

Application of adaptive neural fuzzy inference system for predicting bio-deterioration of historical papers due to alternaria alternate

Seyyede Somaieh Mohsenian¹ | Mehrnaz Azadi² | Maryam Afsharpour³ | Farhang Mozafar⁴

Abstract:

Purpose: To explore predictability of growth rate of *alternaria alternata* in paper by ANFIS to control the bio-deterioration. Mathematical modeling by adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) has proved to be a valuable tool in predicting fungal growth rate in the fields of microbiology and food industry. This method is an alternative way to the classic means of incubation in biotechnology. However, the modeling of filamentous fungi has not received the same level of attention in controlling filamentous fungi in the paper art works.

Method and Research Design: The combined effect of temperature (5-10°C), aw (0.8-0.99), pH (3-9) and time (24-268h) on *A. alternata* growth rate in paper art works was modeled by ANFIS. MTLAB, 2018a Software was employed for the purpose of analysis.

Findings and Conclusion: From comparisons between experimental data results, growth rates predicted by ANFIS were confirmed, because of the high accuracy of the Gaussian membership function. Also, the ANFIS model is a useful tool for quickly predicting the growth rate of *A. alternata* in paper art works.

Keywords:

Historical paper, *Alternaria alternata*, Mathematical modeling, Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS); Predictive.

1. PhD Student, Preservation of Cultural and Historical Artefacts, Isfahan University of Fine Arts, Isfahan, I. R. Iran. somaieh11@gmail.com
2. Assistant Professor, School of Preservation of Cultural and Historical Artefacts, Isfahan University of Fine Arts, Isfahan, I. R. Iran. (corresponding author); m.azadi@aui.ac.ir
3. Associate Professor, Mineral Chemistry, Iranian Institute for Chemistry & Chemical Engineering, Tehran, I. R. Iran, afsharpour@ccerci.ac.ir
4. Associate Professor, The School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran. m.mozaffar@aui.ac.ir





فصلنامه تحقیقات تاریخی
و مطالعات آرشئویی

کاربرد سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی در پیش‌بینی فرسایش بیولوژیکی ناشی از فعالیت قارچ آلترناریا آلترناتا در کاغذهای تاریخی

سیده سمیه محسنیان^۱ | مهرناز آزادی^۲ | مریم افشارپور^۳ | فرهنگ مظفر^۴

چکیده:

هدف: هدف اصلی این مطالعه پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا در کاغذهای تاریخی با استفاده از مدل ریاضی است.

روش/ رویکرد پژوهش: با استفاده از روش سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی، مدل‌سازی ریاضی شده است. برای مدل‌سازی از نتایج مطالعات تجربی محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل از معیارهای ارزیابی مختلفی شامل ضریب همبستگی (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE)، و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: ضریب همبستگی (R^2) نزدیک به صفر (0) است. بنابراین مدل طراحی شده در پیش‌بینی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نزدیک به صفر (0) است. بنابراین مدل طراحی شده در پیش‌بینی رشد قارچ آلترناریا آلترناتا از دقت و صحت کافی برخوردار است. پیشنهاد می‌شود از روش سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا در کاغذهای تاریخی استفاده شود.

کلیدواژه‌ها:

کاغذهای تاریخی؛ آلترناریا آلترناتا؛ مدل‌سازی ریاضی؛ سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)؛ پیش‌بینی؛ حفاظت؛ آرشیو.

گنجینه اسناد

«۱۱۲»

فصلنامه علمی-پژوهشی | سازمان اسناد و کتابخانه ملی ج.ا.ایران - پژوهشکده اسناد

شاپا(چاپی): ۱۰۲۳-۳۶۵۲ | شاپا(الکترونیکی): ۲۵۳۸-۲۲۶۸

شناسانه برنمود رقمی (DOI): ۱۰.۲۲۰۳۴/ganj.۲۰۱۹.۲۳۲۳

نمایه در SID, Reserachgate, ISC و ایران ژورنال | <http://ganjineh.nlai.ir>

سال ۲۸، دفتر ۴، زمستان ۱۳۹۷ | صص: ۱۹۶-۲۱۶ (۲۱)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۴ | تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۷

۱. دانشجوی دکتری حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی، فرهنگس، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
somaieh11@gmail.com
۲. استادیار، عضو هیئت‌علمی دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران، (نویسنده مسئول).
m.zadi@au.ac.ir
۳. دانشیار، عضو هیئت‌علمی پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران.
afsharpour@ccerci.ac.ir
۴. دانشیار، عضو هیئت‌علمی دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
m.mozaffar@au.ac.ir



۱. مقدمه

فعالیت مستقیم و غیرمستقیم قارچ‌ها از عوامل اصلی در فرسایش بیولوژیکی^۱ آثار کاغذی محسوب می‌شود (Cappitelli and Sorlini, 2005; Michaelson et al. 2010). فعالیت قارچ‌ها سبب کاهش مقاومت ساختاری، تغییر رنگ، و ایجاد لکه در آثار کاغذی می‌شود (Bor-rego et al. 2010; Gutarowska et al. 2012; Palla et al. 2017). این لکه‌ها خوانایی نوشته را کم می‌کنند و ارزش‌های زیبایی‌شناختی اثر را تهدید می‌کنند (Michaelson et al, 2012). رشد و فعالیت این قارچ‌ها سلامتی افراد درگیر با این آثار را تهدید می‌کند؛ زیرا این قارچ‌ها متابولیت‌های سمی (مایکوتوکسین) ایجاد می‌کنند که بالقوه سرطان‌زا و آلرژی‌زا هستند (Florian, 2004). هر ساله تعداد زیادی اثر کاغذی وارد موزه‌ها، کتابخانه‌ها و آرشیوها می‌شوند. این اشیاء تازه‌وارد، امکان آلودگی قارچی دارند، بنابراین آگاهی از وضعیت این اشیاء قبل از ورودشان به مخزن از مواردی است که حوزه حفاظت و نگهداری، سخت به آن نیاز دارد (Strang, 2012). آزمون‌های کلاسیک (کشت قارچ‌ها) برای شناسایی آسیب‌های بیولوژیکی در آثار کاغذی علاوه بر زمان‌بر بودن، در بیشتر مواقع از توان مالی مجموعه نیز خارج‌اند؛ بنابراین کلید کاهش و به‌حداقل رساندن آسیب‌های بیولوژیکی ناشی از فعالیت قارچ‌ها، بازبینی آثار کاغذی و تعیین فعالیت قارچ‌ها - در صورت وجود قارچ - در کمترین زمان است (Strang, 2012)؛ به طوری که بین شناسایی تا درمان آثار آلوده به قارچ کمترین زمان ممکن صرف شود (Strang, 2012). امروزه برای کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و افزایش سرعت انجام آزمایش‌های میکروبی، استفاده از مدل‌های ریاضی توسعه یافته‌است (Garcia, 2009). یکی از کاربردهای رایج مدل‌های ریاضی (از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی) در ارزیابی و پیش‌بینی خطر رشد قارچ‌ها در حوزه صنایع غذایی، میکروبیولوژی، مواد و مصالح ساختمانی و بناهای تاریخی است (Garcia, 2009; Vereecken et al, 2012; Al-Mahasneh et al. 2016).

