

三维有限元在颞下颌关节中的应用进展

楼 婷^{1*}, 刘纪元¹, 夏衣旦·艾合买提江¹, 王 星^{1,2#}

¹新疆医科大学第一附属医院附属口腔医院口腔修复科, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区口腔医学研究所, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年3月17日; 录用日期: 2024年4月11日; 发布日期: 2024年4月18日

摘 要

颞下颌关节紊乱病是由多因素引起的一组疾病, 该病的临床症状常常表现为: 张口受限、关节弹响、关节疼痛等。该病的治疗方法分为保守治疗及手术治疗。随着数字成像技术的发展, 三维有限元法可以较真实的还原颞下颌关节的解剖形态并做全面的力学分析, 有助于分析致病因素及制定治疗方案。本文就三维有限元在颞下颌关节中的应用进展作一综述。

关键词

颞下颌关节紊乱病, 三维有限元, 生物力学, 关节盘

Application Progress of Three-Dimensional Finite Elements in Temporomandibular Joint

Ting Lou^{1*}, Jiyuan Liu¹, Ahmatjiang·Xiayidan¹, Xing Wang^{1,2#}

¹Department of Prosthodontics, Stomatological Hospital Affiliated to the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Stomatology, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 17th, 2024; accepted: Apr. 11th, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

Temporomandibular joint disorder is a group of diseases caused by multiple factors, and the clin-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 楼婷, 刘纪元, 夏衣旦·艾合买提江, 王星. 三维有限元在颞下颌关节中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(4): 1212-1217. DOI: 10.12677/acm.2024.1441145

ical symptoms of the disease are often manifested as: limited mouth opening, joint snapping, joint pain, etc. Treatment of the disease is divided into conservative and surgical treatment. With the development of digital imaging technology, the three-dimensional finite element method can realistically restore the anatomical morphology of the temporomandibular joint and do a comprehensive mechanical analysis, which is helpful to analyze the pathogenic factors and formulate treatment plans. In this paper, the application of three-dimensional finite elements in the temporomandibular joint is reviewed.

Keywords

Temporomandibular Joint Disorders, Three-Dimensional Finite Element, Biomechanics, Articular Discs

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颞下颌关节紊乱病(Temporomandibular Joint Disorder, TMD)是一种常见的口腔颌面部疾病,主要表现为颞下颌关节及其周围组织的功能障碍和疼痛[1]。该病常见于青少年和成年人,对患者的咀嚼、说话和面部表情产生不良影响,严重时还会导致慢性疼痛和功能障碍[2]。颞下颌关节(Temporomandibular Joint, TMJ)是连接颅骨和下颌骨的重要关节之一,其解剖结构包括颞骨、下颌骨以及位于两者之间的关节盘。关节盘起到减震和保护软骨的作用,同时也是关节正常运动的关键结构之一。颞下颌关节的正常运动过程涉及到旋转、滑移和滚动等复杂的运动方式[3] [4]。而当 TMJ 发生紊乱时,关节盘的位置和运动会受到影响,从而导致关节功能障碍和疼痛的出现[5]。三维有限元方法在 TMD 中的应用已经取得了显著的进展[6] [7]。该方法是一种数值计算方法,通过将复杂的生物组织和力学行为建模为有限个小单元,并应用适当的边界条件和材料参数,可以模拟和分析颞下颌关节的运动和力学行为。随着技术的不断发展和研究的深入,三维有限元方法在 TMD 中的应用有诸多相关文献,本文将对三维有限元在颞下颌关节中的应用进展进行如下综述。

