

האקדמיה למוסיקה ולמחול בירושלים

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré*: המכניזם לביצוע 7
פירואטים מהכנה אחת.

חיבור לשם קבלת תואר מוסמך

מאת : איל נחום

בהנחיית : ד"ר ורד אביב

מוגש לאקדמיה למוסיקה ולמחול בירושלים

ג' בכסלו תשע"ה, 25/11/14

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הקדמה

Paul Valéry (1871-1945) סופר, משורר ופילוסוף, פרסם ב- 1921 שני טקסטים ייחודיים העוסקים באמנות הריקוד כדגם ייחודי המגשר בין גוף ונפש וכמתווך בין סוגיית ההווה והייצוג באומנות. הריקוד הוא "שירה מקיפה של פעולת היצורים החיים", פואטיקה הנסמכת באופן טבעי על המטאפורה, אך "מהי מטאפורה אם לא מעין פירואט של האידיאה?" (על הריקוד, הצרפתים, 2011, עמ' 21). בחירתו המוקפדת של Valéry בפירואט כביטוי למניפולציה אשר מצליחה לחולל טרנספורמציה לאידיאה היא מעניינת לכשעצמה, וסביר להניח שהשימוש בה נובע מהייחוד שתופסת תנועת הסיבוב בעיניו, כמו גם בעיניהם של אנשי מחול אחרים, לדוגמה Carlo Blasis¹ (1797-1878), רקדן, כוריאוגרף ותיאורטיקן מחול, ומי שנחשב כאב המייסד של טכניקת הבלט הקלאסי. Blasis ראה פירואטים כאלמנט מופרד ומשובח של ריקוד, והקדיש להם פרק שלם בספרו "מסות על ריקוד" ("Treatise on dance", 1820), בו זקף לזכות את יוצריו, Pierre Gardel ו-Gaëtan Vestris, מאה שנים קודם לכן.²

גם בתקופה זו חוקרים ואנשי מחול עוסקים בפירואט מהיבטים שונים. אחד מחוקרים אלה, Kenneth Laws משמש כיום פרופסור אמריטוס לפיסיקה מטעם קולג' דיקנסון בקרלייל-פנסילבניה, לאחר שהקדיש את עיקר עיסוקו המקצועי לחקר הפיסיקה של המחול. Laws חקר את ההיבטים הפיזיקאליים של שווי משקל, קפיצות, ריקוד בשניים (pas de deux) ועוד, אך עניין מיוחד הוא גילה בפירואט. כחוקר בעל מוניטין רב בתחומו, Laws כתב במאמרו "Analysis Turns An of": "מכל קטגוריות תנועות הבלט, פירואטים הם הקשים ביותר ללמידה כיוון שהם מערבים הן מרכיבים של תנועה והן מרכיבים של שווי משקל ובכדי שניתן יהיה לבצעם היטב נדרשת מיומנות ניכרת של שליטה על הגוף" (1978, עמ' 12, שם).

יש לשער כי הפירואט שהסחרור והאיזון אינהרנטיים לו, קיבל על סמך מאפיינים אלה את צביונו הדרמטורגי במחזאות של הבלט הקלאסי והרומנטי. כלומר, שסחרור הגוף יכול בעלילת הבלט לייצג את סחרור הנפש קרי הריגוש הרומנטי, ואילו איזון הסחרור יכול לסמל את השליטה בריגוש זה. באופן זה ריקודי ה-pas de deux בבלטים הנ"ל מציגים את הסחרור הרומנטי בקודקס התרבותי שאליו מכוון הבלט הקלאסי, כהתניית החיזור באקטים של איפוק ועידון. דוגמא לכך יכולות לשמש ואריאציות הסולו של הנסיכה אורורה בבלט "היפיפייה הנמה", בהן היא מבצעת פירואטים באופן עצמאי ובתמיכת ארבעת הנסיכים שהוזמנו לחזר אחריה עם הגיעה לבגרות (ריקוד "אדאגיו הוורדים", מערכה ראשונה). לעומת זאת הפירואטים שמבצעים ז'אן דה בריאן ועבדל רחמאן בסצינת הדו קרב בבלט "ריימונדה" (מערכה שנייה), יכולים לשמש ביטוי למפגן כוח והתמדה/נחישות בין יריבים.

¹ Carlo Blasis- The International Encyclopedia of Dance, current online version, 2005.

² Pirouettes- The International Encyclopedia of Dance, current online version, 2005.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

בכל מקרה, פירואט הוא אלמנט תנועתי ובימתי מורכב לביצוע ומרשים לצפייה כדי שחוקרים שונים ירצו לחקור את מאפייניו לצורך ייעולו, קרי הגדלת מספר מחזורי הסיבוב/פירואטים. בהקשר זה, משתמע מדיווחו של Leopold Adice תלמידו של Blasis, אשר לימד באופרה של פריס בין השנים 1848-1863, כי שלושה מחזורי סיבוב הם המרב שרקדנים נהגו לבצע באימוני הבלט (כהן, 2010, עמ' 116). כיום, במסגרת המגמה האומנותית המתמשכת של שכלול יכולות הביצוע, אנו עדים לביצועים בימתיים מרשימים הרבה יותר המניבים 5 ו-6 ואף 7 פירואטים מהכנה אחת. כרקדן בלט (בעבר) ומורה לבלט, תמיד ניסיתי להבין את מקורות התנופה וניהולה במקרים אלה. כלומר, מאין שואבים תנופת סיבוב אשר תספיק למספר כה גדול יחסית של פירואטים? כיצד מתארגנים ליצירתה של תנופה שכזו? וכיצד מנהלים את תנופת הסיבוב במהלך הביצוע?

במהלך לימודי לתואר מוסמך נתקלתי בסרטון מתוך מופע הבלט "דון קישוט" בביצוע בית האופרה של לטביה, שקטעים ממנו הועלו לאתר השיתוף "you tube"³, בו נראה הרקדן Daniil Simkin מבצע 7 פירואטים ברצף. ביצוע משוכלל זה עורר בי עניין בנושא לחקר המכאניקה של שבעה פירואטים בעבודת הגמר שלי. מסקירה ביבליוגרפית שערכתי לא ידוע לי על ניתוח של ביצוע ווירטואוזי דומה, ולכן שמתי לי למטרה בעבודה זו לגלות את המנגנונים הפיזיקאליים הפועלים בהפקת ביצוע משוכלל של פירואטים ואת האופן שבו מנגנונים אלה מתואמים. חקירה כזו היא הצריכה לימוד מושגים בנושאים של מכאניקה קלאסית⁴ וביומכאניקה כגון, תנועה במסלול ישר ובמסלול שאינו ישר, חוקי התנועה של ניוטון, מתקף ותנע, תנועת סיבוב ועוד. למידה זאת תרמה להבהרתם של המנגנונים המכאניים המעורבים ביצירת תנועה בכלל, ובתנועת הפירואט שבה בחרתי לעסוק בעבודה זו. בהסתמך על חוקרים שונים אפרש את המכאניקה של תנועת הפירואט בתוך שדה הכוח הפיזיקאלי שבו הוא מתקיים, ובאמצעות גוף ידע זה אנתח את ביצועו הייחודי של רקדן הבלט Simkin באופן שניתן יהיה לחלץ מתוכו מספר מנגנוני תיאום לביצוע הנ"ל ושגם ניתן יהיה להסיק ממנו אל הכלל.

מבין מגוון הפירואטים הקיימים בסילאבוס הבלט, עבודה זו התמקדה בפירואט *en dehors* ב- *passé retiré devant* (יוסבר בפרק 1), מתוקף היותו בסיסי ופופולארי. המחקר בעניין זה ארך מספר רב של חודשים אשר כללו למידה במסגרות נוספות, כמו גם תרגול טכני עצמי, בכדי שמסקנותיי בנושא תהיינה נהירות. כולי תקווה שביאור החומר והדיון בו יהיה גם לתועלתם של אחרים, כפי שהדבר תרם לי בזיכוכ הידע ובשכלול הביצוע.

ברצוני להודות למספר אנשים אשר בזכותם התאפשרה כתיבת עבודה זו: פרופסור Laws על שגייש בין בלט ופיזיקה, עולמות שרק כביכול נטולי קשר ממשי. Laws לא פעם נידב את חוות דעתו המלומדת ביחס לסוגיות פיזיקאליות מסוימות, ועל כך תודתי האישית. ד"ר ג'ודי קופרמן

³ <https://www.youtube.com/watch?v=Ojll9w1rGW8>

⁴ מכאניקה היא ענף בפיזיקה שפיתח אייזיק ניוטון בסוף המאה השבע עשרה. המכאניקה הקלאסית או הניוטונית עוסקת בתנועה של גופים (קינמאטיקה) ובכוחות הפועלים עליהם (דינאמיקה/ קינטיקה) (קירש 2006). לפיכך המכאניקה הכרחית להבנתו של כל תחום שמצויה בו התנועה ומן הסתם גם הבלט.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

אשר גם היא נתנה מענה לשאלותיי הפיזיקאליות ועל סמך היכרותה המוקדמת את פרופסור Laws קישרה בינינו לצורך העבודה. ברק שחר על שיעורי הפיזיקה הפרטיים המהנים והנכונות הכנה ללמד. תודה מיוחדת ואחרונה לד"ר ורד אביב על ההדרכה הנבונה והרגישה בהנחיה של כתיבת העבודה.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

פרקים	תוכן עניינים	עמ'
1. מבוא	5	
2. מאפיינים פיזיקאליים של תנועה	8	
3. מאפיינים פיזיקאליים של פירואט	15	
4. מאפיינים ביומכאניים של תנועת הראש בפירואט	19	
5. אנליזה לפירואט	28	
6. ניתוח ממצאים	44	
7. מנגנוני התיאום	51	
8. יישומים בהוראה	56	
9. סיכום ומסקנות	60	
ביבליוגרפיה	63	

נספח – מצ"ב מדיה דיגיטלית הכוללת: סרטון 7 פירואטים, מצגת 7 פירואטים ב- 25 פריים לשנייה (מימין לשמאל) ותרגול מעשי.

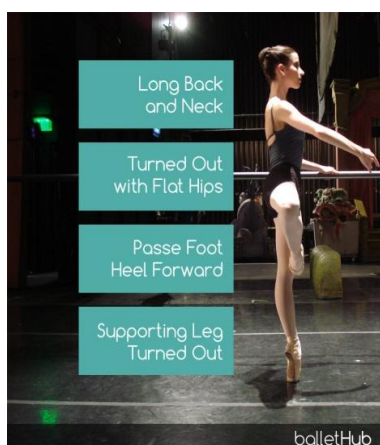
אנליזה לפירואט en dehors ב- passé retiré : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 1

מבוא

עבודה זו תעסוק בניתוח המאפיינים הביומכאניים של - Pirouette en dehors ב- devant passé retiré. פירואט הוא תנועה של הגוף סביב ציר האורך של עצמו (רוטציה אופקית) המתבצע בכוון ובמנח גוף מסוים. בפירואט הנ"ל רגל אחת נושאת את משקל הגוף מעל כרית כף הרגל או חוד כף הרגל ומשמשת ציר אורך לתנועת הסיבוב שעל הרצפה (להלן רגל תומכת⁵), בעוד הרגל השנייה כפופה ומורמת לצד הגוף כשקצה כף הרגל מחודד וממוקם מעל פיקת הברך (להלן רגל עובדת). הירך של הרגל העובדת כפופה בזווית של כ- 90° במפרק הירך במישור הקורונלי וביחס לציר הגוף. הידיים מעוגלות בקדמת הגוף. להמחשת מנח הגוף ב- passé retiré devant ראה תמונות⁶ 1,2 :

תמונה 2. מבט צד (Ballet Hub)



תמונה 1. מבט מלפנים (Ballet Hub)



הפירואטים בבלט מסווגים על פי שני מרכיבים: 1. כוון הסיבוב, ו2. מנח הגוף (רגל עובדת וידיים). כאשר הסיבוב פונה בכוון המנוגד לרגל התומכת, הפירואט יסווג כ- en dehors, וכאשר הסיבוב פונה בכוון אל הרגל התומכת, הפירואט יסווג כפירואט- en dedans. בנוסף פירואט מוגדר גם על פי מנח הגוף בסיבוב, קרי פוזיצית הבלט בפירואט המגדירה את מנחי הרגל העובדת ביחס לידיים. מספר גרסאות הפירואט הקיימות בסילאבוס הינו לפחות כמספר מנחי הבלט ובשני כיווני

⁵ רגל תומכת ורגל עובדת- כך נהוג לכנותן בעברית, למרות ששתי הרגלים עובדות. באנגלית הביטוי המקביל לרגל העובדת הינו "gesture leg" (laws, 2008, פרק 4) המתייחס לרגל שמבצעת את המחווה שמגדיר את מנח הפוזיציה.

⁶ Passé Retiré – ע"ע בתוך- Ballet Hub - (<http://ballethub.com/ballet-lesson/positions-passe-retire-> basics)

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

הסיבוב האפשריים *en dehors* ו- *en dedans*, ובחירתי לעסוק בעבודה זו בפירואט *en dehors* ב- *passé retiré devant* נובעת מהיותו כה בסיסי ופופולארי.

נהוג לחלק את ביצוע הפירואט לשני שלבים עוקבים: 1. שלב ההכנה ב- *plié* ובו הגוף מפיך את האנרגיה הפיזיקאלית לסיבוב מתוך מנח רגליים כפוף. 2. שלב הסיבוב- תוצרו של השלב הראשון המתבצע ב- *relevé*, ברגל תומכת ישרה, מעל כרית כף הרגל או מעל חוד נעל ה- "פוינט" (עמ' 357, Kostrovitskaya & pisarev, 1978). שלושה מאפיינים חשובים הוגדרו לביצוע נכון של פירואט:

1. תבנית הגוף (*form*), 2. קצב הסיבוב (*rate*), ו- 3. שיווי המשקל (עמ' 12, Laws, 1978). הכוונה בכך היא: 1. לחשיבות של פיזור מסת הגוף סביב ציר הסיבוב, 2. לאופן שבו מופעל הכוח לתנועת הסיבוב ואיתו התנופה הסיבובית, 3. לדרך שבה הרקדן משמר את שיווי משקלו מעל נקודת התמיכה. מאפייניו הפיזיקאליים של הפירואט נחקרו בהנחה כי ניתוח פיזיקאלי של מאפייני הפירואט יוכל לתרום לשיפור תהליך הסיבוב בקרב רקדנים ומורים (שם). בנוסף הוצעו גם שלושה משתנים לייעול פירואט, והכוונה היא למשתנים אשר יכולים להגדיל את מספר מחזורי הסיבוב מהכנה אחת (פרק 4, 2008, Laws, Physics and the Art of Dance): (1) המרחק בין כפות הרגליים בהכנה לפירואט. (2) תזמון הרמת כף הרגל האחורית מהרצפה ביחס להפעלת מומנט הסיבוב ויצירת התנופה הסיבובית. (3) תנועת הידיים בשלב התאוצה של הסיבוב.

Laws סבור כי יהיה זה הגיוני לקחת את הממצאים מהניסויים שהפיקו את הפירואטים הטובים ביותר ולשלבם בו זמנית, אך בפועל מבלי שתיעשה התאמה כלשהי למשתנים אלה כשמשלבים אותם יחד, יעילות הסיבוב עלולה גם שלא להשתפר (שם, עמ' 77).

תנועת הראש בפירואט כמשתנה נוסף בייעול פירואט נגרעה ממחקריו של Laws בטענה כי הראש אינו אמור לשנות את תנופת הסיבוב הכללית של הגוף, ותפקידו רק למנוע סחרחורת (שם, עמ' 71). מאחר ולראש יש תפקיד פיזיולוגי חשוב בפירואט, כל דיון על המשתנים הפיזיקאליים לייעול פירואט, שלא יחשיב את המאפיינים הפיזיולוגיים של תנועת הראש המעורבים בשליטה וניהול הביצוע, יחטא למטרה. ברור שכזה מצריך זווית התבוננות ביומכאנית ולא פיזיקאלית גרידא אשר תיקח בחשבון את השפעת הפיזיולוגיה של תנועת הראש על הפיזיקאליות של הביצוע. לפיכך בעבודה זו יידון גם תפקיד הראש והאופן שבו הוא מתואם עם הגוף בפירואט כמנגנון המאפשר את שיכלול הביצוע, כמו כן יוצגו מספר מהלכי תיאום נוספים לייעול פירואט.

כאקזמפלר לאנליזה נבחר ביצעו הווירטואוזי של Simkin, רקדן ראשי בעל מוניטין עולמי אשר הניב 7 פירואטים *en dehors* ב- *passé retiré devant*. ביצעו של Simkin מתעלה על ביצועי פירואטים אחרים שצפיתי בהם ולכן נבחר לשמש בעבודה זו דגם איכותי למידה מיטבית של יעילות ותיאום. בהסתמך על גוף הידע הרלוונטי לתנועת הסיבוב בכלל ולפירואט בפרט (ראה ביבליוגרפיה) אדון במנגנונים הביומכאניים לביצוע הנ"ל. באמצעות ביצוע זה אנסה לגלות: מהם המנגנונים הפיזיקאליים הבאים לידי ביטוי בביצוע משוכלל של פירואטים ובהשוואה לביצוע פשוט? כיצד הגוף מפעיל מנגנונים אלה? כיצד הם מתואמים ביניהם בתהליך הפקת תנועת הסיבוב? כיצד הם יכולים להיות מיושמים בהוראה לצורך שיכלול ביצוע?

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

העבודה תנסה להשיב על שאלות אלה במספר פרקים: פרק זה הינו הראשון מבין תשעת פרקי העבודה ויהווה מבוא לעבודה, פרק שני יעסוק במאפיינים הפיזיקאליים של תנועה, פרק שלישי יעסוק במאפיינים הפיזיקאליים של פירואט, פרק רביעי יעסוק במאפיינים הפיזיולוגיים של תנועת הראש בפירואט, פרק חמישי יציג אנליזה ל-7 פירואטים, פרק שישי יעסוק בניתוח ממצאי האנליזה התומכים בהגברת התנע לביצוע הנבחר, פרק שביעי יחלץ את מהלכי התיאום של מנגנוני התנע בביצוע הנ"ל, פרק שמיני יציע יישומים בהוראה, ופרק תשיעי יציג סיכום ומסקנות המחקר. הביצוע של Simkin שימש מקרה בוחן (case study) בעבודה זו, ומהאנליזה שלו חולצו חמישה מהלכי תיאום עיקריים המעורבים בהפקתו. חלקם פועלים להגברת התנופה הסיבובית בשלבי ההכנה לפירואט וחלקם פועלים במהלך התנועה הסיבובית במטרה לשמר את תנופת הסיבוב על ידי ייצוב הגוף וקירוב מסת הגוף אל ציר הסיבוב. בעבודה זו הוסברו תפקידיו של כל מנגנון בהפקת התנע לביצוע, ובמיוחד האופן שבו כל מנגנון מוגבר ומתואם עם שאר המנגנונים. השלכות מחקר זה בהקשר לביצוע פירואט הוצעו כיישומים בהוראתו. חשוב להבהיר כי השימוש במושג "מנגנון" מופיע במקורות השונים – "mechanism" (1998, 1978, 2002, 2008, Laws) בהקשרו המכאני כדי לתאר חוקיות פיזיקאלית המקיימת יחסי סיבה ותוצאה או מסבב ומסובב⁷ בהקשר מלא לתנועת הסיבוב.

⁷מסובב (שורק ב- ס' בכתוב חסר) ע"ע מילון אבן שושן, הוצאת קריית ספר, ירושלים, 1986.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 2

מאפיינים פיזיקאליים של תנועה

בפרק זה אציג את המושגים הפיזיקאליים והביומכאניים העיקריים הקשורים לתנועה בכלל ולתנועת סיבוב בפרט. מאחר ובפירואט מתרחשת תנועת סיבוב הגוף סביב ציר האורך שלו, מושגים המעורבים בתנועת הסיבוב חשובים להבנת המשתנים השונים בהם נרצה לשלוט בכדי לייעל את ביצוע הפירואט.

חוקי התנועה של ניוטון⁸ בתנועה קווית

- **החוק הראשון** - $\sum \vec{F} = 0$: "עיקרון ההתמדה, קובע כי גוף שלא פועל עליו כוח חיצוני יתמיד במצב של מנוחה או במצב של תנועה ישרה במהירות קבועה" (קירש, עמ' 29, 2006). ההתמדה תלויה במסת הגוף וככל שישנו יותר חומר בגוף כך גדולה ההתמדה שלו, כלומר ההתנגדות שלו לשינוי בתנועתו. לפיכך מסה היא מידת ההתמדה של גוף חומרי (יואיט, 1997, פרק 4).
- **החוק השני** - $\sum \vec{F} = m \vec{a}$: "חוק התאוצה קובע כי התאוצה, כלומר הקצב בו משתנה מהירותו של גוף, נמצאת ביחס ישר לכוח הפועל עליו, וביחס הפוך למסתו של הגוף" (קירש, 2006, עמ' 29) במובנו הפשוט כוח הוא או משיכה או דחיפה, מקורו של הכוח יכול להיות כבידתי, חשמלי, מגנטי או סתם מאמץ של שרירים, לאמיתו של דבר (קבע ניוטון) "כוח הוא כל דבר אשר יכול להאיץ גוף", $\vec{f}/m = \vec{a}$ (יואיט, פרק 4, עמ' 59, 1997).
- **החוק השלישי** - $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$: "חוק פעולה תגובה, אומר כי כאשר גוף מפעיל כוח על גוף אחר, הגוף השני מפעיל באותו זמן כוח על הגוף הראשון, ושני הכוחות הללו שווים בגודלם והפוכים בכיוונם" (קירש, 2006, עמ' 29). כוחות מופיעים בזוג ואין כוח אחד הקיים ללא משנהו, האחד הינו פעולה והשני תגובה. הפעולה והתגובה מהוות את האינטראקציה בין שני הגופים (יואיט, 1997, עמ' 68).

⁸ אייזיק ניוטון / Newton Isaac (1642-1727) פיזיקאי ומתמטיקאי אנגלי ומגדולי המדענים בכל הזמנים. חיבורו "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע" שפורסם ב-1687, כלל תיאור של כוח הכבידה ושל שלושת חוקי התנועה, והניח את הבסיס למכאניקה הקלאסית/הניוטונית. המכאניקה הקלאסית התבססה על 2 עקרונות, שלכל גוף חומרי יש מסה ושגופים שונים מפעילים כוחות זה על זה. המכאניקה שלטה בראייה המדעית של הפיזיקה בעולם במשך כשלוש מאות שנים. (גליק, 2007).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

פרשנות לחוקי ניוטון בתנועה סיבובית

Moment of Inertia / מומנט ההתמד (או התמדה סיבובית סיבובית) - $\sum \vec{\tau} = 0$: מומנט ההתמד הוא המקבילה הסיבובית לעיקרון ההתמד בתנועה קווית. על פי מומנט ההתמד, "גוף המסתובב סביב ציר נוטה להמשיך ולהסתובב סביב אותו ציר, אלא אם כן יופרע על ידי כוח חיצוני. בהיעדר השפעות חיצוניות, גופים מסתובבים נוטים להמשיך ולהסתובב ואילו גופים שאינם מסתובבים נוטים להתמיד במצבם ולא להסתובב" (יואיט, 1997, פרק 7). מומנט ההתמד הינו תכונתו של גוף להתנגד לשינויים במצב תנועתו הסיבובית אך בעוד שההתמד בתנועה קווית או סיבובית תלויים במסת הגוף, מומנט ההתמד תלוי גם בפיזור המסה ביחס לציר הסיבוב. לפיכך, ככל שהמרחק בין עיקר המסה של הגוף לבין ציר הסיבוב גדול יותר, כך יגדל בהתאמה מומנט ההתמד של הגוף. לסיכום, כאשר מומנט ההתמד של הגוף גדול, קשה לשנות את מצב הסיבוב שלו, אם הגוף מסתובב קשה לעצרו, אם הוא במנוחה קשה לסובבו. לפיכך, ערכיו של מומנט ההתמד משתנים בהתאם לצורות הגוף ולמיקום ציר הסיבוב. לדוגמא, למטוטלת ארוכה יש מומנט התמדה גדול ממטוטלת קצרה ולכן היא מתנדנדת הלוך ושוב בקצב איטי יותר ממטוטלת קצרה. (שם, עמ' 115).

תאוצה סיבובית - התאוצה הסיבובית מקבילה לחוק התאוצה של ניוטון בתנועה קווית. תאוצה סיבובית הינה קצב השינוי במהירות הזוויתית, $\alpha = \Delta\omega/\Delta t$. התאוצה הסיבובית מושפעת ממומנט כוח חיצוני (ראה הבא) הפועל על הגוף ויכול לשנות את מצבו הסיבובי. $\sum \vec{\tau} = I \vec{\alpha}$ (עמ' (McGinnis, 2013, 208).

Torque / מומנט כוח (מומנט סיבוב או מומנט פיתול) - מומנט הכוח הוא המקבילה הסיבובית לכוח. כשם ששתייתו של כוח היא לשנות את מצב תנועתם של גופים, כך מומנט הכוח (T) נוטה לפתל גופים או לשנות את המיקום הזוויתי שלהם. כשרוצים לגרום לגוף נייח לנוע יש להפעיל עליו כוח אך כשרוצים לגרום לגוף נייח להסתובב סביב ציר, יש להפעיל עליו מומנט כוח. מומנט הכוח הוא למעשה ההפרעה החיצונית למומנט ההתמד. מומנט הכוח תלוי במרחק שבו מופעל הכוח מציר הסיבוב, והמרחק שבו מופעל הכוח מציר הסיבוב נקרא זרוע הכוח ולעיתים גם זרוע המנוף. מומנט הכוח מוגדר כמכפלה וקטורית של זרוע הכוח, בכוח הנוטה לגרום לסיבוב במרחק זה על פי הנוסחה הבאה :

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}, \text{ מומנט סיבוב } - T, \text{ כוח } - F, \text{ זרוע כוח } - r \text{ (נמדד ביחידות של ניוטון מטר).}$$

ממשוואת התאוצה בתנועה סיבובית, $\sum \vec{\tau} = I \vec{\alpha}$, אנו למדים כי בדומה לחוק התאוצה בתנועה קווית הקובע כי כוח שווה לתאוצת המסה (Force=mass*acceleration), כך מומנט הכוח (שהוא המקבילה הסיבובית לכוח) שווה לתאוצה הסיבובית של מומנט ההתמד, כלומר לתאוצת הגוף המתנגד לשינוי בתנועתו בהתאם למסתו ופיזורו. ממשוואות התאוצה נובע כי ככל שיושקע כוח גדול יותר על מסה כך תתקבל תאוצה קווית גדולה יותר, וככל שיופעל מומנט כוח גדול יותר על הגוף כך תתקבל תאוצה זוויתית (α) גדולה יותר (יואיט, 1997, עמ' 119).

