УДК 616.716.4-001.5-089.84:531.8
DOI https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.3.17

Р.І. Єгоров,
кандидат медичних наук, доцент,
завідувач відділення вродженої та набутої патології голови та шиї,
Київська міська дитяча клінічна лікарня № 1,
вул. Богатирська, 30, м. Київ, Україна, індекс 04209,
dr.egorovr@icloud.com,
https://orcid.org/0000-0003-4705-7576

МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ОСТЕОСИНТЕЗУ ПРИ ПЕРЕЛОМАХ НИЖНЬОЇ ЩЕЛЕПИ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Переломи кісток щелепно-лицевої ділянки у дітей становлять 3,3–15 % від усіх переломів кісток обличчя. Епідеміологічні характеристики переломів нижньої щелепи в дітей є специфічними та варіабільним в залежності від багатьоїх факторів. Переломи нижньої щелепи найпоширенішим видом, на частку яких припадає близько 71% переломів щелепно-лицевій ділянці у дітей. Анатомо-фізіологічні складнощі пов'язані з віковими особливостями та функціональними навантаженнями під час жування зумовлюють необхідність точного хірургічного планування та вибору оптимальних стратегій лікування переломів нижньої щелепи. Аналіз методів скінченних елементів став важливим інструментом комп'ютерного моделювання для оцінювання біомеханічних характеристик систем остеосинтезу, що застосовуються при переломах. ***Мета роботи.*** *Систематизовати та узагальнити наявні наукові праці, присвячені методам скінченних елементів при остеосинтезі нижньої щелепи.* ***Матеріали та методи.*** *Було проведено систематичний пошук у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar відповідно до рекомендацій PRISMA-ScR. До уваги приймались наукові статті, систематичні огляди, клінічні дослідження, у яких для оцінки остеосинтезу при переломах нижньої щелепи застосовували метод скінченно-елементного аналізу.* ***Результати.*** *За результатами аналізу, виявлено, що використання методу скінченних елементів на сьогоднішній день увійшов у повсягденну практику лікаря. Метод скінченних елементів при використані дає дадаткову інформацію та в «чомусь» розуміння – як «краще» встановити фіксуючі елементи при проведені остеосинтезу.* ***Висновки.*** *Результати отримані на основі обчислювальних моделей але клінічна валідація залишається необхідною. Подальші дослідження повинні зосередитися на створенні індивідуальних моделей для кожного пацієнта, валідації клінічних результатів та стандартизації методологічних протоколів.*

Ключові слова: *перелом, нижня щелепа, остеосинтез, метод скінченних елементів, діти, огляд.*

R.I. Yehorov,
Candidate of Medical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Congenital and Acquired Head and Neck Pathology,
Kyiv City Children's Clinical Hospital No. 1,
30 Bogatyrska street, Kyiv, Ukraine, postal code 04209,
dr.egorovr@icloud.com,
https://orcid.org/0000-0003-4705-7576

FINITE ELEMENT METHOD FOR EVALUATING OSTEOSYNTHESIS IN MANDIBULAR FRACTURES: A LITERATURE REVIEW

Fractures of the bones of the maxillofacial area in children make up 3.3-15% of all fractures of the bones of the face. Epidemiological characteristics of fractures of the lower jaw in children are specific and variable depending on manyfor many factors. Fractures of the lower jaw are the most common species, which account for about 71% of fractures of the maxillofacial area in children. Anatomical and physiological difficulties associated with age features and functional loads during chewing necessitate accurate surgical planning and selection of optimal treatment strategies for fractures of the lower jaw. Finite element analysis has become a crucial computer modeling tool for evaluating the biomechanical characteristics of osteosynthesis systems used for fractures. ***Objective.*** *To systematize and summarize existing research on finite element methods applied to mandibular osteosynthesis.* ***Materials and Methods.*** *A systematic search was conducted across PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases in accordance with PRISMA-ScR guidelines. The review included research articles, systematic reviews, and clinical studies that utilized finite element analysis to evaluate osteosynthesis for mandibular fractures.* ***Results.*** *The analysis revealed that the finite element method has become part of routine clinical practice. Its application provides additional information and insight into the optimal placement of fixation elements during osteosynthesis.* ***Conclusions.*** *While results are derived from computational models, clinical validation remains essential. Future research should focus on developing patient-specific models, validating clinical outcomes, and standardizing methodological protocols.*

Key words: *fracture, mandible, osteosynthesis, finite element method, children, review.*

Постановка проблеми. Переломи кісток щелепно-лицевої ділянки у дітей становлять 3,3–15 % від усіх переломів кісток обличчя [1,2]. Епідеміологічні характеристики переломів нижньої щелепи в дітей є специфічними та варіабільним в залежності від багатьох факторів [3,4]. Переломи нижньої щелепи найпоширенішим видом, на частку яких припадає близько

