

גורמים המשפיעים על כוח הכיווץ של שריר מיישר הברך המופק ע"י גירויים חשמליים לאחר ניתוח להחלפת מפרק הברך

יוכבד לויפרי, PT, D.Sc,
לין שניידר-מקלר, PT, ScD, FAPTA

1. החוג לפיזיותרפיה, הפקולטה למדעי הרווחה והבריאות, אוניברסיטת חיפה
2. החוג לפיזיותרפיה, אוניברסיטת דלוור, ארה"ב

תקציר

רקע ומטרות: גירוי חשמלי (ג"ח) של שרירי השלד נמצא כאמצעי יעיל לחיזוק שרירים בקרב נבדקים בריאים ובקרב אנשים עם פתולוגיות שונות. חיזוק השריר באמצעות גירויים חשמליים תלוי בעוצמת הכיווץ המופק על ידי הגירויים. מטרת המחקר הייתה לבדוק האם ג"ח של השריר הארבע ראשי אצל נבדקים קשישים לאחר החלפת מפרק הברך יכול להפיק כיווץ שריר בעוצמה שנועה בין 25-50% מהכיווץ הרצוני המרבי, הידוע כטווח הדרוש לשם חיזוק שריר. כמו כן, מטרת המחקר הייתה לבחון את השפעת משתנים דמוגרפיים שונים על כוח הכיווץ אשר מופק על ידי ג"ח.

שיטה: נאספו נתונים לגבי כוח הכיווץ הרצוני וכוח הכיווץ המופק על ידי ג"ח אצל 56 אנשים (גיל ממוצע 66.0 וסטטיית תקן 12.2 שנה) לאחר ניתוח להחלפת פרק. בוצע ניתוח רגרסייה לבדיקת הקשר בין כוח הכיווץ המופק על ידי ג"ח (מבוטא כאחוז מהכוח הרצוני המרבי (%MVIC)) ובין גיל, מין, מדד מסת השריר, הכוח הרצוני של השריר המגורה, ויכולת הגיוס הרצוני המרבי.

תוצאות: נמצא קשר מובהק בין כוח הכיווץ המופק ע"י ג"ח המאופיין כ-MVIC% והמשתנים המנבאים BMI וכוח השריר הארבע ראשי ($p=0.03$ ו- $p=0.02$ בהתאמה). לעומת זאת לא נמצא קשר מובהק בין גיל, מין או יכולת הגיוס הרצוני המרבי וכוח הכיווץ המופק על ידי ג"ח.

מסקנות: מרבית הנבדקים הקשישים עם חולשה של השריר הארבע ראשי לאחר ניתוח להחלפת מפרק ברך יכולים לשאת ג"ח מוטורי בעוצמות מספקות בכדי להפיק כיווץ בשריר הארבע ראשי בטווח הדרוש לשם חיזוק השריר (25%-50% של MVIC). מחקר זה מעיד כי מין, גיל ויכולת גיוס מרכזי רצוני מרבי של שריר הארבע ראשי לא משפיעים על כוח הכיווץ המופק על ידי ג"ח בשריר הארבע ראשי. לעומת זאת, ככל שמדד מסת הגוף נמוך יותר או ככל שכוח הכיווץ הרצוני חלש יותר ניתן יהיה להפיק באמצעות ג"ח כיווץ חשמלי חזק יותר.

מבוא

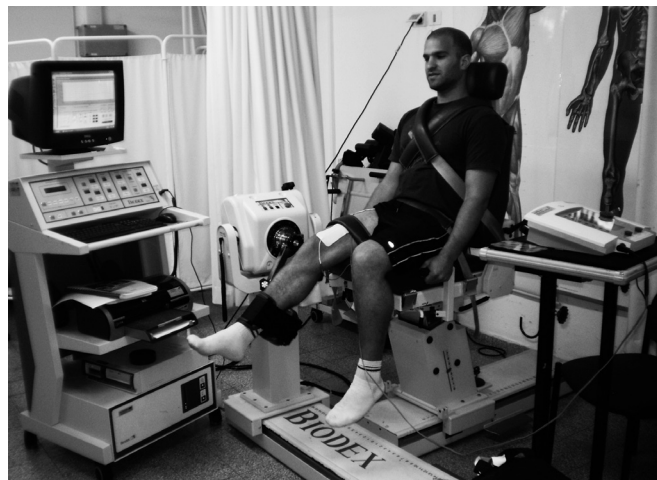
גירוי חשמלי (להלן ג"ח) של שרירי השלד (Neuromuscular Electrical Stimulation) נמצא כאמצעי יעיל לחיזוק שרירים בקרב נבדקים בריאים,¹⁻³ ובקרב אנשים עם פתולוגיות שונות הגורמות לירידה בכוח שריר כגון ארתריטיס של הברך, שבר צוואר ירך ומחלות לב-ריאה.⁴⁻⁶ בדומה לעיקרון ההעמסה הקיים בכיווץ רצוני של השריר נמצא ששיקום כוח השריר הוא ביחס ישיר לעוצמת הכיווץ המופקים ע"י ג"ח בתהליך השיקום.⁷ אולם כוח הכיווץ של השריר המופק ע"י ג"ח מוגבל עקב תחושת אי נוחות וכאב

