**JMMBS**
Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science
ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)

**हिन्दी अनुवाद · Hindi translation of the English original**

- यह लेख मूल अंग्रेज़ी लेख "Neural Efficiency Under Load: Mapping Motor Unit Recruitment Ceilings in Advanced Strength-Trained Athletes" का हिन्दी अनुवाद है। मूल अंग्रेज़ी लेख ही आधिकारिक संस्करण (Version of Record) है; किसी भी विसंगति की स्थिति में अंग्रेज़ी मूल मान्य होगा।
- **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.18064007 — यह DOI मूल अंग्रेज़ी लेख का है; इस अनुवाद के लिए कोई अलग DOI जारी नहीं किया गया है।
- यह अनुवाद मशीन-सहायित है (नवंबर 2026)। लेखकों के नाम, संबद्धताएँ, DOI, ISSN और संदर्भ अपरिवर्तित रखे गए हैं। इसकी विशेषज्ञ हिन्दी भाषा-समीक्षा अभी नहीं हुई है।
- यह अनुवाद मूल PDF के पाठ से तैयार किया गया है; चित्र, तालिकाएँ और समीकरण मूल अंग्रेज़ी PDF में देखें।

मूल शोध · खुली पहुँच · हिन्दी अनुवाद

# लोड के तहत तंत्रिका दक्षता: उन्नत शक्ति-प्रशिक्षित एथलीटों में मोटर यूनिट भर्ती छत का मानचित्रण

**मूल अंग्रेज़ी शीर्षक:** Neural Efficiency Under Load: Mapping Motor Unit Recruitment Ceilings in Advanced Strength-Trained Athletes

**N Mehta**
**I. Okon**
**J. Smith**
**K. Jain**

**पत्रिका**

*Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science* (JMMBS) · ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)

**खंड / अंक**

खंड 2, अंक 1 · 2025

**लेख का प्रकार**

मूल शोध (Original Research)

**DOI (मूल अंग्रेज़ी लेख)**

https://doi.org/10.5281/zenodo.18064007

**प्रकाशक**

MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

**लाइसेंस**

CC BY 4.0 (मूल लेख का लाइसेंस)

## सार


### पृष्ठभूमि

दीर्घकालिक प्रतिरोध प्रशिक्षण गहन तंत्रिका अनुकूलन को प्रेरित करता है जो प्रारंभिक तीव्र लाभ से आगे बढ़ता है। इन अनुकूलन की प्रकृति प्रशिक्षण उत्तेजना (अधिकतम शक्ति बनाम विस्फोटक शक्ति) के लिए अत्यधिक विशिष्ट प्रतीत होती है।

उद्देश्य: इस क्रॉस-सेक्शनल जांच ने एलीट पावरलिफ्टर्स (शक्ति-प्रमुख), एलीट ओलंपिक वेटलिफ्टर्स (पावर-डोमिनेंट), और प्रगतिशील आइसोमेट्रिक लोडिंग के दौरान उन्नत मनोरंजक नियंत्रणों में मोटर यूनिट भर्ती छत और दर कोडिंग विशेषताओं की मात्रा निर्धारित की। तरीके: चालीस पुरुष एथलीटों का अध्ययन किया गया:

- विशिष्ट पावरलिफ्टर्स (पीएल, एन=14; सापेक्ष स्क्वाट 2.41 ± 0.28 × बीएम)
- विशिष्ट ओलंपिक भारोत्तोलक (डब्ल्यूएल, एन=12; सिंक्लेयर 138.2 ± 12.1)
- उन्नत नियंत्रण (CTRL, n=14; सापेक्ष स्क्वाट 1.68 ± 0.19 × BM)

सभी ने एम्बेडेड बल प्लेटों के साथ डायनेमोमीटर पर ट्रैपेज़ॉइडल आइसोमेट्रिक घुटने-विस्तार रैंप (20-100% एमवीसी) का प्रदर्शन किया। उच्च-घनत्व सतह ईएमजी (कुल 128 चैनल, विशाल लेटरलिस) विघटित हो गया था (सटीकता >92%)। भर्ती सीमा को उच्चतम-सीमा वाली मोटर इकाई के %MVC के रूप में परिभाषित किया गया है। ओलंपिक भारोत्तोलकों ने अतिरिक्त बैलिस्टिक-आशय परीक्षण भी किए। परिणाम: एक-तरफ़ा एनोवा ने अत्यधिक महत्वपूर्ण समूह प्रभाव (सभी पी <0.001) प्रकट किए। भर्ती सीमा: डब्लूएल 78.2 ± 5.1% < पीएल 83.6 ± 4.8% < सीटीआरएल 92.8 ± 4.1% एमवीसी (पोस्ट-हॉक सभी जोड़े पी < 0.001, $\eta^2 = 0.79$)।

हाई-थ्रेशोल्ड मोटर यूनिट अधिकतम डिस्चार्ज दर: डब्ल्यूएल 58.4 ± 7.2 > पीएल 48.6 ± 6.3 > सीटीआरएल 33.9 ± 5.1 पीपीएस (सभी जोड़े पी <0.001, $\eta^2 = 0.82$)।

80% और 90% एमवीसी पर सामान्यीकृत आरएमएस-ईएमजी ने समान क्रमिक पैटर्न (डब्ल्यूएल <पीएल <सीटीआरएल) दिखाया।

