นิพนธ์ต้นฉบับ | Original Articles

ช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตาย จากการกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์ในผู้เสียชีวิต จังหวัดบุรีรัมย์

Detectable Time Frame of Post-Mortem Idiomuscular Contraction Following Mechanical Stimulation Among Deceased Individuals in Buri Ram Province

*ธนเดช จันทรเวชกุล, พ.บ., วว.นิติเวชศาสตร์**
*Thanadech Chantharawetchakun, M.D., Diploma of Thai Board of Forensic Medicine**
**กลุ่มงานนิติเวช โรงพยาบาลบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ ประเทศไทย 31000*
**Department of Forensic Medicine, Buri Ram Hospital, Buri Ram Province, Thailand, 31000*
Corresponding author, E-mail: b5166909@gmail.com
Received: 02 Sep 2025. Revised: 09 Oct 2025. Accepted: 06 Nov 2025.

บทคัดย่อ

หลักการและเหตุผล : การหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตาย (idiomuscular contraction) เป็นหนึ่งในปฏิกิริยาเหนือชีวิต (supravital reaction) ที่นำมาใช้เป็นในการประมาณระยะเวลาหลังการตาย (post-mortem interval: PMI) อย่างไรก็ตามขอบเขตของช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวยังไม่ชัดเจน

วัตถุประสงค์ : เพื่อศึกษาระยะเวลาของการตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii muscle) ภายหลังการตาย และเพื่อศึกษาปัจจัยที่สัมพันธ์กับการตรวจพบการหดตัวดังกล่าว

วิธีการศึกษา : การวิจัยแบบตัดขวางในผู้เสียชีวิตที่ห้องพักศพ โรงพยาบาลบุรีรัมย์ จำนวน 355 ราย ที่มีอายุตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไป และมีการบันทึกเวลาการเสียชีวิตที่ชัดเจน ผู้เสียชีวิตทุกคนได้รับการกระตุ้นการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน และบันทึกผลเป็นการหดตัว (positive) หรือไม่พบการหดตัว (negative) ข้อมูลทั่วไปของผู้เสียชีวิตถูกรายงานด้วยสถิติพรรณนา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วย Pearson's correlation coefficient และใช้การวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติก

ผลการศึกษา : จากผู้เสียชีวิตทั้งหมด 355 ราย พบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนจำนวน 199 ราย (ร้อยละ 56.1) กลุ่มที่พบการหดตัวมีค่า post-mortem interval (PMI) เฉลี่ย 2.9 ± 1.4 ชั่วโมง (1.0–8.0 ชั่วโมง) การวิเคราะห์ตามช่วงเวลา พบว่าการหดตัวตรวจพบได้ในช่วง 1-8 ชั่วโมงแรก และไม่พบเลยหลัง 9 ชั่วโมงขึ้นไป การวิเคราะห์แบบ univariable logistic regression พบว่า PMI มีความสัมพันธ์กับการตรวจพบการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ (OR=0.28, 95%CI: 0.21–0.38, p<0.001) และเมื่อวิเคราะห์แบบ multivariable โดยปรับอายุ เพศ BMI และสาเหตุการเสียชีวิต พบว่า PMI ยังคงมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ (adj.OR=0.27, 95%CI: 0.19–0.38, p<0.001)

สรุป : การหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตายสามารถตรวจพบได้ในช่วงเวลาไม่เกิน 8 ชั่วโมงหลังการเสียชีวิต ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาหลังการตายกับการหดตัวมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ ไม่มีผลต่อการตรวจพบการหดตัว

คำสำคัญ : การหดตัวของกล้ามเนื้อภายหลังการตาย ระยะเวลาหลังการตาย การกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์

ABSTRACT

Background : Idiomuscular contraction of skeletal muscle after death is one of the supravital responses that may serve as a supplementary indicator for estimating the post-mortem interval (PMI). However, the precise temporal limits for its detection and the associated influencing factors remain unclear.

Objectives : To investigate the detectable time frame of idiomuscular contraction of the biceps brachii muscle following death, and to identify the factors associated with the presence of this contraction.

Methods : A cross-sectional study was conducted on 355 deceased individuals aged 18 years and older at the mortuary unit of Buri Ram Hospital, with clearly documented times of death. All cadavers underwent mechanical stimulation of the biceps brachii muscles on both sides. The presence or absence of idiomuscular contraction was recorded as positive or negative, respectively. Descriptive statistics were used to present general characteristics. Associations were analyzed using Pearson's correlation coefficient, and both univariable and multivariable logistic regression models (adjusted for age, sex, body mass index [BMI], and cause of death) were applied. A p-value < 0.05 was considered statistically significant.

Results : Among 355 deceased individuals, idiomuscular contraction of the biceps brachii was observed in 199 cases (56.1%). The positive group had a mean post-mortem interval (PMI) of 2.9 ± 1.4 hours (range 1–8 hours). Contractions were detectable within the first 1–8 hours after death and were absent beyond 9 hours. Univariable logistic regression showed a significant association between PMI and muscle contraction (OR = 0.28, 95% CI 0.21-0.38, p < 0.001). After adjustment for age, sex, BMI, and cause of death, PMI remained significantly associated (adj OR = 0.27, 95% CI 0.19-0.38, p < 0.001).

Conclusion : Post-mortem skeletal muscle contraction was detectable within 8 hours after death. The post-mortem interval showed a statistically significant association with the presence of contraction, whereas other factors had no effect on its detectability.

