

Artificial intelligence and machine learning for texture and sensory optimization in plant-based meat analogs: A review

Kamile Bayrak Akay^{1*}

¹Harran University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, 63300, Şanlıurfa, Türkiye

Abstract

In the production of plant-based meat analogs, mimicking the characteristic texture (toughness, elasticity, fibrous structure) and sensory properties of real meat is a critical technological challenge in food science. Traditional formulation development and extrusion processes are often based on time-consuming, resource-intensive, and costly trial-and-error methods. The aim of this systematic review is to evaluate the optimization potential of artificial intelligence and machine learning algorithms in plant-based meat design and to highlight the advantages they offer compared to traditional methods (e.g., Response Surface Methodology). A review of the current literature shows that machine learning models successfully model the complex and nonlinear relationships between input components and the textural quality of the final product. Neural networks such as decision tree-based algorithms (Random Forest, XGBoost) and Multilayer Perceptrons have been found to provide very high accuracy in texture and rheology prediction. In particular, Multi-Objective Bayesian Optimization has proven to significantly reduce the number of experimental trials required to achieve the target tissue profile compared to traditional methods, maximizing process efficiency. Furthermore, the integration of these algorithms with non-destructive "Green Analytics" tools such as hyperspectral imaging and electronic nose (e-nose) has been shown to support environmental sustainability by reducing sample waste and chemical waste by up to 90%. Consequently, the integration of artificial intelligence and machine learning goes beyond traditional input-to-output approaches in plant-based meat production, enabling the "Inverse Design" vision where the targeted tissue is rationally constructed directly using algorithms. This allows for the much faster development of innovative food formulations that increase resource efficiency and meet consumer expectations.

Keywords: Plant-Based Meat Analogs, Artificial Intelligence, Machine Learning, Tissue Optimization, Reverse Design.

Bitkisel bazlı et analoglarında doku ve duyuşal optimizasyon için yapay zeka ve makine öğrenimi: Bir inceleme

Özet

Bitkisel bazlı et analoglarının üretiminde, gerçek etin karakteristik dokusunu (sertlik, esneklik, lifli yapı) ve duyuşal özelliklerini taklit etmek, gıda biliminde kritik bir teknolojik zorluktur. Geleneksel formülasyon geliştirme ve ekstrüzyon süreçleri genellikle zaman alıcı, kaynak yoğun ve maliyetli deneme-yanılma yöntemlerine dayanmaktadır. Bu incelemenin amacı, bitkisel bazlı et tasarımında yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarının optimizasyon potansiyelini değerlendirmek ve geleneksel yöntemlere (örneğin, Yanıt Yüzey Metodolojisi) kıyasla sundukları avantajları vurgulamaktır. Mevcut literatürün incelenmesi, makine öğrenmesi modellerinin girdi bileşenleri ile nihai ürünün dokusal kalitesi arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla modellediğini göstermektedir. Karar ağacı tabanlı algoritmalar (Random Forest, XGBoost) ve Çok Katmanlı Algılayıcılar gibi sinir ağlarının, doku ve reoloji tahmininde çok yüksek doğruluk sağladığı bulunmuştur. Özellikle, Çok Amaçlı Bayes Optimizasyonu, geleneksel yöntemlere kıyasla hedef doku profilini elde etmek için gereken deneysel deneme sayısını önemli ölçüde azaltarak süreç verimliliğini en üst düzeye çıkarmıştır. Dahası, bu algoritmaların hiperspektral görüntüleme ve elektronik burun (e-burun) gibi tahribatsız "Yeşil Analiz" araçlarıyla entegrasyonunun, numune atığını ve kimyasal atığı %90'a kadar azaltarak çevresel sürdürülebilirliği desteklediği gösterilmiştir. Sonuç olarak, yapay zeka ve makine öğreniminin entegrasyonu, bitki bazlı et üretiminde geleneksel girdi-çıkı yaklaşımlarının ötesine geçerek, hedef dokunun algoritmalar kullanılarak doğrudan rasyonel bir şekilde oluşturulduğu "Ters Tasarım" vizyonunu mümkün kılmaktadır. Bu, kaynak verimliliğini artıran ve tüketici beklentilerini karşılayan yenilikçi gıda formülasyonlarının çok daha hızlı geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bitki Bazlı Et Analogları, Yapay Zeka, Makine Öğrenimi, Doku Optimizasyonu, Ters Tasarım.

