



Ελληνική Εταιρεία Βιοχημείας και  
Φυσιολογίας της Άσκησης

Hellenic Society of Biochemistry  
and Physiology of Exercise

Επιθεώρηση Βιοχημείας και  
Φυσιολογίας της Άσκησης  
1: 1-21, 2013

Reviews in Biochemistry and  
Physiology of Exercise  
1: 1-21, 2013

[www.eevfa.gr/web/emag](http://www.eevfa.gr/web/emag)

## ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΙΕΓΕΡΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΚΕΛΕΤΙΚΟ ΜΥ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟ

Τσοούκος Αθανάσιος, Βεληγκέκας Παναγιώτης, Μπογδάνης Γρηγόρης

Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής & Αθλητισμού

### Περίληψη

Η παραγωγή δύναμης και ισχύος από ένα σκελετικό μυ εξαρτάται όχι μόνο από τα φυσιολογικά του χαρακτηριστικά αλλά και από την προηγηθείσα δραστηριότητά του. Ως μεταδιεγερτική ενεργοποίηση ορίζεται η βραχυπρόθεσμη βελτίωση της μυϊκής απόδοσης η οποία επέρχεται μετά από έντονη εθελούσια ή ηλεκτρικά προκλητή μυϊκή σύσπαση. Οι κύριοι φυσιολογικοί μηχανισμοί που προκαλούν το φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης είναι η φωσφορυλίωση των ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης και η αυξημένη επιστράτευση των κινητικών μονάδων με υψηλό κατώφλι ή επίπεδο διεγερσιμότητας. Η άσκηση που προκαλεί μεταδιεγερτική ενεργοποίηση είναι συνήθως μια δυναμική ή ισομετρική σύσπαση που ονομάζεται άσκηση ενεργοποίησης. Η άσκηση αυτή προκαλεί ταυτόχρονα και κόπωση και έτσι η μυϊκή απόδοση στην άσκηση που ακολουθεί εξαρτάται από την επικράτηση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης ή της κόπωσης κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης. Οι παράγοντες που καθορίζουν την σχέση μεταξύ κόπωσης και μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης είναι ο όγκος, η ένταση και το είδος της μυϊκής σύσπασης της άσκησης ενεργοποίησης. Όταν η άσκηση ενεργοποίησης είναι ισομετρική, η βέλτιστη συνολική διάρκειά της δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 δευτερόλεπτα. Σε δυναμικές συσπάσεις ο ωφέλιμος όγκος που φαίνεται να μεγιστοποιεί τη μεταδιεγερτική ενεργοποίηση κυμαίνεται από 3-10 επαναλήψεις με ένταση 80% της μέγιστης επανάληψης (1 ΜΕ), ενώ η αύξηση της μυϊκής απόδοσης εμφανίζεται κατά κανόνα 4-12 λεπτά μετά το τέλος της άσκησης ενεργοποίησης. Σημαντική και άμεση ενεργοποίηση (σε 1-2 λεπτά) μπορεί όμως να επιτευχθεί και με μικρότερες εντάσεις (30-60% 1 ΜΕ). Η αναμενόμενη βελτίωση της μυϊκής απόδοσης μετά από ισομετρική ή δυναμική άσκηση ενεργοποίησης είναι κατά κανόνα από 2-9%. Σημαντικό ρόλο για τη μεγιστοποίηση του φαινομένου της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης διαδραματίζουν η μυϊκή δύναμη και η σύσταση των μυϊκών ινών των δοκιμαζόμενων. Άτομα με αυξημένο ποσοστό μυϊκών ινών τύπου II ή/και μεγαλύτερη εγκάρσια επιφάνεια μυϊκών ινών τύπου II παρουσιάζουν μεγαλύτερη φωσφορυλίωση ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης καθώς επίσης και μεγαλύτερο αριθμό κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας, οι οποίες αν ενεργοποιηθούν θα βελτιώσουν περισσότερο τη μυϊκή απόδοση. Το φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης μπορεί να αξιοποιηθεί στην αθλητική πρακτική για τη βραχυπρόθεσμη βελτίωση της μυϊκής απόδοσης (αγώνας) καθώς και για τη μακροχρόνια αύξηση της μυϊκής ισχύος μέσω της προπόνησης με μεγαλύτερες εντάσεις.

### Διεύθυνση αλληλογραφίας

Μπογδάνης Γρηγόρης  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής & Αθλητισμού  
Εθνικής Αντίστασης 41, Αθήνα 17237  
e-mail: [gbogdanis@phed.uoa.gr](mailto:gbogdanis@phed.uoa.gr)

## 1. Εισαγωγή

Η παραγωγή δύναμης και ισχύος από ένα σκελετικό μυ εξαρτάται όχι μόνο από τα φυσιολογικά του χαρακτηριστικά (π.χ. τύπος μυϊκών ινών, εγκάρσια επιφάνεια), αλλά και από την προηγηθείσα δραστηριότητά του [45]. Έτσι, αν προηγηθεί ήπια άσκηση (π.χ. προθέρμανση), η μυϊκή δύναμη και ισχύς αυξάνονται, ενώ αν προηγηθεί έντονη άσκηση η μυϊκή απόδοση μπορεί είτε να μειωθούν (φαινόμενο «κόπωσης», [19]) είτε να αυξηθούν περαιτέρω σε σύγκριση με την κατάσταση ηρεμίας (φαινόμενο «μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης», [74]). Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση έχει οριστεί ως η βραχυπρόθεσμη βελτίωση της μυϊκής απόδοσης η οποία επέρχεται μετά από προηγηθείσα έντονη εθελούσια ή ηλεκτρικά προκλητή μυϊκή σύσπαση [71]. Η άσκηση που προκαλεί μεταδιεγερτική ενεργοποίηση μπορεί να είναι μέγιστη ισομετρική [37] ή δυναμική με ένα μεγάλο εύρος φορτίων [76] και με διαφορετικές μορφές εκτέλεσης (π.χ. άλματα, άσκηση με αντιστάσεις [85]). Αν και το φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης έχει παρατηρηθεί από τη δεκαετία του 1950 [47], οι περισσότερες μελέτες σε ανθρώπους έχουν γίνει τα τελευταία 25 χρόνια [37, 74, 83, 92].

Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αθλητική πρακτική τόσο κατά την διάρκεια της προετοιμασίας των αθλητών (μακρόχρονη ή έμμεση επίδραση) για τη μεγιστοποίηση της βελτίωσης της μυϊκής ισχύος κατά την προπόνηση, όσο και για τη συμμετοχή των αθλητών σε αγώνα (βραχυπρόθεσμη ή άμεση επίδραση, [17]). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κριτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αφορά τη φυσιολογική βάση του φαινομένου της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης, με αναφορά σε κάποιες πρακτικές εφαρμογές της στο χώρο της άσκησης και του αθλητισμού.

## 2. Τρόποι επίτευξης μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης

Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση έχει καταγραφεί σε πολλές μελέτες σε ανθρώπους και θηλαστικά ζώα [34, 55] και μπορεί να επιτευχθεί:

- με μια σειρά ηλεκτρικά προκλητών επαναλαμβανόμενων μυϊκών συσπάσεων χαμηλής συχνότητας οι οποίες προκαλούν μια προοδευτική θετική επίδραση γνωστή ως φαινόμενο κλίμακας ή staircase effect [58],
- με μια ηλεκτρικά προκλητή τετανική σύσπαση, σε αυτή την περίπτωση η βελτίωση της απόδοσης ονομάζεται μετατετανική ενεργοποίηση [67],
- με μέγιστη εκούσια ισομετρική σύσπαση [38],
- με μια σειρά εκούσιων δυναμικών συσπάσεων με μέγιστο ή υπομέγιστο φορτίο [31, 76].

Η μέτρηση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης πραγματοποιείται είτε ακούσια [40] με μια ηλεκτρικά προκλητή σύσπαση (twitch), είτε εκούσια με μυϊκές συσπάσεις κατά τη διάρκεια ασκήσεων ή αθλητικών δραστηριοτήτων [15]. Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση γίνεται αισθητή 4-20 λεπτά μετά την ενεργοποίηση [37, 49]. Ωστόσο υπάρχουν μελέτες που βρήκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μετά από μικρότερο [81] ή μεγαλύτερο χρόνο αποκατάστασης [73].

## 3. Πιθανοί μηχανισμοί πρόκλησης μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης

Έρευνες της τελευταίας δεκαετίας, δείχνουν ότι οι κύριοι φυσιολογικοί μηχανισμοί που συνδέονται με πρόκληση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης είναι τρεις:

- I. η φωσφορυλίωση των ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης [77],
- II. οι αλλαγές που προκύπτουν στην γωνία πρόσφυσης [83], η οποία σχηματίζεται από την απονεύρωση του μυός και την μυϊκή ίνα [63] και δείχνει τον προσανατολισμό των μυϊκών ινών σε σχέση με τον τένοντα [24], και

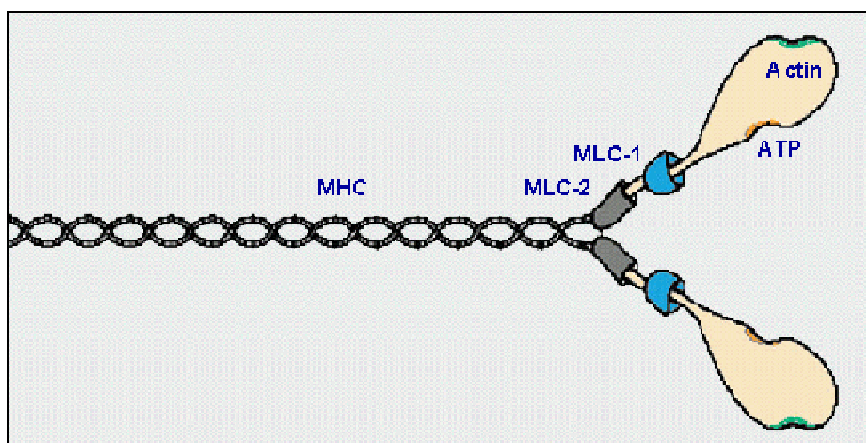
III. η αύξηση της επιστράτευσης των κινητικών μονάδων με υψηλό κατώφλι ενεργοποίησης ή επίπεδο διεγερσιμότητας [37].

Ο πρώτος και ο δεύτερος μηχανισμός, δηλ. η φωσφορυλίωση των ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης και οι αλλαγές στην αρχιτεκτονική του μυός, είναι μυογενείς, δηλ. προκαλούνται στο επίπεδο του μυός. Ο τρίτος μηχανισμός, δηλ. η αύξηση της επιστράτευσης των κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας δραστηριοποιείται στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού, και μπορεί να χαρακτηριστεί ως νευρογενής [37, 14]. Κατά τους Tubman και συν. [87], η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση πιθανότατα προκαλείται από ένα συνδυασμό μυογενών και νευρογενών μηχανισμών.

