

การวิ่งลงเนิน: กลไกการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย
และแนวทางการฝึกเพื่อการปรับตัวของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ
DOWNHILL RUNNING: MECHANISMS OF EXERCISE-INDUCED MUSCLE DAMAGE
AND TRAINING STRATEGIES FOR NEUROMUSCULAR ADAPTATION

จตุรภุช บุษรา^{1, 2*} และ นิโรมลี มะกาเจ²

Jaturabhuj Busara^{1, 2*} and Niromlee Makaje²

¹คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา จังหวัดนครปฐม

²คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดนครปฐม

¹Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University, Nakhon Pathom Province

²Faculty of Sports and Health Science, Kasetsart University, Nakhon Pathom Province

*Corresponding Author: kanup2ku@gmail.com

Received: March 8, 2026

Revised: April 27, 2026

Accepted: May 1, 2026

บทคัดย่อ

การวิ่งลงเนินเป็นรูปแบบการออกกำลังกายที่มีลักษณะเด่นด้านการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริกในระดับสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายและความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ บทความการทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณานี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อทบทวนกลไกการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย 2) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อ และ 3) แนวทางการฝึกเพื่อส่งเสริมการปรับตัวของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ความลาดชัน ความเร็ว ระยะเวลาในการวิ่ง และระดับความเฉพาะเจาะจงของการฝึก เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย โดยสามารถประเมินได้จากการลดลงของแรงหดตัวกล้ามเนื้อแบบเกร็งค้างสูงสุด ระดับครีเอทีนไคเนสในกระแสเลือด และอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย นอกจากนี้ ปัจจัยเชิงชีวกลศาสตร์ เช่น ความถี่และระยะเวลาการก้าว รูปแบบการวางเท้า และองค์ประกอบของร่างกายมีบทบาทต่อการกระจายแรงและภาระเชิงกลที่เกิดขึ้นระหว่างการวิ่งลงเนิน กลไกการปรับตัวของระบบประสาทและกล้ามเนื้อที่สำคัญ ได้แก่ การฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ ซึ่งช่วยลดระดับความเสียหายจากการกระตุ้นซ้ำในครั้งถัดไป รวมถึงการปรับโปรแกรมฝึก การควบคุมเทคนิคการวิ่ง และการใช้อุปกรณ์เสริม เช่น ถังน่องรัดกล้ามเนื้อที่อาจช่วยลดภาระเชิงกลและสนับสนุนการฟื้นตัว โดยสรุป การเข้าใจกลไกการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และการจัดการภาระการฝึกอย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บและส่งเสริมประสิทธิภาพการวิ่งลงเนิน ทั้งนี้ผู้ฝึกสอนหรือนักกีฬาวิ่งเทรลสามารถนำข้อมูลจากการศึกษาไปปรับปรุงและพัฒนาแผนการฝึกซ้อมการวิ่งลงเนินในกลุ่มนักกีฬาวิ่งเทรลและกลุ่มนักกีฬาวิ่งเทรลสมัครเล่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายในการฝึกซ้อมหรือแข่งขันได้

คำสำคัญ: การวิ่งลงเนิน, การเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย, การหดตัวแบบเอกเซนตริก, ระบบประสาทและกล้ามเนื้อ

Abstract

Downhill running involves substantial eccentric muscle contractions, leading to exercise-induced muscle damage (EIMD) and neuromuscular fatigue. This review aimed to: 1) synthesize evidence on the mechanisms of EIMD following downhill running, 2) identify key factors influencing its magnitude, and 3) evaluate training strategies that facilitate neuromuscular adaptation. Evidence indicates that slope, running speed, exercise duration, and training specificity are primary determinants of EIMD severity. Markers of muscle damage include reductions in maximal voluntary contraction, elevated circulating creatine kinase,

and delayed onset muscle soreness. Biomechanical variables, such as stride characteristics, foot strike patterns, and body composition, further modulate mechanical load and force distribution during downhill running. Adaptation is largely mediated by the repeated bout effect (RBE), which attenuates muscle damage upon subsequent exposures. Training interventions, including progressive load management, technique optimization, and adjunct strategies (e.g., compression garments), may mitigate mechanical stress and enhance recovery. Overall, effective management of mechanical load and targeted neuromuscular adaptation strategies are critical for reducing injury risk and optimizing downhill running performance in both trained and recreational trail runners.

Keywords: Downhill running, Exercise-induced muscle damage, Eccentric contraction, Neuromuscular adaptation

บทนำ

การวิ่งลงเนินเป็นองค์ประกอบสำคัญของการแข่งขันกีฬาประเภทวิ่งที่จัดขึ้นในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบและความลาดชันแตกต่างกัน ตัวอย่างของการแข่งขันดังกล่าว ได้แก่ วิ่งเทรล วิ่งภูเขา วิ่งครอสคันทรี่ และวิ่งอัลตร้ามาราธอน นอกจากนี้ การวิ่งลงเนินยังอาจเกิดขึ้นในการแข่งขันบนพื้นผิวเรียบที่มีความลาดชันลง เช่น การแข่งขันวิ่งบนถนนที่มีช่วงเส้นทางเป็นทางลง (Garnier et al., 2020)

การหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริก (eccentric contraction) หมายถึง การหดตัวของกล้ามเนื้อในขณะที่ความยาวของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงต้านการเคลื่อนไหว การหดตัวลักษณะดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดความล้าของกล้ามเนื้อและเอ็นกล้ามเนื้อในระดับสูง และสัมพันธ์กับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย (exercise-induced muscle damage: EIMD) ในระดับปานกลางถึงสูง โดยเฉพาะเมื่อมีการศึกษาการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริกในกลุ่มกล้ามเนื้อช่วงล่างด้วยเครื่องไอโซไคเนตริก (isokinetic dynamometer) ในทำนองเดียวกัน การวิ่งลงเนิน (downhill running) เป็นกิจกรรมที่กล้ามเนื้อทำงานแบบเอกเซนตริกเป็นหลัก เพื่อควบคุมและชะลอความเร็วของร่างกายขณะเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการทำงานของกล้ามเนื้อ (Coratella et al., 2019) รวมถึงก่อให้เกิดความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ (neuromuscular fatigue) ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งจากระบบประสาทรอบนอกและระบบประสาทส่วนกลาง ความล้าจากระบบประสาทรอบนอกมีความเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงในระดับโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อ อันเนื่องมาจากแรงต้านซ้ำ ๆ ในระหว่างการหดตัวแบบเอกเซนตริก ส่งผลให้เกิดความเสียหายของไมโอไฟบริล (myofibril) เช่น การสูญเสียความสามารถในการสร้างแรงของซาร์โคเมอร์ (sarcomere) และความบกพร่องของกระบวนการเร้า-หดตัวของกล้ามเนื้อ (excitation-contraction coupling) (Douglas et al., 2017; Proske & Morgan, 2001) จากการศึกษาของ Scheer & Krabak (2021) พบว่า นักกีฬาวิ่งเทรลพบกับปัญหาอาการบาดเจ็บบริเวณขา (35%) ข้อเท้า (16.8%) เข่า (13.1%) และเท้า (12.6%) ร่วมกับภาวะของโรคหน้าแข้งอักเสบ (30.1%) ขณะที่ความล้าจากระบบประสาทส่วนกลางอาจเกิดจากการลดลงของสัญญาณสั่งการจากสมองและไขสันหลัง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการกระตุ้นหน่วยยนต์ (motor unit) ลดลง ระดับความรุนแรงของความล้าและการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการวิ่งลงเนินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความชันของพื้นที่ ความเร็วในการวิ่ง และระยะเวลาหรือระยะทางของการวิ่ง โดยเฉพาะในกีฬาวิ่งเทรล ซึ่งประสิทธิภาพการแข่งขันมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับช่วงทางลงที่กล้ามเนื้อทำงานแบบเอกเซนตริกเป็นหลัก การเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ในบริบทดังกล่าวสามารถส่งผลให้ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อลดลงประมาณร้อยละ 15–40 ภายหลังการแข่งขัน นอกจากนี้ การวิ่งลงเนินด้วยความเร็วสูงสุดเป็นระยะทาง 6.5 กิโลเมตรที่มีระดับความสูงลดลง 1,264 เมตร และความชันเฉลี่ย 16.8% ยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการทำงานของระบบประสาทรอบนอกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การวิ่งลงเนินสามารถประยุกต์ใช้เป็นรูปแบบการฝึกเฉพาะทางเพื่อกระตุ้นการปรับตัวของระบบประสาท กล้ามเนื้อ และเอ็น ซึ่งอาจส่งผลเชิงบวกต่อสมรรถภาพการวิ่ง หากมีการออกแบบโปรแกรมฝึกอย่างเหมาะสม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลของการวิ่งลงเนินต่อการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย แต่ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยทางชีวกลศาสตร์และแนวทางการฝึกที่สามารถช่วยจำกัดความเสียหายของกล้ามเนื้อยังคงมีความหลากหลายและต้องการการสังเคราะห์องค์ความรู้เพิ่มเติม

บทความการทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณนาหาข้อมูลจากการค้นหาผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ของ The US National Library of Medicine (PubMed) และ ScienceDirect ส่วนคำหลักในการสืบค้น คือ “running” “downhill” “decline” “grade” “gradient” “slope” “muscle damage” “muscle fatigue” “biomechanics” “strategy” “compression garment” “running garment” “preconditioning” “training” “repeated bout effect” “footwear” และใช้คำเชื่อม คือ AND, OR หลังจากนั้นการคัดเลือกรายงานมีเกณฑ์ในการคัดเลือกรายงานวิจัยโดยผู้วิจัยทบทวน คัดเลือกรายงานวิจัยเชิงปริมาณที่ศึกษาเกี่ยวกับการวิ่งลงเนินเพียงอย่างเดียว การศึกษาจะไม่พิจารณาการศึกษาที่ใช้วิธีอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การปั่นจักรยานแบบเอคเซนตริก การวิ่งลงเนินแบบขาข้างเดียว การวิ่งลงเนินแบบมีการช่วยวิ่งให้เร็วขึ้น การก้าวเดิน และการฝึกด้วยเครื่องไอโซคิเนตริกแบบเอคเซนตริกเพื่อก่อให้เกิดความเสียหายของกล้ามเนื้อ หรือการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอคเซนตริก การค้นหาหลักพิจารณาเกี่ยวกับลักษณะของประชากร ระดับการฝึกซ้อม และลักษณะของการวิ่งลงเนิน ตัวอย่างเช่น ความเร็วในการวิ่งหรือความเข้มข้น ระยะเวลาของการออกกำลังกาย และความชัน ในการศึกษาที่นำการออกกำลังกายแบบการวิ่งลงเนินที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มทดลอง (เฉพาะกลุ่มควบคุม) เพื่อนำมาวิเคราะห์และอภิปรายปัจจัยที่ทำให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ส่วนเกณฑ์การคัดออก คือ การศึกษาที่งานวิจัยที่ไม่สมบูรณ์ รายละเอียดไม่เพียงพอและไม่สอดคล้องตามวัตถุประสงค์

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทบทวนกลไกการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายที่เกิดจากการวิ่งลงเนินซึ่งเกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอคเซนตริก 2) วิเคราะห์ปัจจัยด้านสรีรวิทยาและชีวกลศาสตร์ เช่น ความลาดชัน ความเร็ว ระยะเวลาในการวิ่ง ระยะและความถี่ของการก้าว รวมถึงรูปแบบการวางเท้าที่มีผลต่อระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อ 3) สังเคราะห์แนวทางการฝึกและการปรับตัวของระบบประสาทและกล้ามเนื้อที่สามารถจำกัดการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และส่งเสริมประสิทธิภาพการวิ่งลงเนิน

การเปลี่ยนแปลงของกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน

การวิ่งในสภาวะที่มีความลาดชันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบประสาทและกล้ามเนื้อแตกต่างจากการวิ่งบนพื้นราบอย่างมีนัยสำคัญ ขณะวิ่งลงเนิน กล้ามเนื้อบริเวณขาส่วนล่างทำงานแบบเอคเซนตริกซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน เพื่อควบคุมความเร็วของร่างกายภายใต้แรงโน้มถ่วง ลักษณะการทำงานดังกล่าวนำไปสู่การปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางเท้าและกลไกการเคลื่อนไหวของข้อต่อ นอกจากนี้ยังส่งผลให้แรงปฏิกิริยาจากพื้น (ground reaction force) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะองค์ประกอบของแรงในแนวราบที่ทำหน้าที่เป็นแรงเบรก (braking force) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการชะลอความเร็วของร่างกาย ในเชิงสรีรวิทยา การวิ่งลงเนินยังทำให้เกิดรูปแบบการใช้พลังงานที่เฉพาะเจาะจง เนื่องจากกล้ามเนื้อต้องทำหน้าที่ดูดซับแรงกระแทก ควบคุมการเคลื่อนไหว และปรับความเร่งความเร็วให้สอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศ ส่งผลให้เกิดภาระทางกล (mechanical load) และความเครียดต่อโครงสร้างกล้ามเนื้อและเอ็นในระดับที่แตกต่างจากการวิ่งบนพื้นราบ

จังหวะที่เท้าสัมผัสพื้น (foot contact) ภาระทางกลดังกล่าวอาจนำไปสู่การเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ทั้งในระยะเฉียบพลัน และอาจทำให้ระยะเวลาของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายยาวนานมากขึ้น ผลกระทบของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงหลายประการ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อ การเพิ่มขึ้นของการรั่วไหลของโปรตีนจำเพาะของกล้ามเนื้อเข้าสู่กระแสเลือด และการลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ (maximal voluntary contraction: MVC) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง (running economy) รวมถึงประสิทธิภาพโดยรวมของการวิ่งในระยะต่อมา จากการศึกษาที่รวบรวมข้อมูลโดยส่วนใหญ่จะเป็นศึกษาภายในห้องปฏิบัติการจึงอาจจะมีผลการฝึกซ้อมหรือทดสอบในสนามแข่งขันจริง

1. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน

การวิ่งลงเนินสามารถจัดเป็นรูปแบบการออกกำลังกายที่มีภาระทางกลสูง และเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย โดยเฉพาะในกลุ่มกล้ามเนื้อเหยียดหัวเข่า (knee extensors; KE) และกลุ่มกล้ามเนื้อเหยียดข้อเท้า (plantar flexors; PF) กลไกสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การหดตัวแบบเอคเซนตริกซ้ำ ๆ ภายใต้แรงต้านจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายระดับโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อ ความเสียหายดังกล่าวพบได้ในระดับจุลโครงสร้าง เช่น การฉีกขาดและการสลายตัวของ Z-disk การเสียรูปของ A-band ตลอดจนการเรียงตัวผิดปกติของไมโอไฟบริล

(myofibril) ทั้งนี้ มีรายงานว่า การวิ่งลงเนินเป็นเวลา 30 นาที ที่ความชัน 12% และความหนัก 80% ของความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (maximal oxygen uptake; VO_{2max}) สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของกล้ามเนื้อดังกล่าวได้ (Feasson et al., 2002)

ภายหลังการออกกำลังกายแบบแอโรบิกที่มีความหนักสูง ยังพบการเพิ่มขึ้นของโปรตีนจำเพาะของกล้ามเนื้อในกระแสเลือด ได้แก่ ครีเอทีนไคเนส (creatine kinase; CK) ไมโอโกลบิน (myoglobin; Mb) และแลคเตทไดไฮโดรจีเนส (lactate dehydrogenase; LDH) รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ภายในกล้ามเนื้อ ซึ่งสามารถตรวจพบได้ตั้งแต่ 1 ชั่วโมงจนถึง 7 วันภายหลังการออกกำลังกาย (Maughan et al., 1989) ตัวแปรดังกล่าวจึงถูกใช้เป็นดัชนีทางอ้อมของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ในงานวิจัยด้านสรีรวิทยาการออกกำลังกาย การเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกล้ามเนื้อจากการวิ่งลงเนินอาจส่งผลให้แรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจลดลง ซึ่งสะท้อนถึงระดับความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และอาจมีผลต่อสมรรถภาพการวิ่งในระยะต่อมา

2. การเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน

การลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ หรือ MVC เป็นตัวชี้วัดสำคัญของความล้าระบบประสาทและกล้ามเนื้อ (neuromuscular fatigue) ซึ่งอาจเกิดจากทั้งปัจจัยของระบบประสาทรอบนอกและระบบประสาทส่วนกลาง การลดลงของ MVC มีความสัมพันธ์กับระดับความเสียหายของเส้นใยกล้ามเนื้อ จำนวนเส้นใยที่ได้รับผลกระทบ และความบกพร่องของกระบวนการเร่ง-หดตัวของกล้ามเนื้อ (excitation-contraction coupling) อีกทั้งยังสามารถสะท้อนระดับความรุนแรงของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย

ขนาดของการลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ ภายหลังการวิ่งลงเนินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับความหนักของการออกกำลังกาย ความชัน ระยะเวลา อายุ เพศ และระดับความสามารถทางการฝึกซ้อม มีรายงานว่า ภายหลังการวิ่งลงเนินเป็นเวลา 45 นาที การลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ ในกลุ่มกล้ามเนื้อเหยียดหัวเข่า (KE) มีความสัมพันธ์กับความล้าของระบบประสาทรอบนอกและความเสียหายของกล้ามเนื้อ โดยพบว่าการหดตัวแบบเกร็งค้างสูงสุด (isometric MVC) ลดลงประมาณ 14–55% ในกลุ่มกล้ามเนื้อเหยียดหัวเข่า (KE) และ 15–25% ในกลุ่มกล้ามเนื้อเหยียดข้อเท้า (PF) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการวิ่งขึ้นเขาและการวิ่งบนพื้นราบที่มีความหนักเท่ากัน นอกจากนี้ ยังพบการลดลงของความสามารถในการกระโดดแบบเคาน์เตอร์มูฟเมนต์ (counter movement jump: CMJ) และความทนทานของกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน (Mizuno et al., 2016; Carmichael et al., 2005) โดยทั่วไป ค่าแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจจะค่อย ๆ ฟื้นกลับสู่ระดับปกติภายใน 4–5 วัน (Malm et al., 2004) อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการฟื้นตัวดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกลไกของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ซึ่งประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกล้ามเนื้อ ความบกพร่องของกระบวนการเร่ง-หดตัวของกล้ามเนื้อ การลดลงของประสิทธิภาพการสร้างแรง และการเพิ่มขึ้นของโปรตีนจำเพาะของกล้ามเนื้อในกระแสเลือด ได้แก่ ครีเอทีนไคเนส (CK) ไมโอโกลบิน (Mb) และแลคเตทไดไฮโดรจีเนส (LDH) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย (delayed onset muscle soreness: DOMS) และการตอบสนองต่อการอักเสบของกล้ามเนื้อ (Peake et al., 2017)