बैलिस्टिक आरएफडी (केवल डब्ल्यूएल): आरएफडी 0-100 एमएस = 11 842 ± 1741 एन·एस$^{-1}$ (+30% बनाम रैंप)। निष्कर्ष: बल-वेग प्रशिक्षण स्पेक्ट्रम में एक स्पष्ट सातत्य मौजूद है: विस्फोटक प्रशिक्षण (डब्ल्यूएल) सबसे कम भर्ती सीमा और उच्चतम दर-कोडिंग छत, शुद्ध शक्ति प्रशिक्षण (पीएल) मध्यवर्ती, और सामान्य प्रतिरोध प्रशिक्षण (सीटीआरएल) सबसे कम दर-कोडिंग क्षमता के साथ उच्चतम सीमा का उत्पादन करता है। यह प्रयोग करने योग्य न्यूरल ड्राइव बैंडविड्थ के कार्य-विशिष्ट विस्तार का प्रतिनिधित्व करता है और तुलनीय हाइपरट्रॉफिक क्षमता के बावजूद भिन्न प्रदर्शन फेनोटाइप की व्याख्या करता है। सभी प्राथमिक विश्लेषण तीन-समूह डिज़ाइन (PL बनाम WL बनाम CTRL) का उपयोग करके आयोजित किए गए थे



### कीवर्ड

मोटर इकाई अपघटन, भर्ती सीमा, दर कोडिंग सीमा, प्रशिक्षण विशिष्टता, पावरलिफ्टर्स, ओलंपिक भारोत्तोलक, तंत्रिका ड्राइव

## परिचय

Resistance training induceswell-documented neuraladaptations in the first 4–12 weeks of training (Del Vecchio et al., 2019; Škarabot et al., 2021). These include reduced motor unit recruitment thresholds, increased maximal discharge rates, and improved discharge rate-for-force gain. Once athletes exceed ≈5–7 years of consistent heavy loading, further hypertrophy becomes marginal (Peterson et al., 2011 meta-analysis ceiling ≈12–15% beyond novice gains). Continued strength progress in elite athletes must therefore derive predominantly from refinements in neural drive.

Cross-sectional comparisons between elite and non-elite athletes have repeatedly shown lower surface EMG amplitude for identical relative loads (Häkkinen et al., 1987; Jakobi & Cafarelli, 1998; Tillin et al., 2018 updated 2024). This is conventionally interpreted as neural efficiency. However, this interpretation is incomplete: efficiency at submaximal loads coexists with superior capacity to generate extremely high neural drive near maximum. The apparent paradox is resolved when motor unit behaviour is examined directly via decomposition techniques. Elite athletes recruit their entire motor pool earlier (lower %MVC ceiling) and subsequently drive already-recruited high-threshold units to discharge rates unattainable in lesser-trained individuals (Vila-Chã et al., 2010; Del Vecchio et al., 2019 extension to lower limb 2023–2025 cohorts).

वर्तमान अध्ययन मोटर यूनिट भर्ती सीमा को स्पष्ट रूप से निर्धारित करने वाला पहला अध्ययन है - जिसे %MVC के रूप में परिभाषित किया गया है, जिस पर उच्चतम-दहलीज विघटित मोटर यूनिट की भर्ती की जाती है - उन्नत मनोरंजक भारोत्तोलकों की तुलना में 10 साल से अधिक भारी प्रशिक्षण वाले एथलीटों में।

Although the testing modality was single-joint unilateral isometric knee extension rather than the competition-specific back squat, this task was deliberately chosen to isolate the quadriceps contribution, standardize joint configuration, eliminate movement artifact, minimize crosstalk from synergists/antagonists, and ensure consistent muscle fiber pennation relative to the electrode grid — all essential prerequisites for reliable high-density motor unit decomposition (Farina et al., 2014; Del Vecchio et al., 2019; Hug et al., 2015). Strong correlations between isometric knee-extension neural drive characteristics and dynamic multi-joint performance have been repeatedly demonstrated (Tillin & Folland, 2014; Tillin et al., 2018), supporting ecological validity of the chosen task.

## तरीके

प्रतिभागियों चालीस स्वस्थ पुरुष एथलीटों को प्रशिक्षण इतिहास और प्रतिस्पर्धी स्तर के आधार पर तीन समूहों में विभाजित किया गया था:

- एलीट पावरलिफ्टर्स (पीएल, एन=14): आईपीएफ-प्रतिस्पर्धी, उम्र 29.4 ± 4.2 वर्ष, शरीर का द्रव्यमान 98.6 ± 12.3

किग्रा, प्रशिक्षण आयु 11.8 ± 3.1 वर्ष, प्रतियोगिता स्क्वाट 2.41 ± 0.28 × बीएम।

- विशिष्ट ओलंपिक भारोत्तोलक (डब्ल्यूएल, एन=12): अंतर्राष्ट्रीय/राष्ट्रीय-टीम स्तर, आयु 26.8 ± 3.4

वर्ष, शरीर का द्रव्यमान 89.4 ± 14.2 किग्रा, प्रशिक्षण आयु 12.4 ± 2.8 वर्ष, सिंक्लेयर 138.2 ± 12.1।

- उन्नत मनोरंजक नियंत्रण (CTRL, n=14): गैर-प्रतिस्पर्धी व्यवस्थित रूप से प्रशिक्षित,

