



Bu makaleye şu şekilde atıf yapılır: Yücel, H.ve Ekinci, K. (2025). Python Tabanlı Bulanık Mantık Modeli ile Rumen Fungal Ksilanaz Enzim Aktivitesinin Tahmini: Mikrobiyal Üretim Koşullarının Analizi, Mantar Dergisi, 16(1)71-80.

Geliş(Received) :12.02.2025

Kabul(Accepted) :23.04.2025

Araştırma Makalesi

Doi: 10.30708/mantar.1638343

Python Tabanlı Bulanık Mantık Modeli ile Rumen Fungal Ksilanaz Enzim Aktivitesinin Tahmini: Mikrobiyal Üretim Koşullarının Analizi

Halit YÜCEL¹, Kübra EKİNCİ^{2*}

*Sorumlu yazar: kubraekinci@atauni.edu.tr

¹ Zootehni Bölümü, Ziraat Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye/ halit_ksu@hotmail.com 

² Zootehni Bölümü, Ziraat Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye / kubraekinci@atauni.edu.tr 

Öz: Rumen fungal enzim ailesine ait olan ksilanaz enzimi, lignoselülozik yapının parçalanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, bu enzim günümüzde çeşitli canlı gruplarından izole edilerek endüstriyel alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak enzim aktivitesinin çevresel koşullara duyarlılığı, optimum üretim ve uygulama koşullarının belirlenmesini zorlaştırmakta ve bu noktada hesaplamalı yaklaşımlara olan ihtiyaç artmaktadır. Bu çalışmada, ksilanaz enziminin aktivitesini tahmin etmek ve modellemek amacıyla yapay zekâ destekli bir yaklaşım benimsenmiş; bu bağlamda, veri analizi ve algoritmik modelleme açısından geniş olanaklar sunan Python programlama dili tercih edilmiştir. Çalışmada progama dilinin ayrıntılı bir şekilde verilmesi başka bir ifade ile verilen komutların görevlerinin açıklanması gelecekte yapılacak olan rumen mikrobiyal temmelli enzim analizlerinin daha iyi bir şekilde anlaşılması hedeflenmiştir. Python'un bilimsel hesaplamalara yönelik güçlü kütüphaneleri (örneğin NumPy, Pandas, Scikit-Fuzzy, Matplotlib) aracılığıyla, biyolojik sistemlerin belirsiz ve doğrusal olmayan doğasını modellemeye elverişli bir yöntem olan bulanık mantık yaklaşımı uygulanmıştır. Modelleme sürecinde, ksilanaz enziminin aktivitesini etkileyen temel çevresel parametreler olarak sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyonu seçilmiştir. Bu değişkenler, klasik keskin sınırlarla tanımlanmak yerine, bulanık kümeler aracılığıyla "düşük", "orta" ve "yüksek" olarak sınıflandırılmıştır. Belirlenen üyelik fonksiyonları yardımıyla, sistemin bu parametrelere karşı verdiği tepkiler bulanık mantık kuralları doğrultusunda analiz edilmiştir. Böylece, yalnızca optimum koşulları değil, aynı zamanda sınır koşullarındaki varyasyonları da değerlendirebilen esnek bir model ortaya konmuştur. Sonuç olarak, Python destekli bulanık mantık modeli sayesinde, ksilanaz enziminin farklı çevresel koşullardaki aktivite düzeyleri başarıyla öngörülmüş; bu enzimin optimal etkinlik gösterdiği pH aralığının 5.5-6.5, sıcaklık aralığının 50-60 °C ve substrat konsantrasyonunun yaklaşık 5 U/mL aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında bulanık mantığın, mikrobiyal enzim üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve optimizasyonunda alternatif bir yol olarak kullanılabileceği önerilmiştir. Elde edilen bulgular, biyoteknolojik süreçlerin modellenmesinde bulanık mantığın, özellikle biyolojik verilerin doğasında bulunan belirsizlikleri anlamlandırma noktasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Ksilanaz, Python, Fuzzy, Bulanık Mantık, *Neocallimastix*



CC BY 4.0 Uluslararası Lisansı altında lisanslanmıştır / Licensed under the CC BY 4.0 International License. Atıflamada APA stili kullanılmıştır, iThenticate ile taranmıştır./ APA style was used in citation, plagiarism was checked with iThenticate.

Prediction of Rumen Fungal Xylanase Enzyme Activity with Python Based Fuzzy Logic Model: Analysis of Microbial Production Conditions

Abstract: The xylanase enzyme, belonging to the rumen fungal enzyme family, plays a crucial role in the degradation of lignocellulosic structures. Moreover, this enzyme has been effectively utilized in various industrial applications after being isolated from a wide range of organisms. However, the sensitivity of enzyme activity to environmental conditions complicates the determination of optimal production and application parameters, thereby increasing the need for computational approaches. In this study, an artificial intelligence-assisted approach was adopted to predict and model the activity of xylanase. In this study, it was aimed to give the programming language in a differentiated way, in other words, to explain the tasks of the commands given in order to better understand the rumen microbial based enzyme analyses to be performed in the future. In this context, the Python programming language was selected due to its extensive capabilities in data analysis and algorithmic modeling. Through the use of Python's powerful scientific libraries (such as NumPy, Pandas, Scikit-Fuzzy, and Matplotlib), a fuzzy logic method—well-suited to modeling the uncertain and nonlinear nature of biological systems—was implemented. During the modeling process, temperature, pH, and substrate concentration were selected as the key environmental parameters affecting xylanase activity. Instead of being defined with traditional sharp boundaries, these variables were classified into "low", "medium", and "high" categories using fuzzy sets. With the help of predefined membership functions, the system's responses to these parameters were analyzed through fuzzy logic rules. In this way, a flexible model capable of evaluating not only the optimal conditions but also variations under boundary conditions was developed. As a result, the Python-based fuzzy logic model successfully predicted the activity levels of xylanase under different environmental conditions. It was determined that the enzyme exhibited optimal activity within the pH range of 5.5–6.5, the temperature range of 50–60 °C, and at a substrate concentration of approximately 5 U/mL. When compared with the literature, these findings suggest that fuzzy logic can serve as an alternative method in the digitalization and optimization of microbial enzyme production processes. In conclusion, the fuzzy logic approach supported by Python demonstrates significant potential in modeling biotechnological processes, particularly in interpreting the uncertainties inherent in biological data. This study thus provides a valuable reference for future computational modeling applications in enzyme technology and bioprocess engineering.