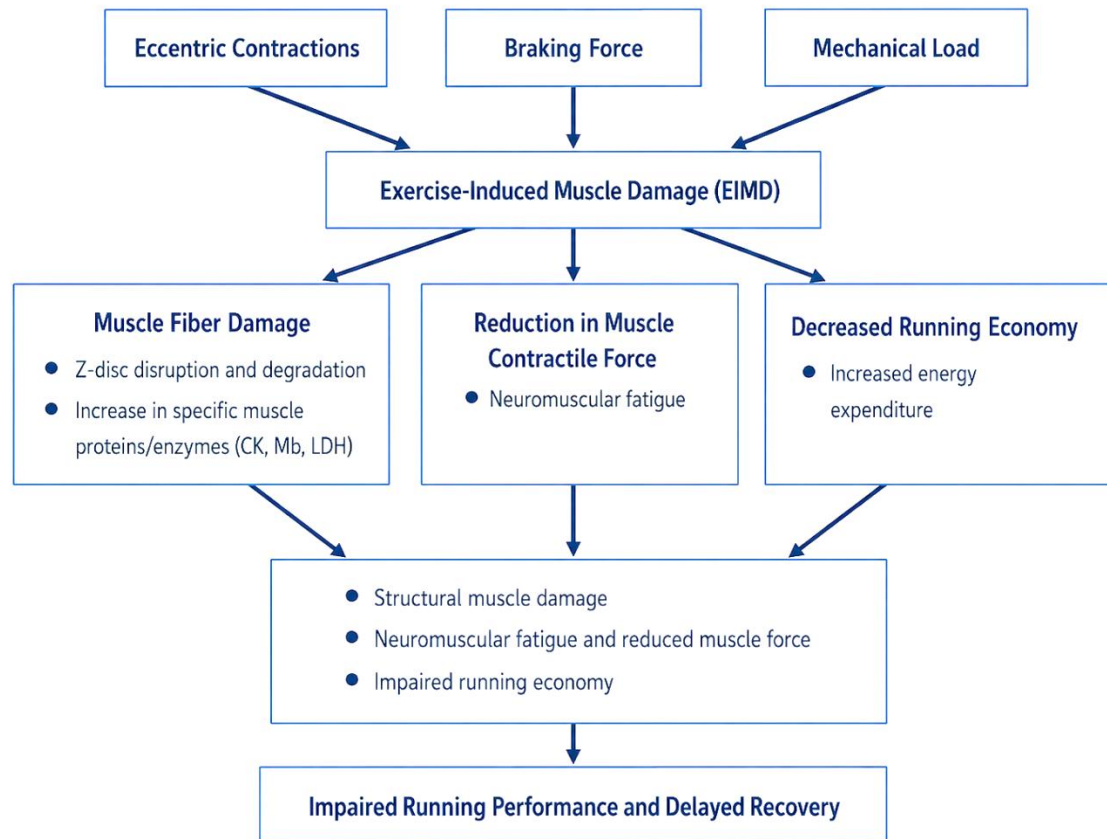


Figure 1. Conceptual framework of downhill running and exercise-induced muscle damage (EIMD)

การทำงานของข้อต่อร่างกายระหว่างการวิ่งลงเนินมีบทบาทสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพการวิ่งและการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย (EIMD) โดยการวิ่งลงเนินกระตุ้นให้เกิดการทำงานแบบเอกเซนตริกที่ข้อเข่าและเพิ่มภาระการทำงานของข้อสะโพกมากกว่าการวิ่งขึ้นเนิน ดังนั้น ความมั่นคงของข้อต่อในระหว่างการวิ่งลงเนินจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดทั้งสมรรถภาพการวิ่งและความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ (Devita et al., 2008) ในส่วนของการดูดซับแรงกระแทกขณะการวิ่งลงเนินจะมีแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อมี 1) การงอเท้าเพิ่มขึ้น (dorsiflexion) มากกว่า 5 องศา 2) มุมข้อต่อสะโพกลดลง 4.3 องศา 3) มีระยะเวลาการวางเท้ามาก (stance duration) 4) ระยะเวลาในการก้าวเพิ่มขึ้น (Stride duration) ในจังหวะการลงส้นเท้า (rearfoot strike) เมื่อเปรียบเทียบกับจังหวะการลงกลางเท้า (midfoot strike) หรือปลายเท้า (forefoot strike) Gottschall & Kram (2005) ให้คำแนะนำถึงการเพิ่มการดูดซับแรงกระแทกโดยการเพิ่มการงอเข่า (knee flexion) เมื่อเท้าเริ่มสัมผัสพื้น และลดความกว้างของระยะการก้าวขณะการวิ่งลงเนิน

ในเชิงกลไก การลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ (MVC) อย่างเฉียบพลันภายหลังการวิ่งลงเนินอาจเกี่ยวข้องกับการลดลงของแรงขับประสาทจากระบบประสาทส่วนกลาง (central drive) ไปยังกล้ามเนื้อ รวมถึงการลดลงของการปลดปล่อยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จากซาร์โคพลาสมิกรีติคูลัม (sarcoplasmic reticulum) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสร้างแรง นอกจากนี้ การหดตัวของแบบเอกเซนตริกที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ หรือเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อกระสวยกล้ามเนื้อ (muscle spindle) และความสามารถในการกระตุ้นหน่วยยนต์ (motor unit activation) อันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ (Sonkodi et al., 2020)

3. การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง (Running economy) ภายหลังการวิ่งลงเนิน

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพและความสำเร็จของนักกีฬารunning ระยะไกล (Morgan & Craib, 1992; Lucia et al., 2006) โดยหมายถึง ปริมาณการใช้ออกซิเจนหรือพลังงานที่ร่างกายต้องใช้ในการวิ่งที่ความเร็วกำหนดภายใต้ระดับความหนักต่ำกว่าระดับสูงสุดและอยู่ในสภาวะคงที่ ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่งที่ดีสะท้อนถึงความสามารถในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือ ใช้ออกซิเจนหรือพลังงานน้อยลงที่ความเร็วเท่ากัน ความลาดชันลงของภูมิประเทศมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง โดยสัมพันธ์กับระดับการทำงานของ

กล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริก ที่สูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วระดับพื้นราบ อย่างไรก็ตาม ขณะการเรียกใช้งานการกระตุ้นหน่วยยนต์ (motor unit) เพื่อกระตุ้นการหดตัวและยืดตัวของกล้ามเนื้อสั้นน้อยกว่าระดับปกติและความถี่การปล่อยสัญญาณประสาทระหว่างการยืดตัวของกล้ามเนื้อน้อยกว่าปกติอาจจะส่งผลที่ทำให้การวิ่งลงเนินมีความต้องการเผาผลาญที่ต่ำลง จึงเป็นกลไกหนึ่งเพื่ออธิบายการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าระหว่างการวิ่งลงเนินเมื่อเทียบกับการวิ่งบนพื้นราบ ในบางเงื่อนไขการวิ่งลงเนินอาจมีความต้องการการเผาผลาญพลังงานต่ำกว่าการวิ่งบนทางลาดชันขึ้นหรือพื้นราบที่ความเร็วและระดับความชันเท่ากัน (Lussiana et al., 2013; Minetti et al., 1994) อย่างไรก็ตาม เมื่อความชันและระยะเวลาการวิ่งเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในระดับความชันที่สูง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบไหลเวียนโลหิตและระบบหายใจ เช่น การเพิ่มขึ้นของอัตราการเต้นของหัวใจ อัตราการใช้ออกซิเจน และอัตราการหายใจ (Garnier et al., 2020; Westerlind et al., 1992; Dick & Cavanagh, 1987) รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแกนกลางลำตัว ภายหลังการวิ่งลงเนินเป็นระยะเวลานาน มีรายงานว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง อาจลดลงประมาณ 3–18% (Chen et al., 2007, Chen et al., 2009) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนไหว เช่น การเพิ่มความถี่ของการก้าว (stride frequency) หรือการลดช่วงการเคลื่อนไหวของข้อต่อส่วนล่าง (range of motion) (Sharwood et al., 2000) ความสัมพันธ์ระหว่างการวิ่งลงเนินกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง ขึ้นกับระดับความลาดชัน กล่าวคือ ในช่วงต้นของการวิ่งลงเนินที่ความชันระดับกลาง การทำงานแบบเอกเซนตริกอาจเพิ่มประสิทธิภาพและลดความต้องการการเผาผลาญพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่เท่ากับวิ่งขึ้นเขาหรือทางราบ อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความลาดชันและระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการสะสมของความล้าและความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ซึ่งกระตุ้นให้เกิดการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนไหวด้วยการเพิ่มความถี่ของการก้าว และการลดช่วงการเคลื่อนไหวของข้อต่อส่วนล่างของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ

ในเชิงกลไก การลดลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง ภายหลังการวิ่งลงเนินอาจสัมพันธ์กับระดับของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ซึ่งส่งผลให้ระบบประสาทต้องเพิ่มการกระตุ้นเส้นใยกล้ามเนื้อที่ยังทำงานได้เพื่อชดเชยเส้นใยที่เสียหาย โดยเฉพาะในช่วงจังหวะส่งแรง (push-off phase) (Nicol et al., 2006) นอกจากนี้ ความเสียหายของหลอดเลือดฝอยอาจกระทบต่อการขนส่งออกซิเจนไปยังเส้นใยกล้ามเนื้อ (Davies et al., 2008) รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราการเผาผลาญขณะพัก (resting metabolic rate) (Jamurtas et al., 2004) ซึ่งล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของการวิ่ง

โดยสรุป การวิ่งลงเนินระยะเวลานานสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านสรีรวิทยาและชีวกลศาสตร์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการวิ่งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง โดยมีการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายเป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของสมรรถภาพและระยะเวลาการฟื้นตัว

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน

การตอบสนองทางสรีรวิทยาและระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ภายหลังการวิ่งลงเนินขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับความลาดชัน ความเร็วในการวิ่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการวิ่ง สถานะการฝึกซ้อม เพศ และอายุ ระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อสามารถประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของกล้ามเนื้อ การลดลงของการทำงานของกล้ามเนื้อ และระดับการรับรู้ความเจ็บปวดของกล้ามเนื้อ ซึ่งมักปรากฏชัดภายในช่วง 24–96 ชั่วโมงภายหลังการออกกำลังกาย (Bontemps et al., 2020)

