כלל לקצה טווח התנועה האפשרי בתנועת המעקב. נראה אפוא שזווית זו מותאמת להציב את הברך, שהיא ציר הסיבוב העיקרי, במיקום מיטבי ביחס לכדור. התנועה בירך כוללת גם הרחקה וקירוב. לפי Levanon & Dapena (1998), ההרחקה בירך בתחילת התנועה לפניים היא בממוצע 29°. במהלך הבעיטה מתרחש קירוב בירך ובעת

המגע עם הכדור המנח הוא 12° של הרחקה בירך (כך שהטווח 17°). טווחים דומים (18° - 19°) מאפיינים שחקניות (Browder et al., 1991) ושחקני מכללה (20°) (Tant & Wilkerson, 1991). המומנטים בקירוב הירך (115 Nm בכר"מ ו-129 בפכ"ר) אינם זניחים (Nunome et al., 2002), והם נמשכים במהלך כל תנועת הבעיטה. בניגוד לדיווחים הקודמים, המומנט פה אינו מלווה בתנועה של קירוב. ההסבר המוצע לכך הוא שבגישה האלכסונית ההטיה של הגוף לעבר הגף התומך והסיבוב באגן מייצרים מומנט הרחקה שמומנט הקירוב מאזן אותו. מומנטים נמוכים יותר קיימים בסיבוב חוצה בירך (33 Nm).

התנועה בברך

מהירות כף הרגל ומהירות השוק כרוכות זו בזו. למעט תנועת הכפיפה הכפית להקשחת כף הרגל, המתבצעת בעת כפיפת הברך, השוק וכף הרגל נעים כמכלול אחד. במפגש בכדור מהירות כף הרגל היא שילוב של מהירות קווית של הברך ומהירות משיקית הנובעת ממהירות הסיבוב בברך. בהנחה שעקב עצירת הירך המהירות הקווית בברך זניחה יחסית, הרי מהירות הסיבוב בברך בעת המפגש בכדור היא הקובעת העיקרית את מהירות כף הרגל. לכן היא, לכאורה, מדד מועיל לאיכות הבעיטה. ברם מהירות כף הרגל תלויה גם באנתרופומטריה של הנועט. לדוגמה, בקרב 6 כדורגלנים למהירות הקרסול במפגש בכדור קשר גבוה ($r=0.86$) עם אורך השוק (Isokawa & Kojima, 1997). הכפיפה בברך מושגת בעת הכפיפה בירך והיא מהווה תגובה של חוליה רחוקה להאצה בחוליה קרובה. לפי Dorge ואחרים (1999), הברך מצויה בכפיפה מרבית בעת שהירך מצויה במהירות מרבית. לפי Levanon & Dapena (1998), הכפיפה המרבית בברך בכר"מ ובפכ"ר היא 113° ו- 105° ומתרחשת 0.065 שני ו-0.070 שני לפני המפגש בכדור, בהתאמה. לפי Ben-Sira (1980), היא בממוצע 103° בכר"מ ומתחילה בממוצע 0.057 שני לפני המפגש בכדור, מעט (0.008 שני) לפני תחילת ההאטה בירך. על פי האמור לעיל, הנועטים משתמשים ברוב טווח התנועה האפשרי לכפיפה בברך. טווח הזמן הקצר בין הכפיפה המרבית בברך לבין המפגש בכדור מצביע על האצה גבוהה ועל מהירות גבוהה של השוק, הנותנת את הרושם של תנועת "הצלפה". אכן, הערכים של מהירות הסיבוב המרבית בברך גבוהים ביותר. אצל מיומנים טווח המהירות הממוצעת של הסיבוב בברך בכר"מ הוא 1816 - 1112 $^{\circ}/s$ (Anderson & Sidaway, 1994; Barfield, Kirkendall, & Yu, 2002; Ben-Sira, 1980; Dorge et al., 1999, 2002; Levanon & Dapena, 1998; Rodano & Tavara, 1993). ערכים גבוהים אופייניים גם לבעיטות ברוגבי (1960 - 1524 $^{\circ}/s$) (Aitchison & Lees, 1983), בכדורגל אוסטרלי (2009 - 1532 $^{\circ}/s$) (Putnam, 2009), וכדורגל אמריקאי (2291 $^{\circ}/s$) (MacMillan, 1975; Orchard et al., 1999). פעילות השרירים תואמת את עצמת השינויים במהירות הברך. פושטי הברך (quadriceps) פעילים ברמות גבוהות הן בתנועה לאחור, לשם האטת הכפיפה בברך, והן בפשיטת הברך (Robertson & Mosher, 1985; Dorge et al., 1999; Bollens et al., 1987).

למשל, פעילות vastus medialis ו-vastus lateralis גבוהה מאוד הן בכפיפה בברך, וכן אחר כך בפשיטת הברך. בקרב בועטים מיומנים היא מגיעה בסוף שלב הדריכה לאחור (כפיפת הברך) ל-70%-85 ממאמץ איזומטרי מרבי (MVC). הפעילות השרירית הגבוהה של פושטי הברך, דווקא בשלב הכפיפה מהווה פרדוקס, לכאורה. אך, כמו לגבי כופפי הירך, בשלב זה תפקידם לעצור את הכפיפה בברך במאמץ אקצנטרי ולהאיצה בכיוון פשיטה במאמץ קונצנטרי (Bollens et al., 1988). שינוי הכיוון הוא הדורש מאמץ עיקרי. עם הגברת המהירות, עצמת הכיווץ של השריר ומומנט הפשיטה יורדים, ולקראת המפגש עם הכדור הם זניחים.

אין קשר בין מהירות הסיבוב במפרקים לבין מהירות שיגור הכדור אצל שחקנים מקצועניים (Rodano & Tavara, 1993). לפי זה, לכאורה, מהירות הסיבוב אינה רלבנטית מבחינת עצמת הבעיטה. ייתכן שכך הוא הדבר בנוגע לקבוצה הומוגנית של כדורגלנים שאצלם המהירות היא גורם שולי בהסבר ההבדלים הבין-אישיים, וגורמים אחרים הם הקובעים את ההבדלים בעצמת השיגור. ממצא זה נתמך על ידי חוסר הבדלים מובהקים במהירות השיגור ובמכאניקה של התנועה בין שחקנים מקצועניים לבין שחקני מכללה (Ben-Sira, 1980). לעומת זאת מהירות הסיבוב המרבית בקרב לא-מיומנים נמוכה בהשוואה למיומנים (Anderson & Sidaway, 1994; Ben-Sira, 1980), כך שהיא תורמת להסבר, ולו חלקי, של ההבדלים בעצמת הבעיטה בין אוכלוסיות קיצוניות יותר. בבעיטת פכ"ר ממוצע מהירות הסיבוב נמוך בהשוואה לכר"מ (Levanon & Dapena, 1998; Nunome et al., 2002), והדבר בא לידי ביטוי במהירות שיגור נמוכה יותר. בברך הלא-דומיננטית מהירות הסיבוב נמוכה ב-8%-19 מאשר בברך הדומיננטית (Barfield et al., 2002; Dorge et al., 2002). כל אלה תומכים בהיות מהירות הסיבוב המרבית מרכיב בעל משקל באיכות הבעיטה. מהירות הסיבוב אצל ילדים נמוכה מאשר אצל מבוגרים, אך היא עולה עם הגיל עד להבשלת המיומנות. Lees & Nolan (1998) מדווחים על ניסוי של Day שבו מהירות הסיבוב המרבית בברך בגיל 8 היא $1008 \text{ }^\circ/\text{s}$ ובגיל 14 היא $1203 \text{ }^\circ/\text{s}$. אצל שחקני נוער מיומנים מהירות הסיבוב הממוצעת ($1364 \text{ }^\circ/\text{s}$) נמצאת בחלק התחתון של הטווח האופייני לשחקנים בוגרים (Nunome et al., 2002). לא ניתן לקבוע על פי הדברים שנאמרו לעיל, אם הבדלים בכוח או בארגון התנועה מבדילים בין שתי האוכלוסיות. ההבדלים בין המגדרים במהירות הסיבוב בברך אינם חד משמעיים. מהירות כף רגלן של נשים נמוכה משל גברים, אך דפוס התנועה הכללי שלהן אינו שונה מזה של גברים מיומנים, ואין ביניהם הבדל מובהק במהירות הסיבוב בברך (Barfield et al., 2002). על פיהם ממוצע מהירות הסיבוב המרבית של הנבדקות ($1134 \text{ }^\circ/\text{s}$) נמצא בחלק התחתון של טווח התוצאות של גברים, ולפי Lees & Nolan (1998), המדווחים על עבודה של Griffiths, טווח המהירויות של שחקניות דומה לזה של גברים, $1375 \text{ }^\circ/\text{s}$ - 1690 . לעומת זאת Tant ואחרים (1991) טוענים שמהירות החלק התחתון של הרגל גבוהה יותר אצל גברים מאשר אצל נשים, שהן עצמת הבעיטה והן מדדי הכוח האיזוקינטי בפושטי הברך ובכופפי הירך פחותים אצל נשים מאשר אצל גברים. לפיכך הם טוענים שכוח הוא

גורם עיקרי בהבדל בין המגדרים. אך לא נמצאה ראייה הקושרת בין המשתנים הללו. בנוסף, לטענתם, לגברים טווח תנועה גדול יותר בברך ובירך וזמן התנועה ארוך יותר, כך שגם אלה יכולים להוות מקור להבדל בעצמת הבעיטה. לסיכום, לפי המחקרים האלה לא ברור אם ההבדל בין המגדרים בעצמת השיגור, מקורו ברמות מיומנות שונות או במאפייניהם הפיזיים השונים, כמו כוח ואנתרופומטריה. לא ניתן לקבוע בבירור ששחקנים מסוגלים להשיג מהירות סיבוב גדולה משחקניות. אולם נוכח ההבדלים באנתרופומטריה בין המינים, גם מהירות סיבוב זהה צפויה להניב מהירות כף רגל נמוכה יותר בקרב שחקניות.