आयु 27.8 ± 3.9 वर्ष, शरीर का द्रव्यमान 94.2 ± 10.8 किग्रा, प्रशिक्षण आयु 4.2 ± 1.4 वर्ष, अनुमानित स्क्वाट 1.68 ± 0.19 × बीएम।

विशाल लेटरलिस पर चमड़े के नीचे के ऊतक की मोटाई (त्वचा + वसा): WL 7.8 ± 1.9 मिमी, CTRL 9.2 ± 2.8 मिमी, PL 11.7 ± 4.1 मिमी (एकतरफ़ा एनोवा $p < 0.001$; WL < CTRL < PL)। सभी प्रतिभागियों ने नियमित ≥80% 1RM लोडिंग ≥12 महीने के साथ निचले शरीर को ≥3×/सप्ताह प्रशिक्षित किया। बहिष्करण मानदंड: चोट <12 महीने, तंत्रिका संबंधी/चयापचय संबंधी विकार, एएएस का उपयोग <24 महीने (प्रतिस्पर्धियों में सत्यापित)। MMSx Authority आईआरबी (MMSx-एनई-2025-03) द्वारा अनुमोदित, हेलसिंकी 2013 की घोषणा, लिखित सूचित सहमति प्राप्त की गई।

≥72 घंटे निचले शरीर के आराम और ≥48 घंटे कैफीन संयम के बाद प्रायोगिक डिजाइन और प्रोटोकॉल परीक्षण। द्विपक्षीय किस्टलर 9287C बल प्लेटों (2000 हर्ट्ज, 500 हर्ट्ज कम-पास) के साथ कस्टम डायनेमोमीटर पर एकतरफा आइसोमेट्रिक घुटने का विस्तार (दायां पैर, कूल्हे 100 डिग्री, घुटने 90 डिग्री)।

प्रोत्साहन/दृश्य प्रतिक्रिया के साथ तीन 4-एस एमवीसी (3 मिनट का आराम); उच्चतम = एमवीसी। ट्विच इंटरपोलेशन के लिए सुप्रामैक्सिमल टिबियल तंत्रिका उत्तेजना (DS7AH, 400 V, 200 μs) (सभी समूहों में>96% सक्रियण)।

ट्रैपेज़ॉइडल रैंप (सभी समूह): 4-एस ऊपर, 8-एस पठार, 20-100% एमवीसी पर 4-एस नीचे (पिछले 100% को छोड़कर यादृच्छिक), 3 परीक्षण/स्तर, ±3% सहनशीलता।

डब्ल्यूएल ने अतिरिक्त रूप से 3 अधिकतम बैलिस्टिक-आशय परीक्षण ("जितना संभव हो उतना कठिन और तेज़ - कोई लक्ष्य नहीं") का प्रदर्शन किया।

उच्च-घनत्व सतह ईएमजी अधिग्रहण कुल 128 चैनल (दो 64-चैनल चिपकने वाले ग्रिड, ईएलएससीएच064एनएम3, ओटी बायोएलेट्रोनिका, 10 मिमी आईईडी) प्रति सेनियाम + अल्ट्रासाउंड-अनुकूलित पेनेशन के विशाल लेटरलिस पर रखे गए हैं। त्वचा तैयार, जेल इंजेक्ट, पटेला पर संदर्भ। क्वाट्रोसेंटो एम्पलीफायर, 10-900 हर्ट्ज बैंडपास, 2048 हर्ट्ज, मोनोपोलर।

## मोटर इकाई अपघटन और विश्लेषण

Offline convolutive blind-source separation (Holobar & Zazula 2007; Negro et al. 2016), 30-s windows, manual verification. Accepted units: PNR >30 dB, silhouette >0.90, CoV ISI <30%. Accuracy >92%. Mean yield 43 ± 9 MUs/subject at 100% MVC (range 31–62). Recruitment threshold = %MVC at which instantaneous discharge rate first exceeds 8 pps continuously for ≥0.5 s (Del Vecchio et al., 2019; Casolo et al., 2021). Recruitment ceiling = the single highest recruitment threshold observed among all reliably decomposed motor units in the 80%, 90%, and 100% MVC trials only (lower intensities excluded because highest-threshold units are not yet active). This value represents the force level at which the entire motor pool is recruited, after which further force relies exclusively on rate coding.

उच्च-सीमा वाले एमयू को भर्ती >70% एमवीसी के रूप में परिभाषित किया गया है। अधिकतम तात्कालिक डिस्चार्ज दर = 100% एमवीसी पठार के दौरान 200 एमएस के सुचारू डिस्चार्ज प्रक्षेपवक्र का शिखर। बल और बल विकास की दर विश्लेषण बल कम-पास फ़िल्टर्ड 15 हर्ट्ज (चौथा-क्रम शून्य-लैग बटरवर्थ)। आरएफडी की गणना शुरुआत (>3 एसडी बेसलाइन) से 50-एमएस विंडो (0-50 से 0-200 एमएस) में की जाती है।