با وجود اهمیت فرایند حفاظت و نگهداری از آثار کاغذی و حجم انبوه این آثار در موزه‌ها، کتابخانه‌ها و آرشیوها، محققان به کاربرد این روش‌های ریاضی در شناسایی و ارزیابی فرسایش بیولوژیکی آثار کاغذی توجه نکرده‌اند. ضروری است، این روش‌ها (مدل‌های پیش‌بینی رشد قارچ‌ها) در این حوزه نیز کاربردی شود؛ زیرا حفاظت‌گران و مرمت‌گران در تمامی برنامه‌های حفاظت پیشگیرانه از جمله برنامه‌ریزی برای مدیریت خطر رشد قارچ‌ها با گونه‌ای از پیش‌بینی سروکار دارند. در این راستا هرچه اعتبار پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر باشد، اتخاذ سیاست‌های مناسب و به‌کارگیری ابزار متناسب با آن نیز به شکل کارآمدتری انجام می‌شود. مدل‌سازی ریاضی با هدف پیش‌بینی خطر رشد قارچ‌ها با دو

1. Bio deterioration



روش کلاسیک و هوش مصنوعی امکان پذیر است. روش های کلاسیک مدل سازی ریاضی، پارامترها را به شکل خطی وارد فرآیندهای مدل می کنند و در اغلب موارد نمی توانند مسائل پیچیده رشد قارچ ها را به خوبی تحلیل کنند؛ زیرا پدیده رشد قارچ ها غیر خطی است. در بین روش های هوش مصنوعی (شبکه های عصبی مصنوعی، شبکه های عصبی فازی، الگوریتم های فازی، الگوریتم های ژنتیک، سیستم های استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی^۱) برای مدل سازی ریاضی، روش سیستم های استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی، برای بررسی انواع پدیده های بیولوژیک و غیربیولوژیک، جایگاهی ویژه در حوزه های مختلف علوم دارد. غیرخطی بودن، قابلیت تطبیق پذیری مناسب، توانایی ادغام اطلاعات از منابع مختلف (مانند سیستم های متخصص، تجربیات انسانی، داده های تجربی)، و توانایی در کاهش ابعاد مسئله با استفاده از روش خوشه بندی جزئی از مهم ترین مزیت این روش مدل سازی ریاضی است (Al-Mahasneh et al. 2016). تحقیقات بسیاری درباره استفاده از مدل سازی ریاضی برای پیش بینی خطر رشد قارچ ها در حوزه های میکروبیولوژی، صنایع غذایی، مواد و مصالح ساختمانی و بناهای تاریخی انجام شده است؛ ولی در این مقاله فقط به تحقیقاتی اشاره می شود که از هوش مصنوعی برای مدل سازی ریاضی استفاده کرده اند:

نتایج تحقیق هاجمیر^۲ و همکاران، درباره پیش بینی خطر رشد باکتری شیگلا^۳ از طریق مدل سازی ریاضی با روش شبکه های عصبی مصنوعی نشان داده است که مدل سازی ریاضی با روش شبکه های عصبی مصنوعی در مقایسه با روش های کلاسیک (از جمله: معادلات رگرسیون^۴) ضریب اطمینان بیشتری دارد؛ یعنی از صحت و دقت کافی برخوردار است (Hajmeer et al. 1997). در تحقیق دیگری محققان به دلیل آن که رشد قارچ ها سبب فاسد شدن مواد غذایی می شود و سم مایکوتوکسین تولید می کند و همچنین روش سنتی کشت و شمارش قارچ ها وقت گیر است، روش مدل سازی را برای پیش بینی خطر رشد قارچ پیشنهاد داده اند. در این راستا آن ها برای پیش بینی خطر رشد قارچ ها، از روش مدل سازی شبکه های عصبی مصنوعی به عنوان جایگزین روش های سنتی کشت و شمارش قارچ ها استفاده کرده اند. بدین منظور ابتدا با انجام مطالعات تجربی، تأثیر ترکیبی سه عامل دما، فعالیت آبی^۵ و pH را بر رشد حداکثری قارچ موناسکوس رابر^۶ بررسی کرده اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که مدل سازی با روش شبکه عصبی مصنوعی به عنوان روشی جایگزین و قدرتمند، توانایی پیش بینی خطر رشد این قارچ را داراست (Lou et al, 2001b). در تحقیقی دیگر، برای مدل سازی ریاضی با هدف پیش بینی خطر رشد همین قارچ، از روش ترکیبی شبکه های عصبی مصنوعی با الگوریتم یادگیری تکاملی^۷ استفاده شده است. الگوریتم یادگیری تکاملی عرضه شده در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک

1. Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS)
2. Hajmeer
3. Shigella flexneri
4. Regression
5. Water activity (aw)
6. Monascus ruber
7. Evolutionary learning algorithm



تاگوچی^۱ است. هم‌چنین در این تحقیق دقت پیش‌بینی خطر رشد قارچ موناסקوس رابر با دو روش مدل‌سازی ریاضی (روش رگرسیون چندجمله‌ای^۲ به‌عنوان یک روش کلاسیک مدل‌سازی ریاضی، و روش شبکه‌های عصبی-فازی به‌عنوان یک روش هوش مصنوعی) باهم مقایسه شده‌است. نتایج این تحقیق نشان داده‌است که پیش‌بینی خطر رشد قارچ موناסקوس رابر از طریق مدل‌سازی با روش شبکه‌های عصبی-فازی^۳ در مقایسه با پیش‌بینی خطر رشد این قارچ از طریق مدل‌سازی ریاضی با روش چندجمله‌ای، از نظر دقت و اعتبار پیش‌بینی عملکرد مناسب‌تری به‌دست می‌دهد (Ho et al, 2012). همین نتیجه را شوبرت و همکاران نیز در نتایج تحقیق خود تأیید کرده‌اند؛ به‌طوری‌که در تحقیق خود نتیجه گرفته‌اند که پیش‌بینی خطر رشد قارچ‌ها با روش مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی از روش چندجمله‌ای دقیق‌تر است (Schubert et al, 2010). وانگ و همکاران، برای پیش‌بینی خطر رشد قارچ لکاناستاک^۴ در محصولات غذایی از دو روش مدل‌سازی ریاضی (شبکه‌های عصبی مصنوعی، و سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی) استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت و صحت نتایج پیش‌بینی‌شده با روش مدل‌سازی ریاضی با سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی، در مقایسه با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی به داده‌های واقعی خیلی نزدیک‌تر است (Wang et al, 2013).

در فرسایش‌های بیولوژیکی کاغذ، قارچ آلترناریا آلترناتا نقش مهمی ایفا می‌کند و با ایجاد لکه‌های سیاه، قهوه‌ای متمایل به سیاه، و قهوه‌ای متمایل به سبز (قهری، ۱۳۹۱، ص ۵۰؛ Ponce-Jimenez et al., 2002) باعث فرسایش کاغذ می‌شود. تحقیق پیش‌رو با هدف پیش‌بینی خطر رشد این گونه قارچی در کاغذهای تاریخی انجام شده‌است.

