

骨盆生物力学中有限元分析方法的应用与展望

陈志豪, 梁凯路*

重庆医科大学附属第二医院骨科 - 关节外科中心, 重庆

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年3月9日; 发布日期: 2025年3月18日

摘要

本文综述了有限元分析在骨盆生物力学中的应用, 包括基础研究、疾病诊断、损伤机制以及手术模拟等方面。尽管有限元分析在骨盆力学研究中取得了显著进展, 但在建模精确度、力学数据准确性及模拟验证等领域仍然存在挑战。随着技术的发展, 未来有限元分析在骨盆生物力学中的应用将更为广泛, 尤其是在个性化治疗和手术规划中具有重要意义。

关键词

有限元分析, 骨盆生物力学, 力学模拟, 损伤机制, 疾病诊断, 手术规划

Application and Prospects of Finite Element Analysis in Pelvic Biomechanics

Zhihao Chen, Kailu Liang*

Orthopedic and Joint Surgery Center, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 9th, 2025; published: Mar. 18th, 2025

Abstract

This paper reviews the applications of Finite Element Analysis in pelvic biomechanics, covering basic research, disease diagnosis, injury mechanisms, and surgical simulation. Despite significant progress in pelvic biomechanics research through FEA, challenges still exist in modeling accuracy, the precision of mechanical data, and simulation validation. With ongoing technological advancements, the application of FEA in pelvic biomechanics will become more extensive, particularly in personalized treatment and surgical planning, offering significant clinical relevance.

*通讯作者。

文章引用: 陈志豪, 梁凯路. 骨盆生物力学中有限元分析方法的应用与展望[J]. 临床医学进展, 2025, 15(3): 1533-1539.
DOI: 10.12677/acm.2025.153773

Keywords

Finite Element Analysis, Pelvic Biomechanics, Mechanical Simulation, Injury Mechanisms, Disease Diagnosis, Surgical Planning

Copyright © 2025 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

骨盆作为连接脊柱与下肢的核心结构, 不仅承载着上半身的重量, 还在下肢运动与力传递中发挥重要作用。其复杂的生物力学特性在人体运动、负载分布和稳定性等方面具有重要影响, 一直以来都是研究的热点领域。

骨盆是一个环形的复杂结构, 由前环和后环组成[1]。双侧耻骨、髌臼、坐骨及耻骨联合等构成骨盆前环, 占骨盆稳定作用的 40% [2]。骨盆后环则包括左右髂骨翼、骶骨、骶髂关节以及周围的韧带和肌肉, 统称为“骶髂关节复合体”, 是骨盆环的后部张力带, 承担骨盆稳定性 60%的作用[3]。目前普遍认为骨盆环的稳定在于骨盆后环的骶髂关节复合体是否完整。骨盆在动态运动中通过不同环路之间的协调配合, 维持脊柱与下肢之间的力学平衡, 确保下肢在步态、跑步以及负重活动中能有效传递动力, 减少不必要的能量浪费和骨骼损伤。

骨盆生物力学对于理解骨盆创伤的发生机制、评估骨折的稳定性和愈合情况等方面具有重要意义。然而, 由于个体间存在显著差异, 骨盆形态的多样性为相关研究带来了巨大挑战。目前, 有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)方法已成为评估人体骨盆在健康状态和病理情况下负载分布的重要工具。

2. 有限元分析概述及其特点

2.1. 有限元分析概述

有限元分析技术起源于工程设计与分析领域, 是一种利用连续介质力学和弹性原理来描述外力作用下研究对象的机械变化、位移变化及其他影响的模拟技术[4]。其基本思想是将复杂几何体划分为较小且简单的有限元素, 通过逐个分析有限元素后, 最终将结果整合以求得整个复杂几何体的解[5]。有限元分析中通常采用 CT 或 MRI 等影像数据, 通过图像处理与建模技术, 迅速生成骨骼及其周围组织的三维几何模型。这一过程可以精确地再现骨骼的空间结构, 并为后续的力学问题分析提供必要的基础。

在骨科领域, 有限元分析不仅能够帮助模拟骨折机制、分析骨骼受力情况, 还广泛应用于手术模拟、治疗效果比较、手术风险预测和植入物设计等方面, 为临床研究提供了重要的帮助[6]。