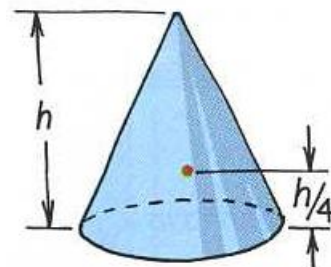
אנליזה לפירואט *en dehors* - *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

חוק הפעולה והתגובה בסיבוב $\vec{r}_1 = -\vec{r}_2$ - פרשנות המקבילה לחוק השלישי של ניוטון בתנועה קווית. לפיה, בתגובה לכל מומנט כוח שגוף אחד מפעיל על האחר, הגוף האחר יפעיל מומנט כוח השווה בגודלו אך הפוך בכוונו. חשוב להבהיר כי שני המומנטים של הכוח הפועלים על שני הגופים הם בעלי ציר סיבוב משותף⁹ (עמ' 210, 2013, McGinnis). לדוגמא, כשרקדן ירצה לבצע תנועת סיבוב הוא יפעיל כוח אופקי כנגד הרצפה, הרצפה בתגובה תפעיל כוח השווה בגודלו אך המנוגד בכיוונו כלפי כף הרגל של הרקדן. כוח ההחזר מהרצפה ייצור תנועה סיבובית בהיותו מקור הכוח החיצוני היחיד הפועל על הגוף להסתובב (Laws, 1978).

מרכז המסה (CM) או מרכז הכובד (CG)

מסה היא כמות החומר הנמצאת בגוף. מרכז המסה הוא נקודה דמיונית במרחב אשר מייצגת את ממוצע התפלגות המסה של מרכיביו השונים של הגוף. מרכז המסה מייצג את הממוצע של כל חלקיקי המסה שהגוף מורכב מהם בין אם הוא נתון להשפעת כוח הכובד ובין אם לא. מרכז הכובד מייצג את ממוצע התפלגות המשקל הנובעת מפיזור המסה בתנאי הכבידה של כדור הארץ. לפיכך בתנאי כבידה מרכז המסה ומרכז הכובד הן לכל צורך מעשי אותה הנקודה. כאשר התפלגות החומר בגוף היא אחידה, כלומר כשעצם הוא סימטרי, מרכז הכובד יהיה במרכזו כך שאם נתמוך בנקודה בודדת זו נוכל להחזיק בכל הגוף במצב של שווי משקל. לעומת זאת בגוף שצורתו אסימטרית חלק גדול יותר מהמסה מרוכז בצד אחד יותר מאשר בצד אחר ולכן לדוגמא בקונוס (חרוט) שבסיסו רחב ביחס לקודקודו, מרכז המסה יימצא קרוב לבסיס, מעל צירו המרכזי בדיוק ברבע המרחק מהבסיס לקודקוד (יואיט, 1997, פרק 7).

איור 1. מרכז המסה בקונוס (שם, עמ' 121)



מרכז מסה של גוף גם יכול להימצא בנקודה שבה אין כל מסה. למשל, מרכז המסה של טבעת או של גוף חלול נמצא במרכז הגיאומטרי של הגוף שבו אין מסה, ומרכז המסה של בומרנג נמצא מחוץ לגוף עצמו ולא בתוך החומר המהווה את הבומרנג (שם).

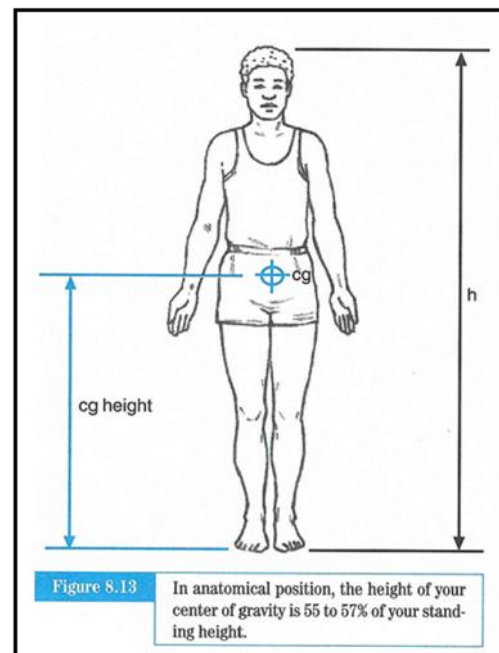
בגוף האדם מרכז הכובד בעמידה אנטומית נמצא בגובה של 55% ל- 57% מהגובה הכללי (ראה איור 2, עמ' הבא) והוא ממוקם כ- 2.5-5 ס"מ מתחת לטבור או כ- 15 ס"מ מעל המפשעה. מרכז הכובד מושפע ממיקום חלקי הגוף, איברים וגפיים אשר יוצר בהתאמה פיזור שונה של המסות שלהם, ולכן מיקומו של מרכז הכובד זז עם כל שינוי במנח הגוף. מרכז הכובד של אישה נמוך

⁹ כוונת הכותב שלגופים נקודת מפגש משותפת ולא שהם סובבים סביב אותו ציר.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

במעט מזה של גבר בגלל חגורות האגן והכתפיים, זו של האגן רחבה וזו של הכתפיים צרה ביחס לגבר. באופן זה מבנה הכתפיים הגברי מעלה את מרכז הכובד ואילו מבנה האגן הנשי מוריד את מרכז הכובד. אצל ילדים מרכז הכובד ממוקם גבוה יותר בגלל ראשם הגדול ורגליהם הקצרות ביחס לאדם הבוגר (McGinnis, 2013).

איור 2. מרכז מסה בגוף האדם (עמ' 149, 2013, McGinnis)



יציבות ושווי משקל

למקומו של מרכז הכובד יש חשיבות רבה לגבי יציבותם של גופים. גוף הינו יציב כאשר מרכז הכובד נשמר מעל בסיס התמיכה. החיתוך של קו הכבידה עם מרכז הבסיס מניב את היציבות הטובה ביותר. חיתוך של קו הכבידה בקצהו של מרכז הבסיס יפחית את היציבות, באופן דומה גם הקטנת בסיס התמיכה או הגבהת מרכז הכובד.

בשמירה על שווי משקל מקובל להתייחס ל- 5 עקרונות: 1. שמירת מרכז הכובד מעל בסיס התמיכה. 2. הגדלת בסיס התמיכה- מגדילה את זווית ההטיה הנחוצה להעתקת מרכז הכובד מחוץ לבסיס התמיכה. 3. קירוב מרכז הכובד לבסיס התמיכה- פועל בדומה לעיקרון הקודם. 4. שימוש בחלקי גוף, אזורים בגוף ואיברים כבסיס לתמיכה. 5. התאמת חלקים שמעל בסיס התמיכה במגוון מנחים לשימור מרכז הכובד מעל בסיס התמיכה. באופן כללי לא קיימת תבנית איזון אחת, וללא קשר לבסיס התמיכה ולמנחי הגוף מעליו, מרכז הכובד חייב להישאר מעל אזור הבסיס. תנוחות המארגנות את חלקי הגוף ואמצעיו החיצוניים של הגוף מעל בסיס התמיכה מספקות יציבות ועייפות שריר מופחתת (Coopre, 1995, 22, עמ').

בטכניקת הבלט יציבות הגוף מוכרת כ- Body alignment, מושג המתייחס למיקום של חלקי הגוף השונים כך שמערכות השלד והשרירים תוכלנה לתפקד ביעילות המרבית. "היציבה הבסיסית בבלט מאריכה את עמוד השדרה תוך הקטנת קשתות הגו הטבעיות אך בשום פנים ואופן ללא

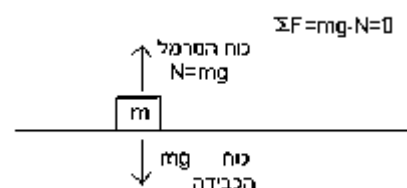
אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

ביטולן. המפתח לכך הוא ארגון נכון של עמוד השדרה. המסות הגרמיות של השלד- ראש, כלוב הצלעות והאגן מוערמים זה מעל זה באופן אנכי מעל בסיסן, הרגליים וכפות הרגליים, בדומה ללבני בניין. הפוזיציה המאוזנת הזו, כשחגורת הכתפיים מונחת מעל כלוב הצלעות, גורמת לקו הכבידה- קו דמיוני אשר חוצה בדיוק את משקל הגוף - ליפול מגובה דרך אמצעו של המבנה. כל החלקים משני צידיו של הקו מאזנים זה את זה. במבט מקדימה או אחורה, קו הכבידה חוצה את הגוף באופן סימטרי". (Grieg אצל Ward, עמ' 36, 2012).

במנחי הבלט, בסיס התמיכה שהגוף נדרש לייצב את עצמו מעל, הינו כרית כף הרגל או חודה. לפיכך, הקטנת איזור התמיכה של הגוף והגבהת מרכז הכובד בגלל מנח ה- *relevé* כמו גם השימוש במנחי ידיים גבוהים, מאתגרים את איזון הגוף. במצב פירואט, בו נשיאת הגוף מתבצעת מעל רגל אחת ב- *relevé*, שווי המשקל שיושג יהיה רופף כלומר, תנועה קלה בכוון כלשהו תגרום לכוחות הפועלים על הגוף להוציאו מאיזון. חשוב לציין כי בפירואט שווי המשקל הוא דינאמי, ואיזון מרכז הכובד אינו מתבצע במצב סטאטי של הגוף אלא בתנועה. בנוסף, שימור מרכז הכובד מגדיר מן הסתם קריטריון אקדמי נכון של ביצוע פירואט (פרק 5, 1978, Kostrovitskaya V. & , Pisarev), לפיו כל נפילה, קרי סטייה מציר הסיבוב תפגום באיכות הביצוע. בהתאם לזאת, אימוניו הסיזיפיים של רקדן הבלט מתבטאים במיוחד בפירואט, בתרגול נפילת קו הכבידה של מרכז מסת הגוף בדיוק מעל כרית או חוד כף הרגל, ובקיבוע מרכז הכובד של הגוף בצירו הרוחבי/האופקי של הגוף, על מנת שתנועת הפירואט סביב ציר האורך של הגוף לא תופרע מצירי תנועה אחרים העלולים להוציאו משווי משקלו.

בגוף האדם, היכולת שלנו לאזן את מרכז הכובד של גופינו או של עצם כלשהו נובע מהיכולת של המוח להגיב לסטיות שבתנועת מרכז הכובד מצירו ולווסת אותן בהתאמה כך שמרכז הכובד יישאר מעל בסיס התמיכה שלו. השליטה על שווי משקל מושגת באמצעות מערכת היציבה האחראית על אינטגרציה ותיאום בין המערכת הוסיבולרית, הראייה והמערכת הפרופריוספטית (פרק 41, 2013, Kandel at al.).

כוח הנורמל (N)- כוח הנורמל הוא אחד ממרכיבי כוח ההחזר מהרצפה והוא מאפשר לגופים שלא לקרוס לתוך כוח הכבידה ולהישאר בשווי משקל. באלמנטים של הבלט ובפירואט כוח הנורמל הוא כוח ההחזר מהרצפה, שהגוף מפעיל כנגד הרצפה על מנת לשאת את הגוף בזקיפות מעל כרית או כף הרגל. לפיכך כוח הנורמל שווה בגודלו למכפלת המסה בגרביטציה ובכיוון הפוך לכוח הכבידה. כוח זה תמיד יהיה ניצב למשטח שעליו פועל הגוף: $N = m \cdot g$ (עמ' 23, 2013, McGinnis).
איור 3. כוח הנורמל (ע"ע ויקיפדיה).



אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

כוח חיכוך (f) - חיכוך הוא כוח המתנגד לתנועה בין משטחים אשר באים במגע האחד עם האחר. החיכוך מתקבל כאשר קשר מיקרוסקופי או מקרוסקופי נוצר בין שני משטחים (פרק 12, Blazeovich, 2007). בליטות זעירות הממוקמות על פני המשטחים מעכבות את התנועה והחיכוך מאפשר למולקולות האטומים בשני המשטחים להיצמד זה לזה בנקודת המגע. כיוונו של כוח החיכוך מנוגד תמיד לכיוון התנועה וניתן לסכם ולומר שהחיכוך תלוי בחומרים שפני המשטחים עשויים מהם ובגודל הכוח הלוחץ המופעל ביניהם. כאשר אנו מנסים להפעיל כוח אופקי על ספל אשר נח על שולחן נוצר כוח חיכוך קטן המונע מהספל לנוע. כאשר אגדיל את הכוח המופעל על הספל, יגדל גם כוח החיכוך אשר יאפשר את תנועתה. הכוח הדרוש להתחיל את תנועת ההחלקה של הכוס ניקרא כוח החיכוך הסטטי (force of static friction, שם עמ' 124) והוא גדול יותר מהכוח המאפשר את החלקת הכוס מעל המשטח ניקרא כוח החיכוך הקינטי (force of sliding friction או kinetic friction, שם עמ' 124). כל עוד הכוח החיצוני המופעל על הגוף קטן מכוח החיכוך הסטטי המקסימלי, הוא לא יוכל לגרום לתנועה והגוף יישאר במקומו. במצב זה גודלו של כוח החיכוך הסטטי יהיה שווה לגודלו של הכוח החיצוני. אם הכוח החיצוני יהיה גדול יותר מכוח החיכוך הסטטי המקסימלי, הגוף יתחיל לנוע וכוח החיכוך שיופעל עליו במהלך התנועה יהיה קינטי ולא סטטי. כדי שגוף יחליק במהירות קבועה יש להפעיל עליו כוח בכיוון המנוגד לכוח החיכוך, באופן ששני הכוחות יבטלו זה את זה. כתוצאה מהתאפסות הכוח השקול, תתאפס התאוצה והגוף ינוע במהירות קבועה (יואיט, 1997, פרק 4). מקדם החיכוך (μ) מייצג את היחס בין כוח החיכוך הפועל בין שני גופים לבין הכוח המצמיד אותם זה לזה וככל שמקדם החיכוך גדל כך גדל גם כוח החיכוך. המקבילה הסיבובית לכוח החיכוך הוא מומנט החיכוך (עמ' 125 , Blazeovich, 2007).

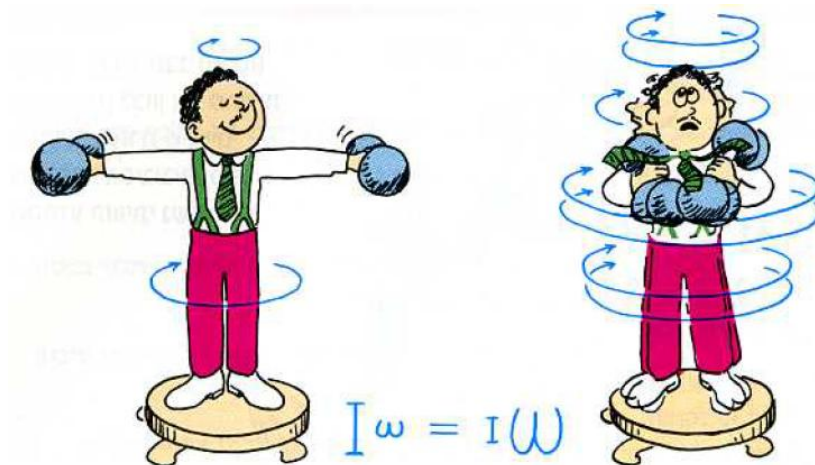
בהקשר לפירואט כוח החיכוך מאפשר לרגליים בהכנה לפירואט להפעיל כוחות צידיים כנגד משטח הביצוע. החיכוך שומר את הכוח המחזיק את כפות הרגליים כנגד הרצפה, ומגדיל את הפוטנציאל לכוח הצדדי התורם למומנט הפיתול אשר מייצר את תנועת הסיבוב. בכך מאפשר החיכוך לכף הרגל דחיפה צידית כנגד הרצפה מבלי להחליק, והפעלה יעילה של מומנט הפיתול. כאשר הרצפה חלקה, האטומים ניתקים זה מזה ואף נקרעים ממשטח אחד ומתחברים למשטח השני. היעדר חיכוך מנטרל את הכוחות האופקיים היוצרים את תנועת הסיבוב ומותיר לבדו את כוח הנורמל הניצב כאנך בין כפות הרגליים לרצפה שכנגדו הגוף יכול לעלות בלבד אך לא להסתובב (עמ' 74, laws, 2008). באופן הגיוני במשטח בעל מקדם חיכוך גבוה מידי, אטומים משני המשטחים (כף הרגל והרצפה) נצמדים ומונעים את החלקתם זה מעל זה, באופן שמנטרל את תנועת הסיבוב.

Momentum Angular/תנע זוויתי/תנע סיבובי (יואיט, 1997, פרק 7) - זהו מדד לגודל התנועה הסיבובית של הגוף ביחס לציר מסוים. תנע זוויתי של גוף קשיח (L) המסתובב במהירות זוויתית קבועה (ω) סביב ציר מסוים, הינו תוצר של מכפלת המהירות הזוויתית במומנט ההתמד של הגוף (I) סביב אותו ציר על פי הנוסחה: $L = I\omega$. בדיוק כשם שהתנע הקווי של

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

כל מערכת נשמר אם אין כוח חיצוני הפועל על המערכת, כך גם התנע הזוויתי נשמר במערכות מסתובבות אם אין מומנט כוח חיצוני שקול שפועל עליו. פירוש הדבר הוא שערכה של מכפלת מומנט ההתמד במהירות הסיבוב בזמן מסוים יישמר גם בכל זמן אחר. דוגמא לכך היא הרכקת הידיים מהגוף בזמן סיבוב יוצרת מומנט התמד גדול יחסית, עם קירובן לגוף מומנט ההתמד שלהן קטן, דבר שאמור להגדיל באופן מתכונתי את מהירות הסיבוב בעוד התנע הזוויתי נשמר קבוע (בהיעדר חיכוך).

איור 4. הקטנת מומנט ההתמד בסיבוב (יואיט, 1997, עמ' 133)



אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

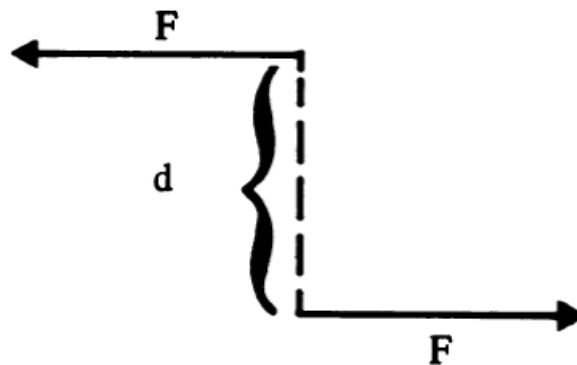
פרק 3

מאפיינים פיזיקאליים של פירואט

בפרק זה יבואו לידי ביטוי העקרונות התנועתיים שהוזכרו בפרק 2 בהקשרם הייחודי לביצוע פירואט. באופן פיזיקאלי הרקדן הוא אובייקט מאסיבי שנע בהשפעתם של כוחות פיזיקאליים. תכונות מסוימות של תנועת הגוף כשלם נקבעות באופן מוחלט על ידי כוחות החיצוניים לגוף, ואילו תכונות אחרות, אשר תלויות בקונפיגורציה של הגוף ובפיזור מסת הגוף, נשלטות על ידי כוח השרירים הפועלים מתוך הגוף עצמו (Laws, 1978). כפי שצוין במבוא, בפירואט ישנם שלושה גורמים חשובים שיש לקחת בחשבון: 1. פיזור המסה סביב ציר הסיבוב, 2. הפעלת מומנט הסיבוב ויצירת התנופה הזוויתית, 3. היכולת לשמר את שווי המשקל מעל הרגל התומכת.

- תנאי ראשון לקיומה של תנועה סיבובית הוא מומנט כוח ראשוני (Initial Torque). בפירואט הסובב את ציר האנך של הגוף, כוח אופקי הפועל לאורכו של קו אשר אינו עובר דרך ציר הסיבוב יוצר מומנט סיבוב. המומנט הוא תוצר הכוח "F" במכפלת המרחק האנכי מקו הפעולה של הכוח לציר הסיבוב "d" כפי שמוצג באיור 5. המומנט מיוצר על ידי צמד כוחות ("couple force") השווים בגודלם אך מנוגדים בכיוונם (כפי שהוסבר בפרק 2), ושצירי הפעולה שלהם נמצאים במרחק מה זה מזה. מומנט הסיבוב יכול לגדול בהתאם להגדלת הכוח או להגדלת המרחק בין קווי הפעולה של הכוחות (שם).

איור 5. - d מייצג את המרחק בין שתי כפות הרגליים (Laws, 1978, עמ' 13)



על פי החוק השלישי של ניוטון כשרקדן מפעיל כוח אופקי כנגד הרצפה באמצעות כפות הרגליים שלו, הרצפה מפעילה כוח השווה בגודלו אך המנוגד בכיוונו על כפות רגליו (יש לציין שהתנגדות האוויר זניחה בהשוואה לכוחות שנדון בהם). לפיכך כוח ההחזר מהרצפה הוא מקורו של הכוח החיצוני הפועל על הגוף ואשר יכול לייצר תנועה סיבובית. מומנט הסיבוב לפירואט מפוזיציה רביעית של הרגליים, פועל על הרצפה באמצעות שתי כפות הרגליים אשר ממוקמות במרחק "d" זו מזו ודוחפות את הרצפה. בהתאם לכל האמור, נובע כי בהכנה לפירואט מפוזיציה חמישית של

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

הרגליים המאופיינת ב- "d" קטן נדרש כוח רב יותר לייצור אותו גודל מומנט מאשר מפוזיציה רביעית שבה "d" גדול יותר. בהקשר למשכו של מומנט הכוח המופעל משתי הרגליים בפירואט, זה מסתיים כאשר הרגליים "עוזבות" את הרצפה, הרגל התומכת אל מנח ה- *relevé*, והרגל העובדת אל מנח ה- *retiré* (שם).

• תנע זוויתי (Angular Momentum) "L" בהקשרו לפירואט-

"L" אומד את גודל התנועה הסיבובית והוא תוצרם של שני הגדלים הבאים : 1. מהירות זוויתית ("ω" - Angular velocity) ו 2. מומנט ההתמד ("I" - Moment of Inertia).

מהירות זוויתית (ω) הינה אומדן לקצב הסיבוב הנמדד במספר מחזורי הסיבוב לשנייה (או רדיאנים לשנייה) ונוסחתו היא : $d\theta / dt$ (השינוי בזמן) / $d\theta$ (השינוי הזוויתי) = ω.

מומנט ההתמד הוא המרחק מציר הסיבוב לגידול במסת הגוף בריבוע, המשולב בסך כל מסת הגוף $(I = \int dm r^2)$. בגוף בעל מסה קבועה, "I" גדל ככל שמסת הגוף מתרחקת מציר הסיבוב. בהתאם לכך התנע הזוויתי מתקבל ממכפלת מומנט ההתמד (I) במהירות הזוויתית (ω) וביטוי המתמטי יהיה $L = I \omega$. מומנט ההתמד של הגוף (אשר נקבע על פי מסת הגוף ופיזור ביחס לציר) קובע את קצב הסיבוב אשר נובע מהתנע הסיבובי בשלב התאוצה (Laws, 1998).

התנע הזוויתי הכולל של הגוף ניתן לשינוי רק במקרה של הפעלת מומנט כוח חיצוני על הגוף, ואין שום סיכוי ששינוי בתנוחת הגוף לבדו, המייצג שינוי בקונפיגורציה של מסת הגוף הנובע מתוך המערכת (מכוח פנימי), יכול לשנות את גודל התנע הזוויתי. מרגע שמומנט הכוח הראשוני פעל כנגד הרצפה והרקדן ביצע - *relevé*, התנע הזוויתי יפחת בהדרגה בגלל החיכוך הקבוע עם הרצפה. מכיוון שמומנט הסיבוב נגזר מקצב שינוי התנע הזוויתי, $T = dL/dt$ ¹⁰, $dL = T \cdot dt$, L יכול להתקבל בשתי דרכים : מהפעלת מומנט כוח גדול יותר במשך זמן קצר או מהפעלת מומנט כוח קטן במשך זמן ארוך. יכולתו של הרקדן להשפיע על קצב הסיבוב, דהיינו על מהירות הסיבוב "ω" כאשר המומנט אשר קבע את גודל התנע הזוויתי חדל, תתאפשר רק באמצעות שליטה על פיזור מסת הגוף ביחס לציר הסיבוב. אם מומנט ההתמד יקטן בגלל קירוב הידיים או כל איבר אחר בגוף אל ציר הסיבוב, המהירות הסיבובית "ω" תגדל בהתאמה תוך שמירת התנע הזוויתי "L" קבוע (Laws, 1978).

• שווי משקל-

גודל התנע בפירואט הוא כזה שניתן להתעלם מאפקט הסיבוב, במילים אחרות תנופת הסיבוב אינה גדולה מספיק בכדי להתגבר על התנדנדות מציר הסיבוב. דוגמא הפוכה לכך היא תנועת הסביבון, שבה כוחות הסיבוב גדולים מכוח האנך/נורמל. במידה והתנע הזוויתי של הגוף בפירואט היה מייצר קצב מחזורי סיבוב גבוה לשנייה, ההתייחסות אליו הייתה כאל סביבון ואז ניתוח שווי

¹⁰ כאן מודגם בגוף נקודתי

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

המשקל בסיבוב היה הרבה יותר מורכב. בהסתמך על חישובים של נתונים אופייניים נמצא כי התנע הסיבובי במצב אנכי בפירואט אינו גדול באופן משמעותי מתנע הסיבוב כשמרכז הכובד של הרקדן מוטה ב- 10° מציר האנך. לפיכך הסיבוב אינו חשוב לשיקולים של שווי משקל וניתן להתייחס לרקדן המאזן את עצמו בפירואט כאילו אינו מסתובב (Laws, 1978).
היות והתנע הסיבובי שהגוף יכול להשיג לצורך ריבוי פירואטים תלוי במשכו של מומנט הסיבוב, Laws מציין 2 מנגנונים להארכת פעולת מומנט הסיבוב (עמ' 75, 2008):

1. הארכת זמן ה- *plié* בהכנה לפירואט, לפני הנפת הרגל העובדת ל- *retire*:
כשכפות הרגליים ממשיכות להפעיל את הכוחות האופקיים תוך כדי שהגוף עולה הן מאריכות את משך פעולת מומנט הסיבוב וכך המומנט גדל. הארכת משך ה- *plié* מאפשרת לגוף מסוגלות טובה יותר לרכוש תנופה סיבובית לפני שהעקבים עולים מהרצפה. הארכת משכו של מומנט הכוח כפוטנציאל להגדלת תנע הסיבוב מיוצגת בחוק פיזיקאלי שבו השינוי בתנע נובע ממכפלת הכוח במרווח הזמן שכוח זה פועל על גוף. בהתאם לזאת הפעלת כוח על גוף משמעה הפעלת מתקף. בעוד שגודל התאוצה תלוי במידת הכוח הפועל על הגוף, גודל השינוי בתנע או המתקף, תלוי הן בגודל הכוח הפועל על הגוף והן במשכו של הכוח הפועל, $J = (\Delta t) \cdot F$.