2. 颞下颌关节模型的建立

TMJ 影像数据的获取和处理是研究颞下颌关节紊乱病的重要环节随着医学影像技术的不断进步,如计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MRI)和正位 X 线摄影等,可以提供高质量的 TMJ 影像数据。这些技术能够提供关节结构的详细信息,包括关节盘的位置、关节间隙的大小和关节软骨的形态等[8] [9]。Krohn 等[10]认为 TMJ 动力学的传统铰轴理论正逐渐被瞬时旋转中心理论所取代,而瞬时旋转中心理论的确定基于有限元模型的三维分析,瞬时旋转中心理论是应用于实时 MRI 有助于直接记录下颌生理运动过程中的 TMJ 结构。Martinez 等[11]通过 CT 结合 MRI 构建一个包含人类咀嚼系统所有基本组成部分的有限元模型,研究中使用 CT 扫描构建骨性结构,使用 MRI 构建软组织,通过 MRI 的瞬态分析建模颞的动态变化。目前有研究[12]将刚体下颌模型配合有限元建模关节盘,与传统的三维有限元模型相比,此模型提出了使用有限元模型盘和弹性基础关节软骨相结的接触模型,可节省计算时间,有助于增加对咀嚼系统的理解,以及 TMJ 与关节应力之间的关系。研究表明[13], TMJ 的材料参数对于模型的准确性和可靠性至关重要。常用的材料参数包括组织的弹性模量、屈服强度、泊松比等。这些参数通常需要通过生物力学

试验或文献报道进行确定。Cifte 等[14]采用三维有限元分析研究咬合平面倾角对 TMJ 应力分布的影响, 顺时针或顺时针的咬合平面旋转是改变传递到 TMJ 结构的咬合力方向的因素之一, 该研究认为有限元分析可确定 TMJ 可能存在的高应力区域, 结果显示在矢状面接受参考咬合平面角度为 8° , 在顺时针和顺时针方向修改 4° , 分别得到顺时针和顺时针模型。Lai 等[15]对关节内病变患者颞下颌关节盘的有限元分析, 在正常模型下, 颞下颌关节盘的应力分布分别为 2.07 ± 0.17 、 1.49 ± 0.14 和 1.41 ± 0.14 MPa, 摩擦系数分别为 0.001、0.3 和 0.4。TMD 模型的应力分布分别为 3.87 ± 0.15 MPa、 7.23 ± 0.22 MPa 和 7.77 ± 0.19 MPa, 当前移位侧的摩擦系数增大时, 对侧关节盘、髁突和下颌骨受到的应力增大, 同时关节盘、髁突和下颌骨的应力值均高于正常外侧关节。由于 TMJ 的多样性和个体差异性, 确定材料参数仍然具有一定的挑战。因此, 研究人员需要结合实验数据和临床实践, 综合考虑不同因素来确定适用于特定研究的材料参数。

3. 三维有限元模拟在颞下颌关节中的应用

利用建立的三维有限元模型, 可以模拟和分析 TMJ 的运动和力学行为[16]。随着信息技术的发展, 有限元分析能够结合 MRI 及 CT 等全方位的获取口腔结构和形态、应力分布情况以及颌关节负荷, 从而形成更为精确的三维模型, 每个部位均可以单独计算所得[17], 包括计算关节盘的位移和稳定性, 评估关节软骨的应力分布和变形情况, 以及预测治疗方案的效果等[18] [19]。模拟结果的分析可以帮助研究人员深入理解 TMJ 的功能和 TMD 病理机制, 为 TMD 的诊断和治疗提供科学依据。Sun 等[20]深入研究人类咀嚼系统的静力传递及其对颞下颌关节的生物力学影响, 通过三维有限元模型研究人类咀嚼系统的生物力学行为, 揭示咀嚼系统的力传递模式, 研究根据健康成年男性的医学图像建立有限元模型, 结果显示磨牙咬合面是咬合的主要传力区, 咬合物质的刚度不会改变力传递模式, 但会影响牙盘和咬合表面的最大接触应力。在单侧咬合时, 关节盘表面的高应力区发生同侧移动, 磨牙垫的存在与否会显著影响咀嚼系统的生物力学反应。有限元分析是研究涉及复杂相互作用的生物力学反应的有效方法, 详细的模型来丰富咀嚼系统的静态分析, 有助于更好地理解咬合过程中力的传递方式和 TMJ 的生物力学意义。Feng 等[21]研究三维有限元模拟下颌关节前伸后收运动的生物力学分析, 研究认为 TMJ 运动频繁, 可能引发 TMJ 上的过载和不平衡负载, 通过 CT 和 MRI 建立 6 个无症状被试的三维颌面系统模型, 使用光学跟踪系统记录下颌骨的前伸和后缩, 采用有限元方法模拟关节在运动过程中的生物力学行为, 该模型可用于研究颞下颌关节运动。Woodford 等[22]采用低轮廓电磁场传感器在三维颌骨运动和咬合载荷测量和建模, 在咀嚼过程中, 最初的牙齿 - 橡胶接触从臼齿的颊侧发展到完全闭口时的舌侧, 低调的电磁场传感器提供了临床相关的颌骨运动学测量, 具有足够的精度, 可以驱动咀嚼和咬合过程中咬合负荷的有限元模型, 研究认为所提出的模型框架为计算跨牙弓的生理、动态咬合负荷提供了基础。

