

## پیش‌بینی ماندگاری فیله میگوی سفید غربی در شرایط انجماد براساس مدل آرنیوس و شبکه عصبی مصنوعی

الهام عیسوندحیدری<sup>1</sup>، لاله رومیانی<sup>2\*</sup>

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران  
۲- گروه شیلات، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران  
\* نویسنده مسئول (laleh.roomiani@iau.ac.ir)

### چکیده

برای ارزیابی پیش‌بینی ماندگاری فیله میگوی سفید غربی با استفاده از مدل ریاضی آرنیوس و شبکه عصبی مصنوعی در دماهای متفاوت (۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد)، تغییرات کیفی فیله شامل پروتئین‌های قابل استخراج از نمک (SEP)، شاخص K، میزان بازهای نیتروژن فرار کل (TVB-N)، شاخص پراکسید (PV)، مقدار اسید تیوباربیتریک (TBARS)، هدایت الکتریکی (EC) و ارزیابی حسی (SA) بررسی شدند. برای مدل آرنیوس دامنه خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای فاکتورهای کیفی TVB-N، EC، SA، TBARS، K و SEP به ترتیب ۱۵/۱۲-۷۳/۱۷، ۵۴/۰۴-۲/۱۳، ۴۷/۶۲-۶/۱۱، ۸۱/۰۰-۰/۰، ۹۹/۰۲-۲۵/۲ و ۵/۵۹-۰/۸۲ درصد قرار داشت. درمورد مدل شبکه عصبی مصنوعی، دامنه خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای فاکتورهای کیفی TVB-N، SA، EC، TBARS، K و SEP به ترتیب ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۰۰ و ۰/۰۰-۰/۰۰۳ درصد قرار داشت. مقادیر حداقل مربعات خطای مدل شبکه عصبی مصنوعی در اکثریت فاکتورهای کیفی کمتر از مدل آرنیوس بود. ضریب  $R^2$  مربوط به فاکتورهای کیفی فیله میگوی منجمد به دست آمده از مدل شبکه عصبی مصنوعی به جزء درمورد فاکتور SA، بیشتر از مدل آرنیوس بود. مدل شبکه عصبی مصنوعی توانست روند تغییرات کیفیت میگوهای نگهداری شده طی ۶ ماه دوره انجماد، در دماهای ۱۵- تا ۴۵- درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با مدل آرنیوس را بهتر نشان دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵  
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

### واژه‌های کلیدی

شبکه عصبی مصنوعی  
ماندگاری  
مدل آرنیوس  
میگوی سفید غربی



### مقدمه

مصرف‌کننده، زمان ماندگاری و تشخیص آن بسیار مهم است. ماندگاری با استفاده از شاخص‌های فیزیکوشیمیایی و میکروبی تعیین و مدت زمان آن با استفاده از مدل‌های جنشی به صورت مقرون به صرفه‌تری پیش‌بینی می‌شود (Sun et al., 2023). انجماد رایج‌ترین روش برای حفظ شکل و کیفیت اصلی محصولات آبی است، زیرا آفت کیفیت را به تأخیر می‌اندازد. نگهداری محصولات به صورت منجمد از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند.

با افزایش زمان نگهداری، کیفیت غذا کاهش می‌یابد و مواد مغذی از بین می‌روند. علاوه بر این، بافت، طعم و رنگ محصول بدتر می‌شود. به طور کلی، فساد در اثر تکثیر میکروب‌ها و اکسیداسیون پروتئین‌ها و لیپیدها ایجاد می‌شود. علاوه بر این، ممکن است به راحتی باعث بیماری‌های با منشأ غذایی شود (Pan et al., 2019). برای کمک به حفظ ایمنی محصول و محافظت از سلامت

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی نمونه

میگوی سفیدغربی<sup>۲</sup> با میانگین وزن  $13/45 \pm 2/00$  و طول  $11/1 \pm 22/00$  سانتی‌متر از بازار آبادان به‌صورت تازه خریداری شد. سپس در کیسه‌های فریزر در شرایط انجماد  $-22$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ماه نگهداری شدند. دمای مرکز میگو و نقطه پایان انجماد مرکز بدن میگو  $-18$  درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن بسته‌بندی و به‌طور تصادفی به ۴ گروه (۱۲ میگو در هر گروه) تقسیم و به‌ترتیب در دمای  $-15$ ،  $-25$ ،  $-35$  و  $-45$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. تمام آزمایش‌ها در روزهای صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ با ۳ تکرار انجام شد.

### اندازه‌گیری پروتئین‌های قابل استخراج از نمک ( $SEP^3$ )

۱ گرم نمونه میگو با ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر سرد به مدت ۳۰ ثانیه همگن شد. پس از ۲۰ دقیقه استخراج در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ (320R، ساخت ایران) و رسوب جمع‌آوری شد. پس از آن، ۱۵ میلی‌لیتر بافر تریس-مالئات با  $pH=7$  به رسوب اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه همگن شد. پس از ۶۰ دقیقه استخراج در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، مجدد با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. مایع رویی با استفاده از بافر تریس-مالئات تا ۲۵ میلی‌لیتر رقیق شد. مقدار جذب در طول موج ۵۴۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Shanghai, Ltd, UNICO Instruments Co) ساخت چین) تشخیص داده و میزان پروتئین با استفاده از مقدار جذب محاسبه شد (Wu et al., 2014).

### اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ( $EC^4$ )

۵ گرم از نمونه میگوی همگن‌شده با ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده و با سرعت متوسط فیلتر شد. EC ماده فیلترشده با استفاده از یک EC متر دیجیتال (Shanghai, Mettler Toledo FE20/EL20) ساخت چین) به‌دست‌آمد.

به‌طور کلی اثربخشی این روش با کاهش دما افزایش می‌یابد. دماهای پایین‌تر اندازه بلورهای یخ را کاهش می‌دهند. با این حال، کیفیت محصول با نگهداری طولانی‌مدت در شرایط انجماد کاهش می‌یابد (Okpala, 2015). اگرچه انجماد به‌طور قابل توجهی ماندگاری آبزیان را افزایش می‌دهد، اما نگهداری در شرایط انجماد برای مدت طولانی، می‌تواند منجر به چندین اثر نامطلوب از جمله ازدست‌دادن رطوبت، تخریب پروتئین، ازدست‌دادن تازگی و اختلالات ریزساختاری شود (Jiang et al., 2021).