Keywords : Idiomuscular contraction, Post-mortem interval, Mechanical stimulation.

หลักการและเหตุผล

การประเมินระยะเวลาตาย (Post-mortem interval: PMI) ถือเป็นประเด็นสำคัญในทางนิติเวชศาสตร์ เนื่องจากการประมาณเวลาตายเป็นข้อมูลสำคัญที่พนักงานสอบสวนผู้ทำการชันสูตรพลิกศพต้องการจากแพทย์ที่ร่วมทำการชันสูตรพลิกศพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสอบสวนหาข้อเท็จจริงที่เกี่ยวข้องกับการตาย ซึ่งมีบทบาทอย่างยิ่งในบริบทของกระบวนการยุติธรรม โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อสงสัยเกี่ยวกับพฤติการณ์การตาย เช่น การเสียชีวิตที่ผิดธรรมชาติหรือเกี่ยวข้องกับการกระทำผิดทางอาญา การประเมิน PMI อย่างแม่นยำสามารถช่วยยืนยันหรือขัดแย้งข้อมูลจากพยาน กล้องวงจรปิด หรือหลักฐานดิจิทัลอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[1-2] การประเมิน PMI สามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธี เช่น การวัดอุณหภูมิของร่างกาย (algor mortis) การแข็งตัวของกล้ามเนื้อ (rigor mortis) การตกตะกอนของเลือด (livor mortis) การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในน้ำไขสันหลัง น้ำวุ้นภายในลูกตา หรือสารชีวภาพอื่น ๆ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล อย่างไรก็ตาม เทคนิคส่วนใหญ่มีข้อจำกัดในเรื่องของความแม่นยำ ระยะเวลาที่สามารถตรวจพบได้และความไวต่อสภาพแวดล้อมภายนอก[3]

ปฏิกิริยาเหนือชีวิต (Supravital reaction) เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการตรวจประมาณเวลาภายหลังการตาย แต่ยังมีการใช้งานในวงจำกัด ซึ่ง Supravital muscle reaction (SMR) คือการหดตัวของกล้ามเนื้อลายที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นภายหลังการตาย เรียกว่า idiomuscular contraction (IC) กลไกนี้เกิดขึ้นจากเซลล์กล้ามเนื้อที่ยังคงมีกระบวนการเมตาบอลิซึมในระยะเวลาหนึ่งหลังการตาย แม้ระบบไหลเวียนโลหิตจะหยุดลงแล้วก็ตาม ทำให้ยังสามารถตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก เช่น แรงทางกลศาสตร์ได้ในช่วงเวลาจำกัด[4] กลไกของ IC เชื่อว่ามีความเกี่ยวข้องกับการคงอยู่ของ ATP และโครงสร้างโปรตีนหลักในกล้ามเนื้อ เช่น actin และ myosin ที่ยังไม่เสื่อมสลายภายหลังการตายทันที[5] ซึ่งเมื่อมีแรงกระตุ้นภายนอก ได้แก่ การกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์ การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า หรือการกระตุ้นด้วยสารเคมี จะทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อเฉพาะที่ในลักษณะชั่วคราวและสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ปฏิกิริยาดังกล่าวจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาหลังการตาย และหายไปเมื่อเซลล์กล้ามเนื้อสูญเสียความสามารถในการทำงาน[6]

รายงานการศึกษาหลายฉบับให้ข้อมูลที่แตกต่างกันเกี่ยวกับช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบ IC ได้ เช่น Warther และคณะ[6] รายงานว่าสามารถตรวจพบ IC ได้สูงสุดถึง 13 ชั่วโมงหลังการตาย ขณะที่ Uslontsev และคณะ[7] เสนอว่าในผู้เสียชีวิตอายุ 18-67 ปี IC สามารถพบได้ไม่เกิน 10-12 ชั่วโมง และในผู้สูงอายุอาจสั้นลงเหลือ 8-10 ชั่วโมง ข้อค้นพบเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบ IC อาจแปรผันตามอายุและปัจจัยภายนอกอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและตำแหน่งของกล้ามเนื้อที่ทำการกระตุ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวส่วนใหญ่มาจากประเทศในยุโรป ซึ่งมีสภาพภูมิอากาศเย็นและอาจไม่สามารถสรุปใช้กับประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศร้อนชื้นได้โดยตรง สภาพภูมิอากาศและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญต่อการคงอยู่ของ supravital reactions และอัตราการเสื่อมสภาพของเซลล์กล้ามเนื้อหลังการเสียชีวิต โดยปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นและอุณหภูมิ สามารถเร่งหรือชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพของโปรตีนและเนื้อเยื่อได้ ดังนั้น การประเมิน PMI จึงต้องพิจารณาสภาพแวดล้อมเป็นองค์ประกอบสำคัญควบคู่กับการตรวจทางกายภาพและชีวเคมี[8-10] จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาที่ออกแบบมาเฉพาะในบริบทของประเทศเขตร้อนชื้น เช่น ประเทศไทย

ปัจจุบันยังไม่มีรายงานการศึกษาขนาดใหญ่ในประเทศไทยที่ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง IC กับ PMI รวมถึงปัจจัยร่วมอื่น ๆ เช่น อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย และสาเหตุการเสียชีวิต ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลจากผู้เสียชีวิตในจังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งเป็นตัวแทนพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย มีสภาพแวดล้อมและวัฒนธรรมที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมสุขภาพ และลักษณะของโรคพื้นฐานที่แตกต่างจากภูมิภาคอื่น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตายต่อการกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์ ในผู้เสียชีวิต