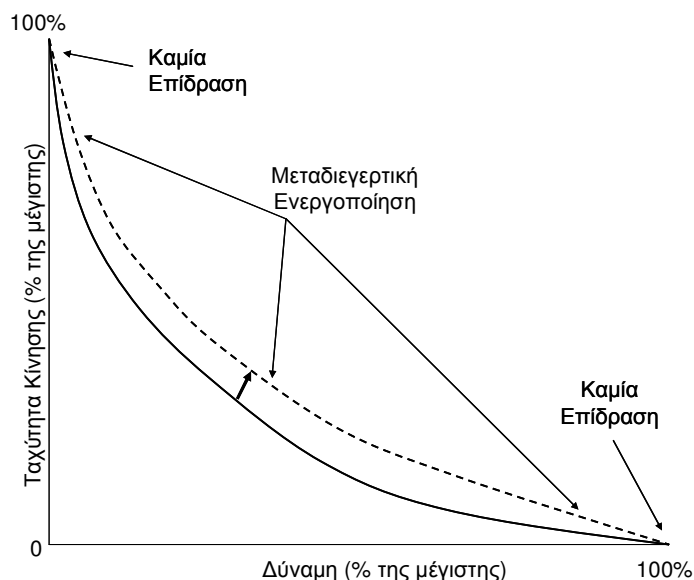
### 3.1 Φωσφορυλίωση ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης

Ο επικρατέστερος φυσιολογικός μηχανισμός της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης φαίνεται να είναι η φωσφορυλίωση των ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης [46,77]. Το μόριο της μυοσίνης αποτελείται από δύο «βαριές αλυσίδες», όπου στο άκρο τους βρίσκονται δύο «ελαφριές αλυσίδες» (Myosin Light Chains ή MLC): η «απαραίτητη ελαφριά αλυσίδα» (MLC-1) και η «ρυθμιστική ελαφριά αλυσίδα» (MLC-2), η οποία μπορεί να φωσφορυλιωθεί (Σχήμα 1). Όταν ένας μυς ενεργοποιηθεί μέσω μιας άσκησης υψηλής έντασης με αντιστάσεις, τότε αυξάνεται η απελευθέρωση των ιόντων ασβεστίου από το σαρκοπλασματικό δίκτυο, τα οποία συνδέονται με μια πρωτεΐνη, την καλμοδουλίνη [55]. Αυτό το σύμπλοκο ενεργοποιεί ένα ένζυμο, την κινάση των ελαφριών αλυσίδων της μυοσίνης, η οποία προσθέτει φωσφορικά ιόντα στις ελαφριές αλυσίδες της μυοσίνης [65].

Η φωσφορυλίωση των MLC-2 αυξάνει τη μυϊκή απόδοση στις συσπάσεις που ακολουθούν μέσω δύο μηχανισμών: (α) της μεταβολής της δομής της κεφαλής της μυοσίνης και (β) της αύξησης της ευαισθησίας του συμπλέγματος ακτίνης-μυοσίνης στο ασβέστιο [35, 80, 89]. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο ρυθμός ανάπτυξης της δύναμης της μυϊκής σύσπασης που ακολουθεί, μέσω της αύξησης στην συχνότητα ένωσης των εγκάρσιων γεφυρών της μυοσίνης και των λεπτών νηματίων της ακτίνης [74]. Η θετική επίδραση της φωσφορυλίωσης των MLC-2 στη μυϊκή απόδοση



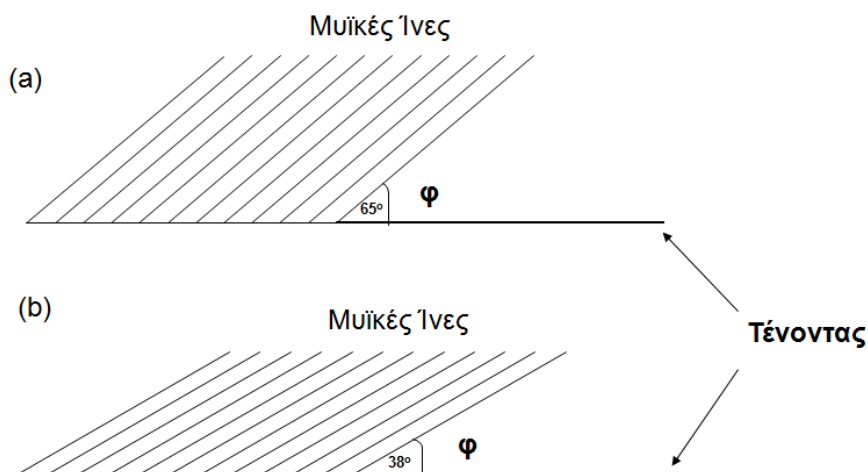
**Σχήμα 1.** Το μόριο της μυοσίνης το οποίο αποτελείται από δύο «βαριές αλυσίδες» (Myosin Heavy Chains ή MHC), όπου στο άκρο τους βρίσκονται δύο «ελαφριές αλυσίδες» (Myosin Light Chains ή MLC): η απαραίτητη ελαφριά αλυσίδα (MLC-1) και η ρυθμιστική ελαφριά αλυσίδα (MLC-2), η οποία μπορεί να φωσφορυλιωθεί. Στις κεφαλές της μυοσίνης φαίνονται τα σημεία πρόσδεσης με την ακτίνη (Actin) και με το ATP.



**Σχήμα 2.** Υποθετική επίδραση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης στην ταχοδυναμική σχέση. Συμπαγής γραμμή: πριν την ενεργοποίηση, Διακεκομμένη γραμμή: μετά την ενεργοποίηση (προσαρμοσμένο από Sale, 2002).

είναι μεγαλύτερη όταν τα επίπεδα του ασβεστίου στο μυϊκό κύτταρο είναι χαμηλά, δηλαδή σε υπομέγιστες μυϊκές συσπάσεις και σε χαμηλές συχνότητες ηλεκτρικής διέγερσης [2]. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, η μέγιστη ισομετρική δύναμη και η μέγιστη ταχύτητα βράχυνσης χωρίς εξωτερική αντίσταση του μυός δεν φαίνεται να βελτιώνονται σημαντικά μετά από ενεργοποίηση του μυός η οποία προκαλεί το φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης [32, 88]. Αντίθετα, η μεγαλύτερη επίδραση παρατηρείται στο κεντρικό μέρος της ταχοδυναμικής καμπύλης λόγω της αύξησης στο ρυθμό ανάπτυξης της δύναμης ([74], βλέπε Σχήμα 2,).

Ένας μικρός αριθμός ερευνών ασχολήθηκαν με τη σχέση μεταξύ της αυξημένης φωσφορυλίωσης των MLC-2 και της μυϊκής απόδοσης σε ανθρώπινους σκελετικούς μυς. Οι Stuart και συν. [79] και οι Smith και Fry [77] μέτρησαν το βαθμό φωσφορυλίωσης των MLC-2 σε σχέση με τη μυϊκή απόδοση μετά από μέγιστη ισομετρική σύσπαση διάρκειας 10 δευτερολέπτων. Στην πρώτη έρευνα, η ανάλυση των βιοψιών του τετρακεφάλου μηριαίου μυός έδειξε σημαντική αύξηση της περιεκτικότητας των MLC-2 σε φώσφορο, η οποία συνοδεύονταν από αύξηση της μυϊκής τάσης κατά τη διάρκεια ηλεκτρικά προκλητής σύσπασης των εκτεινόντων μυών του γόνατος [79]. Αντίθετα, οι Smith και Fry [77] δε βρήκαν σημαντική μεταβολή της φωσφορυλίωσης των MLC-2 ή της μυϊκής ισχύος μετά από παρόμοιο πρωτόκολλο ενεργοποίησης. Εξετάζοντας τις μεταβολές σε κάθε δοκιμαζόμενο βρέθηκε ότι υπήρξε σημαντική αύξηση στη φωσφορυλίωση των MLC-2 στους επτά από τους έντεκα δοκιμαζόμενους, ενώ οι υπόλοιποι τέσσερις παρουσίασαν μείωση, με το μέσο όρο να παραμένει αμετάβλητος. Φαίνεται λοιπόν ότι δεν ανταποκρίνονται όλοι οι δοκιμαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο στην ενεργοποίηση μέσω της φωσφορυλίωσης της MLC-2, κάτι που υποδηλώνει ότι η ενεργοποίηση του μυός μπορεί να σχετίζεται με το ποσοστό μυϊκών ινών ταχείας σύσπασης [38].



**Σχήμα 3.** Η επίδραση της γωνίας πρόσφυσης των μυϊκών ινών ( $\phi$ ) στη μεταφορά ωφέλιμης δύναμης στον τένοντα. Η μείωση της γωνίας ( $\phi$ ) που φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος (b) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ωφέλιμης δύναμης στον τένοντα.

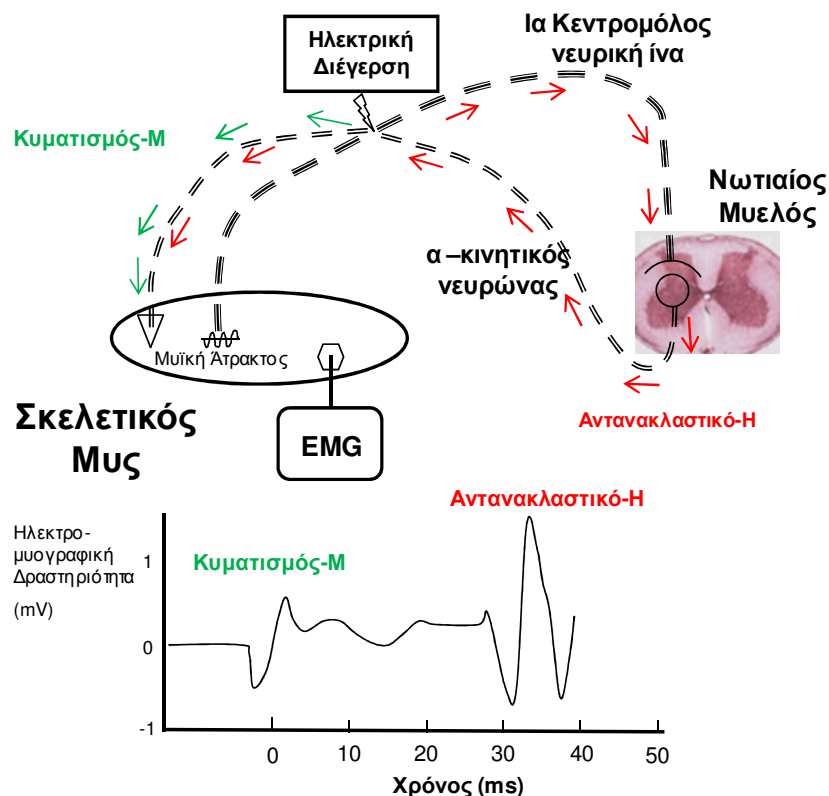
### 3.2 Αλλαγές στην μυϊκή αρχιτεκτονική: γωνία πρόσφυσης των μυϊκών ινών

Το χαρακτηριστικό των πτεροειδών μυών είναι ότι οι μυϊκές τους ίνες εκφύονται και καταφύονται στους αντίστοιχους τένοντες υπό γωνία (Σχήμα 3). Η γωνία πρόσφυσης των μυϊκών ινών σχηματίζεται από την ευθεία έκφυσης-κατάφυσης του μυός σε σχέση με τον προσανατολισμό των μυϊκών δεματίων [25] και καθορίζει την αποτελεσματική μεταφορά της δύναμης από τους μύες, στους τένοντες και στα οστά [25, 29]. Το άθροισμα των δυνάμεων όλων των μυϊκών ινών που αναπτύσσονται στον τένοντα κατά τη σύσπαση υπολογίζεται από τη δύναμη που ασκούν επί το συνημίτονο της γωνίας πρόσφυσης ([29], Σχήμα 3). Συνεπώς οι μικρότερες γωνίες πρόσφυσης παρουσιάζουν μηχανικό πλεονέκτημα, αφού όσο μικραίνει η γωνία πρόσφυσης, το συνημίτονό της μεγαλώνει, δηλ. πλησιάζει τη μονάδα. Η γωνία πρόσφυσης μπορεί να μετρηθεί μέσω υπερηχογραφήματος. Ένα πλεονέκτημα των πτεροειδών μυών είναι ότι περιέχουν περισσότερες μυϊκές ίνες ανά μονάδα όγκου σε σχέση με έναν μυ που έχει τις ίνες του παράλληλα με τον τένοντα. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω της λοξής κατεύθυνσης των ινών σε σχέση με τον τένοντα, μόνο ένα μέρος της δύναμης είναι ωφέλιμο, δηλ. μεταφέρεται στον τένοντα στην επιθυμητή κατεύθυνση.