2.2. 有限元分析特点

有限元分析可以无限次重复进行验证, 并具有高度的可重现性, 这相较于使用活体或遗体组织进行实验具有显著优势。活体组织通常因为样本有限性及个体差异性受到限制, 且化学处理后的遗体组织可能导致组织力学特性的改变。另有研究显示动物模型与人体存在直立姿势上的形态和功能差异较大, 导致他们之间的比较缺乏有效性。

此外, 与直接使用实体骨标本进行实验力学研究相比, 有限元分析方法能够根据需求创建多样的生物力学模型, 并模拟不同实验条件下, 由体位变化引起的形变, 比如扭转、拉伸和弯曲等动作。通过这

种方式, 可以深入分析模型中的应力和应变分布、强度、能量变化、稳定性、极限性能、疲劳损伤以及材料寿命预测等方面, 具有数据结果精度高、成本节约、适用性较好等优势[7]。

3. 有限元分析在骨盆生物力学中的应用

3.1. 有限元分析在骨盆基础生物力学研究领域应用

目前的研究表明有限元模型的整体有效性主要取决于以下三个关键因素: 1) 目标结构的准确形态学数据; 2) 定义模型的精确力学数据; 3) 适当的载荷和边界条件。对以上任何一方面的评估与改进, 都可能有助于提高有限元模型的模拟精度[8], 从而为临床提供更可靠的依据。

3.1.1. 目标结构的准确形态学数据

在以往的研究中, 骨盆模型的骨骼通常以皮质骨和松质骨组成的层状几何形状进行建模。由于局部骨骼的几何形状和曲率变化非常复杂, 皮质骨通常采用具有恒定厚度的粗糙壳单元进行建模。然而实际上, 皮质骨结构在整个骨盆中的变化非常显著[9]。传统的薄壳单元在某些情况下可能无法提供准确的结果, 因为它们容易产生剪切锁定效应[10]。Ma 等人在其研究中开发了基于中国成年男性 CT 数据的有限元骨盆模型, 通过改变骨皮质层的厚度, 发现采用可变骨皮质层厚度的模型比采用固定骨皮质层厚度的模型在预测骨盆受伤方面更为准确。骨皮质层的厚度在抵抗骨盆骨折方面起着决定性作用[11]。

对于韧带的建模, 既往大多数模型将其简化为弹簧单元, 即只有在张力作用下才具有刚度的元素类型, 并且通常将其视为各向同性线性弹性材料。然而韧带由于具有多方向的纤维排列, 导致材料性能具有高度方向依赖性。童凯在其研究中模拟相关韧带时, 基于解剖学图谱及核磁共振影像, 通过运用 SolidWorks 的拉伸、扫描、放样等命令, 建立了韧带三维模型。这种方法相比传统的将韧带简化为弹簧单元, 能够更真实地模拟骨盆周围相关的韧带的特性, 更加贴近现实情况[7]。

对于骨盆肌肉而言, 由于其结构过于复杂, 构建三维模型存在较大困难, 因此既往大多数研究未将肌肉纳入骨盆有限元模型中。陈浩在其研究中用弹簧单元模拟肌肉, 建立了一个包含骨盆周围主要韧带和肌肉的完整的骨盆模型, 通过施加 500 N 的垂直载荷, 以模拟人体站立姿态, 研究发现骨盆肌肉虽然对骨盆中力传导路径的影响较小, 但却显著改变了骨盆内的应力分布, 使骨盆受力更为广泛, 并增加了骨盆的稳定性, 从而有效降低了骨盆的最大应力, 减少了应力集中现象[12]。

3.1.2. 模型的精确力学数据

大多数研究将骨视为各向同性线性弹性材料, 其力学数据用杨氏模量、泊松比来描述。然而 Yun-feng LIU 明确提到骨的有限元模型中一个常见的错误就是将杨氏模量赋给骨。骨是一种非均质、各向异性的复合生物材料, 其杨氏模量会随着矿物含量的变化而变化[13]。针对这一问题, 周伟等人在下颌骨的研究中提出利用 CT 数据的灰度值与骨密度和杨氏模量之间的关系来赋值[14]。但在骨盆骨相关研究中尚未应用此方法。另外, 骨盆周围软组织的精确力学数据仍然缺乏, 因为不同个体之间存在差异, 且目前只能通过文献估算或基于有限样本进行推导[15]。