4. 三维有限元方法在颞下颌关节紊乱病治疗中的应用

在研究 TMD 时, 三维有限元模拟可以帮助研究人员深入理解关节组织的应力分布、变形情况以及关节功能的改变[23] [24]。通过三维有限元模拟, 研究人员可以对 TMJ 进行静态和动态加载的仿真, 模拟不同张口角度下的关节运动和力学行为, 可以帮助研究人员了解 TMJ 在正常和异常条件下的应力分布和变形情况, 从而揭示 TMD 的发生机制[25] [26] [27]。此外, 三维有限元模拟还可以用于评估不同治疗方案对 TMJ 的影响。例如, 通过模拟分析, 可以评估牙合板、矫治器等治疗装置对 TMJ 的稳定性和功能改善的效果[28] [29]。这些模拟结果可以为临床医生选择合适的治疗方案提供科学依据。关节盘穿孔是一种严重的 TMD, 关节盘穿孔可能引起 TMJ 内应力的变化, Gao 等[30]采用三维有限元研究关节盘穿孔对颞下颌关节的生物力学影响, 研究基于 1 例左侧关节盘穿孔患者的 CBCT 影像资料, 建立 TMJ 的 11 个三维有限元模型, 关节盘前移位导致两个颞下颌关节的 maxim von Mises 应力(MVMS)显著增加, 其中

患侧的影响更为明显, 关节盘前移位导致双侧颞下颌关节受力增加, 单侧关节盘穿孔进一步影响 TMJ 两侧的应力。不对称下颌前突是临床上常见的一种骨骼性牙颌面畸形。不对称下颌前突是临床上常见的骨颌面畸形。单侧矢状分裂支截骨术(BSSRO)是一种有效的替代双侧矢状分裂支截骨(BSSRO)的手术, Li 等[31]评估 BSSRO 和 USSRO 治疗不对称下颌前突患者颞下颌关节应力分布的变化, 研究对一名 BSSRO 患者和一名 USSRO 患者进行了术前和术后功能性 TMJ 运动的三维有限元分析, 在两个术前有限元模型中, 功能运动时非偏侧 TMJ 结构的最大应力大于偏侧, 在 BSSRO 和 USSRO FE 模型中, 不平衡应力分布在术后得到纠正, BSSRO 和 USSRO 均能改善下颌偏度。不对称下颌前突患者的双侧 TMJ 结构存在不平衡应力, 采用 USSRO 和 BSSRO 均可显著改善该结构。Varghese 等[32]采用三维有限元评价下颌牙列大规模内缩时下颌关节处应力分布值及牙齿远端化的改变, 采用使用了一名患者的锥形束计算机断层扫描(CBCT)数据和 MRI 数据中的颅面骨骼和关节盘三维有限元模型的 9 个副本, 结果显示在关节盘上, 在所有受力水平下, 最大应力均出现在关节盘的下位区和前后区下位区。关节盘上的应力和牙齿的位移随三根弓线受力水平的增加而增加。450 gm 力时关节盘应力最大, 牙齿位移最小, 250 gm 力最小。随着弓丝大小的增加, 在牙齿位移量或关节盘产生的应力方面没有显著差异, 研究认为通过本文的三维有限元研究, 对于 TMD 患者最好使用较低水平的力, 以减少 TMJ 产生的应力, 避免 TMD 病情恶化。磨牙症、夜间磨牙和咬牙的不良功能习惯与关节变性的发病有关, 特别是长时间的咬合被认为会导致 TMD。Mori 等[33]研究分析了长时间咬合时软骨 TMJ 关节盘和关节软骨的应力分布, 研究基于健康志愿者的 MRI 建立有限元模型, 长时间咬合时记录的髁突运动作为应力分析的加载条件, 咬合开始时(咬合时间 = 0 s), MVMS 应力最大的区域位于面向髁突软骨的下关节盘表面的中后区(6.18 MPa), 最小主应力最大的是髁突软骨(-6.72 MPa); 朝向颞骨软骨的关节盘上表面应力集中解除; 颞骨软骨表面的应力相对较低; 咬合 5 min 后, TMJ 各成分的应力值均降至咬合开始时应力值的 50%~80%, 但同期伴随应变略有增加, 研究认为由于组织扩张, 长时间咬合时, 髁突和颞叶软骨层以及 TMJ 关节盘在应力分布和传递中起重要作用。

