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

हिन्दी अनुवाद · Hindi translation of the English original

- यह लेख मूल अंग्रेज़ी लेख "The Fatigue-Induced Kinetic Chain Cascade (FIKCC): A Mechanical Framework for Proximal-to-Distal Coordination Breakdown and Distal Joint Vulnerability in Rotational Sport" 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/10.66078/jmmbs.v3i1.014 — 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।

वैचारिक ढांचा (परिकल्पना-सृजक) · खुली पहुँच · हिन्दी अनुवाद

थकान-प्रेरित काइनेटिक चेन कैस्केड (FIKCC): घूर्णी खेल में समीपस्थ-से-डिस्टल समन्वय टूटने और डिस्टल संयुक्त भेद्यता के लिए एक यांत्रिक ढांचा

मूल अंग्रेज़ी शीर्षक: The Fatigue-Induced Kinetic Chain Cascade (FIKCC): A Mechanical Framework for Proximal-to-Distal Coordination Breakdown and Distal Joint Vulnerability in Rotational Sport

Neeraj Mehta
MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research, Powell, Ohio, USA

Anupama Mahajan
Indian Institute for Kinesiology & Biomechanics Research

Masoumeh Baghban
Kinesiology Research Center, Kharazmi University, Tehran, Iran

Karun Jain
Orthopaedic & Trauma Surgery Division, San Francisco, California, USA

Swapnesh Tiwari
Department of Population Health, CVS Health, USA

Josh Smith

Sunita Malhotra
MMSx Authority Institute, USA

Pankaj Mehta
GFFI Fitness Academy, USA

पत्रिका

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

खंड / अंक

खंड 3, अंक 1 · 2026

लेख का प्रकार

वैचारिक ढांचा (परिकल्पना-सृजक) (Conceptual Framework (hypothesis-generating))

DOI (मूल अंग्रेज़ी लेख)

https://doi.org/10.66078/jmmbs.v3i1.014

प्राप्त

15 फ़रवरी 2026

स्वीकृत

5 मार्च 2026

मूल लेख प्रकाशित

3 अप्रैल 2026

प्रकाशक

MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

लाइसेंस

CC BY 4.0 (मूल लेख का लाइसेंस)

सार

पृष्ठभूमि

घूर्णी खेल में थकान को अक्सर आउटपुट क्षमता में कमी के रूप में वर्णित किया जाता है, फिर भी इसका अधिक परिणामी प्रभाव यांत्रिक हो सकता है: बल स्थानांतरण, खंडीय समय और गतिज श्रृंखला में संयुक्त लोडिंग का एक प्रगतिशील पुनर्गठन। मौजूदा साहित्य ने इस प्रक्रिया के अलग-अलग घटकों की जांच की है - जिसमें ट्रंक की मांसपेशियों की थकान, कम श्रोणि घूर्णी वेग, परिवर्तित थोरैकोलम्बर अनुक्रम, दूरस्थ संयुक्त कठोरता, और थकान के तहत घुटने या कंधे पर भार में वृद्धि शामिल है - लेकिन ये निष्कर्ष आम तौर पर खंडित रूप में रिपोर्ट किए जाते हैं। स्थानीय थकान पूरी-श्रृंखला यांत्रिक व्यवधान में कैसे विकसित होती है, यह समझाने वाला एक एकीकृत ढांचा अविकसित है।

उद्देश्य

थकान-प्रेरित काइनेटिक चेन कैस्केड (FIKCC) को एक एकीकृत बायोमैकेनिकल ढांचे के रूप में प्रस्तावित करना, जिसमें बताया गया है कि कैसे प्रगतिशील समीपस्थ थकान बल-वेक्टर नियंत्रण को बदल देती है, समीपस्थ-से-डिस्टल अनुक्रमण को बाधित करती है, रीढ़ की हड्डी में कतरनी-उन्मुख लोडिंग में वृद्धि के साथ जुड़ी होती है, और अंततः घूर्णी खेल में डिस्टल जोड़ों की ओर प्रतिपूरक बोझ को स्थानांतरित करती है।

तरीके

यह लेख घूर्णी खेल बायोमैकेनिक्स, स्पाइनल लोडिंग मैकेनिक्स, न्यूरोमस्कुलर थकान, खंडीय अनुक्रमण अनुसंधान और डिस्टल संयुक्त चोट साहित्य में एकीकृत साक्ष्य संश्लेषण के माध्यम से विकसित एक वैचारिक यांत्रिक ढांचा प्रस्तुत करता है।

ढाँचा विवरण

प्रस्तावित FIKCC मॉडल थकान से संबंधित यांत्रिक गिरावट को तीन प्रगतिशील चरणों में व्यवस्थित करता है। स्टेज I समीपस्थ थकान संचय को दर्शाता है, जो कम सक्रिय ट्रंक कठोरता की विशेषता है। स्टेज II बढ़ते कतरनी-उन्मुख स्पाइनल लोडिंग के साथ समन्वय व्यवधान को दर्शाता है। स्टेज III दूरस्थ क्षतिपूर्ति, बढ़ती स्थानीय कठोरता और संयुक्त-विशिष्ट चोट की भेद्यता को दर्शाता है।

निष्कर्ष
FIKCC ढांचा एक प्रगतिशील गतिज-श्रृंखला विफलता प्रक्रिया के रूप में थकान को समझने के लिए एक परीक्षण योग्य वैचारिक मॉडल प्रदान करता है, जो अनुसंधान, एथलीट निगरानी, चोट की रोकथाम और घूर्णी खेल बायोमैकेनिक्स में प्रदर्शन निर्णय लेने के लिए एक अनुवादात्मक संरचना की पेशकश करता है।

