

计算流体力学在门静脉系统血流动力学评估中的应用研究进展

谭力果, 郭大静*

重庆医科大学附属第二医院放射科, 重庆

收稿日期: 2025年7月29日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月2日

摘要

门静脉血流动力学改变是肝脏疾病发生发展的核心病理生理环节, 传统影像学方法(超声多普勒、CT血管成像、2D PC-MRI)及有创测压(HVPG)在全面量化评估复杂门静脉系统三维血流动力学参数(如壁面剪切应力、压力梯度等)方面存在局限。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)基于医学影像数据构建三维血管模型, 通过求解流体动力学方程, 可无创、可视化地模拟和量化分析门静脉系统内血流速度、压力、剪切力等精细动力学参数。本文综述计算流体力学(CFD)结合医学影像技术在门静脉系统血流动力学评估中的应用进展, 阐明其临床转化价值, 分析当前挑战并展望未来发展方向, 为门静脉系统疾病的精准诊疗提供新的流体力学视角。

关键词

计算流体力学, 门静脉高压, 肝硬化, 血流动力学

Advances in the Application of Computational Fluid Dynamics for Hemodynamic Assessment in the Portal Venous System

Liguo Tan, Dajing Guo*

Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Jul. 29th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 谭力果, 郭大静. 计算流体力学在门静脉系统血流动力学评估中的应用研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(9): 52-59. DOI: 10.12677/acm.2025.1592456

Abstract

Alterations in portal venous hemodynamics represent a core pathophysiological mechanism underlying the development and progression of hepatic diseases. Conventional imaging modalities (Doppler ultrasound, CT angiography, 2D PC-MRI) and invasive pressure measurements (HVPG) exhibit limitations in comprehensively quantifying complex three-dimensional hemodynamic parameters within the portal venous system, such as wall shear stress and pressure gradients. Computational fluid dynamics (CFD), based on medical imaging data, constructs three-dimensional vascular models. By solving fluid dynamics equations, CFD enables the non-invasive, visualizable simulation and quantitative analysis of detailed hemodynamic parameters—including blood flow velocity, pressure, and shear forces—within the portal venous system. This article reviews the application advances of CFD combined with medical imaging technology in assessing portal venous hemodynamics. It elucidates the clinical translational value of this approach, analyzes current challenges, and explores future directions, thereby providing a novel fluid mechanics perspective for the precise diagnosis and treatment of portal venous system diseases.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Portal Hypertension, Cirrhosis, Hemodynamics

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

门静脉(PV)是供应肝脏的主要血管之一, 占肝脏血供的 75%~80% [1], PV 向肝脏输送丰富的营养物质, 为肝脏代谢提供能量, 是肝脏营养物质代谢和解毒的物质基础。门静脉高压及其并发症(如食管胃底静脉曲张破裂出血、腹水、肝性脑病)是肝硬化患者死亡的主要原因之一, 造成了巨大的医疗负担[2]-[4]。门静脉系统的血流动力学状态是决定疾病进展和治疗效果的核心因素。准确评估门静脉压力、流量分布、侧支循环情况及血管壁受力状态, 对于风险分层、治疗方案选择(如药物、内镜、TIPS、肝移植)及疗效监测具有决定性意义。超声是评价肝脏血流的首选影像学检查, 可以观察 PV 血流方向, 测量 PV 直径、流速、流量等参数[5]。它具有无创、方便、无辐射、可重复性等优点。然而, 超声的一个问题是观察者之间和内部的可变性, 由于成像原理、声束方向、操作人员经验和设备条件的影响, 流速和流量测量的重复性和准确性存在一定的争议[6]。计算机体层成像血管造影(CTA)及 2D 相位对比 MRI (2D PC-MRI) 主要提供解剖结构和一维血流速度信息, 对复杂的三维血流模式、压力分布及生物力学效应的量化能力有限 [7] [8]。临床上常采用肝静脉置管, 有创测量肝静脉压力梯度, 确定 PV 压力梯度。Thalheimer 等人重新评估比较了 PV 直接压力梯度与肝静脉压力梯度的研究, 结果显示相关性和一致性良好[9]。该方法主要用于食管胃静脉曲张出血的风险评估, 目前被认为是门静脉高压症的诊断金标准。在评估 PV 血流动力学时, 传统成像方法提供的参数有限, 肝静脉置管具有高度的风险。因此, 需要开发新的无创诊断方法, 以提供更有效的参数。