۲. معماری و ساختار سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی، سیستم هوشمند ترکیبی‌ای است که از ترکیب دو ساختار شبکه‌های عصبی^۵ و سیستم‌های فازی^۶ تشکیل شده‌است. در این ساختار از مزایای «شبکه‌های عصبی» و «سیستم‌های فازی» استفاده شده‌است؛ به این معنا که از خصوصیت آموزش‌پذیری شبکه‌های عصبی و از ویژگی توانایی مدل‌سازی استنتاجی سیستم‌های فازی - که باعث افزایش قدرت تصمیم‌گیری و افزایش دقت و اطمینان در شرایط نبود قطعیت می‌شود- در ساختار آن استفاده شده‌است (Al-Mahasneh et al., 2016). قابلیت پیش‌بینی این روش مدل‌سازی، از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و یا منطقی-فازی به‌تنهایی، صحیح‌تر و دقیق‌تر است. نقطه شروع ساختن سیستمی فازی به‌دست‌آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی با استفاده از دانش فرد خبره یا دانش حوزه مد نظر

1. Taguchi-genetic algorithm
2. Polynomial model
3. Fuzzy Neural Networks (FNN)
4. Leuconostoc Mesenteroides
5. Artificial Neural Networks (ANNs)
6. Fuzzy Logic System (FLS)



است و برای مدل‌سازی با این روش، از داده‌های واقعی برای آموزش می‌توان استفاده کرد (Al-Mahasneh et al., 2016).

$$\text{IF } x \text{ is } a \text{ AND } y \text{ is } b; \text{ THEN } g = f(x,y) \quad (1)$$

مهم‌ترین دلیل قدرتمندی شبکه‌های عصبی مصنوعی، قابلیت آموزش پذیری آن‌ها از روی الگوهای آموزشی (ورودی‌ها و خروجی‌های متناسب) با استفاده از الگوریتم‌های مختلف آموزش است. این شبکه‌ها با استفاده از این قابلیت رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی را شناسایی می‌کنند (Al-Mahasneh et al., 2016). ساختار سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی با دو متغیر ورودی و یک متغیر خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است؛ این ساختار شامل ۵ لایه و ۹ قانون اگر-آنگاه است.

در لایه اول (ورودی)، میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های مختلف فازی را کاربر مشخص می‌کند. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون‌ها در لایه دوم به دست می‌آید (Jang, 1993). هر گره i در این لایه، گره‌ای مربع‌شکل است. این لایه دارای گره‌های قابل تنظیم است که توابع عضویت مربوط به آن‌ها معمولاً گاوسی یا زنگوله‌شکل، با مقدار بیشینه‌ای برابر یک و کمینه‌ای برابر صفر است. پارامترهای توابع عضویت که همان پارامترهای مقدمه قوانین فازی هستند، براساس توصیف زبانی مربوط به متغیرها و زیرفضاهای فازی و براساس روش هیبرید تنظیم می‌شوند (Jang, 1993).

$$O_{i,1} = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for} \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$O_{i,j} = \mu_{B_j}(y) \quad \text{for} \quad j=1,2 \quad (3)$$

$$O_{i,1} = \mu_{A_i}(x) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - c_i}{a_i}\right)^2\right] \quad (4)$$

گره‌های لایه دوم دایره‌ای شکل‌اند و ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این گره‌ها به نام Π شناخته می‌شود. این گره‌ها دو سیگنال ورودی را در هم ضرب می‌کنند و حاصل را به عنوان خروجی تحویل شبکه می‌دهند. هر گره خروجی بیانگر شدت برانگیختگی^۱ یک قاعده است:

$$O_K^2 = W_K \mu_{A_i}(x) \mu_{B_j}(y), \quad i=1,2; \quad j=1,2 \quad K=2(i-1)+j \quad (5)$$

۱. Firing Strength گره‌های لایه سوم نیز دایره‌ای شکل و ثابت‌اند و به نام N شناخته می‌شوند و وظیفه



آن‌ها محاسبه وزن نرمالیزه هریک از قوانین است (Al-Mahasneh et al., 2016). گره i امین، نسبت قاعده شدت برانگیختگی را برای قاعده‌های شدت برانگیختگی به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4} \quad i=1,2,3,4 \quad (6)$$

لایه چهارم، لایه قوانین است و از انجام عملیات بر روی سیگنال‌های ورودی به این لایه حاصل می‌شود. گره‌های این لایه مربع‌شکل‌اند. گره‌های لایه چهارم وزن نرمالیزه هریک از قوانین فازی را در خروجی بخش مؤخره آن قانون ضرب می‌کنند و هر گره i در این لایه، گرهی منطبق با تابع گره به صورت زیر است:

$$O_i^4 = \bar{W}_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1,2,3,4 \quad (7)$$

p_i و q_i مجموعه پارامترهای این گره‌اند. پارامترهای این لایه به پارامترهای استنتاجی موسوم‌اند.

تنها گره لایه پنجم، یک گره ثابت به نام \sum است که تمام خروجی‌ها را به عنوان مجموعه‌ای از سیگنال‌های ورودی به صورت زیر محاسبه می‌کند:

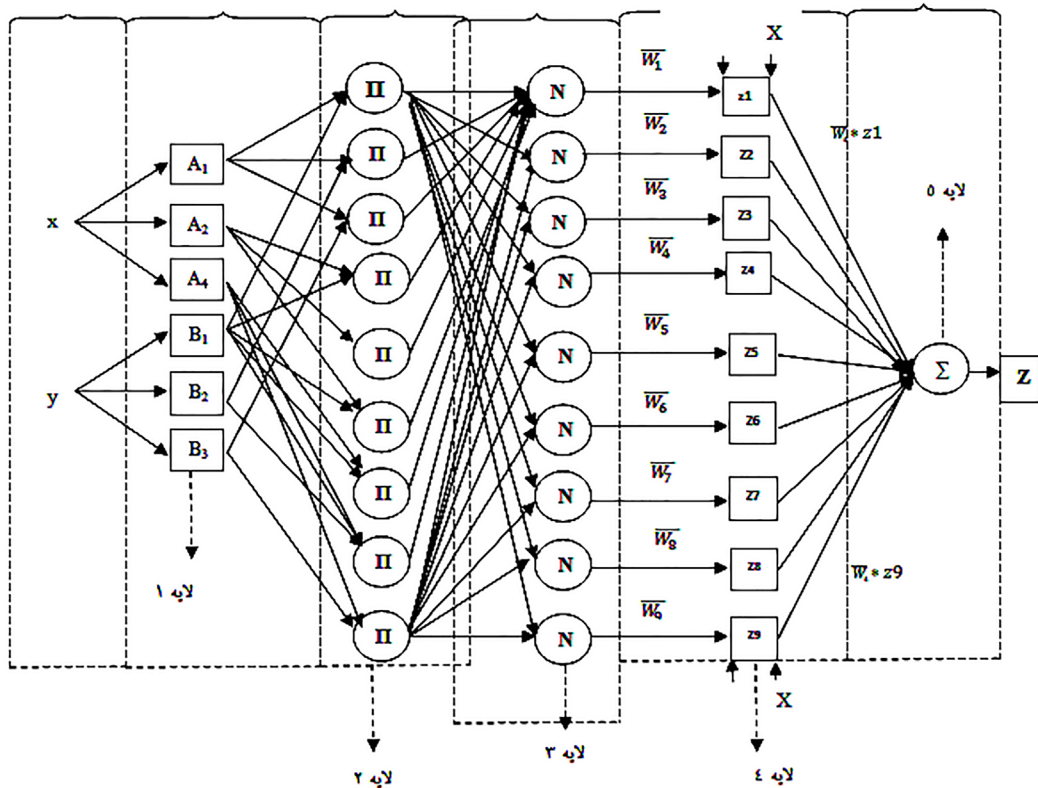
$$O_i^5 = \sum_{i=1}^n Z_i \bar{W}_i = \frac{Z_1 W_1 + Z_2 W_2 + Z_3 W_3 + Z_4 W_4}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4} \quad i=1,2, \quad (8)$$

این گره هم‌چنین تمام سیگنال‌های خروجی از گره‌های لایه چهارم را جمع می‌کند و به عنوان خروجی شبکه تحویل می‌دهد و هدفش از این کار حداقل کردن اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است (Jang, 1993).