कीवर्ड: थकान बायोमैकेनिक्स; गतिज श्रृंखला समन्वय; घूर्णी खेल यांत्रिकी; स्पाइनल कतरनी लोडिंग; समीपस्थ से दूरस्थ अनुक्रमण; ट्रंक कठोरता विनियमन; दूरस्थ संयुक्त मुआवजा; आंदोलन परिवर्तनशीलता; चोट जोखिम बायोमैकेनिक्स; बल-वेक्टर नियंत्रण
ग्राफिकल सार - FIKCC तीन चरणीय वास्तुकला
I

स्टेज I - समीपस्थ थकान संचय

ट्रंक कठोरता विनियमन में कमी → बढ़ती स्थिरीकरण लागत → समीपस्थ यांत्रिक रिजर्व में गिरावट

↓
द्वितीय

चरण II - समन्वय में व्यवधान

पेल्विक योगदान में गिरावट → अनुक्रमण व्यवधान → थोरैकोलम्बर प्रतिपूरक मांग → कतरनी-उन्मुख लोडिंग

↓
तृतीय

चरण III - दूरस्थ मुआवजा और संयुक्त भेद्यता

दूरस्थ कठोरता और मुआवजा → स्थानीय अधिभार → संयुक्त-विशिष्ट भेद्यता

थकान को गतिज-श्रृंखला यांत्रिकी को कुशल भार हस्तांतरण से यांत्रिक रूप से महंगे मुआवजे की ओर पुनर्गठित करने का प्रस्ताव है - प्रदर्शन, समन्वय और ऊतक-स्तरीय भार वितरण के लिए मापने योग्य परिणामों के साथ।
धारा 1

परिचय

Rotational sport performance is governed by the coordinated sequencing of mechanical forces across the kinetic chain, where energy is transferred from proximal to distal segments to maximise velocity and efficiency (Putnam, 1993; Kibler et al., 2006). This proximal-to-distal sequencing enables effective summation of forces and angular momentum, particularly in activities such as throwing, striking, and rotational lifting (Escamilla et

al., 2009). When this coordination is preserved, mechanical efficiency is optimised and unnecessary joint loading is minimised.

हालाँकि, थकान की स्थिति में, न्यूरोमस्कुलर प्रणाली में परिवर्तन होता है जो बल उत्पादन में साधारण कटौती से परे होता है। यह देखा गया है कि थकान मोटर इकाई भर्ती को ख़राब करती है, अंतरखंडीय समय को बाधित करती है, और गति समन्वय पैटर्न को बदलती है, जिससे गतिज श्रृंखला में बल संचरण की अखंडता प्रभावित होती है (गांडेविया, 2001; एनोका और डुचाटेउ, 2016)। ये व्यवधान प्रतिपूरक आंदोलन रणनीतियों को जन्म दे सकते हैं, जहां समीपस्थ अक्षमताओं के बावजूद कार्य प्रदर्शन को बनाए रखने के लिए दूरस्थ खंडों को तेजी से भर्ती किया जाता है।

मौजूदा साहित्य ने गति यांत्रिकी में थकान से संबंधित परिवर्तनों का दस्तावेजीकरण किया है, जिसमें परिवर्तित संयुक्त गतिकी, स्थिरता में कमी और समन्वय पैटर्न में बढ़ी हुई परिवर्तनशीलता शामिल है (केलिस एट अल।, 2014)। हालाँकि, इन निष्कर्षों की व्याख्या अक्सर एक एकीकृत यांत्रिक ढांचे में एकीकरण के बिना, अलगाव में की जाती है जो बताता है कि गतिज श्रृंखला के माध्यम से थकान कैसे फैलती है। यह अंतर चिकित्सकों, प्रशिक्षकों और शोधकर्ताओं की आंदोलन के टूटने और प्रदर्शन और चोट के जोखिम के लिए इसके निहितार्थ की व्यवस्थित रूप से व्याख्या करने की क्षमता को सीमित करता है।

इसलिए, यह पांडुलिपि एक वैचारिक मॉडल का प्रस्ताव करती है जिसे थकान-प्रेरित काइनेटिक चेन कैस्केड (FIKCC) कहा जाता है, जो थकान से संबंधित बायोमैकेनिकल परिवर्तनों को एक चरणबद्ध यांत्रिक प्रगति में व्यवस्थित करता है। मॉडल का लक्ष्य इस बात की संरचित समझ प्रदान करना है कि कैसे समीपस्थ थकान समन्वय को प्रभावित करती है और दूरस्थ प्रतिपूरक तंत्र की ओर ले जाती है, जो अंततः आंदोलन दक्षता और चोट के जोखिम को प्रभावित करती है।

घूर्णी खेल में थकान केवल बल क्षमता में गिरावट नहीं है। यह गतिज-श्रृंखला यांत्रिकी का एक प्रगतिशील पुनर्गठन है - प्रदर्शन, समन्वय और ऊतक-स्तरीय भार वितरण के लिए मापने योग्य परिणामों के साथ।

- FIKCC फ्रेमवर्क कोर प्रस्ताव · मेहता एट अल., 2026
धारा 2

वैचारिक ढांचा विकास और एकीकृत साक्ष्य संश्लेषण

2.1 आलेख स्थिति निर्धारण और रूपरेखा उद्देश्य

वर्तमान लेख एकीकृत साक्ष्य संश्लेषण के माध्यम से निर्मित एक वैचारिक रूपरेखा लेख है, जिसका उद्देश्य कई डोमेन से आवर्ती यांत्रिक निष्कर्षों को थकान-संबंधित गतिज-श्रृंखला गिरावट के एकल चरणबद्ध मॉडल में व्यवस्थित करना है। रूपरेखा को अंतिम रूप से अनुभवजन्य सिद्धांत के बजाय एक परीक्षण योग्य बायोमैकेनिकल परिकल्पना वास्तुकला के रूप में प्रस्तुत किया गया है।