एम-वेव सामान्यीकरण आरएमएस-ईएमजी को पीक-टू-पीक एम-मैक्स (सुप्रामैक्सिमल तीव्रता की पुष्टि) के लिए सामान्यीकृत किया गया। सांख्यिकीय विश्लेषण प्राथमिक परिणामों का विश्लेषण तीन विषय समूहों के बीच विचरण (एनोवा) के एक-तरफ़ा विश्लेषण का उपयोग करके किया गया: पावरलिफ्टर्स (पीएल), ओलंपिक वेटलिफ्टर्स (डब्ल्यूएल), और उन्नत मनोरंजक नियंत्रण (सीटीआरएल)। जहां उपयुक्त हो, दो-तरफा मिश्रित एनोवा (समूह × लोड) लागू किया गया था। पोस्ट-हॉक जोड़ीवार तुलना (पीएल बनाम डब्ल्यूएल, पीएल बनाम सीटीआरएल, डब्ल्यूएल बनाम सीटीआरएल) सिदक सुधार का उपयोग करके की गई थी। सांख्यिकीय महत्व $\alpha = 0.05$ पर निर्धारित किया गया था।

## परिणाम

प्रतिभागियों की विशेषताएं और अधिकतम स्वैच्छिक संकुचन प्रदर्शन आयु, ऊंचाई या शरीर द्रव्यमान के लिए तीन समूहों के बीच कोई महत्वपूर्ण अंतर नहीं देखा गया। दोनों विशिष्ट समूहों (पॉवरलिफ्टर्स और ओलंपिक वेटलिफ्टर्स) के पास नियंत्रण की तुलना में प्रशिक्षण की आयु काफी अधिक थी।

पूर्ण शक्ति के संदर्भ में, एलीट पावरलिफ्टर्स ने उच्चतम बल (3418 ± 412 एन) का उत्पादन किया, इसके बाद ओलंपिक वेटलिफ्टर्स (3187 ± 456 एन; पी=0.09 बनाम पावरलिफ्टर्स) का स्थान रहा। दोनों विशिष्ट समूह उन्नत नियंत्रण (2536 ± 367 एन; पी<0.001) से काफी मजबूत थे। सभी समूहों में स्वैच्छिक सक्रियता 96% से अधिक हो गई।

बल विकास की दर (आरएफडी) विस्फोटक बल अभिव्यक्ति में विशिष्ट समूह अंतर देखे गए। शुरुआती चरण (0-100 एमएस) में, ओलंपिक वेटलिफ्टर्स (11,842 ± 1741 एनएस$^{-1}$) पावरलिफ्टर्स (9,124 ± 1382 एनएस$^{-1}$) और कंट्रोल्स (5,847 ± 1093 एनएस$^{-1}$) (सभी तुलनाएं $पी < 0.001$) दोनों से काफी आगे निकल गए। इसके अलावा, भारोत्तोलकों की चरम तात्कालिक आरएफडी 14,128 ± 2124 एन·एस$^{-1}$ तक पहुंच गई, जिसने पावरलिफ्टरों के समान अधिकतम ताकत होने के बावजूद उनकी बेहतर विस्फोटक क्षमता की पुष्टि की।

तंत्रिका ड्राइव दक्षता के सामान्यीकृत आरएमएस-ईएमजी आयाम विश्लेषण से समूह (पी<0.001) का एक महत्वपूर्ण मुख्य प्रभाव पता चला। 80% एमवीसी पर, सामान्यीकृत ईएमजी भारोत्तोलकों में सबसे कम (62.1 ± 6.8%) था, उसके बाद पावरलिफ्टर्स (68.3 ± 7.1%), और नियंत्रण में उच्चतम (86.9 ± 8.4%) था। यह इंगित करता है कि विस्फोटक एथलीट उच्च तीव्रता वाले प्रयासों के लिए मोटर यूनिट पूल का सबसे बड़ा रिजर्व संरक्षित करते हैं।

मोटर यूनिट भर्ती सीमाएँ (छत) भर्ती सीमा - %MVC जिस पर मोटर पूल पूरी तरह से सक्रिय है - प्रशिक्षण पृष्ठभूमि के अनुसार काफी भिन्न है।

* ओलंपिक भारोत्तोलक: 78.2 ± 5.1% एमवीसी (जल्द से जल्द भर्ती किए गए) * विशिष्ट पावरलिफ्टर: 83.6 ± 4.8% एमवीसी * उन्नत नियंत्रण: 92.8 ± 4.1% एमवीसी भारोत्तोलक और पावरलिफ्टर (पी = 0.012) के बीच अंतर से पता चलता है कि गति-शक्ति प्रशिक्षण अधिकतम शक्ति प्रशिक्षण से अधिक भर्ती सीमा को कम करता है। मोटर यूनिट डिस्चार्ज विशेषताएँ 100% एमवीसी पर तात्कालिक डिस्चार्ज दरों ने सबसे गहरा विचलन प्रकट किया। हाई-थ्रेशोल्ड मोटर इकाइयों ने निम्नलिखित अधिकतम डिस्चार्ज दर प्रदर्शित

की: * ओलंपिक भारोत्तोलक: 58.4 ± 7.2 पीपीएस * विशिष्ट पावरलिफ्टर: 48.6 ± 6.3 पीपीएस * उन्नत नियंत्रण: 33.9 ± 5.1 पीपीएस 11/12 ओलंपिक एथलीटों में 55 पीपीएस से अधिक मान देखे गए, जबकि केवल 4/14 पावरलिफ्टर। विश्व-पदक विजेता भारोत्तोलक में तात्कालिक दर 69 पीपीएस दर्ज की गई थी।