המלווים כיווץ זה. תחושות אילו נובעות בעיקר מגירוי רצפטורים של תחושה וכאב בעור כמו גם מתחושה לא נעימה של "משיכה/כיווץ" חזקים המלווים כיווץ בלתי נשלט של השריר המגורה.⁷⁻⁹

רוב המחקרים העוסקים בג"ח מוטורי דנים בקביעת הפרמטרים האופטימליים של הג"ח הדרושים על מנת להפיק את כוח הכיווץ המירבי של השריר הארבע ראשי.¹⁰⁻¹² בסקירה שנערכה לאחרונה ע"י צמד החוקרים¹³ Vanderthommen and Duchateau נמצאה שונות רבה בין המחקרים בכוח הכיווץ המרבי המופק ע"י ג"ח אשר נמדד כאחוז מכוח הכיווץ הרצוני האיזומטרי המרבי (percentage maximal voluntary isometric contraction) (להלן (%MVIC)). דווח כי כוח הכיווץ החשמלי המופק נע בין 25-90% MVIC. בסקירה נוספת הסיקו החוקרים⁸ Alon and Smith שעל מנת שג"ח יגרום לשיקום כוח השריר הכיווץ החשמלי חייב להיות בעוצמה הנעה בין 20-50% MVIC, טווח אשר כונה על ידם "החלון הטיפולי". יש לציין כי רוב המחקרים אשר בוצעו לקביעת כוח הכיווץ החשמלי על פי פרוטוקולים שונים נעשו בנבדקים צעירים ובריאים.¹⁰⁻¹² המחקרים המועטים שהוכחו יעילות ג"ח בחולשת השריר הארבע ראשי נערכו בעיקר בפגיעות מבודדות של הרצועה הצולבת הקדמית בספורטאים צעירים. על פי מחקרים אלו, יש להשתמש בכוח כיווץ חשמלי של לפחות 50% MVIC.^{14,7} לאחרונה נעשה שימוש בג"ח לחיזוק שריר הארבע ראשי בקרב מבוגרים עם מגוון פתולוגיות כגון: אוסטאוארתריטיס של מפרק הברך,¹⁵ (knee osteoarthritis) דלקת שיגרונית של מפרק הברך,¹⁶ (rheumatoid arthritis) לאחר ניתוחי החלפת מפרקי ירך וברך¹⁷ ובקרב קשישים עם מחלות לב - ריאה עם ירידה תפקודית.⁶ בעוד שבמחקרים אלו דווח שכוח הכיווץ החשמלי שהופק היה בין 25-40% MVIC^{18,6,4} למעשה במחקרים אלו לא בדקו באופן שיטתי את כוח הכיווץ של השריר המופק בתגובה לגירוי החשמלי.

הנחת היסוד היא שבזמן כיווץ רצוני מרבי של השריר קיימת הפעלה מלאה של כל היחידות המוטוריות של השריר. אך בפועל, במצבים מסוימים, יתכן ויהיה כישלון ביכולת הגיוס הרצוני המרבי של כל היחידות המוטוריות הקיימות או הפחתה בקצב הירייה המקסימאלי של היחידות המגויסות.¹⁹ כישלון זה המכונה Central activation failure אשר יכול לנבוע מכאב, פחד מתנועה או כשל מרכזי בגיוס היחידות המוטוריות. כשל זה גורם למעשה לחוסר יכולת למצות את כל פוטנציאל הכוח הקיים למרות ניסיון מרבי לכוון את השריר באופן רצוני.²⁰ קיימות מספר שיטות למדידת יכולת הגיוס הרצוני המרבי, כאשר ככולן נעשה שימוש בגירוי חשמלי במתח גבוה (עד 400 וולט). שיטות המדידה נבדלות במאפייני הג"ח (כגון תדירות הפולסים, משך הפולס ועוצמת

