

İNSAN KALBI MODELLEMESİ: BIYOMEDİKAL VE HESAPLAMALI YAKLAŞIMLAR

Biyomedikal Mühendisliği ve Hesaplamalı Bilimler Grubu

Özet

İnsan kalbi, karmaşık elektromekanik yapısı ve dinamik sıvı hareketleri ile modellenmesi en zorlu organlardan biridir. Günümüzde "Human Heart Model" (İnsan Kalbi Modeli) çalışmaları; anatomik doğruluk, elektrofizyolojik simülasyon ve akışkanlar mekaniği (hemodinamik) entegrasyonu sayesinde tıp dünyasında devrim yaratmaktadır. Bu makalede, modern kalp modellerinin temel bileşenleri, kullanılan matematiksel yaklaşımlar ve bu modellerin klinik/cerrahi süreçlerdeki uygulama alanları incelenmektedir.

1. Giriş

İnsan kalbi, vücudun hayati fonksiyonlarını sürdürmesi için durmaksızın çalışan dört odacıklı, karmaşık bir kas pompasıdır. Kalp hastalıkları, dünya genelinde önde gelen ölüm nedenleri arasında yer almaya devam etmektedir. Geleneksel tanı ve tedavi yöntemlerinin sınırlarını aşmak adına, bilgisayar tabanlı (in silico) kalp modelleri geliştirilmeye başlanmıştır. Gelişmiş görüntüleme tekniklerinden (MR, BT) elde edilen veriler yardımıyla oluşturulan üç boyutlu (3B) geometrik modeller, günümüzde hücresel düzeyden organ düzeyine kadar simüle edilebilmektedir.

2. Kalp Modellemesinin Çoklu Fizik (Multi-physics) Yapısı

Doğru bir insan kalbi modeli, yalnızca organın şeklini değil, aynı zamanda aynı anda gerçekleşen birden fazla fiziksel fenomeni de barındırmalıdır. Bu durum genel olarak üç ana başlıkta incelenir:

Anatomik ve Geometrik Modelleme: Hastaya özel tomografi veya rezonans görüntülerinin segmentasyon yöntemleriyle dijital ortama aktarılması aşamasıdır. Burada doku liflerinin (fiber oryantasyonu) yönü, kalbin kasılma gücünü doğrudan etkilediği için matematiksel tensör alanlarıyla modele işlenir.

Elektrofizyolojik Simülasyon: Kalbin elektriksel uyarı sinyallerinin yayılımı modellenir. Hücresel seviyede iyon kanallarının hareketi, hücre zarı potansiyeli değişimleri makroskopik boyutta "Monodomain" veya "Bidomain" diferansiyel denklemleriyle çözülür. Örneğin, doku düzeyindeki elektriksel yayılım dalgası şu temel denklemle ifade edilebilir:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V_m) = A_m (C_m \partial V_m / \partial t + I_{ion})$$

Burada V_m hücre zarı potansiyelini, σ iletkenlik tensörünü, C_m membran kapasitansını ve I_{ion} ise iyonik akımları temsil etmektedir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Mekanik: Kanın odacıklar içindeki hareketi ve kapakçıklara uyguladığı hidrodinamik kuvvetler, Navier-Stokes denklemleri kullanılarak simüle edilir. Kalp duvarının esnek yapısı ile kanın etkileşimi ise Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) algoritmaları ile çözülür.

Tablo 1: Kalp Modellemesinde Kullanılan Temel Metotlar ve Amaçları

Modelleme Alanı	Kullanılan Matematiksel / Sayısal Yöntem	Klinik Çıktı ve Amaç
Elektrofizyoloji	Bidomain Denklemleri & Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	Aritmi tespiti, ablasyon planlaması
Hemodinamik	Navier-Stokes Simülasyonları (CFD)	Kapakçık yetmezliği, şah damarı ve aort akış analizi
Biyomekanik	Hiperelastik Malzeme Modelleri (Guccione Modeli)	Kalp yetmezliği sonrası doku gerilme analizleri

3. Klinik Uygulamalar ve Gelecek Projeksiyonu

Geliştirilen insan kalbi modelleri, günümüzde "Dijital İkiz" (Digital Twin) konsepti altında hastalara özel olarak uyarlanmaktadır. Cerrahlar, riskli bir operasyona girmeden önce hastanın birebir kalbinin sanal kopyası üzerinde simülasyonlar yaparak en doğru stratejiyi belirleyebilmektedir. Ayrıca yeni geliştirilen kalp ilaçlarının yan etkileri ve kardiyotoksik riskleri, laboratuvar ortamına geçilmeden önce bu dijital modeller üzerinde test edilerek ilaç geliştirme süreçleri hızlandırılmaktadır.

4. Sonuç

İnsan kalbi modelleri, tıp ve mühendislik bilimlerinin kesişim noktasında yer alan en inovatif alanlardan biridir. Hesaplama gücünün artması ve yapay zeka entegrasyonu sayesinde, gelecekte gerçek zamanlı çalışan ve hastanın anlık verileriyle güncellenen dinamik kalp modellerinin rutin klinik muayenelerin bir parçası haline gelmesi öngörülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Quarteroni, A., Dede', L., Manzoni, A., & Vergara, C. (2019). Mathematical modelling of the human heart. Acta Numerica, 28, 523-710.
- [2] Trayanova, N. A. (2011). Whole-heart modeling: applications to cardiac electrophysiology and electromechanics. Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine, 3(3), 279-289.