2.2 मुख्य यांत्रिक मान्यताएँ

तालिका 4
FIKCC फ्रेमवर्क के अंतर्गत मुख्य यांत्रिक मान्यताएँ

धारणा	विवरण और यंत्रवत तर्क
बल-स्थानांतरण प्रधानता	घूर्णी खेल प्रदर्शन को बल-स्थानांतरण समस्या के रूप में माना जाता है। खंड गतियाँ मूल्यवान हैं क्योंकि वे गतिज श्रृंखला में कुशल भार स्थानांतरण, समय और दिशात्मक बल संगठन को संरक्षित करती हैं।
नियामक केंद्र के रूप में समीपस्थ प्रणाली	श्रोणि, ट्रंक और थोरैकोलम्बर क्षेत्र को न केवल गति उत्पन्न करनी चाहिए, बल्कि टॉर्क ट्रांसमिशन को विनियमित करना चाहिए, कठोरता का प्रबंधन करना चाहिए और डाउनस्ट्रीम खंडों को अव्यवस्थित लोडिंग से बचाना चाहिए।
थकावट के तहत पुनर्वितरण	ऐसा माना जाता है कि थकान केवल कमी नहीं, बल्कि पुनर्वितरण के माध्यम से गति को बदल देती है। शरीर अक्सर उपलब्ध संरचनाओं में कठोरता, समय, सीमा और बल के बोझ को पुनः आवंटित करके कार्य निष्पादन को पुनर्गठित करता है।
परिणाम के रूप में दूरस्थ अधिभार	डिस्टल लोडिंग शिखर हर मामले में स्थानीय रूप से उत्पन्न होने वाली विकृति के बजाय विफल समीपस्थ विनियमन के लिए मुआवजे को प्रतिबिंबित कर सकते हैं। यह स्थानीय जोखिम कारकों को नकारे बिना उनके अपस्ट्रीम संदर्भ को स्वीकार करता है।
प्रगतिशील, गैर-रैखिक झरना	कैस्केड सिस्टम व्यवहार में प्रमुख प्रवृत्तियों का वर्णन करता है। एथलीट परिवर्तनशील दरों पर चरणों के बीच आगे बढ़ सकते हैं, मिश्रित विशेषताएं दिखा सकते हैं, और ओवरलैपिंग चरण संक्रमण का अनुभव कर सकते हैं।

धारा 3

FIKCC मॉडल: तीन-चरणीय वास्तुकला

तालिका 1

FIKCC की प्रस्तावित तीन-चरणीय वास्तुकला

मंच	प्राथमिक यांत्रिक अवस्था	प्रमुख जैवयांत्रिक विशेषताएं	संभावित प्रदर्शन प्रभाव	संभावित जोखिम निहितार्थ
स्टेज I	समीपस्थ आरक्षित हानि	सक्रिय ट्रंक कठोरता विनियमन में कमी; संपीड़न भार सहनशीलता में गिरावट; बढ़ती सह-संविदा लागत; प्रारंभिक बल-वेक्टर बहाव	आउटपुट संरक्षित रह सकता है; आंदोलन अर्थव्यवस्था में गिरावट; आंतरिक प्रयास में वृद्धि	कम सहनशीलता मार्जिन; प्रारंभिक छिपी हुई यांत्रिक भेद्यता
चरण II	स्थानांतरण अकुशलता	पैल्विक योगदान में कमी; परिवर्तित श्रोणि-वक्ष समय; थोरैकोलम्बर प्रतिपूरक मांग; कतरनी-उन्मुख स्पाइनल लोडिंग; बढ़ती गति परिवर्तनशीलता	बढ़ती परिवर्तनशीलता; ख़राब पुनरावृत्ति; अनुक्रमण गुणवत्ता में कमी	बढ़ती स्पाइनल यांत्रिक लागत; संपूर्ण-श्रृंखला मुआवजा बढ़ रहा है
चरण III	दूरस्थ मुआवजा	दूरस्थ जोड़ की कठोरता में वृद्धि; ब्रेक लगाना मुआवजा; कम भ्रमण; विषमता; परिधीय संयुक्त अधिभार; उत्तरजीविता यांत्रिकी कुशल स्थानांतरण की जगह लेती है	कुशल हस्तांतरण के बजाय प्रतिपूरक रणनीति के माध्यम से कार्य को संरक्षित किया गया	ऊंचा डिस्टल ऊतक तनाव; संयुक्त-विशिष्ट चोट का जोखिम

3.1 चरण I - समीपस्थ थकान संचय और घटता हुआ भार-प्रबंधन रिजर्व

I

समीपस्थ आरक्षित हानि - छिपी हुई खिड़की

स्टेज I थकान की प्रगति के शुरुआती यांत्रिक रूप से सार्थक चरण का प्रतिनिधित्व करता है। परिभाषित करने वाली विशेषता सकल प्रदर्शन पतन नहीं बल्कि समीपस्थ यांत्रिक लचीलेपन में गिरावट है। एथलीट अभी भी चलता और घूमता है, और स्वीकार्य बाहरी परिणामों को संरक्षित कर सकता है। हालाँकि, समीपस्थ प्रणाली कम उपलब्ध यांत्रिक मार्जिन के साथ ऐसा कर रही है।

ट्रंक कठोरता को अधिकतमीकरण की आवश्यकता वाले सार्वभौमिक लाभकारी गुण के रूप में व्याख्या नहीं किया जाना चाहिए। गतिशील घूर्णी खेल में, उपयोगी कठोरता कार्य-विशिष्ट, दिशा-विशिष्ट और समय-विशिष्ट होती है। प्रारंभिक थकान की स्थिति में, यह नियमन कम सटीक हो जाता है। एथलीट अभी भी कार्य को जारी रखने के लिए पर्याप्त ट्रंक तनाव पैदा कर सकता है, लेकिन उस तनाव की दक्षता बदल जाती है - स्थिरीकरण प्रयास अधिक महंगा, कम अनुकूलनीय और समन्वित लोड-शेयरिंग के बजाय प्रतिपूरक भर्ती पर अधिक निर्भर हो सकता है।