הקשר בין תאוצה, מתקף ותנע נובע מהחוק השני של ניוטון בתנועה קווית ($F=m/a$) באופן הבא (יואיט, 1997, פרק 5): מרווח הזמן של המתקף $J = (\Delta t) \cdot F$, "מסתתר" באיבר התאוצה a כיוון ש:
 $F = m \cdot \Delta v / \Delta t$. כלומר שהשינוי במהירות (Δv) חלקי מרווח הזמן (Δt) הינו התאוצה (a). באופן דומה כך גם בתנועה סיבובית, כפי שנראה במשוואת מומנט הכוח של גוף נקודתי: $dL/dt = T$, כאשר $L=m \cdot v \cdot r$, או $T=r \cdot F$.

דרך אחרת להציג את החוק השני של ניוטון בתנועה קווית היא במשוואה: $\Delta(m \cdot v) = F \cdot t$ משוואה זו אומרת כי כוח $\times$ מרווח הזמן = השינוי ב- {מסה $\times$ מהירות} ובמילים אחרות, המתקף המופעל על הגוף שווה לשינוי בתנע¹¹ של הגוף. המתקף בתנועה סיבובית גם הוא נובע ממכפלת מומנט הכוח בזמן $\Theta J = (\Delta t) \cdot T$ ולכן הפעלה ממושכת יותר של מומנט כוח תגדיל את מתקף הסיבוב וכתוצאה מכך גם את התנע שלו.

2. השימוש בידיים והגו במהלך ההכנה לסיבוב ובהמשכו:
תנע הסיבוב מופק בין השאר מתנועת הידיים והגו המאיצים עם כוון הסיבוב. הפוטנציאל להגברת התנע שלהם גדל כאשר טווח התנועה של האיברים המאיצים לסיבוב גדל או כאשר מהירות הפעלתם גדלה. דוגמא לכך היא מהלך הקרוי "wind up" המתבצע בשלב ההכנה לפירואט. בדומה למתיחת קפיץ המפעיל חפץ סיבובי, נעים הידיים/גו בשלב ההכנה לפירואט תחילה כנגד כוון הסיבוב, במטרה להגדיל את טווח התנועה שלהם לצורך התאוצה לסיבוב. הידיים המאיצות מתנועת ה- wind up צוברות עימן תנע סיבובי רב וכאשר הן עוצרות את תנועתן ביחס לגוף, הן

¹¹ התנע (p) הוא תוצרם של שני הגדלים: מסה (m) $\times$ מהירות (v)

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

מאפשרות את העברת התנע שלהן אל שאר הגוף לצורך הסיבוב ב- *relevé*. חשוב לציין שהעברה יעילה של תנע הידיים צריכה להתבצע בשלב ה- *plié*, כשמומנט הכוח פועל באמצעות כפות הרגליים כנגד הרצפה (ראה הרחבות בפרק האנליזה ובפרקים הבאים). הקשר בין תנועת הידיים למומנט הכוח ביצירת התנע לסיבוב נובע מההקבלה שבין הגדלת שדה הכוח האופקי של פעולת הידיים להגדלת משכו של מומנט הכוח. כלומר, לתזמון של העברת תנע הידיים/גו אל הגוף ברגע מאוחר יותר בסיבוב, כשכפות הרגליים עדיין לוחצות את הרצפה ב- *plié*.

גורם חשוב אחר ביעילות הסיבוב קשור למשטח הביצוע המאפשר לשמר את הכוח המחזיק את כפות הרגליים כנגד הרצפה. ככל שכוח זה נשמר, כך גדל הפוטנציאל לכוח הצדדי התורם למומנט הכוח אשר מייצר את הסיבוב, כלומר גדל החיכוך המאפשר לכף הרגל לדחוף הצידה כנגד הרצפה מבלי להחליק. לעומת זאת במשטח חלק הכוח המחזיק את כפות הרגליים והרצפה חלש. על מנת למנוע החלקה אשר עלולה לסכן את יעילות התנופה הסיבובית, הפעלת הכוחות האופקיים המייצרים את מומנט הכוח תתבצע רק כאשר מרכז הכובד של הגוף עולה (במקום ב- *plié*). במצב זה כוח הנורמל גדול מהכוחות האופקיים המייצרים את המומנט לסיבוב. אילוץ זה יוצר מהלך של עלייה ל- *relevé* ואז סיבוב, אשר לחלוטין אינו פרודוקטיבי, מהסיבה שאין מקור של כוח לסיבוב לאחר שהגוף עזב את הרצפה. לפיכך תנועת הסיבוב מתאפשרת כל עוד ניתן להשתמש בחיכוך כדי לדחוף הצידה בשלב ה- *plié*, אך משעלה הגוף ל- *relevé*, בשום אופן לא ניתן להפעיל כוחות צידיים.

לסיכומו של פרק, המשתנים הפיזיקאליים ליעול פירואט לפי Laws הם שלושה:

1. הפרדת כפות הרגליים בהכנה לפירואט- הפרדה זו יוצרת זרוע מנוף ארוכה יותר מציר הסיבוב לקצה שבו מופעל הכוח לסיבוב, ואורך הזרוע מגדיל את הפוטנציאל של מומנט הכוח.
 2. תזמון הרמת כף הרגל מהרצפה ביחס למשך פעולתו של מומנט הכוח והשגת התנופה הסיבובית- האופן המסובב שבו כפות הרגליים לוחצות את הרצפה תוך כדי שהגוף עולה ל- *relevé*, כך שהשגת התנופה מתאפשרת בשלב הפעלת מומנט הכוח בלבד. משך הפעלת המומנט גם הוא משפיע על גודל המומנט.
 3. הפעלת הידיים לתאוצת הסיבוב- השימוש בתנועת ה- *wind up* ובהעברת התנע שנוצר בשלב מאוחר יותר בסיבוב.
- בהנחה שמשטח הביצוע הוא אופטימאלי, אלה הם המשתנים אשר יכולים להגדיל את כמות הסיבובים מהכנה אחת (עמ' 77, 2008, Laws).

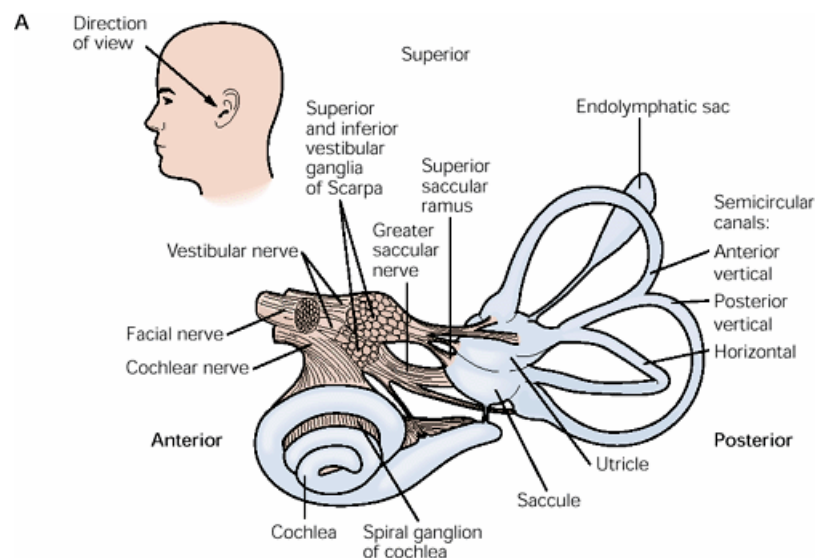
אנליזה לפירואט *en dehors* - *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 4

המאפיינים הפיזיולוגיים של תנועת הראש בפירואט

רוטציית הראש במישור הטרנסוורסאלי (האופקי) בפירואט מתאפיינת במכאניקה ייחודית המאפשרת את מיקוד המבט בחלק גדול מזמן הסיבוב. ספרי לימוד שונים (Kostrovitskaya & Pisarev 1978, p. 367) מציינים כי תפקיד הראש בפירואט הוא למנוע סחרחורת אך גם לספק כוח לפירואט. פיזיקאים מבטלים את הטענה כי הראש יכול לספק כוח נוסף לתנועת הסיבוב (עמ' 71, Laws, 2008) מאחר ומרחקו מציר הסיבוב אינו מספיק בכדי לייצר תנע משמעותי לסיבוב. טענה זו לא תיבדק בעבודה זו, אך ידוע שכל רוטציית גוף ופירואט בפרט, מהווים גירוי למערכת הוסיבולרית (Nigmatullina Y et al., 2013). הפרק יסקור את הקשרים הענפים של מיקוד המבט עם המערכת הוסיבולרית (האיזון), שווי המשקל ומערכת היציבה, ויעסוק באופן שבו מאפיינים פיזיולוגיים אלה גוזרים את המכאניקה של תנועת הראש בפירואט לצורך ניהול תנועת הסיבוב.

איור 6. מערכת שווי המשקל- האוזן התיכונה (Kandel et al., 2013, עמ' 918)



המערכת הוסיבולרית

בגוף האדם (וכלל החולייתנים) מערכת החישה להתמד הגוף (מצב הגוף בין שהוא בתנועה או במצב נייח) היא המערכת הוסיבולרית. המערכת הוסיבולרית מורכבת מחמישה אברי חישה הממוקמים באוזן הפנימית, שתפקידם למדוד את מנחי הראש ואת תאוצתו הקווית והזוויתית. תנועת הראש מטה צבירי שיער המזדקרים כריסים מתאים שבאוזן הפנימית. הטיה זו משנה את הפוטנציאל של ממברנות התאים, המשנה את התקשורת הסינפטית בין התאים לנוירוני החישה שמעצבים אותן. אותות מנוירונים וסיבולריים מוסרים מידע לגבי מהירות הראש ותאוצתו, לגרעינים וסיבולרים בגזע המוח. מידע זה מאפשר בין היתר לייצב את העיניים כך שיוכלו להישאר ממוקדות באובייקט מסוים גם כשהראש זז, ובנוסף מאפשר המידע הוסיבולרי לשמר

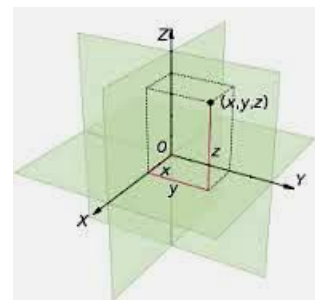
אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

את מנחו הזקוף של הגוף, והוא משפיע על הדרך שבה אנו תופסים תנועה של עצמינו ואת החלל מסביבנו, בהיותו אמצעי להערכת שדה הכבידה שבו אנו חיים (פרק 40, 2013, Kandel et al.).

איברי המערכת הוסיטבולרית ותפקידם

המערכת הוסיטבולרית ממוקמת באוזן הפנימית ליד העצם הטמפורלית בגולגולת והיא מורכבת משני השקים הוסיטבולריים (האיברים האוטוליטים), ה- utricle (נאדון) וה- saccule (שקיק), ומשלוש התעלות הסמיסירקולריות (semicircular canals). השקים הוסיטבולריים מאתרים תנועה קווית, וכיוון שהכבידה משמשת לשעצמה תאוצה קווית, שקים אלה חשים את מנח הראש (כיוונו הסטאטי) ביחס לכבידה בשלושת מישורי התנועה הרוחבי, האנכי והאופקי. לעומתם, התעלות הסמיסירקולריות מגיבות בעיקר לתאוצה זוויתית של הראש ביחס לשלושת צירי התנועה המכונים : Roll - רוטציה רוחבית סביב ציר X, Pitch - רוטציה אנכית סביב ציר Y, ו-Yaw רוטציה אופקית סביב ציר Z. בכל תעלה ישנם חיישנים המגיבים במידה המרבית לתאוצה זוויתית במישור אחד, כך ששלושת מישורי התנועה זוכים לעיבוד (שם, עמ' 917-922).

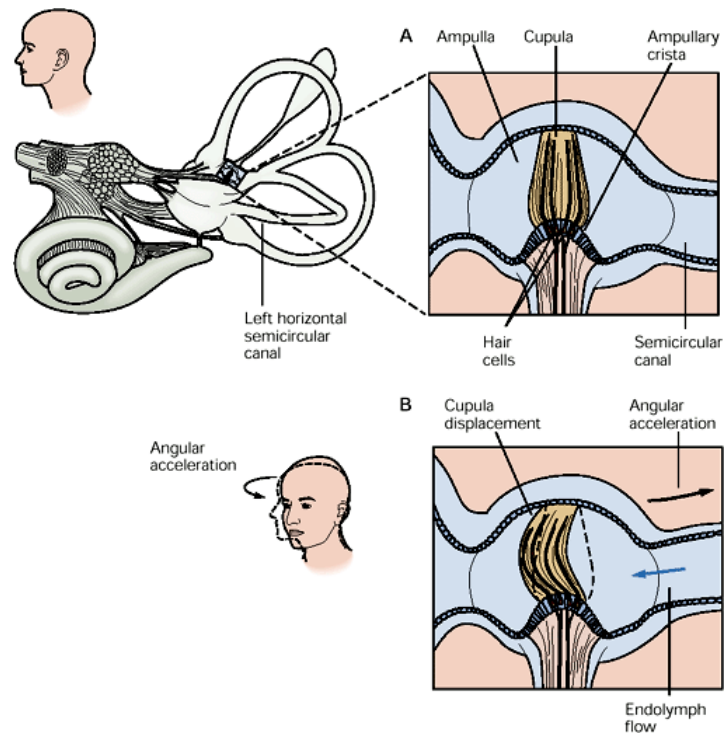
איור 7. צירי התנועה ומישוריו (ע"ע: Wikipedia , Cartesian coordinate system)



התעלה הסמיסירקולרית מורכבת מתעלה קרומית הצפה בתוך תעלה גרמית והיא מכילה נוזל endolymph. בתוך התעלה קיים איזור מורחב הנקרא אמפולה, המכיל איבר ובו מצויים קולטני התחושה. קולטנים אלה עשויים תאי שיער, שריסיהן שקועים בגוש גילי הנקרא cupula (גביעון) החוסם חלק מן האמפולה. כשהראש מסתובב, נוזל האנדולימף שבתעלות נוטה להתעכב בגלל ההתמד שלו ובכך יוצר התנגדות לתנועת המבנים הקשיחים, קרי התעלה, ה- cupula ותאי השערה שלה. התנגדותו של האנדולימף לתאוצת הראש דוחפת את הנוזל כנגד ה- cupula וגורמת לו לנטות, עד אשר משתווה מהירותם, לכשהנוזל מסונכרן עם תנועת הראש. כשתנועת הראש נעצרת הנוזל דוחף את ה- cupula בכיוון ההפוך. הכוון של תאוצת הראש הזוויתית מתורגם לכיפוף ה- cupula המפעיל כוח על ריסי השיער באותה תעלה, כאשר כל צינור סמיסירקולארי הניצב לצינורות האחרים במרחב מדווח על תאוצה במישור שונה. האותות הוסיטבולריים נישאים מריסי השיער אל גזע המוח באמצעות העצב הוסיטבולרי (כרך א', פרק 7, 2007, Carson).

אנליזה לפירואט *en dehors* - *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

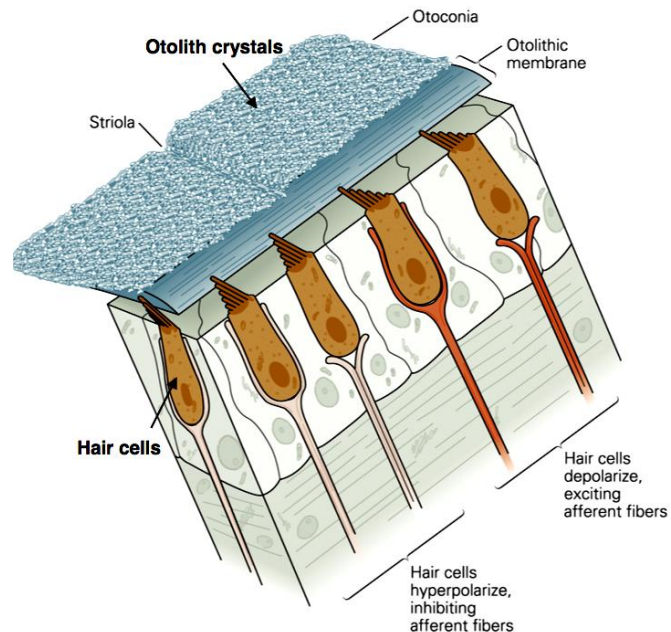
איור 8. התאוצה באמפולה של התעלות הסמיסירקולוריות (Kandel et al., 2013, עמ' 920).



השקים הוסטיבולריים פועלים באופן שונה לגמרי (ראה איור 9, עמ' 22). לכל אחד מאיברים אלה מבנה אליפטי וכל אחד מהם מכיל אזור של רקמה חישתית אשר משנה את מקומה על השקים בהתאם למנח הראש ביחס לכבידה. בדומה לתעלות הסמיסירקולוריות גם רקמה זו מכילה תאי שיער, שריסיהן שקועים בשכבת גיל. הגיל מכיל otoconia, שהם גבישי מלח קטנים מסוג קלציום קרבונט, משקלם של הגבישים גורם לשכבת הגיל לשנות מיקום כתוצאה משינוי כוון הראש. לפיכך, שינוי מנח הראש מפעיל כוח (באמצעות גבישי המלח) על ריסי השיער החישתיים וגורם להטיה בזווית המנח שלהן, הטיה אשר מעוררת אותות חשמליים בנוירונים הסנסוריים, כפי שידווח בהמשך. חשוב לציין כי רוב תנועות הראש מפיקות דפוסים מורכבים של עירור ועיכוב מהמערכת הוסטיבולרית וההפרדה בין הפעולה של איברי המערכת היא לצורך המשגה בלבד (שם, עמ' 278-282).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

איור 9. גבישי המלח בשקים פועלים על ריסי השיער עם כוון הטיית הראש (Kandel et al., 2013, עמ' 922).



המסלול העצבי של המערכת הוטיבולרית

ריסי השיער של איברי המערכת יוצרים סינפסות עם דנדריטים של נוירונים סנסוריים דו קוטביים שהאקסונים שלהם עוברים בעצב הוטיבולרי. העצב הוטיבולרי ביחד עם עצב ה-cochlear¹² (שבלול) הם שני ענפים של עצב השמע. גופי התאים הדו קוטביים שמהם יוצאים האקסונים האפרנטיים (afferent) של העצב הוטיבולרי מצויים בגנגליון הוטיבולרי שעל העצב ותפקידם להעביר מידע למוח. מרבית האקסונים של העצב הוטיבולרי מסתיימים בסינפסות על גבי הגרעינים הוטיבולריים שבמוח המאורך (medulla), אבל חלקם מגיע היישר למוחון (cerebellum). הנוירונים של הגרעינים הוטיבולריים שולחים את האקסונים שלהם למוחון, למוח השדרה (spinal cord), לאזורים אחרים במוח המאורך, לגשר (pons) ולקורטקס של אונת הרקה (temporal cortex). **מסלולים עצביים אלה, מעורבים בשליטה על תנוחות הגוף, על תנועות ומנחי הראש, ותנועות העיניים והם מפעילים רפלקסים ווטיבולריים שונים שהגוף משתמש בהם כדי לפצות על תנועת ראש ותפיסת התנועה בחלל.** הקשרים העצביים שבין המערכת הוטיבולרית ובין עצבי הגולגולת המופקדים על שרירי גלגל העין, מפעילים רפלקסים ווטיבולו-אוקולריים שאחראים על תיאום תנועת שרירי העיניים כשהראש אינו מיוצב. הרפלקסים הוטיבולו-אוקולריים למעשה מקזזים את תנועת העיניים ביחס לתנועת הראש ובאופן זה הם מפצים על תנועות הראש לצורך ייצוב המבט (שם, עמ' 280-281). קיימים שלושה רפלקסים ווטיבולו-אוקולריים (vor): 1. הרפלקס הוטיבולרי הסיבובי (rotational)- מפצה על

¹² cochlear - הוא מבנה דמוי שבלול באוזן הפנימית המכיל את מנגנוני ההתמרה של הצלילים.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

רוטציית הראש והוא מקבל את הקלט שלו בעיקר מהתעלות הסמיסירקולאריות. 2. הרפלקס הוסיבולרי המקביל (translational) - מפצה על תנועה ליניארית של הראש, ו3. תגובת גלגול נגדית של העיניים (the ocular counter-rolling response) - מפצה על הטיית ראש במישור האנכי. הרפלקסים הוסיבולר-אוקולרים השני והשלישי נשלטים באמצעות האיברים האוטוליטים בלבד¹³ (עמ' 922-925, Kandel et al.). בהיותם אחראים על חישת מנח הראש ואיתור תנועה קווית, הרלוונטיות שלהם לפירואט פחותה.

הרפלקס הוסיבולרי הסיבובי - כשהתעלות הסמיסירקולריות חשות בסיבוב ראש בכוון אחד, העיניים מתחילות להסתובב באותה המהירות ובכוון הפוך. כתוצאה מכך העין נשארת מיוצבת על האובייקט הנצפה והראייה ברורה. במידה ורוטציית הראש נמשכת, העיניים אינן נדחקות לקצה ארובת העין ונשארות שם אלא מתבצע איתחול מהיר של תנועת העין עם כוון הסיבוב. תנועת העין מתאפיינת בדפוס תנודתי חוזר המכונה ניסטגמוס הכולל שני שלבים. השלב האיטי של הניסטגמוס מתרחש כשהראש יוצא ממנחו הזקוף לרוטציה, והשלב המהיר כשהראש חוזר למנחו הזקוף. כאשר סיבוב הראש נמשך במהירות קבועה, האנדולימף משיג את תנועת הראש, ה-cupula נרפית והעצב הוסיבולרי משתחרר ממטענו החשמלי. במקרה זה השלב האיטי של הניסטגמוס שוכח, והניסטגמוס חדל לאחר מה, למרות שסיבוב הראש נמשך. כאשר סיבוב הראש נקטע בפתאומיות, האנדולימף ממשיך לנוע בכוון שהראש הסתובב תחילה, יוצר תחושה של המשך תנועת הסיבוב שכיוונה נגדי לסיבוב שהתרחש (שם, עמ' 922-923).

הרפלקסים הוסיבולריים מתפקדים במיטבם נוכח שינויים פתאומיים בתנועה, והם מפצים רק במידה זעומה במהלכה של תנועה קווית ממושכת במהירות קבועה, או בתנועת סיבוב במהירות זוויתית קבועה. בנוסף הם אינם רגישים לרוטציות מאד איטיות של הראש ולתאוצות ליניאריות. כיוון שכך, הם מחוזקים בשני רפלקסים אופטוקינטיים, המשלבים תנועות עיניים קופצניות ותנועות מעקב רציף (שם, עמ' 923-924). רפלקסים אלה חשובים למיקוד המבט אך רלוונטיים פחות בתנועת הפירואט, מאחר ומהירות הראש אינה קבועה, כפי שידווח בהמשך.

הקשר של הקלט הוסיבולרי והקלט הראייתי למערכת היציבה

קשרים שבין המערכת הוסיבולרית למערכת תנועת השלד מפעילים רפלקסים (וסיבולר-ספינאלים) הממלאים תפקיד חשוב בשליטה על תנוחת העמידה של הגוף ושינויים ביציבת הגוף כנגד הכבידה ובתגובה למידע שמקורו במערכת האיזון. רפלקסים אלה מתאמים את תנועת

¹³ **תגובת גלגול נגדית של העיניים** - האיברים האוטוליטים חשים את כיוון הראש ביחס לכבידה התמידית. לפיכך כשהראש נוטה החוצה מתנוחתו האנכית בכוון כלשהו לאורך הציר שבין העורף לעין, האיברים האוטוליטיים מעריכים את מידת הסטייה מהאנך והן יוזמות כפיצוי את תגובת הגלגול הנגדי של העיניים כרפלקס אשר מסובב אותן בכיוון הנגדי להטיה ובתזמון עם קצב הטיה. באופן זה הרפלקס מקזז את ההטיה של התמונות הנופלות על הרשתית באופן ששומר את האנך הוויזואלי התואם לכבידה. **הרפלקס הוסיבולרי המקביל** - מפצה על תנועת הראש הקווית כך שהמרחק אל האובייקט הנצפה מחושב ובהתאמה לו נקבע גודל תנועת העין. לפיכך, מרחקו של אובייקט המיקוד יהיה בהתאמה לגודל תנועת העין וככל שאובייקט זה רחוק יותר כך תקטן בהתאמה תנועת העין. התאמה זו אינה נחוצה לרפלקס הוסיבולרי הסיבובי כיוון שהוא בלתי תלוי במרחק הצפייה של האובייקט (שם, עמ' 923).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הראש עם הצוואר, הגו ויתר הגוף במטרה לשמור על יציבת הגוף, וכפיצוי לתנועת הראש. Machperson & Horak טוענים כי אלה הן "התאמות יציבה המופעלות אוטומטית כסדרות של רפלקסים שמטרתן למנוע נפילה כל אימת ששווי המשקל של הגוף מופרע. תגובות אלה אינן רפלקסים פשוטים, אלא דפוסים של הפעלת שרירית בעלי ארגון גבוה, גמיש וסתגלן" (שם עמ' 958). התאמות מקדימות של היציבה מלוות את התנועות היזומות שלנו בכדי לשמר שיווי משקל ואוריינטציה. נתונים הנקלטים באיברי המערכת הוסטיבולרית מיידיעים את המרכיבים המוטוריים במערכת העצבים לגבי מידת הטיית הגוף והראש והאם הוא מתנדנד לפנים, לאחור או לצד. מידע סומטו-סנסורי ווסטיבולרי לגבי זווית הכבידה של הגוף משולב יחד על מנת לכוון את הגוף ביחס לכבידה ולהתמד, בדומה להטיית גופו של רוכב האופניים המותאמת להתמודד עם גרביטציה וכוח צנטריפטלי (כוח המושך לעבר מרכז הסיבוב) בשביל מעוקל. בני אדם וחיות ניסוי אשר חסרים אותות ווסטיבולריים לא הצליחו להתאים את יציבת הגוף לתנועה סיבובית. במצב פתולוגי זה מערכת היציבה הגיבה לתנועה סיבובית או להטיה במשטח התמיכה באופן המנוגד לתגובה הנורמאלית (שם, עמ' 947).