จังหวัดบุรีรัมย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาของการตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนและปัจจัยที่ส่งต่อการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนภายหลังการตาย ในผู้เสียชีวิตจังหวัดบุรีรัมย์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการประเมินระยะเวลาตายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมทั้งเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปศึกษาต่อยอดเพิ่มเติม

วิธีการศึกษา

รูปแบบการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงสังเกตแบบภาคตัดขวาง cross-sectional observational study

ประชากรที่ศึกษา

ผู้เสียชีวิตในโรงพยาบาลบุรีรัมย์ที่เข้าเกณฑ์อายุ 18 ปีขึ้นไป และทราบเวลาการเสียชีวิตที่ชัดเจน โดยมีการพบเห็นขณะเสียชีวิตหรือมีการบันทึกเวลาการเสียชีวิตไว้ในเวชระเบียน

กลุ่มตัวอย่าง

จากการศึกษาที่ผ่านมา Sophie Warther และคณะ[6] ได้ทำการศึกษา Estimation of the time since death: post-mortem contractions of human skeletal muscles following mechanical stimulation (idiomuscular contraction) พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระยะเวลาของการตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii muscle) ภายหลังการตาย = 1.92 โดยแทนค่าขนาดตัวอย่างเพื่อประมาณค่าเฉลี่ย กรณีประชากรขนาดใหญ่ กำหนดความเชื่อมั่น 95% ความแม่นยำไม่เกิน 0.2 แทนค่าสูตร ผลลัพธ์ที่ได้คือ $n \approx 354.04$ ดังนั้น ควรมีขนาดตัวอย่าง อย่างน้อย 355 คน เพื่อให้การศึกษามีความแม่นยำตามที่กำหนด

วิธีการศึกษา

เกณฑ์การคัดเลือกผู้เสียชีวิต เป็นผู้เสียชีวิตที่ทราบเวลาการเสียชีวิตที่ชัดเจน โดยมีการพบเห็นขณะเสียชีวิตหรือมีการบันทึกเวลาการเสียชีวิตไว้ในเวชระเบียน และผู้เสียชีวิตที่มีอายุมากกว่า 18 ปี

เกณฑ์การคัดออกผู้เสียชีวิต ผู้เสียชีวิตที่ไม่สามารถระบุเวลาการเสียชีวิตได้อย่างชัดเจน หรือมีภาวะบาดเจ็บ บวม หรือติดเชื้อบริเวณต้นแขนทั้งสองข้าง รวมถึงผู้ที่มีภาวะอ้วนมาก (น้ำหนักเกินมาตรฐานอย่างชัดเจน) หรือมีความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อที่อาจส่งผลต่อการตอบสนองของกล้ามเนื้อลาย

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงสังเกตแบบภาคตัดขวาง (cross-sectional observational study) ที่ดำเนินการในผู้เสียชีวิตซึ่งถูกส่งมายังห้องพักศพโรงพยาบาลบุรีรัมย์ โดยผู้เสียชีวิตทุกรายจะได้รับการบันทึกข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ อายุ เพศ น้ำหนัก ส่วนสูง เวลาที่เสียชีวิต และสาเหตุการเสียชีวิตจากเวชระเบียน หรือบุคคลที่พบเห็นเหตุการณ์ ทั้งนี้ ก่อนเริ่มกระบวนการเก็บข้อมูล ได้มีการอธิบายวัตถุประสงค์ ขั้นตอน และวิธีการของงานวิจัยให้แก่ญาติของผู้เสียชีวิตอย่างชัดเจน พร้อมทั้งขอหนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการศึกษา (informed consent) จากญาติทุกรายตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

เกณฑ์การคัดเลือกผู้เข้าร่วมวิจัย ได้แก่ ผู้เสียชีวิตที่มีอายุตั้งแต่ 18 ปีขึ้นไป และมีข้อมูลเวลาเสียชีวิตที่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด โดยยึดตามการบันทึกในเวชระเบียนหรือการพบเห็นขณะเสียชีวิต ส่วนเกณฑ์การคัดออก ได้แก่ ผู้เสียชีวิตที่ไม่สามารถระบุเวลาการเสียชีวิตได้อย่างแม่นยำ หรือมีภาวะบาดเจ็บ บวม หรือการติดเชื้อบริเวณต้นแขนทั้งสองข้าง รวมถึงกรณีที่มีภาวะน้ำหนักเกินมาตรฐานอย่างชัดเจน หรือมีความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อที่อาจส่งผลต่อการตอบสนองของกล้ามเนื้อลาย

ผู้วิจัยทำการกระตุ้นกล้ามเนื้อบริเวณ biceps brachii ทั้งสองข้างของร่างกายผู้เสียชีวิต โดยใช้ด้ามค้อนโลหะเคาะบริเวณผิวหนังเหนือกล้ามเนื้อในตำแหน่งมาตรฐานเดียวกัน การตรวจจะดำเนินการในบริเวณที่มีสภาพสมบูรณ์ของกล้ามเนื้อ ไม่มีบาดแผล การติดเชื้อ หรือบวมที่อาจรบกวนการส่งแรงกระตุ้น หากพบความผิดปกติข้างใด จะใช้เฉพาะแขนข้างที่ปกติในการประเมินและบันทึกผล เพื่อให้ได้ค่าที่แทนสภาพการตอบสนองของกล้ามเนื้อลายได้อย่างแท้จริงผลการตรวจถูกบันทึกเป็น “ผลบวก” (positive idiomuscular contraction) เมื่อพบการหดตัวของกล้ามเนื้ออย่างเห็นได้ชัดภายหลังการกระตุ้น และ “ผลลบ” (negative idiomuscular contraction) เมื่อไม่พบการตอบสนองใด ๆ ภายหลังการกระตุ้น