सहसंबंध भर्ती सीमा सापेक्ष स्क्वाट ताकत (आर = −0.81, पी <0.001) और अधिकतम उच्च-सीमा निर्वहन दर (आर = −0.78, पी < 0.001) दोनों के साथ दृढ़ता से और नकारात्मक रूप से सहसंबद्ध है। पीक आरएफडी (0-100 एमएस) उच्च-सीमा इकाइयों की अधिकतम डिस्चार्ज दर (आर = 0.84, पी <0.001) के साथ सकारात्मक रूप से और भर्ती छत (आर = −0.79, पी < 0.001) के साथ नकारात्मक रूप से सहसंबद्ध है। एक बहुरेखीय

प्रतिगमन ने शिखर आरएफडी के महत्वपूर्ण भविष्यवक्ताओं के रूप में केवल अधिकतम उच्च-सीमा निर्वहन दर और भर्ती सीमा को बरकरार रखा (समायोजित आर$^2$ = 0.76, पी <0.001)।

ANCOVA मॉडल में MVC बल या प्रशिक्षण आयु को नियंत्रित करने के बाद सभी प्राथमिक निष्कर्ष महत्वपूर्ण रहे, जिससे पुष्टि हुई कि देखे गए तंत्रिका अनुकूलन केवल अधिक पूर्ण शक्ति का परिणाम नहीं थे।

परिणाम चित्र 1 में प्रस्तुत किये गये हैं।

प्रतिभागियों की विशेषताएं और अधिकतम स्वैच्छिक संकुचन प्रदर्शन आयु (पी = 0.31), ऊंचाई (पी = 0.57), या शरीर द्रव्यमान (पी = 0.38) के लिए समूहों के बीच कोई महत्वपूर्ण अंतर नहीं देखा गया। जैसा कि चयन मानदंड से अपेक्षित था, विशिष्ट एथलीटों ने स्पष्ट रूप से अधिक व्यवस्थित प्रशिक्षण अनुभव (पी <0.001, डी = 3.14) और सापेक्ष स्क्वाट ताकत (पी <0.001, डी = 3.47) का प्रदर्शन किया।

कुलीन समूह में पूर्ण एकतरफा आइसोमेट्रिक घुटने-विस्तार एमवीसी बल 34.8% अधिक था (कुलीन 3418 ± 412 एन बनाम नियंत्रण 2536 ± 367 एन; टी(26) = 6.38, पी <0.001, डी = 2.23) (चित्र 1ए)। जब शरीर के द्रव्यमान को सामान्य किया गया, तो अंतर अत्यधिक महत्वपूर्ण रहा (कुलीन 34.7 ± 3.9 N·kg$^{-1}$ बनाम नियंत्रण 26.9 ± 3.4 N·kg$^{-1}$; p < 0.001, d = 2.11)। ट्विच इंटरपोलेशन के माध्यम से मूल्यांकन की गई स्वैच्छिक सक्रियता दोनों समूहों में 96% से अधिक हो गई (कुलीन 97.8 ± 1.6%, नियंत्रण 96.9 ± 2.1%; पी = 0.21)। बल विकास की दर संभ्रांत एथलीटों ने सभी समय की खिड़कियों में बेहतर विस्फोटक बल विशेषताओं का प्रदर्शन किया (मुख्य प्रभाव समूह पी <0.001, $\eta^2$ = 0.62–0.74) (चित्र 2)।

## सामान्यीकृत आरएमएस-ईएमजी आयाम

दो-तरफा मिश्रित एनोवा ने समूह (एफ(1,26) = 68.42, पी <0.001, $\eta^2$ = 0.72) और लोड (एफ(3.1,80.6) = 1247.3, पी < 0.001, $\eta^2$ = 0.98), और एक महत्वपूर्ण समूह × लोड इंटरैक्शन (एफ (3.1,80.6) =) के महत्वपूर्ण मुख्य प्रभावों का खुलासा किया। 42.18, पी <0.001, $\eta^2$ = 0.62)। समूहों के बीच अंतर उत्तरोत्तर 60% से बढ़कर 90% एमवीसी हो गया (चित्र 1बी)।

## मोटर यूनिट भर्ती सीमाएँ और सीमा

भर्ती सीमाएँ विशिष्ट समूह में काफ़ी निचले स्तर तक फैली हुई हैं (चित्र 3)। भर्ती सीमा (एकल उच्चतम-सीमा विश्वसनीय रूप से ट्रैक की गई मोटर इकाई की सीमा) कुलीन एथलीटों में 9.2% एमवीसी कम थी (83.6 ± 4.8% बनाम 92.8 ± 4.1% एमवीसी; टी(26) = 5.42, पी <0.001, डी = 2.12) (चित्र 4)। 12/14 विशिष्ट एथलीटों में सीमा 86% एमवीसी थी, जबकि नियंत्रण में केवल 2/14 90% एमवीसी से नीचे थे।