איור מספר 1: מנח בזמן הגירוי המוטורי ובדיקת הכוח באמצעות המכשיר האיזומטרי



הערכה

ההערכה לפני ההתערבות כללה מדידה של כוח הכיווץ הרצוני האיזומטרי המרבי של שריר הארבע ראשי (MVIC) ומדידת רמת הכישלון המרכזי ביכולת הגיוס הרצוני המרבי של שריר הארבע ראשי בשיטת "burst superimposition". המבחנים בוצעו תחילה ברגל הלא מעורבת ואחרי כן ברגל המעורבת על פי פרוטוקול מקובל.²⁵ המדידה בוצעה באמצעות מערכת דינמומטר איזו-קינטית (KinCom, Chattanooga Corp., Chattanooga, TN, USA). לצורך הבדיקה המשתתפים קובעו לכיסא הבדיקה ע"י רצועות בברך, באגן ובפלג גוף עליון כאשר הרגל נשמרה ב-75° של כיפוף (ראה איור מס' 1). האפיקונדיל (epicondyle) הלטרלי של עצם הירך הונח מול ציר התנועה של הדינמומטר כך שאורך זרוע הדינמומטר נשאר במרחק קבוע לאורך כל הבדיקות. לאחר מכן, בוצע ניקוי של העור שבעקבותיו הודבקו שתי אלקטרודות בגודל של 7.6 ס"מ על 12.7 ס"מ (ConMed Corp., Utica, NY, USA) מעל השריר הארבע ראשי: אחת מעל החלק הפרוקסימלי של ה-rectus femoris ושנייה מעל החלק הדיסטלי של ה-vastus medialis. קודם לבדיקה נערך שלב של חימום השריר הארבע ראשי והיכרות עם מכשיר המדידה. המשתתפים ביצעו כיווץ רצוני איזומטרי של השריר ב-50%, 75% ו-100% מיכולת הכיווץ המרבי שלהם. לאחר מכן, בשלב הבדיקה התבקשו המשתתפים לבצע כיווץ מרבי איזומטרי של שריר הארבע ראשי למשך 4-5 שניות תוך כדי מתן עידוד מילולי יחד עם פידבק ויזואלי של תצוגה של כוח הכיווץ על צג המחשב, כאשר על צג המחשב סומן קו קבוע שסימן כוח כיווץ הגבוה במעט מכוח הכיווץ הרצוני שהופק בשלב החימום. שלוש שניות, לאחר תחילת הכיווץ החלה מדידת יכולת גיוס רצוני בשיטת "burst superimposition" ע"י מתן סדרת פעימות (burst train) הכוללת 10 פעימות בתדירות של 100 HZ, משך פעימה ברוחב 600 מיקרו שניות ובמתח של 35 וולט (Grass 8800, Grass instruments, Warwick, RI, USA). במידה והמשתתף לא היה מסוגל לשמור על כוח הכיווץ הרצוני המרבי בזמן מדידת יכולת הגיוס הרצוני, המדידה נערכה שוב עד מקסימום של שלוש ניסיונות בכל רגל. בין כל מדידה ניתן זמן מנוחה של שתי דקות.

הזרם) ובכוח הכיווץ הרצוני של השריר בזמן מתן הגירוי (נע בין הרפיה מלאה של השריר עד כיווץ מקסימאלי).¹⁹⁻²¹

לאחרונה נמצא שכשלוש מרכזי ביכולת הגיוס המרבי של השריר הארבע ראשי השריר בפתולוגיות שונות של מפרק הברך.²² בקרב מטופלים שעברו החלפת מפרק הברך נמצא שהשונות בכוח השריר הארבע ראשי מוסברת חלקית ע"י קיומו של כאב בברך. במקביל נמצא אצל חולים אלו כשל ביכולת גיוס מרבי של השריר הנמצא במתאם גבוה עם כוח השריר.²⁰ לג"ח של שרירים עם כשל ביכולת הגיוס הרצוני המרבי יש פוטנציאל להיות מועיל היות וגירוי זה גורם להפעלה של סיבים שלולא כן לא היו מופעלים באופן רצוני.²³

מטרות מחקר זה היו לקבוע האם ג"ח של השריר הארבע ראשי לאחר החלפת מפרק הברך אצל חולים קשישים מפיך כיווץ חשמלי ב"חלון הטיפולי" הדרוש לחיזוק שרירי הנע בין 25-50% MVIC. כמו כן מטרת המחקר לבחון האם הגורמים הבאים: גיל, מדד מסת הגוף, אטרופיה שרירית ויכולת גיוס רצוני מרבי של השריר משפיעים על כוח הכיווץ אשר המופק על ידי ג"ח של השריר הארבע ראשי באוכלוסייה זו.

שיטת המחקר

נבדקים

בוצעה פנייה ראשונית לכל האנשים שעברו החלפת מפרק ברך חד - צדדי בשלשת מדורי הברך עם צמנט בחתך ניתוח medial para-patellar - ע"י שלושה מנתחים אורתופדים מנוסים במשך תקופה של 4.5 שנים. פנייה זו הייתה דרך דיוור ובעקבותיה בוצע ראיון טלפוני עם האנשים אשר גילו עניין בהשתתפות במחקר על מנת לקבוע את התאמתם למחקר. הקריטריונים לאי הכללה במחקר היו: 1) גיל מתחת לגיל 50 ומעל גיל 85, 2) יתר לחץ דם לא מאוזן, 3) סכרת, 4) מדד מסת הגוף (Body Mass Index (BMI) מעל 40, 5) אוסטאו-ארטרטיס סימפטומטי בברך הנגדית המוגדר ע"י דיווח עצמי של עצמת כאב בברך הגבוהה מ-10/4 בסולם (Visual Analogue Scale (VAS), בעיות אורתופדיות אחרות בגפה התחתונה אשר גורמות להגבלה תפקודית, 7) מרחק מגורים מקליניקת הטיפול העולה על 30 ק"מ. לפני ההצטרפות למחקר עברו כל הנבדקים שיקום במהלך האשפוז ובהמשך בבית. המחקר אושר ע"י הוועדה האתית למחקר בבני אדם של אוניברסיטת Delaware, ניוארק ארה"ב, וכל המשתתפים חתמו על טופס הסמכה מדעת טרם השתתפותם במחקר.