การตรวจการหดตัวของกล้ามเนื้อต้นแขนดำเนินการโดยผู้วิจัยเพียงรายเดียว เพื่อให้การกระตุ้นเป็นไปในมาตรฐานเดียวกันทุกกรณี โดยใช้ด้ามค้อนโลหะเคาะบริเวณส่วนกลางของกล้ามเนื้อต้นแขนทั้งสองข้างด้วยแรงเท่าเทียมกัน เคาะเพียงครั้งเดียวต่อข้าง โดยไม่มีการกระตุ้นซ้ำ เพื่อป้องกันผลกระทบจากการตอบสนองซ้ำของกล้ามเนื้อและลดความคลาดเคลื่อนในการประเมินผล

ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกอย่างเป็นระบบ โดยไม่มีการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลที่สามารถระบุตัวตนผู้เสียชีวิตได้ เพื่อคงไว้ซึ่งความลับและความเป็นส่วนตัวตามหลักจริยธรรม

ภาพที่ 1 เครื่องมือค้อนโลหะที่ใช้สำหรับกระตุ้นกล้ามเนื้อลายต้นแขนภายหลังการตาย เพื่อทดสอบการหดตัวแบบ idiomuscular contraction พร้อมไม้บรรทัดมาตรฐานทางนิติเวชสำหรับเทียบขนาด

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction) ที่เกิดขึ้นชั่วคราวหลังการกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์ภายหลังการเสียชีวิต

จริยธรรมการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผ่านการรับรองจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยเกี่ยวกับมนุษย์ โรงพยาบาลบุรีรัมย์ เลขที่ บร 0033.102.1/4 ลงวันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2568

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ใช้สถิติพรรณนาอธิบายลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างโดยรายงานค่า จำนวน ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. ใช้สถิติเชิงอนุมานเพื่อหาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตาย ได้แก่ สถิติสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่ายของเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation Coefficient)

3. ใช้การวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติก (Logistic regression analysis) ทั้งในรูปแบบเชิงเดี่ยว (univariable) และเชิงพหุ (multivariable) เพื่อตรวจสอบปัจจัยที่สัมพันธ์กับการตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii muscle) โดยรายงานค่า Odds ratio (OR), adjusted Odds ratio (adjOR) และ 95% confidence interval (95%CI) กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ผลการศึกษา

จากผู้เสียชีวิตทั้งหมด 355 ราย พบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนภายหลังการตาย (positive idiomuscular contraction) จำนวน 199 ราย คิดเป็นร้อยละ 56.1 และไม่พบการหดตัว (negative idiomuscular contraction) จำนวน 156 ราย คิดเป็นร้อยละ 43.9 เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มที่ตรวจพบการหดตัวมีค่าเฉลี่ยของระยะเวลาหลังการตาย (post-mortem interval: PMI) เท่ากับ 2.9 ± 1.4 ชั่วโมง (ช่วงเวลา 1.0–8.0 ชั่วโมง) ขณะที่กลุ่มที่ไม่พบการหดตัวมีค่าเฉลี่ย PMI เท่ากับ 10.8 ± 4.3 ชั่วโมง (ช่วงเวลา 5.0-20.0 ชั่วโมง) ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เมื่อวิเคราะห์ความถี่ของการตอบสนองในแต่ละช่วงเวลา พบว่าการหดตัวสามารถตรวจพบได้ในช่วง 1-8 ชั่วโมงแรกหลังการเสียชีวิต โดยในชั่วโมงที่ 1 พบการหดตัวในร้อยละ 100.0 ของผู้เสียชีวิต ชั่วโมงที่ 2 ร้อยละ 98.8, ชั่วโมงที่ 3 ร้อยละ 95.6 ชั่วโมงที่ 4 ร้อยละ 90.3 และในชั่วโมงที่ 5 พบร้อยละ 79.2 อย่างไรก็ตาม ความถี่ของการหดตัวลดลงอย่างชัดเจนหลังจากนั้น โดยในชั่วโมงที่ 6 พบร้อยละ 26.7 ชั่วโมงที่ 7 ร้อยละ 13.3 และชั่วโมงที่ 8 ร้อยละ 18.2 ส่วนในผู้เสียชีวิตที่เกิน 9 ชั่วโมงขึ้นไป ไม่พบการหดตัวของกล้ามเนื้อเลย การทดสอบด้วย Pearson's chi-square พบว่าระยะเวลาหลังการตายมีความสัมพันธ์กับการตรวจพบ idiomuscular contraction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($X^2 = 290.56$, $df = 21$, $p < 0.001$) (ตารางที่ 1 และภาพที่ 3)