Keywords: Xylanase, Python, Fuzzy, Fuzzy Logic, *Neocallimastix*

Giriş

Rumen içerisindeki metabolik süreçler, geviş getiren hayvanların beslenmesinde hayati bir rol oynamakta olup, bu süreçler aracılığıyla konakçı organizmaya enerji ve temel besin maddeleri sağlanmaktadır. Yem bitkilerinin hücre duvarları, bitkinin türüne ve gelişim evresine bağlı olarak değişen oranlarda selüloz, hemiselüloz, pektin, lignin gibi yapısal karbonhidratlar ve mineraller içermektedir (Jung & Casler, 2006). Bu yapısal bileşenlerin geviş getiren hayvanlar tarafından sindirilebilmesi, büyük ölçüde rumende yer alan mikrobiyal toplulukların ürettiği enzimlerin eşzamanlı ve sinerjik faaliyetlerine bağlıdır (Wang & McAllister, 2002). Ancak, ruminantların bu yapıların parçalanmasındaki fizyolojik kapasitesi sınırlı olup, ideal koşullarda dahi bu verimliliğin %65'in altında kaldığı bildirilmektedir. Bu nedenle, rumen mikrobiyotası, ruminant beslenmesi üzerine yapılan araştırmalarda öncelikli bir odak alanı haline gelmiştir.

Rumen mikrobiyotası; bakteriler, protozoalar, arkeler, funguslar ve virüsler gibi farklı mikrobiyal

gruplardan oluşan karmaşık bir ekosistemdir. Bu mikrobiyal topluluk içerisinde yer alan anaerobik funguslar, geviş getiren hayvanların gastrointestinal sisteminde komensal olarak bulunmakta ve özellikle ön mide bölgelerinde yoğun olarak yerleşmektedir (Jung ve Casler, 2006). Anaerobik funguslar, karbonhidrat aktif enzimleri (CAZymes) olarak bilinen geniş enzim repertuarları aracılığıyla lignoselülozik bitki materyallerinin etkin bir şekilde parçalanmasına katkı sağlarlar. Bu enzimler, selülozom adı verilen kompleks protein yapılarına entegre olur ve rizoidal uzantılar vasıtasıyla bitki hücre duvarlarına fiziksel olarak nüfuz ederek lif sindirime doğrudan etki ederler (Papa ve ark., 2012; Cai ve ark., 2010). Bitki hücre duvarlarının yapısında bulunan lignoselülozik biyokütle, bileşimindeki yapısal heterojenlik nedeniyle çok sayıda enzimin koordineli işlevini gerektiren karmaşık bir matristir. Bu yapı içerisinde önemli bir yer tutan ksilan, hemiselülozun temel bileşeni olup, doğada selülozdan sonra en yaygın ikinci polisakkarit olarak kabul edilmektedir. Ksilan, toplam biyokütlenin yaklaşık %20–30'unu oluşturarak

lignoselülozik materyallerin yapısal bütünlüğünde belirleyici bir rol üstlenmektedir (Çalışkan ve ark., 2014).

Rumen mikrobiyotası tarafından üretilen ksilanaz enzimleri, lignoselülozik substratların parçalanmasında anahtar rol oynamakta ve bu süreçlerin etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Zhang ve ark., 2024). Ksilanaz (EC 3.2.1.8), ksilan polimerindeki β -1,4-glikozidik bağları kırarak ksiloz ve düşük moleküler ağırlıklı ksilo-oligosakkaritlere dönüştüren bir glikozid hidrolazdır (Dos Santos ve ark., 2018). Bu yönüyle ksilanaz, hemiselülozun yıkımında temel enzim olarak öne çıkmakta; ayrıca lignoselülozik yapıların içine entegre edilmesiyle selüloza erişimi kolaylaştırarak selülozların hidrolitik etkinliğini de artırmaktadır (Hu ve ark., 2011).

Ksilanaz enziminin doğada geniş bir dağılıma sahip olması, endüstriyel kullanım potansiyelini de beraberinde getirmiştir. Gıda, tekstil, kâğıt ve biyoyakıt endüstrileri başta olmak üzere, pek çok sektörde ksilanazın kullanımı yaygınlaşmakta ve her geçen gün farklı özellikler gösteren yeni enzim izolatları keşfedilerek ticari değeri artırılmaktadır. Bu bağlamda, çevresel örneklerden ksilanaz pozitif mikroorganizmaların taranması, lignoselülozik materyaller üzerinde aktivitelerinin test edilmesi ve seçilen mikroorganizmaya ait ksilanazın kısmi karakterizasyonu, uygulamalı mikrobiyoloji açısından büyük önem arz etmektedir (Kocabaş ve ark., 2017).