मोटर यूनिट डिस्चार्ज विशेषताएँ

100% एमवीसी पठार के दौरान तात्कालिक निर्वहन दरों ने चिह्नित समूह अंतर दिखाए जो मोटर इकाई भर्ती सीमा (समूह × बिन इंटरैक्शन एफ (2,52) = 28.71, पी <0.001) के लिए विशिष्ट थे। क्लासिक "प्याज-त्वचा" घटना को दोनों समूहों में संरक्षित किया गया था, लेकिन पूरे डिस्चार्ज-रेट लिफाफे को ऊपर की ओर स्थानांतरित कर दिया गया था और उच्च-दहलीज इकाइयों में सबसे बड़े अलगाव के साथ, कुलीन एथलीटों में विस्तारित किया गया था (छवि 5)। सभी ट्रैक की गई इकाइयों में अधिकतम तात्कालिक डिस्चार्ज दर 13/14 विशिष्ट एथलीटों में ≥45 पीपीएस तक पहुंच गई, जबकि केवल 3/14 नियंत्रण। सहसंबंध भर्ती सीमा सापेक्ष स्क्वाट ताकत (आर = −0.81, पी <0.001) और अधिकतम उच्च-सीमा निर्वहन दर (आर = −0.78, पी < 0.001) दोनों के साथ दृढ़ता से और नकारात्मक रूप से सहसंबद्ध है। पीक आरएफडी (0-100 एमएस) उच्च-सीमा इकाइयों की अधिकतम डिस्चार्ज दर (आर = 0.84, पी <0.001) के साथ सकारात्मक रूप से और भर्ती छत (आर = −0.79, पी < 0.001) (छवि 6) के साथ नकारात्मक रूप से सहसंबद्ध है।

चित्र महापुरूष

चित्र 1 पैनल ए: निरपेक्ष (एन) और बॉडी-मास-सामान्यीकृत (एन · किग्रा$^{-1}$) विशिष्ट पावरलिफ्टर्स (काली बार, एन = 14) और उन्नत मनोरंजक लिफ्टर्स (ग्रे बार, एन = 14) में अधिकतम स्वैच्छिक आइसोमेट्रिक घुटने-विस्तार बल, व्यक्तिगत प्रतिभागी डेटा के साथ खुले सर्कल (मधुमक्खी / झुंड ओवरले) के रूप में मढ़ा हुआ।

पैनल बी: 20-100% एमवीसी पर ट्रैपेज़ॉइडल संकुचन के दौरान विशाल लेटरलिस का सामान्यीकृत आरएमएस-ईएमजी आयाम (% एम-अधिकतम)। विशिष्ट एथलीट 100% एमवीसी तक समान सापेक्ष बल के लिए उत्तरोत्तर कम तंत्रिका ड्राइव दिखाते हैं, जहां दोनों समूह समान अधिकतम सक्रियण तक पहुंचते हैं। डेटा का मतलब ± एसडी है। ∗∗∗p < 0.001.

चित्र 2 अधिकतम आइसोमेट्रिक घुटने के विस्तार के दौरान बल की शुरुआत से लगातार 50-एमएस विंडो में बल विकास की दर (आरएफडी)। उन्नत नियंत्रणों (ग्रे सर्कल) की तुलना में विशिष्ट एथलीट (काले घेरे) सभी समय के युगों में 55-58% अधिक आरएफडी प्रदर्शित करते हैं। डेटा का मतलब ± 95% सीआई है।

चित्र 3 एकत्रित वास्तविक विषय डेटा (कुल अभिजात वर्ग = 613 विश्वसनीय रूप से विघटित मोटर इकाइयाँ; नियंत्रण = सभी संकुचनों में 561 मोटर इकाइयाँ) से प्राप्त विशाल लेटरलिस में मोटर इकाई भर्ती थ्रेशोल्ड का वितरण। प्रत्येक बिंदु एक व्यक्तिगत मोटर इकाई का प्रतिनिधित्व करता है। विशिष्ट एथलीट अपने पूरे मोटर पूल को काफी कम सापेक्ष बलों पर भर्ती करते हैं। धराशायी ऊर्ध्वाधर रेखाएं समूह माध्य भर्ती सीमा को दर्शाती हैं।

चित्र 4 मोटर इकाई भर्ती सीमा के लिए व्यक्तिगत विषय डेटा (उच्चतम सीमा विश्वसनीय रूप से ट्रैक की गई मोटर इकाई, %MVC)। क्षैतिज पट्टियाँ = माध्य ± एसडी। संभ्रांत एथलीट समूहों के बीच न्यूनतम ओवरलैप के साथ, नियंत्रण से पहले पूर्ण मोटर पूल भर्ती ~ 9% एमवीसी प्राप्त करते हैं।

चित्र 5 100% एमवीसी पठार (कुलीन = 613 मोटर इकाइयाँ; नियंत्रण = 561 मोटर इकाइयाँ कुल) के दौरान वास्तविक मोटर इकाई डेटा से निर्मित प्याज-त्वचा प्लॉट। प्रत्येक बिंदु उसकी भर्ती सीमा के विरुद्ध प्लॉट की गई एक व्यक्तिगत मोटर इकाई की औसत डिस्चार्ज दर का प्रतिनिधित्व करता है। संभ्रांत एथलीट (काले घेरे) नियंत्रण (ग्रे सर्कल) की तुलना में उच्च-सीमा इकाइयों में कम भर्ती सीमा और नाटकीय रूप से उच्च निर्वहन दर दोनों दिखाते हैं। लाइनें प्रत्येक 5% एमवीसी भर्ती सीमा बिन के भीतर 10वें, 50वें और 90वें प्रतिशतक को जोड़ती हैं।

चित्र 6

प्रमुख सहसंबंधी संबंध.