Οι Mahlfeld και συν. [53] μέτρησαν τη γωνία πρόσφυσης των ινών του έξω πλατύ μηριαίου μυός πριν και μετά από μια μέγιστη ισομετρική σύσπαση διάρκειας 3 δευτερολέπτων. Παρατηρήθηκε μείωση της γωνίας κατά  $1.8^\circ$  μετά από 3-6 λεπτά από τη μέγιστη σύσπαση, γεγονός που αυξάνει τη μεταφορά δύναμης στον τένοντα κατά περίπου 1%. Αν και η διαφορά αυτή είναι μικρή, η μεταβολή στη γωνία πρόσφυσης είναι πιθανό να συνεισφέρει στο φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης [61].

### 3.3 Επιστράτευση κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας

Οι κινητικές μονάδες διεγείρονται σύμφωνα με το νόμο «όλον ή ουδέν». Η επιστράτευσή τους ακολουθεί την «αρχή του μεγέθους» κατά την οποία, οι μικρές κινητικές μονάδες διεγείρονται πρώτα και στη συνέχεια οι μεγαλύτερες [42]. Οι μεγαλύτερες κινητικές μονάδες συμμετέχουν στην παραγωγή δύναμης, όταν απαιτείται να αναπτυχθεί μεγάλη τάση στο μυ. Κατά τους Hirst και συν. [44], οι «γρήγορες» κινητικές μονάδες απαιτούν μεγαλύτερη εκπόλωση της



**Σχήμα 4.** Μέτρηση αντανακλαστικού Hoffman (αντανακλαστικό-H) και του κυματισμού-M. Με ηλεκτρικό ερεθισμό διεγείρονται οι α-κινητικοί νευρώνες, με αποτέλεσμα να καταγράφεται άμεσα (3-6 ms) ένα ηλεκτρικό δυναμικό στον μυ (κυματισμός-M). Ταυτόχρονα, διεγείρονται οι Ia κεντρομόλες νευρικές ίνες και το ερέθισμα μεταφέρεται στο νωτιαίο μυελό. Από εκεί μεταδίδεται μέσω συνάψεων στον άλφα-κινητικό νευρώνα που καταλήγει στον μυ και καταγράφεται ως ηλεκτρική δραστηριότητα (αντανακλαστικό-H) σε 28-35 ms μετά την ηλεκτρική διέγερση. EMG = καταγραφή ηλεκτρομυογραφικής δραστηριότητας.

κυτταροπλασματικής μεμβράνης για να διεγερθούν με συνέπεια να έχουν περισσότερες πιθανότητες να μη μεταφερθεί το δυναμικό δράσης ώστε να επιστρατευθούν.

Η αύξηση της μυϊκής δύναμης και ισχύος μετά από μια άσκηση ενεργοποίησης μπορεί να οφείλεται και στην αύξηση της επιστράτευσης των κινητικών μονάδων με υψηλό κατώφλι ενεργοποίησης ή επίπεδο διεγερσιμότητας [83]. Η αυξημένη επιστράτευση των κινητικών μονάδων με υψηλό κατώφλι ενεργοποίησης μπορεί να αξιολογηθεί με το ηλεκτρικά προκλητό αντανακλαστικό Hoffmann (αντανακλαστικό-H). Το αντανακλαστικό-H καταγράφεται με ηλεκτρομυογράφημα μετά από ηλεκτρική διέγερση των κεντρομόλων νευρικών ινών (Ia) που ξεκινούν από τη μυϊκή άτρακτο (Σχήμα 4). Το δυναμικό δράσης που προκαλείται από την ηλεκτρική διέγερση μεταφέρεται στο νωτιαίο μυελό μέσω των κεντρομόλων νευρικών ινών Ia και από εκεί μεταδίδεται μέσω συνάψεων στους άλφα-κινητικούς νευρώνες που καταλήγει στον μυ και καταγράφεται ως ηλεκτρική δραστηριότητα (αντανακλαστικό-H, Σχήμα 4). Επειδή το αντανακλαστικό-H παρακάμπτει τη μυϊκή άτρακτο, (προκαλείται δηλαδή μεταξύ αυτής και της σπονδυλικής στήλης), αποτελεί χρήσιμο τρόπο αξιολόγησης της μονοσυναπτικής αντανακλαστικής δράσης στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού και ειδικότερα της διέγερσης των α-κινητικών νευρώνων [68].



Η αύξηση του αντανακλαστικού-Η μετά από μια μυϊκή σύσπαση ενεργοποίησης υποδηλώνει βελτιωμένη μετάδοση του δυναμικού δράσης στις συνάψεις στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού και έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας (δηλ. μυϊκές ίνες ταχείας σύσπασης). Η βελτιωμένη μετάδοση του δυναμικού δράσης στις συνάψεις στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού οφείλεται στο ότι κάποιες συνάψεις δεν είναι λειτουργικές σε φυσιολογικές συνθήκες (δηλ. πριν την άσκηση ενεργοποίησης).

Αυτό που επιτυγχάνεται με την άσκηση ενεργοποίησης στο επίπεδο των συνάψεων στο νωτιαίο μυελό είναι η αυξημένη λειτουργικότητα των συνάψεων μέσω αυξημένης απελευθέρωσης νευροδιαβιβαστών ή αύξησης της αποτελεσματικότητας των νευροδιαβιβαστών ή αυξημένης μετάδοσης του δυναμικού δράσης στις διακλαδώσεις των κεντρομόλων νευρικών ινών [20].

Σε κυτταρικό επίπεδο, έχει επίσης αποδειχθεί ότι η αυξημένη επιστράτευση των κινητικών μονάδων μπορεί να προκληθεί μέσω υπερπόλωσης των μυϊκών και νευρικών μεμβρανών κατά τη διάρκεια της ανερέθιστης περιόδου όταν τα ιόντα νατρίου αντλούνται έξω από την μεμβράνη. Η διαδικασία αυτή αυξάνει το δυναμικό ηρεμίας της κυτταροπλασματικής μεμβράνης και αυτή η αύξηση επιστρατεύει περισσότερες κινητικές μονάδες στη δραστηριότητα που θα ακολουθήσει [16, 43], καθώς η υπερπόλωση θεωρείται ότι διαρκεί περισσότερο από 20 λεπτά [73].

Το αντανακλαστικό-Η έχει χρησιμοποιηθεί από τους ερευνητές για την εκτίμηση της νευρικής ενεργοποίησης, η οποία εκδηλώνεται ως αυξημένη επιστράτευση κινητικών μονάδων [37, 84]. Η αλλαγή στο εύρος του αντανακλαστικού, δείχνει ότι έχει μειωθεί η προσυναπτική αναστολή των κεντρομόλων νευρώνων Ia [46] με συνέπεια να υπάρχει αυξημένη μετάδοση του διεγερτικού δυναμικού στις συνάψεις στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού [83]. Αυτή η αυξημένη μετάδοση του διεγερτικού δυναμικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μετασυναπτικού δυναμικού για το ίδιο προσυναπτικό δυναμικό, η οποία διαρκεί αρκετά λεπτά μετά τη δραστηριότητα που προκαλεί ενεργοποίηση [51]. Οι Gullich & Schmidtbleicher [37] διαπίστωσαν μια σημαντική μείωση στο εύρος του αντανακλαστικού-Η ένα λεπτό μετά την άσκηση ενεργοποίησης (-24%) και μια βελτίωση (+20%) 4-11 λεπτά μετά. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση στην μυϊκή ισχύ των δοκιμαζόμενων μετά από άσκηση ενεργοποίησης οφείλεται σε μεγαλύτερη επιστράτευση των κινητικών μονάδων. Ένα άλλο στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι η αύξηση του εύρους του αντανακλαστικού-Η ήταν σημαντικά μεγαλύτερη και διήρκησε περισσότερο στους αθλητές (+42% και 8,1±3,6 λεπτά) απ' ό,τι στους φοιτητές δοκιμαζόμενους (+11% και 5,9±3,8 λεπτά). Σε αντίθεση όμως οι Hodgson και συν. [46] παρατήρησαν αύξηση της μυϊκής απόδοσης μετά από 3 σειρές των 5 μέγιστων εκούσιων συσπάσεων, χωρίς όμως να μεγαλώσει ταυτόχρονα το εύρος του αντανακλαστικού. Οι μελετητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση στην περίπτωση αυτή δεν προκλήθηκε από νευρογενείς αλλά από μυογενείς μηχανισμούς.

Ο κυματισμός-M έχει χρησιμοποιηθεί είτε ξεχωριστά είτε σε συνδυασμό με το αντανακλαστικό-Η για την αξιολόγηση της διεγερσιμότητας των κινητικών μονάδων. Ο κυματισμός-M είναι η ηλεκτρομυογραφική δραστηριότητα που καταγράφεται αμέσως μετά την ηλεκτρική διέγερση του μυός (μέσα σε 3-6 ms, Σχήμα 4). Σε κάποιες μελέτες, ο λόγος του αντανακλαστικού-Η προς τον κυματισμό-M έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της διεγερσιμότητας των κινητικών μονάδων [26]. Οι Hamada και συν. [38] παρατήρησαν αύξηση στην ηλεκτρικά προκλητή μονή σύσπαση (34-114%) με ταυτόχρονη αύξηση στο εύρος του κυματισμού-M (7±4%) για 2 λεπτά, μετά από μέγιστη ισομετρική σύσπαση διάρκειας 10 δευτερολέπτων κυρίως στους δοκιμαζόμενους με μεγαλύτερο ποσοστό ινών τύπου II. Σε

συμφωνία με αυτό, οι Folland και συν. [26] διέκριναν μια αύξηση του λόγου του αντανακλαστικού-H προς τον κυματισμό-M (+42%), 5 λεπτά μετά από μια μέγιστη ισομετρική σύσπαση διάρκειας 10 δευτερολέπτων ενώ σημαντική βελτίωση υπήρξε και στην σχετική δύναμη της ηλεκτρικά προκλητής μονής σύσπασης (+16%). Στην έρευνα των Morana και Perrey [66], χρησιμοποιήθηκε ένα πιο ήπιο πρωτόκολλο ενεργοποίησης, που περιελάμβανε υπομέγιστες ισομετρικές συσπάσεις που εκτελούνταν με διαλειμματικό τρόπο (5 s σύσπαση-5 s ανάπαυση) για 10 λεπτά. Το πρωτόκολλο αυτό προκάλεσε άμεση (σε 1 λεπτό) μεγάλη αύξηση της ηλεκτρικά προκλητής μονής σύσπασης (+52%), η οποία όμως δεν σχετιζόταν με την αύξηση του κυματισμού-M, ο οποίος αυξήθηκε αρκετά αργότερα (περίπου στα 7 λεπτά). Σε συμφωνία με αυτά τα δεδομένα, και άλλες έρευνες βρήκαν μεταδιεγερτική ενεργοποίηση η οποία δεν σχετιζόταν με μεταβολές του κυματισμού-M [60,62], ή το λόγο του αντανακλαστικού-H προς τον κυματισμό-M [48].