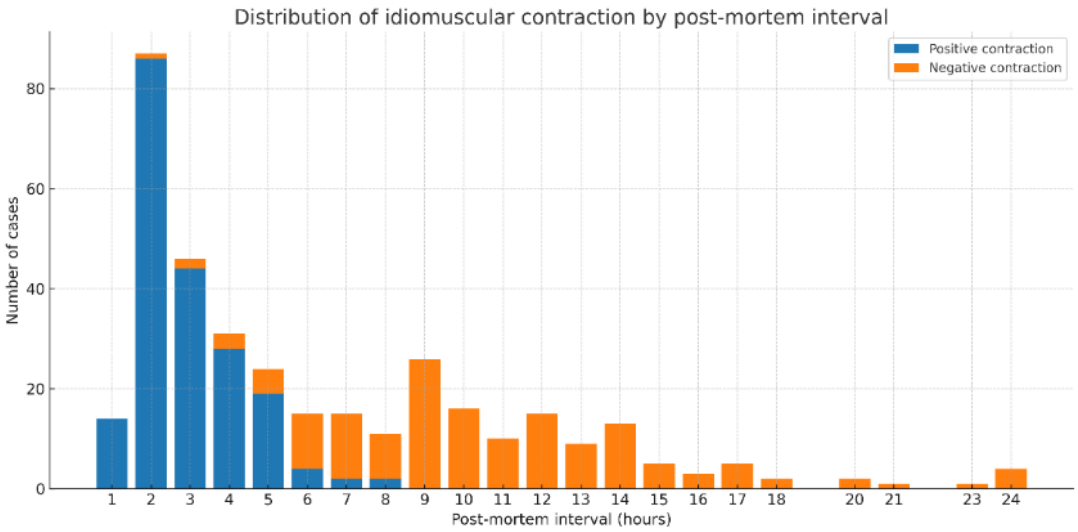
เมื่อพิจารณาปัจจัยพื้นฐานอื่น ๆ พบว่าอายุเฉลี่ยของกลุ่มที่ตรวจพบการหดตัวอยู่ที่ 63.3 ± 17.3 ปี ขณะที่กลุ่มที่ไม่พบการหดตัวมีอายุเฉลี่ย 61.6 ± 17.1 ปี ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p = 0.371$) เพศชายเป็นเพศที่พบบ่อยในทั้งสองกลุ่มโดยไม่แตกต่างกัน ($p = 0.892$) ส่วนค่าดัชนีมวลกาย (BMI) เฉลี่ยในกลุ่มที่พบและไม่พบการหดตัวเท่ากับ 21.9 ± 4.4 และ 22.3 ± 4.1 ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.423$) เช่นเดียวกับการจำแนกตามสาเหตุการเสียชีวิต ซึ่งพบว่ากลุ่มโรคติดเชื้อเป็นกลุ่มที่พบมากที่สุด (ร้อยละ 38.6) รองลงมาคือสาเหตุอื่น ๆ และสาเหตุตายโดยผิดธรรมชาติ โดยไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างกลุ่ม ($p = 0.530$) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับระยะเวลา PMI โดยใช้ Pearson's correlation coefficient พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบเล็กน้อย ($r = -0.126$) และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.018$) (ตารางที่ 1)

เมื่อทำการวิเคราะห์แบบ univariate logistic regression เพื่อตรวจสอบปัจจัยที่สัมพันธ์กับการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii) หลังการเสียชีวิต พบว่า ระยะเวลา

หลังการตาย (post-mortem interval: PMI) ที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้โอกาสการพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายลดลงประมาณร้อยละ 72.0 (OR=0.28, 95%CI: 0.21–0.38, p<0.001) ขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย (BMI) และสาเหตุการเสียชีวิต (โรคหัวใจและหลอดเลือด มะเร็ง โรคติดเชื้อ สาเหตุอื่น ๆ และการเสียชีวิตโดยผิดธรรมชาติ) ไม่พบความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติกับการเกิด idiomuscular contraction (p>0.05) (ตารางที่ 2) เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงพหุตัวแปร (multiple logistic regression) โดยปรับด้วยอายุ เพศ BMI และสาเหตุการเสียชีวิต พบว่า PMI ยังคงมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดิม (adjusted OR=0.27, 95%CI=0.19-0.38, p<0.001) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้เสียชีวิตจำแนกตามการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (n=335)

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน(ร้อยละ)/ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			p-value
	Negative IC (n=156)	Positive IC (n=199)	Total (n=355)	
อายุ (ปี)	61.6±17.1	63.3±17.3	62.5±17.2	0.371
เพศ				
ชาย	110 (70.5%)	139 (69.8%)	249 (70.1%)	0.892
หญิง	46 (29.5%)	60 (30.2%)	106 (29.9%)	
BMI (kg/m²)	22.3±4.1	21.9±4.4	22.1±4.2	0.423
สาเหตุการเสียชีวิต				0.530
Sudden death	3 (1.9%)	1 (0.5%)	4 (1.1%)	
CVS	13 (8.3%)	21 (10.5%)	34 (9.6%)	
Carcinoma	13 (8.3%)	18 (9.1%)	31 (8.7%)	
Infectious	66 (42.1%)	71 (35.7%)	137 (38.6%)	
Others	31 (19.9%)	51 (25.6%)	82 (23.1%)	
Unnatural	30 (19.2%)	38 (19.1%)	68 (19.1%)	
PMI (hours)	10.77±4.3	2.9±1.4	6.4±4.9	<0.001



ภาพที่ 3 การกระจายของผลการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนภายหลังการตายตามช่วงเวลา (PMI)