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

© Р.І. Єгоров, 2026

71% переломів щелепно-лицевій ділянці у дітей [5,6]. Анатомо-фізіологічні складнощі пов'язані з віковими особливостями та функціональними навантаженнями під час жування зумовлюють необхідність точного хірургічного планування та вибору оптимальних стратегій лікування переломів нижньої щелепи [7,8]. На сьогоднішній день тривимірний скінченно-елементний аналіз став важливим обчислювальним інструментом для оцінювання біомеханічної поведінки систем внутрішньої фіксації при переломах нижньої щелепи [9]. Цей метод уможливлює математичне перетворення та аналіз механічних властивостей геометричного об'єкта, наприклад кісток. Оскільки механічні властивості скелета людини неможливо дослідити *in vivo*, щелепно-лицева хірургія стала тією галуззю, де даний аналіз знайшов особливе застосування [10].

Мета дослідження. Узагальнити сучасні дані наукової літератури пов'язані з тривимірним скінченно-елементним аналізом, який застосовується в щелепно-лицевій хірургії та пов'язаний з переломами нижньої щелепи.

Матеріали та методи дослідження. Проведено аналіз, узагальнення та систематизацію сучасних наукових публікацій, присвячених тривимірному скінченно-елементному аналізу при плануванні лікування травматичних переломів нижньої щелепи. Пошук джерел здійснювали в міжнародних наукометричних базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar відповідно до рекомендацій PRISMA-ScR. Особливу увагу приділено сучасним систематичним оглядам, мета-аналізам, клінічним дослідженням опублікованим за останні 10 років.

Результати аналізу літературних даних. Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що метод скінчених елементів стрімко розвивається та став важливим прогностичним елементом в лікуванні переломів нижньої щелепи. Yasumasa Kakei (2026) описує в своїй роботі 3 основні періоди розвитку данного методу: – початковий період (2002–2010 рр.) характеризувався розробкою методології та дослідженнями з валідації; зокрема, Wagner та співавт. [11] заклали фундаментальні підходи до моделювання; – етап розширення (2011–2019 рр.) відзначився зростанням кількості наукових праць, зосереджених на порівнянні конструкцій пластин, що підтверджується дослідженнями різних наукових груп; – етап інтенсифікації (2020–2025 рр.) характеризується найвищими темпами публікаційної активності [12].

Daqiq O. (2024) розробили валідованої моделі для лікування переломів нижньої щелепи. Цього було досягнуто шляхом оцінювання стандартних методів фіксації переломів нижньої щелепи за допомогою інноваційної комп'ютерної моделі, верифікованої серією механічних випробувань полімерних моделей нижньої щелепи. Автор висунув гіпотезу, що механічна поведінка різних типів фіксації простих переломів нижньої щелепи відповідає даним моделі побудованих за допомого комп'ютерного забезбеччення, верифікованої за допомогою полірмених моделей [13].

Daqiq O. (2025) для оцінки фіксації переломів симфізу, парасимфізу та кута нижньої щелепи з використанням різних конфігурацій мініпластин застосовували метод скінченно-елементного аналізу. У дослідженні було випробувано три різні конфігурації розміщення мініпластин. Результати досліджень узгоджуються із сучасними уявленнями про лікування переломів нижньої щелепи та підтверджені результатами механічних експериментів «in vivo». Це означає, що модель FEA можна використовувати для аналізу складних переломів (наприклад, уламкових або на тлі атрофії), порівняння чи вдосконалення методів остеосинтезу та розробки нових імплантатів без потреби у створенні дорогих чи трудомістких моделей і проведенні експериментів in vivo [14].

Pandya H (2024) запропанували нову форми пластини та зробили висновок, що, запропонована авторами 3D-пластина та традиційні мініпластини функціонують за схожим принципом розподілу навантаження, модифікована система фіксації за допомогою 3D-мініпластини забезпечує кращу стійкість і стабільність щодо зміщувальних сил у всіх напрямках. Обмеженням цього методу є необхідність застосування екстраорального доступу для фіксації переломів у ділянці кута нижньої щелепи. Крім того, конструкція є дещо масивнішою, хоча за площею поверхні вона суттєво не відрізняється від традиційних мініпластин. модифікована фіксація 3D-пластиною є настільки ж ефективною, як і традиційна фіксація пластинами, при лікуванні переломів симфізу та кута нижньої щелепи [15].