5. 总结与展望

三维有限元模拟是一种强大的工具, 可以模拟和分析 TMJ 的运动和力学行为。三维有限元模拟在 TMJ 研究中的应用得到了广泛关注。通过构建准确的三维模型, 可以模拟和分析 TMJ 的运动行为。通过改变张口角度和加载条件等参数, 可以模拟不同情况下的 TMJ 运动, 并研究关节结构的稳定性和功能改变。三维有限元模拟可以评估不同治疗方案对 TMJ 的影响。例如, 通过模拟分析, 可以评估牙合板、矫治器等治疗装置对 TMJ 的稳定性和功能改善的效果。三维有限元模拟还可以揭示 TMD 的发生机制。通过模拟分析, 可以计算关节软骨的应力分布和变形情况, 揭示关节组织在正常和异常条件下的力学行为差异。这些研究结果对于深入理解 TMD 的发病机制和治疗方法的改进具有重要意义。

然而, 三维有限元模拟在 TMJ 研究中仍面临一些挑战和限制。模型的构建需要准确获取关节结构的影像数据, 并进行三维重建和网格生成等处理, 由于 TMJ 有精细的解剖结构, 及运动的非线性及复杂的功能, 造成数据采集和建模的困难, 难以真正显示 TMJ 复杂的生物力学环境。这对于研究人员来说可能具有一定的技术难度。模型中的材料参数的确定需要通过实验测量或文献报道, 但由于 TMJ 的多样性和个体差异性, 确定准确的材料参数仍然具有一定的挑战。未来, 三维有限元模拟在 TMJ 研究中的应用有望取得更大的突破和发展。随着影像技术的进步, 高分辨率的影像数据将更容易获取, 从而提高模型构建的准确性。材料参数的确定可以通过更多的实验测量和文献报道进行验证, 以获得更准确的模型参数。可以进一步改进和优化模型的仿真算法, 提高模拟结果的准确性和可靠性。

综上所述, 三维有限元模拟在 TMJ 研究中具有广阔的应用前景。通过模拟和分析, 可以深入理解 TMJ 的运动和力学行为, 揭示 TMD 的发病机制, 并为治疗方案的选择提供科学依据。随着技术的不断