Yapısal olarak, ksilanlar en basit haliyle, β -1,4-glikozidik bağlarla bağlanmış D-ksiloz monomerlerinden oluşan lineer homopolimerlerdir (Motta ve ark., 2013). Ksilanazlar ise, bu polimerlerin hidrolitik yıkımını katalize eden enzimler olup; kâğıt üretiminde hamurun ağartılması, hayvan yemlerinin sindirilebilirliğinin artırılması ve meyve sularının berraklaştırılması gibi birçok spesifik endüstriyel uygulamada yer bulmaktadır. Ayrıca, kahve, bitkisel yağ ve nişasta özütlerinin elde edilmesi gibi işlemlerde de kullanılmakta, tarımsal silaj ve tahıl yemlerinin besin değerlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ksilanın enzimatik olarak parçalanması sonucunda elde edilen ksiloz, ksilobioz ve ksilo-oligomerler gibi şekerler, fermentatif biyoteknolojide önemli ara ürünler olup, lignoselülozların fermente edilebilir şekerlere biyolojik dönüşümü ekonomik açıdan yüksek öneme sahiptir (Butt ve ark., 2008).

Bulanık mantık (FL), kümeler teorisi çerçevesinde geliştirilmiş ve ilk defa Kaliforniya Üniversitesi bilgisayar bilimleri profesörü Lotfi Zadeh tarafından (1965) ortaya atılmıştır. Bu mantık, belirsiz veya kesin olmayan ifadelerle mantıksal akıl yürütmeyi modellemek için tasarlanmıştır (Cintula ve ark., 2016). Temelde, bulanık mantık, doğru/yanlış, evet/hayır, yüksek/düşük gibi geleneksel değerlendirmelerin ötesinde ara değerlerin tanımlanmasına olanak tanır. Uzun veya hızlı gibi kavramlar matematiksel olarak formüle edilebilir ve

bilgisayarlar tarafından işlenebilir hale gelir, böylece insan benzeri düşünme biçimleri bilgisayar programlamasında uygulanabilir (Zadeh, 1984).

Bulanık mantık, bilgisayar bilimleri (Daradkeh & Tvoroshenko, 2020; Thakkar ve ark., 2023; Balovsyak ve ark., 2024), mühendislik (Ross, 2005; Fayek, 2020; Abdoli, 2022; Siqueira ve ark., 2024), matematik (Sharma & Obaid, 2020; Siddique & Biswas, 2024), fizik ve astronomi (Shamir & Nemiroff, 2005; Pawlicki ve ark., 2023; Helmy ve ark., 2024; Cruz, 2024), biyokimya, genetik ve moleküler biyoloji (Saha ve ark., 2012; Nobile ve ark., 2020; Mathur & Singh, 2023), tarım ve biyolojik bilimler (Abu & Yacob, 2013; Kurniasih ve ark., 2018; Meena ve Agilandeewari, 2020; Osman & Salim, 2021; Putra & Nopriadi, 2022; Nazareno ve ark., 2024), sağlık (Jayalakshmi ve ark., 2021; Mittal ve ark., 2023; Suzuki ve Negishi, 2024) gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Python, geniş bir uygulama alanına sahip olan ve yorumlayıcı tabanlı, yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Esnekliği, kullanım kolaylığı ve çok yönlülüğü ile dikkat çeker. Python, veri analizi gibi karmaşık problemlere yönelik algoritmaların çözülmesinde kullanılabilir ve aynı zamanda çok sayıda kütüphane ile bilimsel hesaplamalar için güçlü bir araçtır (Sanner, 1999; Sharma ve ark., 2020). Python, yorumlanan, etkileşimli ve nesne yönelimli bir dil olarak, ticari kullanım için ücretsizdir ve neredeyse her modern bilgisayar ortamında çalıştırılabilir. Bu dil, veri analizi ve bilimsel hesaplamalarda daha az kod ile daha fazla iş yapma imkânı sunar.

Bu çalışmanın amacı, yapay zekâ destekli bulanık mantık yöntemi kullanılarak rumen fungal enzimlerinden biri olan Ksilanaz enziminin *Neocallimastix* sp. baz alınarak optimum çalışma koşullarını tahmin etmek ve bu koşulları optimize etmektir.

Materyal ve Metot

Bulanık mantık denetleyicisinin kararı, veritabanında önceden depolanmış veriler kullanılarak verilir (Raja ve ark., 2023). Rumen fungal enzimleri arasında oldukça önemli bir görevi olan ksilanaz enzimin bulanık mantık modellemesi gerçekleştirilmiş ve bu modelleme yapılırken hem biyoinformatik hem de Bulanık Mantık Yazılımı için Python programlama dili ile scikit-fuzzy kütüphanesi tercih edilmiştir (Spolaor ve ark., 2020). Bu bağlamda, *Neocallimastix* sp. 'ye ait ksilanaz enzim aktivitesini etkileyen çevresel faktörler arasında üç ana parametre seçilmiştir. Bu parametreler, sırasıyla sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), pH ve substrat konsantrasyonu (mg/mL) olarak belirlenmiştir (Pant ve ark., 2024). Bu çalışmanın modellemesinde bulanık mantık sistemi için girdi değişkenleri olarak sıcaklık, pH ve substrat

konsantrasyonları tercih edilmiştir. Çıkış değişkeni olarak Enzim aktivitesi U/mg cinsinden değerlendirilmiştir. Üyelik fonksiyonu olarak sıcaklık için düşük, orta, yüksek, pH için asidik, nötr ve bazik, substrat konsantrasyonu için düşük, orta, yüksek ve aktivite olarak ise düşük orta yüksek olarak değerlendirilmiştir. Girdi değişkenleri (sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyonu) ve çıkış değişkeni (enzim

aktivitesi) arasındaki ilişkileri göstermektedir (Tablo 1, Hellmann, 2001). Kural tabanı yönünden KURAL 1 olarak eğer sıcaklık orta, pH nötr ve substrat konsantrasyonu orta ise enzim aktivitesi yüksek. KURAL 2 ise eğer sıcaklık yüksek, pH bazik ve konsantrasyon düşük olursa aktivite orta olarak kural tabanları belirtilmiştir.