Οι Sotiropoulos και συν. [78] ανέφεραν μια αύξηση στο κατακόρυφο άλμα των δοκιμαζόμενων μετά από άσκηση ενεργοποίησης (ημικάθισμα με μέτριες αντιστάσεις και γρήγορη εκτέλεση), που συνοδεύτηκε από μεγαλύτερη ηλεκτρομυογραφική δραστηριότητα. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι πιθανώς να υπήρξε μεγαλύτερη ενεργοποίηση του νευρικού συστήματος μετά την ενεργοποίηση των μυών που πρωταγωνιστούν στην εκτέλεση του κατακόρυφου άλματος. Αντιθέτως οι Esformes και συν. [22] παρατήρησαν ότι μετά από ενεργοποίηση με διαφορετικά είδη μυϊκών συσπάσεων στα άνω άκρα, βελτιώθηκε η μυϊκή ισχύς μόνο μετά από ισομετρική σύσπαση, ενώ δεν υπήρχαν μεταβολές στην ηλεκτρομυογραφική δραστηριότητα τόσο στο μείζονα θωρακικό όσο και στον τρικέφαλο βραχιόνιο. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η βελτίωση της μυϊκής ισχύος που προκλήθηκε από ισομετρική σύσπαση διάρκειας επτά δευτερολέπτων πιθανότατα οφείλονταν σε μυϊκούς και όχι σε νευρικούς παράγοντες.

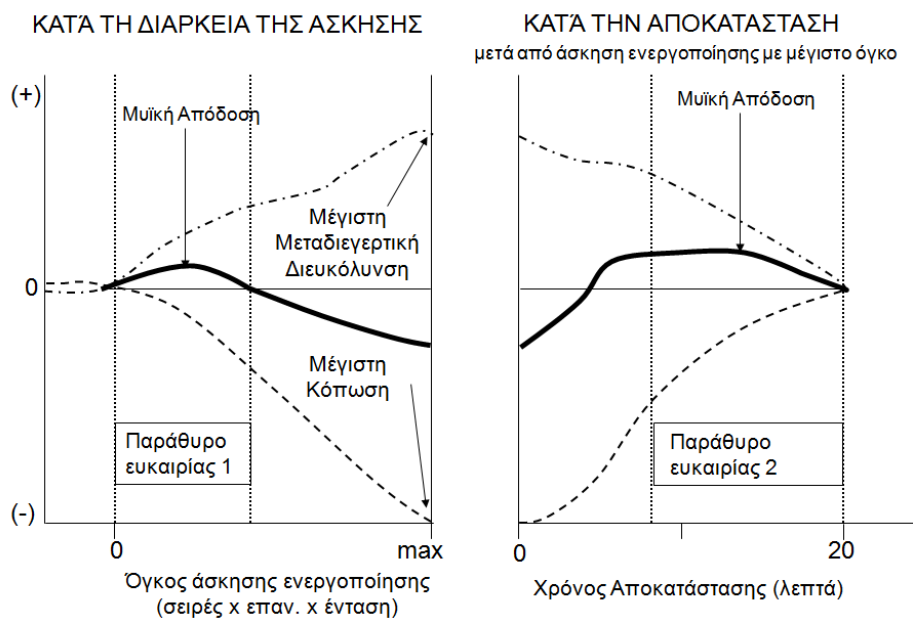
Συμπερασματικά, φαίνεται ότι νευρικοί παράγοντες, όπως αυξημένη μετάδοση του δυναμικού στις συνάψεις στο επίπεδο του νωτιαίου μυελού και υπερπόλωση των νευρικών και μυϊκών μεμβρανών, πιθανόν να συμβάλλουν στο φαινόμενο της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης, αν και τα αποτελέσματα των μελετών είναι αντικρουόμενα. Το μέγεθος της συμμετοχής των νευρογενών και των μυογενών μηχανισμών στην πρόκληση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης πιθανόν να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της άσκησης ενεργοποίησης (π.χ. είδος μυϊκής σύσπασης, ένταση, διάρκεια, ταχύτητα κίνησης, κλπ), αλλά αυτό δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα.

#### **4. Αλληλεπίδραση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης και κόπωσης**

Η προηγηθείσα μυϊκή σύσπαση που προκαλεί μεταδιεγερτική ενεργοποίηση μπορεί να θεωρηθεί ότι «ενεργοποιεί» τον συγκεκριμένο μυ με συνέπεια να αυξάνεται η απόδοση του στο χρόνο που ακολουθεί. Όμως, η μυϊκή σύσπαση αυτή μπορεί να προκαλέσει και κόπωση, η οποία θα μειώσει την απόδοση κάτω από το αρχικό επίπεδο. Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση και η κόπωση συνυπάρχουν στο σκελετικό μυ [69], γιατί κάθε μυϊκή δραστηριότητα μπορεί να ενεργοποιήσει τόσο τους φυσιολογικούς μηχανισμούς της κόπωσης όσο και της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης [65, 84].

Η μυϊκή κόπωση είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο που συνήθως περιλαμβάνει συνδυασμό περιφερικών και κεντρικών μηχανισμών [41] και διακρίνεται σε κεντρική και περιφερική [4]. Η κεντρική κόπωση προκαλεί μείωση στην επιστράτευση των κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας και μείωση στη συχνότητα πυροδότησης των ενεργών





**Σχήμα 5.** Υποθετικό μοντέλο της σχέσης μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης, κόπωσης και μυϊκής απόδοσης, σε συνάρτηση με τον όγκο της ενεργοποίησης. Η απόδοση βελτιώνεται άμεσα (παράθυρο 1) όταν ο όγκος της άσκησης ενεργοποίησης είναι μικρός. Αντιθέτως, όταν ο όγκος της άσκησης ενεργοποίησης είναι μεγάλος, τότε απαιτείται ένα διάλειμμα αποκατάστασης (παράθυρο 2) για να επέλθει η βελτίωση της απόδοσης (προσαρμοσμένο από Tillin & Bishop, 2009).

κινητικών μονάδων [9]. Ως κόπωση ορίζεται η αδυναμία παραγωγής της απαιτούμενης ή αναμενόμενης δύναμης και ισχύος [18, 23]. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω περιφερικών παραγόντων (στο επίπεδο του σκελετικού μύος) όπως είναι οι διαταραχές της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου ( $H^+$ ), καλίου ( $K^+$ ) και ασβεστίου ( $Ca^{2+}$ ) [59], οι οποίες επηρεάζουν τη διεγερσιμότητα της κυτταροπλάσματικής μεμβράνης, τους μηχανισμούς μυϊκής σύσπασης και τον ενεργειακό μεταβολισμό [3]. Επίσης, περιφερική μυϊκή κόπωση μπορεί να προκαλέσουν οι ελεύθερες ρίζες οξυγόνου και αζώτου οι οποίες παράγονται κατά την άσκηση [91], καθώς και η αδυναμία ανασύνθεσης ATP στο ρυθμό που απαιτείται για μέγιστη σύσπαση κυρίως από τα μειωμένα επίπεδα φωσφοκρεατίνης μετά την άσκηση ενεργοποίησης [10, 11]. Η κεντρική κόπωση ορίζεται ως η μείωση της ικανότητας διέγερσης των μυών μέσω των κινητικών νευρώνων, η οποία οφείλεται σε μειωμένη ικανότητα του νευρικού συστήματος - σε επίπεδο νωτιαίου μυελού ή κινητικού φλοιού - να διατηρήσει τα νευρικά ερεθίσματα στο μέγιστο ή απαιτούμενο επίπεδο [30, 36].

Οι μηχανισμοί πρόκλησης της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ότι μπορούν να «εξουδετερώσουν», εν μέρει, τους περιφερικούς και νευρικούς μηχανισμούς της κόπωσης λόγω του ότι είναι σε πολλά σημεία αντίθετοι (π.χ. ο ένας αυξάνει και ο άλλος μειώνει την ευαισθησία των συστατών πρωτεϊνών στο ασβέστιο [27, 66]). Η επικράτηση της ενεργοποίησης ή της κόπωσης θα καθορίσει και την αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου στο να βελτιώσει τη μυϊκή απόδοση στο διάστημα που ακολουθεί [83].

Ένα υποθετικό μοντέλο που δείχνει τη σχέση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης, κόπωσης και απόδοσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Όταν ο όγκος της άσκησης ενεργοποίησης είναι μικρός (μικρή διάρκεια ή λίγες επαναλήψεις), η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση υπερσχύει της κόπωσης, με αποτέλεσμα την άμεση βελτίωση της απόδοσης. Όσο όμως ο όγκος της άσκησης

ενεργοποίησης μεγαλώνει, η κόπωση υπερισχύει της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση. Κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης, η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση μειώνεται με αργότερο ρυθμό σε σχέση με την κόπωση, με συνέπεια να έχουμε βελτίωση της απόδοσης σε κάποιο χρονικό σημείο αρκετά μετά από το τέλος της άσκησης ενεργοποίησης [57, 83]. Λόγω του ότι τα επίπεδα κόπωσης και μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των ατόμων, συνιστάται ο ατομικός προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου αποκατάστασης με τη διαδικασία δοκιμή-σφάλμα [49, 74].

Η υπερίσχυση της κόπωσης ή της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της άσκησης ενεργοποίησης, το χρόνο αποκατάστασης και ορισμένα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των δοκιμαζόμενων. Τα χαρακτηριστικά της άσκησης ενεργοποίησης, τα οποία προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου, περιλαμβάνουν το συνολικό όγκο άσκησης (δηλ. συνολική διάρκεια ή αριθμός μυϊκών συσπάσεων), την έντασή της (σε ποσοστό της μέγιστης δύναμης) και τα διαφορετικά είδη της μυϊκής σύσπασης (ισομετρική, μειομετρική ή πλειομετρική) [22, 70]. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δοκιμαζόμενων περιλαμβάνουν, το προπονητικό επίπεδο, την κατανομή του τύπου των μυϊκών ινών, το βαθμό της μέγιστης μυϊκής δύναμης και το πηλίκo ισχύος-δύναμης [14, 81].

## **5. Παράγοντες που επηρεάζουν τη μυϊκή απόδοση μετά την άσκηση ενεργοποίησης**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την άμεση απόδοση του δοκιμαζόμενου ως συνέπεια της άσκησης ενεργοποίησης είναι ο όγκος, η ένταση, το είδος της μυϊκής σύσπασης καθώς και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των δοκιμαζόμενων [64, 70, 72].