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii muscle) ภายหลังการตาย

ปัจจัย	Crude OR (95%CI)	p-value
อายุ (ปี)	1.00 (0.99-1.00)	0.37
เพศ: ชาย	0.96 (0.61-1.53)	0.89
BMI (kg/m²)	0.97 (0.92-1.02)	0.42
สาเหตุการเสียชีวิต		
CVS	1.29 (0.62-2.81)	0.48
Carcinoma	1.09 (0.51-2.30)	0.81
Infectious	0.75 (0.49-1.16)	0.20
Others	1.35 (0.81-2.24)	0.24
Sudden death	0.27 (0.02-2.50)	0.24
unnatural	0.99 (0.58-1.68)	0.97
PMI (hours)	0.28 (0.21-0.38)	<0.001

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่สัมพันธ์กับการหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขน (idiomuscular contraction of biceps brachii muscle) ภายหลังการตายด้วยวิธี multiple logistic regression

ปัจจัย	Adj. OR (95%CI)	p-value
PMI (hours)	0.27 (0.19-0.38)	<0.001

*ปรับด้วยอายุ เพศ BMI และสาเหตุการเสียชีวิต

อภิปรายผล

จากผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การหดตัวของกล้ามเนื้อลายต้นแขนภายหลังการตาย (idiomuscular contraction) สามารถตรวจพบได้ในช่วง 1-8 ชั่วโมงแรกหลังการเสียชีวิต และไม่มีการหดตัวเกิดขึ้นเลยในกรณีที่ระยะเวลาหลังการตายมากกว่า 9 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกทางชีววิทยาของเซลล์กล้ามเนื้อ ที่ยังคงมีเมตาบอลิซึมเหลืออยู่ในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากการเสียชีวิต แม้ว่าการไหลเวียนโลหิตจะหยุดลงแล้วก็ตาม การตอบสนองต่อแรงทางกลศาสตร์นี้ถือเป็นหนึ่งในปฏิกิริยาเหนือชีวิต (supravital reaction) ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเซลล์และโปรตีนกล้ามเนื้อที่ยังไม่สลายตัวโดยสมบูรณ์ การพบว่าผลบวกของการหดตัวเกิดได้มากที่สุดในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรก (คิดเป็นร้อยละ 43.2 และ 22.1 ตามลำดับ) ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องและมีแนวโน้มตรวจพบในระยะเวลาน้อยกว่าการศึกษาของ Warther และคณะ[6] ซึ่งได้ทำการศึกษา idiomuscular contraction ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแรงทางกลศาสตร์ในกล้ามเนื้อลายของผู้เสียชีวิตจำนวน 270 ราย โดยพบว่าการตอบสนองของกล้ามเนื้อสามารถตรวจพบได้สูงสุดถึง 13 ชั่วโมงหลังการตาย นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Uslontsev และคณะ[7] ที่ศึกษาผู้เสียชีวิต 345 ราย และเสนอว่าในกลุ่มอายุ 18-67 ปี การตอบสนองของกล้ามเนื้อมักพบในช่วง น้อยกว่า 10-12 ชั่วโมง และในกลุ่มอายุ 68-97 ปี มักพบในช่วง ไม่เกิน 8-10 ชั่วโมง โดยไม่มีการตอบสนองหลังจากนั้น เป็นไปได้ว่าความแตกต่างของช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบ idiomuscular contraction ระหว่างการศึกษานี้กับงานวิจัยก่อนหน้าอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพแวดล้อม (อุณหภูมิ ห้องเก็บศพ ความชื้น) ความเร็วในการนำศพเข้ารับการตรวจหลังเสียชีวิต ชนิดของกล้ามเนื้อที่กระตุ้น (เฉพาะกล้ามเนื้อ biceps brachii) รวมถึงเครื่องมือที่ใช้กระตุ้นและวิธีการประเมินผลการหดตัว ซึ่งอาจมีความแตกต่างในเชิงเทคนิคและความละเอียดในการสังเกตผล นอกจากนี้ประชากรกลุ่มตัวอย่างในแต่ละ

การศึกษาอาจมีความแตกต่างกันในด้านพันธุกรรม สภาวะสุขภาพก่อนเสียชีวิต หรือปัจจัยทางสรีรวิทยาอื่น ๆ ซึ่งล้วนมีแนวโน้มส่งผลต่อระยะเวลาที่กล้ามเนื้อสามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นได้