计算流体力学(CFD)通过求解描述流体运动的控制方程(Navier-Stokes 方程), 可在计算机中模拟血管内的血流状态。结合患者个体化的三维血管几何模型(通常从 CT 或 MRI 图像分割重建获得)和边界条件

(如入口流速、出口压力), CFD 能够计算整个门静脉流域内任意位置的血流速度、压力、壁面剪切应力(WSS)等关键参数。近年来, 随着医学影像技术(尤其是 4D Flow MRI)的发展、计算机性能的提升以及算法优化, CFD 在门静脉系统血流动力学研究中的应用日益广泛, 展现出巨大的临床转化潜力。本文旨在综述 CFD 技术在门静脉系统血流动力学评估中的原理、方法学、应用现状及最新进展, 并探讨其面临的挑战与未来方向。

2. 技术原理和方法

CFD 是基于流体力学、计算机科学和数值分析等多学科交叉产生的新兴学科, 其核心在于依托数值计算方法, 在计算机平台上求解描述流体流动的数学方程。通过获取时间和空间维度上流场物理量的定量数据, CFD 得以揭示流体的内在物理特性。随着医工交叉的发展, CFD 在血管系统研究中的应用日益广泛, 在探究血流动力学对疾病发生机制、进展过程、治疗方案及预后效果的影响方面具有重要价值。基于成像的三维建模与计算流体动力学分析相结合的最新进展使得无创计算血流压力成为可能, 相关技术已成功应用于冠状动脉缺血诊断[10] [11]。此外, 实验流体力学技术的持续发展, 例如粒子图像测速(PIV)等方法的完善, 为 CFD 模型的有效性提供了实验验证途径, 显著增强了其可靠性。CFD 数值模拟技术的优势在于能够以无创方式量化评估诸多常规物理实验难以准确获取的关键血流动力学参数, 包括压力分布、壁面剪切应力、振荡剪切作用以及壁面颗粒滞留时间等。一个完整的门静脉系统 CFD 研究过程通常包括以下四个步骤:

2.1. 基于几何参数或其他成像信息构建几何模型

血管三维几何模型的构建主要分为两种方法。一种方法是基于已有的临床实验数据, 利用建模软件构建理想的血管模型。这种方法的优点是易于调整和修改理想模型的各种参数, 便于研究血流特性的具体变化, 如血栓形成或支架置入[12]。另一种方法是使用成像软件提取从无创血管成像技术获得的真实图像, 包括 DSA、CT、MRI 和超声, 由于 PV 是深血管, 通常基于高质量的门静脉系统 CT 或 MRI 检查, 利用医学影像处理软件(如 Mimics, Simpleware, 3D Slicer 等)进行图像分割, 提取门静脉主干及其分支、脾静脉、肠系膜上静脉等目标血管的三维几何模型。与直接基于参数的建模不同, 这种基于图像的方法可以更真实地表示人体血管的三维几何参数[13]。Botar [14]-[16]等基于 MRI 图像重建了 PV 的三维模型, 并利用 CFD 软件计算模型中血液的流动参数, 结果显示与超声的测量结果高度一致。