تعیین زمان ماندگاری آبزیان و محصولات آنها با استفاده از مدل‌های جنبشی مقرون‌به‌صرفه است. مدل‌های جنبشی اکنون به‌طور گسترده برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت غذا مورد استفاده قرار می‌گیرند و گزارش‌های زیادی با استفاده از مدل آرنیوس برای شبیه‌سازی پیش‌بینی کیفیت وجود دارد که به فیله تیلاپیا، قزل‌آلای رنگین‌کمان و ماهی تن اشاره کرد (Tsironi et al., 2020; Wang et al., 2022; Yin et al., 2022). استفاده از مدل آرنیوس، پیش‌بینی خوبی از تغییرات کیفی محصولات ماهی در طول نگهداری ارائه می‌دهد. علاوه بر این، با مدرن‌تر شدن هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی ( $ANN^1$ ) توسط محققان برای کشف پیش‌بینی برخی از خواص صنایع غذایی استفاده شده‌اند (Bhagya Raj & Dash, 2022).

روابط پیچیده‌ای بین پارامترهای ورودی و خروجی در فرایند انجماد آبزیان حاکم است. از این‌رو، برگزیدن مدلی که بتواند رفتار انجماد محصولات را با حداقل خطا تخمین بزند، امری سخت است (Lan et al., 2023). مدل‌های جنبشی مبتنی بر معادله آرنیوس به‌طور گسترده برای پیش‌بینی تغییرات در کیفیت محصولات آبی استفاده می‌شوند (Wang et al., 2022). با توجه به پیچیده بودن روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته، به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی هوشمند، انتخاب دیگری است. یکی از این روش‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی بوده که شامل مجموعه‌ای از عناصر محاسباتی متصل به هم دیگر می‌باشد که شبیه به نرون‌های زیستی بوده که توانایی این را دارد که بدون هیچ دانش قبلی ارتباط ذاتی بین داده‌های مسئله را به‌دست‌آورد (Wang et al., 2020). بنابراین، هدف از مطالعه حاضر تعیین زمان ماندگاری میگوی سفیدغربی با دو روش آرنیوس و شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آنها با یکدیگر برای تعیین بهترین زمان ماندگاری است.

<sup>2</sup> *Litopenaeus vannamei*

<sup>3</sup> Salt extractable proteins

<sup>4</sup> Electrical conductivity

<sup>1</sup> Artificial neural network

استیک کلروفومی (نسبت کلروفوم به اسید استیک ۳:۲) به محتویات ارلن اضافه شد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول یدورپتاسیم اشباع، ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۵ میلی‌لیتر محلول نشاسته ۱ درصد به مجموعه اضافه و مقدار ید آزادشده با محلول تیوسولفات سدیم ۰/۱ نرمال تیترا شد. میزان پراکسید از رابطه (۲) به دست آمد (Soyer et al., 2010):

رابطه (۲)

$$PV = \frac{100 \times \text{نرمالیتة} \times \text{حجم مصرفی}}{\text{وزن نمونه روغن}}$$

اندازه‌گیری اسید تیوباربتوریک (TBARS<sup>۴</sup>)

اندازه‌گیری اسید تیوباربتوریک (TBA) به وسیله روش رنگ‌سنجی صورت گرفت. مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم از نمونه به یک بالن ۲۵ میلی‌لیتری انتقال و با بوتانول-۱ به حجم رسانده شد. ۵ میلی‌لیتر از مخلوط فوق به لوله‌های خشک درب‌دار وارد و به آن ۵ میلی‌لیتر از معرف TBA افزوده شد. لوله‌های درب‌دار در حمام آب با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شد و پس از آن در دمای محیط سرد شدند. سپس توسط دستگاه اسپکتوفوتومتری (UV-VIS-NIR، مدل UV3600، ساخت ژاپن) مقدار جذب محلول آزمایش در ۵۳۰ نانومتر (As<sup>۵</sup>) در مقابل میزان جذب شاهد (Ab<sup>۶</sup>) خوانده شد (Abu-Bakar et al., 2008). مقدار TBA (میلی‌گرم مالون‌دی‌آلدئید در کیلوگرم بافت میگو) براساس رابطه (۳) محاسبه گردید (Erkan & Özden, 2008):

رابطه (۳)

$$TBA = \frac{(As - Ab) \times 50}{200}$$

مدل‌سازی ریاضی و پیش‌بینی خصوصیات کیفی فیله میگو آنالیز سینتیک داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش Van Boekel (۱۹۹۶) بررسی شد. سرعت تغییرات کیفیت فیله میگو از طریق رابطه (۴) سینتیک بررسی گردید:

رابطه (۴)

$$\frac{-dB}{dt} = kB^n$$

در رابطه (۴)، B شاخص فاکتورهای کیفی مربوط به نمونه‌های میگو که ۱۸۰ روز نگهداری شدند. k ضریب ثابت

اندازه‌گیری بازهای نیتروژنی فرار کل (TVB-N<sup>۱</sup>)

اندازه‌گیری TVB-N به کمک دستگاه اندازه‌گیری نیتروژن یا کجلدال (ساخت آلمان) صورت گرفت. ۵ گرم فیله میگو به یک بالن ۵۰۰ میلی‌لیتری منتقل و سپس ۱ گرم اکسید منیزیم به‌عنوان کاتالیزور و ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر برای تقطیر و ۲۵ میلی‌لیتر اسید بوریک ۲ درصد حاوی شاخص متیل رد در داخل ارلن‌مایر اضافه تا به رنگ زرد درآمد. سپس با اسید سولفوریک ۰/۱ نرمال تیترا شد تا رنگ ارغوانی حاصل گردد (Song et al., 2012).

شاخص K

ترکیبات وابسته به آدنوزین تری‌فسفات (ATP<sup>۲</sup>) با استفاده از روش Liu و همکاران (۲۰۱۵) و همچنین رابطه (۱) اندازه‌گیری شدند. ۵ گرم از نمونه وزن و با محلول اسید پرکلریک ۱۰ درصد حجمی همگن شد. سپس با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ و مایع رویی خارج شد. رسوب مجدد با افزودن اسید پرکلریک ۵ درصد حجمی همگن و در همان شرایط سانتریفیوژ و این عمل دو بار تکرار شد. مایع رویی ترکیب با pH با محلول پتاسیم هیدروکسید ۶/۵ برای ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. مایع رویی با فیلتر ۰/۲۲ میکرون از صافی رد شد. تجزیه و تحلیل با استفاده از دستگاه HPLC (Shimadzu، LC-10ATseries، ساخت ژاپن)، (ستون COSMOSIL 5C18-OAQ) (فاز ثابت) و تهیه بافر فسفات در pH=۶/۷ (فاز متحرک) و متانول به نسبت ۹۵:۵ به مدت ۲۰ دقیقه در ۲۵۴ نانومتر انجام گردید.