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของผู้เสียชีวิตกับระยะเวลาหลังการตายที่สามารถตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลาย (PM interval) พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงลบเล็กน้อย ($r = -0.126$) และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.018$) ซึ่งแสดงว่า เมื่ออายุของผู้เสียชีวิตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาหลังการตายที่ยังสามารถตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กล้ามเนื้อของผู้สูงอายุอาจตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยแรงทางกลได้ในช่วงเวลาหลังการเสียชีวิตที่สั้นกว่าผู้ที่อายุน้อยกว่าสอดคล้องกับ Uslontsev และคณะ[7] พบว่ากลุ่มอายุ 68-97 ปี การตอบสนองมักตรวจพบได้เฉพาะในช่วงไม่เกิน 8-10 ชั่วโมง และไม่พบการตอบสนองในช่วงเวลาที่นานกว่านั้น การอธิบายปรากฏการณ์นี้ในเชิงชีววิทยาอาจสัมพันธ์กับการที่มวลกล้ามเนื้อในผู้สูงอายุลดลงตามวัย (sarcopenia) ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างและหน้าที่ของกล้ามเนื้อ ทำให้ความสามารถในการเก็บพลังงานและรักษาสภาพการทำงานของเซลล์หลังการตายลดลงเร็วกว่ากลุ่มผู้เสียชีวิตอายุน้อย ส่งผลให้โอกาสในการเกิด idiomuscular contraction ลดลงตามอายุ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ที่พบมีขนาดเล็ก (r ใกล้ศูนย์) แม้จะมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงอาจไม่สามารถสรุปเชิงปฏิบัติได้อย่างชัดเจนว่าอายุมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการตอบสนองของกล้ามเนื้อหลังการตาย จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยควบคุมตัวแปรร่วมอื่น ๆ เช่น โรคประจำตัว ภาวะโภชนาการ หรือสภาพแวดล้อมภายหลังการตาย เพื่อยืนยันผลดังกล่าวให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยโลจิสติกทั้ง (univariate) และเชิงพหุ (multivariable) ยืนยันว่าระยะเวลาหลังการตาย (Post-mortem interval: PMI) เป็นปัจจัยเดียวที่มีความสัมพันธ์กับการตรวจพบ idiomuscular contraction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้โอกาสในการตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลดลงถึงประมาณร้อยละ 72 (OR = 0.28, 95%CI: 0.21-0.38, $p < 0.001$) และยังคงมีนัยสำคัญหลังปรับด้วยตัวแปรร่วม ได้แก่ อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย และสาเหตุการเสียชีวิต (adjusted OR = 0.27, 95%CI: 0.19-0.38, $p < 0.001$) การค้นพบนี้สอดคล้องกับหลักการทางชีววิทยา ที่ว่า supravital reactions เช่น idiomuscular contraction จะเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาจำกัดภายหลังการเสียชีวิต เมื่อพลังงานภายในเซลล์หมดลงและโครงสร้างโปรตีนในกล้ามเนื้อเริ่มเสื่อมสภาพ กล้ามเนื้อจึงไม่สามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นได้อีก[11] นอกจากนี้การไม่พบความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยอื่น ๆ เช่น อายุ เพศ BMI และสาเหตุการเสียชีวิตกับการเกิด idiomuscular contraction ($p > 0.05$) บ่งชี้ว่าปฏิกิริยานี้อาจขึ้นอยู่กับกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพหลังการตายมากกว่าลักษณะพื้นฐานของร่างกาย หรือปัจจัยทางคลินิกของผู้เสียชีวิต ทำให้ PMI มีความสำคัญอย่างชัดเจนในการประเมิน ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับรายงานของ Warther และคณะ[5] ซึ่งพบว่าโอกาสในการตรวจพบ idiomuscular contraction ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามระยะเวลา post-mortem โดยเฉพาะในช่วง 7–15 ชั่วโมงหลังการตาย (อัตราลดลง 0.61 เท่าต่อชั่วโมง, $p < 0.001$)

นอกจากนี้การศึกษาครั้งนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากศพที่ผ่านการเก็บรักษาในห้องเย็นและศพที่ไม่ได้ผ่านการแช่เย็น โดยมิได้ทำการวัดอุณหภูมิของศพในขณะตรวจ อย่างไรก็ตามจากรายงานของ Warther และคณะ (2012)[5] พบว่าค่าอุณหภูมิทางทวารหนัก (rectal temperature) และอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการตรวจพบ supravital idiomuscular contraction ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิของศพมีผลจำกัดต่อการตรวจพบปฏิกิริยาดังกล่าวในบริบทของการศึกษานี้

ข้อจำกัด

การศึกษาครั้งนี้เป็นการเก็บข้อมูลจากผู้เสียชีวิตที่ถูกส่งมาที่ห้องพักศพของโรงพยาบาลบุรีรัมย์เพียงแห่งเดียว ซึ่งอาจมีลักษณะประชากรเฉพาะที่ไม่สามารถแทนภาพรวมของประชากรทั่วไปได้ สภาพแวดล้อมหลังการตาย เช่น การเก็บศพในห้องเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ไม่ได้ถูกบันทึกไว้เพื่อควบคุมตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจมีผลต่อการตอบสนองของกล้ามเนื้อภายหลังการเสียชีวิต นอกจากนี้การประเมินผลการหดตัวของกล้ามเนื้อขึ้นอยู่กับการสังเกตของผู้วิจัย ซึ่งแม้จะมีมาตรฐานในการตรวจและบันทึกผล แต่ยังมีความเป็นไปได้ของความคลาดเคลื่อนจากผู้ตรวจ (observer bias) และระยะเวลาที่ตรวจพบการหดตัวของกล้ามเนื้อลายส่วนใหญ่พบในช่วงประมาณ 2-4 ชั่วโมงหลังการเสียชีวิต ซึ่งอาจส่งผลให้ค่ากลางของระยะเวลาการตรวจพบโดยรวมสั้นลง ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนผู้เสียชีวิตที่ได้รับการตรวจในช่วงเวลาดังกล่าวมีมากกว่าช่วงอื่น จึงอาจทำให้ค่าการตรวจพบเฉลี่ยมีแนวโน้มความถี่สูงในช่วงต้นของระยะเวลาหลังการตาย