2.2. 模型修复与网格划分

对重建的几何模型进行光滑处理、去除噪点及修复缺陷, 生成适合流体计算的“水密”模型。随后进行网格划分, 将连续的血管腔离散化为大量微小的计算单元。在 CFD 数值模拟过程中, 网格是模型几何结构的表征载体。网格离散化的目的是针对复杂的流体域生成适配的计算网格, 以确保能够精确模拟关键的流体力学现象。网格质量的高低对数值求解过程的收敛特性以及最终结果的精确度具有决定性影响。体积网格的构建通常采用结构化、非结构化或混合策略, 基本组成单元为三维体积网格中的四面体、六面体或多面体元素组成。在 PV 模型的网格选择中, 考虑到壁面边界层的差异和分辨率, 使用混合网格可能是一个很好的选择; 例如, 在血管壁附近可以使用六面体网格, 以更好地贴合血管壁并捕捉更细微的血流变化, 而在血管内部可以使用四面体网格。

2.3. 边界条件、流体属性设定与求解计算

在血流动力学 CFD 数值模拟中, 边界条件的合理选择是实现血管内血液流动仿真模拟的关键。进出口边界条件的设置主要依赖于血管内的生理脉动流速和压力[17]。入口条件与速度的设置可以使用超声

或相位对比 MRI (PC-MRI)进行测量。对于门静脉系统, 常设定肝内小分支或肝窦处的压力(如估算的肝静脉压)或流量比例作为出口边界。血管壁的弹性模量和运动对血流动力学参数和 CFD 模拟结果也有影响。对于流速相对较低, 流量变化不大的 PV, 一般不需要考虑壁面运动和流固耦合(FSI)的影响。

牛顿流体是指粘度恒定的流体, 它可以包括纯液体、低分子复合溶液和低速流动的气体, 而非牛顿流体的粘度是可以变化的。人体血液是一种相当独特的液体, 由血浆和各种血细胞组成, 在许多研究中, 它被视为牛顿流体。有研究者在大多数生理条件下的动脉模型中使用两种流体识别方法比较牛顿流体模型与非牛顿流体模型的差异, 结果表明血流动力学参数无显著差异[18]。Ho [19]等基于 CT 图像构建了不同状态的 PV 模型, 并使用牛顿和非牛顿流体模型对其进行了分析。结果表明, 在生理条件下, 两种流体模型的计算结果没有显著差异, 除了门静脉流量显著降低时。

求解 PV 系统血流的血流动力学控制方程包括质量守恒的连续方程、动量演化的 Navier-Stokes 方程和本构方程。

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U}$$

本构方程:

$$\mu = \mu_{\infty} - (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + (K \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$

上式中, $\mathbf{U}$ 为速度矢量, t 为时间, p 为压力, μ 为动态粘度, ρ 为密度。通常血液密度 ρ 设定为 1060 kg/m³。 $\dot{\gamma}$ 为剪切率, μ_0 为零剪切率黏度, μ_{∞} 为无限剪切率黏度, K 为单位时间参数, n 为无因次参数 [20]。

2.4. 结果后处理与分析

通过求解上述方程, CFD 可量化以下核心参数: 壁面剪切应力(WSS), 即血流作用于血管壁切向的摩擦力, 生理范围内(0.5~7 Pa)维持内皮稳态, 低 WSS (<0.5 Pa)促进血栓形成, 高 WSS (>7 Pa)驱动血管重塑, 如 TIPS 术后狭窄; 压力梯度(PG)可反映局部流动阻力, 门静脉高压时压力梯度显著升高; 压力差(Pressure Drop)指血管段入口与出口间的总压差值, 直接决定器官灌注效率, TIPS 术后门体压差需降至 < 12 mmHg; 振荡剪切指数(OSI)表征血流方向随时间振荡程度的无量纲参数, OSI > 0.1 提示异常震荡流, 与血管炎症及粥样硬化相关。选择合适的数值算法(如有限体积法)和求解器(如 ANSYS Fluent, OpenFOAM 等)进行模拟计算, 获得整个门静脉系统的三维血流速度场、流线、压力分布图, 评估计算方法所得数据的准确性。