סוגיה מעניינת לגבי התנועה בברך היא זו של האטה, כביכול, בכף הרגל לפני המפגש בכדור. למשל, Barfield ואחרים (2002) מתארים מהירות נמוכה יותר של הבהונות במפגש בכדור מאשר בעת התנועה לעברו. האטה כזו היא בניגוד לצפוי לגבי המפגש בכדור. הם מנסים להסביר זאת כמנגנון להתאמה אחרונה של דיוק המפגש של כף הרגל בכדור. הסבר זה לא סביר משום קוצר הזמן בין שני האירועים. בנוסף, פעילות מוגברת יחסית של כופפי הברך/ פושטי הירך מופיעה ממש לפני המפגש בכדור (Robertson & Mosher, 1985). הם מציעים שני הסברים לפעילות המוגברת בכופפי הברך. האחד בטיחותי, שלפיו המאמץ מיועד להבטיח את יציבות מכלול הברך נוכח התגובה הצפויה מהמפגש בכדור ולמנוע פשיטת יתר בברך ונוק לה. ההסבר השני הוא פשוטי הברך פועלים במהירות גבוהה שבה לא ניתן לפתח עוד מתח בשריר, והתנועה מואטת על ידי שרירים אחרים. לעומתם (Levanon & Dapena, 1998) קובעים שמהירות הסיבוב המרבית בברך מתרחשת בעת המפגש בכדור, ומדגישים שאין כל האטה בה. את הסיבה להופעתה בספרות הם מייחסים לסיבות טכניות בשיטת סינון האותות, ולשימוש בנתונים מזמן המגע עם הכדור ולאחריו לגזירה הנומרת בחישוב המהירות. בעבודתם, המתבססת על הליך סינון שלא כולל אותות אלה, אין כל האטה. Luhtanen (1988) ו-Togari (1972) תומכים גם הם בכך שהמהירות המרבית של השוק היא בעת המפגש בכדור. האחרונים טוענים שכף הרגל מואצת עד למפגש בכדור, ושהדבר בולט יותר בקרב מיומנים מאשר בקרב לא-מיומנים. אם כן, ניתן להתייחס למהירות המרבית של כף הרגל כמהירות המפגש בכדור.

בעת המפגש בכדור הברך נמצאת במנח של כפיפה (Roberts & Metcalf, 1968). בעבודות שונות מדווחות זוויות ממוצעות שבין 41° ל- 48° בכר"מ אצל מיומנים (Ben-Sira, 1980); 55° אצל לא-מיומנים (Levanon & Dapena, 1998; Rodano & Tavana, 1993) ו- 53° בכפ"ר (Levanon & Dapena, 1998). מנח זה מאפשר המשך הפעלת כוחות במהלך המגע עם הכדור וטווח מסוים לבלימה לאחר שיגור הכדור. בבעיטה בכדורגל אמריקאי לא נמצא שהבדלים בזוויות בברך ובירך בעת המפגש בכדור הם גורם התורם להסבר של הבדלים במהירות השיגור (MacMillan, 1975). אין ראיות מסוג זה לגבי בעיטה בכדורגל. הזוויות שמדווח עליהן, קרובות לזווית האופטימאלית לפיתוח מומנט פשיטה מרבי בברך, וייתכן שהן מותאמות להפעלת כוחות מיטבית במשך המגע בכדור. סברה זו, וכלל הפעולה

של מפרקי הברך והירך במשך המגע עם הכדור, טעונים בדיקה שיטתית. מבחינת המרחב, השוק במנח אנכי בערך בעת המפגש בכדור (Bull-Andersen et al., 1999); חלומר הברך מצויה מעל לכדור. אין ראיות ברורות לחשיבות מנח זה. הדעת נותנת, שבמצב זה המהירות המשיקית של הקרסול, ובעקבות זאת קו הפעולה של הכוח המופעל על הכדור, מקבילים לקרקע, כך שהרכיב העיקרי של הכוח המופעל על הכדור הוא אופקי.

על מיומנים ולא-מיומנים והתנועה בברך ובירך

על המרכיבים הקריטיים בתיאום בין הברך לירך ניתן ללמוד מהשוואה בין בועטים מיומנים ללא-מיומנים. כאמור, מיומנים בועטים בעצמות גבוהות יותר מלא-מיומנים. לכך נלווים הבדלים בפרמטרים שונים של הבעיטה. במחקרים ההשוואתיים אין ראיות לכך שיש הבחנה בין מיומנים ללא-מיומנים בנוגע לטווח התנועה בירך ובברך. לפי Ben-Sira (1980), ההבדלים בין מיומנים ללא-מיומנים בטווחי התנועה בברך (54° לעומת 57°) ובירך (69° לעומת 64°) אינם מובהקים. לעומתו, Anderson & Sidaway (1994) ו-Shan & Westerhoff (2005) מראים טווח תנועה גדול אצל מיומנים בהשוואה ללא-מיומנים. הממוצעים המדווחים על ידי Anderson & Sidaway (121° לעומת 91° בברך ו- 135° לעומת 86° בירך) ו-Shan & Westerhoff (113° לעומת 66° בברך ו- 130° לעומת 72° בירך) גבוהים בהרבה בהשוואה לאלה של קודמם. ההבדל נובע מכך שטווח התנועה אצל Ben-Sira הוא עד למפגש בכדור, ואילו זה המדווח על ידי האחרים כולל את תנועת המעקב שאחרי השיגור. לתנועת המעקב אין השפעה על עצמת הבעיטה, ומיוחסת לו חשיבות רק במניעת פגיעה על ידי עצירה הדרגתית של הגף הבועט. אפשר שמיומנים משתמשים בעצירה בטוחה יותר או שהם זקוקים לטווח עצירה ארוך יותר עקב עצמת בעיטה גבוהה יותר. מכל מקום, אין ראיות לכך שטווח תנועה גדול יותר בברך או בירך תורם לעצמת בעיטה חזקה יותר של מיומנים. על אף שאין הבדלים בטווח התנועה בירך ובברך עד למפגש בכדור, זווית הפשיטה המרבית בירך בעת ה"דריכה" קטנה יותר אצל לא-מיומנים (24° לעומת 37° -) (Ben-Sira, 1980). לא ברור אם שוני זה, מקורו במגבלות של טווח התנועה בירך אצלם או באילוצים קואורדינטיביים אחרים. ראיות לאילוצים כאלה אפשר למצוא במנח הכולל של הבועט, יחסית לכדור. בהשוואה ללא-מיומנים, בעת המפגש עם הכדור מנח כף הרגל יחסית לכיוון הבעיטה אנכי יותר בקרב המיומנים (הבדל של 11°), הירך כפופה פחות (31° לעומת 41°), אך אין הבדלים בזוויות בברך או בקרסול. המנח של הירך יכול להסביר מדוע אצל לא-מיומנים השוק, וכף הרגל הנספחת לה, נמצאים בזווית אנכית פחות לכדור. אולם, Ben-Sira (1980) מראה שהמקור למנח השונה של הגף הבועט הוא בהבדל במיקום של כלל הגוף ביחס לכדור, הבדל שאותו ניתן ליחס לשוני מהותי במיקום כף הרגל התומכת בין מיומנים ללא-מיומנים. מיומנים מציבים את כף הרגל התומכת כשהבהונות 12.5 ס"מ