رابطه (۱)

$$K (\%) = \frac{(HxR + Hx) \times 100}{(ATP + ADP + AMP + IMP + HxR + Hx)}$$

در رابطه (۱)، ATP آدنوزین تری‌فسفات، ADP آدنوزین دی‌فسفات، AMP آدنوزین مونوفسفات، IMP اینوزین مونوفسفات، HxR اینوزین و Hx هیپوزانتین می‌باشد.

اندازه‌گیری شاخص پراکسید (PV<sup>۳</sup>)

مقداری از روغن میگو در ارلن‌مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری سرسباده‌ای وزن و حدود ۲۵ میلی‌لیتر از محلول اسید

<sup>4</sup> Thiobarbituric acid

<sup>5</sup> Absorbance sample

<sup>6</sup> Absorbance blank

<sup>1</sup> Total volatile base nitrogen

<sup>2</sup> Adenosine triphosphate

<sup>3</sup> Peroxide value

برحسب ژول بر مول) و ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴۴ ژول بر مول کلونین) است.

**مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی (شبکه عصبی RBF)**  
در این تحقیق از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۸ R برای ایجاد شبکه عصبی RBF جهت مدل سازی و پیش بینی سینتیک تأثیر دماهای مختلف بر ماندگاری میگوی سفیدغربی استفاده شد. این شبکه دارای ۳ لایه، ورودی، پنهان و خروجی می باشد. لایه ورودی شامل ۲ نرون بود که برابر با تعداد متغیرهای ورودی است که در این مطالعه زمان و دمای نگهداری ورودی بودند. لایه خروجی شامل یک نرون بود که برابر با تعداد متغیرهای خروجی می باشد، که در این بررسی شامل شاخص  $K$ ،  $TVB-N$ ،  $PV$ ،  $TBARS$ ، ارزیابی حسی و میزان پروتئین و هدایت الکتریکی بودند. لایه ورودی، اطلاعات را دریافت و جمع آوری کرده و بردار ورودی  $X$  را فرمول بندی می کند. لایه پنهان متشکل از  $L$  گره بود، که تبدیل های غیرخطی را روی بردار ورودی اعمال می کنند و لایه خروجی پاسخ نهایی را دریافت می کند. خروجی شبکه RBF وسط یک ترکیب خطی از پاسخ های لایه پنهان شکل می گیرد که به صورت رابطه (۱۲) تعیین می گردد.

رابطه (۱۲)

$$y_i(x^p) = \sum_{j=1}^k w_{ji} \phi_j(\|x^p - c^i\|), i = 1, 2, \dots, s$$

در رابطه (۱۲)،  $\| \cdot \|$  - نورم فاصله اقلیدسی،  $k$  تعداد نورون لایه پنهان،  $\phi_j$  پاسخ نورون لایه پنهان،  $w_{ji}$  وزن خروجی،  $x^p$  بردار ورودی،  $y_i$  خروجی زامین گره خروجی،  $c^i$  مرکز و  $s$  تعداد نورون های خروجی است. در این شبکه، از تابع انتقال شعاعی گوسی که یکی از پرکاربردترین توابع شعاعی در مسائل مهندسی است در لایه پنهان استفاده گردید و در لایه خروجی نیز از تابع انتقال خطی استفاده شد. تابع انتقال شعاعی گوسی از طریق رابطه (۱۳) تعیین می شود:

رابطه (۱۳)

$$Q_j(\|x^p - c^i\|) = \exp\left(-\frac{\|x^p - c^i\|^2}{2\sigma_i^2}\right), i = 1, 2, \dots, k$$

در رابطه (۱۳)،  $\sigma_i$  پهنای پراکندگی زامین گره در لایه پنهان می باشد. پراکندگی  $\sigma$  به صورت رابطه (۱۴) تعریف می شود:

رابطه (۱۴)

$$\sigma_i = 2 * \sum_{i=1}^p |c_{i-1} - c_i| / p$$

است و  $n$  نظم جنبشی است. در این مطالعه برای درک ارتباط کمی بین زمان و دمای نگهداری با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف فیله میگو، رفتار داده های آزمایشگاهی با مدل های سینتیکی مختلف توصیف گردید. معمولاً سینتیک تغییرات کیفی در فیله آیزیان از معادله سینتیکی درجه صفر (رابطه ۵)، درجه اول (رابطه ۶) و درجه دوم (رابطه ۷) تبعیت می نماید.

رابطه (۵)

$$B = B_0 - kt$$

رابطه (۶)

$$\ln B = \ln B_0 - kt$$

رابطه (۷)

$$1/B = 1/B_0 + kt$$

در رابطه های (۵)، (۶ و ۷)،  $B_0$  مقدار اولیه پارامتر کیفی در زمان صفر،  $B$  مقدار پارامتر کیفی در زمان  $t$ ،  $k$  ضریب ثابت معادله هاست (مثبت یعنی رشد نمایی ایزوترم و منفی یعنی کاهش نمایی ایزوترم). با به دست آوردن ثابت نرخ تغییر پارامتر از معادله درجه اول، ماندگاری فیله میگو براساس هر کدام از فاکتورهای کیفی محاسبه شد (رابطه ۸ و ۹):

رابطه (۸)

$$t_{1/2} = \ln(2) / k_{FO}$$

رابطه (۹)

$$k = k_0 \exp(E_a/RT)$$

بعد از جایگزین کردن رابطه فوق با رابطه (۲)، (۳) و (۴) معادله های پیش بینی می تواند به دست آید (رابطه های ۱۰، ۱۱ و ۱۲):

رابطه (۱۰)

$$B = B_0 - k_0 \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

رابطه (۱۱)

$$B = B_0 \exp(k_0 \cdot t \cdot \exp(-E_a/RT))$$

رابطه (۱۲)

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{B_0} + k_0 \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

معادله آرنیوس قابل قبول ترین عبارت برای محاسبه تأثیر دما بر ثابت های سرعت سینتیکی در سیستم های غذایی است. با کمک معادله آرنیوس ارتباط ثابت سینتیکی تخریب کیفی ( $k$ ) با دمای مطلق فرایند برحسب کلونین ( $T$ ) بررسی گردید که  $E_a$  و  $R$  به ترتیب برابر انرژی فعال سازی

بسیار مطلوب؛ ۱، بسیار غیرقابل قبول)، بافت گوشت (۶)، الاستیک؛ ۱، بسیار غیرکشسان)، و کدرشدن یا تیرگی میگوی آب‌پز شده (۶، شفاف؛ ۱، بسیار کدر). نمره‌های فاکتورهای مختلف جمع شدند تا نمره حسی کلی به دست‌آید. نمره کل زیر ۱۵ غیرقابل قبول در نظر گرفته شد (Xu et al., 2017)

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها

تمام آزمایش‌ها در ۳ تکرار انجام و نتایج به صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شد. تجزیه و تحلیل ANOVA با استفاده از آزمون مقایسه چندگانه دانکن برای مقایسه تفاوت بین تیمارها انجام و تفاوت در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد ( $P < 0.05$ ) در نظر گرفته شد. برای بررسی آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد.