3.1.3. 适当的载荷和边界条件

有限元模型的边界条件是探索骨盆生物力学行为的关键因素。在临床应用中, 设定更加准确的边界条件, 对于精确预测骨盆生物力学载荷传递至关重要。然而, 当前骨盆有限元模型边界条件设定的标准尚未统一。Pan Hu 等人在其研究中通过构建了三种不同边界条件的骨盆有限元模型(模型 I: 假设髋关节两侧存在接触; 模型 II: 假设髋关节连接面融合在一起, 且有股骨; 模型 III: 在模型 II 的基础上去掉股骨), 并分析了髋关节连接条件对骨盆生物力学载荷传递的影响, 发现髋关节的连接条件和股骨的存在对骨盆的应力分布有显著影响[16]。

而对于不同的加载条件, 计算模型与体外实验模型的定性和定量数据可能存在显著差异, 甚至可能相差两个数量级(即 100 倍) [17]。

3.2. 有限元分析在骨盆疾病诊断研究领域应用

骶髂关节疼痛的诊断通常依赖于物理测试、病史询问及影像学检查等, 其中已有临床研究表明, 物理测试在诊断骶髂关节疼痛方面具有较高的准确性和可靠性。Kim 通过有限元分析定量研究了六种常见物理测试(加压试验、分离试验、骶骨顶端加压试验、大腿推力试验、“4”字试验和骶髂关节扭转试验)对骶髂关节疼痛的影响。研究发现, 不同测试下, 骶髂关节的接触压力和韧带应变差异显著。加压试验、大腿推力试验、“4”字试验和骶髂关节扭转试验产生的接触压力较高(超过 10 MPa), 而骶骨顶端加压试验较低(约 3 MPa)。在韧带应变方面, 髂骨间韧带的应变最大。该研究为物理测试提供了定量数据, 证明了有限元分析在评估物理测试有效性中的重要作用, 并且可进一步帮助临床诊疗及开发其他测试方法[18]。

3.3. 有限元分析在骨盆损伤机制研究领域应用

目前, 运用有限元分析方法模拟骨盆受伤机制的研究较少, 主要原因在于骨盆形态极不规则, 周围软组织走行差异大。过往, 我们分析受伤机制主要依赖于临床观察、尸体实验以及影像学分析等, 但都存在各种困难, 例如尸体试验难以模拟不同受力机制下的骨折类型。随着计算机技术的不断发展, 有限元模型凭借其可重复性和较强的适用性, 越来越多的研究开始应用有限元分析方法建立骨盆模型, 以探讨相关损伤机制。Böhme 通过有限元分析模型研究了 II 型前后压缩性骨盆损伤(APCII)中的韧带损伤机制。研究发现, APCII 损伤主要导致前骶髂韧带的破裂, 从而使骨盆失去水平稳定性, 但垂直稳定性仍保持。而骶棘韧带和骶坐韧带在此类损伤中并未发生损伤, 这与传统观点存在差异[19]。此外另有研究使用有限元分析方法构建出骨盆有限元模型, 将一侧髂骨及骶骨固定约束, 另一侧髂骨沿 X 轴水平单纯向外旋转, 来动态模拟 APC 型骨盆损伤机制[7]。

3.4. 有限元分析在骨盆手术中的应用

有限元分析在骨盆手术中具有广泛的应用价值, 主要体现在以下几个方面: 首先, 它能够有效预测围手术期的潜在风险, 如失血量、手术时长及骨折愈合周期等关键指标。其次, 该技术通过精确解析特定的骨折模式, 能够模拟手术过程, 为患者制定个性化的治疗方案[20]。值得注意的是, 近年来, 骨科疾病的发病率逐渐增高, 通常需要利用相关手术植入物(如螺钉、金属板和外固定器)进行手术治疗[21]。为提高手术安全性及通过相关法律要求, 临床实践前需针对手术植入物进行严格的测试, 验证在施加物理负荷时组织的机械行为[22]。有限元分析的计算建模是进行此类分析的一种方法, 现已在医疗器械设计中得到广泛应用[23]。