### **5.1 Χαρακτηριστικά άσκησης ενεργοποίησης**

Ο όγκος της άσκησης ενεργοποίησης έχει θεωρηθεί από τις βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την απόδοση που ακολουθεί. Κατά τους Tillin & Bishop [83] αν ο όγκος είναι μικρός τότε η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση θα εμφανιστεί αμέσως, ενώ αν ο όγκος είναι μεγαλύτερος τότε θα πρέπει να υπάρξει μια επαρκής περίοδος αποκατάστασης για να υπερισχύσει η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση της κόπωσης. Η ισομετρική άσκηση έχει χρησιμοποιηθεί πολύ συχνά για την πρόκληση του φαινομένου της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης [83]. Οι Hamada και συν. [40] χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο κόπωσης το οποίο περιελάμβανε 16 ισομετρικές συσπάσεις των 5 δευτερολέπτων η κάθε μια, παρατήρησαν ότι μετά τις πρώτες 3 συσπάσεις η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση ήταν εμφανής (αύξηση δύναμης κατά 127%). Η απόδοση στη συνέχεια μειωνόταν ώσπου έφτασε αμέσως μετά την 16η σύσπαση στο 32% κάτω από την αρχική τιμή. Αυτό το εύρημα ενισχύθηκε και από τα αποτελέσματα των Vandervoort και συν. [90] οι οποίοι μια μέγιστη εκούσια σύσπαση διάρκειας 10 δευτερολέπτων προκάλεσε μεγαλύτερη αύξηση της δύναμης (+142%) σε σχέση με μια μέγιστη εκούσια σύσπαση 1 δευτερολέπτου (+43%) ή με μια μέγιστη εκούσια μέγιστη σύσπαση 3 δευτερολέπτων (+130%) ή με μέγιστη εκούσια σύσπαση 30 δευτερολέπτων (+65%). Οι French και συν. [28] συνέκριναν δύο πρωτόκολλα με διαφορετικό όγκο και βρήκαν ότι μόνο εκείνο το πρωτόκολλο με 3 σειρές των 3 δευτερολέπτων με μέγιστες εκούσιες ισομετρικές συσπάσεις στους τετρακέφαλους μύες, προκάλεσε βελτίωση στο άλμα βάθους (+5,03%) σε σύγκριση με το πρωτόκολλο των 3 σειρών με 5 δευτερόλεπτα. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αν η συνολική διάρκεια σύσπασης είναι ίση ή μεγαλύτερη των 15 δευτερολέπτων τότε προκαλείται μυϊκή κόπωση και αντισταθμίζεται πλήρως η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση. Η υπερίσχυση της κόπωσης έναντι της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης φάνηκε και στην έρευνα των Tsolakis και συν. [85] όπου παρατηρήθηκε μείωση

της επίδοσης στο κατακόρυφο άλμα (κατά 7,5-8,7%) μόνο στους άνδρες αθλητές της ξιφασκίας 8-12 λεπτά μετά από 3 σειρές των 3 δευτερολέπτων μέγιστων ισομετρικών συσπάσεων. Σημειώνεται ότι η μείωση αυτή δεν παρατηρήθηκε στις γυναίκες αθλήτριες ξιφασκίας. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η βέλτιστη διάρκεια μέγιστης ισομετρικής σύσπασης για τη βελτίωση της επίδοσης μετά από άσκηση ενεργοποίησης είναι περίπου 10 δευτερόλεπτα. Η βελτίωση της απόδοσης είναι περίπου 4-5% (Πίνακας 1).

Η δυναμική άσκηση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης μέσω της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης. Οι Mangus και συν. [54] εφάρμοσαν τέσσερις σειρές της μιας επανάληψης στο 90% της μέγιστης δύναμης των δοκιμαζόμενων στην άσκηση ημικάθισμα. Το κατακόρυφο άλμα δεν βελτιώθηκε παρότι υπήρξε μια τάση για βελτίωση ( $p=0,07$ ). Αντιθέτως, σε ένα αντίστοιχο διαλειμματικό πρωτόκολλο οι Chatzoroulos και συν. [13] με 10 μονές επαναλήψεις στο 90% της μέγιστης δύναμης και 3 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των επαναλήψεων, βρήκαν σημαντική βελτίωση σε δρόμο ταχύτητας 30 μέτρων (2%) και ιδιαίτερα στα 10 πρώτα μέτρα (3%). Σε συμφωνία με τους Chatzoroulos και συν. [13] βρίσκεται και η μελέτη των Batista και συν. [6], οι οποίοι χρησιμοποίησαν παρόμοιο πρωτόκολλο με 10 σειρές της μιας επανάληψης (διάρκεια επανάληψης 1,5 δευτερόλεπτα) με διάλειμμα 30 δευτερολέπτων μεταξύ των επαναλήψεων, σε ισοκίνητικό μηχάνημα και με γωνιακή ταχύτητα  $60^\circ$  ανά δευτερόλεπτο και βρήκαν μια βελτίωση στην απόδοση της τάξεως των 6% ( $p<0,05$ ). Σε μια άλλη μελέτη των Villareal και συν. [73] συγκρίθηκαν 6 διαφορετικά πρωτόκολλα με διάφορες εντάσεις. Οι μελετητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι για την βελτίωση της κατακόρυφης αλτικότητας απαιτείται μια ένταση της τάξεως των 80-95% της 1 μέγιστης επανάληψης (1ME). Σε συμφωνία με τους Villareal και συν. [73], οι Crewther και συν. [15] παρατήρησαν μια βελτίωση στο κατακόρυφο άλμα (3-4%), μετά από 1 σειρά των 3 επαναλήψεων με ένταση 3 ME (περίπου 90-93% της μέγιστης), ενώ οι Kilduff και συν. [49] με 1 σειρά των 3 επαναλήψεων στο 87% της 1 ME και 3 σειρές των 3 επαναλήψεων στο 87% της 1 ME [50] βρήκαν βελτίωση τόσο στο ύψος του κατακόρυφου άλματος (4,9%) όσο και στη μέγιστη ισχύ (6,4-7,5%). Στις περισσότερες από τις παραπάνω έρευνες η αύξηση της μυϊκής απόδοσης συνέβη κατά τη διάρκεια του 4-12<sup>ου</sup> λεπτού της αποκατάστασης [7, 15, 49, 50]. Επίσης αμέσως μετά την άσκηση ενεργοποίησης βρέθηκε μείωση της απόδοσης σε όλες σχεδόν τις έρευνες. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με αποτελέσματα μελετών που μέτρησαν το εύρος του αντανακλαστικού-Η. Ο Gullich & Schmidtbleicher [37] παρατήρησαν την μεγαλύτερη αύξηση του αντανακλαστικού στα  $8,7 \pm 3,6$  λεπτά μετά την άσκηση ενεργοποίησης ενώ οι Trimble & Harp [84] στα 6-10 λεπτά μετά.

Μεταδιεγερτική ενεργοποίηση μπορεί επίσης να επιτευχθεί με δυναμική άσκηση χρησιμοποιώντας υπομέγιστα φορτία αλλά με μέγιστη ταχύτητα κίνησης. Στην έρευνα των Smilios και συν. [76] βρέθηκε παρόμοια βελτίωση του κατακόρυφου άλματος (+3.3-4.9%) μετά από δύο πρωτόκολλα που περιελάμβαναν τρεις σειρές των πέντε επαναλήψεων με 30% και 60% της 1 ME στην άσκηση ημικάθισμα-άλμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρήθηκε 1 λεπτό μετά την πρώτη σειρά και όχι μετά την ολοκλήρωση των τριών σειρών. Μια άλλη μελέτη των Gilbert και Lees [31] συνέκρινε την επίδραση δύο διαφορετικών εντάσεων δυναμικής άσκησης (1 ME και φορτίο που μεγιστοποιείται η ισχύς) κάνοντας πέντε μονές επαναλήψεις με 3 λεπτά διάλειμμα στην άσκηση ημικάθισμα. Βρέθηκε ότι το κατακόρυφο άλμα αυξήθηκε κατά 8,5% μετά από 20 λεπτά αποκατάστασης όταν η ένταση ήταν μέγιστη, ενώ η αύξηση περιορίστηκε στο 3,4% και εμφανίστηκε μόλις 2 λεπτά μετά το τέλος της άσκησης ενεργοποίησης στην περίπτωση που το φορτίο ήταν αυτό που μεγιστοποιούσε την παραγόμενη ισχύ. Συμπερασματικά, σε δυναμικά πρωτόκολλα με δυναμικές συσπάσεις, ο ωφέλιμος όγκος που φαίνεται να μεγιστοποιεί τη μεταδιεγερτική ενεργοποίηση κυμαίνεται από 3 ως 10 επαναλήψεις

**Πίνακας 1.** Έρευνες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε άσκηση ενεργοποίησης για την επίτευξη βραχυπρόθεσμης βελτίωσης της μυϊκής απόδοσης.

Ερευνητές	Δείγμα	Άσκηση Ενεργοποίησης	Πρωτόκολλο/διάλειμμα	Αποτελέσματα	Εμφάνιση βελτίωσης
French και συν. (2003)	13 Αθλ. (10 Άνδρες, 3 Γυναίκες)	Μέγιστη Ισομετρική Σύσπαση κάτω άκρα	3 σειρ. Χ 3 δευτ. /διάλειμμα: 3 λεπτά	↑ 5% DJ	Αμέσως μετά
Gulich και Schmidtbleicher (1996)	34 Αθλ. Άνδρες, 11 Αθλ. Γυναίκες	Μέγιστη Ισομετρική Σύσπαση κάτω άκρα	3σειρ.Χ5δευτ. /διάλειμμα: 5 λεπτά	↑ 4,4 % CMJ και ↑ 20% H-reflex	3 λεπτά 8,7 λεπτά
Tsolakis και συν. (2011)	13άνδρες και 10 γυναίκες (Αθλ. Ξιφασκίας)	Μέγιστη Ισομετρική Σύσπαση κάτω άκρα	3 σειρ. Χ 3 δευτ. /διάλειμμα: 15 δευτερόλεπτα	↓ 7,5-8,7% Μεγ. Ισχύος (CMJ) στους Άνδρες	8-12 λεπτά
Tsolakis και Bogdanis (2012)	20 (Αθλ.Ξιφασκίας)	Πλειομετρικά επιτόπια άλματα	3 σειρ. Χ 5 επαν. /διάλειμμα: 1 λεπτό	↔ Ύψος CMJ	8 λεπτά
Batista και συν. (2007)	10 (Μ. Γ) Άνδρες	Εκτάσεις Γόνατος (Ισοκινητικό)	10 σειρ. Χ 1επαν. 100%/διάλειμμα: 30 δευτερόλεπτα	↑ 4,5% Μέγ. Ροπή 4-12 λεπτά	4-12 λεπτά
Bevan και συν. (2009)	26 (Αθλ.) Άνδρες	Κάμψεις-Τάσεις Αγκώνων (Πάγκος)	3 σειρ. Χ 3επαν. 40% 1 ΜΕ/διάλειμμα: 4 λεπτά	↑ 4,2% Μεγ. Ισχύος, ↑ 8,2% Μεγ. Ύψος Ρίψης ΒΡΤ	8 λεπτά
Chatzopoulos και συν. (2009)	15 (Αθλ.) Άνδρες	Ημικάθισμα 90°	10 σειρ. Χ 1 επαν. 90% 1 ΜΕ/διάλειμμα: 3 λεπτά	↓ χρόνου sprint 10μ. (3%) ↓ χρόνου sprint 30 μ. (2%)	5 λεπτά
Crewther και συν. (2011)	9 (Αθλ.) Άνδρες	Παράλληλο κάθισμα	1 σειρ. Χ 3 επαν. 3 ΜΕ	↑ 3-4% CMJ	4-12 λεπτά
Gourgoulis και συν. (2003)	20 (Μ. Γ) Άνδρες	Ημικάθισμα 90°	1 σειρ.Χ2επαν.Χ 20,40,60,80,90% 1ΜΑΕ/διάλειμμα: 5 λεπτά	↑ 4% CMJ στους δυνατότερους (>160κιλ.)	Αμέσως μετά