#### نتایج و بحث

نتایج شکل (۱) نشان داد که میزان SEP تا روز ۶۰ به طور آهسته روند کاهشی داشت. در حالی که بعد از ۶۵ روز روند کاهشی بخصوص در دماهای ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد با سرعت بیشتری طی شد. در روز ۶۵ مقدار پروتئین فیله میگوهای منجمد شده در دماهای ۴۵-، ۳۵-، ۲۵- و ۱۵- به ۹۶/۲۴، ۹۲/۸۵، ۹۶/۴۱ و ۸۰/۵۵ درصد کاهش، اما در روز ۱۸۰، این مقدار به ۹۱/۱۴، ۷۰/۷۴، ۴۴/۱۴ و ۲۷/۲۰ درصد کاهش یافت. در دمای ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد، تفاوت معنی‌دار آماری بین میزان SEP در روزهای مطالعه مشاهده نشد ( $P < 0.05$ )، اما در دماهای ۳۵- و ۴۵- تفاوت معنی‌دار آماری بین روزهای مطالعه مشاهده شد ( $P < 0.05$ ). در تمام دماهای مورد مطالعه، میزان EC روند افزایشی داشت که این روند دارای تفاوت معنی‌دار آماری برای هر دما بود ( $P < 0.05$ ). در دماهای بالاتر میزان افزایش EC بیشتر بود. مقدار EC اولیه ۲/۱۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود که در دمای ۱۵- و ۴۵- در انتهای دوره به ترتیب به ۳/۱۳ و ۲/۵۷ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر رسید (شکل ۱). میزان TVB-N با افزایش دما و روز نگهداری، به سرعت زیاد شد. از روز ۹۰ این تغییرات با سرعت بیشتری مشاهده شد. میزان اولیه TVB-N در عضله میگوهای منجمد ۷/۱۱ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم عضله بود. در روز ۱۸۰، میزان TVB-N عضله میگوها، در دمای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- به ترتیب ۳۶/۱۴، ۱۴/۱۰، ۱۱/۳۴ و ۹/۸۷ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم عضله رسید. بین دماهای مختلف در روزهای مختلف مطالعه، میزان TVB-N تفاوت معنی‌دار آماری نشان داد ( $P < 0.05$ ).

در رابطه (۱۴)،  $C_i$  و  $C_{i-1}$  مراکز توابع شعاعی و  $p$  تعداد مرکز RBF هستند (Wang et al., 2015). در شبکه RBF دو پارامتر حداکثر تعداد نرون و شاخص گستردگی توسط کاربر تغییر داده می‌شود تا بهترین عملکرد شبکه RBF برای مدل‌سازی محقق شود. باتوجه به مطالعه‌های انجام‌شده، دامنه مناسب تعداد نرون در شبکه RBF ۲۰ تا ۳۰ درصد کل داده‌ها پیشنهاد شده است. لذا در این بررسی حداکثر نرون تا ۳۰ نرون و شاخص گستردگی نیز (۱- تا ۱) در نظر گرفته شد. برای ارزیابی توانایی شبکه طراحی شده در پیش‌بینی ماندگاری میگو، از دو پارامتر حداقل مربعات خطا ( $MSE^1$ ) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شد تا بهترین مدل برای سینتیک ماندگاری که در واقع کمترین خطا و بالاترین ضریب همبستگی را دارد به دست‌آید. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان با مقدار میانگین مربعات خطا تعیین شد. حداقل مربعات خطا و مقدار ضریب همبستگی به ترتیب براساس رابطه (۱۵) و (۱۶) به دست‌آمد:

رابطه (۱۵)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}$$

رابطه (۱۶)

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{(P_i - O)^2} \right)$$

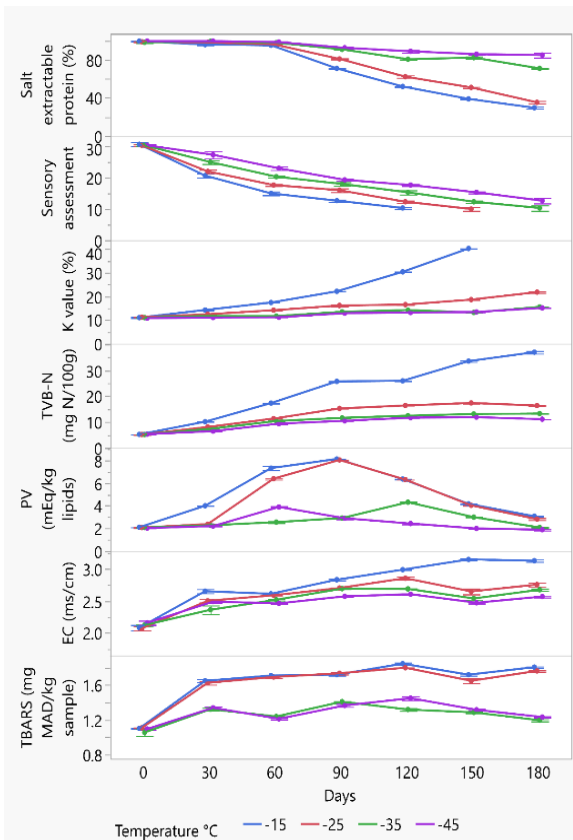
در رابطه (۱۵) و (۱۶)،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی،  $O_i$  مقدار واقعی و  $O$  میانگین داده‌ها می‌باشد. بهترین عملکرد زمانی است که  $R^2$  مقداری نزدیک به ۱ داشته باشد و مقدار صفر برای  $R^2$  نشان‌دهنده آن است که مقادیر خروجی برآورد شده توسط مدل به مقادیر واقعی خروجی نزدیک نمی‌باشد. همچنین هرچه  $MSE$  مقادیر کمتری داشته باشد نشان‌دهنده آن است که مدل با خطای کمتری نسبت به پیش‌بینی مقادیر خروجی اقدام می‌نماید.