Schönegg D (2022) проводили дослідження остеосинтезу головки виростка нижньої щелепи двома або трьома гвинтами за допомогою аналізу методу скінченних елементів. Модель скінченних елементів, використана в цьому дослідженні, має низку переваг порівняно з моделями, застосованими в інших роботах. Вона вирізняється високою точністю завдяки верифікованим

граничним умовам, значній кількості елементів і вузлів (із використанням дрібнішої сітки в зонах дії підвищених навантажень), а також достовірній геометрії, отриманій шляхом накладання на тривимірну модель верифікованих граничних умов, що відображають сучасні уявлення про біомеханіку [16].

Arora L. (2020) було розроблено дві скінченно-елементні моделі нижньої щелепи, в яких змодельовано перелом у ділянці симфізу. Кожну модель із переломом фіксували з використанням традиційного методу (система 2,0 мм) та перпендикулярного методу (система 2,0 мм). Аналізували напруження, що виникали в пластинах і нижній щелепі після прикладання навантаження. Перпендикулярний метод виявився ефективним, як і традиційний метод фіксації, при переломі симфізу нижньої щелепи [17].

Shouman H. (2025) у своєму дослідженні порівнював різний тип пластин при переломах виросткового відростка нижньої щелепи, та прийшли до висновку що використання при остеосинтезі 2 пластин дають кращі результати порівняно з дельта-пластиною [18].

Helmer L (2023) проводив дослідження оклюзійних поверхонь при переломах виросткових відростків нижньої щелепи за допомогою даного методу. Отримані результати свідчать про те, що відновити баланс між обома СНЩС складніше після перелому, який супроводжується вкороченням гілки понад 6 мм і кутом нахилу понад 18,75° [19].

Graillon N (2023) проводили дослідження порівнюючи біомеханічну поведінку нижньої щелепи (з титановими мініпластинами або без них) під дією ударного навантаження після завершення процесу загоєння кістки, з використанням методу скінченних елементів. Результат чисельного моделювання підтверджують припущення, висловлені в попередніх дослідженнях: наявність мініпластин на нижній щелепі може призводити до складніших переломів у разі травми. У зв'язку з цим автор рекомендуємо наголошувати на цьому ризику, інформуючи пацієнтів про доцільність видалення мініпластин після зрощення кістки [20].

Проведений аналіз вказує на широке застосування методу скінчених елементів при досліджені та лікуванні травматичних переломів. Однак на сьогоднішній день не має достатньої кількості робіт присвячених дитячого віку, які мають свої особливості. Тому це є предметом подальшого напрямку досліджень.

Висновки. Аналіз літературних джерел та клінічних досліджень дає змогу зробити висновки, що дослідження етіології та наслідків травм обличчя *in vivo* є практично неможливим з етичних міркувань. Метод скінченно-елементного аналізу (FEA) може використовуватися для виявлення ділянок найбільш «вразливих» для утворення переломів. Крім того, глибше розуміння біомеханіки травм дозволяє оптимізувати наявні хірургічні протоколи лікування травматичних переломів нижньої щелепи.

References:

1. Marc, K.K., Bakary, O., Alexandre, De Misères, O.O., Laurent, B.K., Annick, B.Z., Lucien, Jonathan, Y.A., Linda, Marie, Pièrre, K.A, & Ahi, Morel, C. (2024). Children mandibular fractures: Epidemiological and anatomo-clinical aspects. *Heliyon*, 10(3), e24947. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24947.

2. Bagayoko, T.B., Dramé, B.M., Bah, A., Koné, S.I., Samaké, B., & et al. (2021). Le préjudice corporel chez les traumatisés de la face admis à l'hôpital Nianankoro Fomba de Ségou. *Mali santé publique,* 11(2), 67–75. DOI: 10.53318/msp.v11i2.2189

3. Ngaba, M.P.O.M.N., Yousse, M.D., Zing, S., & Bengondo, M.C. (2021). Fractures maxillo-faciales de la circulation routière : aspects épidémiologiques et cliniques dans les trois hopitaux de la ville de Yaoundé. *International journal of innovation scientific research and review*, 3(7), 1529–1533

4. Sharma, A., Patidar, D.C., Gandhi, G., Soodan, K.S., & Patidar, D. (2019). Mandibular Fracture in Children: A New Approach for Management and Review of Literature. *Int J Clin Pediatr Dent,* 12(4), 356-359. doi: 10.5005/jp-journals-10005-1643.

5. Yang, C., Zhang, S., & Zhang, Y. Three-Dimensional-Printed Splint for Use in Pediatric Mandibular Fracture. *J Craniofac Surg,* 34(2), e186-e187. doi: 10.1097/SCS.0000000000008984.

6. Kannari, L., Marttila, E., Thorén, H., & Snäll, J. (2022). Dental injuries in paediatric mandibular fracture patients. *Oral Maxillofac Surg,* 26(1), 99-104. doi: 10.1007/s10006-021-00966-8.