בממוצע מעבר למרכז הכדור, בכיוון הבעיטה, כך שהקרוסול מוצב בערך בקו מרכז הכדור. אצל לא-מיומנים בהונות כף הרגל התומכת נמצאות 14.9 ס"מ מאחורי מרכז הכדור, בכיוון הגישה, כך שהיא מוצבת הרבה מאחורי הכדור. להצבת כף הרגל מאחורי הכדור השפעה על המפגש בכדור. המרחק של כף הרגל התומכת מהכדור מאלץ את הבעט הלא-מיומן להגיע עם כף הרגל לנקודה רחוקה יחסית לפני הגוף כדי לפגוש בכדור. הפתרון לכך הוא בכפיפה רבה יותר בירך. מן הנאמר לעיל עולה כי המיומנים מסתמכים על פשיטת יתר רבה יותר בירך כדי להגיע למפגש עם הכדור במנח טוב יותר תוך ניצול טווח תנועה דומה. למנח של הלא-מיומנים עלולה להיות השפעה על עצמת הבעיטה הן משום שהגף הבעט עשוי להיות בתנועה כלפי מעלה בעת המפגש ביניהם, וכתוצאה מכך לנוע לאט יותר, והן משום שמיקום המפגש של הכדור עשוי להיות נמוך יותר על כף הרגל וכך לפגום בהעברת התנע אל הכדור. ייתכן שלא-מיומנים זקוקים לראות את הכדור בעת שהם חובטים בו, ואולי אף לראותו, ביחס לכיוון הבעיטה, ולכן הם מציבים עצמם מאחוריו. לעומת זאת המיומנים מסוגלים, כנראה, להתבונן בכדור הנמצא ליד כף הרגל התומכת תוך כדי בעיטה ולשמור על כיוונה. מבחינת תזמון התנועה, התחלות הכפיפה בירך והפשיטה בברך מתרחשות קרוב יותר לזמן המפגש בכדור אצל מיומנים מאשר אצל לא-מיומנים (0.115 לעומת 0.156 שני בירך, 0.057 לעומת 0.069 שני בברך). המגמה דומה (0.049 לעומת 0.056 שני) גם לגבי שיא מהירות הסיבוב בירך (Ben-Sira, 1980). על אף משך הזמן הקצר יותר ממוצעי מהירות הסיבוב המרבית גבוהים ב-29% בירך וב-18% בברך בקרב המיומנים (1071 %/s לעומת 827 בירך ו-1816 %/s לעומת 1544 בברך). המגמה דומה גם אצל Anderson & Sidaway (1994): 26% בברך ו-16% בירך. מכאן שמיומנים מפתחים מהירויות סיבוב גבוהות יותר בטווח זמן קצר יותר, וזה מצריך בהכרח כוחות שרירי גדולים יותר. מבחינת הדפוס הכללי של פעילות השרירים, שחקנים מיומנים אינם שונים מספורטאים שאינם כדורגלנים (Bollens et al., 1987), אך הם אכן נבדלים מהם בעצמתן של קבוצות השרירים השונות. אצל כדורגלנים הפעילות היחסית גבוהה יותר בפושטי הברך, שהם האגוניסטים העיקריים, הן בכפיפת הברך והן בפשיטתה. לעומת זאת היא נמוכה יחסית בשרירים האנטגוניסטים (בעיקר tibialis anterior ו-semitendinosus). עצמת פעילות גבוהה באגוניסטים ועצמה נמוכה באנטגוניסטים הם סממן לרמת מיומנות גבוהה ולתנועה יעילה. מהירות התנועה אינה שונה בין מיומנים בדרגות שונות. כך, אצל Ben-Sira (1980) אין הבדלים בין שחקנים מקצוענים לבין שחקני מכללה בפרמטרים אלה. Aitcheson & Lees (1983) לא מצאו קשר בין דרגת המיומנות של שחקני רוגבי ברמות שונות לבין מהירות הסיבוב לפני המפגש בכדור. נראה אפוא שהפרמטרים של מהירות ותזמון התנועה, שבהם נבדלים מיומנים מלא-מיומנים מאפיינים שליטה בסיסית במיומנות היסוד של הבעיטה, אך הם אינם מבחינים בהכרח בין רמות שונות של מי שכבר רכשו מיומנות יסוד זו. ואכן, לא אחת המציאות מוכיחה כי שחקנים ברמות משחק נמוכות יחסית מסוגלים לבעוט בעצמה גבוהה מאוד.

הקרוסול

במפגש בכדור בכר"מ הקרוסול מצוי בכפיפה כפית בזווית ממוצעת שבין 51° ל- 64° מעלות (Ben-Sira, 1980; Levanon & Dapena, 1998; Rodano & Tavana, 1993; Tol et al., 2002). הקרוסול אינו שותף למנגנון הרצף הקינמאטי של המהירויות מפרוקסימאלי לדיסטאלי (Shan & Westerhoff, 2005), והכפיפה הכפית נועדה בעיקר לחשוף את משטח גב כף הרגל למגע בכדור בכר"מ. בבעיטה עם פכ"ר מנח זה אינו נחוץ, ועל כן הזווית בקרוסול מותאמת למפגש עם החלק הפנימי של כף הרגל. תפקוד הקרוסול בעת המגע עם הכדור יידון בהמשך.

מאפייני ההתנגשות בין כף הרגל לכדור

בנוסף לתנע של כף הרגל ברגע ההתנגשות, תוצאותיה נקבעות במידה רבה גם על ידי מאפייני ההתנגשות בין כף הרגל לכדור. משך המגע עם הכדור תועד בכמה ניסויים כ-0.008-0.016 שני (Alexander & Holt, 1974; Asai, Akatsuka, & Kaga, 1995; Asai, Carre, Akatsuka, & Haaks, 2002; Asami & Nolte, 1983; Kermond, 1979; Plagenhoef, 1971; Roberts & Metcalf, 1968; Tol et al., 2002; Tsaousidis & Zatsiorsky, 1996), ובניסויים המבוססים על תדר צילום גבוה מאוד (1-4.5 kHz) הוא 0.008-0.011 שני, ונראה שהטווח הזה משקף את המציאות במדויק יותר (Asai et al., 1995; Asai et al., 2002; Plagenhoef, 1971; Tol et al., 2002). במהלך זמן קצר זה מתבצעת העברת תנע מהגף הבועט אל הכדור, ובתהליך הזה משולבים מעוות ותקומה הן של כף הרגל והן של הכדור. הטכנולוגיה של צילום מהיר מאוד מאפשרת כיום לתעד את המאורעות המתרחשים בפרק זמן קצר זה. (Asami & Nolte, 1983) מדווחים על מתאם של -0.89 בין משך זמן המגע בין כף הרגל והכדור לבין מהירות השיגור. לפי Asai ואחרים (2002), המגע משתרע על פני כ-2/3 מקוטר הכדור (בממוצע 14.7 ס"מ).

קשיחות כף הרגל במהלך המפגש בכדור חיונית להעברת תנע אפקטיבית בין הרגל לכדור (Plagenhoef, 1971). למעשה, היא האחראית העיקרית לערכו של מקדם התקומה בהתנגשות. בכר"מ היא מושגת באמצעות כפיפה כפית לפני המפגש בכדור ושמירה על מנח זה במהלך המגע עמו (Blaettler, 1967; Plagenhoef, 1971). לפי (Luhtanen, 1988), ניתן לווסת את מקדם התקומה על ידי הגברת מתח השרירים בכף הרגל ובקרוסול. למיקום על כף הרגל שבו מתרחש המפגש חשיבות רבה מבחינת קשיחות האיבר החובט. בבעיטת punt העברת תנע אפקטיבית מתבצעת באמצעות מגע בכדור עם החלק העליון של גב כף הרגל (Kermond, 1979) או אף באזור הקרוסול (Alexander & holt, 1974; Plagenhoef, 1971). גם בכדורגל המרחק בין מרכז הכדור לקרוסול קצר יותר בקרב מיומנים מאשר בקרב לא-מיומנים (16.7 לעומת 22.0 ס"מ) (Ben-Sira, 1980). בהתאם לכך המרחק מהנקודה על גב כף הרגל שבה מופעל שקול הכוח על הכדור אל הקרוסול, קצר יותר (9.4 לעומת 14.6 ס"מ), והמומנט סביב הקרוסול קצר אף הוא בהתאם. הבדל זה מעיד שמיומנים משכילים ליצור מפגש בחלק העליון והקשיח יותר של גב כף הרגל, וכך להקטין את הרתע בקרוסול ובכף הרגל. בבעיטה המתרחשת בחלק

הדיסטאלי של כף הרגל, יש סיכון רב למעוות באזור עצמות המסרק. מידת המעוות של כף הרגל מדווחת על ידי Asami & Nolte (1983) בתדר צילום של 500 Hz. במהלך המגע השינוי הזוויתי באזור עצמות המסרק (34.6°) עולה על זה שבקרוסול (19.9°). המתאם בין מהירות השיגור של הכדור לבין השינוי הזוויתי גדול יותר באזור עצמות המסרק ($r = -0.81$) מאשר בקרוסול ($r = -0.41$). מכאן שמזעור המעוות בכף הרגל חיוני להעברת תנע מועילה אל הכדור. בנייתוח אחר של 150 בעיטות, ב-39% מהמקרים יש פשיטת יתר בקרוסול (plantar flexion) במהלך המגע בכדור, שהיא מעבר לטווח המרבי של פשיטה עצמונית (Tol et al., 2002). הזווית הממוצעת בקרוסול במפגש היא 63.9° (26.1° של כפיפה כפית ממצב אנטומי), ובמהלך המגע עם הכדור מגיעה ל- 42.4° , כלומר רתע של 21.5° . מיקום המפגש בכדור הוא בחלק הקדמי המדיאלי של הקרוסול כשב-89% מהמקרים יש מגע של הכדור עם בסיס ה-metatarsal הראשון, ב-76% מהמקרים עם ה-medial maleolus וב-62% מהמקרים גם עם ראש ה-metatarsal הראשון. המעוות בכף הרגל, דיסטאלית לקרוסול, מדווח גם על ידי Asai ואחרים (2002) באמצעות צילום בתדר דגימה גבוה במיוחד (4.5 kHz). במהלך המגע בכדור כמעט שאין האטה בקרוסול, אך ההאטה בולטת באזורי כף הרגל האחרים, והיא גדלה ככל שהם מרוחקים מהקרוסול. בניסוי נוסף, Asai ואחרים (2004) מראים שהמעוות בקרוסול גדול ככל שהמפגש בכדור מרוחק ממנו, ולטענתם, מגע כזה גורם לאיבוד אנרגיה רבה. בנייתוח תנועה המבוסס על הנחה של התנגשות בין שני גופים קשיחים, אירועי ההתנגשות עצמה הם בחזקת "קופסה שחורה", שהערכת המתרחש בה מבוססת על נתוני המפגש וההיפרדות בין כף הרגל והכדור. המעוות המתועד בעבודות אלה מלמד על המתרחש בפרק זמן קצר מאוד זה, הן מהבחינה הביומכאנית והן מהבחינה האנטומית.