#### ارزیابی حسی

گروهی متشکل از ۵ عضو نیمه‌آموزش‌دیده خانم و آقا (محدوده سنی ۳۲-۴۱ سال) آزمایش ارزیابی حسی را براساس آزمون هدونیک شش نقطه‌ای انجام دادند که در آن ۶ امتیاز خوب و ۱ امتیاز بد برای هر فاکتور بود. هر عضو داور یا ارزیاب، یک میگو کامل را از یک بسته تصادفی میگو ارزیابی کرد. نمونه میگو با ۵ جنبه ارزیابی شد: رنگ (۶)، بدون تغییر رنگ؛ ۱، تغییر رنگ شدید)، یکپارچگی ظاهری (۶)، سفت و کامل؛ ۱، بسیار شل و ناقص)، بو (۶)،

<sup>1</sup> Mean square error

شدند (۲۵/۷۶ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم). دماهای ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد توانستند مقدار TVB-N را در حدمجاز، اما با اختلاف معنی‌دار نگه‌دارند ( $P < 0.05$ ). در مطالعه Tsironi و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در دماهای پایین‌تر افزایش آهسته این فاکتور کیفی به‌دست‌آمد. ممکن است به‌این‌دلیل باشد که دمای پایین می‌تواند رشد و تولیدمثل باکتری‌ها را مهار کند و همچنین فرایند دامیناسیون اکسیداتیو ترکیبات نیتروژنی غیرپروتئینی را کاهش دهد (Zhang et al., 2011).



شکل ۱- تغییر فاکتورهای کیفی فیله میگو تحت دماهای مختلف در ۱۸۰ روز نگهداری

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کیفی برای میگوهای منجمد می‌باشد، که بیانگر میزان دناوره‌شدن پروتئین‌هاست (Xu et al., 2017). نتایج شکل (۱) نشان داد که میزان این فاکتور در ۶۰ روز اول نگهداری، به‌طور آهسته‌ای کاهش یافت ولی بعد از آن با رشد سریع‌تری به‌ویژه در نمونه‌هایی که در دمای ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد نگهداری‌شده بودند، کاهش پیدا کرد. این نتیجه در مورد مطالعه Wu و همکاران (۲۰۱۴) و همکاران (۲۰۱۷) مشاهده شد. نتیجه مطالعه حاضر و مطالعه Wu و همکاران (۲۰۱۴) و Xu و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که

(شکل ۱). مقدار اولیه K، ۱۲/۳۴ درصد بود. در روز ۱۸۰، میزان شاخص K در دماهای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- به ۵۰/۱۱، ۳۰/۱۴، ۲۳/۱۳ و ۱۸/۱۵ درصد افزایش یافت. با بالا رفتن زمان نگهداری، میزان K به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ( $P < 0.05$ ), اما این افزایش بعد از روز ۹۰ سریع‌تر بود (شکل ۱). تغییرات میزان شاخص پراکسید در میگوهای منجمدشده در ۱۸۰ روز نگهداری در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان پراکسید در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد از مقدار اولیه ۲/۴ به ۹/۸۸ میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم لیپید در روز ۹۰ رسید و سپس به ۳/۷۷ میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم لیپید در روز ۱۸۰ رسید. بیشترین مقدار PV در دمای ۴۵- در روز ۶۵ مشاهده گردید که ۳/۹۱ میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم لیپید بود. شکل (۱) روند آهسته تغییرات TBARS در فیله میگوهای منجمد در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. افزایش TBARS در این مطالعه نشان‌دهنده اکسیداسیون ثانویه لیپیدها در عضله میگوهای منجمد که به آهستگی اتفاق افتاده است، در انتهای دوره میزان آن کاهش یافت. امتیازهای ارزیابی حسی (SA<sup>۱</sup>) در میگوهای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵-، ۴۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد نگهداری‌شده بودند، با گذشت زمان نگهداری به‌طور آهسته و معنی‌دار کاهش پیدا کرد ( $P < 0.05$ ). امتیاز ۳۰ برای میگوهای بود که کاملاً تازه بودند و امتیاز ۱۵ شامل میگوهای بود که فاسد شده بودند. براساس این استاندارد در نظر گرفته‌شده، میگوهای ۴۵- و ۳۵- منجمدشده بودند، به‌ترتیب در روز ۱۷۵ و ۱۴۲ نگهداری فاسد شدند. درحالی‌که میگوهای منجمدشده در دماهای ۲۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب در روز ۱۳۱ و ۵۸ فاسد شده بودند (شکل ۱).

براساس نتایج شکل (۱)، TVB-N طی دوره نگهداری میگوهای وانامی در دماهای مختلف افزایش نشان داد. مقدار اولیه آن ۵/۲۰ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم گوشت به‌دست‌آمد که نسبت به مطالعه Okpala (۲۰۱۵) برای میگوی وانامی (۹/۹۴ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم) و Cadun و همکاران (۲۰۰۸) برای میگوی صورتی آب‌های عمیق (۱۳/۳ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم) کمتر بود. از طرف دیگر Goncalves و Santos (۲۰۱۹) گزارش کردند که میزان TVB-N ۲۰ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم گوشت میگو نشان از تازگی دارد. براساس این میزان، میگوهای وانامی منجمدشده در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد در روز ۹۰ از حالت تازگی خارج

<sup>۱</sup> Sensory Assessment

ممکن است در نتیجه افزایش نفوذپذیری غشا و کاهش ظرفیت نگهداری آب فیبرهای ماهیچه‌ای رخ دهد که منجر به افزایش حجم خارج‌سولوی می‌شود (Byrne *et al.*, 2002; Lepetit *et al.*, 2000). روند اکسیداسیون لیپید در آبزیان به آنزیم‌های داخلی مربوط می‌شود (De Abreu *et al.*, 2011). دمای انجماد و زمان نگهداری دو عامل بسیار مهم در روند اکسیداسیون در میگوهای منجمد و فعالیت آنزیم‌ها بشمار می‌روند. تغییرات PV در میگوی منجمد در دماهای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان PV در تمامی دماهای مورد مطالعه در هفته ۹ افزایش معنی‌داری نشان داد و سپس تا انتهای دوره روند کاهشی داشت. افزایش PV ممکن است به دلیل سرعت بیشتر تشکیل پراکسیدها نسبت به تجزیه پراکسیدها به محصولات اکسیداسیون ثانویه باشد. بیشترین مقدار PV در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد به دست آمد که نشان از آن دارد که دمای پایین‌تر انجماد می‌تواند نقش مهمی در کاهش پراکسید داشته باشد. نتایج بررسی مطالعه فعلی با نتایج Haghshenas و همکاران (۲۰۱۴) که بر نگهداری ناگت میگو در دمای انجماد کار کردند، مطابقت دارد.