מידע ויזואלי גם הוא מספק ידע מוקדם לגבי מצבים אפשריים של חוסר יציבות ומסייע לגוף להתכוון לסביבה. קלט ויזואלי מספק למערכת היציבה כוון ומידע תנועתי מקרוב ומרחוק. קלט זה מפחית מתנדבות הגוף כשנעמדים ללא תנועה, ומספק רמזים המאפשרים למערכת שווי המשקל לייצב את הגוף, במיוחד כשנדרש מערך ארגון חדש לייצוב הגוף או כששווי משקלו רופף. לפיכך, רקדנים ומחליקי קרח מקבעים את מבטם על נקודה בשדה הראייה בזמן סיבוב כדי לשמור על יציבות. לראייה יש גם תפקיד חשוב בהתאמה מקדימה של היציבה בתנועות רצוניות כמו בתכנון הנחת כף הרגל בצעד או במעבר מעל מכשול וכד', והשפעה חזקה על כוון שרירי היציבה. בכל מקרה תהליך ייצוב התמונה על הרשתית באמצעות ראייה ידוע כפחות מהיר ופחות יעיל בהשוואה לייצוב התמונה שעושה המערכת הוסטיבולרית, כלומר תהליך הראייה הינו איטי מידי כדי להשפיע באופן משמעותי על התגובות של היציבה להפרעות פתאומיות בשווי המשקל, כך שבמקרים אלה אנו מגיבים באופן רפלקסיבי תוך הישענות על פרופריוספציה וחוש שווי המשקל (שם, פרק 41, עמ' 949-946).

ניתן לסכם בקצרה כי המערכת הוסטיבולרית מפרשת אותות המגיעים מהאוזן הפנימית בנוגע למנח הראש, שווי משקל ותפיסת התנועה בחלל. מערכת היציבה מבצעת למידע זה אינטגרציה עם קלט ויזואלי וסומטו-סנסורי אשר ביחד יוצרים במערכת העצבים תמונה מדויקת של היציבות וההטיה של בסיס התמיכה, כמו גם של יחסי הגוף שלנו לאנך הארצי (שם, עמ' 950).

הביומכאניקה של תנועת הראש בפירואט

בעוד שבתנועת היום יום תיאום רפלקסיבי רציף בין תנועת הראש והעין מאפשר למידע ויזואלי להתייצב ולהיקלט ביחד עם מידע המגיע מחושים נוספים, בסיבוב מלא של הגוף נוצר קושי לייצב את המידע הוויזואלי על הרשתית כיוון ששדה הראייה נע עם הגוף, קושי זה גדל ככל שמהירות הסיבוב גדלה. מגבלות התנע הסיבובי ובסיסו הרופף בפירואט מצריכים קצב סיבוב מהיר יחסית אשר יאפשר מספר מחזורי סיבוב. בניגוד לסיבוב איטי, סיבוב בקצב מהיר מאפס את מרווחי

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הזמן של מיקוד המבט ותמונות הנופלות על רשתית העין אינן מצליחות להתייבב. שינוי הגוף הפתאומי שפירואט מצריך בהתמדה הגוף ואיזונו המהוקצע בסיבוב, עלול לגרום בהיעדר מיקוד המבט לאבדן נקודת הייחוס בשדה הראייה. עקב זאת, עלולים להיפגע גם תפקודיה של המערכת הוסיבולרית המשמרים בגוף מתח השריר, שווי המשקל, קליטה ואינטגרציה החושית. מצב זה לרוב מלווה בורטיגו, תחושת סחרחורת או בחילה המוכרת מסיבוב פסיבי על כסא מסתובב. האתגר הביומכאני שמציב קצב סיבוב מהיר הוביל בפירואט להפרדת תנועת הראש מתנועת הגוף. הפרדה זו מכונה בבלט "spotting" והיא מאפשרת להאריך את זמן מיקוד העין ככל האפשר במהלך הסיבוב. למרות ששתי התנועות (הראש והגוף) סובבות את ציר האורך של הגוף, הן נבדלות בדפוס תאוצה שונה (ראה פרק 5, אנליזה). בעוד מחזורי הסיבוב של הגוף רציפים ומגיעים לעצירה מוחלטת רק כשתנע הסיבוב מגיע לסיומו, מחזורי הסיבוב של הראש מתאפיינים בהאצה ועצירה בכל מחזור סיבוב מחדש. בתחילת הסיבוב, הגוף פונה בכיוון הסיבוב, בזווית של כ- 90° למנח הראש המקובע. הפיתול שנוצר במפרקי הצוואר יוצר אילוץ אשר מוביל לשלב השני של הסיבוב שבו הראש מתיר את עצמו מהפיתול, פונה בעקבות הגוף ואף מקדים את סיבוב הגוף בשונו אל נקודת הייחוס הראשונית. באופן זה תמונות משדה הראייה יכולות להתייבב על רשתית העין כשהמבט נשאר ממוקד בחלק גדול מזמן הסיבוב.

Tokita at al. (1972) מצאו כי תנועת ה- "spotting" שרקדנים מקצועיים מיומנים בה, דיכאה ניסגמוס שאחרי סיבוב בניגוד לנבדקים חסרי מיומנות סיבובית. בפירואט לצד ימין התרחש העתק של העין לשמאל בשלב מוקדם בסיבוב עם רוטציית הראש. הסטייה של העין נגרמה באמצעות מיקוד מכיוון של המבט אל נקודת הייחוס מלפנים. עם תאוצת הראש, קלט וסיבולרי ממבדך האוזן העתיק את מיקום העין שמאלה, כך שתנועת עין זו הייתה בתיאום של תנועת הראש היזומה עם הרפלקס הוסיבולו-אוקולרי. כשהראש עצר, העיניים הסתובבו ימינה באופן מיידי כדי להשיג יתרון בסיבוב. תנועת עין זו הגיבה לשלב המהיר של הניסגמוס: עם עצירת הראש, טונוס במבדך האוזן אשר נוצר בשרירי האוזן, העתיק את מיקום העין ימינה. תנועת עין זו התקדמה במהירות בכיוון הסיבוב וגם היא הראתה תיאום בין תנועת הראש היזומה לרפלקסים הוסיבולו-אוקולריים. Tshiassny (Tokita at al., 1972) טוען ש"ספוטינג" חשוב לשמירת שווי משקל בפירואט במיוחד בסוף הסיבוב וברוטציית הראש הקצרה והמהירה בסיבוב אשר משאירה את ה- cupula ללא שינוי. למרות שהשהיית העין בתחילת הסיבוב וזריקתה עם כיוון הסיבוב הן תנועות יזומות, נראה כי עדיין ייצובן הממוקצע מתאפשר בזכות התערבותם של הרפלקסים הוסיבולו-אוקולריים בתנועת הסיבוב.

Gdowski & McCrea (1999) בדקו את האינטגרציה בין אותות של המערכת הוסיבולרית ושל תנועת הראש בגרעין הוסיבולרי במהלך סיבוב גוף של קופי סנאי. הניסוי התבצע במצב שראש הקוף קובע לגוף ובמצב שני שבו הראש היה חופשי לנוע בסיבוב, הרלוונטי יותר לתנועת הפירואט. חוקרים אלה מצאו כי בהיעדר מטרה וויזואלית שניתן להתמקד בה בסיבוב גוף, התעורר כפיצוי רפלקס ה- vestibulocollic (vcr) אשר הקטין את מהירות הראש בחלל. הרפלקס הוסיבולו-קוליק הוא רפלקס נוסף שתפקידו לייצב את תנוחת הראש בהתאם לקלט מאיברי המערכת

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הוסטיבולרית. רפלקס זה מעורר שרירים שיכולים לייצר סיבוב המקזז את תנועת הראש מעל הצוואר אך גם שרירים שיכולים לשנות את כוון הצוואר ביחס לגוף (שם). לפיכך בהסתמך על ממצא מעניין זה ניתן להסיק כי **תנועת ה-spotting של הראש בפירואט משמשת מנגנון להגברת מהירות הראש בנוכחות מטרה ויזואלית**. לעומת זאת, אבדן מיקוד המבט בפירואט, קרי היעדר מטרה ויזואלית, לא יאפשר את רוטציית הראש האופקית, כלומר את תאוצתו הזוויתית. יש לשער, כי בהיעדר מטרה ויזואלית ולנוכח העובדה כי פירואט הוא תנועה יזומה המתבצעת בשווי משקל רופף (בניגוד גמור לפאסיביות של קופי הניסוי לסיבוב, בישיבתם המיוצבת ובאי יוזמה), גם רפלקסים נוספים המקבלים קלט וסטיבולרי ושמטואמים ביניהם יהיו מואטים. האטה של רפלקסים וסטיבולריים תתבטא בלקות פיזיולוגית אשר תתבטא בייצוב הגוף נוכח השינויים בתאוצתו, ובניטור תנועת הסיבוב. במחקר הנ"ל נמצא גם כי **פיתול הצוואר בסיבוב שידר קלט עוצמתי מחיישנים פרופריוצפטיים אשר עוררו נוירונים בגרעין הוסטיבולרי**. לנוירונים בגרעין הוסטיבולרי יש הערכה ויזואלית ווסטיבולרית של תנועת הראש בחלל, ונתוני קלט מהמוחן מכילים באופן תמידי הערכה זו באמצעות משוב וויזואלי. **לגרעין הוסטיבולרי השלכות ישירות על נוירונים מוטוריים אשר יכולים לייצר הפעלה מהירה של זנב, גפיים, וגו כאשר מרכז הכובד מועתק**. באופן זה הקלט הפרופריוצפטי הקשור לסיבוב הראש מעל הגוף, ולכן גם ל- vcr, גורם לאותות מחיישנים וסטיבולריים להשתנות מקואורדינאטות של ראש בחלל לקואורדינאטות של גוף בחלל (דרך נוירונים וסטיבולריים משניים בגרעין הוסטיבולרי). סביר להניח כי שינוי הקואורדינאטות חשוב לרפלקסים השולטים ביציבה ולהבניית תפיסת הגוף כמרכז לאוריינטציה ותנועה בחלל. באופן התואם לממצאי המחקר הנ"ל, יהיה זה סביר להניח כי גם בפירואט פיתול הצוואר יעורר באמצעותם של אותם חיישנים פרופריוצפטיים קלט וסטיבולרי. הקלט הפרופריוצפטי מפצה על תפיסת נייחות הראש בתחילת הפירואט לצורך אינטגרציה עם תפיסת תנועת הגוף, ובאופן עקיף הוא מעורר את הקלט הוסטיבולרי להפעלה מהירה של חלקי הגוף המאיצים לתנועת הסיבוב ובאוריינטציה ברורה. בשלב העוקב בפירואט, לאחר פיתול הצוואר, קלט וסטיבולרי ישיר הנובע מתאוצת הראש המהירה מעורר את התעלה הסמיסירקולרית האופקית לאותות באופן ישיר למערכת הוסטיבולרית ביחס לתנועה המבוצעת. לפיכך נראה כי מעורבותה של המערכת הוסטיבולרית בפירואט בין אם באופן עקיף או ישיר נשמר לאורך הביצוע והפרופריוספציה נוטה לפצות בהיעדר קלט חישתי ישיר (ויזואלי).

לסיכום, פרק זה דן באופן שבו הצורך הפיזיולוגי למיקוד העין בפירואט גוזר את המכאניקה של תנועת הראש בפירואט. הפרק סקר את תנועת הראש כמתואמת עם המערכת הוסטיבולרית, כמי שאחראית לייצוב הקלט הויזואלי וליציבת הגוף ביחס להפרעות פתאומיות בשדה הכבידה. הודגש כי תרגול מתמשך של פירואטים בקרב רקדנים מיומנים התערב למעשה ברפלקסים וסטיבולריים אשר ייצבו מהר יותר את העיניים אחרי הסיבוב, הקטינו ניסגמוס, ודיכאו מצב לא רצוי של תפיסת המשך תנועת הסיבוב. בנוסף פיתול הצוואר בסיבוב הראה כי נתוני קלט פרופריוצפטיים מהצוואר שולבו עם אותות מהמערכת הוסטיבולרית כתמיכה להשאת הראש הרגעית ביחס לסיבוב הגוף.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

בהתאמה לני"ל Dieterich at al. מציעים שלא להגביל את תפיסת הרלוונטיות של המערכת הוסיבולרית לחוש האיזון בלבד, ושיש לראותה כחלק מאינטראקציה קורטיקלית בין חיישנים רב שימושיים וחיישני תנועה כדי להבטיח תפיסה של כבידה, תנועה ושמירת שווי משקל. ניתן לייחס למערכת הוסיבולרית כמי שתורמת לרשת מורכבת ורבת מטרות לאיתור, פירוש ותגובה מוטורית לשינויים בחלל האגוצנטרי (שם, 2003). **בהשלכה ישירה לפירואט, המיומנות הנרכשת של הרקדן מתערבת בתפקודיה של המערכת הוסיבולרית להגברת החישה וניטור הסיבוב.** איזון הגוף מעל כרית כף הרגל מצריך תגובה מתמדת ומחודדת של מערכת היציבה לסטיות קלות של מרכז הכובד ביחס לציר התמיכה הרופף המערבת את המערכת הוסיבולרית, ולשינויים יזומים של מנחי הידיים והרגליים בפירואט כאלמנט ביצועי או כאמצעי שליטה בפיזור מסת הגוף ביחס לציר הסיבוב. יתרונותיה של מכאניקת ה- spotting של הראש ניכרים ביכולת התכנסות של מידע ויזואלי ווסיבולרי למרות תנועת הסיבוב, ובדיכוי תגובות פיזיולוגיות לא רצויות של המערכת הוסיבולרית לסיבוב כגון, סחרחורת ותפיסת המשך תנועה עצמית, המאפשרים את השליטה בניטור הפירואט והמשכיות התנועה.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 5

אנליזה לפירואט

תמונה 3. Simkin performing pirouette
endehors in passé retiré devant.
<https://www.youtube.com/watch?v=Ojll9w1rGW8>

דגימה -



אנליזה על סמך המאפיינים הפיזיקאליים של תנועת הסיבוב שהוצגו בפרקים הראשונים נעשתה לביצוע הפירואטים של Daniil Simkin, סולן ראשי בתיאטרון הבלט האמריקאי (ABT), בתוך מופע הבלט "דון קישוט" שהציג בית האופרה של לטביה, אשר קטעים מתוכו הועלו לאתר השיתוף you tube (2007)¹⁴. שם, במיז-אנ-סצינה של ה"ריקוד לשניים"

Simkin מבצע 7 פירואטים *en dehors* ב- *passé retiré* (ראה תמונה 3). שליטתו בתנע הסיבוב היא כה גבוהה, עד כי גם בפעם השנייה באותה הסצנה הוא הניב את אותם שבעה פירואטים. בהתאם לזאת הנחתי, כי ההדגמה הנ"ל תוכל לשמש אותי בחקר האמצעים לייעול ותיאום המנגנונים הביומכאניים בביצוע משוכלל. בנוסף, ביצעו הוירטואוזי של Simkin הושווה לביצוע פשוט של פירואט בודד (Lott, 2012), במטרה לעמוד על ההבדלים במנחי הגוף בהפקת תנע הסיבוב בין שני מקרי קצה אלה.

שיטה-

אנליזות ביומכאניות מתבססות על שיטות איכותניות ושיטות כמותיות לצורך שיפור הטכניקה, שיפור האימון ומניעת פציעות. השיטות האיכותניות מתבססות באופן סובייקטיבי על צפייה והערכת הביצוע בהתאם למאפייניו המכאניים (MecGinnis, 2013). רוב האנליזות האיכותניות אינן משתמשות בנתונים קונקרטיים (מדידים) אלא בתיאור התנהגותי של המבצע באופן שינסה לקבוע האם הנבדק זז, הרים, דחף או נשאר נייח? מחקר כזה מורכב מסיווג הביצוע באופן שיענה על השאלות הנ"ל, כן/לא, בקושי/ללא קושי וכד'. סוג התנועה מתואר ביחס לשלושת מישורי התנועה המובחנים ובמושגים של מעגליות או סיבוב.

אנליזות איכותניות מתארות גם ביצוע יחסי, כזה אשר מושווה לביצוע אחר או לסטנדרט ביצוע קיים, מתוך מטרה לגלות האם הביצוע היה מהיר/איטי יותר, זוויתי או פחות זוויתי, וכד' (פרק 8 Coopre, 1995). לעומת השיטות האיכותניות, השיטות הכמותיות מנסות לכמת את מרבית הפרמטרים הביומכאניים של התצפית לצורך הערכה של מאמנים ומורים את הביצוע. באתלטיקה לדוגמא, אמצעים כגון שעון עצר משמשים למדידה השוואתית של מהירות ותאוצת מקטעי המרוץ, בכדי לשפר את ביצועי האצן. אמצעי נוסף הוא צילום, שבאמצעותו ניתן לתעד ביצוע, בין

¹⁴ ע"ע Danill Simkin בתוך you tube : <https://www.youtube.com/watch?v=Ojll9w1rGW8>

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

היתר בכדי לספור את צעדי האצן לצורך חישוב קצב צעדיו בכל מקטע (בהינתן זמן המקטע). שיטות כמותיות מקיפות יותר מצריכות ציוד שהוא הרבה יותר משוכלל ויקר וששמור באופן בלעדי לספורטאי צמרת (עמ' 312, 2013, McGinnis).

המחקר בעבודה זו שילב בין שתי השיטות הנ"ל באופן הבא: האנליזה דגמה ביצוע של פירואט המורכב מ- 7 מחזורי סיבוב רצופים. סרטון הצילום של הביצוע הומר לפריימים המתעדים את הרקדן ומנחיו ברצף תנועתו בתדירות של 25 תמונות לשנייה (ראה נספח). באופן זה כל פריים דגם תנועה במרווחים קבועים של 4 מאיות השנייה (0.04 שני). הצפייה בפריימים חידדה את התצפית כך שניתן היה להפריד בין מהלכי הביצוע השונים, קרי שלבי ההכנה של הפירואט ושל כל אחד ממחזורי הסיבוב בנפרד. התצפית התבססה על התבוננות השוואתית במנחי הגוף המשתנים של המבצע בשלבים ובמקטעי הביצוע הנ"ל, אשר מהם ניתן היה לשער לגבי פעולתם של המנגנונים הפיזיקאליים ביצירת התנע לביצוע. בנוסף, נערכה גם התבוננות השוואתית בין מנחי הגוף בהפקת שבעה פירואטים לבין מנחי הגוף המפיקים פירואט בודד. השוואה זו נועדה לתקף את הקשר שבין מנגנוני התנע למנחי הגוף בשני ביצועי קצה, האחד בעל רף מקסימאלי והשני בעל רף מינימאלי. מטרת הצפייה הייתה:

- לאבחן את המנגנונים המכאניים שהרקדן משתמש בביצוע פירואט.
- להסביר את הדרך שמנגנונים אלה מיועלים בביצוע משוכלל.
- להסביר את התיאום של המנגנונים המכאניים בהפקת ביצוע שכזה.
- להראות כיצד מנגנונים אלה פועלים בביצוע פשוט.

בהתייחס לשיטה הכמותית, החלוקה לפריימים אפשרה הערכת זמן משוערת לשלבי הביצוע ומחזוריו, כמו גם הפקת נתונים כמותיים לגבי מהירותו ותאוצתו של הגוף בשלבים שונים של הביצוע. מנתונים אלה ניתן היה להסיק באשר לדפוס פעולתם של המאפיינים הפיזיקאליים בביצוע, אשר ביחד עם ממצאי התצפית תרמו לחקר הביצוע.

הוגדרו שלושה שלבים שונים בביצוע הפירואטים של Simkin. בנוסף לשלב ההכנה ב- *plié* ושלב הסיבוב ב- *relevé* שהוזכרו בפרק המבוא, המבצע עשה שימוש בהכנה נוספת אשר הוגדרה כשלב קדם ה- *plié*. שלבי הביצוע הינם בעלי אפיון שונה בהפקת תנע הסיבוב, יצירתו ושימורו ולהלן החלוקה לשלבים:

1. שלב קדם *plié* - מצב הכנה ראשוני לפירואט המאופיין במעבר מייצוב מרכז המסה של הגוף מעל רגל ציר ישרה אל מנח כפוף של הרגליים בפוזיציה רביעית, ושל הידיים והגו בתנועת ה- *wind up* אל תאוצתם בכוון הסיבוב.
2. שלב ה- *plié* - מצב הכנה שני המתאפיין במעבר ממצב כפוף של הרגליים בפוזיציה רביעית אל ניתוקה של הרגל העובדת מהרצפה בפעולת ה- *retiré*, ושל הרגל התומכת בפעולת ה- *relevé*. בשלב זה הגו והידיים חוזרים מתנועת ה- *wind up* עד שהם מקבילים לנקודת ה- 0, קרי נקודת ההתחלה.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

3. שלב ה- *relevé*, מאופיין בנשיאת הגוף מעל כרית כף הרגל ב- *retiré* במהלך שבעת מחזורי הסיבוב ובו חדל המקור לייצור תנע הסיבוב.

ממצאי האנליזה מוצגים בשלוש טבלאות שונות: טבלה ראשונה מורכבת מתמונות נבחרות של מנחי גופו של הרקדן כפי שתועדו סינכרונית ברגעי הזמן המצולמים בפריים. לתמונות המנחים צורף תיאור איכותני במושגי הבלט, והסבר אשר ניסה לקשור בין מנחים אלה לפעולתם של המנגנונים הפיזיקאליים בהפקת תנע הסיבוב, כמו גם לאופן שבו מנגנונים אלה מתואמים במהלך התנועת הרציף.

טבלה 2 נועדה לתת אומדן כמותי לזמן הביצוע הכולל של Simkin ולשלב הביצוע הנבחרים כתמיכה לצפייה בפריימים המצולמים. המדידה פותחה מטבלאות של מודלים ביומכאניים באתלטיקה, בהן חולק ההעתק הכולל של המרוץ למקטעים שווים בכדי לבחון את דפוס הביצוע של האצנים בשלבים השונים של הריצה כגון, זמן ביצוע, מהירות הזינוק, מהירות רגעית בכל מקטע, קצב השינוי במהירות (תאוצה) בין כל מקטע, ועוד¹⁵. באופן דומה נמדד זמן ביצועו הכולל של Simkin ושל מקטעיו, קרי מחזורי הסיבוב שלו, זאת בכדי שניתן יהיה ללמוד על הדינאמיקה של הביצוע: משך הביצוע בשניות, **תדירות- קצב סיבוב בערכים של מחזור סיבוב לשנייה אשר למעשה משמשת במחקר זה ובמחקרים אחרים המתייחסים לפירואט כמהירות סיבוב¹⁶, ותאוצת סיבוב כנגזרת של השינוי בתדירות/מהירות במחקר זה**. מדידת הזמן התבססה כאמור על מכפלת הפריימים של משך התנועה הרצויה, כגון שינוי מנח או מחזור סיבוב אחד, במשכו של כל פריים- 0.04 שניות.

טבלה 3 מתארת את עבודת הגוף בהפקת התנע לפירואט אחד (Lott, 2012) בהשוואה לטבלה 1, בה תואר תהליך הפקת התנע לשבעה פירואטים. מדידה נוספת נעשתה לזמן המשוער של סיבוב הראש בשני המחזורים הראשונים, כאינדיקציה ליעילות המכאנית שגוזרת המערכת הוסטיבולרית על ביצוע הסיבוב. הנתונים הוצגו במקביל בגרף והוסברו.

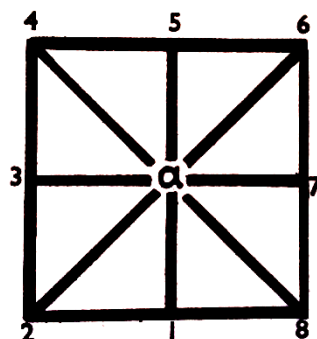
יש לציין כי תחילת מדידת הביצוע נקבעה לשלב ה- *plié*, בו נראים הידיים והגו מקבילים אל נקודת האפס לאחר שחזרו מתנועת ה- *wind up*. נקודת האפס היא הנקודה שממנה התחיל הרקדן את תנועת הסיבוב. בביצוע זה הרקדן פנה אל נקודה 6 ביחס למישורי הבמה (ראה איור 10).

¹⁵Bruggemann & Glad: Time analysis of the sprint events. Scientific Research Project at the Games of the XXXIV Olympiad Seoul 1988, IAAF, Supplement, 1990.

¹⁶"מהירות סיבובית (ω) היא קצב הסיבוב, הנמדד במחזורים לשנייה" (Laws, p. 14, 1978)

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

איור 10 . מפת הרצפה (vaganova, 1969, עמ' 4)



1. Floor plan. The spectator is at point 1; the dancer at point a

להלן ממצאי האנליזה, ראה עמוד הבא :

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

טבלה 1א' : שלב ראשון בהכנה, שלב קדם ה- *plié* .