1. ปัจจัยด้านระดับการฝึกซ้อมและลักษณะเฉพาะของการวิ่งลงเนิน

การลดลงของแรงหดตัวสูงสุดแบบเกร็งค้าง (isometric MVC) เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญของความเสียหายของกล้ามเนื้อและความล้าระบบประสาทและกล้ามเนื้อ โดยพบว่าภายหลังการวิ่งลงเนิน ค่าแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจลดลงอย่างฉับพลัน (Maughan et al., 1989; Malm et al., 2004) ทั้งนี้ ขนาดของการลดลงแตกต่างกันตามสถานะการฝึกซ้อม โดยกลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกวิ่งลงเนินมีค่าแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ ลดลงประมาณ 23.5% ขณะที่กลุ่มที่มีการฝึกเฉพาะทางลดลงประมาณ 16.4% นอกจากนี้ กลุ่มที่ได้รับการฝึกสามารถฟื้นตัวกลับสู่ระดับปกติภายใน 72 ชั่วโมง ในขณะที่กลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกอาจใช้เวลามากกว่า 96 ชั่วโมงจึงจะฟื้นตัวอย่างสมบูรณ์ ในด้านตัวบ่งชี้ทางชีวเคมี ระดับครีเอตินไคเนสในเลือดมักเพิ่มขึ้นสูงสุดภายใน 24 ชั่วโมง (Schwane et al., 1987; Ehrstrom et al., 2018) ขณะที่อาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย หรือ DOMS มักสูงสุดภายใน 48 ชั่วโมง (Bontemps et al., 2020; Ehrstrom et al., 2018; Hayashi et al., 2019)

การฝึกความทนทานและการฝึกเฉพาะทางที่มียอดประกอบของการหดตัวแบบเอกเซนตริกสามารถช่วยลดระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อภายหลังการวิ่งลงเนิน (Ehrstrom et al., 2018) กลไกที่เกี่ยวข้องอาจประกอบด้วย การปรับตัวของระบบประสาท การเพิ่มความตึงตัวของหน่วยกล้ามเนื้อและเอ็นกล้ามเนื้อ (muscle-tendon unit stiffness) และการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเส้นใยกล้ามเนื้อ การฝึกที่มีความเฉพาะเจาะจงจึงมีบทบาทสำคัญในการสร้างความคุ้นเคยต่อแรงกระทำเชิงกล และอาจช่วยจำกัดระดับของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายภายหลังการวิ่งลงเนิน ระดับการฝึกซ้อมและความเฉพาะเจาะจงที่กำลังถูกใช้ฝึกซ้อมการวิ่งลงเนินสามารถมีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายควรต้องถูกนำมาศึกษาต่อไปในอนาคต

2. ปัจจัยด้านเพศและปัจจัยส่วนบุคคลอื่น

ในด้านความแตกต่างระหว่างเพศ งานวิจัยส่วนใหญ่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการลดลงของ แรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดโดยสมัครใจ ระดับความล้าระบบประสาท หรือระดับครีเอทีนไคเนส (CK) ในเลือดภายหลังการวิ่งลงเนินระหว่างเพศชายและเพศหญิง (Sorichter et al., 2001) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าในเพศหญิงระดับครีเอทีนไคเนส อาจกลับคืนสู่ค่าปกติได้รวดเร็วกว่าผู้ชาย (Oosthuysen et al., 2017) กลไกที่อธิบายความแตกต่างดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับบทบาทของฮอร์โมนเอสโตรเจน ซึ่งมีคุณสมบัติในการคงเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์กล้ามเนื้อ ลดการอักเสบ และอาจช่วยลดระดับความรุนแรงของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย โดยเฉพาะในระยะเวลาตอบสนองทุติยภูมิของการอักเสบ (Welsh et al., 2014) ปัจจัยทางด้านเพศและอายุอาจจะส่งผลต่อการตอบสนองต่อการวิ่งลงเนินแต่การศึกษาในส่วนนี้ยังต้องการการศึกษาเพิ่มเติม

แผนการพัฒนาความสามารถในการวิ่งลงเนิน

การเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายภายหลังการวิ่งลงเนินสามารถส่งผลให้ประสิทธิภาพการวิ่งลดลง และยืดระยะเวลาการฟื้นตัวของนักกีฬา ดังนั้น แนวทางการพัฒนาความสามารถในการวิ่งลงเนินจึงมุ่งเน้นไปที่การกระตุ้นการปรับตัวทางสรีรวิทยาและชีวกลศาสตร์ผ่านการฝึกซ้อมที่มีความเฉพาะเจาะจงหลักการสำคัญของการพัฒนาดังกล่าวคือ การสร้างความคุ้นเคยต่อภาระการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริก ซึ่งเกิดขึ้นซ้ำ ๆ และต่อเนื่องในระหว่างการวิ่งลงเนิน การฝึกที่มียอดประกอบของแรงต้านเชิงลบในระดับที่ควบคุมได้สามารถช่วยลดระดับความรุนแรงของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายในการออกกำลังกายครั้งถัดไป อันเป็นผลจากกระบวนการปรับตัวของกล้ามเนื้อและระบบประสาท กระบวนการปรับตัวดังกล่าวจึงมีบทบาทเป็นขั้นตอนเตรียมความพร้อม (preconditioning) สำหรับการแข่งขันหรือการฝึกซ้อมที่มีการวิ่งลงเนิน โดยเฉพาะในนักกีฬาวิ่งระยะไกล ซึ่งจำเป็นต้องเผชิญกับแรงกระทำเชิงกลสูงและต่อเนื่อง การออกแบบโปรแกรมฝึกที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการลดความเสี่ยงของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย การรักษาประสิทธิภาพการวิ่ง และการส่งเสริมการฟื้นตัวอย่างมีประสิทธิภาพ (Bontemps et al., 2020)

1. การปรับตัวภายหลังการฝึกซ้อม

1.1 การฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ (repeated Bout Effect; RBE)

การฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ หรือ RBE เป็นกลไกการปรับตัวที่สำคัญต่อการลดความรุนแรงของการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย โดยเฉพาะภายหลังการวิ่งลงเนิน ซึ่งมีลักษณะของการหดตัวแบบเอกเซนตริกในระดับสูง แนวคิดของการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ คือ การแบ่งการวิ่งลงเนินออกเป็นอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยเว้นระยะห่างกันหลายวันจนถึงหลายสัปดาห์ การวิ่งลงเนินครั้งแรกอาจทำให้เกิดความเสียหายของกล้ามเนื้อ ส่งผลให้แรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดลดลง และเกิดอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย หรือ DOMS อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการวิ่งลงเนินครั้งที่ 2 ภายหลังการฟื้นตัว ระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Byrnes et al., 1985) และการฟื้นตัวของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อจะรวดเร็วขึ้น (Ebbeling & Clarkson, 1989) กลไกที่เกี่ยวข้องกับการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ ประกอบด้วย 1) การปรับตัวของระบบประสาท (neural adaptation) ซึ่งช่วยกระจายภาระไปยังหน่วยมอเตอร์ที่เหมาะสมมากขึ้น 2) การปรับตัวเชิงโครงสร้างของกล้ามเนื้อและเอ็นกล้ามเนื้อ 3) การเพิ่มความสามารถในการควบคุมการอักเสบ และ 4) การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการซ่อมแซมและการเรียงตัวใหม่ของไมโอไฟบริล (Hyldahl et al., 2017) มีรายงานว่า การวิ่งลงเนินครั้งที่ 2 ภายในระยะเวลาไม่เกิน 7 วันหลังจากการวิ่งครั้งแรก สามารถลดระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อได้ (Pierrynowski et al., 1987) ซึ่งสัมพันธ์กับการลดการรั่วไหลของโปรตีนจำเพาะในกล้ามเนื้อ เช่น ครีเอทีนไคเนส (CK) และ ไมโอโกลบิน (Mb) เข้าสู่กระแสเลือด และอาจมีการกำจัดออกได้รวดเร็วขึ้น (Pierrynowski et al., 1987; Park & Lee,

2015; Smith et al., 2007) ผลที่ตามมาคือระดับเกิดอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย (DOMS) ลดลง (Smith et al., 2007) และการฟื้นคืนค่าแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าเดิม (Green et al., 2010) โดยทั่วไปการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำส่งผลชัดเจนต่อการลดระดับครีเอทีนไคเนส (CK) มากกว่าการลดเกิดอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย (DOMS) และการป้องกันการลดลงของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุด (MVC) ภายหลังการออกกำลังกาย นอกจากนี้ยังพบว่าการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ อาจส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง และพารามิเตอร์การก้าว เช่น ความยาวก้าวและความถี่ก้าว โดยเฉพาะเมื่อทำการวิ่งลงเนินครั้งที่ 2 หลังผ่านไปอย่างน้อย 72 ชั่วโมงจากครั้งแรก กลไกที่เป็นไปได้คือ การลดระดับการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ทำให้ความต้องการสัญญาณประสาทสั่งงานไปยังกล้ามเนื้อลดลง โดยเฉพาะในช่วงจังหวะถีบพื้นพื้น ส่งผลให้ต้นทุนการใช้ออกซิเจนลดลง และทำให้ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่งดีขึ้น (Bontemps et al., 2020)

Table 1. Summary of downhill running studies: participant characteristics, downhill running training interventions, changes in stride characteristics, and the use of compression garments.