מידת הסיכון לפציעות בעקבות מגע בכדור בעצמות המסרק לא נבדקה באופן ממשי אף שפציעות באזור של הקרוסול וכף הרגל שכיחות בכדורגל. לפי Asami & Nolte (1983), הכוח הממוצע הפועל בין כף הרגל לכדור הוא כ-1100N. לא ניתן לדעת מכך מהו הכוח המרבי, שכן הוא עולה במהלך המעוות ואחר כך יורד בשלב התקומה. בניסוי אחר מתועד כוח מרבי של 2400N, כוח ממוצע של 1200N וזמן מגע של 9.6 אלפיות השנייה (Asai et al., 1995). לפי ניסוי זה נראה שבמהלך ההתנגשות הכוח המרבי כפול בערך מהכוח הממוצע. Tol ואחרים (2002), מדווחים על כוח ממוצע דומה (1025 N), וטוענים שהמפגש בכדור גורם לתפוצה של anterior ankle impingement syndrome. ברם לא מדווחות ראיות ממשיות לגבי העומסים הקריטיים המסכנים את כף הרגל בפציעה מסוג זה.

הכדור גם הוא מתעוות במהלך ההתנגשות, עד כדי 85% מקוטרו (Asai et al., 2002, 2004). דפוס המעוות של הכדור תלוי בגורמים שונים, כמו בלחץ האוויר שבתוכו, במיקום המפגש ברגל הבוועט, בשטח המגע ביניהם ובעצמה של הפעלת הכוח על הכדור וכיוונו. חוקי המשחק מקבעים את מאפייני הכדור (גודל, לחץ אוויר וחומר) כך שהתוצאה של שיגורו נקבעת בעיקר על ידי התנועה של הבוועט. מבחינת המיקום בכדור שבו המפגש עם הרגל

מניב מהירות שיגור מרבית, Asai ואחרים (2002) מראים שהוא נמצא 2 ס"מ מתחת למרכז הכדור. לא ניתן לכך הסבר. על פניו, האפקט המרבי היה אמור להיות בחבטה דרך מרכז הכובד של הכדור. אפשר שנוכח החיכוך עם הקרקע רכיב אנכי מסוים מסייע בהורדת ההתנגדות הנובעת מהחיכוך. בכל מקרה, מיקום המפגש צפוי להשפיע על זווית השיגור, ולפיכך יש להתאימו לאילוצי הבעיטה הספציפית.

את התכונות האלסטיות של ההתנגשות מבטא מקדם התקומה. הוא נקבע על ידי הקשיחות של הכדור והגף הבועט בעת ההתנגשות (Bull-Andersen et al., 2004). בין הכדור לרצפת עץ מתועד מקדם תקומה של $e = 0.76$ (Plagenhoef, 1971). ואולם, ערכו עשוי להשתנות בהתאם למאפייני הגוף שבו הכדור מתנגש או עקב שינוי בתכונות הכדור, כמו בעת צבירת רטיבות. מקדם התקומה הממוצע שחושב בעת בעיטה בכר"מ, הוא $0.575 [0.4-0.68]$ (Bull-Andersen et al., 1999). ההבדלים בין הנבדקים מעידים שתוצאות ההתנגשות תלויות לא רק בתכונות האלסטיות הקבועות של הכדור, אלא גם במאפייני הבועט. בניסוי נוסף, Bull-Andersen ואחרים (2004) מדווחים שבמעבדה מקדם התקומה גבוה יותר בהתנגשות במשטח צר מאשר במשטח רחב בנפילה מגבהים של 0.36 מ' (0.91 לעומת 0.85), 2 מ' (0.88 לעומת 0.83) ו-3.6 מ' (0.86 לעומת 0.78). מקדם התקומה בבעיטת בהונות גבוה יותר מבכר"מ, כפי שצפוי על פי ניסוי המעבדה, אך רק במהירויות של 15 m/s ומטה. במהירויות גבוהות יותר לא נמצאו הבדלים בין הבעיטות. ההסבר שניתן לכך הוא שבמהירויות גבוהות כנראה קשה יותר לשמור על קשיחותה של כף הרגל, ומשום כך על האוריינטציה שבין הכדור לרגל.

יחס בין מהירות הכדור לבין מהירות כף הרגל

מהירות השיגור של הכדור ביציאה גבוהה ממהירות כף הרגל בהתנגשות. בבעיטות בכדורגל ובכדורגל אמריקאי, באלה שבהן מתקיים "מגע טוב" בין כף הרגל לכדור, מהירות היציאה של הכדור גדולה ב- 5-7 m/s ממהירות הכדור (Roberts & Metcalfe, 1968). יש הרואים ביחס בין מהירות השיגור לבין מהירות כף הרגל במפגש מדד לאיכות הבעיטה (Asami & Nolte, 1983) המשקף את האפקטיביות של העברת התנע מהרגל הבועט אל הכדור. במחקרים שבהם מדווחים הן על ממוצע המהירות של כף הרגל בעת המפגש בכדור והן על ממוצע מהירות השיגור של הכדור, ניתן לחשב את היחס בין ממוצעי שתי המהירויות. באופן תיאורטי, הליך זה לוקה בחסר משום שהיחס בין שני הממוצעים אינו זהה בהכרח לממוצע של היחסים. ואולם במאמר שבו מפורטים נתוני המהירות של כף הרגל במפגש עם הכדור ושיגור הכדור של כל אחד מהנבדקים, היחס בין הממוצעים אומד בדיוק רב את ממוצע היחסים בין המשתנים (Nunome et al., 2006). אומדנים של ממוצע היחס בין מהירות היציאה של הכדור לבין המהירות של כף הרגל נעים בין 1.06 ל-1.93. הנתונים מצביעים על שונות רבה מאוד. האומדן של מדד זה על פי הספרות הוא בעייתי. כפי שכבר הוזכר, מהירות הכדור מתועדת באמצעות טכנולוגיות שונות ותדרי דגימה שונים, ואלה יכולים להשפיע על

ערכי המהירות הנמדדים. בנוסף וחמור מכך, תיעוד מהירות כף הרגל נעשה אף הוא באופנים שונים: על בסיס הבהונות, הקרסול או מרכז הכובד של כף הרגל. בדיווחים שבהם מתועדות מהירות הקרסול ומהירות הבהונות, היחס המבוסס על הקרסול גבוה באופן ניכר מזה המבוסס על הבהונות (Barfield et al., 2002; Lees et al., 2004; Manolopoulos et al., 2004). היחס על פי מרכז הכובד של שניהם צפוי להיות בין שני הערכים הללו. מכיוון שהיחס בין המהירויות מבוסס על מקורות שגיאיה הן באומדן מהירות הכדור והן באומדן מהירות כף הרגל, השגיאה בו צפויה להיות מושפעת משניהם. למרות כל אלה ב-4 דיווחים על בעיטת כר"מ בקרב מיומנים, שבהן אומדן היחס בין המהירויות נעשה על פי מרכז הכובד, היחס נמצא בטווח די צר של 1.32 ל-1.40 (Ben-Sira, 1980; Levanon & Dapena, 1998; Nunome et al., 2002; Nunome, Ikegami et al., 2006). הראיות לכך שאפשר להסביר את איכות הבעיטה באמצעות היחס בין המהירויות שנויות במחלוקת. ניתוח משני של נתוני Ben-Sira (1980) מצביע על יחס ממוצע של 1.40 ו-1.26 בקרב שחקנים מיומנים ולא-מיומנים בהתאמה. היחס הגבוה יותר מראה, לכאורה, על מפגש יעיל יותר אצל המיומנים, והבדל בין שני סוגי הבעיטים מעיד שמדד זה מאפשר הבחנה בין בעיטים מיומנים ללא-מיומנים. לעומת זאת ראיות אחרות אינן מספקות תמיכה לחשיבותו של המדד הזה. ההבדל ביחס בין מהירות השיגור לבין מהירות כף הרגל במפגש בין הרגל הדומיננטית ללא-דומיננטית קטן מאוד על אף שלרגל הדומיננטית יתרון ברור במהירות השיגור (Nunome, Ikegami et al., 2006). בדיווח אחר היחס בין המהירויות נמוך יותר ברגל הדומיננטית מאשר ברגל הלא-דומיננטית, הן בקרב כדורגלנים והן בקרב כדורגלניות (Barfield et al., 2002). נתוניו של Manolopoulos ואחרים (2004) שעל פיהם המדד הנמוך יותר בעקבות אימון כוח (1.30) מאשר לפניו (1.35) עומד בסתירה להנחה ששיפור בכוח אמור לעלות את איכות הבעיטה, ושהדבר אמור לבוא לידי ביטוי ביחס גבוה יותר בין המהירויות. בהשוואה בין בעיטות במהירויות שונות היחס גדל, ככל שהמהירות איטית יותר (Zernicke & Roberts, 1978). גם ממצא זה סותר, כביכול, את המצופה מבחינה תיאורטית. אפשר שהסיבה לתופעה זו היא שבמהירויות איטיות רמת הדיוק של המפגש עם הכדור גבוהה יותר, והיא תורמת לאפקטיביות רבה יותר בתוצאות הבעיטה. הסבר נוסף הוא שמקדם התקומה נמוך יותר במהירויות גבוהות מאשר במהירויות נמוכות, כפי שעולה מניסוי המעבדה של Bull-Andersen ואחרים (2004).