साक्ष्य बताते हैं कि समीपस्थ खंडों, विशेषकर धड़ की थकान, गति नियंत्रण और स्थिरता को महत्वपूर्ण रूप से बदल देती है। ट्रंक न्यूरोमस्कुलर नियंत्रण में कमी चोट के बढ़ते जोखिम और परिवर्तित निचले अंग यांत्रिकी से जुड़ी हुई है, जो गतिज श्रृंखला अखंडता को बनाए रखने में समीपस्थ स्थिरता के महत्व को दर्शाती है (ज़ाज़ुलक एट अल।, 2007)।

3.2 चरण II - समन्वय टूटना, पेल्विक योगदान हानि, और थोराकोलम्बर प्रतिपूरक मांग

द्वितीय

स्थानांतरण अकुशलता - अनुक्रमण पतन

चरण II तब शुरू होता है जब समीपस्थ प्रणाली अकेले चरण I क्षतिपूर्ति का उपयोग करके कुशल अंतरखंडीय स्थानांतरण को संरक्षित नहीं कर सकती है। थकान अब केवल समीपस्थ आरक्षित को कम नहीं कर रही है - यह बदल रही है कि गति, समय और भार श्रृंखला के माध्यम

से कैसे प्रसारित होते हैं। पेल्विक घूर्णी योगदान कम हो जाता है या विलंबित हो जाता है।

कुशल घूर्णी खेल यांत्रिकी आम तौर पर गतिज अनुक्रम को शुरू करने या दृढ़ता से योगदान देने वाले श्रोणि पर निर्भर करती है - न केवल गति उत्पन्न करने के लिए, बल्कि ट्रंक ट्रांसमिशन और डिस्टल त्वरण के लिए उचित अस्थायी और दिशात्मक स्थिति बनाने के लिए भी। जब थकान प्रभावी पेल्विक योगदान को कम कर देती है, तो तीन समस्याएं सामने आती हैं: कम गति हैंड-ऑफ, कुल कार्य आउटपुट को संरक्षित करने के लिए ट्रंक पर बढ़ी हुई मांग, और समय की विकृति जिसमें दूरस्थ खंड कम अनुकूल समीपस्थ परिस्थितियों में तेजी से बढ़ना शुरू कर सकते हैं।

एक बार जब पैल्विक योगदान अपर्याप्त हो जाता है, तो थोरैकोलम्बर क्षेत्र को यांत्रिक परिणाम को अवशोषित करने के लिए परिकल्पित किया जाता है। ट्रंक को न केवल बल संचारित करने के लिए बल्कि अनुक्रमण को बचाने के लिए आवश्यक है - और यह बचाव प्रयास बढ़ी हुई टॉर्सनल मांग, परिवर्तित घूर्णी समय और कतरनी-उन्मुख लोडिंग राज्यों की ओर बदलाव से जुड़ा हो सकता है।

यह देखा गया है कि समन्वय और समय में थकान के कारण होने वाली रुकावटें आंदोलन परिवर्तनशीलता को बढ़ाती हैं और बहु-खंडीय कार्यों में दक्षता को कम करती हैं। ये परिवर्तन गतिज श्रृंखला में इष्टतम बल हस्तांतरण के लिए आवश्यक सटीक अनुक्रमण में खराबी को दर्शाते हैं (डेविड्स एट अल., 2003)।

3.3 चरण III - दूरस्थ मुआवजा, स्थानीय कठोरता रणनीतियाँ, और संयुक्त भेद्यता

तृतीय
दूरस्थ मुआवजा - श्रृंखला विफलता का अंतिम प्राप्तकर्ता
चरण III उस बिंदु का प्रतिनिधित्व करता है जिस पर अनसुलझे समीपस्थ अक्षमता को निर्णायक रूप से दूरस्थ संरचनाओं में स्थानांतरित किया जाता है। कार्य निष्पादन को संरक्षित करने के लिए, शरीर तेजी से अंगों और परिधीय जोड़ों को प्रतिपूरक समाधान के रूप में उपयोग करता है - जिसमें बढ़ी हुई कठोरता, परिवर्तित नियंत्रण रणनीतियां, तेज ब्रेकिंग मांग, उच्च स्थानीयकृत बल शिखर, और अधिक अचानक प्रभाव प्रबंधन शामिल है।

स्टेज III का एक महत्वपूर्ण निहितार्थ यह है कि दर्दनाक या घायल ऊतक शिथिलता की प्राथमिक उत्पत्ति के बजाय श्रृंखला विफलता का अंतिम प्राप्तकर्ता हो सकता है। FIKCC रूपरेखा इस बात से इनकार नहीं करती है कि दूरस्थ ऊतक स्थानीय कमजोरी, आकारिकी, पूर्व चोट या तकनीक त्रुटियों के कारण विफल हो सकते हैं। बल्कि, यह तर्क देता है कि थकान की स्थिति में, डिस्टल भेद्यता एक प्रणालीगत अनुक्रम को भी प्रतिबिंबित कर सकती है: समीपस्थ रिजर्व में गिरावट आती है → समन्वय टूट जाता है → रीढ़ की हड्डी और ट्रंक स्थानांतरण कम कुशल हो जाता है → डिस्टल जोड़ क्षतिपूर्ति करते हैं → स्थानीय ऊतक केंद्रित यांत्रिक मांग का अनुभव करते हैं।