Study	Participants	Downhill run			Intervention	Outcomes
		Duration	Intensity	Slope (%)		
Byrnes et al. (1985)	College students (n=22; 11 males and 11 females)	30 min	Speed corresponding to 170 bpm recorded on level grade	-17.6	Bout 3 post 3, 6 & 9 weeks	+ DOMS after week 3 and 6 + CK and Mb after 3 and 6 <-> DOMS และ CK after week 9
Pierrynowski et al. (1987)	College male students (n=9)	3x4 min, r=9 min	60%VO _{2max}	-10	Bout 2 pre & post 4 days	+ DOMS <-> MVC of KE & Knee flexors
Westerlind et al. (1992)	Recreational active adults (n=7; 4 males & 3 females)	30 min	40%VO _{2peak}	-10	Bout 2 pre & post 2 weeks	+ DOMS + CK + VO _{2peak} increases during DR
Eston et al. (1996)	Healthy male students (n=10)	5x8 min, r=2 min	60%HR _{max}	-10	Bout 2 of 100 KE maximal eccentric contractions; pre & post 2 weeks prior DR	+ CK + DOMS <-> Muscle tenderness + MVC of KE (Concentric & Eccentric contraction)
Smith et al. (2007)	Active male adults (n=9)	3x15 min, r=5 min	70%VO _{2peak} recorded on level grade	-16.2	Bout 2 pre & post 2 weeks	+ DOMS + CK
McKune et al. (2006)	Healthy male adults (n=11)	60 min	75%VO _{2peak} recorded on level grade	-13.5	Bout 2 pre & post 2 weeks	+ CK
Chen et al. (2007)	Healthy male students (n=12)	30 min	70%VO _{2max}	-15	Bout 2 pre & post 5 days	+ DOMS + CK + RE changes with faster recovery time
Green et al. (2010)	Recreational adult female (n=10)	6x5 min, r=2 min	13 km/hr	-10	Bout 2 pre & post 2 weeks	<-> Faster recovery of MVC of KE <-> CK <-> DOMS <-> Insulin & glucose response
Park & Lee (2015)	Moderately trained male adults (n=13)	40 males	70%VO _{2max}	-10	Bout 2 pre & post 3 weeks	+ CK

Table 1. (Continued)

Study	Participants	Downhill run			Intervention	Outcomes
		Duration	Intensity	Slope (%)		
Schwane et al. (1987)	Healthy (n=20 in DR; 7 male & 13 females)	9x5 min, r=2 min	80%VO _{2max} @ level grade (9.4 km/hr)	-10	5 sessions/week for 1 or 2 weeks	+ DOMS + CK
Toyomura et al. (2018)	Healthy male adults (n=18)	5-20 min	14.9km/hr (Lactate threshold)	-10	5 sessions/week for 5 weeks	+ MVC of KE + Change of direction ability + Little effect on aerobic capacity
Giandolini et al. (2013)	Male adults trained in trail training (n=23)	6.5 km	As fast as possible (13.3 km/hr)	-16.8	Anterior vs. posterior FSP (preferred stride frequency)	FSP differently affects the components of impact shock acceleration: <-> Anterior FSR leads to improve attenuation & impact-related frequency
Giandolini et al. (2017)	Male adults trained in trail training (n=23)	6.5 km	As fast as possible (13.3 km/hr)	-16.8	Anterior vs. posterior FSP (preferred stride frequency)	Anterior FSP: - MVC decrement in KE - Peripheral neuromuscular fatigue in KE High FSP: - MVC decrement in KE & PF
Baggaley et al.	Active adults (n=19; 9 males & 10 females)	<15 second	11.9 km/hr	-8.8 & -17.6	@ PSF, +10% PSF, -10% PSF	PSF manipulation: + Lower leg energy absorption + Impact attenuation + Shorter PSF: reduce the demand placed on the knee & hip and may aid to reduce EIMD and improving performance
Ehrström et al. (2020)	Male adults well-trained in trail running (n=13)	40 min	55%VO _{2max} (15.1 km/hr) VO _{2max} measured with a +10%	-15	Compression rate of 18 mmHg to the calf & 21 mmHg at thigh	+ Attenuation of KE + self tissue vibration + Neuromuscular fatigue & recovery + MVC decrements in KE & recovery + DOMS <-> RE
Lussiana et al. (2013)	Male adults recreational runner (n=14)	7x5 min (DR, level & uphill), r=5 min	10 km/hr	-8, -5 & -2 for DR	Minimal shoes vs. traditional shoes	+ RE when all slopes are considered. <-> RE for negative slopes only.

1.2 การกระตุ้นก่อนการออกกำลังกาย (preconditioning Exercise)

การกระตุ้นก่อนการออกกำลังกาย หมายถึง การปฏิบัติการฝึกแรงต้านหรือการหดตัวของกล้ามเนื้อในระดับความหนักสูงก่อนการวิ่งลงเนิน เพื่อกระตุ้นการปรับตัวของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และลดระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย แนวคิดดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ แต่แตกต่างกันที่การใช้รูปแบบการฝึกเฉพาะจุดและควบคุมตัวแปรได้มากกว่า ตัวอย่างเช่น การฝึกกล้ามเนื้อเหยียดหัวเข่า ด้วยการหดตัวแบบเอกเซนตริก จำนวน 100 ครั้ง ที่ความเร็วต่ำ หลังจากนั้น 14 วัน ให้วิ่งลงเนินระยะเวลารวม 40 นาที โดยแบ่งออก 5 รอบ ๆ ละ 8 นาที และพักรอบละ 2 นาที พบว่า ภายหลังการวิ่งลงเนิน ค่าแรงสูงสุดที่วัดด้วยเครื่องไอโซไคเนติก (isokinetic dynamometer) ลดลงน้อยกว่ากลุ่มควบคุมประมาณ 19–22% และระดับครีเอทีนไคเนส (CK) ภายหลัง 48 ชั่วโมง ลดการเพิ่มขึ้นได้ถึง 79% (Eston et al., 1996) นอกจากนี้ การกระตุ้นด้วยแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุด จำนวน 10 ครั้ง เป็นระยะเวลา 2 วันก่อนการวิ่งลงเนิน พบว่าสามารถเร่งการฟื้นตัวของแรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุดให้กลับสู่ค่าปกติภายใน 72 ชั่วโมง ขณะที่กลุ่มควบคุมยังไม่สามารถฟื้นตัวได้สมบูรณ์แม้ผ่านไป 96 ชั่วโมง และระดับอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย ลดลงประมาณ 25% ภายใน 48 ชั่วโมง (Bontemps et al., 2020) อย่างไรก็ตาม รูปแบบการกระตุ้นดังกล่าวไม่พบผลต่อค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง การกระโดดสูง หรือระดับครีเอทีนไคเนส (CK) อย่างมีนัยสำคัญ การทำการกระตุ้นก่อนการออกกำลังกาย อาจช่วยกระตุ้นการปรับตัวของหน่วยมอเตอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมแรงการหดตัวแบบเอกเซนตริก และเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเส้นใยกล้ามเนื้อก่อนเผชิญภาระจริงจากการวิ่งลงเนิน ส่งผลให้ระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และความล้าระบบประสาท-กล้ามเนื้อลดลง โดยสรุป การทำการกระตุ้นก่อนการออกกำลังกาย เป็นกลยุทธ์เชิงป้องกันที่สามารถประยุกต์ใช้ในช่วงเตรียมการแข่งขันหรือก่อนการฝึกวิ่งลงเนินที่มีความหนักสูง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อลดความรุนแรงของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และเร่งการฟื้นตัวของสมรรถภาพกล้ามเนื้อ

1.3 การฝึกซ้อมวิ่งลงเนิน

การฝึกซ้อมวิ่งลงเนินเป็นรูปแบบการฝึกที่มีลักษณะเฉพาะจากการกระตุ้นการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริกในระดับสูงและต่อเนื่อง โดยเฉพาะการฝึกแบบพลัยโอเมตริกในช่วงจังหวะเท้าสัมผัสพื้น (initial contact) ช่วงรับแรงกระแทก และช่วงการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบคอนเซนตริก การฝึกในลักษณะดังกล่าวสามารถพัฒนาความแข็งแรงของกล้ามเนื้อในนักกีฬาประเภทความอดทน และอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง เพิ่มขึ้นประมาณ 4-8% (Douglas et al., 2017, Sedano et al., 2013) กลไกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย การกระตุ้นการปรับตัวของระบบประสาท การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันของหน่วยกล้ามเนื้อและเอ็นกล้ามเนื้อ การเพิ่มความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของเส้นใยกล้ามเนื้อ และการปรับเปลี่ยนรูปแบบชีวกลศาสตร์การวิ่ง การฝึกวิ่งลงเนินยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของวงจรการยืดออก-หดสั้น (stretch-shortening cycle; SSC) โดยเฉพาะในช่วงเอกเซนตริก ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการกักเก็บและถ่ายโอนพลังงาน ส่งผลให้ต้นทุนการใช้ออกซิเจนขณะวิ่งบนพื้นราบลดลง (Nicol et al., 2006)

จากการศึกษาพบว่ากลุ่มที่ฝึกวิ่งลงเนิน (5 ครั้ง/สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 1-2 สัปดาห์ ครั้งละ 5-15 นาที ที่ความลาดชัน 10% และความหนัก 80% VO_{2max}) มีระดับอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกายต่ำกว่ากลุ่มควบคุม ภายหลังการวิ่งลงเนิน 45 นาที นอกจากนี้ การฝึกเป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์ (3 ครั้ง/สัปดาห์ ครั้งละ 5-20 นาที ที่ความลาดชันลาดลง 10%) สามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดของการหดตัวแบบไอโซเมตริก คอนเซนตริก และเอกเซนตริกได้ประมาณ 9-24% เมื่อประเมินด้วยเครื่องไอโซไคเนติก (Toyomura et al., 2018) อย่างไรก็ตาม การฝึกที่ระดับความลาดชันลาดลง 5% ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่งหรือพารามิเตอร์การก้าว ได้แก่ ความยาวก้าวและความถี่ก้าว แสดงให้เห็นว่าขนาดของความลาดชัน (slope magnitude) อาจเป็นตัวแปรสำคัญต่อระดับการกระตุ้นการปรับตัว การเพิ่มประสิทธิภาพในการวิ่งลงเนินในนักกีฬาวิ่งเทรล จำเป็นต้องมุ่งเน้นการพัฒนาองค์ประกอบทางสรีรวิทยาและสมรรถภาพทางกายที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถในการใช้ออกซิเจนสูงสุด (VO_{2max}) ความแข็งแรงสูงสุดของกล้ามเนื้อ (maximal strength) และความตึงตัวของหน่วยกล้ามเนื้อ-เอ็น (muscle-tendon unit stiffness) ของกล้ามเนื้อส่วนล่างของร่างกาย โดยองค์ประกอบทั้งสามประการนี้มีบทบาทเชิงกลไกที่สำคัญต่อการควบคุมแรง การดูดซับแรงกระแทก และการถ่ายโอนพลังงานเชิงกล ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยกำหนดประสิทธิภาพในการวิ่งลงเนินอย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุป การฝึกซ้อมวิ่งลงเนินในระดับความลาดชันและความหนักที่เหมาะสมสามารถกระตุ้นการปรับตัวเชิงประสาท-กล้ามเนื้อ เพิ่มความแข็งแรง และอาจส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่ง ทั้งนี้ ผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับความเฉพาะเจาะจงของโปรแกรมฝึก ความลาดชัน และระยะเวลาการฝึกเป็นสำคัญ นอกจากนี้ การรวบรวมข้อมูลจำนวนโปรแกรมการฝึกซ้อมการวิ่งลงเนินที่มีจำนวน