شکل ۱

شمایی از ساختار سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) با دو متغیر ورودی (Jang, 1993).
لایه ۱: لایه فازی کردن متغیرهای ورودی
لایه ۲: لایه محصول
لایه ۳: لایه نرمال سازی داده‌ها
لایه ۴: فازی زدایی
لایه ۵: لایه خروجی

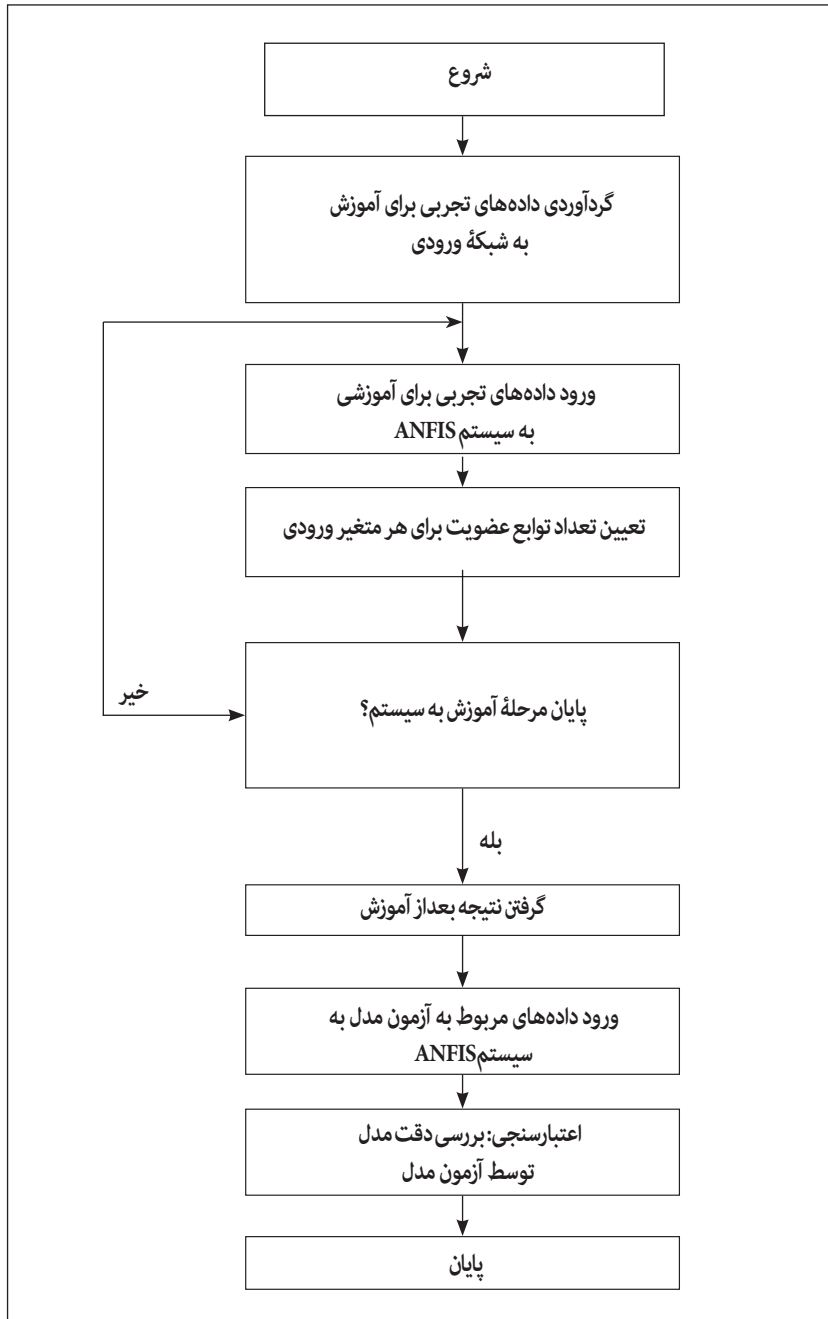


۳. مواد و روش‌ها

برای طراحی مدل، ابتدا داده‌های موردنیاز از نتایج مطالعات تجربی (تأثیر ترکیبی ۴ عامل دما، فعالیت آبی، pH، و زمان بر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا) گردآوری شد (جدول شماره ۱) (این نتایج از تحقیق محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) برداشت شد). سپس با کمک روش سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی مدلی ریاضی برای این قارچ ساخته شد و در ادامه دقت آن ارزیابی شد. در این راستا براساس توصیه ژانگ^۱ و همکاران (۱۹۹۸) برای مدل سازی ریاضی، ۸۰ درصد (۵۰ داده) از مجموعه داده‌های به دست آمده از مطالعات تجربی (میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا آلترناتا) برای آموزش مدل (جدول ۱)، و ۲۰ درصد (۱۳ داده) برای ارزیابی صحت و دقت مدل (جدول ۲) استفاده شد. گفتنی است که تقسیم بندی داده‌ها به دو گروه آموزش و ارزیابی به صورت تصادفی انجام شده است.

1. Zhang

مراحل مدل‌سازی برای پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا از طریق سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲

مراحل مدل‌سازی با روش ANFIS برای پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا

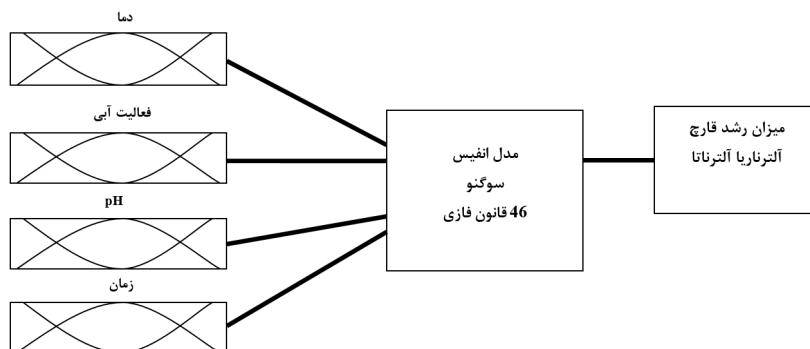


۳.۱. مدل سازی ریاضی با سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی

برای انجام تحقیق پیش رو ابتدا داده‌های حاصل از مطالعات تجربی محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) استانداردسازی (نرمال سازی) شد. سپس برای ساخت مدل، ۵۰ داده از ۶۳ داده به دست آمده از مطالعات تجربی به شبکه آموزش داده شد و چون قوانین خاصی برای آموزش و طراحی شبکه‌های عصبی وجود ندارد، چندین ساختار آزمایش شد. معماری بهینه مدل با استفاده از پیش فرض‌های جعبه ابزار نرم افزار متلب ورژن 2018a^۱ با آزمون ترکیبات مختلفی از ساختار مدل، با توجه به معیارهای ضریب همبستگی و مقادیر خطای حاصله به دست آمد؛ چون ساختار مناسب سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی، متناسب با داده‌های ورودی نوع تابع عضویت ورودی و خروجی، و قوانین و تعداد تابع عضویت انتخاب می‌شود. برای آموزش مدل از روش هیبرید^۲ -به دلیل خطای کمتر و سرعت آموزش زیادتر- استفاده شد. در این مطالعه از روش خوشه‌بندی جزئی موجود در نرم افزار متلب استفاده شد. در این روش، نوع تابع عضویت را با توجه به اطلاعات ورودی و دسته‌بندی‌های موجود، خودِ مدل تعیین می‌کند. در روش خوشه‌بندی، محدوده نفوذ را کاربر تعیین می‌کند که معمولاً بین صفر تا یک متغیر است (Al-Mahasneh et al., 2016). طراحی سیستم فازی براساس داده‌های ورودی با ۱۰۰ بار تکرار انجام شد.

شکل ۳

ساختار قانون فازی ANFIS را با تابع عضویت گاوسی نشان می‌دهد. در این ساختار، ۴ متغیر ورودی [دما، فعالیت آبی، pH و زمان] و یک خروجی (میزان رشد قارچ آلترناریا آرتناتا) با مدل سازی با روش ANFIS با استفاده از جعبه ابزار MATLAB Fuzzy Logic Toolbox طراحی شده است. تعداد قوانین فازی در این ساختار ۴۶ قانون فازی است. ۵۰ مجموعه داده حاصل از مطالعات تجربی در ۱۰۰ دوره آموزش، آموزش داده شد.



۳.۲. استانداردسازی (نرمال سازی) داده‌های گردآوری شده از نتایج مطالعات تجربی

داده‌های گردآوری شده از نتایج مطالعات تجربی محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) از طریق رابطه زیر نرمال سازی شد:

$$a_i = 0.1 + 0.8 \left(\frac{A_i - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \right) \quad (9)$$

در این رابطه a_i : مقدار نرمال شده داده‌ها، A_i : مقدار واقعی داده‌ها، A_{\min} : حداقل داده

مربوط به متغیر مدنظر، و A_{\max} : حداکثر داده مربوط به متغیر مدنظر است.

1. MATLAB 2018a
2. Hybrid



نرمال سازی (بین 0 و 1)	میزان رشد شعاعی قارچ آلتزاریا آلتزناتا (میلی متر)	زمان (بر حسب روز)	pH	فعالیت آبی (a _w)	دما	تعداد داده‌ها
0.129629	0.4	30	6	0.98	5	1
0.15185	0.7	30	6	0.98	10	2
0.24814	2	30	6	0.98	15	3
0.38888	3.9	30	6	0.98	20	4
0.385185	5.2	30	6	0.98	25	5
0.440740	4.6	30	6	0.98	30	6
0.36666	3.6	30	6	0.98	35	7
0	0	30	6	0.9	5	8
0	0	30	6	0.9	10	9
0	0	30	6	0.9	15	10
0.107407	0.1	30	6	0.9	20	11
0	0	30	6	0.9	30	12
0	0	30	6	0.9	35	13
0	0	30	6	0.8	25	14
0.107407	0.1	30	6	0.85	25	15
0.12518	0.34	30	6	0.9	25	16
0.314814	2.9	30	6	0.95	25	17
0.43333	4.5	30	6	0.97	25	18
0.440740	4.6	30	6	0.99	25	19
0.240740	1.9	30	3	0.98	25	20
0.3	2.7	30	4	0.98	25	21
0.53703	5.9	30	6.5	0.98	25	22
0.440740	4.6	30	7.5	0.98	25	23
0.418518	4.3	30	8	0.98	25	24
0.33703	3.2	30	8.5	0.98	25	25
0	0	30	6	0.8	20	26
0	0	30	6	0.85	20	27
0.107407	0.1	30	6	0.9	20	28
0.240740	1.9	30	6	0.95	20	29
0.27777	2.4	30	6	0.97	20	30
0.28518	2.5	30	6	0.99	20	31
0.53703	6.2	31	6.5	0.98	25	32
0.61111	7	32	6.5	0.98	25	33

جدول ۱

نرمال سازی مجموعه داده‌های گردآوری شده از مطالعات تجربی محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) برای آموزش شبکه برای مدل سازی پیش بینی خطر رشد قارچ آلتزاریا آلتزناتا (مقادیر اندازه گیری شده دما، فعالیت آبی، pH، و زمان به عنوان داده‌های ورودی و میزان رشد شعاعی قارچ آلتزاریا آلتزناتا به عنوان داده خروجی)



تعداد داده‌ها	دما	فعالیت آبی (a _p)	pH	زمان (برحسب روز)	میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا (آلترناتا) (میلی‌متر)	نرمال‌سازی (بین 0 و 1)
34	25	0.98	6.5	33	8.1	0.69259
35	25	0.98	6.5	34	8.6	0.73703
36	5	0.97	6	30	0	0
37	10	0.97	6	30	0	0
38	15	0.97	6	30	0.94	0.169629
39	20	0.97	6	30	2.4	0.27777
40	25	0.97	6	30	4.5	0.43333
41	30	0.97	6	30	4.1	0.403703
42	35	0.97	6	30	0.8	0.15925
43	5	0.99	6	30	0	0
44	10	0.99	6	30	0.1	0.107407
45	15	0.99	6	30	1.2	0.18888
46	20	0.99	6	30	2.5	0.28518
47	30	0.99	6	30	4	0.396296
48	35	0.99	6	30	0	0
49	25	0.98	4.5	30	3.2	0.3509803
50	25	0.98	5.5	30	4.77	0.4741176

ادامه جدول ۱

نرمال‌سازی مجموعه داده‌های گردآوری شده از مطالعات تجربی محسنیان و همکاران (۱۳۹۷) برای آموزش شبکه برای مدل‌سازی پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا (مقادیر اندازه‌گیری شده دما، فعالیت آبی، pH، و زمان به‌عنوان داده‌های ورودی و میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا آلترناتا به‌عنوان داده خروجی)

۴- بحث و گفت‌وگو

هایکین، برای بررسی کارایی (دقت و صحت) مدل‌های پیش‌بینی، معیارهایی را معرفی کرده که نام و فرمول برخی از مهم‌ترین آن‌ها در زیر آمده‌است (Haykin, 1994). این معیارها شامل ضریب همبستگی (R²)، میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) است. بدیهی است که بهترین مقدار برای R²، یک (1) و برای سایر معیارها صفر (0) است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (Y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{\sum_{m=1}^n (t_{mea,m})^2} \quad (10)$$

$$MSE = \frac{\sum_{m=1}^n (Y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{n} \quad (11)$$