מה רואים?	הסבר	תמונה
גוף זקוף מול נקודה 6 (נקודת אפס). רגל ימין מתוחה אל הרצפה ותומכת במשקל הגוף. רגל שמאל/העובדת, מתוחה לצד הגוף על הרצפה (<i>degagé a la second</i>). ידיים בפוזיציה שנייה <i>, allongé</i> , (מוארכות לצדי הגוף בגובה הכתפיים, גב כף היד פונה כלפי מעלה).	המבצע דרוך וממוקד לקראת התאוצה הסיבובית הקרבה מעל רגל ימין וכנגד כוון השעון (לשמאל). הוא מעתיק את מרכז הכובד אל הרגל אשר תשמש ציר לסיבוב. הידיים במנח ארוך בכדי ליצור זרוע מנוף ארוכה.	
הרגל העובדת נעה בתנועת מחוג מהירה לאחור. הרגליים מתכופפות. באופן סימולטני הגוף והידיים מסתובבים ביחס לאגן בזווית של כ- 90° בניגוד לכוון הסיבוב. יד שמאל מול נקודה 6 בפוזיציה ראשונה, ויד ימין מוארכת בגובה הכתף אל נקודה 2. הגוף מוטה מעט קדימה. מנח הראש ללא שינוי.	תנועת המחוג של רגל שמאל נועדה ליצור תנע סיבובי אשר עובר אל הגוף תוך כדי כיפוף הרגל התומכת ב- <i>plié</i>. הטיית הגוף לפנים מאפשרת הפרדה רחבה בין כפות הרגליים כלומר, זרוע כוח גדולה יותר למומנט הכוח, שתגדיל את תנופתו. תנועת הרוטציה של הידיים והגוף כנגד כוון הסיבוב – <i>wind up</i>, נועדה להגדיל את שדה הכוח האופקי שעליו "טוענות" הידיים את תנע הסיבוב.	

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

טבלה 1ב': שלב שני בהכנה, שלב ה- *plié* אל "שלב הפיתול הראשוני".

מה רואים?	הסבר	
גו וידיים חוזרים מ- up wind דרך נקודה 6 כשהן מוארכות לצד ובגובה הכתפיים. הגו נטוי מעט קדימה ביחס לציר האורך של הגוף. שתי כפות הרגליים נוגעות ברצפה וכפיפת הרגליים מועמקת אל הפוזיציה הרביעית של הרגליים ב- <i>plié</i>. מנח הראש ללא שינוי.	הידיים נעות שמאלה, עם כוון הסיבוב בכדי להעביר את תנופתן לשאר הגוף. הגו נוטה מעט קדימה כדי לאפשר מנח שבו זרוע המנוף בין הרגליים גדולה יותר. העמקת כיפוף הרגליים מגדילה את המתקף שהן מפעילות על הרצפה, קרי נועדה לפעול ביתר יעילות על הכוחות האופקיים שמאפשרים את מומנט הסיבוב.	
הגו והידיים מסובבים בזווית של כ- 90° שמאלה בכוון הסיבוב מנקודת האפס. כפות הרגליים על הרצפה והרגליים עדיין כפופות (<i>plié</i>). כף רגל ימין שהייתה מול נקודה 8 פונה לנקודה 5. הראש עדיין פונה אל נקודה 6. הידיים באבדוקציה, מתוחות לצדי הגוף ובגובה הכתפיים. מנח הראש ללא שינוי.	תנע המגיע מתנועת המחוג של הרגל העובדת (שמאל) ומתנועת ה- wind up של הידיים מפתל את הגו בכיוון הסיבוב ואת רגל ימין/התומכת על הרצפה. בהתאמה כף רגל ימין פונה עם כוון הסיבוב במצב כפוף אשר מעכב את פעולת ה- <i>relevé</i> ומאריך את משך ה- <i>plié</i>, קרי את פעולתו של מומנט הכוח. המומנט המושהה מאפשר לתנע מהידיים לעבור אל הגוף בשלב מאוחר יותר בסיבוב. זמן המיקוד מתארך וגוּזר את הפרדת הראש מהגוף. בעבודה זו אתייחס למהלך זה כאל "שלב הפיתול הראשוני", המתאם את העברת תנע הסיבוב אל הגוף.	

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

	המנח הסגור של הרגל התומכת מאריך את פעולתו של מומנט הכוח כנגד הרצפה. הראש מאיץ כשמומנט הכוח עדיין פועל (כף רגל אחורית עדיין במגע עם הרצפה), ולכן תנועת הראש בזמן כשכפות הרגליים עדיין דוחפות מהרצפה אינה גורעת מהתנע הכללי של הגוף. באופן דומה גם הרגל האחורית יוצאת למנח- <i>retiré</i> מתוך מומנט הכוח המושהה. פיתול הגו והרגל התומכת ב- <i>plié</i> מאפשרים את הנפת ה- <i>retiré</i> בשלב מאוחר יותר בסיבוב, ולטווח רחוק יותר על ציר הסיבוב. מהלך זה תורם לתנופת סיבוב גדולה יותר. נראה כי שלב הפיתול הראשוני מתאם סימולטנית את תאוצתם הזוויתית של הראש והרגל האחורית מתוך מומנט הכוח המושהה.	הגו והרגל התומכת שינו את מיקומם ביחס לציר האורך כ- 90° מעלות נוספות. לראשונה הראש נע מנקודת האפס עם שאר הגוף. מפרק הברך פחות כפוף. כף רגל ימין פונה אל נקודה 4 וכף הרגל שמאל נוגעת באופן חלקי ברצפה. מנח הראש משתנה.
---	--	---

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

טבלה 1ג': שלב שלישי, שלב הסיבוב ב- *relevé*.

מה רואים?	הסבר	
<u>מחזור סיבוב 1</u> ידיים ישרות ולצידי הגוף בגובה הכתפיים, גב כף היד פונה כלפי מעל). כרית כף הרגל נושאת את משקל הגוף למרות שהרגל התומכת עדיין כפופה. הרגל העובדת עדיין לא התמקמה ב- <i>retiré</i>.	תנועת ה <i>wind up</i> המהירה שיצרו הידיים נקטעת ביחס לגו אך לא ביחס לציר הסיבוב. באופן זה הידיים מפעילות מתקף מהיר על הגו והתנע שהן יצרו עובר במהירות אל כלל הגוף. הרגל התומכת כפופה כיוון שתאוצתה ל- <i>relevé</i> איטית יותר מתאוצתה הסיבובית. הכוחות האופקיים היוצרים את הסיבוב גדולים יותר מכוח הנורמל שפועל כנגד הרגל התומכת. הרגל העובדת עדיין מאיצה זוויתית ולכן מיקומה מעל פיקת הברך מתעכב.	
<u>מחזור סיבוב 2</u> ביחס לסיבוב הראשון הידיים הונמכו והתעגלו מעט. הרגל התומכת פחות כפופה. הרגל העובדת התמקמה במנח ה- <i>retiré</i> מעל פיקת הברך.	תאוצת הרגל התומכת קרבה לסיום וזו של הרגל ב- <i>retiré</i> סיימה. הרגל העובדת אשר הונפה זוויתית יצרה גם היא תנע אשר תורם לתנע הסיבובי הכולל של הביצוע.	

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

	התאוצה של הרגל התומכת התאפסה מול כוח הנורמל. שיווי המשקל הוא תוצר של העתק מרכז הכובד מעל כרית כף הרגל ויחס שקול בין כוח הנורמל לרגל התומכת.	<u>מחזור סיבוב 3</u> הידיים ללא שינוי ניכר. הרגל התומכת ישרה. תנע הסיבוב נמשך ושווי המשקל נשמר.
	הקונפיגורציה המשתנה של הידיים נועדה להקטין את מומנט ההתמד של הגוף. בנוסף הנמכת הידיים מסייעת להנמיך את מרכז הכובד של הרקדן ולהגדיל באופן יחסי את יציבות הגוף.	<u>מחזור סיבוב 4</u> הידיים מונמכות ומקורבות אל הגוף. תנע הסיבוב נמשך ושווי המשקל נשמר.
	כנ"ל	<u>מחזור סיבוב 5</u> מנח הידיים ללא שינוי ניכר (במגבלות המדידה). תנע הסיבוב נמשך ושווי המשקל נשמר.
	השינוי המתמשך בתצורת הידיים נועד להמשיך ולהקטין את מומנט ההתמד ולהגדיל באופן יחסי את יציבות הגוף.	<u>מחזור סיבוב 6</u> הידיים מונמכות ומכונסות עוד יותר אל הגוף ביחס למחזורי הסיבוב הקודמים. תנע הסיבוב נמשך ושווי המשקל נשמר.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

	מומנט החיכוך הקבוע שבין כרית כף הרגל והרצפה קיזז את תנע הביצוע לאחר 7 מחזורי סיבוב. סביר להניח כי היציבה במהלך הביצוע מתקבלת מיחס שקול בין כוח הנורמל לרגל התומכת ושאר הגוף. שיווי המשקל מתקבל מהעתק וניטור מדויקים של מרכז הכובד מעל כרית כף הרגל.	<u>מחזור סיבוב 7</u> הרקדן נעצר בשיווי משקל.
---	--	---

אומדן כמותי לזמן הביצוע הכולל ומקטעיו

- בטבלה 2 שאותה אציג בהמשך, יצוין אומדן הזמן לכל מחזור סיבוב בנפרד, קרי משך הזמן שאורך כל סיבוב בשניות. בהתאם לזמן זה חושבו המהירות הסיבובית לשנייה של כל מחזור וגם השינויים בקצב המהירות, קרי התאוצה הרגעית בכל מחזור. אומדן זה ישמש בטבלה להבהרת הדינאמיקה של הביצוע על פי המדדים הבאים :
1. זמן ביצוע- זמן הביצוע מורכב מזמני המחזור המשוערים של כל סיבוב בנפרד והוא מציג את משך הזמן שהביצוע ארך : משך התנע כמדד ליעילותו, ומן הסתם משך הזמן שהגוף הצליח לשמר את שיווי המשקל במנח הסיבוב.
 2. מהירות/תדירות סיבובית- מהירות הסיבוב מציגה את הקצב המשוער של מחזור סיבוב הגוף לשנייה. מתוך חישוב זה ניתן יהיה להסיק לגבי דפוס פעולתם של המאפיינים הפיזיקאליים על הגוף בשלבי הביצוע השונים.
 3. תאוצה- התאוצה, בנוסף למהירות, מראה את הקצב המשוער של השינוי במהירותם של מחזורי הסיבוב המתקבלים משליטתו הטכנית של הרקדן במאפיינים הפיזיקאליים הרלוונטיים לתנועת הסיבוב.

להלן טבלה 2, ראה עמוד הבא :

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

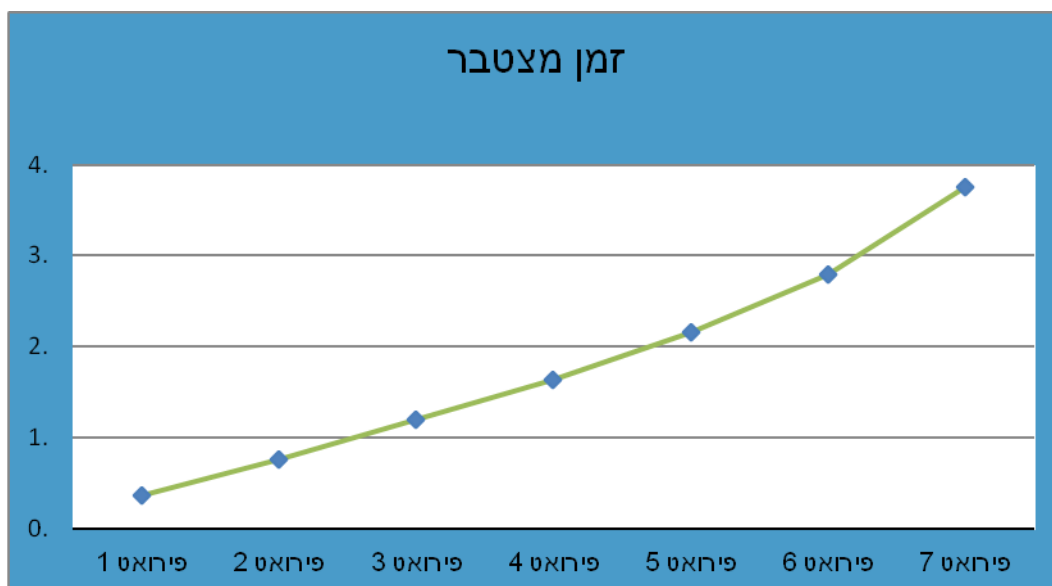
טבלה 2 – זמן מחזור, מהירות סיבובית ותאוצה סיבובית

α - תאוצה סיבובית מחזור/לשנייה בריבוע	ω - מהירות סיבובית מחזור/לשנייה	$\sum t$ - זמן מצטבר בשניות	t - זמן עבור מחזור סיבוב בשניות
$2.77-0 / 0.36-0 = 7.69$	$1 / 0.36 = 2.77$	0.36	$0.36 = 1$ מס' פריימים : $0.04*9$
$2.50-2.77 / 0.40-0.36 = -6.75$	$1 / 0.40 = 2.50$	0.76	$0.40 = 2$ $(0.04*10)$
$2.27-2.50 / 0.44-0.40 = -5.75$	$1 / 0.44 = 2.27$	1.2	$0.44 = 3$ $(0.04*11)$
$2.27 -2.27 / 0.44-0.44 = 0$	$1 / 0.44 = 2.27$	1.64	$0.44 = 4$ $(0.04*11)$
$1.92 -2.27 / 0.52-0.44 = -4.37$	$1 / 0.52 = 1.92$	2.16	$0.52=5$ $(0.04*13)$
$1.56 -1.92 / 0.64-0.52 = -3$	$1 / 0.64 = 1.56$	2.80	$0.64 = 6$ $(0.04*16)$
$1.04 -1.56 / 0.96 -0.64= -1.62$	$1 / 0.96 = 1.04$	3.76	$0.96 = 7$ $(0.04*24)$

נתוני הזמן בטבלת 2 יומחשו ויוסברו בשלושת הגרפים הבאים, ראה עמוד הבא :

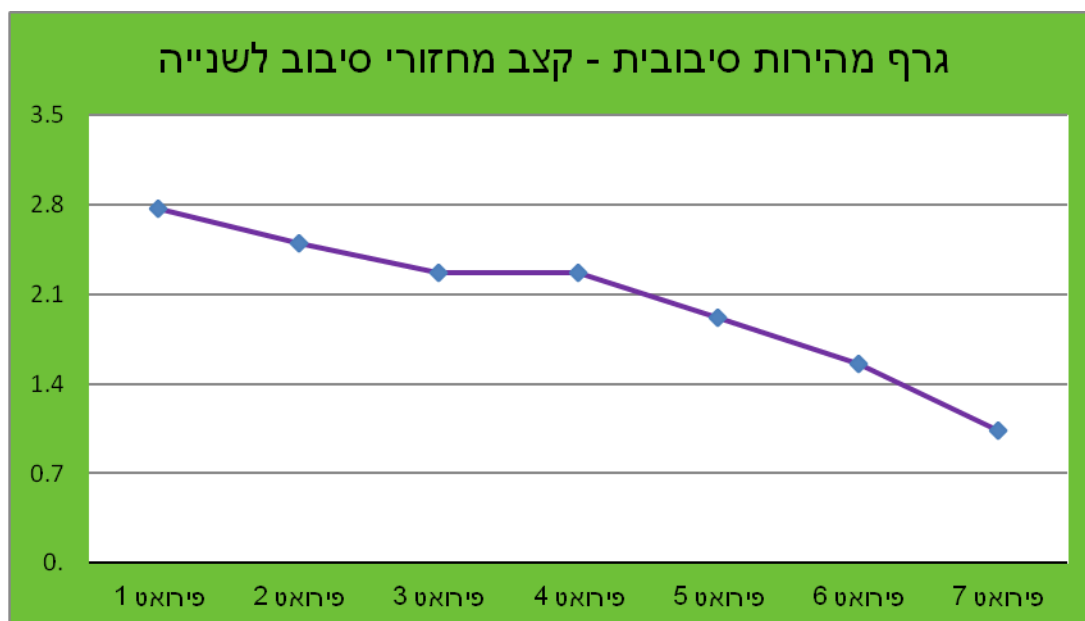
אנליזה לפירואט *en dehors* - *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

גרף 1 זמן מצטבר בשניות : מספר פירואטים = x , זמן מחזור בשניות = y



גרף 1 מציג את הנטייה הליניארית של עקומת הזמן העולה עם כל אחד משבעת מחזורי הסיבוב. בסה"כ מתקבל משכו המשוער של הביצוע, קרי הזמן שארך תנע הסיבוב כ- 3.76 שני. מן הסתם זהו גם משך הזמן שהגוף נדרש לאזן את עצמו מעל כרית כף הרגל עד לסיום הביצוע, עם הנחת כף הרגל על הרצפה. לפיכך היכולת לאזן את הגוף בפירואט מעל כרית כף הרגל הכרחית למיצוי פוטנציאל התנע בסיבוב.

גרף 2 מהירות : מספר פירואטים = x , מחזור סיבוב ל-1 שנייה = y

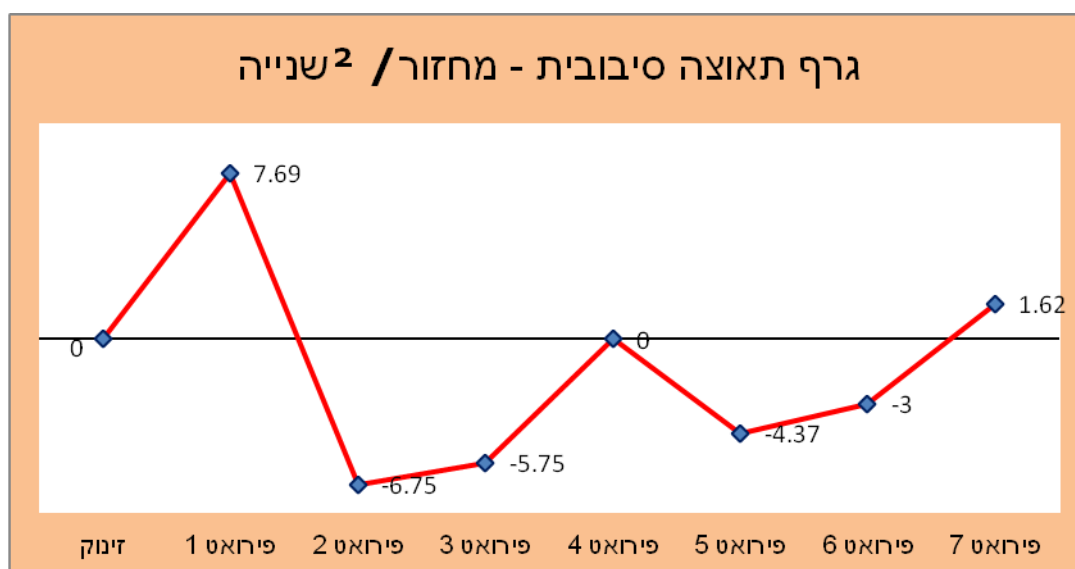


גרף 2 מראה את הנטייה הליניארית של עקומת המהירות היוורדת. השיפוע היוורד של העקומה מבטא את ההאטה ההדרגתית עם כל מחזור סיבוב נוסף. ניתן ליחס את הירידה במהירות הסיבוב

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

להשפעתם של מומנט החיכוך כנגד הרצפה ולהקטנת פיזור מסת הגוף ביחס לציר הסיבוב (כינס הידיים $L = I\omega$). גורמים אלה יכולים להסביר את דפוס ההאטה המתמשך של הגוף בכל סיבוב עד לעצירתו המוחלטת. ההאטה במהירות הסיבוב פסקה בין הפירואט השלישי לרביעי, שם שמר הרקדן על מהירות קבועה. נצפה בפריימים כי לאחר הפירואט השלישי המבצע החל לכנס את ידיו אל ציר הסיבוב, ולכן הגיוני לשער כי הקטנת מומנט ההתמד של גופו בסיבוב הרביעי קיבעה את מהירותו. במשטח בו מקדם החיכוך נמוך כגון זה שבין נעל ההחלקה לקרח ($\mu=0.03$) הקטנת מומנט ההתמד הייתה מגבירה באופן משמעותי את מהירות הסיבוב, אך כנגד החיכוך שבין משטח הבלט לנעל הבלט, הקטנת מומנט התמד רק בלמה לרגע את דפוס ההאטה הליניארי של המהירות. פסגת הגרף בתחילת העקומה מציינת את מהירותו של מחזור הסיבוב הראשון כמדד ליעילות ההכנה בהפקת התנע הזוויתי, ובהינתן שמהירותם של מחזורי הסיבוב 1-3 לא נבעה מהקטנה מיידית של מנח הידיים.

גרף תאוצה: מספר פירואטים = x, מחזור / שנייה בריבוע = y



גרף 3 מציג את עקומת התאוצה כביטוי לשינוי במהירותם של מחזורי הסיבוב, קרי שינוי בתנע הסיבוב¹⁷. הגרף נוסק בתחילת הביצוע ומיד לאחר צונח לעברם של ערכים שליליים המייצגים את התאוצה המתמשכת והגדלה שלאחר הפירואט הראשון, למעט רגע איפוס התאוצה בו סבב הגוף במהירות קבועה במחזור הסיבוב הרביעי¹⁸. הגרף מלמד על חשיבותה של פעולת התאוצה בשלב ההכנה לפירואט לקביעת גודל התנע אשר באופן סינכרוני רק הולך ופוחת בשל מומנט החיכוך. התנע הגדול המופק לביצוע, למרות מרחקן של הידיים מציר הסיבוב בשלושת מחזורי הסיבוב הראשונים, מדגיש את יעילות ההכנה בשלב ההאצה. בנוסף, כינס הידיים אל ציר הסיבוב מבטא

¹⁷ $T = I * \alpha \rightarrow T * \Delta t = \Delta L \rightarrow I * \alpha * \Delta t = \Delta L \rightarrow I * \alpha = \Delta L / \Delta t$ (יואט, 1997)

¹⁸ במצב זה, ניתן לומר כי גוף זה שרוי במצב של שווי משקל דינאמי, בניגוד לשווי משקל סטטי שבו הגוף נמצא טרם ההחלקה (יואט 1997).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

את המיומנות החושית של המבצע בהעדפתו להקצות את התנע הכולל שהפיק לטובת ריבוי סיבובים עם מומנט התמד קטן על פני מיעוט סיבובים עם מומנט התמד גדול. על פי חוק שימור התנע הזוויתי ובהיעדר כוחות חיצוניים אשר יכולים להשפיע על הפירואט לאחר שכפות הרגליים "עזבו" את הרצפה, ניתן לסכם ולקבוע כי **גודל תאוצת הסיבוב ההתחלתית משמשת מדד ליעילות ההכנה לפירואט בהפקת גודל התנע הסיבובי הכולל, בתנאי שמהירות הסיבוב הראשון לא נבעה מהקטנת מומנט ההתמד ושווי המשקל נשמר לכל אורך הביצוע**. ישנם סימוכין לכך כי הטכניקה הנ"ל, המשמשת את Simkin להאצת הגוף בסיבוב עם מומנט התמד גדול של הגוף, יעילה יותר מביצוע שבו ההאצה לפירואט מתבצעת עם מומנט התמד מוקטן קרי, איסוף מהיר של הידיים לסיבוב, הנובע מהעברת התנע שלהן לגוף בשלב מוקדם בסיבוב קרי, משכו של מומנט הכוח גם הוא מתקצר. קצב מחזור הסיבוב הנוצר מאופן ביצוע זה הינו מהיר אך משך התנע שלו קצר (Laws, 2008, עמ' 79-80).

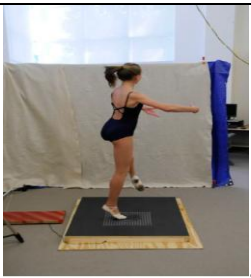
תיאור של עבודת הגוף בהפקת תנע לפירואט אחד

טבלה 3 תדגים את מנחי הגוף בהפקת התנע לפירואט אחד, זאת בהשוואה לטבלה 1 שבה תוארו מנחי הגוף בהפקת התנע לשבעה פירואטים. הטבלה תשווה בין המכניזם בביצוע פשוט לביצוע המשוכלל של Simkin, ותמחיש את ההבדלים בשימוש במנגנונים להפקת התנע בשני ביצועי קצה אלה. במקרה זה שיערתי כי השונות האנתרופומטרית בין הגופים המבצעים פחות רלוונטית להפעלה המכאנית שגופם עושה. התמונות נמצאות בתוך Lott, 2012.

טבלה 3. עבודת הגוף בהפקת התנע לפירואט אחד

הכנה בפוזיציה רביעית של הרגליים ללא wind up. כלומר, טווח 0° בתנועת הטעינה של הידיים והגו בהשוואה לביצוע המתואר בטבלה 1 שבו טווח ה- wind up היה כ- 90°. לפיכך בביצוע זה מוקטן שדה הכוח האופקי לתאוצת הידיים הזוויתית ואיתו קטן הפוטנציאל ליצירת התנע לפירואט.	 1.
נראה כי הגו והידיים לא הגיעו לשלב הפיתול הראשוני של Simkin, המאפיין את פיתול הגו בזווית של כ- 90° בכוון הסיבוב, הידיים באבדוקציה בגובה הכתפיים והרגליים ב- plié. ממנח הידיים האליפטי ניתן להסיק שהן במגמת התכנסות אל הגוף, ושסך כל הטווח לתאוצת הסיבובית עד לנקודה זו אינו עולה על 45° בהשוואה ל- 180° בטבלה 1. מרכז הכובד בנקודה זו נראה גבוה יותר בהשוואה לפריים הקודם, כיוון שהרגליים במגמה להתיישר, העקב של הרגל אחורית מורם מהרצפה ונראה גם שינוי במנח הראש המעיד על תחילת תאוצתו הסיבובית. מנחי הגוף מעידים על קיצור מומנט הכוח, והעברת תנע הידיים לגוף בשלב מוקדם	 2.