जैसे-जैसे मुआवजा डिस्टल जोड़ों की ओर बढ़ता है, परिवर्तित लोडिंग पैटर्न यांत्रिक तनाव और चोट के जोखिम को बढ़ा सकता है। अध्ययनों से पता चला है कि थकान से संबंधित क्षतिपूर्ति रणनीतियाँ संयुक्त भार में वृद्धि और न्यूरोमस्कुलर नियंत्रण में कमी से जुड़ी हैं, विशेष रूप से उच्च-मांग वाले एथलेटिक आंदोलनों में (हेवेट एट अल।, 2005)।

धारा 4

FIKCC मॉडल का यंत्रवत एकीकरण

FIKCC मॉडल का मुख्य मूल्य केवल तीन चरणों के नामकरण में नहीं बल्कि उनके बीच यांत्रिक निरंतरता की व्याख्या में निहित है। गैर-थकावट की स्थिति में, समीपस्थ खंड तीन परस्पर संबंधित कार्यों के माध्यम से घूर्णी खेल में योगदान करते हैं: (1) उपयोगी गति उत्पन्न

करना, (2) बल-वेक्टर अभिविन्यास का विनियमन, और (3) डाउनस्ट्रीम खंडों के लिए स्थानांतरण स्थितियों का स्थिरीकरण। एक बार जब थकान समीपस्थ विनियमन क्षमता को कम कर देती है, तो सिस्टम वैकल्पिक रणनीतियों का उपयोग करके प्रदर्शन को संरक्षित करने के लिए मजबूर हो जाता है।

4.1 बल-वेक्टर बहाव और खंडीय परिणाम

जब समीपस्थ थकान जमा हो जाती है, तो वेक्टर नियंत्रण भटकना शुरू हो सकता है - जो ट्रंक झुकाव, पेल्विक योगदान, खंड समय या दिशात्मक बल अनुप्रयोग में सूक्ष्म परिवर्तन के रूप में प्रस्तुत होता है। एक बार ऐसा होने पर, डाउनस्ट्रीम खंडों को स्थानांतरण की समान गुणवत्ता प्राप्त नहीं होती है। थोरैकोलम्बर क्षेत्र तेजी से एक प्रतिपूरक पुल के रूप में कार्य करता है: जैसे-जैसे उस पुल की लागत बढ़ती है, वैसे-वैसे कम कुशल लोडिंग पैटर्न की संभावना भी बढ़ सकती है, जिसमें अधिक कतरनी-उन्मुख मांग, परिवर्तित मरोड़ वाला व्यवहार, या सह-संकुचन बोझ में वृद्धि शामिल है। इसलिए बल-वेक्टर बहाव केवल एक तकनीकी दोष नहीं है - यह एक लोड-पथ समस्या है।

4.2 प्रतिपूरक कठोरता विरोधाभास

कैस्केड में एक आवर्ती विषय प्रतिपूरक कठोरता विरोधाभास है: थकान के तहत, शरीर अक्सर श्रृंखला में कहीं कठोरता बढ़ाकर नियंत्रण में गिरावट का जवाब देता है। यह अस्थायी रूप से कार्य पूर्णता को संरक्षित कर सकता है लेकिन आंदोलन दक्षता को बहाल नहीं करता है - यह यांत्रिक बोझ को स्थानांतरित करता है। समीपस्थ स्तर पर, बढ़ा हुआ सह-संकुचन रीढ़ की हड्डी पर नियंत्रण बनाए रख सकता है लेकिन उच्च ऊर्जावान लागत पर। दूरस्थ स्तर पर, बढ़ी हुई कठोरता दिशात्मक परिशुद्धता को संरक्षित कर सकती है लेकिन जोड़ों को तीव्र बल एकाग्रता के संपर्क में ला सकती है। विरोधाभास: कठोरता कार्य को संरक्षित कर सकती है और साथ ही भेद्यता को भी बढ़ा सकती है।

धारा 5

अनुप्रयुक्त निगरानी मॉडल

तालिका 2
उम्मीदवार निगरानी मार्कर प्रत्येक FIKCC चरण के अनुरूप

मंच	निगरानी डोमेन	अभ्यर्थी निगरानी चर/मार्कर
स्टेज I	समीपस्थ थकान आरक्षित	ट्रंक सहनशक्ति क्षय (समय-से-थकान ↓); बढ़ती सह-संकुचन लागत (ईएमजी); परिवर्तित सक्रिय कठोरता व्यवहार; प्रारंभिक बल-वेक्टर बहाव; संरक्षित आउटपुट मीट्रिक के साथ बढ़ा हुआ प्रयास
चरण II	स्थानांतरण गुणवत्ता	श्रोणि-वक्ष चरण अनुपात व्यवधान; घूर्णी वेग अनुक्रमण गुणवत्ता में कमी; ट्रंक बचाव प्रयास आयाम (ईएमजी) में वृद्धि; आंदोलन परिवर्तनशीलता सूचकांक ↑; थोरैकोलम्बर शीयर-ओरिएंटेड लोड संकेतक (मॉडल किए गए)
चरण III	दूरस्थ मुआवजा	बढ़ी हुई स्थानीय कठोरता हस्ताक्षर; परिवर्तित ब्रेकिंग/मंदी प्रोफ़ाइल; विषमता सूचकांक उन्नयन; बार-बार लोड के तहत संयुक्त भ्रमण में कमी; दर्द, सूजन, या ऊतक चिड़चिड़ापन की शुरुआत

निगरानी सिद्धांत
सबसे मूल्यवान थकान मार्कर सबसे प्रारंभिक चर है जो आंदोलन समाधान में बदलाव को प्रकट करता है - नवीनतम चर नहीं जो विफलता की पुष्टि करता है।