在骨盆前环损伤中, Bodzay 等通过有限元分析模型研究了不同内固定物在耻骨骨折中的应用及其对后骨盆稳定性的影响, 发现钢板固定比逆行螺钉能提供更好的稳定性[24]。在骨盆后环损伤中, Lee 通过有限元分析和生物力学实验比较了三种骶髂关节损伤固定技术的生物力学性能, 结果表明, 后路髂髂螺钉固定相比骶骨棒和锁定加压钢板固定, 在固定稳定性、植入物失效风险和骨盆断裂风险方面具有明显优势[25]。梁成等人比较了前路双钢板、后路桥接钢板和拉力钉三种修复方式在治疗单侧不稳定骨盆后环损伤中的生物力学性能, 结果表明, 拉力钉修复提供了最佳的生物力学稳定性, 最接近正常骨盆, 而双钢板和桥接钢板修复存在不同的缺陷[26]。但是关于骨盆 C 型损伤中的最佳治疗方案的建议, 各项研究存在不同建议。Zhao 和 FU 在他们的研究中分别比较了常规和加长型骶髂螺钉在治疗双侧骶骨骨折中的稳定性。研究均发现, 加长型骶髂螺钉的稳定性优于常规型骶髂螺钉, 并推荐在 S1 和 S2 段使用加长型骶髂螺钉再进行双段固定。而 Wang 在其研究中针对 III 型骶骨骨折(Denis 分型), 推荐使用带空心螺钉的

凸形板[27]-[29]。

综上所述, 有限元分析可用于模拟和预测材料在不同力作用下的反应。其提供了一种可靠的、非侵入性的替代方法, 可以取代实验模型, 如尸体和动物实验。随着技术的不断进步, 有限元分析在骨科植入物设计领域的适用性将不断提高。

3.5. 有限元分析在 3D 打印技术方面的应用

骨盆手术因其解剖结构复杂、暴露深且需要精确的操作空间, 以避免损伤重要的神经血管和内脏结构, 一直以来都充满挑战。基于有限元分析的 3D 打印技术在骨盆骨折中展示出了独特优势, 其可生成三维模型, 准确呈现出骨盆的比例、形状和解剖结构, 以及骨折片的体积、大小和相互关系, 帮助医生更好的规划复位技术、选择手术入路及最佳螺钉轨迹等[30]。Hung 对 30 例采用 3D 打印技术方法的骨盆骨折患者进行了回顾性研究, 结果表明, 与传统 CT 影像相比, 手术时间缩短了 70 分钟, 出血量减少了 270 毫升, 并发症更少, 复查影像效果更好[31]。

4. 有限元分析的挑战与问题

4.1. 有限元模型构建

为了提供准确的结果, 有限元分析在很大程度上依赖于模型构建的精确性。然而, 由于骨盆的复杂几何形状、材料的异质性和各向异性, 其是一种难以建模的结构。以至于现有大多数模型在建模时只包含骨和韧带, 缺乏周围肌肉, 甚至部分模型只纳入骨骼。在骨盆骨整体建模上, 现有模型通常仅含骨盆环, 缺乏腰骶过渡区(L5-S1), 甚至有些模型排除了骶骨, 而这些结构在骨盆的运动中起着重要作用。

另外为了简化模型, 许多研究将弹簧单元替代为周围软组织, 忽略了材料的异质性和各向异性, 导致了不同研究之间存在明显差异, 直接影响建模结果。随着 FEA 模拟结果被用于推导或评估患者的临床结果, 进一步提高 FEA 建模的准确性变得至关重要。

4.2. 软组织力学数据

有限元分析中使用的软组织力学数据主要来源于尸体数据, 以及现有模型或文献中的测量数据。尽管许多研究者在模拟活体组织特性方面做出大量努力, 但当前的方法仍不能准确表示软组织材料特性的问题, 导致试验结果与现实之间存在差距。因此, 需进一步开展广泛的基础力学实验研究, 找到更现实且有用的数据。

4.3. 结果验证

FEA 模型建立完成后应进行充分的验证, 其中最有力的是体内或体外的验证。但现有的模型存在以下问题: 1) 大多数模型缺乏验证; 2) 部分模型验证不够可靠, 其仅与既往文献中的数据或现有的尸体实验数据进行对比, 然而后续模拟和原始试验的加载条件不同, 模拟结果会逐渐偏离原始的验证设置, 故降低了验证的有效性。

5. 有限元分析在骨盆生物力学中应用的未来

有限元分析方法在过去几十年中已经发展成为生物力学建模的前沿技术, 研究人员也为构建人体骨盆模型付出了巨大努力。首先, 未来的发展方向应聚焦于提高骨盆有限元模型的精确度, 随着人工智能的不断发展, 后续研究可以结合深度学习等技术, 从影像数据中自动生成高精度的骨盆有限元模型, 以进一步优化建模过程。其次, 我们可以通过采用逆向有限元分析方法来构建不同的软组织模型, 并使用动态 MRI 验证其结果, 从而提高软组织力学数据的精确度[32]。最后, 制定统一的模型验证与评估标准