Tablo 1. Bulanık mantık sistemine dayalı olarak girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişki

Sıcaklık	pH	Substrat Konsantrasyonu	Enzim Aktivitesi
Düşük	Asidik	Düşük	Düşük
Düşük	Asidik	Orta	Orta
Düşük	Asidik	Yüksek	Yüksek
Düşük	Nötr	Düşük	Düşük
Düşük	Nötr	Orta	Orta
Düşük	Nötr	Yüksek	Yüksek
Düşük	Bazik	Düşük	Düşük
Düşük	Bazik	Orta	Orta
Düşük	Bazik	Yüksek	Yüksek
Orta	Asidik	Düşük	Düşük
Orta	Asidik	Orta	Orta
Orta	Asidik	Yüksek	Yüksek
Orta	Nötr	Düşük	Düşük
Orta	Nötr	Orta	Yüksek
Orta	Nötr	Yüksek	Yüksek
Orta	Bazik	Düşük	Orta
Orta	Bazik	Orta	Yüksek
Orta	Bazik	Yüksek	Yüksek
Yüksek	Asidik	Düşük	Düşük
Yüksek	Asidik	Orta	Orta
Yüksek	Asidik	Yüksek	Yüksek
Yüksek	Nötr	Düşük	Düşük
Yüksek	Nötr	Orta	Orta
Yüksek	Nötr	Yüksek	Yüksek
Yüksek	Bazik	Düşük	Orta
Yüksek	Bazik	Orta	Orta
Yüksek	Bazik	Yüksek	Yüksek

Oluşturulan modelleme sonucu veri değerlendirilmesi için grafik temelli bir çıktı elde edilmiştir. Python programlama dilinde kütüphanelerin import edilmesi için gerekli komut satırı şekil 1 de gösterildiği gibi colab veri tabanına girişi yapılmıştır.

Python veri girişi sırasında matematiksel hesaplama ve dizileme için 'numpy' (Harris ve ark., 2020; Gilmiyarov ve ark., 2023), bulanık modellemesi için 'skfuzzy' veri kütüphanesine erişim için 'scikit-fuzzy' (Samsingh ve ark., 2021), veri çıktıların grafik olarak değerlendirilmesi için 'matplotlib' komut satırı kullanılmıştır (Cao ve ark., 2021; May ve ark., 2022).

```
try:
    import skfuzzy as fuzz
    from skfuzzy import control as ctrl
    import matplotlib.pyplot as plt
except ModuleNotFoundError:
    !pip install scikit-fuzzy matplotlib
    import skfuzzy as fuzz
    from skfuzzy import control as ctrl
    import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np

# Girdi değişkenleri
```

Şekil 1. Colab veri tabanına kütüphane import giriş kodları

Giriş ve Çıkış değişkenlerinin değerlendirilmesi veya tanımlanması Python komut satırına sırasıyla girdi değişkenlerini ifade etmek için 'Antecedent' ve çıkış değişkenleri için 'Consequent' komut satırı tercih edilmiştir (Dong ve ark., 2023; Daole ve ark., 2023). Ek olarak girdi değişkenleri olarak sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyonu tercih edilirken, çıkış değişkeni ise aktivite olarak U/mg cinsinden tahmini beklenmiş ve bu kodlama basamağı şekil 2'de gösterilmiştir.

Üyelik fonksiyonun tanımlanması için sıcaklık (temperature), pH ve substrat konsantrasyonu (substrate_concentration) komut satırları yazılımı

sırasında sıcaklık low (düşük), medium (orta) ve high (yüksek) olacak şekilde değerlendirilmesi için 'trimf' komut satırı girişi yapılmış (Jianling ve ark., 2023; Chuensiri ve ark., 2024) ve bu satır genel olarak veri girişinde kullanılan üç farklı üyenin fonksiyonunu tanımlamak için kullanılmıştır. Bu komut satırı her veri üyesi için tekrar yazılmıştır.

Ek olarak çıkış üyelik fonksiyonun aktivite olarak değerlendirilmesi yapılırken bu değerlendirme sıcaklık veri girişinde olduğu gibi düşük, orta ve yüksek olacak şekilde ayarlanmıştır. Komut satırı şekil 3'de gösterilmiştir

```
import numpy as np

# Girdi değişkenleri
temperature = ctrl.Antecedent(np.arange(30, 71, 1), 'Temperature')
pH = ctrl.Antecedent(np.arange(5, 10, 0.1), 'pH')
substrate_concentration = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 11, 0.1), 'Substrate Concentration')

# Çıkış değişkeni
activity = ctrl.Consequent(np.arange(0, 101, 1), 'Activity')

# Üyelik fonksiyonları
temperature['Low'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [30, 30, 50])
temperature['Medium'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [40, 50, 60])
temperature['High'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [50, 70, 70])

pH['Acidic'] = fuzz.trimf(pH.universe, [5, 5, 7])
pH['Neutral'] = fuzz.trimf(pH.universe, [6, 7, 9])
pH['Basic'] = fuzz.trimf(pH.universe, [8, 10, 10])
```

Şekil 2. Veri girdi ve çıkış değişkenlerin komut satırında gösterilmesi. Girdi değişkenleri Temperature (Sıcaklık), pH ve Substrate Concentration (Substrat konsantrasyonu) olarak ifade edilirken Activity (Aktivite) satırı ise çıkış değişkenidir

```
# Üyelik fonksiyonları
temperature['Low'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [30, 30, 50])
temperature['Medium'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [40, 50, 60])
temperature['High'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [50, 70, 70])

pH['Acidic'] = fuzz.trimf(pH.universe, [5, 5, 7])
pH['Neutral'] = fuzz.trimf(pH.universe, [6, 7, 9])
pH['Basic'] = fuzz.trimf(pH.universe, [8, 10, 10])

substrate_concentration['Low'] = fuzz.trimf(substrate_concentration.universe, [0, 0, 5])
substrate_concentration['Medium'] = fuzz.trimf(substrate_concentration.universe, [3, 5, 8])
substrate_concentration['High'] = fuzz.trimf(substrate_concentration.universe, [5, 10, 10])

activity['Low'] = fuzz.trimf(activity.universe, [0, 0, 50])
activity['Medium'] = fuzz.trimf(activity.universe, [30, 50, 70])
activity['High'] = fuzz.trimf(activity.universe, [50, 100, 100])
```

Şekil 3. Üyelik fonksiyonlarının komut satırı gösterilmiştir. Sıcaklık aralığı olarak 30°C- 70°C aralığı, pH olarak 5-10 aralığı ve substrat konsantrasyonu olarak 0-100U/mg aralığı tercih edilmiştir.