אנליזה לפירואט ב- en dehors - passé retiré : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

בסיבוב. לפיכך התנע המופק לסיבוב יהיה קטן. הידיים סיימו את העברת התנע שלהן אל הגוף והן ממשיכות להתכנס אל ציר הסיבוב בכדי להקטין את מומנט ההתמד. הרגל העובדת עדיין לא התקבעה ב-'retire', דבר המעיד על התנע הסיבובי שהיא עדיין נושאת בשלב זה.	 .3
הרגל העובדת התקבעה ב- retire לאחר כ- 5/8 ממחזור הסיבוב הראשון. בטבלה 1 ה- retire התקבע לאחר כשני מחזורי סיבוב. המנח המקובע מעיד על כך שהתנע הסיבובי של הרגל העובדת אשר הגיע ממומנט הכוח חדל בנקודה זו. לפיכך התנופה החלשה של הרגל העובדת הינו בהתאמה למומנט הכוח הקטן. נראה כי גם הרגל התומכת הגיעה כאן ליישור מלא במפרק הברך עוד בטרם הושלם מחזור הסיבוב הראשון לעומת כ-2 מחזורי סיבוב בטבלה 1. ניתן להסיק כי ככל שתנע הסיבוב של הגוף גדול יותר כך גדל היחס בין תאוצתו הסיבובית לתאוצתו הקווית (יישור הרגל התומכת).	 .4

אומדן זמן לתנועת הראש ולמיקוד המבט בפירואט- כפי שהוסבר בפרק 4, מתקיים דפוס זמנים שונה לתאוצות הראש והגוף בפירואט. מהירות הראש מתאפסת בסיומו של כל מחזור ואילו מהירות הגוף מתאפסת רק כשתנע הסיבוב מגיע לסיומו. השלב שבו הראש עוצר מאפשר להעריך את משך הזמן של מיקוד המבט בין מחזורי הסיבוב. המדידה מתייחסת לזמן שעובר מהפריים שבו הראש חוזר אל נקודת הייחוס ועד לפריים שהוא פונה מנקודה זו שנית. משך המיקוד חושב בסכימת הזמן משתי הנקודות הנ"ל. בביצוע של Simkin זמן הנייחות של הראש בין מחזור הסיבוב הראשון למחזור הסיבוב השני חושב באופן הבא: א. זמן מחזור סיבוב ראשון של הגוף = 0.36 שני. ב. זמן מחזור סיבוב ראשון של הראש = 0.24 שני. ההפרש ביניהם = 0.12 שני, מציין את נקודת הזמן שממנה הראש היה מקובע אל נקודת הייחוס/נקודת האפס. בשלב שני שוער הזמן מהרגע שהראש הגיע לנקודת הייחוס ועד לתחילתו של מחזור סיבוב הגוף הבא, כ= 0.08 שני. כעת נשאר לסכום את הפרש הזמנים בין שני הנתונים הנ"ל $0.12 + 0.08$, וכך מקבלים כי משך הזמן שהראש קובע לצורך מיקוד המבט הוא כ- 0.20 שני.

יש לציין שבפריימים המצולמים לא ניתן לראות את גלגל העין של המבצע, אך מצופה כי גלגל העין ינוע בנפרד מהראש, על מנת שלא לבטל את הרפלקס האוקולו-וסיטובולרי. כשהראש יתחיל לפנות בכיוון הסיבוב גלגל העין יפנה תחילה כנגד כיוון הסיבוב ואז יקדים במעט את הראש החוזר אל נקודת הייחוס. בתמונות נצפה כי המבט אכן מתכוון אל נקודת הייחוס פריים אחד קודם שהראש מגיע, ומקובע אל נקודת הייחוס פריים נוסף לאחר פנייתו של הראש ממנה, מה שמשאיר יותר זמן למיקוד המבט. בהתאם לזאת הוערך כי מיקוד המבט בין שני הסיבובים הראשונים ארך

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

כ- 0.28 שני¹⁹ מתוך 0.36 שני שהוא זמן מחזור סיבוב הגוף הראשון. זהו רגע קצר אך נחוץ לשימור תפקידיה של המערכת הוסיטבולרית בחישה ובקרת תנועת הסיבוב. לפיכך מתקבלות שלוש תאוצות סיבוביות, של הגוף, הראש וגלגל העין. המהירות שגלגל העין "פוגע" במטרה מתוך סיבוב הראש, גדולה מהמהירות הסיבובית של הראש עצמו. באופן הגיוני משך הזמן למיקוד המבט פוחת ככל שקצב הסיבוב גובר (ולהיפך).

חשוב להדגיש שהשהיית הראש בביצוע של Simkin, משלב ההכנה השני ועד לתחילת תנועת הרוטציה שלו, ארכה פריים אחד, כלומר פרק זמן השווה ל- 4 מאיות השנייה בלבד! (וייתכן שאף פחות מכך בצילום של יותר מ- 25 פריימים לשנייה). לפיכך פרק זמן זה מצריך הערכה מחדש של השימוש בהנחיה המתודית- להשאיר את הראש, ועל כך ארחיב בהמשך.

¹⁹ המדידה כללה שני פריימים, האחד של תנועת גלגל העין המושהה עם תנועת הראש בתחילת הסיבוב, והשני המקדים את תנועת הראש בסיבוב, שני אלה נוספו לזמן של אי תנועת הראש לצורך חישוב הזמן למיקוד המבט.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 6

ניתוח ממצאים

"בפירואט התנע הזוויתי מצוי בראש וראשונה בגו, ברגל המחווה (*retiré leg* / העובדת) ובידיים" (Laws, 1978, p. 14). מהאנליזה לשבעת הפירואטים של Simkin עולות מספר נקודות אשר יכולות לשפוך אור על ביצועו המשוכלל ועל המנגנונים הפועלים להגברת תנע הסיבוב:

1. תאוצת ההכנות:

הפקת התנע לביצוע של Simkin נעשתה בשני שלבים רציפים. בשלב הראשון- שלב קדם ה-*plié*, כשהרגל התומכת הנושאת את הגוף ניצבה ישרה אל הרצפה ואילו הרגל העובדת נמתחה לצד הגוף על הרצפה, והסתובבה בתנועה מעגלית לאחור על הרצפה. בשלב השני, התבצע מעבר אל שלב ה-*plié* בפוזיציה רביעית והמופרדת של הרגליים אשר ממנה הופעל מומנט הסיבוב. תפקיד הכנה הוא כאמור לייצר תנע אשר יספיק למספר רב ככל האפשר של מחזורי סיבוב לביצוע. מכיוון שתנע באופן כללי הוא וקטור של מהירות במכפלת המסה ($L=mvr$ / $p=mv$), הגדלת משתנה המהירות במכפלת המסה תגרום להגדלת התנע. לפיכך ייעול התנע בפירואט מותנה בהגברת המהירות של האיברים המאיצים, שלבי ההכנה צריכים להיות רציפים ועל כל שלב להיות מהיר מקודמו. בביצוע הנ"ל נמצא כי מהירות ההכנות אכן התגברה, וכי הזמן המשוער שארך שלב 1 היה כ- 0.52 שני, וזה של שלב 2 אף פחת ל- 0.16 שני.

2. התאוצה הסיבובית של הביצוע:

טבלת הזמנים מלמדת כי דפוס הביצוע מתאפיין בתאוצת סיבוב התחלתית גבוהה שלאחריה תאוצה הדרגתית עד לעצירה מוחלטת. התאוצה הסיבובית הראשונית הגבוהה מעידה על שינוי גדול בתנע הגוף ביחס לשאר מחזורי הביצוע ולמרות שמומנט התמד של הידיים היה גדול. לדפוס התאוצה יש קשר למעורבותם של שני מאפיינים פיזיקאליים בביצוע: מומנט החיכוך הקבוע הפועל כנגד תנע הסיבוב וגורע ממנו בהדרגה, והקטנת מומנט ההתמד של הגוף אשר מפחיתה את התנגדות הגוף לסיבוב. שני אלה יוצרים דפוס האטה מתמשך, ורק למראית נראה כי הרקדן מסתובב במהירות קבועה ואז נעצר בשווי משקל. מומנט החיכוך גורע בקביעות מתנע הסיבוב ומאפס אותו לאחר שבעה מחזורי סיבוב. קירוב הידיים אל ציר הסיבוב לאחר הסיבוב השלישי, אינה מגדילה את מהירותו של מחזור הסיבוב הרביעי, אך מצליחה להקטין את ההתנגדות הסיבוב לחיכוך. בהיעדר כוחות חיצוניים אשר יכולים להשפיע על הפירואט לאחר שלב ה-*plié*, שלב ההכנה הינו קריטי ביצירת התנע לסיבוב, שכן בשלב זה נקבע גודל התנע וקצב מחזורי הסיבוב. לפיכך ניתן לקבוע כי, גודלה של תאוצת הסיבוב ההתחלתית משמשת מדד ליעילות

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הפקת התנע לביצוע, בתנאי שמומנט ההתמדה של הגוף לא הוקטן מלכתחילה ושווי המשקל נשמר לכל אורך הביצוע.

3. שימוש בתנועת ה- *wind up* של הידיים והגו בהכנה לפירואט בשלב קדם ה- *plié*:

פירוש הביטוי *wind-up* הוא לטעון, ובהקשר לפירואט הכוונה היא שהידיים והגו טוענים פוטנציאל לתנע סיבובי. בתנועה זו פלג הגוף הכולל ידיים וגו, פונה מנקודת האפס בזווית של כ-90° מכוון הסיבוב, כלומר בניגוד לכוון הסיבוב. בדומה להארכת מסלול התאוצה של אתלט הקופץ לרוחק או של כלי טיס לצורך המראה, כך גם תנועת ה- *wind up* מגדילה את שדה הכוח האופקי לתאוצתן הסיבובית של הידיים ועם זאת גדל פוטנציאל התנע שהן יוצרות לפירואט. תפקידו של הגב בפעולת הידיים הוא לשמש ציר משני מהידיים אל ציר האנך של הגוף, שלוחה של הידיים מציר הכתף אל עמוד השדרה, אשר מאריכה את זרוע המנוף/כוח של הידיים ובהתאם לזאת תורמת להגדלת התנע לסיבוב. ניתן לסכם בכך שתנועת ה- *wind up* משמשת מנגנון להגדלה משמעותית של התנע לפירואט. התנועה מושפעת ממרחקן של הידיים מציר הסיבוב, קצב תנועתן, וגודל שדה הכוח האופקי שבו הן פועלות, אשר באופן מעשי יכולים להגדיל את תנע לסיבוב.

4. שימוש בתנועת מחוג של הרגל העובדת על הרצפה בשלב קדם ה- *plié* אל

שלב ה- *plié*

pirouette en dehors מבוצע אקדמית משלוש פוזיציות: שנייה, רביעית וחמישית אשר כפופות במפרקי הרגל. Simkin ביצע מהלך מקדים לשלב ה- *plié*, בו מתח את רגלו העובדת לצד הגוף על הרצפה, וסובב אותה במהירות בטווח מעגלי של כ-90° לאחור על הרצפה. תנועת המחוג של הרגל על שדה כוח אופקי בכוון הסיבוב נוטה לייצר תנע סיבובי המקדים את שלב ה- *plié*. הרגל העובדת בהיותה ישרה ומתוחה עד לקצות אצבעותיה (כף הרגל מחודדת) נעה הרחק מציר הסיבוב במפרק הירך על הרצפה. המנוף שלה ממפרק הירך ומהירות תנועתה, מייצרים תנע סיבובי אשר עובר אל שלב ה- *plié* ומתווסף למומנט הסיבוב שמפעילות הרגליים. העברת התנע של תנועת המחוג לגוף מתאפשרת בזכות עיגונה של הרגל התומכת לרצפה לתוך שלב ה- *plié*.

ביקשתי את חוות דעתו של Laws על הכנה זו לפירואט, וזהו תרגומי לתשובתו המלומדת כפי שנסלחה אלי במייל (14/3/5): "באופן וודאי אם רגל אשר חופשייה לזוז נושאת עימה תנע כלשהו לצורך סיבוב, אז כשמקור מומנט הכוח לסיבוב פוסק, כלומר כשכף הרגל שעל הרצפה אינה מסתובבת כנגד הרצפה (ולפיכך יוצרת מומנט כוח) אז רגל זו אשר חופשייה להסתובב יכולה להעביר תנע אל הגוף כשלם ביוצרה סיבוב יעיל יותר". הוא מוסיף ואומר שיש בתנועה זו מן הדמיון לסיבוב הצלפה (*tour fouetté*) שעליו הוא כותב בהרחבה במאמר – Momentum (1998)

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

"Transfer in Dance Movement". בסיבוב הצלפה, הרגל העובדת נעה הצידה במישור האופקי, מעבירה תנע סיבובי ממנה אל הגוף כשלם ובחזרה מהגוף אל הרגל. כשהרגל העובדת נמתחת הצידה ומגיעה לקצה טווח התנועה שלה, תנועתה נפסקת ביחס לגוף. עקב זאת התנע שהיא יצרה עובר אל הגוף וחוזר מיד למנח ה- *retiré* של הפירואט, בו כף הרגל העובדת ממוקמת מעל הברך של הרגל התומכת. בהמשך הרגל התומכת עולה ל- *relevé* וכך מתאפשר הסיבוב הבא. Imura (Imura et al, 2008) מוסיף ומסביר כי תנועת הזריקה של הרגל העובדת הצידה מתאפשרת באמצעות הפעלת מומנט כוח במפרק הירך עם כוון הסיבוב. תנועת ההצלפה של הרגל העובדת, מפעילה למעשה מתקף סיבובי על הגוף, כשזו מתכופפת וכל כף הרגל שלה באה במגע עם הרצפה. מהלך ההכנה של Simkin דומה בחלקו לסיבוב ההצלפה. רגלו העובדת אומנם לא נזרקה באוויר כמו בסיבוב ההצלפה, אך תנועת המחוג המהירה שלה על הרצפה בטווח של כ- $1/4$ מעגל בכוון הסיבוב, מקנה לה תנע סיבובי. המתקף הסיבובי שהיא מפעילה נוסף לזה של מומנט הכוח בשלב ה- *plié*, בו כיפוף הרגליים מייצר כוח זוויתי מהרצפה. באופן זה מצליחה הרגל העובדת לייצר תנע סיבובי לפני שלב ה- *plié*, המתווסף לתנע שיוצר מיד לאחריו מומנט הכוח.

5. הפרדה גדולה בין הרגליים בשלב ה- *plié*

המנח המופרד של הרגליים נוצר כדי לייעל את פעולתו של מומנט הכוח בשלב ההכנה שבו הרגליים כפופות בפוזיציה רביעית. מומנט הכוח מאפשר לרגליים לדחוף הצידה כנגד הרצפה ולהשתמש בשדה הכוח האופקי כדי לייצר תנע לסיבוב. מומנט הכוח כאמור מושפע ממרחקו של הכוח הפועל מציר הסיבוב ומגודל הכוח. לפיכך, המנח המופרד של הרגליים מתפקד כזרוע הכוח במומנט, ויש לו את היכולת לייעל את מומנט הסיבוב אפילו מבלי להגדיל את הכוח הפועל בקצה המנוף ($\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$). בהכנה לפירואט, המרחק (d) אשר נמצא בין שתי רגליו של המבצע, מייצג את זרוע הכוח של המומנט, והוא פועל על פי העיקרון הפיזיקאלי הנ"ל. לפיכך כש- (d) יגדל, מומנט הכוח של הפירואט יגדל ואיתו גודל התנע. אולם המנח המופרד למדי בין שתי הרגליים בשלב ההכנה לפירואט (פוזיציה רביעית רחבה של הרגליים) מצריך התאמה פיזית מהמבצע. מנח זה המוגדר גם כ- *hyperextension* במישור הסגיטאלי, מגביל את תנועת הרגל לאחור במפרק האגן וזו מתאפשרת רק באמצעות תנועה בעמוד השדרה המותני, המלווה בהטיית האגן קדימה (Fitt, 1996). על מנת שיציבת גופו של המבצע לא תיפגע במנח זה, הוא מטה מעט את גופו קדימה. בבלט יציבת הגוף במנחי ה- *hyperextension* של הרגל (פוזיציה רביעית גדולה ומכרע קדמי) מתארגנת בקו אלכסוני שבו הגוף ממשיך ברצף את הטיית האגן. אלכסון זה מתחיל מקצה הרגל האחורית ועובר דרך האגן, אל הגוף ועד לקודקוד. באופן זה קשתות הגוף נשמרות, הצלעות אינן נדחפות החוצה מבית החזה, ונמנע ליקוי במערך היציבה. ליקוי שכזה בשלב ההכנה עלול היה להחליש את כוח ההחזר מהרצפה אשר נוטה להתפזר דרך קשתות הגב. כתוצאה מכך גם שרירי השלד צריכים לפעול במאמץ רב יותר בכדי לנסות ולהשיג את אותו אפקט ביצועי. בנוסף מבנה כזה שבו חלקי הגוף אינם ערוכים זה מעל זה היה מסכן את יציבות הסיבוב. Simkin כאמור מטה

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

מעט את גופו קדימה, אך הוא גם מוצא את התזמון הנכון להזדקף בחזרה אל הפירואט מהמנח שבו גוו היה מוטה לפני כשרגליו מופרדות ב- *plié*. באופן זה הוא מאריך את זרוע הכוח של המנח (d) לצורך ייעול מומנט הכוח ושלא באמצעות הפעלת כוח נוסף כנגד הרצפה. טכניקה זו מאפשרת לו להפיק תנע מוגדל ללא מאמץ מיותר ובאופן שגורם לו להיראות נינוח לגמרי.

6. שלב הפיתול הראשוני

תנועת הסיבוב של מרבית חלקי הגוף התחילה למעשה בעוד המבצע שרוי עדיין ב- *plié*, ממחישה את יחסי הכוחות הצידיים בפירואט בהשוואה לכוח האנך/נורמל. מהלך זה כונה בעבודה זו שלב הפיתול הראשוני ומאפייניו הם: א. מנח גו בזווית של כ- 90° בכוון הסיבוב. ב. מנח ידיים לצידי הגוף, בגובה הכתפיים ובאורך מרבי (אבדוקציה של 90°). ג. הרגליים כפופות ומופרדות ב- *plié*. ד. הרגל התומכת/הקדמית מסובבת פנימה במפרק הירך ובכוון הסיבוב. שלב הפיתול הראשוני משלב בין שני מנגנונים פיזיקאליים. האחד מגדיל את שדה הכוח האופקי לתאוצת הידיים/גו הסיבובית וכך מגביר את פוטנציאל התנע לסיבוב. השני מייעל את פעולתו של מומנט הכוח על הרצפה באמצעות הארכת משך ה- *plié*. בהקשר למנגנון הראשון, הפעלת הידיים בפירואט התחילה מטווח מוגדל שקבעה תנועת ה- *wind up*. הטווח שנוצר לתאוצת הידיים השתרע מזווית של כ- 90° מכוון הסיבוב ועד לשלב הפיתול הראשוני בזווית של כ- 90° לכוון הסיבוב, סה"כ כ- 180° . טווח זה הגדיל באופן משמעותי את שדה הכוח האופקי שהידיים האיצו בו לצורך יצירת התנע לסיבוב.

בהקשר למנגנון השני, משך ה- *plié* התארך לתוך תנועת הסיבוב וכך יועלה פעולתו של מומנט הכוח. למעשה, שלב הפיתול הראשוני תיאם את העברת תנע הידיים המוגדל אל הגוף ברגע מאוחר יותר בסיבוב, כשמומנט הכוח עדיין פעל על הרצפה. באנליזה נראה כי רגלו התומכת של המבצע החלה להסתובב פנימה (turn-in) ממנח ה- turn-out בתחילת הכנה. הסיבוב פנימה של כף הרגל היה בתיאום עם תנועת הידיים/גו, בכוון הסיבוב, ובעוד הרגל כפופה. תנועת הסיבוב פנימה של הרגל התומכת בנפרד מזו של הרגל העובדת, אפשרה את הארכת משך ה- *plié* ובכך ייעלה את פעולתו של מומנט הכוח. הסיבה לכך היא שמנח ה- turn-out בהכנה לפירואט (בפוזיציה רביעית כפופה), הציב את כף הרגל הקדמית בניגוד לכוון הסיבוב. כוחות הסיבוב אשר התחילו לפעול על הגוף, פנו בכיוון המנוגד לכף הרגל הקדמית ואילצו אותה לפנות יתר על המידה החוצה, מעבר למסוגלות האנטומית של מפרקי הרגל. במקום העלייה המתבקשת ל- *relevé* המסמנת את תחילת הסיבוב, הרגל התומכת- לא רק שלא התיישרה ל- *relevé*, אלא בעודה כפופה, הסתובבה פנימה במפרק הירך ובכוון הסיבוב, בעוד הרגל האחורית נותרה ללא שינוי במנחה המסובבת החוצה והכפוף. בדרך זו התארך משך ה- *plié* לתוך תנועת הסיבוב ויועלה פעולתו של מומנט הכוח. בביצוע של פירואט 1 לדוגמא (שתואר בטבלה 3), כשכוחות הסיבוב פעלו על הרגל התומכת, זו התיישרה בשלב מוקדם יחסית. חשוב לציין כי עלייה מהירה אל כרית כף הרגל (*relevé*)

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

קוטעת את פעולתו של מומנט הכוח, ועלייה מהירה מידי מקצרת את משכו ופוגמת ביעילותו. לפיכך שלב הפיתול הראשוני הוא שלב חשוב ביותר אשר מתאם בין יצירת תנע הידיים לתנע שיוצרות הרגליים, בשלב מתקדם יותר ברצף ולאחר שמומנט הכוח מיצה את פעולתו.

7. תאוצת הראש

4 מאיות השנייה לאחר שהגוף האיץ לסיבוב הראשון (וייתכן שאף פחות מכך) החל גם הראש את תאוצתו הסיבובית. סביר להניח כי מרווח זמן זה בין שתי התאוצות הינו קטן מכדי שהמבצע יצליח לתאם באופן קוגניטיבי בין שתי פעולות סותרות, כך שלמעשה תיאום זה נעשה בין שתי מערכות רפלקסים מורכבות. באחת, המבצע נדרש להשהות את מבטו ולעכב את תנועת הראש ביחס לסיבוב הגוף, ובשנייה, בהפרש של מאיות שנייה בודדות, המבצע נדרש להאיץ את ראשו ולהקדים את סיבוב הגוף. ביצוע פירואט נושא קושי תפיסתי/ביצועי לתאם בין חלקי הגוף השונים המשולבים יחד ביצירת תנע סיבובי אל מול נייחות הראש. האינטגרציה בין שתי מערכות הרפלקסים מורכבת (כפי שהוסבר בפרק 4), במיוחד כאשר הגברת תאוצת הגוף ההתחלתית מאתגרת את סנכרון הראש. במצבי שגרה עיכוב תנועת הראש ביחס לתנועת גוף יכול להיגרם מההתממד שלו כאיבר לשינוי פתאומי בתאוצת הגוף, אך בפירואט עיכוב הראש יזום. בתנועת הפירואט, הרגע שבו פונה הראש מנקודת הייחוס הוא זמן "ההיעלמות" של הקלט הוויזואלי אשר כפיצוי לכך נתמך בקלט פרופריוצפטי ווטיבולרי. מיומנות טכנית של פירואט מוכחת כאשר המוח יכול לתאם בין תפיסת התנועה הנפרדת של הראש מזו של הגוף. יחד עם זאת חשוב לציין שרגע ההזנקה של הגוף אל תנועת הסיבוב, אשר מכריע את העתק מרכז הכובד מעל ציר הסיבוב ואת תנע הסיבוב, מותיר את המוח ללא מידע חזותי ברור ומשמעותי לניטור התנועה. ה"היעלמותם" הרגעית של המבט/ראש בתנועת הסיבוב מצמצם את הקלט העצבי הישיר התומך בתפיסת התנועה. לפיכך מתבקש כי החזרת מיקוד המבט אל נקודת הייחוס הראשונית לצורך התמצאות מחודשת בשדה הכבידה חייבת להתבסס על האוטומציה של התנועה, המאפשרת תנועות מתואמות ומתוזמנות במהירות ובשליטת המוחון (Kandel at ,Carson, chapter 8, 2007, al., chapter 21, 2013), ועל כך יוסבר בפרק הבא, סעיף 3.

8. תאוצת ה- *retiré* . סעיף זה יתייחס למספר היבטים הקשורים לתנע שמייצרת

פעולת ה- *retiré*.

- מהירות : תנועת סיבוב מתאפיינת בכך שכל חלקי הגוף נעים באותה זווית, באותו כוון ובאותו מרווח זמן (shea, wright, 1997). נובע מכך שחלקי הגוף הרחוקים יותר מציר הסיבוב צריכים לעבור דרך גדולה יותר, כיוון שההעתק הקווי שלהם בתנועת הסיבוב מושפע מאורכו של רדיוס הסיבוב (McGinnis, 2013). בהתאם לזאת, פעולת ה- *retiré* שבה הירך נזרקת הרחק מציר הסיבוב חייבת להתאים למהירותם של חלקי הגוף הקרובים לציר הסיבוב, ועל כן תאוצתה הזוויתית של הירך חשובה לתנע הביצוע.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

- תזמון : שלב הפיתול הראשוני מתאר מנח שבו הרגליים כפופות ומופרדות במישור החיצו, הגו בפיתול של כ- 90° בכוון הסיבוב, כמו גם הרגל התומכת. שלב הפיתול הראשוני אשר תזמן את העברת תנע הידיים אל הגוף מאוחר בסיבוב, מתזמן באופן דומה גם את העברת התנע מרגל ה- *retiré* אל הגוף מאוחר יותר בסיבוב. לפיכך תאוצת ה- *retiré* פועלת מתוך מומנט הכוח על הרצפה, היא מושפעת מגודלו, כפי שניתן היה להבדיל בניתוח מנחי הגוף של ביצוע פירואט אחד בהשוואה לשבעה.
- הגדלת טווח האבדוקציה של ה- *retiré* : המנח הסגור של הרגל התומכת בשלב ה- *plié* מאפשר אבדוקציה טובה יותר של הרגל העובדת. האבדוקציה במפרק האגן נחלקת בין שתי הרגליים, ולכן סגירת הרגל התומכת בשלב הפיתול הראשוני, מאפשרת לרגל העובדת לנוע ביתר חופשיות על ציר הסיבוב וכך לשאת את התנע שלה אל נקודה זוויתית רחוקה יותר. מהירותה ביחס לשינוי הזוויתי שהיא עוברת מייצרים תאוצה גבוהה יותר ולכן גם תנע סיבובי גדול יותר.
- זרוע המנוף : זרוע המנוף של מנח ה- *retiré* מגיעה לאורכה המרבי בין מפרק הירך אל מפרק הברך ב- 90° . אורך הזרוע כאמור משפיע על התנע הזוויתי שיוצרת הרגל העובדת, וכך תאוצת ה- *retiré* המהירה מתוך מומנט הכוח תורמת לתאוצת הגוף. באופן הגיוני לאחר מספר רגעים שתנופת ה- *retiré* חדלה, קצת לאחר שה- *retiré* מתקבע מעל פיקת הברך, תרומתה לתנע הסיבוב מתהפך, ומרחקה מציר הסיבוב יוצר מומנט התמד אשר גורע מתנע הסיבוב. בביצוע של Simkin הרגל העובדת התקבעה ב- *retiré* רק לקראת מחזור הסיבוב השני. יש להניח כי זהו משך הזמן שהנפת הירך תרמה לתנע הכללי של הסיבוב לפני שמומנט ההתמד שלה התחיל לפעול. הנחה זו נתמכת בתאוצת הסיבוב אשר מתרחשת באופן משמעותי מהסיבוב השלישי, מעט לאחר שהרגל התמקמה מעל הברך, לכן לאופן שבו מבוצע ה- *retiré* יש השפעה על התנע הכולל של הפירואט.