מאתיים המשתתפים אשר התקבלו למחקר טופלו במכון פיזיותרפיה באוניברסיטת Delaware (ניוארק, ארה"ב), 2-3 פעמים בשבוע למשך 6 שבועות. המשתתפים חולקו בצורה אקראית לשתי קבוצות כאשר שתי הקבוצות קיבלו טיפול זהה של תוכנית שיקום אינטנסיבית שכללה תרגילי חיזוק, טווח ותרגול פונקציונאלי (לפרטים נוספים אודות פרוטוקול התרגילים ותוצאות הטיפול, ראה פיטרסון ושות, 2009).²⁴ אחת משתי קבוצות המחקר קבלה בנוסף לתוכנית שיקום זו סדרת גירויים חשמליים לשריר הארבע ראשי. המחקר התיאורי הנוכחי מתייחס לכוח הכיווץ החשמלי של המשתתפים בקבוצה זו כפי שנמדד במהלך הטיפול הראשון.

להגדיל את זמן העלייה ל-3 שניות בכדי להגביר את נוחות הנבדק, אבל ללא שינוי ביחס בין זמן ההפעלה וזמן אי ההפעלה (on/off ratio). עצמת הזרם (מיליאמפר) הועלתה ע"י המטפל עד לרמה המרבית שהנבדק יכול לשאת. במהלך הג"ח ניתנה לנבדק הנחייה להימנע מכווץ רצוני של שריר הארבע ראשי ולאפשר העלאת העוצמה כך שכוח הכיווץ החשמלי יהיה לפחות 30% MVIC. להגברת המוטיבציה יכול היה הנבדק לראות את רמת הכוח המתפתח על צג המחשב בזמן אמת. המדדים שחושבו היו: (1) כוח הכיווץ המופק ע"י מתן ג"ח של שריר הארבע ראשי (להלן כוח כיווץ חשמלי) חושב על סמך הממוצע של 10 הכיווצים שהופקו ע"י ג"ח. (2) כוח הכיווץ החשמלי היחסי המחושב כאחוז מהכיווץ המירבי הרצוני (MVIC%) (לדוגמא אם הכוח הרצוני המירבי שהופק היה 40 ניוטון, והכוח שהופק על ידי הגירוי החשמלי היה 10 ניוטון, אזי ה- %MVIC היה 25% מחושב על פי הנוסחה $100 * (10/40)$).

ניתוח סטטיסטי

ממוצע וסטיות תקן חושבו עבור המדדים הבאים: גיל, מספר הימים שעברו מהניתוח החלפת מפרק הברך, מדד מסת הגוף (BMI), כוח רצוני המירבי של השריר הארבע ראשי (MVIC), כוח כיווץ חשמלי מירבי, כוח כיווץ חשמלי מרבי כאחוז מכוח כיווץ רצוני מירבי (MVIC%), מדד השריר הארבע ראשי (QI), ויכולת גיוס מרכזי רצוני של השריר הארבע ראשי (CAR). ההשפעה של מין, גיל, BMI ו-QI על CAR% נבדקה באמצעות ניתוח רגרסיה ליניארית. מובהקות נקבעה ב- $p=0.05$. העיבוד הסטטיסטי נעשה באמצעות תוכנת SAS (SAS Institute, Cary, NC).

תוצאות

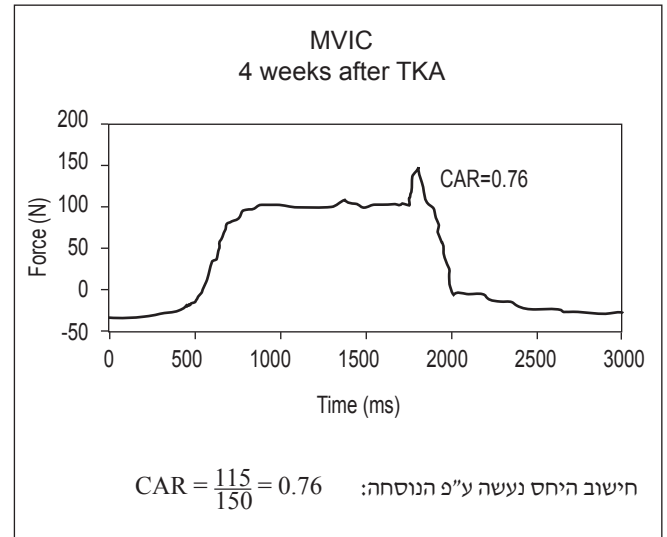
מתוך 100 הנבדקים אשר החלו את המחקר, 84 סיימו אותו. אולם, ניתוח הנתונים התבצע רק כאשר הג"ח ניתנו בזרם רוסקי קלאסי (גל נושא בתדר 2500 הרץ) וכאשר הנתונים לגבי כל הכיווצים היו זמינים. לכן ניתן היה להשתמש בנתוני הפקת הכוח רק של 56 נבדקים. סיכום המאפיינים של הנבדקים מוצגים בטבלה 1.