3. CFD 在门静脉系统疾病中的应用

1、肝硬化门静脉高压血流动力学评估

门静脉高压是肝硬化的常见并发症, 可导致胃食管静脉曲张、腹水、脾大, 肝性脑病等并发症的发生, 严重门静脉高压是肝硬化患者死亡的主要原因。从慢性肝病到肝硬化的病理过程伴随着肝脏微血管系统的结构改变, 包括肝窦重建、肝内分流形成和内皮功能障碍, 导致肝内阻力增加, 这是肝硬化患者门静脉压力升高的起始因素[2]。同时, 血管扩张物质产生增加和血管收缩物质反应减少导致内脏血管扩张进一步增加门静脉压力[21][22]。全面、无创地评估肝脏血流动力学变化对肝硬化患者的临床诊断和治

疗具有重要意义。CFD 可以获得血管模型的血流动力学参数, 因此可以用于无创性评估肝硬化患者门静脉系统主要血管的血流动力学变化。

晚期肝硬化患者常表现为肝右叶萎缩和肝左叶肥大, 这可能与血流重新分配有关, 但这一点很难通过体内实验证实。Xie [20]等应用 CFD 比较肝硬化患者和健康受试者的门静脉左右支血流分配和肝脏体积的关系, 发现门静脉左右支的血液分布有显著差异, 大部分血液从 SMV 流入门静脉右支(RPV), 而大部分血液从 SV 进入门静脉左支(LPV)。门静脉左右支流量比(QRPV/QLPV)与肝体积比(VR/VL)呈线性相关。George [23]等利用 MRI 和 CFD 技术模拟门静脉高压, 提出了几个能够反映肝血流分布的血流动力学参数, 如 SV 与 PV 的流量比, 该参数在肝硬化患者和健康人之间存在显著差异。此外, 该研究还发现, 在肝硬化患者中, SMV 向肝脏供血的比例低于健康人, 这可能是因为 SV 和 SMV 的压力和营养成分含量不同。

除了评估血流动力学以外, CFD 还可应用于无创评估肝静脉压力梯度。肝静脉压力梯度(HVPG)作为临床金标准, 定义为肝静脉楔压与自由压之差, $HVPG \geq 10 \text{ mmHg}$ 可诊断临床显著门静脉高压, $HVPG \geq 12 \text{ mmHg}$ 可能有静脉曲张出血风险。Qi [24]等结合 CT 血管造影和 CFD 技术开发并验证基于 CT 血管造影图像估计肝静脉压力梯度(HVPG)的计算模型虚拟肝静脉压力梯度(vHVPG), 该模型结果与侵入性 HVPG 测量具有显著相关性, 并具有很强的重复性, 同时 vHVPG 在临床显著的门静脉高压的无创诊断中也有很好的性能。

2、经颈静脉肝内门静脉系统分流术(TIPS)支架放置及功能评估

经颈静脉肝内门体静脉分流术(transjugular intrahepatic portosystemic shunt, TIPS)是在门静脉和肝静脉之间建立新的分流, 引流门静脉的血流进入体循环, 降低门静脉压力, 能够有效治疗或减轻门静脉高压相关并发症[25]。临床数据显示, 超过 90%的患者在接受 TIPS 后, 门静脉压力梯度显著下降。但是在有效缓解门静脉高压的同时, 必须维持肝脏的有效灌注, 以预防肝性脑病等并发症的发生[26]。基于 CFD 数值模拟技术的 TIPS 血流动力学研究有助于实现 TIPS 手术的精准和个性化治疗。

Yin [27]等基于 CT 图像构建了 TIPS 手术前后患者的三维几何模型, 然后利用 CFD 模拟了 TIPS 手术中不同支架放置方式对血流动力学的影响。结果显示, 尽管左、右 TIPS 对 TIPS 后门静脉压力和分流血流的影响仅存在细微差异, 与左 TIPS 相比, 右 TIPS 导致 SMV 进入支架的流量更高, 可能会增加肝性脑病的风险。此外, 支架的入口点应尽可能靠近 PV 分叉, 以获得更大更稳定的血流。