进步和方法的不断完善, 相信三维有限元模拟在 TMJ 研究中的应用将会得到进一步推广和应用。

参考文献

- [1] Dos Santos Proença, J., Baad-Hansen, L., Do Vale Braido, G.V., *et al.* (2024) Clinical Features of Chronic Primary Pain in Individuals Presenting Painful Temporomandibular Disorder and Comorbidities. *Journal of Oral Rehabilitation*, **51**, 255-265. <https://doi.org/10.1111/joor.13598>
- [2] Agostini, F., Ferrillo, M., Bernetti, A., *et al.* (2023) Hyaluronic Acid Injections for Pain Relief and Functional Improvement in Patients with Temporomandibular Disorders: An Umbrella Review of Systematic Reviews. *Journal of Oral Rehabilitation*, **50**, 1518-1534. <https://doi.org/10.1111/joor.13571>
- [3] De Souza-Pinto, G.N., Herreira-Ferreira, M., Grossmann, E., *et al.* (2023) Assessment of Temporomandibular Joint Bone Changes Associated with Anterior Disc Displacement: An MRI Cross-Sectional Study. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, **124**, Article ID: 101657. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2023.101657>
- [4] Immonen, J.A., Ciccotelli, J., Nguyen, L.M., *et al.* (2023) Osteoarthritis Disease Severity in the Temporomandibular Joint and the Knee Joint: A Comparative Cadaveric Study. *Cartilage*, **14**, 445-454. <https://doi.org/10.1177/19476035231189839>
- [5] 邢盼盼. 颞下颌关节结构紊乱病关节盘形态改变的临床 MRI 研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西医科大学, 2019.
- [6] Wu, J., Jia, W., Su, X., Z., *et al.* (2024) Three-Dimensional Analysis of Mandibular Morphology Asymmetry and Temporomandibular Joint Position in Patients with Unilateral Brodie Bite. *Orthodontics & Craniofacial Research*, **12**, 45-51. <https://doi.org/10.1111/ocr.12755>
- [7] Zhang, Y., Zheng, J., Wu, Q., *et al.* (2024) Three-Dimensional Spatial Analysis of Temporomandibular Joint in Adolescent Class II Division 1 Malocclusion Patients: Comparison of Twin-Block and Clear Functional Aligner. *Head & Face Medicine*, **20**, Article No. 4. <https://doi.org/10.1186/s13005-023-00404-y>
- [8] 鄢荣曾, 胡敏. 颞下颌关节三维有限元建模相关因素分析[J]. 医用生物力学, 2016, 31(2): 182-187.
- [9] 叶鹏程, 方一鸣, 张琳琳, 等. 颌面部包括咀嚼系统的数字解剖学有限元建模初步研究[J]. 医学研究杂志, 2016, 45(4): 36-41.
- [10] Krohn, S., Frahm, J., Mahler, A., *et al.* (2020) Biomechanical Analysis of Temporomandibular Joint Dynamics Based on Real-Time Magnetic Resonance Imaging. *International Journal of Computerized Dentistry*, **23**, 235-244.
- [11] Martinez Choy, S.E., Lenz, J., Schweizerhof, K., *et al.* (2017) Realistic Kinetic Loading of the Jaw System during Single Chewing Cycles: A Finite Element Study. *Journal of Oral Rehabilitation*, **44**, 375-384. <https://doi.org/10.1111/joor.12501>
- [12] Sagl, B., Schmid-Schwab, M., Piehslinger, E., *et al.* (2019) A Dynamic Jaw Model with a Finite-Element Temporomandibular Joint. *Frontiers in Physiology*, **13**, Article 1156. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01156>
- [13] 庞亚倩, 刘亮, 冯大军, 等. 下颌骨正中联合部囊性病变更有限元建模及生物力学研究[J]. 口腔医学研究, 2021, 37(3): 250-254.
- [14] Cifter, E.D. (2022) Effects of Occlusal Plane Inclination on the Temporomandibular Joint Stress Distribution: A Three-Dimensional Finite Element Analysis. *International Journal of Clinical Practice*, **2022**, Article ID: 2171049. <https://doi.org/10.1155/2022/2171049>
- [15] Lai, L., Huang, C., Zhou, F., *et al.* (2020) Finite Elements Analysis of the Temporomandibular Joint Disc in Patients with Intra-Articular Disorders. *BMC Oral Health*, **20**, Article No. 93. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01074-x>
- [16] Curtis, N. (2011) Craniofacial Biomechanics: An Overview of Recent Multibody Modelling Studies. *Journal of Anatomy*, **218**, 16-25. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2010.01317.x>
- [17] Goncalves, D.A., Camparis, C.M., Speciali, J.G., Castanharo, S.M., Ujikawa, L.T., Lipton, R.B. and Bigal, M.E. (2013) Treatment of Comorbid Migraine and Temporomandibular Disorders: A Factorial, Double-Blind, Randomized, Placebo-Controlled Study. *J Orofac Pain. Fall*, **27**, 325-335.
- [18] Singh, M. and Detamore, M.S. (2009) Biomechanical Properties of the Mandibular Condylar Cartilage and Their Relevance to the TMJ Disc. *Journal of Biomechanics*, **42**, 405-417. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.12.012>
- [19] Gallo, L.M. (2005) Modeling of Temporomandibular Joint Function Using MRI and Jaw-Tracking Technologies—Mechanics. *Cells Tissues Organs*, **180**, 54-68. <https://doi.org/10.1159/000086199>
- [20] Sun, T., Chong, D.Y.R., Shao, B., *et al.* (2023) A Deep Dive into the Static Force Transmission of the Human Masticatory System and Its Biomechanical Effects on the Temporomandibular Joint. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **230**, Article ID: 107336. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107336>
- [21] Feng, Y., Shu, J., Liu, Y., *et al.* (2021) Biomechanical Analysis of Temporomandibular Joints during Mandibular Pro-