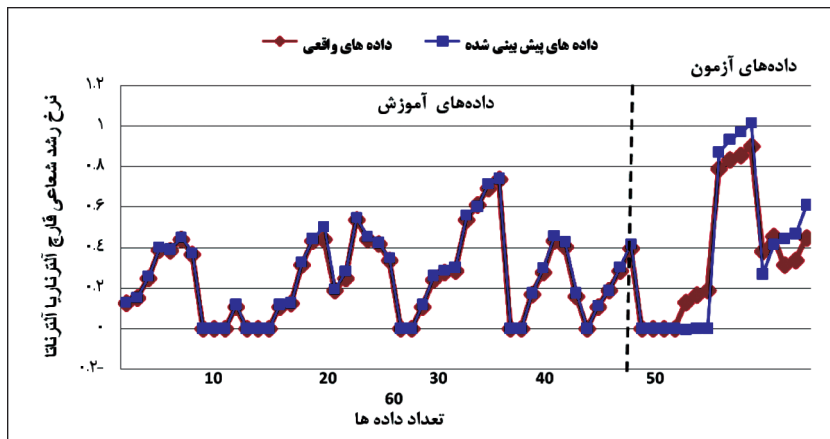
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (Y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{n}} \quad (12)$$

در این توابع t_{mea,m} داده واقعی (داده حاصل از مطالعه تجربی)، Y_{pre,m} داده خروجی مدل (داده پیش‌بینی شده مدل)، و n: تعداد مشاهدات است.



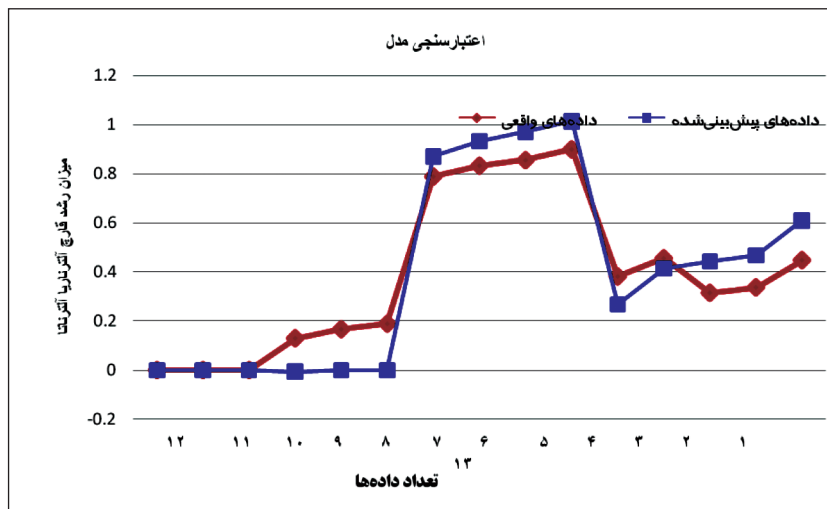
اعتبارسنجی (صحت و دقت) مدل

برای ارزیابی صحت و دقت مدل طراحی شده در این تحقیق، از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE)، و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (جدول ۳). از مقایسه این معیارها در مرحله آموزش و آزمون (جدول ۳) می توان نتیجه گرفت که مدل فازی-عصبی طراحی شده از دقت و صحت کافی برای پیش بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا در کاغذ برخوردار است. همچنین در جدول ۲ داده های واقعی (داده های حاصل از مطالعات تجربی) با داده های پیش بینی شده با مدل انفیس، برای مقایسه و تجزیه و تحلیل عرضه شده است.



شکل ۴

عملکرد مدل شبکه های عصبی مصنوعی (سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی) (ANFIS) طراحی شده برای پیش بینی میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا آلترناتا از طریق مقایسه داده های واقعی و داده های پیش بینی شده در مرحله آموزش و آزمون مدل



شکل ۵

عملکرد مدل سیستم استنتاجی عصبی-فازی-تطبیقی (ANFIS) طراحی شده برای پیش بینی میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا آلترناتا از طریق مقایسه داده های واقعی و داده های پیش بینی شده در مرحله آزمون مدل (اعتبارسنجی مدل)



همان‌طورکه در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود عملکرد مدل در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی نزدیک به 99% است و مدل به‌خوبی و با دقت مطلوب توانسته‌است الگوی حاکم بر روند فرسایش بیولوژیکی را درک کند و آن را در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی برآورد کند.

در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود که در اغلب موارد، مدل سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی در مرحله آزمون (ارزیابی) با شرایط واقعی قابل رقابت است. دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی -باوجود محدود بودن تعداد داده‌های استفاده‌شده و محدوده تغییرات بسیار وسیع آن‌ها- و سادگی آموزش و توسعه آن، به‌خوبی قابلیت فراوان آن را در فراگیری و پیش‌بینی فرآیند پیچیده و ناشناخته حاکم بر رشد قارچ‌ها در آثار کاغذی نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که نتایج این مدل، امکان جایگزینی آن را به‌جای روش‌های آزمایشگاهی پیچیده، وقت‌گیر و پرهزینه، برای تخمین قدرت قارچ آلترناریا آلترناتا در فرسایش بیولوژیکی آثار کاغذی نشان می‌دهد.

تعداد داده‌ها	عوامل تأثیرگذار						میزان رشد شعاعی قارچ آلترناریا آلترناتا		
	دما	فعالیت آبی (aw)	pH	زمان (بر حسب روز)	مطالعات تجربی (بر اساس نتایج داده‌های واقعی)	داده‌های واقعی (نرمالیزه بین 0 و 1)	پیش‌بینی شده	داده‌های	مقایسه
1	15	0.8	6	30	0	0	-6.3032e-18		
2	15	0.85	6	30	0	0	7.3539e-23		
3	15	0.9	6	30	0	0	8.1526e-23		
4	15	0.95	6	30	0.13106	0.4	-0.0055945		
5	15	0.97	6	30	0.79796	0.9	1.4178e-05		
6	15	0.99	6	30	0.1932	1.2	-1.4441e-05		
7	25	0.98	6.5	35	0.745376	9.1	0.87106		
8	25	0.98	6.5	36	0.82232	9.3	0.93412		
9	25	0.98	6.5	37	0.86888	9.9	0.97085		
10	25	0.98	6.5	38	0.89216	10.2	1.0149		
11	25	0.98	5	30	0.39514	3.8	0.26858		
12	25	0.98	7	30	0.4728	4.8	0.41536		
13	25	0.98	9	30	0.3252	2.9	0.4434		

جدول ۲

مقایسه داده‌های واقعی میزان رشد قارچ آلترناریا آلترناتا (حاصل از مطالعات تجربی) با داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل طراحی‌شده باروش سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)



داده‌ها	R ² (ضریب همبستگی)	MSE (میانگین مربعات خطا)	RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)
داده‌های واقعی	1	1.1271e-14	1.0616e-07
داده‌پیش‌بینی‌شده	0.98716	0.004676	0.06838

جدول ۳

معیارهای ارزیابی صحت و دقت مدل
(اعتبارسنجی مدل)

۵. نتیجه‌گیری

رایج‌ترین روش‌ها برای بررسی فرسایش بیولوژیکی آثار کاغذی، نمونه‌برداری از سطح کاغذ و کشت قارچ و سپس مطالعات میکروسکوپی است. البته در بین روش‌های نوین شناسایی قارچ‌ها، روش‌های مولکولی (از جمله تجزیه و تحلیل DNA با واکنش زنجیره پلیمری (Polymerase Chain Reaction: qRT-PCR)، هیبریداسیون فلورسانس درجا (Fluorescence in-situ hybridization: FISH) و...) نیز به علت تشخیص زود هنگام بسیار مورد توجه‌اند؛ ولی بسیار پرهزینه‌اند و از عهده مجموعه‌ها خارج‌اند. در ضمن هیچ‌یک از این روش‌ها اطلاعاتی درباره آینده وضعیت فرسایش بیولوژیکی آثار کاغذی به دست نمی‌دهند؛ اطلاعاتی که بتواند در برنامه‌های حفاظت پیشگیرانه مدنظر قرار گیرد.