Çalışmamızda bulanık mantık modellemesi için kural tabanı oluştururken her veri seti etkisinin değerlendirilmesi için bulanık mantık kuralları tanımlanmıştır ve bu tanımlanma yapılırken 'ctrl.Rule' komut satırı kullanılmıştır. Ayrıca veri girişinde kullanılan kurallara dayalı bulanık mantık kontrol sistemi için 'ControlSystem ([rule1, rule2, rule3]) ve sistemin simülasyonu için 'ControlSystemSimulation (activity)' komut satırı girişi sonrasında (Gajare ve ark., 2021; Ma ve ark., 2024) ayrı ayrı olacak şekilde sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyon veri satırı 'activity_simulation .ln

put' giriş komutu yardımıyla kodlama yapıldıktan sonra, 'activity_simulation.compute()' komut satırı ile sistemin aktifleşmesi ve tahmini aktivitenin tespiti gerçekleştirilmiş (Htun ve ark., 2024) ve şekil 4'de komut satırları gösterilmiştir.

Bulanık mantık temelli tahmini enzim aktivitesinin ve veri girişinde kullanılan üyelik fonksiyonları sonuçlarının grafik olarak gösterilmesi için Python kodu 'activity.view' olarak tercih edilmiş (Steubing ve ark., 2020; Grum ve ark., 2021) ve şekil 5'de gösterilmiştir

```
# Kural tabanı
rules = [
    ctrl.Rule(temperature['Medium'] & pH['Neutral'] & substrate_concentration['Medium'], activity['High']),
    ctrl.Rule(temperature['High'] & pH['Basic'] & substrate_concentration['Low'], activity['Medium']),
    ctrl.Rule(temperature['Low'] & pH['Acidic'] & substrate_concentration['High'], activity['Low']),
]

# Kontrol sistemi
activity_control = ctrl.ControlSystem(rules)
activity_simulation = ctrl.ControlSystemSimulation(activity_control)

# Örnek bir veri seti
activity_simulation.input['Temperature'] = 50
activity_simulation.input['pH'] = 7
activity_simulation.input['Substrate Concentration'] = 5
activity_simulation.compute()
```

Şekil 4. Kural tabanı, Kontrol sistemi ve örnek bir veri seti oluşturma komut satırları gösterilmiştir.

```
# Örnek bir veri seti
activity_simulation.input['Temperature'] = 50
activity_simulation.input['pH'] = 7
activity_simulation.input['Substrate Concentration'] = 5
activity_simulation.compute()

# Çıktıyı görselleştirme
print(f"Predicted Activity: {activity_simulation.output['Activity']:.2f} U/mg")

activity.view(sim=activity_simulation)
plt.show()
```

Şekil 5. Veri çıktısının görselleştirilmesi ve grafik oluşturulması için kullanılan komut satırı.

Bulgular ve Tartışım

Bulanık mantık modelleme yöntemleri, deneysel veri setlerinde oluşabilecek eksik veri girişleri ya da kullanılan biyolojik materyalin etkinliği üzerindeki belirsizlik gibi çeşitli olumsuz koşullarda güvenilir veri çıktıları sunabilmektedir (Singhala ve ark., 2024). Bu bağlamda, çalışmada fungal ksilanaz enzimine ilişkin belirsiz çevresel koşullar tespit edilerek, bu enzime ait kinetik verilerin daha net bir biçimde ortaya konması hedeflenmiştir. Python tabanlı yapay zekâ destekli bir

yazılım kullanılarak geliştirilen bulanık mantık modeli sayesinde, rumen fungal kökenli ksilanaz enziminin aktivitesini etkileyen çevresel parametrelerin optimizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyonu gibi enzim aktivitesini doğrudan etkileyen temel çevresel faktörler değerlendirilmiş ve bu parametrelerin her biri için uygun üyelik fonksiyonları tanımlanarak bulanık kümeler oluşturulmuştur. Bulanık mantık kuralları doğrultusunda yapılan algoritmik

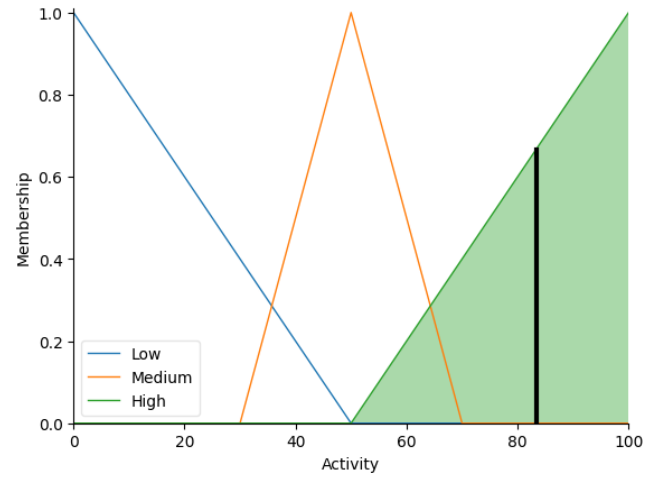
analizler sonucunda, özellikle pH ve sıcaklık değişkenleri arasında güçlü bir korelasyonun bulunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, ksilanaz enziminin optimal aktivite gösterdiği pH aralığı 5.5–6.5, sıcaklık aralığı ise 50–60 °C olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalarla yüksek oranda örtüşmektedir (Zhang ve ark., 2019; Liu ve ark., 2024; Zhu ve ark., 2020; Stabel ve ark., 2021).