Riedel [28]等纳入 20 例肝硬化 TIPS 患者, 结合 4D Flow MRI 和 CFD 无创评估肝硬化 TIPS 患者门体压力梯度(PSPG)。通过模拟门静脉-肝静脉三维流场, 预估分流后门体流量比($>60\%$ 提示过度分流), 优化支架选择(如 VIATORR 支架的覆膜长度)。CFD 压力分布图可可视化狭窄位置(如支架头端/尾端血栓), 与有创造影的结果一致。该研究表明 TIPS 术前及术后 CFD 模拟可指导临床评估支架置入后的效果及狭窄程度, 无创测量 PSPG, 监测 TIPS 支架功能。

3、门静脉血栓形成的预测

肝硬化导致内皮细胞功能障碍和门静脉血流缓慢。同时, 肝合成功能下降导致低白蛋白血症, 导致血浆外溢、血液高凝, 从而更容易发生 PV 血栓形成。门静脉高压症患者发生脾功能亢进时, 脾切除术是一种有效的治疗方法, 但术后 PV 血栓形成是其主要并发症之一, 发生率为 $18.3\% \sim 30.1\%$ [29]。PV 血栓形成使门静脉系统血流动力学发生变化, 将 CFD 技术应用于 PV 血栓形成的研究, 有助于我们深入了解血栓形成的发病机制和进展。

Xiong [12]等建立了 PV 合并血栓形成的理想模型, 利用 CFD 比较了 PV 主要分支静脉不同解剖特征诱导血栓形成的风险。他们发现胃左静脉、肠系膜下静脉的解剖结构和 PV-SV 的角度与血栓形成有很强的相关性。Wang [30]等根据 3 例行脾切除术的门静脉高压患者术前临床资料, 建立计算模型, 分别量化

脾切除术前后门静脉系统血流动力学。该研究得出患者脾切除术前低 WSS 区面积比较小, 术后低 WSS 区面积明显增加, 低 WSS 区与 CT 图像上的血栓分布吻合较好, 表明 CFD 研究可以作为常规临床评估的补充, 以完善风险分层和术后患者管理。

4、活体肝移植术前评估

活体肝移植是指从供体体内切除部分肝脏, 将其移植到受体体内的手术。术后观察表明, 供体与受体残余肝脏的再生潜力显著, 其体积通常可恢复至术前原始肝脏体积的 80%到 90% [31]。为确保活体肝移植术后供体的安全, 术前运用影像学检查结合功能性生物标志物评估手段, 预测活体肝部分切除对供体肝脏功能及血流动力学稳定性的潜在影响具有重要的临床价值。RUTKOWSKI [32]等结合 4D Flow MRI 与 CFD 技术, 对活体肝移植捐献者进行术前虚拟手术规划, 将餐后状态下门静脉分支的生理性扩张状态, 假设为术后可能达到的最大扩张程度, 利用术前获取的血流动力学数据预测术后门静脉系统的流速、流量、压力和 WSS 等参数, 结果提示术前 CFD 模型可用于预测供体术后门静脉血流情况。

4. CFD 在门静脉系统应用的局限性与展望

目前 CFD 在门静脉系统中的研究存在一些局限性, 包括耗时、样本量小等问题。同时 CFD 模型存在简化问题, 当前多假设血管壁为刚性, 忽略了血管壁的弹性、随压力变化的顺应性以及周围组织的约束作用(流固耦合 FSI 模型更精确但计算极复杂)。血液常简化为牛顿流体, 忽略了其可以剪切形变的非牛顿特性, 尤其是在低剪切率区域。并且对于 PV 边界条件的设置还有待进一步研究, 随着临床和技术人员对于 CFD 更多实践方法的探索, 人们会更加关注边界条件确定的其他影响因素。此外, CFD 后处理所需要的时间较长, 限制其在临床的应用, 这些都是亟待解决的问题。