تغییرات TBARS در میگوهای منجمد شده در دماهای مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که دو دمای ۱۵- و ۲۵- درجه سانتی‌گراد روند آهسته‌ای در افزایش این فاکتور نشان دادند. در هفته ۵ افزایش ناگهانی در میزان اسید تیوباربیتوریک اتفاق افتاد که بین دو دمای ۱۵- و ۲۵- با ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد تفاوت معنی‌دار آماری به وجود آمد ( $P < 0.05$ ). میگوهای منجمد شده در دو دمای ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد دارای کمترین میزان TBARS بودند که می‌تواند به دلیل کاهش پلیمرهای پروتئینی باشد. گزارش شد که TBARS می‌تواند با اجزای دیگر مانند پروتئین‌ها برای تشکیل پلیمرها در زمانی که لیپیدها یا اسیدهای چرب طی نگهداری در شرایط انجماد اکسید می‌شوند، تعامل داشته باشند (Choe & Min, 2009). تغییر رنگ به‌طور کلی با تغییرات در غلظت رنگدانه و ساختار عضلانی همراه است. پروتئازهای درون‌زا تا حد زیادی مسئول از دست دادن کیفیت بافت در مراحل اولیه فساد بودند و بوی بد نتیجه فعالیت میکروبی است (Hultmann & Rustad, 2004). دمای پایین توانست سبب نکه‌داشتن کیفیت خوب و افزایش ماندگاری میگوها شود.

میزان SEP در دماهای پایین‌تر مقدار کمتری با اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) نسبت به دماهای بالاتر داشته است. شکل‌گیری باندهای هیدروفوبیک، باندهای هیدروژن، باندهای دی‌سولفید می‌تواند در دناتور شدن پروتئین‌ها نقش داشته باشند که در نهایت سبب کاهش SEP می‌شود. مقدار اولیه K در نمونه‌های میگو ۱۱/۱۰ درصد بود (شکل ۱) که کمتر از مطالعه Xu و همکاران (۲۰۱۷) (۱۸/۱۵ درصد) و Kalleda و همکاران (۲۰۱۳) (۱۸/۹۷ درصد) بود. در انتهای دوره نگهداری میزان K در دماهای ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۱/۷۵، ۲۲ و ۱۵/۰۹ درصد بود. با افزایش دما مقدار K زیاد شد و با تفاوت معنی‌دار بین ۱۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد ( $P < 0.05$ ) اما از روز ۹۰ خصوصاً در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد این افزایش، سرعت بیشتری داشت. به این معنی که دمای پایین‌تر می‌تواند سرعت اتولیز میگو را کاهش دهد و فعالیت ۵-نوکلئوتیداز را مهار کند و سرعت پایین‌تر در تخریب ATP می‌تواند منجر به افزایش نرخ پایین‌تر K-value شود (Abu-Bakar *et al.*, 2008). تغییرات میزان K در مطالعه‌های مختلف، ممکن است به دلیل تفاوت در گونه‌ها، شرایط حمل‌ونقل و روش‌های کشتار باشد. بالاترین حد قابل قبول میزان K در ماهیان تازه ۷۰ درصد است (IMP, 1959). در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد در روز ۱۸۰، میزان K از حد مجاز فراتر رفت، ولی در سایر دماها این میزان پایین‌تر از حد مجاز بود. دماهای پایین از تجزیه ATP جلوگیری می‌کند.

EC یک شاخص مناسب است که می‌تواند بر تدری، ظرفیت نگهداری آب و سایر شاخص‌های کیفی غذاهای دریایی تأثیر گذارد. در هفته ۲۲ بیشترین میزان این فاکتور کیفی در میگوهای مشاهده شد که در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد نگهداری شده بودند (۳/۱۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر). در دماهای گرم‌تر میزان EC بیشتر گزارش شد. این ممکن است به دلیل مواد یونی تولید شده توسط باکتری‌ها باشد که می‌تواند منجر به افزایش EC شود (Estévez, 2011). علاوه بر این، بافت‌های عضلانی تجزیه شده ممکن است بر شیره سلولی و بافت‌های خارج‌سولوی اطراف آن تأثیر گذارند، که می‌تواند منجر به افزایش EC نیز شود (Zhu *et al.*, 2015). دماهای پایین می‌تواند تا حدی از جمعیت میکروبی و تجزیه بافت‌های عضلانی جلوگیری کنند، بنابراین افزایش EC در میگوهای که در این دماها منجمد شده بودند، آهسته بود. چندین محقق گزارش کردند که رسانایی افزایش یافته

تمام دماها به دست آمد. حداکثر مجموع مقادیر  $R^2$  برای ۴ دما به عنوان شاخص انتخابی استفاده شد (جدول ۱).

تجزیه و تحلیل مدل آرنیوس با جایگزینی داده‌های تجربی از هر شاخص به معادله‌های تابع کیفیت، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و معادله رگرسیون خطی برای

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی شاخص‌های متفاوت کیفی میگوی سفید غربی وانامی در دماهای مختلف نگهداری