十分重要, 其将有助于提升不同研究间的可比性和一致性。今后随着各项问题的不断解决, 有限元分析方法在骨盆生物力学中会展现更广阔的应用前景, 助力骨盆生物力学研究向更深层次发展。

参考文献

- [1] 郭建辉, 王朝晖, 熊波. 有限元分析在骨盆骨折生物力学研究中的应用[J]. 创伤外科杂志, 2015, 17(3): 274-276.
- [2] 郑明, 聂娜, 刘列华, 等. 骨盆前环骨折微创内固定技术研究进展[J]. 中华创伤杂志, 2021, 37(6): 571-576.
- [3] 周琳夕, 严诚, 等. 基于 CT 图像研究骨盆及韧带的损伤[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2021, 19(3): 138-141.
- [4] Galbusera, F., Cina, A., Panico, M., Albano, D. and Messina, C. (2020) Image-Based Biomechanical Models of the Musculoskeletal System. *European Radiology Experimental*, **4**, Article No. 49. <https://doi.org/10.1186/s41747-020-00172-3>
- [5] 张萌, 马坚. 髌裂治疗中有限元方法的应用进展[J]. 口腔医学研究, 2023, 39(8): 679-683.
- [6] Welch-Phillips, A., Gibbons, D., Ahern, D.P. and Butler, J.S. (2020) What Is Finite Element Analysis? *Clinical Spine Surgery: A Spine Publication*, **33**, 323-324. <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000001050>
- [7] 童凯. 骨盆前后压缩型损伤机制的有限元分析及相关韧带力学意义研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2018.
- [8] Hammer, N. and Klima, S. (2019) *In-Silico* Pelvis and Sacroiliac Joint Motion—A Review on Published Research Using Numerical Analyses. *Clinical Biomechanics*, **61**, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.12.005>
- [9] Konosu, A. (2003) Development of a Biofidelic Human Pelvic FE-Model with Several Modifications onto a Commercial Use Model for Lateral Loading Conditions. 2003 SAE World Congress, Detroit, 3-6 March 2003, 108-123.
- [10] Li, Z., Kindig, M.W., Kerrigan, J.R., Untaroiu, C.D., Subit, D., Crandall, J.R., et al. (2010) Rib Fractures under Anterior-Posterior Dynamic Loads: Experimental and Finite-Element Study. *Journal of Biomechanics*, **43**, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.08.040>
- [11] Ma, Z.W., Lan, F.C., Chen, J.Q., et al. (2014) Finite Element Study of Human Pelvis Model in Side Impact for Chinese Adult Occupants. *Traffic Injury Prevention*, **16**, 409-417.
- [12] 陈浩. 骨盆周围肌肉力对骨盆生物力学的研究[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(1): 75-78.
- [13] Liu, Y., Wang, R., Baur, D.A. and Jiang, X. (2018) A Finite Element Analysis of the Stress Distribution to the Mandible from Impact Forces with Various Orientations of Third Molars. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, **19**, 38-48. <https://doi.org/10.1631/jzus.b1600552>
- [14] 周伟, 安金刚, 荣起国, 等. 下颌骨颏部骨折联合双侧髌突囊内骨折致伤机制的三维有限元分析[J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(5): 983-989.
- [15] Buford, W.L., Moulton, D.L., Gugala, Z. and Lindsey, R.W. (2010) The Sacroiliac Spine—Computer Simulation of Motion and Modeling of the Ligaments. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, Buenos Aires, 31 August-4 September 2010, 5117-5120. <https://doi.org/10.1109/iembs.2010.5626195>
- [16] Hu, P., Wu, T., Wang, H., Qi, X., Yao, J., Cheng, X., et al. (2017) Influence of Different Boundary Conditions in Finite Element Analysis on Pelvic Biomechanical Load Transmission. *Orthopaedic Surgery*, **9**, 115-122. <https://doi.org/10.1111/os.12315>
- [17] Hammer, N., Steinke, H., Lingslebe, U., Bechmann, I., Josten, C., Slowik, V., et al. (2013) Ligamentous Influence in Pelvic Load Distribution. *The Spine Journal*, **13**, 1321-1330. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.03.050>
- [18] Kim, Y.H., Yao, Z., Kim, K. and Park, W.M. (2014) Quantitative Investigation of Ligament Strains during Physical Tests for Sacroiliac Joint Pain Using Finite Element Analysis. *Manual Therapy*, **19**, 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.math.2013.11.003>
- [19] Böhme, J., Lingslebe, U., Steinke, H., Werner, M., Slowik, V., Josten, C., et al. (2014) The Extent of Ligament Injury and Its Influence on Pelvic Stability Following Type II Anteroposterior Compression Pelvic Injuries—A Computer Study to Gain Insight into Open Book Trauma. *Journal of Orthopaedic Research*, **32**, 873-879. <https://doi.org/10.1002/jor.22618>
- [20] Welch-Phillips, A., Gibbons, D., Ahern, D.P. and Butler, J.S. (2020) What Is Finite Element Analysis? *Clinical Spine Surgery: A Spine Publication*, **33**, 323-324. <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000001050>
- [21] Friis, E.A., Tsao, A.K., Timmie Topoleski, L.D. and Jones, L.C. (2017) Mechanical Testing of Orthopaedic Implants. Woodhead Publishing.
- [22] Brekelmans, W.A.M., Poort, H.W. and Slooff, T.J.J.H. (1972) A New Method to Analyse the Mechanical Behaviour of Skeletal Parts. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, **43**, 301-317. <https://doi.org/10.3109/17453677208998949>