在未来开展的研究中, 可进一步优化以下几个方面: 整合 CTA/4D Flow MRI 原始数据、超声流速等边界条件测量值、临床金标准 HVPG 测值及病人不良事件随访记录如胃食管静脉曲张破裂出血、血栓形成、TIPS 支架狭窄等, 构建多中心开放验证数据库, 建立金标准支持的模型验证平台, 推动模型验证和 AI 算法的开发。开展多中心、大样本的前瞻性临床研究, 明确 CFD 预测参数的临床效能和临界值, 推动其纳入临床指南。采用深度学习算法(如 3D U-Net)自动化分割门静脉几何结构, 减少人工操作偏差并提升模型泛化能力。基于大量 CFD 模拟数据训练的 DL 模型, 可在输入血管几何和边界条件后, 近乎实时地预测关键血流动力学参数(如 WSS、压力), 极大缩短计算时间, 为临床快速评估提供可能, 推动 CFD 向临床即时工具发展。

5. 结论

综上所述, 计算流体力学(CFD)作为一门强大的数值模拟技术, 通过与医学影像的深度结合, 为无创、可视化、量化研究门静脉系统复杂血流动力学提供了前所未有的工具。其在揭示门静脉高压病理生理机制、评估和优化 TIPS 治疗、分析血栓风险、预测肝移植后血流变化等方面展现出巨大潜力。尽管目前仍面临模型简化、边界条件设定、计算复杂度和临床验证不足等挑战, 但随着影像技术的进步、人工智能的融合以及标准化工作的推进, CFD 有望在未来成为门静脉系统疾病精准诊疗中不可或缺的流体力学分析平台, 为改善患者预后提供新的科学依据和临床价值。

参考文献

- [1] Lauth, W.W. (2009) Hepatic Circulation: Physiology and Pathophysiology. Morgan & Claypool Life Sciences.
- [2] Tsochatzis, E.A., Bosch, J. and Burroughs, A.K. (2014) Liver Cirrhosis. *The Lancet*, **383**, 1749-1761. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(14\)60121-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(14)60121-5)
- [3] Garcia-Tsao, G. and Bosch, J. (2011) Management of Varices and Variceal Hemorrhage in Cirrhosis. *The New England*