Substrat konsantrasyonu açısından değerlendirildiğinde, 0–3 mg/mL aralığında ksilanaz enziminin yeterli düzeyde aktivite göstermediği, ancak substrat konsantrasyonunun 5 mg/mL seviyesine ulaştığında enzim aktivitesinin maksimum düzeye çıktığı saptanmıştır. Bu bulgu, enzimin substrat doygunluğuna ulaştıktan sonra yapılan substrat ilavelerinin enzim aktivitesini artırmadığını ortaya koymaktadır (Deng ve ark., 2017). Bu durum, enzim-substrat etkileşim dinamiklerinin belirli bir eşik değerin ötesinde sabit kaldığını ve bu sınırın bulanık mantık modelleme ile etkin bir biçimde tanımlanabileceğini göstermektedir.

Modelde kullanılan üyelik fonksiyonları ile enzim aktivite arasında farklı koşullarda pozitif korelasyonların tespit edilmesi, literatürdeki verilerle tutarlıdır ve bulanık mantık yaklaşımının biyolojik verilerdeki belirsizliklerin açıklanmasında etkin bir yöntem olduğunu desteklemektedir. Bu çalışmada, Python ortamında 'Scikit-Fuzzy' kütüphanesi aracılığıyla geliştirilen bulanık mantık modelinin, *Neocallimastix* sp. kaynaklı ksilanaz enziminin optimum çalışma koşullarını değerlendirmede etkili olduğu görülmüştür. Özellikle ortam sıcaklığının 30 °C'nin altına düştüğünde enzim aktivitesinin azaldığı; 50 °C sıcaklıkta ise optimum düzeye ulaştığı belirlenmiştir. Bu bulgu, Comlekçioğlu ve ark. (2012) tarafından yürütülen ve *Neocallimastix* sp. ile *Orpinomyces* sp. türlerinin enzim üretim kapasitelerinin karşılaştırıldığı çalışmadaki sonuçlarla da paralellik göstermektedir. Söz konusu çalışmada, farklı karbon kaynaklarının kullanıldığı fermantasyon koşullarında ksilanaz aktivitesinin 40 °C'de gerçekleştiği deneysel olarak gösterilmiştir.

Orpinomyces sp. tarafından sentezlenen ksilanaz enziminin termostabilitesini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalarda ise, bu enzimin nötral veya asidik pH koşullarında optimum aktivite gösterdiği ve 60 °C sıcaklıkta, pH 5–7 aralığında maksimum düzeyde çalıştığı raporlanmıştır (Trevizano ve ark., 2012). *Neocallimastix frontalis* ile gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, en uygun pH değeri 5.5, en uygun inkübasyon sıcaklığı ise 55 °C olarak bildirilmiştir (Mountfort & Asher, 1989). Literatürdeki bu veriler, bulanık mantık modellemede elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve doğruluğunu pekiştirmektedir.

Ek olarak, Comlekçioğlu ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada ksilanaz enziminin uygun pH'ını 6,0 olarak belirtmiş; Kar & Torcan (2023) ise *Neocallimastix* sp. ile yürüttükleri araştırmada optimum sıcaklık aralığını 40–50 °C ve pH aralığını 6,0–6,5 olarak bildirmiştir. Bu değerler, çalışmamızda bulanık mantık modellemenin ortaya koyduğu aralıklarla oldukça örtüşmektedir. Sonuç olarak, Python tabanlı yapay zekâ modeli ile oluşturulan bulanık mantık sistemi sayesinde, ksilanaz enziminin çevresel koşullara bağlı aktivite profili hem teorik hem de deneysel veriler ışığında anlamlı ve tutarlı bir biçimde ortaya konmuştur. Bu değerlendirme aynı zamanda grafiksel olarak da sunulmuş olup, Şekil 6'da detaylandırılmıştır.



Şekil 6. Rumen Fungal Ksilanaz Enziminin bulanık modellemesi sonucu elde edilen grafik değerlendirilmesi (y eksen: üyelik derecesi, x eksen: aktivite düzeyi)

Sonuç

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Python tabanlı yapay zekâ destekli bulanık mantık modelleme yaklaşımı, rumen fungal kökenli ksilanaz enziminin çevresel koşullara bağlı aktivitesinin tahmin edilmesinde etkili bir yöntem olarak ortaya konmuştur. Sıcaklık, pH ve substrat konsantrasyonu gibi enzim aktivitesini doğrudan etkileyen parametreler, bulanık mantık yaklaşımı ile bulanık kümeler aracılığıyla değerlendirilmiş; biyolojik sistemlerin doğasında bulunan doğrusal olmayan ve belirsiz yapılar başarıyla modellenmiştir. Model çıktıları, literatürde yer alan deneysel verilerle yüksek oranda uyum göstermiş ve kullanılan yaklaşımın güvenilirliğini ortaya koymuştur.

Python programlama dili ile geliştirilen her bir kod bloğu, biyolojik sistemlerin karmaşık yapısının modellenmesinde önemli katkılar sağlamış; özellikle Scikit-Fuzzy kütüphanesi aracılığıyla oluşturulan üyelik fonksiyonları ve kural tabanları, elde edilen verilerin analitik yorumlanmasına olanak tanımıştır. Ancak mevcut modelin daha yüksek duyarlılıkla çalışabilmesi için veri

setinin genişletilmesi, üyelik fonksiyonlarının yeniden tanımlanması ve kural tabanlarının detaylandırılması önerilmektedir.