9. תיאום בו זמני בין התאוצות הזוויתיות של הראש והרגל העובדת ל- *retiré*

סעיף זה עוסק בסימולטניות של תאוצת הראש והרגל העובדת למנח ה- *retiré*. בביצוע של Simkin תיאום זה התאפשר משלב הפיתול הראשוני של הגוף ב- *plié*, שבו הגו פנה בזווית של כ- 90° ביחס לראש, טרם הוזנק הגוף ל- *relevé*. שלב הפיתול הראשוני מאלץ אנטומית את הראש להתיר את עצמו מהפיתול שנוצר בעמוד השדרה הצווארי וכך לפנות בכוון הגוף, ובנוסף לרגליים לסיים את מומנט הפיתול כנגד הרצפה בהנפה זוויתית של הרגל העובדת למנח ה- *retiré* ושל הרגל התומכת ל- *relevé*. באופן זה התזמון של תאוצות הראש והרגל מתרחש במקביל ומציין את רגע ה"זינוק" לתנועת הסיבוב.

10. היחס בין תאוצת הסיבוב לתאוצת ה- *relevé* הקווית

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

נראה כי יישור הרגל התומכת ל- *relevé* בביצוע 7 הפירואטים של Simkin ארך כשני מחזורי סיבוב. לעומת זאת בביצוע של פירואט אחד, יישור הרגל התומכת ארך כ- 5/8 ממחזור הסיבוב. ניתן להסיק מכך כי ככל שתנע סיבוב הגוף גדול יותר כך גדל היחס בין תאוצתו הסיבובית לתאוצה הקווית של הרגל התומכת (יישור הרגל). האופן שבו הסיבוב מקדים את יישור הרגל מצביע על כך שלא ניתן באמת לעלות ואז להסתובב, הנחיה שמורים לפעמים נוטים לתת בשיעור, כיוון שהפעלתו של מומנט נפסקת עם העלייה ל- *relevé* (Laws, 2002, 2008).

11. שימור התנע בפירואט ביחס למומנט ההתמד ולמומנט החיכוך

לאחר שהגוף הוזנק אל תנועת הסיבוב מתוך מומנט הכוח, לא ניתן להגדיל את תנע הסיבוב ללא מומנט כוח חיצוני, לפיכך סופו של התנע לדעוך בגלל החיכוך הקבוע עם הרצפה. הדרך היחידה להוסיף מחזורי סיבוב בתנע הקיים היא באמצעות הקטנת מומנט ההתמד של הגוף. Simkin עושה זאת בתהליך הדרגתי, כאשר לסירוגין הוא מקרב ומנמיך את הידיים אל מרכז הכובד, קרי ציר הסיבוב. באופן זה הוא מנטר וממקסם את תנע ביצוע שהוא יצר לכמות מרבית של מחזורי סיבוב.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 7

מהלכי התיאום של מנגנוני התנע

ביצועו של Simkin מדגים את השימוש המוגבר במנגנונים להפקת התנע, ובמיוחד את האופן בו הם מתואמים. מנגנונים אלה אמורים למצות את הפוטנציאל הפיזיקאלי בשדה הכוח שעליו פועל הגוף. רוב המנגנונים אופייניים לשלב ההכנה כיוון ששלב זה הינו המכריע ביצירת תנע הסיבוב שלאחריו כבר לא ניתן להגדילו. בפרק 6 הודגש האופן שבו מנגנוני התנע מוגברים לצורך הביצוע ואילו פרק זה ידגיש את התיאום ביניהם. מתוך האנליזה עולים חמישה מהלכי תיאום:

1. תיאום בין תנועת המחוג של הרגל העובדת בשלב הראשוני של ההכנה עם תנועת ה-

wind up של הגו והידיים :

תנועת המחוג של הרגל העובדת מתבצעת בטווח מעגלי של כ- 90° אך בכיוון המנוגד לתנועת הגו והידיים אשר נעות גם הן בטווח דומה. כשרגל שמאל נעה עם כוון הסיבוב, הידיים והגו נעים כנגד כוון הסיבוב. באופן זה התנע הסיבובי המנוגד שכל צד מפיק מייצב לרגע את הגוף בשווי משקל מול הכוחות האופקיים שמפעילים עליו שתי התנועות בשלב ההכנה הראשוני. בשלב ההכנה השני תנופת הידיים פועלת במקביל לכוחות הצידיים שמפעילות הרגליים באמצעות מומנט הפיתול. תנועת המחוג של הרגל והידיים ב- wind up מתגברים את הפקת התנע ממומנט הכוח שפועל על הרצפה במצב המופרד של הרגליים.

2. תיאום בין מומנט הכוח לתנע המגיע מתנועת wind up של הגו והידיים :

תיאום זה מאפיין את שלב הפיתול הראשוני של הגוף בסיבוב, בעודו ב- *plié* במנח המופרד של הרגליים, בפוזיציה רביעית. הוא מאפשר את העברת התנע שטענו הידיים בתנועת wind up אל הגוף, בשלב מאוחר יותר בסיבוב, כשמומנט הכוח לקראת מיצוי פעולתו על הרצפה. העברה מוקדמת של תנע הידיים אל הגוף הייתה מן הסתם נספגת בגוף ולא משנה את גודלו. העברה מאוחרת של תנע הידיים, לאחר שהרגליים עזבו את הרצפה, הייתה מותירה את הגוף עם מומנט כוח בלבד ברגע הזינוק לסיבוב, ומומנט התמד גדול של הידיים בשל התנגדותן לתנועת הסיבוב. התיאום בין תנופת הרגליים לזו של הידיים/גו בהכנה לפירואט מאפשר לתנע הסיבובי שהן יוצרות בנפרד להתמזג בגוף כאחד. מהלך זה מדגיש את ההפרדה המושגית והמלאכותית בפירואט בין שלב ה- *plié* לשלב ה- *relevé*, כיוון ששלב ההכנה נועד להאיץ את הפעלתם של כוחות סיבוב משמעותיים על הגוף כדי להזניקו בתנופת סיבוב מרבית. ההכנה לפירואט בעלת שני השלבים שסימקין מבצע, מאפיינת תפקידי בנים ברפרטואר הבלט, והיא בעלת פוטנציאל לייצר תנופת סיבוב אשר לעיתים מעבר ליכולתם של רקדנים לא מיומנים לשלוט בה. הכנה זו אפקטיבית רק כאשר ההכנות מבוצעות ברצף ובמהירות מתגברת, והראש אינו מעכב את מבטו!

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

3. תיאום תאוצת הראש עם תאוצת ה- *retiré* משלב הפיתול הראשוני :

הראש מאיץ בעקבות הגוף לאחר כ- 0.04 שני משלב ההכנה השני. מרווח הזמן מחייב תזמון שיהיה מתכונתי לקצב סיבוב הגוף. סביר להניח שהקושי של המוח לסנכרן את תאוצת הראש ביחס לתאוצת הגוף נובע ממספר גורמים: ראשית, יש לשער שמנח הראש המקובע יחסית בתחילת הפירואט מקשה על איברי המערכת הוסיטבולרית לחוש את תנועת הגוף בתחילת הסיבוב. בנוסף סיבוב הגוף המהיר מקשה על סנכרון רוטציית הראש בשלב הזינוק לפירואט. כאמור, מערכת התנועה בביצוע אופטימאלי נסמכת על מערכת הראייה, הפרופריוספציה והמערכת הוסיטבולרית, אך בביצוע מהיר ומורכב של פירואט לדוגמא, מתקבל מידע חלקי או סותר מהמערכות הנ"ל לגבי התנועה. במצב זה המוח עלול להתמצא פחות בהערכתה, ועלול להתבסס על עבודה רפלקסיבית מורכבת ופחות על פי משוב. גורם שלישי הוא עיכוב היתר של הראש בפירואט הנובע מהדגשת יתר של ההנחיה המתודית המוכרת "להשאיר את הראש" בסיבוב. הנחיה זו מתעלמת מהתאוצה ההתחלתית הגבוהה בביצוע משוכלל אשר מצריכה הפעלה מוקדמת יותר של רוטציית הראש בפירואט. במרווח זמן של מאיות השנייה, מחשבה מודעת על תנועת הראש עלולה לפגוע באוטומטיזציה של התנועה היזומה, כיוון שמיומנות אוטומטית אינה מערבת את תהליכי העיבוד שבמודע²⁰. מיומנות אוטומטית נשלטת בעיקר באמצעות מערכות מוחיות עמוקות כגו המוחון (ולא קליפת המוח), ובניטורה לא נדרש מאמץ רב אם בכלל, גם אם נוספות דרישות אחרות ביכולת העיבוד שבמודע. באופן הפוך גם כל ליקוי באוטומטיזציה של התנועה יבוא לידי ביטוי כאשר תהליך ניטור התנועה שבמודע יאותגר (Nicolson & Fawcett, בתוך Visser J, 2003). תמיכה לכך נמצאה גם במחקרם של Nigmatullina Y at al. (2013). מחקר זה בדק את הקשר בין שתי מגמות התגובה במוח נוכח גירוי וסיטבולרי, האחת של הרפלקס הוסיטבולו-אוקולרי והשנייה של תפיסת סיבוב עצמי (ורטיגו), כנובעות ממבנים עצביים שונים. המחקר בחן רוטציות גוף אופקיות בקרב קבוצת רקדנים מנוסים בהשוואה לרקדנים מתחילים, כולם פאסיביים לסיבוב. בקבוצת הניסוי/הרקדנים נמצאה ירידה במשכה של תחושת הוורטיגו (מצב רצוי בהחלט לרקדן) ועלייה במשכו של הרפלקס הוסיטבולו-אוקולרי. הממצא היה במתאם עם ירידה בדחיסות החומר האפור²¹ במוחון של קבוצת הניסוי ובניגוד לקבוצת הביקורת. שינויים פלסטיים במבנה המוח, קרי הקטנה או הגדלה בכמות החומר האפור או הלבן²², שכיחים במחקרים השונים (שם, עמ' 1). שינויים אלה נמצאו במתאם עם רמת ביצוע גבוהה הנובעת מתרגול מתמשך, שכן דחיסות החומר האפור במוחון פוחתת בשלב שבו למידת המיומנות מתבססת אך תוך שמירת רמת הביצוע. במחקר הנ"ל נראתה ירידה סלקטיבית בדחיסות החומר

²⁰ במקור: Visser J, "conscious processing capacity", עמ' 487, 2003

²¹ במקור: Nigmatullina Y at al., "GM density reduction", עמ' 1, 2013

²² החומר האפור מתייחס לריכוז גופי תאי הנוירונים במוח שצבעם חום אפרפר. החומר הלבן מתייחס לאקסונים המחברים את הנוירונים שבמוח עם מבני מוח אחרים, אלה מצופים במיילין שצבעו לבן (Carson פרק 3 עמ' 99).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

האפור במוחון הווסטיבולרי בקרב קבוצת הרקדנים המנוסים, שיוחסה לאוטומטיזציה של תנועת הסיבוב שהם מורגלים בה. בנוסף, החוקרים משערים כי לדיכוי תחושת הורטיגו בקבוצת הניסוי, כלומר לירידה בתגובתיות התפיסה לסיבוב, היה קשר עם דילול החומר האפור במוחון הווסטיבולרי, וזאת באמצעות הגבלת החיווט עם החומר הלבן בקורטקס. ממצא זה עמד בניגוד לקבוצת הביקורת שהראתה מתאם בין תגובתיות התפיסה לסיבוב עם החומר הלבן בקורטקס הפרונטאלי. לפיכך המאמר הנ"ל משער כי תרגול מתמשך של אימוני בלט ברוטציות גוף מייצר מעגל חיווט עצבי נוקשה ובעל גמישות מועטה בלבד, שמתבטא באובדן חומר אפור במוחון (שם).

ניתן להבין ממנגנון האוטומטיזציה של התנועה כי קוגניציה עצמית ברגע ההזנקה לפירואט, כלומר החשיבה על שתי הוראות ביצוע מיידיות הסותרות זו את זו בשלב התאוצה הראשונית לא יהיה יעיל: הוראה אחת ש"חושבת" כביכול את עיכוב תנועת הראש ביחס לסיבוב הגוף והוראה השנייה אשר ניתנת בהפרש של שבריר הרגע ומבקשת להאיץ את הראש באופן שימהר להקדים את סיבוב הגוף בפירואט. לפיכך, יש לשער כי על מנת שמנגנון התיאום בין סיבוב הראש לגוף יפעל בסנכרון מלא, על המבצע לפעול על פי רמז תנועה אשר יקדים את הפעלת הראש ברגע התאוצה הראשוני של הגוף לסיבוב. אות זה יתבסס על תחושת התנועה המקדימה להפעלת תאוצת הראש ויעקוף את העיכוב שמפעילה המחשבה על קיבוע מנח הראש ביחס לסיבוב הגוף או לכתף הנגדית²³.

בנוסף השימוש באות מקדים ידגיש בשלב התאוצה הראשוני של הפירואט דווקא פעולה, קרי את האצת/חזרת הראש בסיבוב, במקום את עיכוב הפעולה/קיבוע הראש. לפיכך, הפעלת הראש בתאוצת הסיבוב הראשונית תקושר לרמז מקדים אשר יקצוב את הסנכרון של הראש עם הגוף ויתמוך באוטומטיזציה של הביצוע הרציף והמהיר. חשוב להדגיש כי הנטייה להקדים את רוטציית הראש תגדל ככל שתאוצת הסיבוב ההתחלתי תגדל. בהינתן שלסימקין נדרשו כ- 0.04 שני' (ואף פחות מכך) להאיץ את ראשו מהרגע שידיו פנו מנקודת האפס בכוון הסיבוב, יהיה זה לא סביר להניח שהוא פשוט "המתין" 0.04 שני' עד שגופו יפנה בכוון הסיבוב בזווית של כ- 90° בכדי להאיץ את ראשו, אלא שהוא הסתמך על תחושת התנועה המקדימה לסיבוב הראש. כלומר, רמז פרופריוצפטי שנובע מתנועה קודמת ברצף ההכנה, וקוצב את תאוצת הראש לסיבוב כגון, התחושה מתנועת הידיים הפונות עם כוון הסיבוב בשלב ההכנה השני, או מהעמקת ה- plié המקבילה לה מבחינת התזמון, או מדחיפת הרצפה לתאוצת ה- retiré בשלב הפיתול הראשוני בביצוע מואט.

זה המקום להזכיר כי בהיעדר מטרה וויזואלית למיקוד המבט בסיבוב, הרפלקס הווסטיבולרי-קוליק (vcr) הקטין את מהירות הראש בחלל (Gdowski & McCrea, 1999). רפלקס זה כאמור מעורר שרירים שיכולים לייצר סיבוב המקזז את תנועת הראש מעל הצוואר, ושרירים שיכולים לשנות את כוון הצוואר ביחס לגוף בסיבוב. לפיכך הרפלקס הווסטיבולרי-קוליק יכול להסביר את תנועת ה- spotting של הראש בפירואט, אולי שלא על פי תפיסתו המוטעית כמנגנון להגברת תנע

²³ 1978, עמ' 356, Kosrovitskaya & pisarev

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הסיבוב כפי שניתן למצוא במספר מקורות²⁴, אלא כפי שמשמע ממחקרם של Gdowski (1999) & McCrea **כמנגנון להגברת מהירות הראש בנוכחות מטרה ויזואלי**. מנגנון זה מאפשר לראש לעצור ולהאיץ בכל מחזור סיבוב מחדש, וכך למנוע את האטתם של רפלקסים וסטיבולריים נוספים אשר באופן פיזיולוגי יפגמו בניהול הביצוע. נובע מכך שדסינכרוניזציה של הראש/מיקוד המבט בכל שלב בביצוע, יהיה בלתי הפיך עקב התגובות הפיזיולוגיות שמעורר הגירוי הוסיבולרי הלא מבוקר. לפיכך תיאום הראש בשלב התאוצה בהכנה הינו כה קריטי לקביעת מיקוד המבט לצורך ניהול תנועת הסיבוב המתמשך.

בנוסף לתנע שמייצרים איברי הגוף השונים בתאוצתם הראשונית, נראה כי גם תאוצת הראש ההתחלתית תומכת בתאוצת הסיבוב הראשון של הגוף. למרות שהוסבר כי מיקום הראש ביחס לציר הסיבוב אינו יכול לייצר תנע משמעותי לביצוע, סיבובו ההתחלתי עדיין עלול להאט במידה את סיבוב הגוף אם יבוצע לאחר שמומנט הכוח סיים את פעולתו. כנאמר, המכאניקה של תנועת הראש קובעת כי סיבוב הראש מהיר יותר מסיבוב הגוף. לכן, נובע מחוק שימור התנע הסיבובי ($L = \omega * I$) כי כאשר הראש יסתובב מהר יותר מהגוף, הוא יספוג מתנע הסיבוב של הגוף ויאט את מהירותו. משתמע מכך שכאשר הראש ינוע ביחד עם שאר הגוף, הסיבוב יהיה אפילו מהיר יותר מסיבוב שבו רוטציית הראש תתבצע לאחר שמומנט הכוח סיים את פעולתו. האנליזה הראתה כי הראש בפירואט נזרק לתנועת הסיבוב משלב הפיתול הראשוני, כשמומנט הסיבוב עדיין פועל (למרות שהתגובה להפעלתו ניתנת בשלב מקדים!). באופן זה מהירות הראש אינה מקוזזת ממהירות סיבוב הגוף כיוון שתאוצתו (המעוכבת) נובעת מפעולתו של מומנט הכוח על הרצפה. לפיכך, לא רק שהראש אינו גורע מתנע הסיבוב הראשון של הגוף, אלא אף יכול להוסיף לתנע הכולל של הביצוע. "אם הראש מאיץ את סיבובו בזמן הפעלתם של כוחות אופקיים כנגד הרצפה", דבר אשר יוצר מומנט הפיתול המאריך את משך מומנט הכוח, "אזי סך התנע של כל הגוף יהיה גדול יותר" (תרגום שלי ל-Laws, מתוך email, 20/1/2014). שלב הפיתול הראשוני מייצר תזמון ייחודי שבו מומנט הכוח מושהה וממנו מתבצעות תאוצת סיבוב הראש ותאוצת הרגל האחורית אל ה- *retiré* סימולטנית. באופן זה הראש אשר נשמר עם תחילת התאוצה יכול להקדים את סיבוב הגוף, לתמוך בתאוצת הגוף, להוסיף לתנע הכללי של הגוף, ולאפשר את מיקוד המבט לצורך המשך הביצוע. מרווח הזמן הקצר לסנכרון תאוצת הראש עם זו הגוף בסיבוב מעלה את הצורך לתרגל את חזרת הראש ביחד עם תאוצת ה- *retiré* בשלב הפיתול הראשוני.

4. תיאום תאוצת ה- *retiré* עם מומנט הסיבוב המושהה:

המנח הסגור של הרגל התומכת בשלב הפיתול הראשוני של הגוף מאפשר לרגל שמבצעת את ה- *retiré* להצטרף מאוחר יותר בסיבוב, רק לאחר שלב הפיתול הראשוני, ולהאיץ יותר זוויתית מתוך מומנט הכוח המושהה על ציר הסיבוב. פיתול הרגל התומכת כשם שהוא מאפשר להאריך את מומנט הכוח, ולידיים להעביר את התנע שלהם בשלב מאוחר יותר בסיבוב כך גם לרגל ה-

²⁴ Kostrovitskaya & Pisarev, 1978, p.367, Laws, 2008, p. 71

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

retiré להאיץ מעט מאוחר יותר ולהעביר את התנע שלה בשלב מאוחר יותר בסיבוב. פיתול הרגל התומכת מגדיל את המרחק הזוויתי שהרגל נזרקת אליו ב- *retiré* שמשמעה תאוצה סיבובית מהירה יותר. תאוצתה המהירה של רגל ה- *retiré* מתוך מומנט הסיבוב במנח זה יוצרת זרוע כוח הארוכה ביותר מציר המפרק אשר מגדילה את תנופתה שלה כתוספת לתנע הכולל של הגוף. בביצוע של Simkin תנופת ה- *retiré* לפני קיבועה של כף הרגל מעל פיקת הברך ארכה כשני מחזורי סיבוב. קיבוע ה- *retiré* הוא הרגע שבו הרגל העובדת סיימה את תנופתה הזוויתית כתוספת לתנע הסיבוב. מרגע זה ואילך תפקידה מתהפך, לא רק שהיא אינה תורמת לתנע הסיבוב אלא גם שמרחקה מציר הסיבוב מגדיל את מומנט ההתמד שלה וגורע מתנע הסיבוב הכולל. לפיכך, האופן שה- *retiré* מבוצע מתוך מומנט הכוח הפועל על הרצפה הינו משמעותי לתנע הכולל של הביצוע, ומשך הזמן שהירך מונפת טרם קיבועה מבטא את מרווח הזמן לפני שתנופתה חדלה ומרחקה מציר הסיבוב יאט את תנועתה.

5. תיאום בין מומנט ההתמד של הגוף עם מומנט החיכוך:

זהו המנגנון היחיד אשר פועל לאחר שכל מקורות התנע פסקו, וייחודו הוא בכך שהוא אינו יכול להגדיל את התנע הסיבובי אך הוא בהחלט יכול להשפיע על מהירות הסיבוב בזמן התרחשותו והגדלת מחזורי הסיבוב. Laws (1978), כאמור הסביר שכאשר מומנט הסיבוב מופסק והתנע הזוויתי הוא די קבוע, הרקדן יכול לשלוט בקצב הסיבוב דהיינו במהירות הסיבוב "ω" על ידי שליטה בפיזור מסת הגוף ביחס לציר הסיבוב. אם מומנט ההתמד "I" קטן, בגלל קירוב הידיים או כל איבר אחר בגוף אל ציר הסיבוב, המהירות הסיבובית "ω" בהתאמה תגדל תוך שמירת התנע הזוויתי "L" קבוע. לאחר שגודל התנע הסיבובי נקבע לסיבוב, גורעים ממנו בקביעות מומנט החיכוך עם הרצפה ומומנט ההתמד של המסה הרחוקה מציר הסיבוב קרי, מנח הידיים ורגל ה- *retiré*. כל שנשאר למבצע לעשות הוא לקרב ולהנמיך את הידיים אל ציר האנך של הסיבוב ואל מרכז הכובד. כאמור שינוי מנח הידיים אל ציר הסיבוב נראה לאחר שלושה מחזורי סיבוב וההתנגדות של מוטת ידיו הארוכות לתנועה הייתה מקצרת את משך התנע לולא היה עושה זאת. מהלך זה סיפק לו ארבעה מחזורי סיבוב נוספים בקונפיגורציה מרוכזת יותר אל ציר הסיבוב. ביצועים ווירטואוזים נוספים כגון זה של מיכאיל ברישניקוב בסרט "לילות לבנים" שבו הוא מבצע 11 פירואטים²⁵, מלמדים כי בנוסף לקירוב והנמכת הידיים, מונמכת גם הרגל העובדת, מפוזיצית ה- *retiré* אל פוזיציה נמוכה בהרבה בגובה הקרסול (*sur le cue de pied*). הנמכה זו מקטינה על פי אותו עיקרון את מרחקה של הרגל העובדת מציר הסיבוב ובהתאם את מומנט ההתמד שלה. מנגנון זה מקנה להם מספר סיבובים נוסף באותו גודל תנע.

²⁵ Baryshnikov pirouettes white nights - <https://www.youtube.com/watch?v=02EvsGal-Wc>

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 8

יישומים בהוראה

מורכבותה של האינטראקציה הפיזיקאלית-פיזיולוגית בהפקת ביצוע משוכלל של פירואטים מסבירה את האתגר הטכני שביצוע כזה מציב. המבצע צריך להפעיל בתיאום מושלם של איברי גופו השונים את מנגנוני התנע השונים ובאמצעות תיאום הראש לפירואט עליו גם לנהל את תנועת הסיבוב המתמשכת. רגע קריטי בביצוע הוא רגע הזינוק לפירואט מבחינת קביעת גודל התנע לסיבוב והסנכרון בין הראש, כאיבר המשמעותי לניהול התנועה, לסיבוב הגוף. לפיכך פירואט הינו אלמנט כה מאתגר שהדרך ללמדו צריכה לכלול את תרגולם של מספר אלמנטים כגון, סנכרון הראש ביחס לתאוצת הסיבוב, הגברת מנגנוני התנע, שמירת תבנית הגוף, שמירת שיווי המשקל ושימור התנע ביחס לכבידה ע"י הקטנת מומנט ההתמד. מטרת יישומי ההוראה היא למקסם את פעולת הגוף על שדות הכוח הפיזיקאליים באמצעות הנחיות ביומכאניות, אשר תאפשרנה את האוטומטיזציה של התנועה היזומה והמהירה. להלן תוצגנה מספר הנחיות מקובלות בהוראת פירואט אשר עלולות לשמש פרדוקסים ביומכאניים :

1. שמירת המשקל בהכנה לפירואט בפוזיציה רביעית של הרגליים מעל הרגל

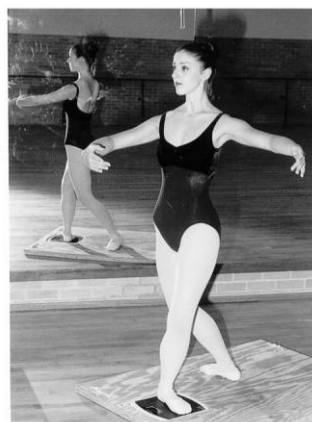
הקדמית -

פיזור משקל הגוף בהכנה לפירואט מעל הרגל הקדמית (בפוזיציה רביעית) לא משאירה מספיק ממשקל הגוף על הרגל האחורית בכדי שכוח החיכוך האופקי יאפשר לכף הרגל האחורית לדחוף הצידה מבלי להחליק לצורך יצירת מומנט הכוח (Laws, 2008, פרק 4). בניסוי שבדק את יעילות הפירואט ביחס לפיזור משקל הגוף של המבצעים בהכנה לפירואט נמצא דפוס הצלחה מסוים (Laws, 2002). ראשית נערכה מדידה לגובהם של המבצעים, משקלם ואורך הרגל. לוח עץ שבתוכו היה שקוע משקל מדד את הכוח האנכי שהפעילה כל כף רגל. בנוסף הוערכה יעילות הפירואט גם ביחס למרחק בין שתי כפות הרגליים ברגע ההכנה (ראה תמונה 3). נמצא כי רקדנים נטו להשאיר 63% בממוצע ממשקל הגוף על הרגל הקדמית, כך ש- 37% ממשקל הגוף נותר על הרגל האחורית, מספיק משקל כדי שכף הרגל האחורית תוכל להפעיל כוח חיכוך אופקי, כלומר לדחוף הצידה מבלי להחליק ביצירת מומנט הסיבוב. בנוסף רוב הרקדנים המיומנים היו טובים יותר כשחלק גדול יותר ממשקל הגוף היה על הרגל האחורית²⁶.