טבלה מס' 1: מאפייני קבוצת המחקר (33 נשים ו 23 גברים)

משתנה	ממוצע (סטיות תקן)
גיל במועד הניתוח (שנים)	66.0 (12.2)
זמן בין הניתוח והטיפול ראשון (ימים)	27.5 (3.7)
כוח כיווץ מקסימאלי (ניוטון)	265.6 (104.2)
כוח כיווץ מקסימאלי באמצעות גירוי (ניוטון)	97.8 (46.9)
כוח כיווץ באמצעות גירויים חשמליים כאחוז מגיוס רצוני מקסימאלי (%)	39.0 (16.0)
מדד מסת הגוף (BMI)	28.8 (6.0)
מדד כוח השריר הארבע ראשי	0.48 (0.21)
יחס גיוס מרכזי (CAR)	0.79 (0.19)

מודל הרגרסיה מצביע על קשר מובהק כולל בין המשתנים הבלתי תלויים וממוצע הכיווץ החשמלי המירבי היחסי ($p=0.03$). תוצאות ניתוח הרגרסיה מוצגות בטבלה 2. נמצא קשר שלילי מובהק בין MVIC% והמשתנים המנבאים BMI ומדד השריר ארבע ראשי ($p=0.02$ ו- $p=0.03$ בהתאמה). דהיינו, ככל שמדד מסת הגוף גבוהה או כוח השריר בכיווץ רצוני היה גבוה יותר הכוח החשמלי היחסי המופק היה נמוך יותר. בדיקה של טעות בטא מראה כי ההשפעה של BMI ו-QI על המודל היא כמעט שוות ערך. לעומת זאת לא נמצא קשר מובהק בין הגיל, המין או ה- CAR וה- %MVIC.

איור מספר 2: תוצאות יחס הגיוס המרכזי (Central Activation Ratio-CAR) של נבדק אחד ארבעה שבועות לאחר הניתוח להחלפת מפרק הברך.



על סמך המדידה חושבו המשתנים הבאים:

1. כוח הכיווץ הרצוני האיזומטרי המרבי (MVIC): ערך זה התקבל על סמך מדידת כוח הכיווץ לפני מתן הג"ח,

2. יכולת הגיוס הרצוני של שריר הארבע ראשי חושבה ע"פ נוסחת ה-CAR (Central Activation Ratio) (איור מס' 2). חישוב היחס נעשה ע"פ הנוסחה:

$$CAR = \frac{\text{כוח הכיווץ המירבי המקסימאלי (MVIC)}}{\text{MVIC} + \text{הכוח שהופק באמצעות הגירוי}}$$

3. מדד השריר הארבע ראשי (QI) **Quadriceps Index** המבטא את חולשת השריר ביחס לשריר הארבע ראשי בצד שלא נותח. ככל שערך מדד זה נמוך יותר משמעות הדבר חולשת שריר גדולה יותר. חישוב ה- QI נעשה ע"פ הנוסחה הבאה:

$$QI = \frac{\text{MVIC של הרגל המעורבת}}{\text{MVIC של הרגל הלא המעורבת}}$$

ההתערבות:

הטיפול של ג"ח לשריר הארבע ראשי ניתן במנח ישיבה זהה לזה של הבדיקה כשהברך המעורבת מקובעת ב- 60° כיפוף. גם מנח האלקטרודות על שריר הארבע ראשי היה זהה לזה שבזמן הבדיקה. הג"ח המוטורי כלל 10 כיווצים חשמליים של השריר באמצעות מכשיר קליני (Electro Med Health Industries, Miami Beach, FL, USA, 380 Verastim).

הפרמטרים של הג"ח היו: זרם חילופין סינכואידלי בתדר גל נושא של 2500 Hz (משך פעימה 400 מיקרו שניות), תדר bursts של 50 Hz (זרם רוסקי קלאסי). אולם, בניסיון להקטין את חוסר הנוחות של הנבדק ולהגביר את כוח הכיווץ החשמלי, המטפל היה רשאי לשנות את תדר הגל הנושא ל- 1500 Hz או ל- 2000 Hz ואת תדר ה- burst ל- 75 Hz. משך זמן הגירוי נקבע ל- 2 שניות זמן עלייה, 10 שניות זמן עבודה ו- 80 שניות זמן מנוחה. המטפל היה רשאי

טבלה מס' 2: תוצאות ניתוח רגרסיה

משתנה	ערך P	אומדן הפרמטר	ערך הבטה הסטנדרטי
Intercept		0.95	
מין	NS	-0.03	
גין	NS	-0.0002	
מדד מסת הגוף (BMI)	0.03	-0.01	-0.30
מדד כוח השריר הארבע ראשי	0.02	-0.27	-0.34
יחס גיוס מרכזי (CAR)	NS	-0.14	

דיון

מחקר זה בדק את עוצמת כוח הכיווץ של השריר הארבע ראשי המופק ע"י גירוי חשמלי בקבוצה של גברים ונשים אשר סבלו מחולשה מתונה עד חמורה של השריר הארבע ראשי לאחר ניתוח להחלפת ברך. נמצא כי כוח הכיווץ החשמלי היחסי הממוצע ברגל המנותחת היה 39.0% MVIC (סטטיית תקן 16.0%). למרות שערך זה נמוך מזה שהתקבל במבוגרים וצעירים לאחר שחזור רצועה צולבת קדמית.²⁶ עדיין ערך כוח הכיווץ החשמלי המופק נמצא בתוך "החלון הטיפולי" של 20-50% MVIC, הדרוש לשם השגת חיזוק שרירים כפי שהוכח במחקרים קודמים.⁸