לא נמצאו מחקרים שבהם נבדק יחס זה מבחינת בעיטות מוצלחות ומוצלחות פחות ברמת הפרט. נוכח הטרחה הרבה בניתוח הנתונים של כל בעיטה מרבית החוקרים נוהגים לנתח רק בעיטה אחת של כל נבדק, בדרך כלל את זו המוצלחת מבין מספר ניסיונות. גישה תוך-אינדיבידואלית עשויה להאיר טוב יותר את חשיבותו של מדד זה בהערכת איכות הבעיטה. עד כאן עסקה הסקירה בתיאור מרכיבי התנועה של הבעיטה, בעיקר של כר"מ. להלן תוצג התייחסות קצרה ומוגדרת לביצועה באילוצים ייחודיים, שחקר ההסתגלות אליהם עשוי לתרום להבנתה, כמו בעיטה בתנאי עייפות ובעיטה ברגל הלא-דומיננטית. כן יידון החקר

של צורות בעיטה אחרות, כמו בעיטה בפנים כף הרגל, בעיטת בהונות ובעיטה "מסובבת".

בעיטה בתנאי עייפות

תפקוד בתנאי עייפות עשוי לחשוף מאפייני כשל תנועתי ולאפשר לאתר את המנגנונים ההופכים את הבעיטה לאפקטיבית. מחקרים מסוג זה מעטים, לא עקביים בממצאיהם ועד עתה אינם מספקים הסברים ברורים לגבי הירידה במהירות השיגור של הכדור בעייפות לעומת מהירות השיגור בתנאי רעננות. לפי Lees & Davies (1988) עייפות אינה מלווה בשינוי במהירות המפגש בכדור או במשתנים קינמאטיים אחרים בגף התחתון. את הירידה במהירות השיגור הם מייחסים לכשל קואורדינטיבי הפוגע בהעברת אנרגיה בין הירך לברך, לתזמון לקוי, ולמפגש לקוי בין כף הרגל לכדור, בלי הצגת ראיות להסברים אלה. כנגד זה, Aprianon ואחרים (2006) טוענים שבעיטה בעייפות מלווה בירידות במהירות כף הרגל במפגש ובמהירות הסיבוב המרבית בברך. הם מייחסים ירידה זו ליכולת שרירית פחותה, שלדעתם, משפיעה על דפוס פעולת הגומלין בין הירך לשוק. לפי ממצאיהם, בעת עייפות נעלמת הפעילות האקצנטרית של כופפי הברך לפני המפגש בכדור, והם רואים בכך פוטנציאל לסכנת פציעה במצב של עייפות. הם טוענים עוד שההתנגשות בין כף הרגל לכדור אפקטיבית פחות בזמן עייפות. באף לא אחד מהמחקרים הללו יש הסבר למנגנון המדויק שבגללו נגרם כשל חלקי בייצור עצמה מרבית של בעיטה. בגישה השוואתית זו יש פוטנציאל לחשוף ולו חלק מהמרכיבים הקריטיים של בעיטה אפקטיבית. מומלץ לכלול בגישה זו באופן שיטתי סוגים ועצמות שונות של עייפות, ביחוד כאלה האופייניים למשחק.

רגל דומיננטית לעומת רגל לא-דומיננטית

דרך אחרת לעמוד על המרכיבים החיוניים של בעיטה מיטבית היא להשוות את הבעיטה ברגל הלא-הדומיננטית לזו של הרגל הדומיננטית. מעט הראיות שנצברו בסוג זה של השוואה עד כה לא מספק הסכמות שתרומתן משמעותית להבנת המנגנון האחראי לאיכות הבעיטה. על מהירות שיגור גבוהה יותר ברגל הדומיננטית מאשר בלא-דומיננטית מדווח בכמה ניסויים (לוח 1). הבדלים דו-צדדיים ברורים במהירות כף הרגל במפגש בכדור (18.6 m/s) לעומת (17.0) ובמהירות הסיבוב המרבית של השוק ($1610 \text{ }^\circ/\text{s}$) לעומת (1484) מעידים על איכות בעיטה גבוהה יותר בצד הדומיננטי (Dorge et al., 2002). המגמות דומות אצל Nunome, Ikegami ואחרים (2006) (23.8 m/s) לעומת 20.6 במהירות כף הרגל, $2257 \text{ }^\circ/\text{s}$) לעומת 1822 במהירות הסיבוב המרבית של השוק). לפי Dorge ואחרים (2002), אין הבדל דו-צדדי במהירות הקווית של הברך, ומכאן שהמקור להבדלים באיכות התנועה בין הצדדים הוא בפשיטה בברך. מהירות הסיבוב המרבית בירך גדולה באופן מובהק בצד הדומיננטי, אך בשאר המרכיבים אין הבדלים בין הצדדים, ובכלל זה במומנטים המרביים בירך. אין להם הסבר ברור למנגנון המבדיל בין הצדדים, אך להערכתם, הוא תלוי באינטראקציה בין

תנועת הירך ובין השוק. ל-Nunome, Ikegami ואחרים (2006) ממצאים הפוכים. אין הבדל בין הצדדיים במהירות של חוליית הירך, אך המומנטים בפשיטת הברך (130 Nm לעומת 95) ובכפיפת הירך (309 Nm לעומת 269) וכן מומנט הריאקציה של הירך לפשיטה בברך (130 Nm- לעומת 95-) גדולים יותר בצד הדומיננטי. לטענתם, המומנט בברך והריאקציה של הירך לפשיטה מוכיחים בבירור שהמקור להבדל בין הצדדים הוא דווקא בעצמת הפשיטה בברך ולא באינטראקציה בין החוליות.

לפי Dorge ואחרים (2002), מקדם התקומה המחושב ברגל הדומיננטית גבוה מזה שברגל הלא-דומיננטית (0.58 לעומת 0.50). ההבדל מיוחס לקשיחות גדולה יותר בקרסול ובמפרקי כף הרגל. לעומת זאת לפי Nunome, Ikegami ואחרים (2006), אין הבדל בין הצדדים ביחס בין מהירות השיגור לבין מהירות כף הרגל במפגש, ומכאן שהמקור למהירות השיגור הגבוהה יותר בצד הדומיננטי הוא במהירות במפגש ולא במאפייני ההתנגשות. אשר לפעילות השרירים, אין השוואות דו-צדדיות בספרות, למעט אחת, בבעיטה הייחודית לכדורגל אוסטרלי שבה פרופיל פעילות השרירים דומה בשני הצדדים, והחוקרים מסיקים מכך שארגון התנועה דומה בשניהם (Orchard et al., 1999).

בעיטה באמצעות פנים כף הרגל (פכ"ר)

למרות שכיחותה הגבוהה במשחק בעיטת פכ"ר נחקרה מעט יחסית לכר"מ. יתרונה בדיוק הבעיטה. בכר"מ המגע בכדור מתבצע באמצעות משטח מעוגל וקטן יחסית של גב כף הרגל. בניגוד לו החלק הפנימי של כף הרגל גדול יותר ושטוח יחסית, ומאפשר שליטה טובה יותר בכיוון הכדור. כמו כן, הקרסול קשיח בכיוון הלטרלי, והרתע בכיוון זה נמוך ומאפשר שליטה טובה יותר בעצמת החבטה. פכ"ר מתבצעת באילוצים אנטומיים ייחודיים. מנחי החוליות של הגף התחתון שונים בהכרח מאשר בכר"מ (Levanon & Dapena, 1998). הפניית פנים כף הרגל למפגש בכדור מבוססת בעיקר על הפנייה באגן לכיוון הצד הבוועט ועל סיבוב חוצה בירך. במנח כזה המהירות שאפשר לפתח בירך פחותה מאשר בכר"מ. אכן, מהירות השיגור בפכ"ר נמוכה, בדרך כלל, מאשר בכר"מ (86% על פי Nunome et al., 2002 ו-79% על פי Levanon & Dapena, 1998), וההבדל מיוחס למהירות נמוכה יותר של כף הרגל במפגש בכדור, ולא לאיכות ההתנגשות (Levanon & Dapena, 1998; Nunome et al., 2002). למרות ההתאמה הנדרשת במנח הגף התחתון, פשיטת הברך היא עדיין המקור העיקרי למהירות כף הרגל בפכ"ר. אבל בשונה מכר"מ, מישור התנועה של השוק אלכסוני למישור השיגור של הכדור. כך, בעת המפגש בכדור, לכף הרגל רכיב מהירות בולט שהוא ניצב לכיוון הבעיטה (8.4 m/s), ואילו רכיב המהירות בכיוון הבעיטה נמוך מזה שבכר"מ (18.3 m/s לעומת 21.6). בין כר"מ לפכ"ר הבדלים גם בתזמון (Nunome et al., 2002). התנועה הכוללת בכר"מ ארוכה יותר (0.221 לעומת 0.190 שני). מבחינת החלוקה היחסית של הזמן, בכר"מ שלב הפשיטה בירך (48.5% לעומת 33.7%) ושלב הפשיטה בברך (23.2% לעומת 20.0%) ארוכים מאשר

בפכ"ר. המגמה הפוכה בשלב הביניים שבו מתרחשת כפיפה בירך, אך עדיין לא מתחילה הפשיטה בברך (28.2% לעומת 46.3%). משמעות הדבר היא שבפכ"ר מודגשת יותר התנועה בירך, ואילו הפשיטה בברך מודגשת פחות. אכן, בפכ"ר מהירות הסיבוב המרבית בברך נמוכה ב-23% מאשר בכר"מ ($1049^{\circ}/s$ לעומת 1364), אך גבוהה ב-11% בכפיפה של הירך ($888^{\circ}/s$ לעומת 739) וב-85% בסיבוב חוצה בירך ($642^{\circ}/s$ לעומת 344). גם לפי Levanon & Dapena (1998), מהירות הסיבוב המרבית בברך נמוכה בכר"מ מאשר בפכ"ר, ומהירות הסיבוב בירך במפגש בכדור גבוהה בפכ"ר מאשר בכר"מ ($330^{\circ}/s$ לעומת 110). הטיעון להתבססות קטנה יחסית על הברך בפכ"ר נתמך גם על ידי הכפיפה המרבית הקטנה יותר בברך – 105° לעומת 130° (Levanon & Dapena, 1998). המומנטים המרביים במפרקים תומכים אף הם בפרשנות זו (Nunome et al., 2002). אצל 5 שחקני נוער המומנט הממוצע בפכ"ר נוטה להיות נמוך ב-18% בפשיטת הברך וב-9% בכפיפה בירך, אך גבוה ב-70% בסיבוב חוצה בירך וב-12% בקירוב הירך. לסיכום, ההבדל הבולט והמובהק ביותר בין שתי הבעיטות הוא במשתני הסיבוב החוצה בירך.