(συνεχίζεται)

**Πίνακας 1.** (συνέχεια)

Ερευνητές	Δείγμα	Άσκηση Ενεργοποίησης	Πρωτόκολλο/διάλειμμα	Αποτελέσματα	Εμφάνιση βελτίωσης
Kilduff και συν. (2007)	23 (Αθλ.) Άνδρες	Βαθύ Κάθισμα	1 σειρ. x3 επαν. 3 ΜΕ	↑ Μεγ. Ισχύος 6,8 και 8,0% CMJ	8 και 12 λεπτά
Kilduff και συν. (2008)	20 (Αθλ.) Άνδρες	Βαθύ Κάθισμα	3 σειρ. x3 επαν. 87% 1 ΜΕ/διάλειμμα: 4 λεπτά	↑ Μεγ. Ισχύος 4,9% CMJ ↑ 32% RFD	8 λεπτά
Rixon και συν. (2007)	20 Αθλ. 10 Μ. Γ., άνδρες και γυναίκες	Ημικάθισμα 90° Μέγιστη Ισομετρική σύσπαση 125° θέση καθίσματος	1 σειρ. x3 επαν. 3ΜΕ (90%) 3 σειρ. x3 δευτ. 100%/διάλειμμα: 2 λεπτά	↑ 7,7% Μεγ. Ισχύος (CMJ) ↑ 8.9% Μεγ. Ισχύος (CMJ)	3 λεπτά
Ruben και συν. (2010)	12 (Κ. Γ) Άνδρες	Παράλληλο κάθισμα	1 σειρ. x5 επαν. 30% ΜΕ και 1 σειρ. X 3 επαν. 70% ΜΕ και 1 σειρ. x 3 επαν. 90% ΜΕ /διάλειμμα: 2 λεπτά	↑ 17% Μέγ. Ισχύος ↑ 12 και 17% Μέσης και Μέγιστης Δύναμης	5 λεπτά
Smilios και συν. (2005)	10 (Κ. Γ) Άνδρες	Ημικάθισμα 90°, Ημικάθισμα-Αναπήδηση	3 σειρ. x5 επαν. 30% ΜΕ, 60% ΜΕ /διάλειμμα: 3 λεπτά	↑ 3,4-3,96% Μέγ. Ισχύος (CMJ)	1 λεπτό
Gilbert και συν. (2005)	15 (Κ. Γ) Άνδρες	Βαθύ Κάθισμα	5 σειρ. x1 επαν. 100% 1ΜΕ και 5 σειρ. x1 επαν. Pmax	↑ 8,5% Μέγ. Ισχύος (CMJ) 100% 1 ΜΕ ↑ 3,4% Μέγ. Ισχύος (CMJ) Pmax	20 λεπτά, 2 λεπτά
Terzis και συν. (2009)	8 Μ.Γ Άνδρες, 8 Μ.Γ Γυναίκες	Άλματα Βάθους (40 cm)	5 συνεχόμενα άλματα	↑ 7.5% Ριπτικής επίδοσης μόνο στους Άνδρες	Αμέσως μετά

Μ. Γ.: Μέτρια Γυμνασμένοι, Κ.Γ.: Καλά Γυμνασμένοι, Αθλ.: Αθλητές, ΜΕ: Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων, BPT: ρίψη στην άσκηση κάμψεων-τάσεων αγκώνων (πάγκος), CMJ: κατακόρυφο άλμα με αιώρηση, DJ: άλμα βάθους, RFD: ρυθμός ανάπτυξης της δύναμης, Pmax: Φορτίο μεγιστοποίησης της μυϊκής ισχύος.

με ένταση κοντά στη μέγιστη (>80% της μιας μέγιστης επανάληψης-1 ME) και η αύξηση της μυϊκής απόδοσης εμφανίζεται κατά κανόνα 4-12 λεπτά μετά το τέλος της άσκησης ενεργοποίησης και κυμαίνεται κατά κανόνα από 2-9%. Σημαντική και άμεση ενεργοποίηση (σε 1-2 λεπτά μετά την άσκηση ενεργοποίησης) μπορεί όμως να επιτευχθεί και με μικρότερες εντάσεις (30-60% 1 ME, Πίνακας 1).

## 5.2 Χαρακτηριστικά δοκιμαζόμενων

Η μυϊκή δύναμη και η κατανομή των μυϊκών ινών είναι δύο σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την αλληλεπίδραση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης και κόπωσης. Το επίπεδο της μυϊκής δύναμης των δοκιμαζόμενων έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί σημαντική μεταβλητή για την εμφάνιση βελτίωσης της απόδοσης μετά από άσκηση ενεργοποίησης [5, 93]. Οι Young και συν. [93] βρήκαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης δύναμης στο κάθισμα (5 ME) των δοκιμαζόμενων και του ποσοστού βελτίωσης στο κατακόρυφο άλμα με βάρη ( $r=0,73$ ,  $p=0,02$ ). Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι δυνατότεροι συμμετέχοντες με μέσο όρο μέγιστης δύναμης στο ημικάθισμα  $152 \pm 30$  κιλά είχαν μεγαλύτερη βελτίωση στην απόδοση μετά από την άσκηση ενεργοποίησης σε σχέση με τους πιο αδύναμους. Επίσης σημαντική συσχέτιση μεταξύ της έντασης των 3 ME και του ποσοστού βελτίωσης της κατακόρυφης αλτικότητας βρήκαν και οι Kilduff και συν. [49] ( $r=0,63$ ,  $p<0,01$ ) με μέγιστη δύναμη των δοκιμαζόμενων στο κάθισμα  $153 \pm 23$  κιλά. Ακόμη οι Gourgoulis και συν. [33] παρατήρησαν μια αύξηση 4,0% ( $p<0,05$ ) στο κατακόρυφο άλμα μόνο σε όσους μπορούσαν να σηκώσουν τουλάχιστον 160 κιλά στο κάθισμα, ενώ εκείνοι που δεν μπορούσαν, βελτιώθηκαν μόνο 0,42% ( $p>0,05$ ). Σε μία άλλη μελέτη των Bullock και συν. [12] οι δοκιμαζόμενοι με μεγαλύτερο επίπεδο μυϊκής δύναμης που μπορούσαν να σηκώσουν στο κάθισμα δυο φορές το βάρος του σώματός τους, ανταποκρίθηκαν καλύτερα στο μεγαλύτερο όγκο άσκησης ενεργοποίησης (6 άλματα βάθους) σε σχέση με τον μικρότερο όγκο (4 άλματα βάθους). Ακόμη οι Ruben και συν. [72] παρατήρησαν ότι όσοι μπορούσαν να σηκώσουν στο κάθισμα περισσότερο από δυο φορές το βάρος του σώματός τους και είχαν απόλυτη δύναμη  $170 \pm 24$  κιλά παρουσίασαν μια μεγαλύτερη βελτίωση μετά την άσκηση ενεργοποίησης, η οποία περιελάμβανε ένα προοδευτικά αυξανόμενο πρωτόκολλο αντίστασης. Κατά τους Bevan και συν. [7], η σχέση της μυϊκής δύναμης και του ποσοστού βελτίωσης μετά την άσκηση ενεργοποίησης μπορεί να αποδοθεί στην καλύτερη ενεργοποίηση του μυϊκού συστήματος κατά την διάρκεια της προπόνησης υψηλής αντίστασης και η οποία επιδρά σε αλλαγές στο εύρος του H-reflex και στην φωσφορυλίωση των ελαφριών αλυσίδων της μυοσίνης [37, 79].

Μια πιθανή αιτία για τη μεγαλύτερη βελτίωση της μυϊκής απόδοσης μετά από άσκηση ενεργοποίησης στους δυνατότερους δοκιμαζόμενους είναι ότι έχουν μεγαλύτερο ποσοστό ινών τύπου II ή λόγω της προπόνησης έχουν αυξήσει την εγκάρσια διατομή των ινών τύπου II, καθώς έχει συσχετιστεί σημαντικά από την βιβλιογραφία το ποσοστό ινών τύπου II με την μέγιστη μυϊκή δύναμη ( $r=0,5-0,93$ ,  $p<0,05$ ) [1, 56, 82]. Οι μυϊκές ίνες τύπου II παρουσιάζουν μεγαλύτερη φωσφορυλίωση ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης [65] και οι κινητικές μονάδες που τις περιλαμβάνουν έχουν υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας. Συνεπώς, τα άτομα που έχουν μυς με μεγάλο ποσοστό ινών τύπου II θα εμφανίσουν μεγαλύτερη μεταδιεγερτική ενεργοποίηση και θα βελτιώσουν περισσότερο την απόδοσή τους όταν προηγηθεί μια άσκηση ενεργοποίησης. Οι Gullich & Schmidtbleicher [37] παρατήρησαν ότι οι γαστροκνήμιοι μύες, που έχουν μεγαλύτερο ποσοστό με μυϊκές ίνες τύπου II, παρουσίασαν μεγαλύτερη μεταδιεγερτική ενεργοποίηση η οποία διατηρήθηκε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με αυτή των υποκνημιδίων μυών οι οποίοι έχουν μεγαλύτερο ποσοστό μυϊκών ινών τύπου I. Κατά τους Hamada και συν. [38],



το μέγεθος της νευρικής διέγερσης που επιτυγχάνεται μετά την άσκηση ενεργοποίησης είναι μεγαλύτερο στις μυϊκές ίνες τύπου II [37] και γι' αυτό το λόγο η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση παρουσιάζεται αυξημένη σε αθλητές ισχύος [28].

Οι Terzis και συν. [81] βρήκαν σημαντική συσχέτιση ( $r=0,76$ ,  $p<0,01$ ) της βελτίωσης της απόδοσης μετά από άσκηση ενεργοποίησης με την εγκάρσια διατομή των μυϊκών ινών τύπου II. Η συσχέτιση του ποσοστού των μυϊκών ινών τύπου II και της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης ήταν επίσης σημαντική αλλά μικρότερη ( $r=0,69$ ,  $p<0,01$ ). Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι ο αριθμός των μορίων της μυοσίνης τύπου II είναι σημαντικότερος από τον αριθμό των κυττάρων τύπου II για την πρόκληση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης. Η τελευταία υπόθεση έρχεται σε συμφωνία με την αυξημένη φωσφορυλίωση των MLC-2 που προκαλεί η άσκηση ενεργοποίησης και η οποία θεωρείται ο επικρατέστερος μηχανισμός της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης. Έτσι περισσότερα μόρια μυοσίνης θα υποστούν μεγαλύτερη φωσφορυλίωση από την άσκηση ενεργοποίησης, με συνέπεια να προκληθεί μεγαλύτερη βελτίωση στην απόδοση. Στην ίδια μελέτη συσχετίστηκε σε μέτριο βαθμό η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση σε σχέση με την μυϊκή δύναμη των δοκιμαζόμενων στις 6 ME ( $r=0,50$ ,  $p<0,05$ ). Οι μελετητές κατέληξαν ότι η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση επηρεάζεται περισσότερο από την κατανομή των μυϊκών ινών και ακόμα περισσότερο από την εγκάρσια διατομή των μυϊκών ινών τύπου II παρά από τη μυϊκή δύναμη. Σε πρακτικό επίπεδο αυτά τα συμπεράσματα υποδεικνύουν ότι η προπόνηση με αντιστάσεις μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα των δοκιμαζόμενων για την πρόκληση της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης [74] μέσω της αύξησης της εγκάρσιας διατομής των μυϊκών ινών τύπου II [52, 70, 81].