-
- [23] Goel, V.K. and Nyman, E. (2016) Computational Modeling and Finite Element Analysis. *SPINE*, **41**, S6-S7. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000001421>
- [24] Bodzay, T. (2014) Does Surgically Fixation of Pubic Fracture Increase the Stability of the Operated Posterior Pelvis? *Joint Diseases and Related Surgery*, **25**, 91-95. <https://doi.org/10.5606/ehc.2014.20>
- [25] Lee, C., Hsu, C. and Huang, P. (2017) Biomechanical Study of Different Fixation Techniques for the Treatment of Sacroiliac Joint Injuries Using Finite Element Analyses and Biomechanical Tests. *Computers in Biology and Medicine*, **87**, 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.06.007>
- [26] 梁成, 张麟麒, 王冠, 等. 不同内植物修复单侧不稳定骨盆后环损伤的有限元及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(9): 1336-1341.
- [27] Zhao, Y., Li, J., Wang, D., Liu, Y., Tan, J. and Zhang, S. (2012) Comparison of Stability of Two Kinds of Sacro-Iliac Screws in the Fixation of Bilateral Sacral Fractures in a Finite Element Model. *Injury*, **43**, 490-494. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.12.023>
- [28] Fu, S., Zhao, Y., Lian, W., Zou, D., Sun, T., Zhao, Y., *et al.* (2014) Comparison of the Risk of Breakage of Two Kinds of Sacroiliac Screws in the Treatment of Bilateral Sacral Fractures. *European Spine Journal*, **23**, 1558-1567. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3313-z>
- [29] Wang, J.P., Liu, H.J., Sun, S.K. and Jian, S.H. (2013) 3D Finite Elemental Analysis on Treatment of Sacral Fractures with Different Internal Fixation Implants. *Applied Mechanics and Materials*, **437**, 325-330. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.437.325>
- [30] Fang, C., Cai, H., Kuong, E., Chui, E., Siu, Y.C., Ji, T., *et al.* (2019) Surgical Applications of Three-Dimensional Printing in the Pelvis and Acetabulum: From Models and Tools to Implants. *Der Unfallchirurg*, **122**, 278-285. <https://doi.org/10.1007/s00113-019-0626-8>
- [31] Hung, C., Li, Y., Chou, Y., Chen, J., Wu, C., Shen, H., *et al.* (2018) Conventional Plate Fixation Method versus Pre-Operative Virtual Simulation and Three-Dimensional Printing-Assisted Contoured Plate Fixation Method in the Treatment of Anterior Pelvic Ring Fracture. *International Orthopaedics*, **43**, 425-431. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-3963-2>
- [32] Yang, M., Chen, C., Wang, Z., Long, J., Huang, R., Qi, W., *et al.* (2024) Finite Element Analysis of Female Pelvic Organ Prolapse Mechanism: Current Landscape and Future Opportunities. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article 1342645. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1342645>