สรุป

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า idiomuscular contraction ของกล้ามเนื้อลายต้นแขนสามารถตรวจพบได้ในช่วง 1-8 ชั่วโมงแรกภายหลังการเสียชีวิต และไม่พบการตอบสนองเลยหลังจาก 9 ชั่วโมงขึ้นไป โดยระยะเวลาหลังการตาย (post-mortem interval: PMI) เป็นปัจจัยเดียวที่มีความสัมพันธ์กับการเกิด idiomuscular contraction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ปัจจัยอื่น เช่น อายุ เพศ ดัชนีมวลกาย และสาเหตุการเสียชีวิต ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากผลการศึกษา พบว่าการตรวจการหดตัวของกล้ามเนื้อลายภายหลังการตายสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้เสริม (auxiliary indicator) ในการประเมินระยะเวลาหลังการเสียชีวิต โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเวลาการเสียชีวิตที่แน่ชัด หรือไม่สามารถใช้วิธีการทางชีวเคมีได้ การสังเกตการหดตัวของกล้ามเนื้อภายหลังการกระตุ้นด้วยแรงทางกลสามารถช่วยจำกัดช่วงเวลาหลังการตายให้อยู่ในกรอบประมาณ 8 ชั่วโมงแรก ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการประเมินเบื้องต้นในเวชปฏิบัตินิติเวช ทั้งในการชันสูตรพลิกศพ ณ ที่เกิดเหตุ และการประเมินร่วมกับตัวบ่งชี้ทางกายภาพอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิศพและการเกิด rigor mortis

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาต่อยอดในประชากรที่มีความหลากหลายทั้งในด้านเชื้อชาติ ภูมิภาค และลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มอายุสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งอาจมีรูปแบบของการตอบสนองของปฏิกิริยาเหนือชีวิตที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การศึกษาควรขยายไปยังตำแหน่งกล้ามเนื้ออื่น ๆ เช่น quadriceps, pectoralis major หรือ masseter เพื่อเปรียบเทียบระดับการตอบสนองและช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบปฏิกิริยาเหนือชีวิตได้อย่างแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากกล้ามเนื้อแต่ละกลุ่มมีโครงสร้าง เส้นเลือด และการสลายหลังการตายที่แตกต่างกัน

ในแง่ของเทคโนโลยี ควรมีการพัฒนาเครื่องกระตุ้นกล้ามเนื้อที่ใช้แรงทางกลศาสตร์แบบมาตรฐานร่วมกับระบบบันทึกการเคลื่อนไหวด้วยกล้อง high-speed หรือเซ็นเซอร์ตรวจวัดแรงหดตัวของกล้ามเนื้อ เพื่อให้ได้ผลที่เป็นเชิงปริมาณ และลดอคติจากผู้ตรวจ นอกจากนี้การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาช่วยในการแปลผลการหดตัว เช่น การวิเคราะห์ภาพเคลื่อนไหวจากวิดีโอ หรือการจำแนกลักษณะการตอบสนองแบบอัตโนมัติ อาจช่วยยกระดับการประเมิน PMI ในงานนิติเวชให้มีความแม่นยำสูงขึ้นและลดความแปรปรวนระหว่างผู้ตรวจในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Madea B. Is there recent progress in the estimation of the postmortem interval by means of thanatochemistry? Forensic Sci Int 2005;151(2-3):139-49. doi:10.1016/j.forsciint.2005.01.013.
2. Li C, Wang Q, Zhang Y, Lin H, Zhang J, Huang P, et al. Research progress in the estimation of the postmortem interval by Chinese forensic scholars. Forensic Sci Res 2016;1(1):3-13. doi: 10.1080/20961790.2016.1229377.
3. Shrestha R, Kanchan T, Krishan K. Methods of Estimation of Time Since Death. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025. [cited 2025 Aug 25]. Available from:URL:http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549867/
4. Stigter H, Krap T, Gelderman T, Dijkhuizen L, Duijst W. Technical note: Practical application of post-mortem mechanical stimulation of skeletal muscle, a field study. Int J Legal Med 2024;138(1):55-60. doi: 10.1007/s00414-022-02873-3.
5. Cooper GM. Actin, Myosin, and Cell Movement. In: Cooper GM. The Cell: A Molecular Approach 2nd.ed. Sunderland (MA): Sinauer Associates; 2000. [Internet]. [cited 2025 Aug 25]. Available from:URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9961/.
6. Warther S, Sehner S, Raupach T, Püschel K, Anders S. Estimation of the time since death: post-mortem contractions of human skeletal muscles following mechanical stimulation (idiomuscular contraction). Int J Legal Med 2012;126(3):399-405. doi: 10.1007/s00414-011-0665-3.
7. Uslontsev DN, Kildyushov EM, Tumanov EV. [On the need for a unified approach in assessing the muscle contraction swelling (idiomuscular tumor) in determining the time since death coming]. [Article in Russian]. Sud Med Ekspert 2021;64(4):37-41. doi: 10.17116/sudmed20216404137.
8. Baek IS, Oh HS, Kim YR, Kang MG, Jung JB, Park SH. Medical-Legal Entomology in Action: Evaluation of Insect-Based Post-Mortem Interval Estimation in South Korean Death Investigations. Insects 2025;16(2):231. doi: 10.3390/insects16020231.
9. ScienceDirect Topics. Muscle Excitability - an overview. [Internet]. [cited 2025 Sep 3]. Available from:URL:https://www.sciencedirect.com/topics/neuroscience/muscle-excitability
10. Zissler A, Stoiber W, Geissenberger J, Steinbacher P, Monticelli FC, Pittner S. Influencing Factors on Postmortem Protein Degradation for PMI Estimation: A Systematic Review. Diagnostics (Basel) 2021;11(7):1146. doi: 10.3390/diagnostics11071146.
11. Donaldson AE, Lamont IL. Biochemistry changes that occur after death: potential markers for determining post-mortem interval. PLoS One 2013;8(11):e82011. doi: 10.1371/journal.pone.0082011.