Elde edilen sonuçlar, ksilanaz enziminin optimum koşullar altında 5.5–6.5 pH aralığında, 50–60 °C sıcaklıkta ve yaklaşık 5 mg/mL substrat konsantrasyonunda en yüksek aktiviteyi gösterdiğini ortaya koymuş; bu değerlerin literatür ile tutarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, substrat doygunluğuna ulaşıldıktan sonra yapılan substrat ilavesinin enzim aktivitesi üzerinde anlamlı bir artış sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, enzime ait kinetik sınırların bulanık mantık modeli ile etkin biçimde tanımlanabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, rumen fungal ksilanaz enziminin yapay zekâ destekli bulanık mantık temelli modellemesinin yapılmasına olanak sağlamış ve bu yaklaşımın gelecekte mikrobiyal enzimlerin optimizasyon çalışmalarında potansiyel bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Özellikle endüstriyel öneme sahip ksilanaz gibi enzimlerin farklı çevresel koşullarda gösterdiği aktivitenin daha geniş ve çeşitli veri

setleriyle değerlendirilmesi hem modelin güvenilirliğini artıracak hem de diğer mikroorganizmalar tarafından sentezlenen enzimlerle karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak tanıyacaktır. Bu bağlamda, bulanık mantık tabanlı modelleme çalışmalarının, biyoteknolojik süreçlerin dijitalleştirilmesi ve hassas kontrolü açısından önemli katkılar sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar eşit katkıya sahiptir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Etik Beyanı

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur (Halit YÜCEL, Kübra EKİNCİ).

Kaynaklar

- Badar, M., Ahmad, I., Mir, A. A., Ahmed, S., and Waqas, A. (2022). An autonomous hybrid DC microgrid with ANN-fuzzy and adaptive terminal sliding mode multi-level control structure. *Control Engineering Practice*, 121, 105036.
- Cai, S., Li, J., Hu, F. Z., Zhang, K., Luo, Y., Janto, B., ... & Dong, X. (2010). Cellulosilyticum ruminicola, a newly described rumen bacterium that possesses redundant fibrolytic-protein-encoding genes and degrades lignocellulose with multiple carbohydrate-borne fibrolytic enzymes. *Applied and environmental microbiology*, 76(12), 3818-3824.
- Çalışkan, R., Yağcı, S., & Kocabaş, D. S. (2014). Lignoselülozik biyokütleinin ekstrüzyon ile ön işlemi ve enzimatik yolla ksilooligosakkarit üretimi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 156-171.
- Cao, S., Zeng, Y., Yang, S., and Cao, S. (2021). Research on Python data visualization technology. In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1757, No. 1, p. 012122). IOP Publishing.
- Chuensiri, S., Katchasuwanmanee, K., Wisessint, A., Jotisankasa, A., Soralump, C., Siriyakorn, V., ... and Sanposh, P. (2024). Implementation of Adaptive Network-Based Fuzzy Inference for Hybrid Ground Source Heat Pump. *IEEE Access*.
- Comlekcioglu, U., FC, Y., Keser, S., BM, K., Battaloglu, G., & Ozkose, E. (2012). Neocallimastix sp. ve Orpinomyces sp.'nin Enzim Üretimleri Üzerine Karbon Kaynaklarının Etkisi. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 18(5).
- Daole, M., Schiavo, A., Bárcena, J. L. C., Ducange, P., Marcelloni, F., and Renda, A. (2023). OpenFL-XAI: Federated learning of explainable artificial intelligence models in Python. *SoftwareX*, 23, 101505.
- Daway, H. G., Daway, E. G., and Kareem, H. H. (2020). Colour image enhancement by fuzzy logic based on sigmoid membership function. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 13(5), 238-246.
- Deng, J., and Deng, Y. (2021). Information volume of fuzzy membership function. *International Journal of Computers Communications & Control*, 16(1).
- Deng, Z., Wang, Y., Mao, J., and Ye, M. (2017). Investigating the Relationship between the Substrates' Consumption and Their Abundances in a Complex Enzymatic System. *Analytical chemistry*, 89(20), 10644-10648.
- Dong, Y., Li, G., Jiang, X., and Jin, Z. (2023). Antecedent Predictions Are More Important Than You Think: An Effective Method for Tree-Based Code Generation. In *ECAI 2023* (pp. 565-574). IOS Press.
- Dos Santos, J. P., da Rosa Zavareze, E., Dias, A. R. G., & Vanier, N. L. (2018). Immobilization of xylanase and xylanase- β -cyclodextrin complex in polyvinyl alcohol via electrospinning improves enzyme activity at a wide pH and temperature range. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 1676-1684.
- Gajare, A., Tembe, Y., Sawant, S., and Mangala, R. (2021, October). CircuitScribe: Block Diagram based Circuit Simulation Application. In *2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)* (pp. 492-497). IEEE.
- Gilmiyarov, R. V., Galimzyanova, L. I., Porshnev, S., and Chernova, O. (2023, May). Comparative Quality Analysis of Random Number Generators in MATLAB and NumPy packages. In *2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)* (pp. 293-297). IEEE.
- Grum, M., Kotarski, D., Ambros, M., Biru, T., Krallmann, H., and Gronau, N. (2021). Managing Knowledge of Intelligent Systems: The Design of a Chatbot Using Domain-Specific Knowledge. In *Business Modeling and Software Design: 11th International Symposium, BMSD 2021, Sofia, Bulgaria, July 5–7, 2021, Proceedings 11* (pp. 78-96). Springer International Publishing.
- Harris, C. R., Millman, K. J., Van Der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... and Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362.
- Htun, S. N. N., Egami, S., and Fukuda, K. (2024). Activity scenarios simulation by discovering knowledge through activities of daily living datasets. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 17(1), 87-105.
- Hu, J., Arantes, V., & Saddler, J. N. (2011). The enhancement of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic substrates by the addition of accessory enzymes such as xylanase: is it an additive or synergistic effect?. *Biotechnology for biofuels*, 4, 1-14.
- Jianling, W., Xian, Y., Nan, L., and Detong, C. (2023, July). Fuzzy Control Strategy for Energy Allocation Optimization in Extended Range Mode. In *2023 8th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)* (pp. 847-852). IEEE.
- Jung, H. G., & Casler, M. D. (2006). Maize stem tissues: impact of development on cell wall degradability. *Crop science*, 46(4), 1801-1809.
- Kar, B., & Torcan, B. (2023). Isolation, morphological identification, and xylanase characteristics of anaerobic gut fungi Neocallimastix from Anatolian wild goat. *Journal of Basic Microbiology*, 63(3-4), 377-388.
- Khandeparker, R., & Numan, M. T. (2008). Bifunctional xylanases and their potential use in biotechnology. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(7), 635-644.
- Lin, Y. H., Yu, C. M., and Wu, C. Y. (2021). Towards the design and implementation of an image-based navigation system of an autonomous underwater vehicle combining a color recognition technique and a fuzzy logic controller. *Sensors*, 21(12), 4053.
- Liu, J. C., Cheng, H. L., Lai, Y. H., Hu, C. Y., and Chen, Y. C. (2024). A fragment of the β -glucosidase gene from the rumen fungus Neocallimastix patriciarum J11 encodes a recombinant protein that exhibits activities in β -glucosidase and β -glucanase. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 732, 150406.