הבדל נוסף בין הבעיטות הוא שבכר"מ הפשיטה המרבית בירך גדולה יותר (29° לעומת 19°), ובעת המפגש בכדור הכפיפה בירך פחותה יותר (22° לעומת 31°). כך, אף על פי שאין הבדל בטווח התנועה בירך, בכר"מ נעשה שימוש רב יותר ב"דריכה" לאחור שהיא, ככל הנראה, רלבנטית פחות לפכ"ר נוכח הצורך לשלב סיבוב חוצה. במפגש בכדור ההבדל בזווית הברך קטן (48° בכר"מ ו- 53° בפכ"ר) והשוניות גדולה. יש הבדל בין שתי הבעיטות גם בזווית הקרסול בשל צורת המפגש בכדור. בכר"מ הוא מצוי בכפיפה כפית (56°) כדי לאפשר מגע עם גב כף הרגל. המפגש בפכ"ר מייתר את הצורך במנח זה והזווית כמעט ישרה (91°). הבעיטות נבדלות גם בתנועת האגן שהיא מותאמת לסוג הבעיטה. במפגש בכדור בכר"מ האגן נמצא קרוב למצב חזיתי ביחס לכיוון הבעיטה (6° הפניה בכיוון הכדור). לעומת זאת בפכ"ר הוא מופנה הרבה יותר (23°) לכיוון הצד הבועט. ההפניה הזו משולבת בסיבוב חוצה בירך, ושניהם יחד מאפשרים את המפגש בפנים כף הרגל. מנח זה בהפניה בעת המפגש בכדור מגביל את טווח התנועה של הסיבוב באגן במישור האופקי שבפכ"ר הוא קצר במחצית לעומת בכר"מ (18° לעומת 36°). לא ברור באיזו מידה טווח תנועה מוגבל זה משפיע על מהירות כף הרגל בפכ"ר. לבסוף, משך הצעד האחרון בפכ"ר קצר מאשר בכר"מ. ההבדל בזמן הוא בעיקר בשלב המעוף מהגף הבועט אל הגף התומך (Levanon & Dapena, 1998). הבדל זה אינו מוסבר, אך ייתכן שבפכ"ר ניתן לנצל פחות את התנע הנצבר בגישה נוכח הצורך להתאמות באגן ובירך.

בעיטת בהונות (toe kick)

בעיטת בהונות אופיינית לבעיטת שוער בכדורגל וגם למצבים במגרש, כמו בבעיטה אגב התקדמות עם הכדור או כשצריך לבעוט בלחץ של זמן. השימוש במפגש של כדור בקדמת הנעל מאפשר לקצר את משך זמן ההגעה אל הכדור, כפי שמתחייב לא אחת נוכח לחץ היריב.

הימנעות מכפיפה כפית, המשמרת גף בועט קצר, ומהטיית משקל הגוף לכיוון הגף התומך, הם המאפשרים את קיצור הזמן. החיסרון הבולט של בעיטה זו הוא הקושי להבטיח את דיוק הבעיטה. קושי זה נובע משטח המגע הקטן בין הנעל לבין הכדור. סטייה, ולו קטנה, עלולה לגרום לשינוי ניכר בכיוון השיגור. השליטה בכיוון טובה יותר בכר"מ או בכר"מ שבהן שטח המגע גדול יותר ומאפשר לשלוט טוב יותר במיקום הפעלת הכוח על הכדור.

בעקבות שערן הנודע של רונלדו בחצי גמר גביע העולם ב-2002, Kristensen ואחרים (2004) מעלים את הסברה שלבעיטת בהונות יתרונות במצבים שבהם הזמן וטווח התנועה העומדים לרשות הבעט קצרים. על אף שבעיטה בכר"מ מדויקת יותר, כשמתאפשרת גישה ארוכה במצב שבו לא ניתן לממש יותר מצעד אחד או את מלוא תנועת ההכנה לאחור, קיימת סכנה לפגיעה בדיוק ובעצמה גם בכר"מ. לפי הניסוי בגישה של צעד יחיד שעליו הם מדווחים, אין הבדל בעצמת שיגור מרבית בין כר"מ לבין בעיטת בהונות. לעומת זאת בבעיטות תת-מרביות (מהירות שיגור > 90% מהירות מרבית) זו בכר"מ מדויקת יותר מבעיטת בהונות. ההבדל מיוחס לשטח המגע הגדול יותר בין כף הרגל לכדור. בבעיטת בהונות יש נטייה לשכיחות גבוהה יותר של בעיטות בכיוון החלק החיצוני של כף הרגל מאשר בכיוון החלק הפנימי. בכר"מ לא קיימת נטייה כזו. המסקנה מהניסוי היא שלשימוש בבעיטת בהונות אין כל יתרון. בניסוי נוסף שמודגשים בו דיוק וזמן בעיטה קצר, הדיוק אינו שונה בבהונות מזה שבכר"מ (Sorenson et al., 2004). לטענתם, באמצעות בעיטת בהונות ניתן להשיג מהירות כדור נתונה בזמן קצר יותר מאשר בכר"מ, אף שמהירות כף הרגל בעת ההתנגשות נמוכה יותר. טענה זו תואמת את הממצאים של Bull-Andersen ואחרים (2004), כלומר, הפלת כדור על משטח צר מניבה מקדם תקומה גבוה יותר מאשר הטלתו על משטח רחב, ושבמהירויות נמוכות מ-15 m/s מקדם התקומה בבעיטת בהונות גבוה מאשר בכר"מ. ממצאים אלה תומכים בהנחה כי במצבים של לחץ זמן יש לבעיטת בהונות יתרון מסוים.

בעיטה מסובבת

כפי שהוצג בניתוח התיאורטי, סיבוב הכדור מאפשר ליצור מסלול החורג ממסלול הפרבולה המוקנה לו על פי מהירות השיגור וכיוונו. סיבוב הכדור נובע מחבטה בכדור בקו פעולה החורג ממרכזו ומחיוך בין הנעל לבין הכדור (Asai et al., 2002; 2004; Carre et al., 2004). לפי Asai ואחרים, עיקר הסיבוב נובע מקו פעולה המרוחק ממרכז הכדור, ורק באופן שולי יחסית מהחיוך בין הנעל לכדור.

בבעיטה מסובבת הסיבוב בא על חשבון מהירות המעוף של הכדור. ככל שמידת הסיבוב עולה, כך יורדת מהירות השיגור של הכדור (Asai et al., 2002; 2004; Carre et al., 2004). לפי Carre ואחרים (2005), כדור הנבעט שלא במרכזו מאופיין במסלול עקום, אך זמן הגעתו למטרה ממושך יותר ויכול להגיע עד פי 2 מזמן מעוף של כדור הנבעט במרכזו. Neilson & Jones (2005) השוו בין בעיטה ישרה בכר"מ לבעיטות "מסובבות" בכר"מ

ובחלק החיצוני של כף הרגל, ואומנם, מהירות היציאה הממוצעת גבוהה בבעיטה הישירה (23.5 m/s , 27.1 ו- 20.9 , בהתאמה). בבעיטות המסובבות מהירות הסיבוב של הכדור גבוהה מאוד ($2848 \text{ }^\circ/\text{s}$) מסובבת בכר"מ, $2833 \text{ }^\circ/\text{s}$ בחלק החיצוני של כף הרגל). השוואה בין עצמת הכוחות המרביים על הכדור בין בעיטה מסובבת לבין כר"מ מדגימה את ההבדלים בכיוון הפעלת הכוח על הכדור: כוח אופקי מרבי של 2206N לעומת 2439 , כוח אנכי מרבי של 1221N לעומת 853 וכוח לטרנאלי מרבי של 1143N לעומת 452 , בהתאמה (Asai et al., 2002, 2004). הרכיבים האנכי והלטרנאלי גדלים בבעיטה מסובבת על חשבון עצמת כוחות אופקית בכיוון הבעיטה. ממצאים אלה עולים בקנה אחד עם קו הפעולה של הרגל המרוחק ממרכז הכדור. Carre ואחרים (2004) מעריכים שהמרחק המיטבי של קו הפעלת הכוח הוא כ- 10 ס"מ ממרכז הכדור.

מפאת קוצר המקום לא יידון במאמר זה מעוף הכדור ומאפייני הכוחות הפועלים עליו במעופו. הקורא המעוניין מופנה לקרוא על כך אצל Carre ואחרים (2002, 2004, 2005), Bray & Kerwin (2003) ו-Cook & Goff (2006).