หลากหลายนั้น ยังไม่แน่ชัดว่าโปรแกรมการฝึกเป็นปัจจัยใดมีบทบาทสำคัญที่ตอบสนองต่อการบาดเจ็บและความล้าของกล้ามเนื้อในขณะการวิ่งลงเนิน จึงมีความจำเป็นต้องมีงานวิจัยคุณภาพสูงเพิ่มเติม โดยใช้แนวทางที่มีความสอดคล้องกันในการประเมินความเสียหายของกล้ามเนื้อ

2. การปรับตัวของการก้าว น้ำหนักร่างกาย การสะสมความร้อน และอุณหภูมิกล้ามเนื้อ

2.1 ลักษณะการก้าวและรูปแบบการวางเท้าที่เหมาะสม

ลักษณะการก้าว ได้แก่ ระยะการก้าว (stride length) และความถี่การก้าว (stride frequency) รวมถึงรูปแบบการวางเท้า เช่น การลงส้นเท้า (rearfoot strike) กลางเท้า (midfoot strike) หรือปลายเท้า (forefoot strike) ล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงกระทำเชิงกลที่เกิดขึ้นกับระบบประสาทและกล้ามเนื้อของร่างกาย (Giandolini et al., 2017) ความล้าที่สะสมจากแรงกระแทกและแรงเบรกในระหว่างการวิ่งลงเนินมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย (Baggaley et al., 2020, Giandolini et al., 2017) ในบริบทของการวิ่งลงเนิน พบว่า การใช้ระยะการก้าวมากกว่าปกติ (overstriding) สามารถเพิ่มแรงเบรกและแรงกระแทกในช่วงเท้าสัมผัสพื้น ส่งผลให้แรงหดตัวของกล้ามเนื้อสูงสุด ลดลงมากกว่าการใช้ความยาวก้าวที่สั้นลงกว่าปกติ ในทางตรงกันข้าม การลดระยะการก้าวและเพิ่มความถี่การก้าวมีแนวโน้มช่วยลดภาระเชิงกลต่อกล้ามเนื้อ และส่งเสริมการฟื้นตัวของการทำงานของกล้ามเนื้อได้รวดเร็วขึ้นภายหลังการออกกำลังกายแบบเฉียบพลัน อย่างไรก็ตาม การฝึกด้วยความยาวก้าวที่มากกว่าปกติอาจถูกนำมาใช้เป็นกลยุทธ์กระตุ้นให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ในระดับควบคุมได้ขณะวิ่งลงเนินครั้งแรก เพื่อกระตุ้นกลไกการฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ กล่าวคือ การกระตุ้นความเสียหายของกล้ามเนื้อในระดับหนึ่งอาจนำไปสู่การปรับตัวที่ช่วยลดระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย ในการวิ่งลงเนินครั้งถัดไป โดยเฉพาะเมื่อประเมินภายใน 24 ชั่วโมงหลังการออกกำลังกาย (Bontemps et al., 2020)

ระยะการก้าวมีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับพลังงานเชิงกลและการกระจายแรงกระแทกของร่างกายขณะวิ่งลงเนิน โดยเฉพาะในช่วงเท้าสัมผัสพื้นและช่วงรับแรงเบรก มีรายงานว่า การลดระยะการก้าวลงประมาณ 10% สามารถลดการดูดซับพลังงานและลดแรงกระแทกที่ข้อเข่าและข้อสะโพกได้อย่างมีนัยสำคัญ กลไกดังกล่าวอาจช่วยลดภาระการทำงานของแบบเอนเซนตริกของกล้ามเนื้อรอบข้อ และลดความเสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย การปรับลดระยะการก้าวควบคู่กับการเพิ่มความถี่การก้าว สามารถลดแรงเบรก (braking force) และลดความเค้นเชิงกลสะสมในระบบประสาทและกล้ามเนื้อ ซึ่งอาจช่วยรักษาประสิทธิภาพการวิ่งและชะลอการเกิดความล้าได้ โดยเฉพาะในการวิ่งลงเนินระยะเวลานาน ทั้งนี้ ระยะการก้าวและความถี่การก้าว มีความสัมพันธ์กับต้นทุนพลังงานในการวิ่ง หากรูปแบบการก้าวขณะวิ่งลงเนินมีความใกล้เคียงกับความถี่การก้าว ที่นักกีฬาคุ้นเคยขณะวิ่งบนพื้นราบ อาจช่วยคงประสิทธิภาพการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการวิ่งได้

การเพิ่มความถี่การก้าวขณะวิ่งลงเนินอาจเป็นกลยุทธ์หนึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บและการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายได้ กลไกที่เป็นไปได้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความยาวของกล้ามเนื้อขณะเกิดการหดตัวแบบเอนเซนตริก เมื่อความถี่การก้าวต่ำและระยะการก้าวยาว โดยเฉพาะกลุ่มเหยียดข้อเข่าและข้อสะโพกจะทำงานในช่วงความยาวที่มากขึ้นระหว่างจังหวะรับแรง ส่งผลให้เกิดการหดตัวแบบเอนเซนตริกภายใต้สภาวะ “กล้ามเนื้อยาว” ซึ่งสัมพันธ์กับระดับความเสียหายของเส้นใยกล้ามเนื้อที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความถี่การก้าวและลดระยะการก้าวจะทำให้การหดตัวแบบเอนเซนตริกเกิดขึ้นในช่วงความยาวกล้ามเนื้อที่สั้นลง ลดแรงเบรกและแรงกระแทกสะสม จึงอาจลดความเสียหายของกล้ามเนื้อส่วนล่างของร่างกายได้ (Butterfield & Herzog, 2006; Child et al., 1998; Jones et al., 1989)

รูปแบบการวางเท้าในจังหวะเริ่มสัมผัสพื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบการทำงานและความยาวของกล้ามเนื้อของร่างกาย ซึ่งอาจส่งผลต่อระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย โดยเฉพาะในการวิ่งลงเนินที่มีแรงกระแทกและแรงเบรกสูง รูปแบบการวางเท้าของนักวิ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) การลงส้นเท้า (rearfoot strike) คือ ส้นเท้าสัมผัสพื้นก่อน แล้วจึงตามด้วยส่วนกลางเท้าและปลายเท้า 2) การลงกลางเท้า (midfoot strike) คือ บริเวณกระดูกฝ่าเท้าส่วนกลางสัมผัสพื้นก่อนหรือเกือบพร้อมๆ กับส้นเท้า และ 3) การลงปลายเท้า (forefoot strike) คือ บริเวณกระดูกฝ่าเท้าด้านหน้าเป็นจุดสัมผัสแรก โดยส้นเท้าอาจไม่สัมผัสพื้นหรือสัมผัสภายหลังอย่างชัดเจน การลงส้นเท้ามักสัมพันธ์กับแรงกระแทกที่สูงกว่าและแรงเบรกที่มากขึ้น ซึ่งอาจเพิ่มภาระการทำงานของแบบเอนเซนตริกของกล้ามเนื้อรอบข้อเข่า ในขณะที่การลงกลางเท้าหรือปลายเท้าอาจช่วยกระจายแรงผ่านข้อเท้าและเอ็นร้อยหวายมากขึ้น

รูปแบบการลงปลายเท้ามีลักษณะเฉพาะคือ ขณะเริ่มสัมผัสพื้นข้อเท้าอยู่ในท่างอข้อเท้าลงร่วมกับการงอเข่ามากกว่าการลงส้นเท้า ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้แรงกระแทกเริ่มต้นลดลง แต่เกิดการถ่ายโอนแรงเบรกไปยังข้อเท้าและกล้ามเนื้อรอบข้อเท้ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการลงส้นเท้า พบว่า รูปแบบการลงปลายเท้ามีแรงเบรกที่บริเวณข้อเท้า (เช่น กล้ามเนื้อ vastus lateralis) และกล้ามเนื้อหน้าแข้ง (tibialis anterior) ในระดับต่ำกว่า ขณะที่แรงเบรกและแรงดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นที่ข้อเท้า โดยเฉพาะในกล้ามเนื้อ gastrocnemius lateralis ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงในช่วงเอคเซนตริกภายหลังเท้าสัมผัสพื้น ดังนั้น แม้ว่าการลงปลายเท้าอาจช่วยลดภาระเชิงกลที่ข้อเท้า แต่ก็อาจเพิ่มภาระการทำงานของแบบเอคเซนตริกของกล้ามเนื้อกลุ่มงอข้อเท้าลง และอาจจะเป็นปัจจัยที่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ในกล้ามเนื้อในกลุ่มการวิ่งลงเขา หากไม่มีความแข็งแรงหรือความคุ้นเคยเพียงพอ ในทางปฏิบัติ นักวิ่งที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางเท้าระหว่างการวิ่งลงเนินได้อย่างยืดหยุ่น เช่น สลับระหว่างการลงส้นเท้า กลางเท้า หรือปลายเท้า อาจช่วยกระจายภาระเชิงกลไปยังกล้ามเนื้อที่แตกต่างกัน ลดการสะสมความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และจำกัดการเปลี่ยนแปลงของการทำงานของระบบประสาทส่วนปลายให้อยู่ในระดับต่ำ (Bontemps et al., 2020) โดยสรุป ขณะการวิ่งลงเนิน ควรหลีกเลี่ยงการก้าวยาวเกินปกติ โดยปรับลดระยะการก้าวร่วมกับเพิ่มความถี่การก้าว เพื่อลดแรงกระแทกและแรงเบรกที่เกิดขึ้นในช่วงเท้าสัมผัสพื้น สำหรับรูปแบบการวางเท้า ควรเลือกใช้การลงกลางเท้าหรือปลายเท้าเพื่อช่วยกระจายแรงเชิงกล อย่างไรก็ตาม การปรับรูปแบบการวางเท้าควรสอดคล้องกับระดับความแข็งแรงและความคุ้นเคยของกล้ามเนื้อ โดยอาจใช้การปรับเปลี่ยนรูปแบบการลงเท้าอย่างยืดหยุ่นเพื่อกระจายภาระ ลดความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และลดความเสียหายเฉพาะจุดเพื่อจำกัดความรุนแรงของการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายได้