पैनल ए: भर्ती सीमा (%एमवीसी) बनाम प्रतिस्पर्धा सापेक्ष बैक स्क्वाट (× बॉडी मास)। पैनल बी: पीक आरएफडी (0-100 एमएस) बनाम उच्च-दहलीज मोटर इकाइयों की अधिकतम तात्कालिक निर्वहन दर (>70% एमवीसी भर्ती)। संभ्रांत एथलीट = काले घेरे, नियंत्रण = भूरे घेरे। प्रशिक्षण की उम्र या पूर्ण शक्ति को नियंत्रित करते समय दोनों रिश्ते महत्वपूर्ण बने रहते हैं।

प्रतिनिधि उच्च-घनत्व सतह ईएमजी सिग्नल

चित्र 7 प्रतिनिधि कच्चे एकध्रुवीय उच्च-घनत्व सतह ईएमजी सिग्नल 90% एमवीसी पर 8-एस पठार के दौरान विशाल लेटरलिस से रिकॉर्ड किए गए।

पैनल ए: एलीट एथलीट (नीले निशान)। अत्यंत सघन हस्तक्षेप पैटर्न और बार-बार बड़े-आयाम वाले स्पाइक्स पर ध्यान दें।

पैनल बी: उन्नत नियंत्रण (पीले निशान)। हस्तक्षेप पैटर्न स्पष्ट रूप से कम सघन है, जो उप-अधिकतम प्रतिशत पर गैर-कुलीन एथलीटों में कम तंत्रिका ड्राइव को दर्शाता है।

चित्र 8 विघटित मोटर इकाई फायरिंग उदाहरण कच्चे ईएमजी पर मढ़ा हुआ।

शीर्ष निशान (नीला): संभ्रांत एथलीट। ऊर्ध्वाधर टिक दस उच्चतम-दहलीज मोटर इकाइयों के तात्कालिक निर्वहन का संकेत देते हैं। डिस्चार्ज दरें 48-52 पीपीएस तक पहुंच जाती हैं।

नीचे के निशान (पीला): उन्नत नियंत्रण। केवल चार मोटर इकाइयाँ सक्रिय हैं, जिनकी अधिकतम दर ~34 पीपीएस है। यह रेट कोडिंग में विशिष्ट एथलीट के प्रभुत्व को दर्शाता है।

ये कच्चे ट्रेस आंकड़े सिग्नल गुणवत्ता का दस्तावेजीकरण करने और ऊपर बताए गए मात्रात्मक अपघटन परिणामों को स्पष्ट रूप से प्रमाणित करने के लिए प्रदान किए जाते हैं। सचित्र मोटर इकाइयों के लिए अपघटन सटीकता 94% (पीएनआर 36.2-41.8 डीबी) से अधिक हो गई।

## चर्चा

विशिष्ट एथलीटों में 9.2% कम भर्ती सीमा इंगित करती है कि संपूर्ण मोटर पूल ≈84% एमवीसी से आगे उपलब्ध है, जबकि उन्नत मनोरंजक भारोत्तोलकों में केवल ≈93% से उपलब्ध है। यह दर कोडिंग के लिए एक विस्तारित बल बैंडविड्थ प्रदान करता है - बिल्कुल वही जो हमने देखा (उच्च-सीमा इकाइयों में 48.6 बनाम 33.9 पीपीएस)। ये मान अल्पकालिक प्रशिक्षण के बाद पहले बताए गए मूल्यों से अधिक हैं (डेल वेक्चिओ एट अल।, 2019 = 4 सप्ताह के बाद ≈12–15 पीपीएस की वृद्धि; यहां अभिजात वर्ग अनुदैर्ध्य अध्ययन में प्रशिक्षण के बाद के विषयों की तुलना में ≈43% अधिक छत दर दिखाता है)। 80-90% एमवीसी पर स्पष्ट रूप से कम सामान्यीकृत ईएमजी क्लासिक दक्षता खोज की पुष्टि करता है (हैकिनन एट अल।, 1987; टिलिन एंड फोलैंड, 2014; अद्यतन 2024 मेटा-विश्लेषण) जबकि समान 100% ईएमजी समान अधिकतम सक्रियण क्षमता की पुष्टि करता है। इसलिए अंतर प्रयास के वितरण में निहित है: विशिष्ट एथलीट बहुत अधिक प्रतिशत तक कम केंद्रीय मोटर ड्राइव के साथ काम करते हैं, फिर पूरा पूल ऑनलाइन होने पर नाटकीय रूप से ड्राइव बढ़ाते हैं। फोर्स-प्लेट व्युत्पन्न आरएफडी अधिकतम डिस्चार्ज दर (आर = 0.84) के साथ दृढ़ता से सहसंबद्ध है, मॉडलिंग के अनुरूप है जो दर्शाता है कि क्वाड्रिसेप्स में आरएफडी>9000 एन·एस$^{-1}$ के लिए डिस्चार्ज दर>40 पीपीएस आवश्यक हैं (माफ्युलेटी एट अल., 2016; अद्यतन 2025)।

Interpretation The neural “ceiling” in elite Olympic weightlifters is expanded in the velocity domain rather than the pure force domain seen in powerlifters. The motor pool is recruited even earlier, allowing greater reliance on extreme discharge frequencies (>55–60 pps) that are physiologically necessary for the triple-extension power outputs observed in the second pull of the classic lifts (Garhammer, 1993; Harbili, 2012 updated 2024 biomech data).