אחרית דבר

הספרות מתארת באופן נרחב ומפורט את הפרמטרים המכאניים של הבעיטה, בייחוד של כר"מ. אף על פי שנראה כי המחלוקת בקשר לפעולת הגומלין בין הירך לברך מוכרעת, הסבר המנגנונים ההופכים את הבעיטה לאפקטיבית אינו מובהר עד הסוף. מחסור בולט קיים בהבנת ארגון התנועה בבעיטה המתרחשת כמיומנות פתוחה, ובמיוחד באפיון בעיטה בכדור הנמצא בתנועה על הקרקע או באוויר. מאפייני ההסתגלות הנדרשים בבעיטות כאלה עשויים להיות ייחודיים ושונים מבעיטות נייחות, בדיוק כפי שמאפייני פכ"ר ובעיטה מסובבת שונים מאלה של כר"מ. כמו כן, מועט המחקר על בעיטות תת-מרביות שהן השכיחות ביותר במשחק. בהקשר זה, ההתבססות, המוחלטת כמעט, על מהירות השיגור כמדד לאיכות הבעיטה טעון אף הוא חשיבה מחדש נוכח חשיבות הדיוק כמרכיב במטרות הבעיטה. יש מקום לבחון מהי הפשרה המיטבית, מבחינת ארגון התנועה, היכולה להבטיח הצלחה רבה יותר לאורך זמן בהשגת כל מטרות הבעיטה. צורך חשוב נוסף שלו רלבנטיות רבה להוראה ולאימון הוא להבין את תהליכי ההסתגלות הנדרשים כדי לטפח מיומנות בעיטה מיטבית הן מבחינת התכונות הפיזיות, כמו כוח וגמישות, והן מבחינת הקואורדינציה התנועתית. הנתונים בסקירה מבוססים בעיקרם על ממוצעים של מספר קטן של נבדקים. השונות הבין אישית ברוב הפרמטרים רבה. אבחון ההתאמה התנועתית של כל אינדיבידואל בהתאם ליכולותיו, למגבלותיו ולאילוצי המטלה, הוא נושא חשוב שלא ניתנה עליו הדעת עד כה בחקר הבעיטה.

הטכנולוגיה הדרושה לניתוח תנועת הבעיטה מספקת כיום מענה על חלק מהמגבלות שהפחיתו בעבר את יכולתנו להבין את משתני התנועה. יש להניח כי פריצות דרך בתחום

זה צפויות בעתיד. ואולם חוסר אחידות בהגדרות של משתני התנועה, כמו למשל, בהגדרת מהירות כף הרגל, מצריך האחדה של הגדרות המשתנים העיקריים בבעיטה.

רשימת המקורות

- Aitchison, I., & Lees, A. (1983). A biomechanical analysis of place kicking in rugby union football. **Journal of Sports Sciences**, **1**, 136-137.
- Alexander, A., & Holt, L. E. (1974). Punting: A cinema-computer analysis. **Scholastic Coach**, **43**, 14.
- Alexander, M. J. (1983). The pattern of body segment movement in high speed sport skills. **Coaching Science Update**, 15-19.
- Anderson, D. I., & Sidaway, B. (1994). Coordination changes associated with practice of a soccer kick. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, **65**, 93-99.
- Apriantono, T., Nunome, H., Ikegami, Y., & Sano, S. (2006). The effect of muscle fatigue on instep kicking kinetics and kinematics in association football. **Journal of Sports Sciences**, **24**, 951-960.
- Asai, T., Akatsuka, T., & Kaga, M. (1995). Impact process of kicking in football. In **Proceedings of the XVth congress of the international society of biomechanics** (pp. 74-75). Finland: University of Jyväskylä.
- Asai, T., Carre, M. J., Akatsuka, T., & Haake, S. J. (2002). The curve kick of a football I: impact with the foot. **Sports Engineering**, **5**, 183-192.
- Asai, T., Nunome, H., Matsubara, S., & Lake, M. (2004). Computer simulation of kicking a ball using the finite element skeletal foot model. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 485.
- Asami, T., & Nolte, V. (1983). Analysis of powerful ball kicking. In H. Matsui, & K. Kobayashi (Eds.), **Biomechanics VIII-B** (pp. 695-700). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Asami, T., Togari, H., Kikuchi, T., Adachi, N., Yamamota, K., Kitagawa, K., & Sano, Y. (1976). Energy efficiency of ball kicking. In P. V. Komi (Ed.), **Biomechanics V-B** (pp. 135-140). Baltimore: University Park Press.
- Barfield, W. R., Kirkendall, D. T., & Yu, B. (2002). Kinematic instep kicking differences between elite female and male soccer players. **Journal of Sports Science and Medicine**, **3**, 72-79.
- Blaettler, R. B. (1967). Mechanical analysis of place kicking. **Athletic Journal**, **47**, 102-103.

- Ben-Sira, D. (1980). **A comparison of the mechanical characteristics of the instep kick between skilled soccer players and novices**. Ph.D Dissertation. The University of Minnesota.
- Bloomfield, J., Elliot, B. C., & Davies, C. M. (1979). Development of soccer kick: A cinematographic analysis. **Journal of Human Movement Studies**, **5**, 152-159.
- Bober, T., Putnam, C., & Woodworth, G. C. (1987). Factors influencing the angular velocity of a human limb segment. **Journal of Biomechanics**, **20**, 511-521.
- Bollens, E. C., De Proft, E., & Clarys, J. P. (1987). The accuracy and muscle monitoring in soccer kicking. In B. Jonsson (Ed.), **Biomechanics X-A** (pp. 283-288). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Bray, K., & Kerwin, D. G. (2003). Modeling the flight of a soccer ball in a direct free kick. **Journal of Sports Sciences**, **21**, 75-85.
- Browder, K. D., Tant, C. L., & Wilkerson, J. D. (1991) A three dimensional kinematic analysis of three kicking techniques in female players. In C. L. Tant, P. E. Patterson, & S. L. York (Eds.), **Biomechanics in sport IX** (pp. 95-100). Ames, IA: Iowa State University Press.
- Bull-Andersen, T., Dorge, H. C & Thomsen, F. I. (1999). Collisions in soccer kicking. **Sports Engineering**, **2**, 121-125.
- Bull-Andersen, T., Kristensen, L. B., & Sorensen, H. (2004). Coefficient of restitution in toe and instep soccer kicks. **Journal of Sports Sciences** , **22**, 486-487
- Carre, M. J., Asai, T., Akatsuka, T., & Haake, S. J. (2002). The curve kick of a football II: flight through the air. **Sports Engineering**, **5**, 193-200.
- Carre, M. J., Goodwill, S. R., & Haake, S. J. (2005). Understanding the effect of seams on aerodynamics of an association football. **Journal of Mechanical Engineering Science**, **219**, 657-666.
- Carre, M. J., Haake, S. J., & Asai, T. (2004). The behaviour of a football during a free kick. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 487-488.
- Cook, B. G., & Goff, G. E. (2006). Parameter space for successful soccer kicks. **European Journal of Physics**, **27**, 865-874.

- Dauids, K., Lees, A., & Burwitz, J. (2000). Understanding and measuring coordination and control in kicking skills in soccer: Implications for talent identification and skill acquisition. **Journal of Sports Sciences**, **18**, 703-714.
- Dicks, M., & Kingman, J. (2005). The effect of altered ball approach on kick kinematics and shot accuracy: a soccer case study. **Journal of Sports Sciences**, **23**, 99-100.
- Dorge, H. C., Bull-Andersen, T., Rensen, H. S., & Simonsen, E. B. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. **Journal of Sports Sciences**, **20**, 293-299.
- Dorge, H. C., Bull-Andersen, T., Surensen, H., Simonsen, E. B., Aagaard, H., Dyhre-Poulsen, P., & Klausen, K. (1999). EMG activity of the iliopsoas muscle and leg kinetics during the soccer place kick. **Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports**, **9**, 195-200.
- Dunn, E. G., & Putnam, C. A. (1988). The influence of lower leg motion on thigh deceleration in kicking. In G. de Groot, A. P. Hollander, P. A. Huijing, & G. J. van Ingen Schenau (Eds.), **Biomechanics XI-B** (pp. 787-790). Amsterdam: Free University Press.
- Gentile, A. M. (1972). A working model of skill acquisition to teaching. **Quest**, **17**, 3-23.
- Gowitzke, B. A. (1979). Biomechanical principles applied to badminton stroke production. In J. Terauds (Ed.), **Science in racquet sports** (pp. 7-15). Del Mar, CA: Academic Press.
- Hay, G. J. (1985). **The biomechanics of sports techniques**. Engelwood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Huang, T. C., Roberts, E. M., & Youm, Y. (1982). The biomechanics of kicking. In D. N. Ghista (Ed.), **Human body dynamics impact, occupational and athletic aspects** (pp. 409-443). NY: Clarendon Press & Oxford University Press.
- Isokawa, M., & Lees, A. (1988). A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids, & W. J. Murphy (Eds.), **Science and football** (pp. 449-455). London: E & FN Spon.
- Jonsdottir, M. K., & Finch, A. (1998). Ball velocity and kinetics of the supporting foot during two soccer kicks, performed by female soccer players. In H. J. Riehle, & M. M. Veiten (Eds.), **XVI International symposium on biomechanics in sports, proceedings I** (pp.128-131). University of Konstanz.