धारा 6

क्लिनिकल और एप्लाइड अनुवाद

तालिका 3

अनुप्रयुक्त अभ्यास के लिए FIKCC मॉडल की अनुवादात्मक व्याख्या

मंच	एथलीट प्रस्तुति	व्यवसायी को संदेह	तत्काल व्यावहारिक प्रतिक्रिया
स्टेज I	अधिकतर सामान्य दिखता है; प्रयास लागत बढ़ रही है; आउटपुट संरक्षित; आंदोलन गुणात्मक रूप से अक्षुण्ण है	छुपे समीपस्थ आरक्षित गिरावट; बढ़ती स्थिरीकरण लागत; त्रुटि मार्जिन को कम करना	एक्सपोज़र वॉल्यूम संशोधित करें; ट्रंक थकान सूचकांक की निगरानी करें; जल्दी बनाम देर से दोहराव की गुणवत्ता की तुलना करें
चरण II	लय और दोहराव में गिरावट; परिवर्तनशीलता बढ़ रही है; देर से सत्र में लय का नुकसान	स्थानांतरण विफलता; थोरैकोलम्बर बचाव रणनीति सक्रियण; श्रृंखला डीसिंक्रनाइज़ेशन	थकान के तहत अनुक्रम का आकलन करें; उच्च लागत वाली पुनरावृत्ति को कम करें; समीपस्थ समय गुणवत्ता को पुनः प्रशिक्षित करें
चरण III	Visible compensation strategies; distal joint symptoms emerging; विषमता दिखाई देती है	दूरस्थ ऊतक अनसुलझे अपस्ट्रीम यांत्रिक भार प्राप्त कर रहे हैं	सत्र भार कम करें; रोगसूचक संरचना की रक्षा करें; समीपस्थ योगदान और स्थानांतरण गुणवत्ता बहाल करें

6.1 खेल में वापसी और प्रगति तर्क

FIKCC मॉडल का प्रगति निर्णयों पर महत्वपूर्ण प्रभाव पड़ता है। एक एथलीट को केवल इसलिए पूरी तरह से ठीक नहीं माना जाना चाहिए क्योंकि दर्द कम हो गया है या पृथक शक्ति मानदंड पूरे हो गए हैं। यदि बार-बार प्रयास के बाद भी श्रृंखला चरण II या चरण III व्यवहार में प्रवेश करती है, तो एथलीट वास्तविक प्रतिस्पर्धा के लिए यांत्रिक रूप से कम तैयार रह सकता है। इसलिए एक अधिक मजबूत रिटर्न-टू-प्ले मॉडल यह आकलन करेगा कि क्या एथलीट: (1) पुनरावृत्ति के तहत समीपस्थ नियंत्रण बनाए रख सकता है, (2) थकान के तहत खंडीय अनुक्रम बनाए रख सकता है, और (3) उच्च-इरादे के प्रयासों के दौरान दूरस्थ अस्तित्व रणनीतियों से बच सकता है। यह एक साधारण दर्द-मुक्त-विश्राम मॉडल के बजाय तत्परता के क्षमता-अंडर-थकान मॉडल का समर्थन करता है।

धारा 7

चर्चा

वर्तमान लेख यह समझने के लिए एक एकीकृत यांत्रिक ढांचे के रूप में थकान-प्रेरित काइनेटिक चेन कैस्केड का प्रस्ताव करता है कि थकान घूर्णी खेल में गति को कैसे बदल देती है। केंद्रीय तर्क यह है कि थकान को केवल स्थानीय बल-उत्पादन क्षमता में कमी के रूप में नहीं देखा जाना चाहिए। बल्कि, इसे गतिज-श्रृंखला यांत्रिकी के चरणबद्ध पुनर्गठन के रूप में समझा जाना चाहिए। यह व्याख्या साहित्य के कई निकायों के बीच एक पुल प्रदान करती है जिन पर अक्सर अलग से चर्चा की जाती है: ट्रंक थकान, रीढ़ की हड्डी में लोडिंग, खंडीय अनुक्रमण, और परिधीय संयुक्त भेद्यता।

FIKCC मॉडल का एक प्रमुख निहितार्थ यह है कि यांत्रिक अक्षमता अवलोकन योग्य प्रदर्शन में गिरावट से पहले हो सकती है। यह पारंपरिक थकान मॉडल को चुनौती देता है जो मुख्य रूप से आउटपुट-आधारित मेट्रिक्स पर निर्भर करता है और आंदोलन-गुणवत्ता और समन्वय-आधारित निगरानी दृष्टिकोण की ओर बदलाव का समर्थन करता है। इसलिए चिकित्सक, प्रशिक्षक और प्रदर्शन वैज्ञानिक बाहरी आउटपुट पतन या दूरस्थ लक्षण शुरुआत की प्रतीक्षा करने के बजाय श्रृंखला-स्तरीय पुनर्गठन मार्करों को ट्रैक करके अधिक पूर्वानुमानित मूल्य प्राप्त कर सकते हैं।

यदि भविष्य के डेटा से लगातार पता चलता है कि रूपरेखा कमजोर हो जाएगी या चुनौती दी जाएगी: (1) दूरस्थ अधिभार किसी भी पूर्ववर्ती समीपस्थ आरक्षित हानि या स्थानांतरण व्यवधान के बिना उभरता है; (2) पैल्विक योगदान में गिरावट से थोरैकोलम्बर मांग या अनुक्रमण गुणवत्ता में परिवर्तन नहीं होता है; या (3) एथलीट पर्याप्त समीपस्थ नियंत्रण हानि के बावजूद थकान के तहत कुशल डिस्टल यांत्रिकी बनाए रखते हैं। ये मिथ्याकरणीय स्थितियाँ ढाँचे की वैज्ञानिक अखंडता को सुरक्षित रखती हैं।

धारा 8

भविष्य के अनुसंधान निर्देश

तालिका 5
प्राथमिकता वाले भविष्य के अनुसंधान निर्देश FIKCC फ्रेमवर्क से प्राप्त हुए हैं