מחקר זה אשר נערך במרפאת פיזיותרפיה אמבולטורית פעילה מאד תוך שימוש בציוד סטנדרטי לגירוי, מצביע על הישימות של ג"ח כחלק משיקום המבוגר לאחר ניתוח החלפת ברך. במחקר המשך שכלל מעקב אחר קבוצת נבדקים דומה נמצא כי תוך כדי התקדמות הטיפול במהלך 5-6 שבועות של שיקום אינטנסיבי שכלל גם ג"ח כוח הכיווץ הרצוני האיזומטרי המירבי של השריר הארבע ראשי גדל באופן משמעותי סטטיסטית.²⁴ בנוסף, נמצאה עליה בכוח הכיווץ החשמלי ובמידה נמוכה יותר גם בכוח הכיווץ החשמלי המבוטא כ-27% MVIC. ניתוח הרגרסיה בעבודה זו מצביע על כך שגיל ומין הנבדק כמו גם יכולת גיוס רצוני של השריר הארבע ראשי לא השפיעו על כוח הכיווץ חשמלי החשמלי היחסי. הערך מתאם בין גיל לכוח הכיווץ החשמלי היחסי לא מוציא מכלל אפשרות שמבוגרים וצעירים יגיבו באופן שונה מאשר מבוגרים קשישים שכן טווח הגילאים של הנבדקים במחקר הנוכחי נע בין 51-82 שנים ולא כלל צעירים כלל. יחד עם זאת, התוצאות מצביעות על כך שגורם הגיל לכשעצמו לא צריך להוות שיקול בהחלטה האם לכלול ג"ח מוטורי כחלק משיקום של הנבדק.

מקובל שכוח הכיווץ האיזומטרי המרבי הרצוני וכן כוח הכיווץ חשמלי האבסולוטי גבוהים באופן משמעותי בגברים מאשר בנשים²⁸⁻³⁰ הממצא הנוכחי של הערך מתאם בין מין לכוח הכיווץ החשמלי היחסי נתמכים גם ע"י מחקר קודם, אשר לא הראה כל הבדל בכוח הכיווץ החשמלי היחסי בין המינים.²⁷ לכן על הקלינאים להיות מודעים שבעוד שכוח הכיווץ החשמלי האבסולוטי עלול להיות נמוך יותר אצל נשים, היות ובד"כ גם כוח הכיווץ הרצוני של השריר הארבע ראשי נמוך יותר בנשים. אך אין הבדל בין המינים בכוח היחסי המופק ע"י גירויים חשמליים. לכן ניתן לצפות שאפקט הטיפול בג"ח יהיה דומה בשני המינים.

בעבר נמצא כי יכולת הגיוס המרכזי הרצוני של השריר הארבע ראשי יורדת עם הגיל ובמצבים של חולשת שריר או כאב מפרקי,^{20,31} למעשה, ממצאי מחקר נוכחי זה תומכים בממצאים אלו, שכן מדד יכולת הגיוס המרכזי הרצוני (CAR) של הנבדקים היה 0.79 (סטטיית תקן 0.19) שהוא נמוך באופן משמעותי מהערך המצופה אצל נבדקים צעירים בריאים הנע בין 0.96 ל-1.0.³¹ יחד עם זאת במחקר זה נמצא במפתיע שיכולת הגיוס המרכזי הרצוני של השריר הארבע ראשי לא נמצא במתאם לכוח הכיווץ החשמלי. על פי תוצאות אלו נראה כי ג"ח לא יעיל בגיוס סלקטיבי של אותם סיבים שלא מופעלים באופן רצוני ע"י הנבדק.

בניגוד לממצאים של חוסר מתאם בין מין, גיל, יכולת גיוס רצוני של שריר הא"ר לבין כוח הכיווץ החשמלי היחסי נמצא מתאם שלילי מובהק בין מדד מסת הגוף (BMI) לבין כוח הכיווץ החשמלי היחסי. כמו כן נמצא מתאם שלילי בין כוח השריר ברגל המנותחת ובין כוח הכיווץ החשמלי היחסי. משמעות הדבר היא שככל שהנבדק שוקל יותר וככל שכוח השריר ארבע ראשי חזק יותר בהשוואה לרגל הבריאה, כך הכיווץ החשמלי היחסי נמוך יותר. המתאם החיובי בין מדד מסת הגוף (BMI) לבין כוח כיווץ חשמלי יחסי נמצא למרות שנבדקים עם השמנת יתר (BMI>40) הוצאו מהמחקר וממוצע ה-BMI של הנבדקים היה 28.8 אשר נחשב כעודף משקל אך לא כהשמנת יתר. ההשפעה של BMI ככל הנראה קשורה לעובדה שמוליכות חשמלית מעוכבת ע"י רקמת שומן.³² למרות שבמחקר זה, לא בדקנו את עובי העור באזור הירך ועובי העור היה נתון מידע על הפרופורציה של רקמת השומן באזור הגירוי, יש מקום להניח כי קיים מתאם חיובי בין BMI לבין דרגת רקמת השומן בירך. לאור זאת, קלינאים צריכים להיות מודעים שהשפעה של ג"ח מוטורי כאמצעי טיפול לצורך חיזוק שרירים יכולה להיות קטנה יותר בחולים עם עודף משקל. המתאם השלילי שנמצא בין מדד השריר הארבע ראשי (QI) לבין כוח הכיווץ החשמלי היחסי מצביע על כך שג"ח מוטורי מפיך כוח חשמלי יחסי גבוה יותר ככל שהשריר חלש יותר. קשר זה יתכן שנובע מכך ששרירים חלשים הם בד"כ בעלי מסה קטנה יותר. לכן, ג"ח בשריר חלש יגרום לגיוס אחוז גבוה יותר של מסת השריר וכתוצאה מכך לכוח כיווץ חשמלי יחסי גבוה יותר.