بسیاری از حوزه‌های علوم (میکروبیولوژی، صنایع غذایی، و بناهای تاریخی) از مزیت مدل‌های پیش‌بینی ریاضی بهره‌برداری کرده‌اند؛ ولی حوزه حفاظت و مرمت آثار تاریخی از مزیت استفاده از این روش‌ها دور مانده است؛ مزیت‌هایی که می‌توانند تأثیراتی مهم در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های حفاظت پیشگیرانه و نیز کنترل فرسایش بیولوژیکی در این بخش داشته باشند.

یافته‌های این تحقیق نشان داد که میزان خطای مدل سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی طراحی شده در پیش‌بینی خطر رشد قارچ آلترناریا آلترناتا حدود 2% است و این مدل بیش از 98% با نتایج داده‌های حاصل از مطالعات تجربی مطابقت دارد؛ به عبارت دیگر مدل طراحی شده در پیش‌بینی رشد قارچ آلترناریا آلترناتا از دقت و صحت کافی برخوردار است. از این رو پیشنهاد می‌شود تا با به‌کارگیری و توسعه روش‌های نوین پیش‌بینی از طریق مدل‌سازی ریاضی با روش‌های هوش مصنوعی (سیستم استنتاجی عصبی-فازی تطبیقی) در حوزه بررسی وضعیت بیولوژیکی سایر آثار تاریخی، به حفاظت گران و مرمت گران این حوزه‌ها هم کمک شود.



منابع

منابع فارسی

- قهری، محمد. (۱۳۹۱). *عوامل میکروبی آسیب‌رسان به مواد آرشیوی و کتابخانه‌ای*. تهران: سازمان اسناد و کتابخانه ملی جمهوری اسلامی ایران.
- محسنیان، سیده سمیه؛ آزادی، مهرناز؛ افشارپور، مریم؛ مظفر، فرهنگ. (۱۳۹۷). «ارزیابی تأثیر متغیرهای دما، فعالیت آبی (a_w)، غلظت یون هیدروژن (pH)، و زمان بر رشد قارچ‌های اسپرژیلوس نایجر، پنی سیلیوم sp. و آلترناریا آلترناتا در کاغذهای تاریخی». *گنجینه اسناد*؛ دوره ۲۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صص ۱۶۶-۲۰۲.

منابع لاتین

- Al-Mahasneh, Majdi; Aljarrah, Mohannad; Rababah, Taha; Aludatt, Muhammad. (2016). "Application of Hybrid Neural Fuzzy System (ANFIS) in Food Processing and Technology". *Food Engineering Reviews*, 8(3), pp 351-366. DOI: 10.1007/s12393-016-9141-7.
- Borrego, Sofía; Guiamet, Patricia; Gómez de Saravia, Sandra; Batistini, Patricia; Garcia, miniet; Lavin, Paola; Perdomo, Ivette. (2010). "The quality of air at archives and the biodeterioration of photographs". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(2), pp 139-145. www.elsevier.com/locate/ibiod. 2012/05/12.
- Cappitelli, F; Sorlini, C. (2005). "From papyrus to compact disc: the microbial deterioration of documentary heritage". *Critical Reviews in Microbiology*, 31(1), pp 1-10.
- Florian, Mary-Lou E. (2004). *Fungal Facts: Solving Fungal Problems in Heritage Collections*. Archetype Publications, Great Britain, pp 90-97.
- Garcia, Daiana; Ramos, Antonio J; Sanchis, Vicente; Marín, Sonia. (2009). "Predicting mycotoxins in foods: A review". *Food Microbiology*, 26(8), pp 757-769.
- Gutarowska, Beata; Rembisz, Daria; Pietrzak, Katarzyna; Skóra, Justyna; Szyrkowska, Malgorzata; GliŚcińska, Eulalia; Koziróg, Anna. (2012). "Optimization and application of the misting method with silver nanoparticles for disinfection of the historical objects". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 75, pp 167-175.
- Hajmeer, Maha N; Basheer, Imad A; Najjar, Yacoub M. (1997). "Computational neural



- networks for predictive microbiology II. Application to microbial growth". *International Journal of Food Microbiology*, 34(1), pp 51-66.
- Haykin, Simon. (1994). *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. Macmillan, New York.
- Ho, Wen-Hsien; Tsai, Jinn-Tsong; Wang, Hue-Yu. (2012). "Neural Fuzzy Network model with evolutionary learning algorithm for mycological study of foodborne fungi". *International journal of innovative computing, information & control (IJICIC)*, 8(7).
- Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), pp 665-685.
- Lou, Wen; Nakai, Shuyro. (2001^a). "Application of artificial neural networks for predicting the thermal inactivation of bacteria: a combined effect of temperature, pH and water activity". *Food Research International*, 34(7), pp 573-579.
- Lou, Wen; Nakai, Shuyro. (2001^b). "Artificial neural network-based predictive model for bacterial growth in a simulated medium of modified-atmosphere-packed cooked meat products". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(4), pp 1799-1804.
- Michaelsen, Astrid; Piñar, Guadalupe; Pinzari, Flavia. (2010). "Molecular and microscopical investigation of the microflora inhabiting a deteriorated Italian manuscript dated from the Thirteenth Century". *Microbial Ecology*, vol. 60, no. 1, pp 69-80.
- Michaelsen, Astrid; Pinzari, Flavia; Barbabietola, Nicoletta; Piñar, Guadalupe. (2012). "Monitoring the effects of different conservation treatments on paper-infecting fungi". *International Biodeterioration & Biodegradation*, xxx, pp 1-9.
- Palla, Franco; Barresi, Giovanna. (2017). *Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage*. Switzerland: Springer, Cham. Online ISBN: 978-3-319-46168-7. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7>
- Panagou, E. Z.; Kodogiannis, V. S. (2009). "Application of neural networks as a non-linear modelling technique in food mycology". *Expert Systems with Applications*, 36(1), pp 121-131.