- Journal of Medicine*, **364**, 490.
- [4] Qi, X., Berzigotti, A., Cardenas, A. and Sarin, S.K. (2018) Emerging Non-Invasive Approaches for Diagnosis and Monitoring of Portal Hypertension. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, **3**, 708-719. [https://doi.org/10.1016/s2468-1253\(18\)30232-2](https://doi.org/10.1016/s2468-1253(18)30232-2)
 - [5] Berzigotti, A. (2017) Non-Invasive Evaluation of Portal Hypertension Using Ultrasound Elastography. *Journal of Hepatology*, **67**, 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2017.02.003>
 - [6] Nelson, R., Lovett, K., Chezmar, J., Moyers, J., Torres, W., Murphy, F., et al. (1987) Comparison of Pulsed Doppler Sonography and Angiography in Patients with Portal Hypertension. *American Journal of Roentgenology*, **149**, 77-81. <https://doi.org/10.2214/ajr.149.1.77>
 - [7] Liao, C., Chen, M., Yu, C., Tsang, L.L., Chen, C., Hsu, H., et al. (2022) Non-Contrast-Enhanced and Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Angiography in Living Donor Liver Vascular Anatomy. *Diagnostics*, **12**, Article 498. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020498>
 - [8] Stankovic, Z. (2016) Four-Dimensional Flow Magnetic Resonance Imaging in Cirrhosis. *World Journal of Gastroenterology*, **22**, 89-102. <https://doi.org/10.3748/wjg.v22.i1.89>
 - [9] Thalheimer, U., Leandro, G., Samonakis, D.N., Triantos, C.K., Patch, D. and Burroughs, A.K. (2005) Assessment of the Agreement between Wedge Hepatic Vein Pressure and Portal Vein Pressure in Cirrhotic Patients. *Digestive and Liver Disease*, **37**, 601-608. <https://doi.org/10.1016/j.dld.2005.02.009>
 - [10] Min, J.K., Leipsic, J., Pencina, M.J., Berman, D.S., Koo, B., van Mieghem, C., et al. (2012) Diagnostic Accuracy of Fractional Flow Reserve from Anatomic CT Angiography. *JAMA*, **308**, 1237-1245. <https://doi.org/10.1001/2012.jama.11274>
 - [11] Lu, M.T., Ferencik, M., Roberts, R.S., Lee, K.L., Ivanov, A., Adami, E., et al. (2017) Noninvasive FFR Derived from Coronary CT Angiography: Management and Outcomes in the PROMISE Trial. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **10**, 1350-1358. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.11.024>
 - [12] Xiong, Z., Yan, Y., Wang, X., Liu, Z., Luo, X. and Zheng, T. (2023) The Effect of Splenic Vein Diameter on the Diagnosis of Portal Vein Thrombosis. *Medical Physics*, **50**, 6614-6623. <https://doi.org/10.1002/mp.16481>
 - [13] Park, S., Yoon, K., Ko, Y.B. and Suh, D.C. (2013) Computational Fluid Dynamics of Intracranial and Extracranial Arteries Using 3-Dimensional Angiography: Technical Considerations with Physician's Point of View. *Neurointervention*, **8**, 92-100. <https://doi.org/10.5469/neuroint.2013.8.2.92>
 - [14] Botar, C.C., Vasile, T., Sfrangeu, S., Clichici, S., Agachi, P.S., Badea, R., et al. (2009) CFD Simulation of the Portal Vein Blood Flow. In: Vlad, S., Ciupa, R.V. and Nicu, A.I., Eds., *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology*, Springer, 359-362. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04292-8_79
 - [15] Botar, C.C., Vasile, T., Sfrangeu, S., Clichici, S., Agachi, P.S., Badea, R., et al. (2010) Validation of CFD Simulation Results in Case of Portal Vein Blood Flow. *Computer Aided Chemical Engineering*, **28**, 205-210. [https://doi.org/10.1016/s1570-7946\(10\)28035-5](https://doi.org/10.1016/s1570-7946(10)28035-5)
 - [16] Botar-Jid, C.C., Agachi, P.S. and Clichici, S. (2009) Computational Fluid Dynamics Applied to Study the Hemodynamics in Sangvin Vessels. Case Study—The Portal System. *Computer Aided Chemical Engineering*, **26**, 677-682. [https://doi.org/10.1016/s1570-7946\(09\)70113-0](https://doi.org/10.1016/s1570-7946(09)70113-0)
 - [17] Moon, J.Y., Suh, D.C., Lee, Y.S., Kim, Y.W. and Lee, J.S. (2014) Considerations of Blood Properties, Outlet Boundary Conditions and Energy Loss Approaches in Computational Fluid Dynamics Modeling. *Neurointervention*, **9**, 1-8. <https://doi.org/10.5469/neuroint.2014.9.1.1>
 - [18] Lou, Z. and Yang, W. (1993) A Computer Simulation of the Non-Newtonian Blood Flow at the Aortic Bifurcation. *Journal of Biomechanics*, **26**, 37-49. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(93\)90611-h](https://doi.org/10.1016/0021-9290(93)90611-h)
 - [19] Ho, H., Bartlett, A. and Hunter, P. (2012) Non-Newtonian Blood Flow Analysis for the Portal Vein Based on a CT Image. In: Yoshida, H., Hawkes, D. and Vannier, M.W., Eds., *Abdominal Imaging. Computational and Clinical Applications*, Springer, 283-291. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33612-6_30
 - [20] Xie, C., Sun, S., Huang, H., Li, X., Qu, W. and Song, H. (2024) A Hemodynamic Study of the Relationship between the Left and Right Liver Volumes and the Blood Flow Distribution in Portal Vein Branches. *Medical Physics*, **51**, 6501-6512. <https://doi.org/10.1002/mp.17184>
 - [21] Iwakiri, Y. (2011) Endothelial Dysfunction in the Regulation of Cirrhosis and Portal Hypertension. *Liver International*, **32**, 199-213. <https://doi.org/10.1111/j.1478-3231.2011.02579.x>
 - [22] Hennenberg, M., Trebicka, J., Sauerbruch, T. and Heller, J. (2008) Mechanisms of Extrahepatic Vasodilation in Portal Hypertension. *Gut*, **57**, 1300-1314. <https://doi.org/10.1136/gut.2007.144584>
 - [23] George, S.M., Eckert, L.M., Martin, D.R. and Giddens, D.P. (2014) Hemodynamics in Normal and Diseased Livers: Application of Image-Based Computational Models. *Cardiovascular Engineering and Technology*, **6**, 80-91.