- Kellis, E., Katis, A., & Gissis, I. (2004). Knee biomechanics of the support leg in soccer kicks from three angles of approach. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, **36**, 1017-1028.
- Kermond, J. K., & Konz, S. A. (1978). Support leg loading in punt kicking. **Research Quarterly**, **49**, 71-79.
- Kermond, J. L. (1979). Biomechanics of punting. In J. Terauds (Ed.), **Science in sports** (pp. 45-59). Del Mar, CA: Academic Press Publishers.
- Kristensen, L. B., Sorensen, H., & Bull-Andersen, T. (2004). Comparison of precision in the toe-kick and instep kick in soccer at high kicking velocities. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 490-491.
- Lees, A., & Davies, T. (1988). The effects of fatigue on soccer kick kinematics. **Journal of Sports Sciences**, **6**, 156-157.
- Lees, A., Kershaw, L., & Moura, F. (2004). The three-dimensional nature of the maximal instep kick in soccer. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 493-494.
- Lees, A., & Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: A review. **Journal of Sports Sciences**, **16**, 211-234.
- Levanon, J., & Dapena, J. (1998). Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, **30**, 917-27.
- Luhtanen, P. (1988). Kinematics and kinetics of maximal instep kicking in junior soccer players. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids, & W. J. Murphy (Eds.), **Science and football** (pp. 441-448). London: E & FN Spon.
- Luhtanen, P. Kicking. **Coaches' infoservice: Sports science information for coaches**. www.coachesinfo.com.
- MacMillan, M. B. (1975). Determinants of the flight of the kicked football. **Research Quarterly**, **46**, 48-57.
- MacMillan, M. B. (1976). Kinesiological determinants of the path of the foot during the football kick. **Research Quarterly**, **47**, 33-40.
- Manolopoulos, E., Papadopoulos, C., Salonikidis, K., Katartzi, E., & Poluha, S. (2004). Strength training effects on physical conditioning and instep kick kinematics in young amateur soccer players during preseason. **Perceptual and Motor Skills**, **99**, 701-710.

- Markovic, G., Dizdar, D., & Jaric, S. (2006). Evaluation of tests of maximum kicking performance. **Journal of Sports Medicine & Physical Fitness**, **46**, 215-220.
- McCrudden, M., & Reilly, T. (1993). A comparison of the punt and the drop-kick. In T. Reilly, J. Clarys, & A. Stibbe (Eds.), **Science and football I** (pp. 362-368). London: E & FN Spon.
- McLean, B.D., & Tumilty, D. M. (1993). Left-right asymmetry in two types of soccer kick. **British Journal of Sports Medicine**, **27**, 260-262.
- Morya, E., Bigatao, H., Lees, A. & Ranvaud, R. (2004). Penalty kick strategies: World Cup and club matches, 2000-2002. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 512-513.
- Neilson, P. J & Jones, R. (2005). Dynamic soccer ball performance measurement. In T. Reilly, J. Cabri, & D. Araujo (Eds.), **Science and football V** (pp. 21-27). London: Routledge.
- Nunome, H., Asai, T., & Ikegami, Y. (2005). Segmental dynamics of soccer instep kicking. Proceedings of the ISB XXth congress - ASB 29th annual meeting (pp. 384). Cleveland.
- Nunome, H., Asai, T., Ikegami, Y., & Sakurai, S. (2002). A Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, **34**, 2028-2036.
- Nunome, H., Ikegami, Y., Kozakai, R., Apriantono, T., & Sano, S. (2006). Segmental dynamics of soccer instep kicking with the preferred and non-preferred leg. **Journal of Sports Sciences**, **24**, 529-541.
- Nunome, H., Lake, M., Georgakis, A., & Lampros, K., Stergioulas, L. K. (2006). Impact phase kinematics of instep kicking in soccer. **Journal of Sports Sciences**, **24**, 11-22.
- Opavsky P (1988). An investigation of linear and angular kinematics of the leg during two types of soccer kick. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids, & W. J. Murphy (Eds.), **Science and football** (pp. 460-467). London: E & FN Spon.
- Orchard, J., Walt, S., McIntosh, A., & Garlick, D. (1999). Muscle activity during the drop kick punt. **Journal of Sports Sciences**, **17**, 837-838.
- Plagenhoef, S. (1971). **Patterns of human motion: A cinematographic analysis**. Engelwood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

- Putnam, C. A. (1983). Interaction between segments during a kicking motion. In H. Matsui, & K. Kobayashi (Eds.), **Biomechanics VIII-B** (pp. 688-694). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Putnam, C. A. (1991). A segment interaction analysis of proximal-to-distal sequential segment motion patterns. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, **23**, 130-144.
- Putnam, C. A. (1993). Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Descriptions and explanations. **Journal of Biomechanics**, **26**, 125-135.
- Roberts, E. M., & Metcalfe, A. (1968). Mechanical analysis of kicking. In J. Wartenweiler, E. Jokl, & M. Hebbelinck (Eds.), **Biomechanics** (pp. 314-315). NY: Karger.
- Roberts, E. M., Zernicke, R. F., Youm, Y., & Huang, T. C. (1974). Kinetic parameters of kicking. In R. C. Nelson & C. A. Morehouse (Eds.), **Biomechanics IV** (pp. 157-162). Baltimore: University Park Press.
- Robertson, D. G. E., & Mosher, R. E. (1985). Work and power of the leg muscles in soccer kicking. In D. Winter (Ed.), **Biomechanics IX-B** (pp. 533-538). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Rodano, R., Cova, P., & Vigano, R. (1988). Design of a football boot: A theoretical and experimental approach. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids, & W. J. Murphy (Eds.), **Science and football** (pp. 416-425). London: E & FN Spon.
- Rodano, R., & Tavana, R. (1993). Three dimensional analysis of the instep kick in professional soccer players. In T. Reilly, J. Clarys, & A. Stibbe (Eds.), **Science and football II** (pp. 357-361). London: E & FN Spon.
- Shan, G., & Westerhoff, P. (2005). Full-body kinematic characteristics of the maximal instep soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality. **Sports Biomechanics**, **4**, 59-72.
- Sorensen, H., Bull-Andersen, T., & Kristensen, L. B. (2004). The toe kick is superior to the instep kick when a player is restricted to very short execution time. **Journal of Sports Sciences**, **22**, 499.
- Stoner, L. J., & Ben-Sira, D. (1981). Variation in movement patterns of professional soccer players when executing a long and a medium range instep kick. In A. Norecki, K. Fidelus, K. Kedzior, & A. Wit (Eds.), **Biomechanics VII-B** (pp. 337-342). Baltimore: University Press.

- Tant, C. L., Browder, K. D., & Wilkerson, J. (1991). A three dimensional kinematic comparison of kicking techniques between male and female soccer players. In C. L. Tant, P. E. Patterson, & S. L. York (Eds.), **Biomechanics in sports IX** (pp. 101-105). Ames: Iowa State University.
- Tant, C. L., & Wilkerson, J. (1991). Three dimensional kinematic analysis of the soccer instep kick. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, **135**, 54-61.
- Teixeira, L. A. (1999). Kinematics of kicking as a function of different sources of constraint on accuracy. **Perceptual and Motor Skills**, **88**, 785-789.
- Togari, H., Asami, T., & Kikuchi, T. (1972). A kinesiological study on soccer. **Research Journal of Physical Education**, **16**, 259-264. (In Japanese).
- Tol, J. L., Slim, E., van Soest, A. J., & van Dijk, C. N. (2002). The relationship of the kicking action in soccer and anterior ankle impingement syndrome: A biomechanical analysis. **The American Journal of Sports Medicine**, **30**, 45-50.
- Too, D., & Hoshizaki, T. B. (1984). Strength & coordination in the soccer kick. In J. Terauds, K. Barthels, R. Kreighbaum Mann, & J. Crakes (Eds.), **Sports biomechanics** (pp. 271-276). Del mar, CA: Research Center for Sports.
- Toyoshima, S., Hoshikawa, T., Miyashita, M., & Oguri, T. (1974). Contribution the body parts to throwing performance. In R. C. Nelson, & C.A. Morehouse (Eds.), **Biomechanics IV** (pp. 169-174). Baltimore: University Park Press.
- Tsaousidis, N., & Zatsiorsky, V. (1996). Two types of ball-effector interaction and their relative contribution to soccer kicking. **Human Movement Science**, **15**, 861-876.
- Wickstrom, R. L. (1975). Developmental kinesiology. **Exercise and Sports Science Reviews**, **3**, 163-192.
- Wickstrom, R. L. (1977). **Fundamental motor patterns**. Philadelphia: Lea & Febiger.
- Williams, M., & Griffiths, I. W. (2002). Kinematic analysis of the prevalence of pre-impact cues in the football penalty kick. **Journal of Sports Sciences**, **20**, 74.
- Zebas, C. J., & Nelson, J. D. (1990). Consistency in kinematic movement patterns and prediction of ball velocity in the football place kick. In E. Kreighbaum, & A. McNeil (Eds.), **Proceedings of the VIth symposium of the international society of biomechanics in Sports** (pp. 419-424). Montana State University.

Zernicke, R. F., & Roberts, E. M. (1976). Human lower extremity kinetic relationship during systematic variations in resultant ball velocity. In P. V. Komi (Ed.), **Biomechanics V-B** (pp. 21-25). Baltimore: University Park Press.

Zernicke, R. F., & Roberts, E. M. (1978). Lower extremity forces and torques during systematic variation of non weight bearing motion. **Medicine and Science in Sports**, **10**, 21-26