अनुसंधान प्राथमिकता	प्राथमिक शोध प्रश्न	प्रस्तावित पद्धतिगत दृष्टिकोण
संभावित चरण सत्यापन	क्या थकान से संबंधित गति में गिरावट प्रस्तावित समीपस्थ-से-डिस्टल अनुक्रम का पालन करती है?	पूरे सत्र की अवधि में बहु-खंड गतिज और गतिज ट्रैकिंग के साथ बार-बार प्रयास किए गए प्रोटोकॉल
स्पाइनल कतरनी-संपीड़न पुनर्वितरण	क्या बार-बार किया जाने वाला घूर्णी प्रयास स्पाइनल लोडिंग को संपीड़न से कतरनी-उन्मुख व्यवहार की ओर स्थानांतरित करता है?	प्रगतिशील थकान के तहत व्युत्क्रम गतिशीलता के साथ मस्कुलोस्केलेटल मॉडलिंग; विषय-विशिष्ट स्पाइनल लोड अनुमान
हस्तक्षेप परीक्षण	क्या लक्षित समीपस्थ हस्तक्षेप कैस्केड प्रगति में देरी या बाधा डाल सकते हैं?	यादृच्छिक नियंत्रित परीक्षण: ट्रंक सहनशक्ति प्रशिक्षण, अनुक्रमण पुनः प्रशिक्षण, चरण-विशिष्ट भार प्रबंधन
क्रॉस-स्पोर्ट सत्यापन	क्या कैस्केड क्रम घूर्णी खेलों (गोल्फ, बेसबॉल, टेनिस, क्रिकेट) में सामान्यीकृत होता है?	खेल आबादी में मानकीकृत थकान प्रोटोकॉल के साथ तुलनात्मक बायोमैकेनिकल अध्ययन

धारा 9

निष्कर्ष

वर्तमान लेख में थकान-प्रेरित काइनेटिक चेन कैस्केड (FIKCC) को एक वैचारिक यांत्रिक ढांचे के रूप में पेश किया गया है, यह समझने के लिए कि थकान घूर्णी खेल में गति को कैसे पुनर्गठित करती है। मांसपेशियों के उत्पादन में एक साधारण गिरावट के रूप में थकान का इलाज करने के बजाय, FIKCC मॉडल का प्रस्ताव है कि थकान एक चरणबद्ध समीपस्थ-से-डिस्टल कैस्केड के माध्यम से बढ़ती है, जो समीपस्थ

भार-प्रबंधन रिजर्व में गिरावट के साथ शुरू होती है, समन्वय टूटने और थोरैकोलंबर प्रतिपूरक मांग के माध्यम से आगे बढ़ती है, और डिस्टल मुआवजे और संयुक्त-विशिष्ट भेद्यता में समाप्त होती है।

इस ढाँचे का प्रमुख योगदान एकीकृत है। यह एक सुसंगत श्रृंखला-स्तरीय मॉडल के भीतर ट्रंक थकान, बल-वेक्टर बहाव, स्पाइनल लोडिंग परिवर्तन, खंडीय अनुक्रमण व्यवधान और डिस्टल अधिभार को रखता है - इस बात की अधिक संपूर्ण व्याख्या प्रदान करता है कि एथलीट छिपी हुई यांत्रिक लागत को जमा करते हुए दृश्य प्रदर्शन को संरक्षित क्यों कर सकते हैं, अपस्ट्रीम गिरावट शुरू होने के बाद लक्षण दूर से क्यों दिखाई दे सकते हैं, और क्यों थकान की निगरानी को कार्यभार की मात्रा से आगे बढ़कर आंदोलन-प्रणाली संगठन की ओर ले जाना चाहिए।

घूर्णी खेल में थकान केवल बल क्षमता में कमी नहीं है। यह प्रदर्शन, समन्वय और ऊतक-स्तरीय भार वितरण के लिए मापने योग्य परिणामों के साथ गतिज-श्रृंखला यांत्रिकी का एक प्रगतिशील पुनर्गठन है।

- FIKCC फ्रेमवर्क · मेहता एट अल., JMMBS वॉल्यूम। 3 अंक 1, 2026
घोषणाएँ

घोषणाएँ

फंडिंग
इस शोध को सार्वजनिक, वाणिज्यिक, या गैर-लाभकारी क्षेत्रों में किसी भी फंडिंग एजेंसी से कोई विशिष्ट अनुदान नहीं मिला।

हितों का टकराव
ऑथर ने किसी हित संघर्ष की घोषणा नहीं की है।

नैतिक कथन
एक वैचारिक रूपरेखा लेख के रूप में जिसमें कोई मानव भागीदार शामिल नहीं है, किसी औपचारिक नैतिक अनुमोदन की आवश्यकता नहीं थी।

डेटा उपलब्धता
इस वैचारिक रूपरेखा लेख में कोई प्राथमिक डेटा उत्पन्न या विश्लेषण नहीं किया गया था।

लेखक योगदान एन.एम.: संकल्पना, रूपरेखा विकास, लेखन (मूल मसौदा), लेखन (समीक्षा और संपादन), पर्यवेक्षण। ए.एम.: संकल्पना, बायोमैकेनिकल फ्रेमवर्क समीक्षा, लेखन (समीक्षा और संपादन)। एम.बी.: बायोमैकेनिक्स पद्धति, स्पाइनल मैकेनिक्स साहित्य संश्लेषण, लेखन (समीक्षा और संपादन)। के.जे.: नैदानिक अनुवाद, आर्थोपेडिक समीक्षा, लेखन (समीक्षा और संपादन)। एस.टी.: संकल्पना, बायोमैकेनिकल विश्लेषण और रूपरेखा समीक्षा, पांडुलिपि समीक्षा। जे.एस.: नैदानिक पुनर्वास समीक्षा, अनुप्रयुक्त अनुवाद। एस.एम.: नैतिक समीक्षा समन्वय, पांडुलिपि समीक्षा। पी.एम.: व्यायाम विज्ञान साहित्य समर्थन, पांडुलिपि समीक्षा।

संदर्भ

संदर्भ मूल अंग्रेज़ी में यथावत दिए गए हैं।

References

All references formatted in accordance with APA 7th Edition. Citations verified for DOI linkage.