- trusion and Retraction Motions: A 3D Finite Element Simulation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **208**, Article ID: 106299. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106299>
- [22] Woodford, S.C., Robinson, D.L., Edelmann, C., *et al.* (2021) Low-Profile Electromagnetic Field Sensors in the Measurement and Modelling of Three-Dimensional Jaw Kinematics and Occlusal Loading. *Annals of Biomedical Engineering*, **49**, 1561-1571. <https://doi.org/10.1007/s10439-020-02688-6>
- [23] 徐文华. 上颌扩弓对颞下颌关节生物力学影响的三维有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [24] 刘梦超, 马艺萌, 尼娜. 下颌偏斜患者双侧颞下颌关节三维有限元对称性研究[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2020, 41(3): 307-309.
- [25] 刘梦超, 吴信雷, 林崇翔, 等. 颞下颌关节骨骼肌肉系统三维有限元模型的构建[J]. 医用生物力学, 2015, 30(2): 118-124.
- [26] Merema, B.B.J., Sieswerda, J.J., Spijkervet, F.K.L., *et al.* (2022) A Contemporary Approach to Non-Invasive 3D Determination of Individual Masticatory Muscle Forces: A Proof of Concept. *Journal of Personalized Medicine*, **12**, Article 1273. <https://doi.org/10.3390/jpm12081273>
- [27] Pinheiro, M., Willaert, R., Khan, A., *et al.* (2021) Biomechanical Evaluation of the Human Mandible after Temporomandibular Joint Replacement under Different Biting Conditions. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 14034. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93564-3>
- [28] Huang, W., Dong, L., Yu, S., *et al.* (2023) Stress Distribution of the Modified Clear Twin-Block Aligner on the Temporomandibular Joint, Alveolar Bone and Teeth: A Finite Element Analysis. *International Orthodontics*, **21**, Article ID: 100815. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2023.100815>
- [29] 付欣. 颌间牵引对颞下颌关节应力分布及位移影响的三维有限元研究[D]: [硕士学位论文]. 佳木斯: 佳木斯大学, 2018.
- [30] Gao, W., Lu, J., Gao, X., *et al.* (2023) Biomechanical Effects of Joint Disc Perforation on the Temporomandibular Joint: A 3D Finite Element Study. *BMC Oral Health*, **23**, Article No. 943. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03521-x>
- [31] Li, H., Zhou, N., Huang, X., *et al.* (2020) Biomechanical Effect of Asymmetric Mandibular Prognathism Treated with BSSRO and USSRO on Temporomandibular Joints: A Three-Dimensional Finite Element Analysis. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **58**, 1103-1109. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2020.06.006>
- [32] Varghese, C., Ramaiah, P.T., Setty, S., *et al.* (2023) Evaluation of Stress Distribution Values at the Temporomandibular Joint and Distalization of Teeth during En-Masse Retraction of the Mandibular Dentition Using Buccal Shelf Bone Screws: A FEM Study. *International Orthodontics*, **21**, Article ID: 100747. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2023.100747>
- [33] Mori, H., Horiuchi, S., Nishimura, S., *et al.* (2010) Three-Dimensional Finite Element Analysis of Cartilaginous Tissues in Human Temporomandibular Joint during Prolonged Clenching. *Archives of Oral Biology*, **55**, 879-886. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2010.07.011>