יש לציין כי למחקר מספר מגבלות. המחקר נערך לאורך תקופת זמן ארוכה עם מספר רב של מטפלים שערכו את הבדיקות. למרות שנעשו מאמצים לדאוג למהימנות בין-בדקים גבוהה, ריבוי המטפלים יכל להשפיע על מידת העקביות בניהול הטיפול והבדיקה. לדוגמה, יכולים היו להיות הבדלים בין המטפלים בהכנת העור, במיקום הנחת האלקטרודות, או באופן בו עודדו את הנבדקים להרפות את השריר הארבע ראשי בזמן הג"ח. גורמים אלו יכלו להשפיע על כוח הכיווץ החשמלי של השריר ובהתאם על תוצאות המחקר. מגבלה נוספת קשורה למספר המשתתפים בנייתוח הנתונים. מכיוון שהטיפולים ניתנו במרפאת חוץ פעילה מאד, ניטור כוח הכיווץ החשמלי של השריר הארבע ראשי לא תמיד התאפשר. לכן, חסרים נתונים עבור חלק מהנבדקים. בנוסף, 16 מתוך 100 הנבדקים אשר נמצאו מתאימים לקבוצת המחקר, לא סיימו את תוכנית הטיפול, כאשר 11 מתוכם טענו כי הג"ח היה מאד לא נעים עבורם. יוצא מכך, שככל הנראה ישנם מטופלים שלא יכולים לשאת את עוצמת הג"ח הנחוצה להפקת כוח כיווץ בטווח הטיפול.

מסקנות

השונות הקיימת בקרב נבדקים בתגובה לג"ח מעיד על הצורך בביצוע של מחקרים נוספים אשר יסייעו בהנחיית המטפל בקביעת פרוטוקולי טיפול אופטימליים למטופלים עם ליקויים שונים. מחקרים אלו צריכים להתמקד בקביעת ההשפעה של פרמטרים שונים של ג"ח (כגון זמן מחזור ומספר הכיווצים החשמליים) על כוח הכיווץ החשמלי ועל עייפות השריר בעקבות ג"ח. יחד עם זאת, מחקר זה מדגים כי מרבית הנבדקים הקשישים עם חולשה של השריר הארבע ראשי לאחר ניתוח להחלפת מפרק ברך יכולים לשאת ג"ח מוטורי בעוצמות מספקות בכדי להפיק כיווץ חשמלי בשריר הארבע ראשי בטווח הדרוש לשם חיזוק השריר. מחקר זה מעיד כי מין, גיל ויכולת גיוס מרכזי רצוני מרבי של השריר הארבע ראשי לא משפיעים על כוח הכיווץ החשמלי של השריר הארבע ראשי. לעומת זאת, ככל שמדד מסת הגוף גדול (BMI) או ככל שכוח הכיווץ הרצוני עולה ניתן יהיה להפיק בשריר הארבע ראשי כוח חשמלי יחסי קטן יותר.