- Ponce-Jimenez, Maria; Toral, Fernando; Fornue, Ezequiel. (2002). "Antifungal protection and sizing of paper with Chitosan salts and cellulose ethers. Part 1, physical effects". *Journal of the American Institute for Conservation*, 41(3), pp 243-254.
- Schubert, Mark; Mourad, Safer; Schwarze, Francis. (2010). "Radial basis function neural networks for modeling growth rates of the basidiomycetes *Physisporinus vitreus* and *Neolentinus lepideus*". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(3), pp 703-712. DOI: 10.1007/s00253-009-2185-3.
- Strang, Thomas. (2012). "Studies in Pest Control for Cultural Property". Acta Universitatis Gothoburgensis. GOTHENBURG STUDIES IN CONSERVATION 30. PHD thesis. Sweden, 2012.
- Vereecken, Evy; Roels, Staf. (2012). "Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation". *Building and Environment*, 51, pp 296-310.
- Wang, Hue-Yu; Wen, Ching-Feng; Chiu, Yu-Hsien; Lee, I-Nong; Kao, Hao-Yun; Lee, I-Chen; Ho, Wen-Hsien. (2013). "Leuconostoc Mesenteroides Growth in Food Products: Prediction and Sensitivity Analysis by Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems". *PLoS ONE*, 8(5): e64995. DOI: 10.1371/journal.pone.0064995. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064995>
- Zhang, Guoqiang; Patuwo, B. Eddy; Hu, Michael Y. (1998). "Forecasting With Artificial Neural Network: The State of Art". *International Journal of Forecasting*, 14(1), pp 35-62.

English Translation of References

- Al-Mahasneh, Majdi; Aljarrah, Mohannad; Rababah, Taha; Aludatt, Muhammad. (2016). "Application of Hybrid Neural Fuzzy System (ANFIS) in Food Processing and Technology". *Food Engineering Reviews*, 8(3), pp 351-366. DOI: 10.1007/s12393-016-9141-7.
- Borrego, Sofia; Guiamet, Patricia; Gómez de Saravia, Sandra; Batistini, Patricia; Garcia, miniet; Lavin, Paola; Perdomo, Ivette. (2010). "The quality of air at archives and the biodeterioration of photographs". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(2), pp 139-145. Retrieved from www.elsevier.com/locate/ibiod. 2012/05/12.



- Cappitelli, F; Sorlini, C. (2005). "From papyrus to compact disc: the microbial deterioration of documentary heritage". Critical Reviews in *Microbiology*, 31(1), pp 1-10.
- Florian, Mary-Lou E. (2004). *Fungal facts: Solving fungal problems in heritage collections*. Archetype Publications, Great Britain, pp 90-97.
- Garcia, Daiana; Ramos, Antonio J; Sanchis, Vicente; Marín, Sonia. (2009). "Predicting mycotoxins in foods: A review". *Food Microbiology*, 26(8), pp 757-769.
- Ghahri, Mohammad. (1391/2012). "*Avāmel-e mikrobi-ye āsib-resān be mavād-e āršivi va ketābxāne-ye melli-e*" (Microbial factors deteriorating archival and library material). Tehran: Sāzmān-e AsnādvaKetābxāne-ye Melli-ye Jomhuri-ye Eslāmi-ye Iran (Sākmā) (National Library and Archives of Iran).[Persian]
- Gutarowska, Beata; Rembisz, Daria; Pietrzak, Katarzyna; Skóra, Justyna; Szyrkowska, Malgorzata; GliŚcińska, Eulalia; Koziróg, Anna. (2012). "Optimization and application of the misting method with silver nanoparticles for disinfection of the historical objects". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 75, pp 167-175.
- Hajmeer, Maha N; Basheer, Imad A; Najjar, Yacoub M. (1997). "Computational neural networks for predictive microbiology II. Application to microbial growth". *International Journal of Food Microbiology*, 34(1), pp 51-66.
- Haykin, Simon. (1994). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Macmillan, New York.
- Ho, Wen-Hsien; Tsai, Jinn-Tsong; Wang, Hue-Yu. (2012). "Neural Fuzzy Network model with evolutionary learning algorithm for mycological study of foodborne fungi". *International journal of innovative computing, information & control (IJICIC)*, 8(7).
- Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), pp 665-685.
- Lou, Wen; Nakai, Shuyro. (2001^a). "Application of artificial neural networks for predicting the thermal inactivation of bacteria: a combined effect of temperature, pH and water activity". *Food Research International*, 34(7), pp 573-579.
- Lou, Wen; Nakai, Shuyro. (2001^b). "Artificial neural network-based predictive model

- for bacterial growth in a simulated medium of modified-atmosphere-packed cooked meat products". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(4), pp 1799-1804.
- Michaelsen, Astrid; Piñar, Guadalupe; Pinzari, Flavia. (2010). "Molecular and microscopical investigation of the microflora inhabiting a deteriorated Italian manuscript dated from the Thirteenth Century". *Microbial Ecology*, vol. 60, no. 1, pp 69-80.
- Michaelsen, Astrid; Pinzari, Flavia; Barbabietola, Nicoletta; Piñar, Guadalupe. (2012). "Monitoring the effects of different conservation treatments on paper-infecting fungi". *International Biodeterioration & Biodegradation*, xxx, pp 1-9.
- Mohsenian, SeyedehSomayeh; Azadi, Mehrnaz; Afsharpour, Maryam; Mozaffar, Farhang. (1397/2018). "Arz-yā bi-ye ta'sir-e motqayer-hā -ye damā ,fa'āliat-e ābi, qelzat-e yon-e hidrožen, va zaman bar rošd-e qārč-hā-ye āsperjelusnāyjer, penisil-iyom va ā lternvriāāalternātā dar kāqaz-hā-ye tārixi" (The effect of temperature, water activity, ph. and time on the growth of Aspergillus Niger, Alternaria Alternata and Penicillium sp. in the historical papers). *Ganjine-ye asnād*, autumn 2018, 28(3), pp. 166-202.[Persian]
- Palla, Franco; Barresi, Giovanna. (2017). *Biotechnology and conservation of cultural heritage*. Switzerland: Springer, Cham. Online ISBN: 978-3-319-46168-7. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46168-7>.
- Panagou, E. Z.; Kodogiannis, V. S. (2009). "Application of neural networks as a non-linear modelling technique in food mycology". *Expert Systems with Applications*, 36(1), pp 121-131.
- Ponce-Jimenez, Maria; Toral, Fernando; Fornue, Ezequiel. (2002). "Antifungal protection and sizing of paper with Chitosan salts and cellulose ethers. Part 1, physical effects". *Journal of the American Institute for Conservation*, 41(3), pp 243-254.
- Schubert, Mark; Mourad, Safer; Schwarze, Francis. (2010). "Radial basis function neural networks for modeling growth rates of the basidiomycetes Physisporinus vitreus and Neolentinus lepideus". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(3),



pp 703-712. DOI: 10.1007/s00253-009-2185-3.

Strang, Thomas. (2012). "Studies in pest control for cultural property". ActaUniversitatisGothoburgensis. GOTHENBURG STUDIES IN CONSERVATION 30. PHD thesis. Sweden, 2012.

Vereecken, Evy; Roels, Staf. (2012). "Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation". *Building and Environment*, 51, pp 296-310.

Wang, Hue-Yu; Wen, Ching-Feng; Chiu, Yu-Hsien; Lee, I-Nong; Kao, Hao-Yun; Lee, I-Chen; Ho, Wen-Hsien. (2013). "LeuconostocMesenteroides Growth in Food Products: Prediction and Sensitivity Analysis by Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems". *PLoS ONE*, 8(5): e64995. DOI: 10.1371/journal.pone.0064995. retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064995>.

Zhang, Guoqiang; Patuwo, B. Eddy; Hu, Michael Y. (1998). "Forecasting with artificial neural network: The state of art". *International Journal of Forecasting*, 14(1), pp 35-62.