2.2 การใส่ถุงน่องรัดกล้ามเนื้อช่วงล่างของร่างกาย

การใส่ถุงน่องรัดกล้ามเนื้อ (compression garments) ที่มีระดับแรงดันเหมาะสมระหว่างการวิ่งลงเนิน อาจช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของความล้าระบบประสาทและกล้ามเนื้อของกล้ามเนื้อเหยียดเข่า (KE) ในระยะเฉียบพลันภายหลังการวิ่ง (Ehrstrom et al., 2018) กลไกที่เป็นไปได้ คือ การลดการสั่นของกล้ามเนื้อระหว่างเท้าสัมผัสพื้น การเพิ่มความมั่นคงของข้อต่อ และการกระตุ้นการรับรู้ตำแหน่งของข้อต่อ (proprioception) ซึ่งอาจส่งผลให้การควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อช่วงล่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นระหว่างออกกำลังกาย นอกจากนี้ การใส่ถุงน่องรัดกล้ามเนื้ออาจส่งเสริมกระบวนการฟื้นตัวภายหลังการออกกำลังกาย โดยเฉพาะในกล้ามเนื้อมัดใหญ่ที่มีภาระเชิงกลสูงจากการวิ่งลงเนิน ทั้งนี้ อาจเกี่ยวข้องกับการส่งเสริมการไหลเวียนกลับของเลือดดำและการลดการคั่งของของเหลวในเนื้อเยื่อ (Ehrstrom et al., 2018) การใช้ถุงน่องรัดกล้ามเนื้ออาจเป็นกลยุทธ์หนึ่งที่ช่วยจำกัดระดับการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย ทั้งในการวิ่งลงเนินและการวิ่งบนพื้นราบ โดยเฉพาะในนักวิ่งที่มีอายุมากกว่า 40 ปี ซึ่งอาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย และการฟื้นตัวที่ช้ากว่า การเพิ่มความมั่นคงของกล้ามเนื้อและเอ็นกล้ามเนื้อจากแรงรัดอาจช่วยลดผลกระทบจากแรงกระแทกและแรงเร่งซ้ำ ๆ ในการฝึกวิ่งระยะยาว

3. การสะสมความร้อน

การควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย (thermoregulation) ระหว่างการออกกำลังกายมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความหนักของการทำงานของระบบเผาผลาญ โดยทั่วไป การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแกนกลางลำตัวสอดคล้องกับระดับการใช้ออกซิเจน (VO₂) และความหนักของการออกกำลังกาย มากกว่ารูปแบบการหดตัวของกล้ามเนื้อโดยเฉพาะ ขณะการวิ่งลงเนินระดับการใช้ออกซิเจนมักต่ำกว่าการวิ่งขึ้นภูเขา เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วการวิ่งซึ่งนักกีฬาสามารถปฏิบัติได้จริง เนื่องจาก การวิ่งลงเนินมีต้นทุนพลังงานเชิงเมตาบอลิซึมต่ำกว่า แม้ว่าจะมีภาระเชิงกลจากแรงกระแทกและแรงเบรกสูงกว่า ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแกนกลางลำตัวขณะวิ่งลงเนินจึงมีแนวโน้มต่ำกว่าการวิ่งขึ้นภูเขาเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม แมต้นทุนพลังงานจะต่ำกว่า แต่การวิ่งลงเนินในระยะเวลานานหรือที่ความลาดชันสูงอาจทำให้เกิดความล้าของระบบประสาทและกล้ามเนื้อจากแรงเอคเซนตริกสะสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่แตกต่างจากความล้าจากภาระเมตาบอลิซึมโดยตรง

4. น้ำหนักร่างกาย

น้ำหนักร่างกายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อแรงกระทำเชิงกลที่เกิดขึ้นกับระบบประสาท-กล้ามเนื้อขณะวิ่งลงเนิน เนื่องจากแรงกระแทกและแรงเบรกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลของร่างกาย การลดน้ำหนักร่างกาย โดยเฉพาะมวลไขมันส่วนเกิน อาจช่วยลดภาระเชิงกลที่กระทำต่อข้อเท้า ข้อสะโพก และข้อเท้า ส่งผลให้ระดับความล้าและความเสี่ยงต่อการเกิดการบาดเจ็บลดลง ในทางตรงกันข้าม ปริมาณไขมันในร่างกายที่สูงอาจเพิ่มแรงกระแทกสะสมในช่วงเท้าสัมผัสพื้น และเพิ่มความต้องการการทำงานของแบบเอคเซนตริกของกล้ามเนื้ออย่างค้ำลง ส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกายในระดับที่รุนแรงขึ้น และทำให้ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อลดลงอย่างชัดเจนภายหลังการวิ่งลงเนิน

สรุป

การวิ่งลงเนินเป็นรูปแบบการออกกำลังกายที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อแบบเอกเซนตริกในระดับสูง ซึ่งสามารถชักนำให้เกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย (EIMD) และความล้าของระบบประสาท-กล้ามเนื้อ ส่งผลให้สมรรถภาพการวิ่งลดลงในระยะเวลาหลังการออกกำลังกาย การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยามักเกิดขึ้นตั้งแต่ทันทีหลังการออกกำลังกายจนถึงประมาณ 96 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ระดับความล้า ความเร็ว และระยะเวลาในการวิ่ง ระดับของการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย สามารถประเมินได้จากการลดลงของแรงหดตัวกล้ามเนื้อสูงสุด ระดับครีเอทีนไคเนสในกระแสเลือด และระดับอาการปวดกล้ามเนื้อภายหลังการออกกำลังกาย (DOMS) นอกจากนี้ ปัจจัยด้านเทคนิคการวิ่ง เช่น ระยะและความถี่ของการก้าว รูปแบบการวางเท้า รวมถึงองค์ประกอบของร่างกายและอุปกรณ์ที่ใช้ อาจมีบทบาทในการลดภาระเชิงกลและจำกัดการเกิดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อจากการออกกำลังกาย กลไกการปรับตัวของระบบประสาท-กล้ามเนื้อ โดยเฉพาะปรากฏการณ์การฝึกซ้อมเป็นชุดซ้ำ (RBE) ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดระดับความเสียหายของกล้ามเนื้อจากการวิ่งลงเนิน การวางแผนโปรแกรมฝึกที่มีความจำเพาะต่อการวิ่งลงเนินร่วมกับการจัดการภาระการฝึกอย่างเหมาะสม จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บและส่งเสริมประสิทธิภาพการวิ่งในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

- Baggaley, M., Vernillo, G., Martinez, A., Horvais, N., Giandolini, M., Millet, G. Y., & Edwards, W. B. (2020). Step length and grade effects on energy absorption and impact attenuation in running. *European journal of sport science*, 20(6), 756–766. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1664639>
- Bontemps, B., Vercruyssen, F., Gruet, M., & Louis, J. (2020). Downhill Running: What Are The Effects and How Can We Adapt? A Narrative Review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 50(12), 2083–2110. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01355-z>
- Butterfield, T. A., & Herzog, W. (2006). Effect of altering starting length and activation timing of muscle on fiber strain and muscle damage. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 100(5), 1489–1498. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00524.2005>
- Byrnes, W. C., Clarkson, P. M., White, J. S., Hsieh, S. S., Frykman, P. N., & Maughan, R. J. (1985). Delayed onset muscle soreness following repeated bouts of downhill running. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 59(3), 710–715. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.1985.59.3.710>
- Carmichael, M. D., Davis, J. M., Murphy, E. A., Brown, A. S., Carson, J. A., Mayer, E., & Ghaffar, A. (2005). Recovery of running performance following muscle-damaging exercise: relationship to brain IL-1beta. *Brain, behavior, and immunity*, 19(5), 445–452. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2005.03.012>
- Chen, T. C., Nosaka, K., & Tu, J. H. (2007). Changes in running economy following downhill running. *Journal of sports sciences*, 25(1), 55–63. <https://doi.org/10.1080/02640410600718228>
- Chen, T. C., Nosaka, K., Lin, M. J., Chen, H. L., & Wu, C. J. (2009). Changes in running economy at different intensities following downhill running. *Journal of sports sciences*, 27(11), 1137–1144. <https://doi.org/10.1080/02640410903062027>
- Child, R. B., Saxton, J. M., & Donnelly, A. E. (1998). Comparison of eccentric knee extensor muscle actions at two muscle lengths on indices of damage and angle-specific force production in humans. *Journal of sports sciences*, 16(4), 301–308. <https://doi.org/10.1080/02640419808559358>
- Coratella, G., Longo, S., Cè, E., Esposito, F., de Almeida Costa Campos, Y., et al. (2019). Commentaries on Viewpoint: Distinct modalities of eccentric exercise: different recipes, not the same dish. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 127(3), 884–891. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00496.2019>
- Davies, R. C., Eston, R. G., Poole, D. C., Rowlands, A. V., DiMenna, F., Wilkerson, D. P., Twist, C., & Jones, A. M. (2008). Effect of eccentric exercise-induced muscle damage on the dynamics of muscle oxygenation and pulmonary oxygen uptake. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 105(5), 1413–1421. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90743.2008>
- Devita, P., Janshen, L., Rider, P., Solnik, S., & Hortobágyi, T. (2008). Muscle work is biased toward energy generation over dissipation in non-level running. *Journal of biomechanics*, 41(16), 3354–3359. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.09.024>
- Dick, R. W., & Cavanagh, P. R. (1987). An explanation of the upward drift in oxygen uptake during prolonged sub-maximal downhill running. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(3), 310–317.

- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(5), 917–941. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0628-4>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Eccentric Exercise: Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(4), 663–675. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0624-8>
- Ebbeling, C. B., & Clarkson, P. M. (1989). Exercise-induced muscle damage and adaptation. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 7(4), 207–234. <https://doi.org/10.2165/00007256-198907040-00001>
- Ehrstrom, S., Gruet, M., Giandolini, M., Chapuis, S., Morin, J. B., & Vercruyssen, F. (2018). Acute and Delayed Neuromuscular Alterations Induced by Downhill Running in Trained Trail Runners: Beneficial Effects of High-Pressure Compression Garments. *Frontiers in physiology*, 9, 1627. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01627>
- Eston, R. G., Finney, S., Baker, S., & Baltzopoulos, V. (1996). Muscle tenderness and peak torque changes after downhill running following a prior bout of isokinetic eccentric exercise. *Journal of sports sciences*, 14(4), 291–299. <https://doi.org/10.1080/02640419608727714>
- Feasson, L., Stockholm, D., Freysenet, D., Richard, I., Duguez, S., Beckmann, J. S., & Denis, C. (2002). Molecular adaptations of neuromuscular disease-associated proteins in response to eccentric exercise in human skeletal muscle. *The Journal of physiology*, 543(Pt 1), 297–306. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.018689>
- Garnier, Y., Lepers, R., Assadi, H., & Paizis, C. (2020). Cardiorespiratory Changes During Prolonged Downhill Versus Uphill Treadmill Exercise. *International journal of sports medicine*, 41(2), 69–74. <https://doi.org/10.1055/a-1015-0333>
- Giandolini, M., Horvais, N., Farges, Y., Samozino, P., & Morin, J. B. (2013). Impact reduction through long-term intervention in recreational runners: midfoot strike pattern versus low-drop/low-heel height footwear. *European journal of applied physiology*, 113(8), 2077–2090. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2634-7>
- Giandolini, M., Horvais, N., Rossi, J., Millet, G. Y., Morin, J. B., & Samozino, P. (2017). Effects of the foot strike pattern on muscle activity and neuromuscular fatigue in downhill trail running. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 27(8), 809–819. <https://doi.org/10.1111/sms.12692>
- Gottschall, J. S., & Kram, R. (2005). Ground reaction forces during downhill and uphill running. *Journal of biomechanics*, 38(3), 445–452. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.04.023>
- Green, M. S., Doyle, J. A., Ingalls, C. P., Benardot, D., Rupp, J. C., & Corona, B. T. (2010). Adaptation of insulin-resistance indicators to a repeated bout of eccentric exercise in human skeletal muscle. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 20(3), 181–190. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.20.3.181>
- Hayashi, K., Leary, M. E., Roy, S. J., Laosiripisan, J., Pasha, E. P., & Tanaka, H. (2019). Recovery from Strenuous Downhill Running in Young and Older Physically Active Adults. *International journal of sports medicine*, 40(11), 696–703. <https://doi.org/10.1055/a-0951-0017>
- Hyldahl, R. D., Chen, T. C., & Nosaka, K. (2017). Mechanisms and Mediators of the Skeletal Muscle Repeated Bout Effect. *Exercise and sport sciences reviews*, 45(1), 24–33. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000095>
- Jamurtas, A. Z., Koutedakis, Y., Paschalis, V., Tofas, T., Yfanti, C., Tsiokanos, A., Koukoulis, G., Kouretas, D., & Loupos, D. (2004). The effects of a single bout of exercise on resting energy expenditure and respiratory exchange ratio. *European journal of applied physiology*, 92(4-5), 393–398. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1156-8>
- Jones, D. A., Newham, D. J., & Torgan, C. (1989). Mechanical influences on long-lasting human muscle fatigue and delayed-onset pain. *The Journal of physiology*, 412, 415–427. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1989.sp017624>
- Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Viña, C., & Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 31(5), 530–540. <https://doi.org/10.1139/h06-029>
- Lussiana, T., Fabre, N., Hébert-Losier, K., & Mourot, L. (2013). Effect of slope and footwear on running economy and kinematics. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 23(4), e246–e253. <https://doi.org/10.1111/sms.12057>
- Malm, C., Sjödin, T. L., Sjöberg, B., Lenkei, R., Renström, P., Lundberg, I. E., & Ekblom, B. (2004). Leukocytes, cytokines, growth factors and hormones in human skeletal muscle and blood after uphill or downhill running. *The Journal of physiology*, 556(Pt 3), 983–1000. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.056598>
- Maughan, R. J., Donnelly, A. E., Gleeson, M., Whiting, P. H., Walker, K. A., & Clough, P. J. (1989). Delayed-onset muscle damage and lipid peroxidation in man after a downhill run. *Muscle & nerve*, 12(4), 332–336. <https://doi.org/10.1002/mus.880120412>

- McKune, A. J., Smith, L. L., Semple, S. J., Mokethwa, B., & Wade, A. A. (2006). Immunoglobulin responses to a repeated bout of downhill running. *British journal of sports medicine*, 40(10), 844–849. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2006.027839>
- Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1994). Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *The Journal of experimental biology*, 195, 211–225. <https://doi.org/10.1242/jeb.195.1.211>
- Mizuno, S., Morii, I., Tsuchiya, Y., & Goto, K. (2016). Wearing Compression Garment after Endurance Exercise Promotes Recovery of Exercise Performance. *International journal of sports medicine*, 37(11), 870–877. <https://doi.org/10.1055/s-0042-106301>
- Morgan, D. W., & Craib, M. (1992). Physiological aspects of running economy. *Medicine and science in sports and exercise*, 24(4), 456–461.
- Nicol, C., Avela, J., & Komi, P. V. (2006). The stretch-shortening cycle : a model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 36(11), 977–999. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636110-00004>
- Oosthuysen, T., & Bosch, A. N. (2017). The Effect of Gender and Menstrual Phase on Serum Creatine Kinase Activity and Muscle Soreness Following Downhill Running. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/antiox6010016>
- Park, K. S., & Lee, M. G. (2015). Effects of unaccustomed downhill running on muscle damage, oxidative stress, and leukocyte apoptosis. *Journal of exercise nutrition & biochemistry*, 19(2), 55–63. <https://doi.org/10.5717/jenb.2015.15050702>
- Peake, J. M., Neubauer, O., Della Gatta, P. A., & Nosaka, K. (2017). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 122(3), 559–570. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00971.2016>
- Pierrynowski, M. R., Tudus, P. M., & Pyley, M. J. (1987). Effects of downhill or uphill training prior to a downhill run. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 56(6), 668–672. <https://doi.org/10.1007/BF00424808>
- Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of physiology*, 537(Pt 2), 333–345. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x>
- Scheer, V., & Krabak, B. J. (2021). Musculoskeletal Injuries in Ultra-Endurance Running: A Scoping Review. *Frontiers in physiology*, 12, 664071. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.664071>
- Schwane, J. A., Williams, J. S., & Sloan, J. H. (1987). Effects of training on delayed muscle soreness and serum creatine kinase activity after running. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(6), 584–590.
- Sedano, S., Marin, P. J., Cuadrado, G., & Redondo, J. C. (2013). Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *Journal of strength and conditioning research*, 27(9), 2433–2443. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318280cc26>
- Sharwood, K. A., Lambert, M. I., St Clair Gibson, A., & Noakes, T. D. (2000). Changes in muscle power and neuromuscular efficiency after a 40-minute downhill run in veteran long distance runners. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 10(2), 129–135. <https://doi.org/10.1097/00042752-200004000-00008>
- Smith, L. L., McKune, A. J., Semple, S. J., Sibanda, E., Steel, H., & Anderson, R. (2007). Changes in serum cytokines after repeated bouts of downhill running. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 32(2), 233–240. <https://doi.org/10.1139/h06-106>
- Sonkodi, B., Berkes, I., & Koltai, E. (2020). Have We Looked in the Wrong Direction for More Than 100 Years? Delayed Onset Muscle Soreness Is, in Fact, Neural Microdamage Rather Than Muscle Damage. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 9(3), 212. <https://doi.org/10.3390/antiox9030212>
- Sorichter, S., Mair, J., Koller, A., Calzolari, C., Huonker, M., Pau, B., & Puschendorf, B. (2001). Release of muscle proteins after downhill running in male and female subjects. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 11(1), 28–32. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2001.011001028.x>
- Toyomura, J., Mori, H., Tayashiki, K., Yamamoto, M., Kanehisa, H., & Maeo, S. (2018). Efficacy of downhill running training for improving muscular and aerobic performances. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 43(4), 403–410. <https://doi.org/10.1139/apnm-2017-0538>
- Welsh, M. C., Allen, D. L., & Byrnes, W. C. (2014). Plasma matrix metalloproteinase-9 response to downhill running in humans. *International journal of sports medicine*, 35(5), 363–370. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1353212>
- Westerlind, K. C., Byrnes, W. C., & Mazzeo, R. S. (1992). A comparison of the oxygen drift in downhill vs. level running. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 72(2), 796–800. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.72.2.796>