P-value	RMSE	$\sum R^2$	$R^2$	ضریب ثابت معادله	فرمول برازش	دما (درجه سانتی‌گراد)	معادله سینتیکی	شاخص
<۰/۰۰۰۱	۱/۹۹	۳/۵۴۴۲	۰/۹۷۶۲	۰/۱۷۹۸	$y = 0.1798x + 5.9844$	-۱۵	سطح اول	بازهای نیتروزن فرار کل (میلی گرم نیتروزن بر ۱۰۰ گرم)
<۰/۰۰۲۴	۱/۹۱		۰/۸۶۵۸	۰/۰۶۸۲	$y = 0.0682x + 6.746$	-۲۵		
<۰/۰۰۱۵	۱/۱۵		۰/۸۸۶۴	۰/۰۴۵۱	$y = 0.0451x + 6.4538$	-۳۵		
<۰/۰۰۵۳	۱/۲۳		۰/۸۱۵۸	۰/۰۳۶۳	$y = 0.0363x + 6.2214$	-۴۵		
<۰/۰۰۱۵	۰/۸۹	۳/۳۱۷۷	۰/۸۸۸۲	۰/۰۱۰۳	$y = 0.0103x + 1.994$	-۱۵	سطح اول	
<۰/۰۰۵۳	۰/۸۲		۰/۸۱۶۶	۰/۰۰۶۴	$y = 0.0064x + 1.9062$	-۲۵		
<۰/۰۰۴۹	۰/۸۲		۰/۸۲۱۴	۰/۰۰۴۹	$y = 0.0049x + 1.8606$	-۳۵		
<۰/۰۰۷۳	۰/۱۶		۰/۷۹۱۵	۰/۰۰۴۳	$y = 0.0043x + 1.8214$	-۴۵		
<۰/۰۰۱۳	۲/۹۹	۳/۶۵۹۷	۰/۹۴۰۸	۰/۱۸۹۸	$y = 0.1898x + 8.3005$	-۱۵	سطح صفر	شاخص K (درصد)
<۰/۰۰۰۱	۰/۶۹		۰/۹۶۹۹	۰/۰۵۵۳	$y = 0.0553x + 10.826$	-۲۵		
<۰/۰۰۴۳	۰/۷۳		۰/۸۳۱	۰/۰۲۲۷	$y = 0.0227x + 10.905$	-۳۵		
<۰/۰۰۰۷	۰/۵۰		۰/۹۱۸	۰/۰۲۳۵	$y = 0.0235x + 10.363$	-۴۵		
<۰/۰۰۰۱	۰/۰۴	۳/۷۴۸۴	۰/۹۹۴۹	۰/۰۰۸	$y = 0.0086x + 2.3744$	-۱۵	سطح اول	
<۰/۰۰۰۱	۰/۰۳		۰/۹۸۴	۰/۰۰۳۵	$y = 0.0035x + 2.4202$	-۲۵		
<۰/۰۰۳۶	۰/۰۵		۰/۸۴۲۴	۰/۰۰۱۷	$y = 0.0017x + 2.3969$	-۳۵		
<۰/۰۰۰۵	۰/۰۴		۰/۹۲۷۱	۰/۰۰۱۹	$y = 0.0019x + 2.3488$	-۴۵		
<۰/۰۰۰۱	.	۳/۹۱۱۲	۰/۹۹۷۲	۰/۰۰۰۵۳	$y = 0.0005x + 0.0329$	-۱۵	درجه دوم	ارزبای حسسی
<۰/۰۰۰۳	.		۰/۹۷۲۷	۰/۰۰۰۴۲۷	$y = 0.0004x + 0.0311$	-۲۵		
<۰/۰۰۰۱	.		۰/۹۶۹	۰/۰۰۰۳۴۵	$y = 0.0003x + 0.0291$	-۳۵		
<۰/۰۰۰۱	.		۰/۹۷۲۳	۰/۰۰۰۲۴۸	$y = 0.0002x + 0.0299$	-۴۵		
۰/۰۰۲۲	.	۳/۴۸۱	۰/۸۷۰۲	۰/۰۰۰۱۳۱	$y = 0.0001x + 0.0058$	-۱۵	درجه دوم	بروتشتن های قابل استخراج از نمک (درصد)
۰/۰۰۵۴	.		۰/۸۱۵۱	۰/۰۰۰۰۹۴۲۳	$y = 9E-05x + 0.0068$	-۲۵		
۰/۰۰۲۷	.		۰/۸۵۷۵	۰/۰۰۰۰۲۱۵۴	$y = 2E-05x + 0.0095$	-۳۵		
۰/۰۰۰۳	.		۰/۹۳۸۲	۰/۰۰۰۰۱۱۲۹۳	$y = 1E-05x + 0.0098$	-۴۵		
۰/۰۰۲۱	۰/۱۵	۲/۶۱۹۸	۰/۸۷۰۷	۰/۰۰۵۴	$y = 0.0054x + 2.2918$	-۱۵	سطح صفر	هدایت الکتریکی (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر)
۰/۰۳۳۴	۰/۱۷		۰/۶۲۸۶	۰/۰۰۳۱	$y = 0.0031x + 2.3071$	-۲۵		
۰/۰۲۸۹	۰/۱۴		۰/۶۴۸	۰/۰۰۲۶	$y = 0.0026x + 2.2775$	-۳۵		
۰/۰۸۸۳	۰/۱۲		۰/۴۷۱۶	۰/۰۰۱۶	$y = 0.0016x + 2.3321$	-۴۵		
۰/۰۰۴۲	۰/۰۶	۲/۵۶۳۸	۰/۸۳۲۶	۰/۰۰۰۲	$y = 0.002x + 0.8299$	-۱۵	سطح اول	
۰/۰۳۶۶	۰/۰۷		۰/۶۱۶۱	۰/۰۰۱۳	$y = 0.0013x + 0.8315$	-۲۵		
۰/۰۲۹۴	۰/۰۶		۰/۶۴۵۹	۰/۰۰۱۱	$y = 0.0011x + 0.8207$	-۳۵		
۰/۰۸۹۵	۰/۰۵		۰/۴۶۹۲	۰/۰۰۰۷	$y = 0.0007x + 0.8444$	-۴۵		
۰/۰۵۸۶	۰/۱۹	۱/۲۶۳۳	۰/۵۴۳۷	۰/۰۰۲۹	$y = 0.0029x + 1.3932$	-۱۵	سطح صفر	اسید تیوبارینتوریک مالون‌الدئید بر کیلوگرم نمونه)
۰/۰۸۷۱	۰/۱۹		۰/۴۷۴۲	۰/۰۰۲۵	$y = 0.0025x + 1.4007$	-۲۵		
۰/۵۰۶۶	۰/۱۲		۰/۰۹۲۸	۰/۰۰۰۵	$y = 0.0005x + 1.2157$	-۳۵		
۰/۳۸۶۳	۰/۱۲		۰/۱۵۲۶	۰/۰۰۰۷	$y = 0.0007x + 1.2254$	-۴۵		
۰/۰۶۹۱	۰/۱۴	۱/۲۴۹۴	۰/۵۱۵۷	۰/۰۰۰۲	$y = 0.002x + 0.312$	-۱۵	سطح اول	
۰/۰۹۳۹	۰/۱۳		۰/۴۶۰۱	۰/۰۰۱۸	$y = 0.0018x + 0.3175$	-۲۵		
۰/۴۷۲۱	۰/۰۹		۰/۱۰۷۸	۰/۰۰۰۵	$y = 0.0005x + 0.1882$	-۳۵		
۰/۳۶۵۴	۰/۰۹		۰/۱۶۵۸	۰/۰۰۰۶	$y = 0.0006x + 0.1979$	-۴۵		



تغییرات سینتیکی با کمک معیارهای  $R^2$  و RMSE انتخاب گردید. براساس نتایج TVB-N در ۱۸۰ روز نگهداری در دماهای مختلف، آنالیز رگرسیون خطی سطح صفر و تحلیل رگرسیون خطی سطح اول انجام و برای محاسبه ثابت سرعت واکنش، ضرایب تعیین رگرسیون خطی، همان‌طورکه در **جدول (۱)** نشان داده شده است، برازش شد. می‌توان دریافت که مجموع ضرایب تعیین رگرسیون خطی سطح صفر بیشتر از ضرایب تعیین رگرسیون خطی سطح اول بود، بنابراین برای تعیین TVB-N میگوی سفیدغربی منجمد، برازش رگرسیون خطی جنبشی سطح صفر سودمندتر بود. وابسته‌بودن افزایش TVB-N به دما به‌خوبی توسط مدل سینتیک آرنیوس نشان داده شد (**جدول ۱**). مدل درجه اول، برای توصیف شاخص K، در تمام دماهای مورد مطالعه به‌خوبی نشان داده شده است.