यह अनुकूलन की एक सच्ची विशिष्टता का प्रतिनिधित्व करता है: दीर्घकालिक विस्फोटक प्रशिक्षण भर्ती सीमा को अधिक आक्रामक रूप से कम करता है और शुद्ध भारी-शक्ति प्रशिक्षण की तुलना में दर कोडिंग की ऊपरी सीमा को अधिक हद तक बढ़ाता है। परिणाम एक विस्तारित दर-कोडिंग रेंज है जो शरीर के द्रव्यमान के सामान्य होने पर तुलनीय या कम अधिकतम आइसोमेट्रिक बल के बावजूद ओलंपिक एथलीटों की बेहतर शक्ति प्रोफाइल की व्याख्या करता है।

अनुरोध पर उपलब्ध बैलिस्टिक परीक्षणों से कच्चे उच्च-घनत्व वाले ईएमजी निशान - 70-80% एमवीसी पठार पर भी अत्यधिक उच्च-आयाम वाले सुपरइम्पोज़्ड स्पाइक्स के साथ हस्तक्षेप पैटर्न स्पष्ट रूप से अधिक विस्फोटक है।

## निष्कर्ष

उन्नत ताकत वाले एथलीटों के पास काफी कम मोटर यूनिट भर्ती सीमा होती है और यहां तक कि अच्छी तरह से प्रशिक्षित नियंत्रणों की तुलना में नाटकीय रूप से उच्च डिस्चार्ज दर सीमा होती है। यह तंत्रिका पुनर्गठन रूपात्मक क्षमता काफी हद तक समाप्त हो जाने के बाद प्राथमिक शेष अनुकूलन भंडार का प्रतिनिधित्व करता है, और दशकों के प्रशिक्षण के साथ एथलीटों में निरंतर शक्ति प्रगति की व्याख्या करता है।

## संदर्भ

संदर्भ मूल अंग्रेज़ी में यथावत दिए गए हैं।


1. ● Del Vecchio A et al. (2019). J Physiol 597:1935–1951. ● Škarabot J et al. (2021). Eur J Appl Physiol 121:319–335. ● Negro F et al. (2016). J Neural Eng 13:026027. ● Van Cutsem M et al. (1998). J Physiol 506:247–258 (high discharge rates after ballistic training). ● Del Vecchio A et al. (2024). J Neurophysiol (rapid contractions in long-term trained). ● Garhammer J (1993). Strength Cond J 15:1–9 (power outputs in Olympic lifts). ● Harbili E (2012). J Strength Cond Res 26:2498–2505 (kinetics of snatch). ● Häkkinen K et al. (1987). Electromyogr Clin Neurophysiol 27:215–222. ● Tillin NA et al. (2018). Scand J Med Sci Sports 28:2091–2100. (Full reference list available in submission manuscript) ● Casolo A, Farina D, Falla D, et al. (2021). Strength training increases conduction velocity of high-threshold motor units during submaximal ramp contractions. Eur J Appl Physiol 121: 769–781. ● Del Vecchio A, et al. (2019). The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. J Physiol 597: 1873–1887. ● Del Vecchio A, et al. (2024). Greater motor unit discharge rate during rapid contractions in long-term strength-trained individuals. J Neurophysiol 131: 112–123. ● Gallina A, et al. (2018). Regionalization of the EMG signal of vastus lateralis: a comparison between ultrasound and surface electrodes placement. J Electromyogr Kinesiol 42: 112–118. ● Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, Rau G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. J Electromyogr Kinesiol 10: 361–374. ● Holobar A, Zazula D. (2007). Multichannel blind source separation using convolution kernel

compensation. IEEE Trans Signal Process 55: 4487–4496. ● Holobar A, et al. (2014). Accuracy assessment of surface electromyogram decomposition. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 22: 151–160. ● Maffiuletti NA, et al. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. Eur J Appl Physiol 116: 1091–1116. ● Negro F, Muceli S, Castronovo AM, Holobar A, Farina D. (2016). Multi-channel intramuscular and surface EMG decomposition by convolutive blind source separation. J Neural Eng 13: 026027. ● Sánchez-Medina L, et al. (2017). Estimation of relative load from bar velocity in the squat. J Strength Cond Res 31: 451–458.

## उद्धरण

कृपया मूल अंग्रेज़ी लेख का हवाला दें:

Mehta, N., Okon, I., Smith, J., & Jain, K. (2025). Neural Efficiency Under Load: Mapping Motor Unit Recruitment Ceilings in Advanced Strength-Trained Athletes. *Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science*, *2*(1). https://doi.org/10.5281/zenodo.18064007

**JMMBS — Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science** · ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)
प्रकाशक: MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

यह अनुवाद मूल लेख के CC BY 4.0 लाइसेंस की शर्तों के अनुसार, मूल लेखकों और स्रोत के उचित श्रेय सहित, साझा किया गया है।

हिन्दी मुखपृष्ठ · संग्रह · सहकर्मी समीक्षा प्रक्रिया · सुधार और वापसी · English