- <https://doi.org/10.1007/s13239-014-0195-5>
- [24] Qi, X., An, W., Liu, F., Qi, R., Wang, L., Liu, Y., *et al.* (2019) Virtual Hepatic Venous Pressure Gradient with CT Angiography (CHESS 1601): A Prospective Multicenter Study for the Noninvasive Diagnosis of Portal Hypertension. *Radiology*, **290**, 370-377. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018180425>
 - [25] Tripathi, D., Stanley, A.J., Hayes, P.C., Travis, S., Armstrong, M.J., Tsochatzis, E.A., *et al.* (2020) Transjugular Intrahepatic Portosystemic Stent-Shunt in the Management of Portal Hypertension. *Gut*, **69**, 1173-1192. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-320221>
 - [26] Patel, R.K., Chandel, K., Tripathy, T.P. and Mukund, A. (2021) Complications of Transjugular Intrahepatic Portosystemic Shunt (TIPS) in the Era of the Stent Graft—What the Interventionists Need to Know? *European Journal of Radiology*, **144**, Article ID: 109986. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109986>
 - [27] Yin, K., Wang, X. and Zheng, T. (2022) Computational Hemodynamic Analysis for Optimal Stent Position in the Transjugular Intrahepatic Portosystemic Shunt Procedure. *Journal of Biomechanics*, **143**, Article ID: 111303. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111303>
 - [28] Riedel, C., Hoffmann, M., Ismahil, M., Lenz, A., Piecha, F., Ristow, I., *et al.* (2024) Four-Dimensional Flow MRI-Based Computational Fluid Dynamics Simulation for Noninvasive Portosystemic Pressure Gradient Assessment in Patients with Cirrhosis and Transjugular Intrahepatic Portosystemic Shunt. *Radiology*, **313**, e232989. <https://doi.org/10.1148/radiol.232989>
 - [29] Huang, L., Yu, Q. and Wang, J. (2018) Association between Changes in Splanchnic Hemodynamics and Risk Factors of Portal Venous System Thrombosis after Splenectomy with Perisphagogastric Devascularization. *Medical Science Monitor*, **24**, 4355-4362. <https://doi.org/10.12659/msm.909403>
 - [30] Wang, T., Liang, F., Song, G., Guan, J. and Zhou, Z. (2022) Predicting the Risk of Postsplenectomy Thrombosis in Patients with Portal Hypertension Using Computational Hemodynamics Models: A Proof-Of-Concept Study. *Clinical Biomechanics*, **98**, Article ID: 105717. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105717>
 - [31] Rutkowski, D.R., Reeder, S.B., Fernandez, L.A. and Roldán-Alzate, A. (2017) Surgical Planning for Living Donor Liver Transplant Using 4D Flow MRI, Computational Fluid Dynamics and *in Vitro* Experiments. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, **6**, 545-555. <https://doi.org/10.1080/21681163.2017.1278619>
 - [32] Olthoff, K.M., Emond, J.C., Shearon, T.H., Everson, G., Baker, T.B., Fisher, R.A., *et al.* (2014) Liver Regeneration after Living Donor Transplantation: Adult-to-Adult Living Donor Liver Transplantation Cohort Study. *Liver Transplantation*, **21**, 79-88. <https://doi.org/10.1002/lt.23966>