- Ma, H., Zheng, W., Wang, T., and Zhang, P. (2024, May). Performance improvement for Python-based Dynamic System Simulation. In *2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET)* (pp. 1432-1435). IEEE.
- May, R. M., Goebbert, K. H., Thielen, J. E., Leeman, J. R., Camron, M. D., Bruick, Z., ... and Marsh, P. T. (2022). MetPy: A meteorological Python library for data analysis and visualization. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(10), E2273-E2284.
- Mountfort, D. O., & Asher, R. A. (1989). Production of xylanase by the ruminal anaerobic fungus *Neocallimastix frontalis*. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(4), 1016-1022.
- Raja, K. (2023). Python-based fuzzy logic in automatic washer control system. *Soft Computing*, 27(10), 6159-6185.
- Pant, S., Prakash, A., Vundavilli, P. R., Khadanga, K. C., Kuila, A., Aminabhavi, T. M., and Garlapati, V. K. (2024). Concomitant inhibitor-tolerant cellulase and xylanase production towards sustainable bioethanol production by *Zasmidiumcellare* CBS 146.36. *Fuel*, 375, 132593.
- Papa, G., Varanasi, P., Sun, L., Cheng, G., Stavila, V., Holmes, B., ... & Singh, S. (2012). Exploring the effect of different plant lignin content and composition on ionic liquid pretreatment efficiency and enzymatic saccharification of *Eucalyptus globulus* L. mutants. *Bioresource Technology*, 117, 352-359.
- Samsingh, V., Ramachandran, A., Selvam, A., and Subramanian, K. (2021). Python implementation of fuzzy logic for artificial intelligence modelling and analysis of important parameters in drilling of hybrid fiber composite (HFC). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1012, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- Singhala, P., Shah, D., and Patel, B. (2014). Temperature control using fuzzy logic. arXiv preprint arXiv:1402.3654.
- Spolaor, S., Fuchs, C., Cazzaniga, P., Kaymak, U., Besozzi, D., and Nobile, M. S. (2020). Simpful: a user-friendly Python library for fuzzy logic. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(1), 1687-1698.
- Stabel, M., Hagemeister, J., Heck, Z., Aliyu, H., and Ochsenreither, K. (2021). Characterization and Phylogenetic Analysis of a Novel GH43 β -Xylosidase From *Neocallimastix californiae*. *Frontiers in fungal biology*, 2, 692804.
- Steubing, B., de Koning, D., Haas, A., and Mutel, C. L. (2020). The Activity Browser—An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software Impacts*, 3, 100012.
- Trevizano, L. M., Ventrone, R. Z., de Rezende, S. T., Junior, F. P. S., & Guimarães, V. M. (2012). Thermostability improvement of *Orpinomyces* sp. xylanase by directed evolution. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 81, 12-18.
- Tura, A. D., Lemu, H. G., Mamo, H. B., and Santhosh, A. J. (2023). Prediction of tensile strength in fused deposition modeling process using artificial neural network and fuzzy logic. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(3), 529-539.
- Wang, Y., & McAllister, T. A. (2002). Rumen microbes, enzymes and feed digestion-a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(11), 1659-1676.
- Zhang, M., Qiu, Q., Zhao, X., Ouyang, K., & Liu, C. (2024). Characterization of Novel Multifunctional Xylanase from Rumen Metagenome and Its Effects on In Vitro Microbial Fermentation of Wheat Straw. *Fermentation*, 10(11), 574.
- Zhang, Y., Yang, H., Yu, X., Kong, H., Chen, J., Luo, H., ... and Yao, B. (2019). Synergistic effect of acetyl xylan esterase from *Talaromyces leycettanus* JCM12802 and xylanase from *Neocallimastix patriciarum* achieved by introducing carbohydrate-binding module-1. *AMB Express*, 9, 1-12.
- Zhu, D., Liu, X., Xie, X., Yang, S., Lin, H., and Chen, H. (2020). Characteristics of a XIP-resistant xylanase from *Neocallimastix* sp. GMLF 1 and its advantage in barley malt saccharification. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(5), 2152-2160.