מקורות

1. Maffiuletti N.A., Dugnani S., Folz M., Di Pierno E., Mauro F. Effect of combined electrostimulation and plyometric training on vertical jump height. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34:1638-44.
2. Parker M.G., Bennett M.J., Hieb M.A., Hollar A.C., Roe A.A.: Strength response in human femoris muscle during 2 neuromuscular electrical stimulation programs. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2003; 33:719-26.
3. Snyder-Mackler L., Delitto A., Stralka S.W., Bailey S.L. Use of electrical stimulation to enhance recovery of quadriceps femoris muscle force production in patients following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys Ther.* 1994; 74:901-7.
4. Gaines J.M., Metter E.J., Talbot L.A. The effect of neuromuscular electrical stimulation on arthritis knee pain in older adults with osteoarthritis of the knee. *Appl Nurs Res.* 2004; 17:201-6.
5. Lamb S.E., Oldham J.A., Morse R.E., Evans J.G. Neuromuscular stimulation of the quadriceps muscle after hip fracture: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2002; 83:1087-92.
6. Quittan M., Wiesinger G.F., Sturm B. et al. Improvement of thigh muscles by neuromuscular electrical stimulation in patients with refractory heart failure: a single-blind, randomized, controlled trial. *Am J Phys Med Rehabil.* 2001; 80:206-14; quiz 215-6, 224.
7. Snyder-Mackler L., Delitto A., Bailey S.L., Stralka S.W. Strength of the quadriceps femoris muscle and functional recovery after reconstruction of the anterior cruciate ligament. A prospective, randomized clinical trial of electrical stimulation. *J Bone Joint Surg Am.* 1995; 77:1166-73.
8. Alon G., Smith G.V. Tolerance and conditioning to neuro-muscular electrical stimulation within and between sessions and gender. *J. Sports Science Medicine.* 2005; 4:395-405.
9. Delitto A., Strube M.J., Shulman A.D., Minor S.D. A study of discomfort with electrical stimulation. *Phys Ther.* 1992; 72:410-21; discussion on 421-4.
10. Gorgey A.S., Dudley G.A. The role of pulse duration and stimulation duration in maximizing the normalized torque during neuromuscular electrical stimulation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2008; 38:508-16.
11. Laufer Y., Elboim M. Effect of burst frequency and duration of kilohertz-frequency alternating currents and of low-frequency pulsed currents on strength of contraction, muscle fatigue, and perceived discomfort. *Phys Ther.* 2008; 88:1167-76.
12. Ward A.R., Robertson V.J., Loannou H. The effect of duty cycle and frequency on muscle torque production using kilohertz frequency range alternating current. *Med Eng Phys.* 2004; 26:569-79.
13. Vanderthommen M., Duchateau J. Electrical stimulation as a modality to improve performance of the neuromuscular system. *Exerc Sport Sci Rev.* 2007; 35:180-5.
14. Delitto A., Rose S.J., McKowen J.M., Lehman R.C., Thomas J.A., Shively R.A. Electrical stimulation versus voluntary exercise in strengthening thigh musculature after anterior cruciate ligament surgery. *Phys Ther.* 1988; 68:660-3.
15. Durmus D., Alayli G., Canturk F. Effects of quadriceps electrical stimulation program on clinical parameters in the patients with knee osteoarthritis. *Clin Rheumatol.* 2007; 26:674-678.
16. Piva S.R., Goodnite E.A., Azuma K. et al. Neuromuscular electrical stimulation and volitional exercise for individuals with rheumatoid arthritis: a multiple-patient case report. *Phys Ther.* 2007; 87:1064-77.
17. Petterson S., Snyder-Mackler L. The use of neuromuscular electrical stimulation to improve activation deficits in a patient with chronic quadriceps strength impairments following total knee arthroplasty. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2006; 36:678-85.
18. Talbot L.A., Gaines J.M., Ling S.M., Metter E.J. A home-based protocol of electrical muscle stimulation for quadriceps muscle strength in older adults with osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol.* 2003; 30:1571-8.

19. Kent-Braun J.A., Ng A.V., Doyle J.W., Towse T.F. Human skeletal muscle responses vary with age and gender during fatigue due to incremental isometric exercise. *J Appl Physiol.* 2002; 93:1813-23.
20. Mizner R.L., Stevens J.E., Snyder-Mackler L. Voluntary activation and decreased force production of the quadriceps femoris muscle after total knee arthroplasty. *Phys Ther.* 2003; 83:359-65.
21. Allen G.M., Gandevia S.C., McKenzie D.K. Reliability of measurements of muscle strength and voluntary activation using twitch interpolation. *Muscle Nerve.* 1995; 18:593-600.
22. Manal T.J., Snyder-Mackler L. Failure of voluntary activation of the quadriceps femoris muscle after patellar contusion. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2000; 30:655-60; discussion 661-3.
23. Jubeau M., Zory R., Gondin J., Martin A., Maffiuletti N.A. Effect of electrostimulation training-detraining on neuromuscular fatigue mechanisms. *Neurosci Lett.* 2007; 424:41-6.
24. Petterson S.C., Mizner R.L., Stevens J.E. et al. Improved function from progressive strengthening interventions after total knee arthroplasty: a randomized clinical trial with an imbedded prospective cohort. *Arthritis Rheum* 2009;61:174-83.
25. Fitzgerald G.K., Piva S.R., Irrgang J.J., Bouzubar F., Starz T.W. Quadriceps activation failure as a moderator of the relationship between quadriceps strength and physical function in individuals with knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum.* 2004; 51:40-8.
26. Snyder-Mackler L., De Luca P.F., Williams P.R., Eastlack M.E., Bartolozzi A.R., 3rd. Reflex inhibition of the quadriceps femoris muscle after injury or reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Am.* 1994; 76:555-60.
27. Laufer Y., Snyder-Mackler, L. Response of male and female subjects after total knee arthroplasty to repeated neuromuscular electrical stimulation of the quadriceps femoris muscle. *Am J Phys Med Rehabil.* 2010; 89:464-472.
28. Bergman B.C., Martin D.T., Wilkinson J.G. Knee extensor torque and perceived discomfort during symmetrical biphasic electromyostimulation. *J Strength Cond Res.* 2001; 15:1-5.
29. Kramer J.F. Effect of electrical stimulation current frequencies on isometric knee extension torque. *Phys Ther.* 1987; 67:31-8.
30. Laufer Y., Ries J.D., Leininger P.M., Alon G. Quadriceps femoris muscle torques and fatigue generated by neuromuscular electrical stimulation with three different waveforms. *Phys Ther* 2001; 81:1307-16.
31. Stevens J.E., Binder-Macleod S., Snyder-Mackler L. Characterization of the human quadriceps muscle in active elders. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001; 82:973-8.
32. Petrofsky J., Laymon M., Prowse M., Gunda S., Batt J. The transfer of current through skin and muscle during electrical stimulation with sine, square, Russian and interferential waveforms. *J Med Eng Technol.* 2009; 33:170-81.