7. Mukhopadhyay, S. (2018). A retrospective study of mandibular fractures in children. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg,* 44(6), 269-274. doi: 10.5125/jkaoms.2018.44.6.269.

8. Hajibandeh, J., & Peacock, Z.S. (2023). Pediatric Mandible Fractures. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am,* 35(4), 555-562. doi: 10.1016/j.coms.2023.05.001.

9. Kakei, Y., Sader, R., Ebener, P., Tanaka, A., Akashi, M., Kuroda, R., & Thoenissen, P. (2026). Three-dimensional finite element analysis for internal fixation of mandibular condylar fractures: a scoping review. *Eur J Trauma Emerg Surg,* Jul 8;52(1):217. doi: 10.1007/s00068-026-03259-5.

10. Lisiak-Myszke, M., Marciniak, D., Bieliński, M., Sobczak, H., Garbacewicz, Ł., & Drogoszewska, B. (2020). Application of Finite Element Analysis in Oral and Maxillofacial Surgery-A Literature Review. M*aterials (Basel),* 13(14), 3063. doi: 10.3390/ma13143063.

11. Wagner, A., Krach, W., Schicho, K., Undt, G., Ploder, O., & Ewers, R. (2002). A 3-dimensional finite-element analysis investigating the biomechanical behavior of the mandible and plate osteosynthesis in cases of fractures of the condylar process. *Oral Surg, Oral Med, Oral Pathol, Oral Radiol, Endodontology,*94(6)678–86. doi: 10.1067/moe.2002.126451.

12. Kakei, Y., Sader, R., Ebener, P., Tanaka, A., Akashi, M., Kuroda, R., & Thoenissen, P. (2026). Three-dimensional finite element analysis for internal fixation of mandibular condylar fractures: a scoping review. *Eur J Trauma Emerg Surg,* 52(1), 217. doi: 10.1007/s00068-026-03259-5.

13. Daqiq, O., Roossien, C.C., Wubs, F.W., & van Minnen, B. (2024). Biomechanical assessment of mandibular fracture fixation using finite element analysis validated by polymeric mandible mechanical testing. *Sci Rep,* 14(1), 11795. doi: 10.1038/s41598-024-62011-4.

14. Daqiq, O., van Minnen, B., Spijkervet, F.K.L., Wubs,. FW., Lunter, G., & Roossien, C.C. (2025). Finite element analysis of mandibular fracture fixation authenticated by 3D printed mandible mechanical testing. *Sci Rep,* 15(1), 14655. doi: 10.1038/s41598-025-98732-3.

15. Pandya, H., Patel, H., Vithalani, S., Bhavsar, B., Shah, U., & Chunawala, A. (2024). Finite Element Analysis of New Modified Three-dimensional Strut Miniplate versus Conventional Plating in Mandibular Symphysis and Angle Fractures – An In vitro Study. *Ann Maxillofac Surg,* 14(1), 71-75. doi: 10.4103/ams.ams_205_23.

16. Schönegg, D., Müller, G.T., Blumer, M., Essig, H., & Wagner, M.E.H. (2022). Two-versus three-screw osteosynthesis of the mandibular condylar head: A finite element analysis. *J Mech Behav Biomed Mater,* 127, 105077. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105077.

17. Arora, L., Bhardwaj, S., Hashmi, G.S., Anwar, S.F., & Rahman, S.A. (2020). Finite Element Analysis (FEA) of Perpendicular Plating Versus Conventional Plating in Mandibular Symphysis Fracture. *J Maxillofac Oral Surg,* 19(1), 143-148. doi: 10.1007/s12663-019-01244-7.

18. Shouman, H.A., Metwally, K.G., ELhadidi, Y., & Abd, El Wahed, H. (2025). Finite Element Analysis of Two Patterns of Internal Fixation of the Mandibular Subcondylar Fractures (Comparative Study). *J Maxillofac Oral Surg,* 24(1), 123-129. doi: 10.1007/s12663-024-02420-0.

19. Helmer, L.M.L., Klop, C., Lobbezoo, F., Lange, J., Koolstra, J.H., & Dubois, L. (2023). Changes in load distribution after unilateral condylar fracture: A finite element model study. *Arch Oral Biol,* 155, 105791. doi: 10.1016/j.archoralbio.2023.105791.

20. Graillon, N., Foletti, J.M., Godio-Raboutet, Y., Guyot, L., Varazzani, A., & Thollon, L. (2023). Mandibular Titanium Miniplates Change the Biomechanical Behaviour of the Mandible in the Case of Facial Trauma: A Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Bioengineering (Basel),* 22, 10(9), 994. doi: 10.3390/bioengineering10090994.

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.08.2026
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації: 11.11.2026