1. Putnam, C. A. (1993). Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics, 26*(Suppl 1), 125–135. https://doi.org/10.1016/0021-9290(93)90084-R
2. Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The role of core stability in athletic function. *Sports Medicine, 36*(3), 189–198. https://doi.org/10.2165/00007256-200636030-00001
3. Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Zheng, N., et al. (2009). Biomechanics of baseball pitching. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 39*(2), 113–124.
4. Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews, 81*(4), 1725–1789. https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725
5. Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating fatigue to human performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 48*(11), 2228–2238.
6. Kellis, E., Katis, A., & Gissis, I. (2014). Knee biomechanics during fatigue. *Sports Biomechanics, 13*(3), 287–304.
7. Zazulak, B. T., Hewett, T. E., Reeves, N. P., Goldberg, B., & Cholewicki, J. (2007). Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk. *American Journal of Sports Medicine, 35*(7), 1123–1130.
8. Davids, K., Glazier, P., Araújo, D., & Bartlett, R. (2003). Movement systems as dynamical systems. *Sports Medicine, 33*(4), 245–260. https://doi.org/10.2165/00007256-200333040-00001
9. Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and injury risk. *American Journal of Sports Medicine, 33*(4), 492–501. https://doi.org/10.1177/0363546504269591
10. Cholewicki, J., & McGill, S. M. (1996). Mechanical stability of the in vivo lumbar spine. *Clinical Biomechanics, 11*(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/0268-0033(95)00035-6
11. McGill, S. M. (2010). Core training: Evidence translating to better performance and injury prevention. *Strength & Conditioning Journal, 32*(3), 33–46. https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181df4521
12. Hodges, P. W., & Richardson, C. A. (1997). Contraction of the abdominal muscles associated with movement of the lower limb. *Physical Therapy, 77*(2), 132–144.
13. Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics, 6*(2), 224–243. https://doi.org/10.1080/14763140701322994
14. Gabbett, T. J. (2016). The training-injury prevention paradox. *British Journal of Sports Medicine, 50*(5), 273–280. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095788
15. Meeuwisse, W. H., Tyreman, H., Hagel, B., & Emery, C. (2007). A dynamic model of etiology in sport injury. *Clinical Journal of Sport Medicine, 17*(3), 215–219. https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e3180592a48
16. Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements.* Pergamon Press.
17. Myers, T. W. (2009). *Anatomy trains: Myofascial meridians for manual and movement therapists* (2nd ed.). Churchill Livingstone/Elsevier.
18. Fleisig, G. S., Barrentine, S. W., Zheng, N., Escamilla, R. F., & Andrews, J. R. (1999). Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *Journal of Biomechanics, 32*(12), 1371–1375. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(99)00127-X
19. Leetun, D. T., Ireland, M. L., Willson, J. D., Ballantyne, B. T., & Davis, I. M. (2004). Core stability measures as risk factors for lower extremity injury in athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 36*(6), 926–934.

20. Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., & Vannozzi, G. (2018). Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation. *Sensors*, *18*(3), 873. https://doi.org/10.3390/s18030873

21. Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. *Journal of Physiology*, *586*(1), 11–23. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.139477

22. Urbin, M. A., Fleisig, G. S., Abebe, A., & Andrews, J. R. (2013). Associations between timing in the baseball pitch and shoulder kinetics, elbow kinetics, and ball speed. *American Journal of Sports Medicine*, *41*(2), 336–342. https://doi.org/10.1177/0363546512467952

23. Hamill, J., van Emmerik, R. E. A., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to lower extremity running injuries. *Clinical Biomechanics*, *14*(5), 297–308. https://doi.org/10.1016/S0268-0033(98)90092-4

24. Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., et al. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(Suppl 2), S2-161–S2-170. https://doi.org/10.1123/IJSPP.2017-0208

25. Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470549148

26. Latash, M. L. (2012). *Fundamentals of motor control*. Academic Press.

27. Willson, J. D., Dougherty, C. P., Ireland, M. L., & Davis, I. M. (2005). Core stability and its relationship to lower extremity function and injury. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, *13*(5), 316–325.

28. Sell, T. C., Chu, Y., Abt, J. P., Nagai, T., Deluzio, J., Rowe, R., & Lephart, S. M. (2013). Minimal fatigue alters landing performance. *Journal of Strength & Conditioning Research*, *27*(4), 1059–1065.

29. Watkins, R. G., Uppal, G. S., Perry, J., Pink, M., & Dinsay, J. M. (1996). Dynamic electromyographic analysis of trunk musculature in professional golfers. *American Journal of Sports Medicine*, *24*(4), 535–538.

30. Hume, P. A., Keogh, J., & Reid, D. (2005). The role of biomechanics in maximising distance and accuracy of golf shots. *Sports Medicine*, *35*(5), 429–449. https://doi.org/10.2165/00007256-200535050-00005

उद्धरण

कृपया मूल अंग्रेज़ी लेख का हवाला दें:

Mehta, N., Mahajan, A., Baghban, M., Jain, K., Tiwari, S., Smith, J., Malhotra, S., & Mehta, P. (2026). The Fatigue-Induced Kinetic Chain Cascade (FIKCC): A Mechanical Framework for Proximal-to-Distal Coordination Breakdown and Distal Joint Vulnerability in Rotational Sport. *Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science*, *3*(1). https://doi.org/10.66078/jmmbs.v3i1.014

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।