²⁶ עוד נמצא בניסוי זה כי רקדנים הצליחו יותר בביצוע הפירואטים כאשר בשלב ההכנה ביצעו הפרדה רחבה יותר בין כפות הרגליים. כמו כן לרקדנים מיומנים לא הייתה בעיה להעתיק את מרכז הכובד ממצב רחוק יותר בהכנה הרחבה אל ציר הסיבוב.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

תמונה 3. פלטפורמה עם משקל השקוע בתוכה המשמש למדידת הכוח האנכי בכל כף רגל (Laws, 2002).



2. איסור תנועת "wind up" בפירואט-

מרבית מורי הבלט רואים בתנועת ה- wind up חריגה אסתטית מכללי הביצוע של פירואט ולכן הם אוסרים באופן חד משמעי על תלמידיהם את השימוש בתנועה זו (Laws, 2008, עמ' 81). כפי שנצפה באנליזה, בתנועת ה- wind up פנו הגו והידיים בזווית של כ- 90° מכוון הסיבוב. טווח זה משמש הגדלה משמעותית של שדה הכוח שממנו הגו/ידיים התחילו את תאוצתם לצורך יצירת תנופת הסיבוב. לפיכך, wind up משמשת מנגנון טכני להגברת תנע הסיבוב והגבלתה בשלבי תרגול מתקדמים, קרי איסור תנועת הידיים והגו בטווח האמור לקראת ביצוע משוכלל, יקטין בהכרח את פוטנציאל התנע לסיבוב ואת מספרם של מחזורי הסיבוב שניתן להפיק.

3. עלייה לרלווה ואז סיבוב-

Laws הדגיש את האבסורדיות הפיזיקאלית של הנחייה זו במספר כתביו (1978, 2002, 2008) והסביר שלאחר העלייה ל- relevé מומנט הסיבוב חדל ולכן בשלב זה לא ניתן בשום אופן להפיק כוח סיבובי. דרך האנליזה לביצועו של Simkin הוגדר ותואר שלב הפיתול הראשוני באופן מנחי. שלב זה תיאר את מנחי הגוף ברגע הזינוק ל- relevé והמחיש את פעולתו של הגוף על שדות הכוח הפיזיקאליים בכדי להגדיל את תנע הסיבוב. בנוסף, שלב זה סותר את הדיכוטומיה המושגית של relevé-plié ואת שלב ההכנה לפירואט כנפרד מרגע מהסיבוב. חשיבותו של שלב הפיתול הראשוני הוא בהארכת המשך שמומנט הכוח פועל על הרצפה ביחס לתנועת הידיים/גו, כך שבאופן מעשי תחילתו של הסיבוב מצוי כבר בשלב ה- plié, קרי בשלב הכנה ולפני שלב ה- relevé. ההכנות המתודיות לפירואט שמטרתן לתרגל את ייצוב הגוף בשווי משקל סטאטי במנח הפירואט, מנטרלות למעשה את פוטנציאל הסיבוב בתרגול. יוצא מכך שהמתודיקה מדגישה לרוב את ההיבט הקווי של תנועת הפירואט, קרי העלייה לרלווה ושימור מנח הגוף, ופחות את הכוחות האופקיים שהגוף צריך להפעיל לצורך הגברת תנע הסיבוב. ההבנה בנחיצות השהיית מומנט הסיבוב ובמקביל בתיאום מאוחר של תנועת הידיים/גו ביחס ל- relevé יכולה להפוך את שלב הפיתול הראשוני

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

למהלך חשוב בתרגול וייעול פירואט. האנליזה כאמור הראתה כי הפקת התנע לפירואט בשלב ה-
plié הייתה כה יעילה, עד כי המבצע הצליח לשאת את ידיו הרחק מציר הסיבוב למשך 3 מחזורי
סיבוב, ולאחריהם להפיק 4 מחזורי סיבוב נוספים.

בהסתמך על כל הנאמר, תרגול יעיל של פירואט *en dehors* היה נעשה באופן הבא: עם פתיחת
הידיים בשלב ה- plié יש לעכב את שלב ה- *relevé* ולבצע דווקא העמקה במנח הכפוף והמופרד
של הרגליים. פעולה זו אמורה לסייע בהארכת פעולתו של מומנט הכוח. בנוסף, על המתרגל לפתל
את גוו וידיו בהתאם לשלב הפיתול הראשוני. רק משלב זה ולא קודם לכן, יש לסובב את הרגל
האחורית ל- *retiré* ואת הראש בחזרה אל נקודת הייחוס.

4. השארת הראש ואז סיבוב-

ההנחיה הכה מוכרת, להשאיר את הראש בסיבוב נכונה בעיקר בשלבי הלימוד הראשונים לצורך
הבנת תפיסת התנועה בפירואט המפרידה את סיבוב הראש מהגוף. השארת הראש מתבצעת באופן
יחסי לקצב הסיבוב הראשוני ולכן עם הגברת מהירותו יש להקדים את רוטציית הראש כתנאי
לביצוע ה- *spotting*. ניתן להניח כי עיכוב יתר של הראש יכול לשמש גורם אחד לכך שדווקא
הניסיון להגדיל את תנע הסיבוב גם בקרב רקדנים מקצועיים אינו מוביל בהכרח לביצוע מרובה
פירואטים. התנופה הסיבובית המוגברת מאיצה את הגוף בקצב אשר מקשה על תיאום תנועת
הראש עם תנועת הגוף ולחוסר סנכרון ביניהם. במצב זה אובד מיקוד המבט, מהירות הראש
מואטת באופן בלתי הפיך, האישון נע ביחד עם הראש ללא אובייקט מטרה, ההתמצאות
המרחבית נפגמת בשל חוסר יכולת לייצב את התמונות על רשתית העין. תופעות פיזיולוגיות
מתערבות בתקינותם של רפלקסים וסטיבולרים (כגון ורטיגו/סחרחורת) ופוגעות ביכולת לייצב
את הגוף בסיבוב ולפיכך לשמר את התנע שלו, דבר אשר בסופו של דבר מחבל בביצוע. באנליזה
נראה כי בשלב הפיתול הראשוני, תאוצת הראש הזוויתית התרחשה בו זמנית עם תאוצת ה-

retiré הזוויתית, ולאחר שהידיים והגו כבר החלו את תאוצתם ראשונים לפירואט. סביר להניח כי
במרווח הזמן הקצר שעומד להפעלתם של איברי הגוף לסיבוב (ידיים, גו, רגליים, ראש), יהיה זה
גם חסכוני להפעילם בו-זמנית ועל פי עיקרון מכאני משותף- תאוצתם הזוויתית. זאת לעומת
הפעלה אשר תשלב בין 3 הוראות פעולה נפרדות: האחת לעיכוב רוטציית הראש, השנייה לסיבוב
הראש, והשלישית להאצת הרגל האחורית אל מנח הפירואט. לפיכך מרגע שהוסר העיכוב על
רוטציית הראש (ככל הנראה מרמז מקדים), תנועתו מתואמת עם תנועת ה- *retiré*. קשר התאוצה
הזוויתית בין הפעלת הראש בסיבוב והרגל האחורית תומך גם הוא באוטומטיזציה המהירה של
הביצוע. לפיכך הטכניקה להגברת התנע לפירואט מחייבת גם את הקדמת רוטציית הראש ביחס
לקצב הסיבוב הראשוני של הגוף, כלומר מרווח הזמן להפעלת הראש יקטן באופן יחסי ככל שקצב
סיבוב הגוף יגדל. כפי שהוזכר בפרק 6, הסתמכות על רמז פרופריוצפטי מקדים יכולה לייעל את
סנכרון הראש עם סיבוב הגוף בביצוע פירואט משוכלל ולהדגיש דווקא את חזרת הראש בסיבוב
במקום את עיכובו. לדוגמא, בביצוע פירואט בודד תזמון רוטציית הראש יכול להתרחש עם פעולת
ה- *retiré*. מספר רב של מחזורי סיבוב גבוה דורשים קצב סיבוב מהיר יותר ולכן יצריכו את

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

הקדמת רוטציית הראש ברצף ההכנה. רמז מקדים לכך יכולה לשמש תחושת תנועת הידיים בכוון הסיבוב או תחושת העמקת ה- *plié* שני מהלכים החופפים זה לזה בשלב ההכנה.

5. סגירתם המיידית של הידיים לפוזיציה ראשונה -

בדומה לסימקין, יש לשאוף בביצוע פירואט ליצור תנע סיבובי מספיק בכדי שהידיים יישארו לצדי הגוף במחזורי הסיבוב הראשונים, על מנת שניתן יהיה להקטין את מומנט ההתמד של הגוף/ידיים בשלב מאוחר יותר בביצוע ולהפיק מחזורי סיבוב נוספים. זאת בניגוד ליצירת תנע שבו קצב הסיבוב מושפע מסגירתן המיידית של הידיים לפוזיציה ראשונה עם העלייה ל- *relevé*. בהיעדר תנופה סיבובית מתאימה, וללא הגברתם של מנגנוני תנע כגון: הפרדת רגליים, השהיית מומנט הפיתול, והגדלת טווח השימוש בידיים שיוצרת תנועת *wind up*, שמירת הידיים לצדי הגוף קרי, הרחק מציר הסיבוב עלולה דווקא להאט את סיבוב הגוף. *Simkin* הדגים יעילות ביצועית המפרידה בין המנגנונים ליצירת תנע הסיבוב להקטנת מומנט ההתמד. טכניקה משוכללת זו אשר מניבה מספר רב של מחזורי סיבוב (ושאין לה אזכור בספרי המתודה) עומדת להשוואה מול הטכניקה הקונבנציונלית לביצוע פירואט²⁷. בטכניקה זו, התנע המופק לסיבוב אינו גדול, הפעלת מומנט הסיבוב כנגד הרצפה מסתיימת מהר, בהתאם לכך גם הידיים מתכנסות ומחזירות במהירות את התנע שיצרו אל הגוף, לכן קצב הסיבוב בהפעלה כזו גם הוא הינו מהיר, אך הביצוע מסתיים בזמן קצר (Laws, 2008, עמ' 79). האנליזה שהוצגה בעבודה זו, הראתה כיצד המבצע האיץ את ידיו בטווח אופקי מוגדל של כ-180° (כ-90° מתחילת תנועת ה- *wind up* בנוסף ל-90° נוספים המושגים בשלב הפיתול הראשוני). התנע המוגבר שידיו הפיקו לפירואט עבר אל הגוף רק בשלב מאוחר יותר בסיבוב תוך שהמבצע ממשיך להפעיל את מומנט הסיבוב. חשוב לציין כי המבצע, למרות מומנט ההתמד הגדול שיצרו ידיו, הצליח להפיק ברגע התאוצה קצב שיא של מספר מחזורי סיבוב לשנייה ביחס לשאר הביצוע, כלומר את השינוי הגדול ביותר בתנע הסיבוב. באופן זה, כינוס הידיים אל הגוף במהלך שבעת הפירואטים יכול היה להתבצע בשלב מאוחר יותר בביצוע ובאופן הדרגתי, וכך להקטין את האטת קצב הסיבוב בשל מומנט החיכוך. מבין שתי הטכניקות לביצוע פירואטים, זו שבה הידיים נשארות תחילה לצד הגוף היא ללא ספק המאתגרת ביותר, (זו גם הסיבה לאי שכיחותה), ולפי Laws נושאת את התחזית הטובה ביותר לביצועם של מספר רב של פירואטים מהכנה אחת (שם).

²⁷ V.Kostrovitskaya & A. Pisarev, School of Classical Dance, (עמ' 356).

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

פרק 9

סיכום ומסקנות

עבודה זו עסקה בתיאור המנגנונים הביומכאניים המעורבים בביצוע משוכלל של פירואט ובתיאור המיוחד שביניהם. הנחת העבודה המתודולוגית הייתה כי ביצוע מופתי מכיל את כל המרכיבים והמהלכים הנכונים אודותם ניתן ללמוד. בתחילת העבודה הבהרתי את המושגים הפיזיקאליים החיוניים להבנת תנועת סיבוב, לאחר מכן סקרתי את הספרות המחקרית אשר קיימת בתחום. העבודה יצאה מתוך הגדרת שלושת המאפיינים שקבע Laws לביצוע נכון של פירואט: תבנית הגוף (form), קצב הסיבוב (rate), ושיווי המשקל ועברה דרך הגדרת שלושת המשתנים ליעול הפירואט גם הם של Laws: הפרדת כפות הרגליים בהכנה לפירואט, תזמון הרמת כף הרגל האחורית מהרצפה ביחס למומנט הכוח ויצירת תנע הסיבוב, והשימוש שהידיים עושות בשלב התאוצה של הסיבוב. בהמשך, הוסבר ההיבט הפיזיולוגי של מיקוד המבט כמתואם עם המערכת הוויזואלית והמערכת הפרופריוספטית. היבט זה גוזר את המכאניקה הייחודית של תנועת הראש בפירואט, האחראית על ניטור הביצוע הסיבובי המתמשך קרי, ניהול התנע. בשלב האנליזה הדגמתי ותיארתי את האינטראקציה בין עבודת הגוף בביצוע הנדון על המרחב הפיזיקאלי. ניתוח הממצאים חילץ חמישה מהלכי תיאור של המנגנונים הפועלים להגברת תנע הסיבוב: תנועת המחוג של הרגל העובדת בשלב הראשוני של ההכנה המתואמת עם יצירת טווח מוגדל של תנועת הידיים/גו (wind up), העברה מאוחרת של תנע הידיים/גו ביחס לפעולת מומנט הכוח במנח הרגליים המופרד, תאוצת ה- *retiré* המאוחרת המתואמת גם עם מומנט הסיבוב, ותאוצת הראש גם היא מתוך מומנט הסיבוב ובו זמנית עם תאוצת ה- *retiré*. מנגנון פיזיקאלי אחרון הוא הקטנת מומנט ההתמד של הגוף המתואם עם מומנט החיכוך לצורך שימור התנע בביצוע. ארבעת המנגנונים הראשונים שמישים בשלב ההכנה לפירואט, והאופן שבו כל אחד מהם פועל ביחד ובנפרד מייצר את התנופה הסיבובית הנחוצה. המנגנון החמישי שמיש בשלב הסיבוב עצמו והוא אחראי על ניהול התנע ביחס למומנט החיכוך. התזמון שממנו הגוף "מזנק" לפירואט הוגדר בעבודה כשלב הפיתול הראשוני, שלב זה תואר באמצעות מנחי הגוף המייחדים אותו, ומומלץ כשלב ישים נוסף בתרגול.

זה המקום לציין כי תנועת הראש בפירואט עונה על הצורך הפיזיקאלי לתמוך בתאוצת הגוף ההתחלתית, וגם על הצורך הפיזיולוגי לאפשר את מיקוד המבט כחלק מניהול התנועה: שמירת שיווי משקל, שמירת תבנית הגוף, וניהול פיזור מסת הגוף לצורך שימור התנע. בפרק היישומים בהוראה מניתי חמש הנחיות שכיחות לביצוע פירואט אשר עלולות דווקא להתנגש עם המנגנונים להגברת התנע בסיבוב, אותם כיניתי פרדוקסים ביומכאניים: **חלוקת משקל הגוף בהכנה על הרגל הקדמית** (התומכת)- אינה משאירה משקל לרגל האחורית לחיכוך האופקי בפעולת מומנט הסיבוב. **איסור שימוש בתנועת ה- wind up** - מקטין את פוטנציאל יצירת התנע הסיבובי של הידיים/גו לפירואט. **עלייה לרלווה ואז סיבוב** - מתעלמת משלב הפיתול הראשוני כלומר, מנטרלת

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

את מומנט הכוח ואת ההפעלה הסיבובית שעושים איברי הגוף בשלבי ההכנה לפירואט ביחס לשדה הכוח האופקי. **השארית הראש ואז סיבוב** - עלולה בקצב סיבוב מהיר לחבל בסנכרון הראש עם סיבוב הגוף ולפגום בביצוע. לשם כך, יש להסתמך על רמז פרופריוצפטי מקדים אשר יקצוב את תנועת הראש לסיבוב, וידגיש דווקא את חזרתו ולא את עיכובו. רמז להפעלת הראש תשמשנה תנועת הידיים בשלב ההכנה השני או העמקת ה- *plié*. **כינוס הידיים לפוזיציה ראשונה בפירואט**

במקום ייצוב בפוזיציה שנייה – כאשר הידיים מתכנסות מהר עם העלייה ל- *relevé* בתחילת הסיבוב, התנע יושפע מהקטנת מומנט ההתמד של הגוף. לפיכך, מחזורי הסיבוב יהיו מהירים אך התנע יסתיים מהר. ייצוב הידיים בפוזיציה שנייה יאלץ את הגוף להפיק תנע סיבובי גדול יותר אשר יאפשר את הקטנת מומנט ההתמד של הידיים בשלב מאוחר יותר בביצוע, ואת הפקתם של מחזורי סיבוב נוספים. הבהרתם של מנגנוני התנע בסיבוב למתרגל תתרום לייעול ושיפור הביצוע.

תנועת הראש בפירואט - *spotting*, שלא זכתה להתייחסות במחקרים פיזיקאליים שונים (Imura, Laws, et al.), הוסברה בעבודה זו כמנגנון להגברת מהירות הראש בנוכחות מטרה ויזואלית המאפשרת את מנגנון התאוצה של הראש בסיבוב ביחס לגוף. מנגנון זה חשוב באופן פיזיולוגי לשימור התנע וניהול הביצוע עד כי לא ניתן להתעלם ממנו כמשתנה משמעותי בייעול פירואט. בהקשר זה סביר להניח, בעקבות Gdowski & McCrea (1999), כי גם בפירואט פיתול הצוואר לצורך מיקוד המבט, יעורר באמצעותם של חיישנים פרופריוצפטים קלט וסטיבולרי כפיצוי לתפיסת ניחות הראש בתחילת הפירואט, ולצורך הפעלה מהירה של חלקי הגוף המאיצים לתנועת הסיבוב באוריינטציה ברורה.

מתודולוגית, ביצעו הייחודי של Simkin שימש בעבודה זו מקרה בוחן (case study) להפעלה ותיאום יעילים של המנגנונים להגברת תנע הסיבוב, הראויים ליישום בהוראת פירואט משוכלל. הביצוע הנדיר נדגם מתוך סרטון ההופעה ולא הופק בתנאי מעבדה. בשל כך, המדידה התבססה על חלוקת הסרטון ל- 25 פריימים בשנייה בלבד, והערכת הזמן למהלכים שנחקרו עלולה לסבול מאי דיוקים קלים, אך כאלה הקטנים מ- 0.04 מאיות השנייה. יחד עם זאת, שיטת הניתוח הסינכרונית הצליחה להציג את ליבת תהליך התיאום של מנגנוני התנע הפועלים בביצוע ווירטואוזי וכמו גם את האופן שבו מוגברים. אולם, ממצאים דומים אשר יופקו בתנאי מעבדה ובאמצעים טכנולוגיים משוכללים יותר יוכלו לתמוך בעבודה זו.

מסקנתו של כותב העבודה כי לא די בשלושת המשתנים שמנה laws לייעול הפירואט (2008, עמ' 77), אלא שחובה להתייחס גם למהלכי התיאום השונים של מנגנוני התנע. לדוגמא, התרגול המעשי של כותב העבודה בתחילת המחקר להגדיל את תנע הסיבוב באמצעות הגברת המהירות של הפעלת הגוף לא הוביל למספר רב יותר של פירואטים. נהפוך הוא, ניסיון זה יצר חוסר סנכרון בין סיבוב הגוף לראש. לפיכך, חקר המקרה בעבודה זו הוביל למסקנה כי **הסנכרון המהיר בין סיבוב הראש לגוף ברגע הזינוק לסיבוב חייב להסתמך על רמז פרופריוצפטי מקדים בשלב ההכנה**. רמז כזה יכול לנבוע מתחושת התנועה המקדימה בשלב ההכנה, כגון זו של הידיים לסיבוב, או של העמקת כיפוף הרגליים. רמז זה ישמש אות לחזרתו המהירה של הראש בסיבוב, ולא יחשוב את עיכובו באופן קוגניטיבי הזר לפעולת האוטומטיזציה של הביצוע. לפיכך חשוב

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע 7 - פירואטים מהכנה אחת.

שדיון שלם על ייעול פירואט יאמץ גישה ביומכאנית אשר תאחד את משתני הביצוע הפיזיולוגיים והפיזיקאליים. חשוב לציין שעבודה זו נסמכה בין היתר גם על ממצאים שהופקו מניסויים על קופים ובתנאים בהם הנבדקים היו מיוצבים ופאסיביים לסיבוב. שלא כמו רקדנים המבצעים פירואט, נבדקים אלה לא יזמו את יצירת התנע לסיבוב, ולכן יש מן העניין שמחקרים נוספים יעמיקו את הקשר בין יצירת תנע הסיבוב למשתנים הפיזיולוגיים התומכים בניהולו ובתנאים של שווי משקל רופף.

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7 פירואטים מהכנה אחת.

ביבליוגרפיה

1. יואיט פ. ג. פיזיקה לכל, עקרונות מדע החומר ואנרגיה. מכון ברנקו וייס לטיפול החשיבה, ירושלים, 1997.
2. כהן ג'. ס. המחול כאומנות הבמה. אסיה, רמת השרון, 2010.
3. מלרמה ס., ולרי פ. על הריקוד, הצרפתים. בינג ל. הקיבוץ המאוחד, תל אביב, 2011.
4. קירש י. היקום על פי הפיזיקה המודרנית. עם עובד, תל אביב, 2006.
5. Blazeovich A. Sports Biomechanics, the Basis Optimizing: Human Performance. A & C Black Publishers Ltd, London 2007.
6. Carson N. R. Physiology of Behavior. Pearson, Massachusetts, 2007.
7. Coopre A. Biomechanics of Human Behavior. Brown & Benchmark, Iowa, 1995.
8. Fitts S. Dance Kinesiology. Schirmer, Utah, 1996.
9. Franklin S. F., Nichols E L. The Elements of Physics :Mechanics and Heat. Macmillan, New York, 1896.
10. Kandel E. R., Schwartz J. H., Jessell T. M., Siegelbaum S. A., Hudspeth A. J. Principles of Neural Science. McGraw-Hill Professional, New York 2013.
11. Kostrovitskaya V. & Pisarev A. School of Classical Dance. Moscow: Progress Publishers, 1978.
12. Laws K. Physics and the Art of Dance. New York: Oxford University Press, 2008.
13. McGinnis P. M. Biomechanics of Sport and Exercise. Human Kinetics, Illinois, 2013.
14. Cohen S. J. The International Encyclopedia of Dance. Oxford University press, online version, 2005.
15. Shea C. H., Wright D. L. An Introduction to Human Movement. Allyn & Bacon, Massachusetts, 1997.
16. Vaganova A. Basic principles of Classical Ballet. Dover, New York, 1969.
17. Bruggemann G. & Glad B. Time Analysis of the Sprint Events. Scientific

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

- Research Project at the Games of the XXXIV Olympiad Seoul 1988, IAAF, Supplement 1990.
18. Dieterich M., Bense S., Lutz S., Drzezga A., Stephan T., Bartenstein P., Brandt T. Dominance for Vestibular Cortical Function in the Non-dominant Hemisphere. *Cerebral Cortex* Sep. 2003; 13: 994–1007.
 19. Gdowski G. T. & McCrea R. A. Integration of Vestibular and Head Movement Signals in the Vestibular Nuclei During Whole-Body Rotation. *Journal of Neurophysiology*. 1999; 82: 436-449.
 20. Harrison B. J., Pujol J., Lopez-Sola M., Hernandez-Ribas R., Deus J., et al. Consistency and Functional Specialization in The Default Mode Brain Network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2008; 105 (28) 9781–9786.
 21. Imura A., Lino Y., Kojima T. Biomechanics of Continuity and Speed Change During One Revolution of The Fouettés Turn, *Human Movement Science*. 2008; 27: 903-913.
 22. Lott M. B., Laws K. The Physics of Toppling and Regaining Balance during a Pirouette, *Journal of Dance Medicine & Science*. 2012; 16 (4): 167- 174.
 23. Laws K. An Analysis of Turns in Dance, *Dance Research Journal*. 1978 – 1979; 11(1/2):12-19.
 24. Laws K. Momentum Transfer in Dance Movement. *Medical Problem of Performing Artists*. 1998; 13(4):135-144.
 25. Nigmatullina Y., Hellyer P. J., Nachev P., Sharp D. J., Seemungal B. M. The Neuroanatomical Correlates of Training-Related Perceptuo-Reflex Uncoupling in Dancers. *Cerebel Cortex*. 2013; 23 (9): 1093-1102.
 26. Tokita T., Aoki S., Aoki S., Miyata H. Telemetry Of Eye and Head Movement. *Agressologie*. 1972; Suppl B: 21-7.
 27. Visser J. Developmental Coordination Disorder: A Review Of Research On Subtypes and Comorbidities. *Human Movement Science*. 2003; 22(4,5): 479–493.
 28. Ward R. E. Biomechanical Perspectives on Classical Ballet Technique and

אנליזה לפירואט *en dehors* ב- *passé retiré* : המכניזם לביצוע - 7
פירואטים מהכנה אחת.

Implications for Teaching Practice. Unsw, Sydney, 2012.

29. Sugano A., Laws K. Physical analysis as a Foundation for Pirouette
Training. Medical Problems of Performing Artists. 2002; 17(1): 29-32.