## 6. Συμπεράσματα και πρακτικές εφαρμογές

Η μεταδιεγερτική ενεργοποίηση επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της αυξημένης φωσφορυλίωσης των ελαφριών αλυσίδων της μυοσίνης (MLC-2) καθώς και της αυξημένης επιστράτευσης κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας. Το μέγεθος της συμμετοχής αυτών των μηχανισμών στην πρόκληση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της άσκησης ενεργοποίησης (π.χ. είδος μυϊκής σύσπασης, ένταση, διάρκεια, ταχύτητα κίνησης, κλπ), αλλά αυτό δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα.

Ο βαθμός και ο χρόνος βελτίωσης της μυϊκής απόδοσης μετά από μια άσκηση ενεργοποίησης εξαρτάται από τη σχέση μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης και κόπωσης που προκαλούνται παράλληλα. Η υπερίσχυση της κόπωσης ή της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της άσκησης ενεργοποίησης, το χρόνο αποκατάστασης και ορισμένα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των δοκιμαζόμενων. Όταν η άσκηση ενεργοποίησης είναι ισομετρική, η βέλτιστη συνολική διάρκειά της δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 δευτερόλεπτα (συνήθως σε μικρότερα σετ των 3-5 δευτερολέπτων). Σε διαλειμματικά πρωτόκολλα με δυναμικές συσπάσεις, ο ωφέλιμος όγκος που φαίνεται να μεγιστοποιεί τη μεταδιεγερτική ενεργοποίηση κυμαίνεται από 3-10 επαναλήψεις με ένταση κοντά στη μέγιστη ( $>80\%$  της μιας μέγιστης επανάληψης-1 ME), ενώ η αύξηση της μυϊκής απόδοσης εμφανίζεται κατά κανόνα 4-12 λεπτά μετά το τέλος της άσκησης ενεργοποίησης και κυμαίνεται κατά κανόνα από 2-9%. Σημαντική και άμεση ενεργοποίηση (σε 1-2 λεπτά μετά την άσκηση ενεργοποίησης) μπορεί όμως να επιτευχθεί και με μικρότερες εντάσεις (30-60% 1 ME).

Σημαντικό ρόλο για τη μεγιστοποίηση του φαινομένου της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης διαδραματίζουν η μυϊκή δύναμη και η σύσταση των μυϊκών ινών των δοκιμαζόμενων. Άτομα με αυξημένο ποσοστό μυϊκών ινών τύπου II παρουσιάζουν μεγαλύτερη φωσφορυλίωση ελαφριών αλυσίδων μυοσίνης καθώς επίσης και μεγαλύτερο αριθμό κινητικών μονάδων με υψηλό επίπεδο διεγερσιμότητας, οι οποίες αν ενεργοποιηθούν θα βελτιώσουν περισσότερο τη μυϊκή απόδοση.

Τέλος, η εγκάρσια επιφάνεια των μυϊκών ινών τύπου II φαίνεται να είναι σημαντικότερη για το μέγεθος της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι η προπόνηση μυϊκής ισχύος, η οποία προκαλεί αύξηση της εγκάρσιας επιφάνειας των ινών τύπου II πιθανότατα να επιφέρει και αύξηση του επιπέδου της μεταδιεγερτικής ενεργοποίησης.

### Παραπομπές

1. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Neural adaptation to resistance training: Changes in evoked V-waves and H-reflex responses. *J Appl Physiol* 92: 2309–2328, 2002.
2. Abbate FA, Sargeant AJ, Verdijk PW, De Haan A. Effects of high-frequency initial pulses and post-tetanic potentiation on power output of skeletal muscle. *J Appl Physiol* 88, 35–40, 2000.
3. Allen D, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 88: 287–332, 2008.
4. Babault N, Desbrosses K, Fabre MS. Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *J Appl Physiol* 100: 780-785, 2006.
5. Baker D. The acute effect of alternating heavy and light resistances upon power output during upper body complex power training. *J Strength Cond Res* 17: 493-497, 2003.
6. Batista MAB, Urganowitsch C, Roschel H, Lotufo R, Ricard MD, Tricoli, VAA. Intermittent exercise as a conditioning activity to induce postactivation potentiation. *J Strength Cond Res* 21: 837–840, 2007.
7. Bevan HR, Owen NJ, Cunningham DJ, Kingsley MIC, Kilduff LP. Complex training in professional rugby players: influence of recovery time on upper-body power output. *J Strength Cond Res* 23: 1780–1785, 2009.
8. Bevan HR, Cunningham DJ, Tooley EP, Owen NJ, Cook, CJ, Kilduff LP. Influence of postactivation potentiation on sprinting performance in professional rugby players. *J Strength Cond Res* 24: 701–705, 2010.
9. Bigland-Ritchie B, Johnson R, Lippold OT, Smith S, Woods, JJ. Changes in motoneurone firing rates during Sustained Maximal Voluntary Contractions. *J Physiol* 340: 335-346, 1983.
10. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK, Nevill, AM. Recovery of power output and muscle metabolites following 30s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol* 482: 467–480, 1995.
11. Bogdanis GC. Effects of Physical Activity and Inactivity on Muscle Fatigue. *Front Physiol* 3: 1-15, 2012.
12. Bullock N, Comfort P. An investigation into the acute effects of depth jumps on maximal strength performance. *J Strength Cond Res*, 25: 2011.
13. Chatzopoulos DE, Michailidis CJ, Giannakos AK. Postactivation potentiation effects after heavy resistance exercise on running speed. *J Strength Cond Res* 21: 1278-1281, 2007.
14. Chiu LZ, Fry AC, Weiss LW, Schilling BK, Brown LE, Smith SL. Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals. *J Strength Cond Res* 17: 671–677, 2003.
15. Crewther BT, Kilduff LP, Cook CJ, Middleton MK, Bunce PJ, Yang GZ. The acute potentiating effects of back squats on athlete performance. *J Strength Cond Res*, 25: 3319-3325, 2011.
16. De Ruyter CJ, Elzinga PWL, Verdijk W. van Mechelen, A deHaan. Changes in force, surface and motor unit EMG during post-exercise development of low frequency fatigue in vastus lateralis muscle. *Eur J Appl Physiol* 94: 659-669, 2005.

17. Docherty D, Hodgson M. The application of postactivation potentiation to elite sport. *Int J Sports Physiol Perf* 2: 439-444, 2007.
18. Edwards RH. "Human muscle function and fatigue," in *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*, eds R. Porter and J. Whelan London: Pitman Medical, 1981, pp. 1–18.
19. Enoka RM, Stuart DG. Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol* 72: 1631-48, 1992.
20. Enoka R. *Neuromechanics of human movement*. 3rd ed. Champaign, (IL): Human Kinetics, 2002.
21. Esformes JI, Cameron N, Bampouras TM. Postactivation potentiation following different modes of exercise. *J Strength Cond Res* 24: 1911–1916, 2010.
22. Esformes JI, Keenan M, Moody J, Bampouras TM. Effect of different types of conditioning contraction on upper body postactivation potentiation. *J Strength Cond Res* 25: 143–148, 2011.
23. Fitts RH. Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiol Rev* 74: 49–94, 1994.
24. Folland JP, Williams AG. Methodological issues with the interpolated twitch technique. *J Electromyogr Kinesiol* 17: 317-327, 2007.
25. Folland JP, Williams, AG. The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med* 37: 145-168, 2007.
26. Folland JP, Wakamatsu T, Fimland MS. The influence of Maximal /isometric activity on twitch and H-Reflex potentiation, and quadriceps femoris performance. *Eur J Appl Physiol* 104: 739-748, 2008.
27. Fowles JR, Green HJ. Coexistence of potentiation and low frequency fatigue during voluntary exercise in human skeletal muscle. *Can J Physiol Pharmacol* 81: 1092–1100, 2003.
28. French DN, Kraemer WJ, Cooke CB. Changes in dynamic exercise performance following a sequence of preconditioning isometric muscle actions. *J Strength Cond Res* 17: 678–685, 2003.
29. Fukunaga T, Ichinose Y, Ito M. Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *J Appl Physiol* 82: 354-358, 1997.
30. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 687 81:1725-1789, 2001.
31. Gilbert G, Lees A. Changes in the force development characteristics of muscle following repeated maximum force and power exercise. *Ergonomics* 48: 1576–1584, 2005.
32. Gossen ER, Sale DG. Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance. *European J Appl Physiol* 83: 524–530, 2000.
33. Gourgoulis V, Aggeloussis N, Kasimatis P, Mavromatis G, Garas A. Effect of a submaximal half-squats warm-up program on vertical jumping ability. *J Strength Cond Res* 17: 342–344, 2003.
34. Grange RW, Vandenboom R, Xeni J. Potentiation of in vitro concentric work in mouse fast muscle. *J Appl Physiol* 84 (1): 236-243, 1998.
35. Grange R.W, Vandebloom R, Houston, ME. Physiological significance of myosin phosphorylation in skeletal muscle. *Canadian J Appl Physiol* 18: 229–243, 1993.
36. Gruet M, Temesi J, Rupp T, Levy P, Millet GY, Verges S. Stimulation of the Motor Cortex and Corticospinal Tract to Assess Human Muscle Fatigue. *Neuroscience*, pii: S0306-4522(12)01082-82. doi: 10.1016, 2012.
37. Gullich A, Schmidtbleicher D. MVC-induced short-term potentiation of explosive force. *New Studies in Athletics* 11.: 67–81, 1996.

38. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD, Tarnopolsky MA. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol* 88: 2131–2137, 2000.
39. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD. Postactivation potentiation in endurance-trained male athletes. *Med Sci Sports Exerc* 32: 403–411, 2000.
40. Hamada T, Sale DG, MacDougall JD, Tarnopolsky MA. Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiol Scand* 178: 165–173, 2003.
41. Harrison AJ. Throwing and catching movements exhibit post-activation potentiation effects following fatigue. *Sports Biomechanics* 10: 185-196, 2011.
42. Henneman E, Clamann HP, Gillies JD, Skinner RD. Rank order of motoneurons within a pool: law of combination. *J Neurophysiol* 37: 1338–1349, 1974.
43. Hicks A, Fenton J, Garner S, McComas AJ. M wave potentiation during and after muscle activity. *J Appl Physiol* 66: 2606–2610, 1989.
44. Hirst GDS, Redman SJ, Wong K. Post-tetanic potentiation and facilitation of synaptic potentials evoked in cat spinal motoneurons. *J Physiol* 321: 97-109, 1981.
45. Hodgson M, Docherty D, Robbins D. Post-activation potentiation: underlying physiology and implications for motor performance. *Sports Med* 35: 585–595, 2005.
46. Hodgson M, Docherty D, Zehr P. Postactivation Potentiation of Force Is Independent of H-Reflex Excitability. *Int J Sports Physiol Perform* 3: 219-231, 2008.
47. Hufschmidt HJ. Wird durch muskeltvibration eine eigenreflexreihe erzeugt? *Plügers Archiv. Eur J Physiol* 267: 508-516, 1958.
48. Iglesias-Soler E, Paredes X, Carballeira E, Marquez G, Fernandez Del-Olmo M. Effect of Intensity and Duration of Conditioning Protocol on Postactivation Potentiation and Changes in H-Reflex. *Eur J Sports Sci* 11: 33-38, 2011.
49. Kilduff LP, Bevan HR, Kingsley MIC, Owen NJ, Bennett MA, Bunce PJ, Hore A M, Maw JR, Cunningham DJ. Postactivation potentiation in professional rugby players: optimal recovery. *J Strength Cond Res* 21: 1134–1138, 2007.
50. Kilduff LP, Owen N, Bevan H, Bennett M, Kingsley MI, Cunningham D. Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *J Sports Sci* 26: 795–802, 2008.
51. Luscher HR, Ruenzel P, Henneman E. (1983). Composite EPSPs in motoneurons of different sizes before and during PTP: implications for transmission failure and its relief in Ia projections. *J Neurophysiol* 49: 269-289.
52. MacDougall JD. *Hypertrophy or hyperplasia*. In: Komi PV (ed) *Strength and power in sport*. Blackwell, London, 1992, pp. 230–238.
53. Mahlfeld K, Franke J, Awiszus F. Postcontraction changes of muscle architecture in human quadriceps muscle. *Muscle Nerve* Apr 29: 597-600, 2004.
54. Mangus BC, Takahashi M, Mercer JA, Holcomb WR, McWhorter JW, Sanchez R. Investigation of vertical jump performance after completing heavy squat exercises. *J Strength Cond Res* 20: 587–600, 2006.
55. Manning D, Stull J. Myosin light chain phosphorylation dephosphorylation in mammalian skeletal muscle. *Am J Physiol* 11: 234-241, 1982.
56. Maughan RJ, Watson JS, Weir J. Relationships between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners. *Eur J Appl Physiol* 50: 309-318, 1983.
57. McCann MR, Flanagan SP. The effects of exercise selection and rest interval on postactivation potentiation of vertical jump performance. *J Strength Cond Res* 24: 1285–1291, 2010.

58. McIntosh BR, Rassier DE. What is fatigue? *Can J Appl Physiol* 27: 42-55, 2002.
59. McKenna MJ, Bangsbo J, Renaud JM. Muscle K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, and Cl disturbances and Na<sup>+</sup>- K<sup>+</sup> pump inactivation: implications for fatigue. *J Appl Physiol* 104: 288–295, 2008.
60. Mettler JA, Griffin L. Postactivation Potentiation and Muscular Endurance Training. *Muscle Nerve* 45: 416-425, 2012.
61. Miarka B, Del Vecchio FB, Franchini E. Acute effects and postactivation potentiation in the special judo fitness test. *J Strength Cond Res* 25: 427–431, 2011.
62. Mitchell CJ, Sale DG. Enhancement of Jump Performance after a 5-RM Squat is associated with Postactivation Potentiation. *Eur J Appl Physiol* 111: 1957-1963, 2011.
63. Μυρωτή Ο, Μάνου Β, Τασόπουλος Σ, Σταυρόπουλος Ν, Κέλλης Σ. Αρχιτεκτονικά Χαρακτηριστικά των Εκτεινόντων Μυών των κάτω άκρων και Κατακόρυφη Αλτική Ικανότητα Καλαθοσφαιριστών. *Αναζητήσεις στη Φυσική Αγωγή & τον Αθλητισμό* 6: 232-241, 2008.
64. Moir GL, Mergy D, Witmer CA, Davis SE. The acute effects of manipulating volume and load of back squats on countermovement vertical jump performance. *J Strength Cond Res* 25: 1486–1491, 2011.
65. Moore R, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles in situ. *Am J Physiol* 247: 462–471, 1984.
66. Morana C, Perrey S. Time course of postactivation potentiation during intermittent submaximal fatiguing contractions in endurance- and power-trained athletes. *J Strength Cond Res* 23: 1456–1464, 2009.
67. O’Leary DD, Hope K, Sale DG. Post-tetanic potentiation of human dorsiflexors. *J Appl Physiol* 83: 2131–2138, 1997.
68. Palmieri RM, Ingersoll CD, Hoffmann MA. The Hoffmann Reflex: Methodological Considerations and Applications for Use in Sports Medicine and Athletic Training Research. *J Athl Training* 39: 268-277, 2004.
69. Rassier DE, Macintosh BR. Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle. *Braz J Med Biol Res* 33: 499–508, 2000.
70. Rixon KP, Lamont HS, Bemben MG. Influence of type of muscle contraction, gender, and lifting experience on postactivation potentiation performance. *J Strength Cond Res* 21: 500–505, 2007.
71. Robbins DW. Postactivation Potentiation and Its Practical Applicability: A Brief Review. *J Strength Cond Res* 19: 453-458, 2005.
72. Ruben RM, Molinari MA, Bibbee C, Childress MA, Harman MS, Reed KP, Haff GG. The acute effects of an ascending squat protocol on performance during horizontal plyometric jumps. *J Strength Cond Res* 24: 358–369, 2010.
73. Saez Saez de Villarreal E, Gonzalez-Badillo JJ, Izquierdo M. Optimal warm-up stimuli of muscle activation to enhance short and long-term acute jumping performance. *European J Appl Physiol* Jul 100: 393-401, 2007.
74. Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. *Exercise Sport Sci Rev* 30: 138–143, 2002.
75. Sale DG. Postactivation potentiation: role in performance. *Br J Sports Med* 38: 386-387, 2004.
76. Smilios I, Pilianidis T, Sotiropoulos K, Antonakis M, Tokmakidis SP. Short-term effects of selected exercise and load in contrast training on vertical jump performance. *J Strength Cond Res* 19: 135-139, 2005.

77. Smith JC, Fry AC. Effects of a ten-second maximum voluntary contraction on regulatory myosin light-chain phosphorylation and dynamic performance measures. *J Strength Cond Res* 21: 73–76, 2007.
78. Sotiropoulos K, Smilios I, Christou M, Barzouka K, Spaias A, Douda H, Tokmakidis S. Effects of warm-up on vertical jump performance and muscle electrical activity using half-squats at low and moderate intensity. *J Sports Sci Med* 9: 326-331, 2010.
79. Stuart DS, Lingley MD, Grange RW, Houston ME. Myosin light chain phosphorylation and contractile performance of human skeletal muscle. *Can J Physiol Pharmacol* 66: 49–54, 1988.
80. Sweeney HL, Bowman FB, Stull JT. Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: regulation and function. *Am J Physiol* 264: 1085-1095, 1993.
81. Terzis G, Spengos K, Karampatsos G, Manta P, Georgiadis, G. Acute effect of drop jumping on throwing performance. *J Strength Cond Res* 23: 2592–2597, 2009.
82. Thorstensson A, Grimby G, Karlsson J. Force-velocity relations and fibre composition in human knee extensor muscles. *J Appl Physiol* 40: 12-16, 1976.
83. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post-activation potentiation and its effects on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med* 39: 147–166, 2009.
84. Trimble MH, Harp SS. Postexercise potentiation of the H-reflex in humans. *Med Sci Sports Exerc* 30: 933-941, 1998.
85. Tsolakis C, Bogdanis GC, Nikolaou A, Zacharogiannis E. Influence of type of muscle contraction and gender on postactivation potentiation of upper and lower limb explosive performance in elite fencers. *J Sports Sci Med* 10: 577-583, 2011.
86. Tsolakis C, Bogdanis GC. Acute Effects of Two Different Warm-Up Protocols on Flexibility and Lower Limb Explosive Performance in Male and Female High Level Athletes. *J Sports Sci Med* 11: 669-675, 2012.
87. Tubman LA, Macintosh BR, Maki WA. Myosin light chain phosphorylation and posttetanic potentiation in fatigued skeletal muscle. *Eur J Physiol* 431: 882-887, 1996.
88. Vandenboom R, Grange RW, Houston ME. Threshold for force potentiation associated with skeletal myosin phosphorylation. *Am J Physiol* 265: 1456–1462, 1993.
89. Vandenboom R, Grange RW, Houston ME. Myosin phosphorylation enhances rate of force development in fast-twitch skeletal muscle. *Am J Physiol* 268: 569–603, 1995.
90. Vandervoort AA, Quinlan J, McComas AJ. Twitch potentiation after voluntary contraction. *Exper Neurol* 81: 141–152, 1983.
91. Westerblad H, Allen DG. Emerging roles of ROS/RNS in muscle function and fatigue. *Antiox Redox Sign* 15: 2487–2499, 2011.
92. Xenofondos A, Laparidis K, Kyranoudis A, Galazoulas Ch, Bassa E, Kotzamanidis C. Post-Activation Potentiation: Factors affecting it and the effect on Performance. *J Phys Ed Sport* 28: 32-38, 2010.
93. Young WB, Jenner A, Griffiths K. Acute enhancement of power performance from heavy load squats. *J Strength Cond Res* 12: 82–84, 1998.





Ελληνική Εταιρεία Βιοχημείας και  
Φυσιολογίας της Άσκησης  
Hellenic Society of Biochemistry  
and Physiology of Exercise

Επιθεώρηση Βιοχημείας και  
Φυσιολογίας της Άσκησης  
1: 1-21, 2013

Reviews in Biochemistry and  
Physiology of Exercise  
1: 1-21, 2013

[www.eevfa.gr/web/emag](http://www.eevfa.gr/web/emag)

## PHYSIOLOGICAL BASIS OF POSTACTIVATION POTENTIATION IN SKELETAL MUSCLE AND PRACTICAL APPLICATIONS IN SPORT

Tsoukos, Athanasios; Veligeas, Panagiotis; Bogdanis, Gregory

*National and Kapodistrian University of Athens, Department of Physical Education & Sports  
Science*

### Abstract

Muscle force and power depends on both physiological characteristics and contraction history. Postactivation Potentiation (PAP) has been defined as the acute enhancement of muscle performance which occurs after a vigorous voluntary or an electrically evoked contraction. The main physiological mechanisms under the phenomenon of PAP are the phosphorylation of myosin light chains and the increased recruitment of high threshold motor units. The exercise that causes PAP is usually a dynamic or isometric contraction and is called activation exercise. This exercise also causes fatigue and thus muscle performance during the subsequent recovery period depends on the balance between PAP and fatigue. The factors that determine the balance between PAP and fatigue are the volume, the intensity and the type of muscle contraction of the activation exercise. The optimal duration of activation exercise via isometric contractions should not exceed 10 seconds. In dynamic contractions the optimal volume which appears to maximize PAP, ranges from 3 to 10 repetitions with an intensity of >80% of 1-RM. Muscular performance is increased 4-12 minutes after the activation exercise. However, significant increase of performance could be achieved with lower intensities (30-60% of 1-RM) in 1-2 minutes after the activation exercise. The expected improvement of muscle performance after isometric or dynamic exercise is around 2-9%. Strength and muscle fibre composition are important determinants for maximization of PAP. Subjects with a high percentage and/or greater cross sectional area of fast twitch muscle fibers show greater phosphorylation of myosin light chains and have a larger number of high threshold motor units that can lead to improved muscle performance. The PAP phenomenon can be used in sports practice during the warm-up, in order to have an acute enhancement of performance or during training to take an advantage from the long term effects of training with higher intensities.

### Address for correspondence

*Bogdanis, Gregory  
National and Kapodistrian University of Athens  
Department of Physical Education & Sports Science  
Ethnikis Antistasis 41, Athens 17237, Greece  
e-mail: [gbogdanis@phed.uoa.gr](mailto:gbogdanis@phed.uoa.gr)*