مدل درجه دوم برای توصیف شاخص SA و SEP بهترین توصیف را داشت. طبق نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌توان بیان کرد که افزایش دما باعث کاهش SA و SEP میگوهای منجمد شد. بنابراین میزان k این پارامترها منفی شد و به  $\ln(k)$  تبدیل شد. از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین ۴ دمای مورد مطالعه در ۱۸۰ روز نگهداری در مورد کیفیت فیله میگو مشاهده گردید ( $P < 0.05$ )، (**شکل ۲**).

داده‌های تجربی برای هر شاخص به فرمول تحلیل رگرسیون غیرخطی جایگزین شد و انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) و عامل پیش‌نمایی ( $k_0$ ) هر شاخص به دست‌آمد (**جدول ۲**). انرژی فعال‌سازی برای SA، TVB-N، K، SEP، TBARS و EC به ترتیب ۱۲/۲۳، ۱۳/۹۹، ۲۴/۲۵، ۴۳/۳۱، ۲۳/۸۱ و ۱۶/۲۳ کیلوژول بر مول به دست‌آمد. عامل پیش‌نمایی یا  $k_0$  برای فاکتورهای بالا به ترتیب ۵۱۲/۱۴۱، ۶/۲۶۵، ۰/۱۶۱، ۰/۳۲۰، ۸۷۶۴۰/۳۲۰ و ۱۳۵/۹۵۲ و ۳/۷۲۰ درصد حاصل شد. با جایگزینی انرژی فعال‌سازی و عوامل پیش‌نمایی در فرمول، رابطه (۱۷) براساس هر شاخص به دست‌آمد. براساس ضریب پیش‌نمایی ( $k_0$ )، انرژی فعال‌سازی واکنش ( $E_a$ ) و تعداد مراحل واکنش به دست‌آمده از آنالیز سینتیکی، معادله‌های مدل ماندگاری مطابق با تعداد مراحل واکنش به ترتیب به صورت رابطه (۱۷) تعیین شد:

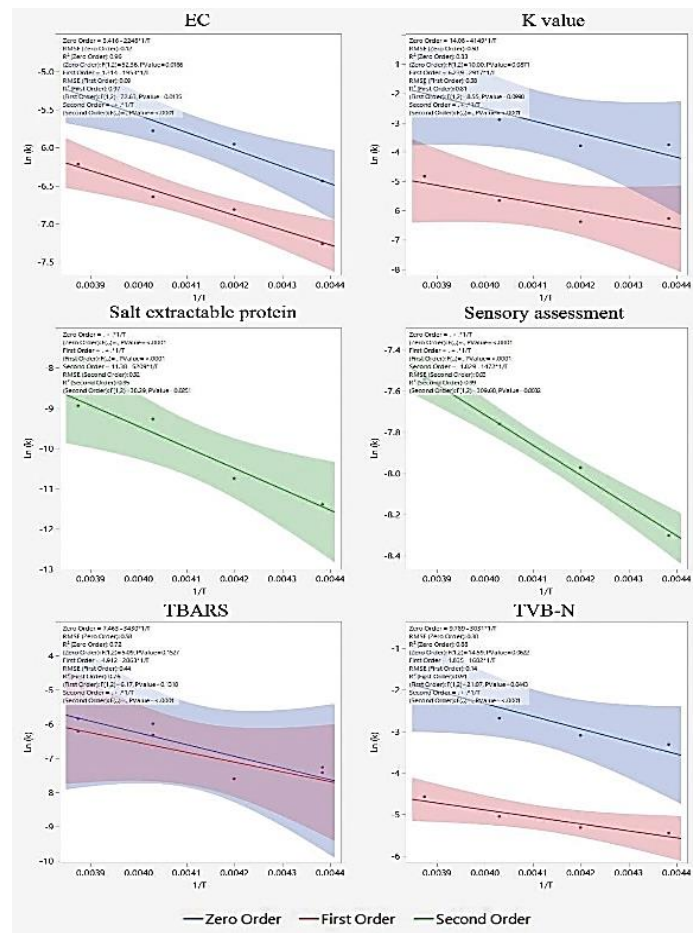
رابطه (۱۷)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}$$

براساس **جدول (۱)**، نتایج میزان شاخص‌های TVB-N، K، TBARS و EC اندازه‌گیری شده مربوط به میگوی وانامی نگهداری شده در ۴ دمای مختلف نگهداری به صورت مدل سینتیکی بیان شد و بهترین مدل جهت پیش‌بینی

جدول ۲- پارامترهای مدل آرنیوس برای فاکتورهای کیفی میگوی سفیدغربی نگهداری شده در دماهای متفاوت

شاخص	مدل	فرمول برازش	k	$R^2$	$E_a$ (کیلوژول بر مول)	RMSE	P-value	$k_0$
بازهای نیتروژنی فرار کل	مدل صفر	$y = -3031.3x + 9.7894$	-۳۰۳۱/۳	۰/۸۷۹۵	۲۵/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۶۲۲	۱۷۸۴۳/۵۹۷
	مدل درجه اول	$y = -1682.3x + 1.8349$	-۱۶۸۲/۳	۰/۹۱۳۳	۱۳/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۴۴۳	۶/۲۶۵
شاخص K	مدل صفر	$y = -4149.4x + 14.078$	-۴۱۴۹/۴	۰/۸۳۳۳	۳۴/۵۰	۰/۵۰	۰/۰۸۷۱	۱۷۴۱ ۱۳۰۰/۱۶۲
	مدل درجه اول	$y = -2916.5x + 6.2386$	-۲۹۱۶/۵	۰/۸۱۰۴	۲۴/۲۵	۰/۳۸	۰/۰۹۹۸	۵۱۲/۱۴۱
ارزیابی حسی	مدل درجه دوم	$y = -1471.6x - 1.8289$	-۱۴۷۱/۶	۰/۹۹۳۶	۱۲/۲۳	۰/۰۳	۰/۰۰۳۲	۰/۱۶۱
پروتئین‌های قابل استخراج از نمک	مدل درجه دوم	$y = -5208.8x + 11.381$	-۵۲۰۸/۸	۰/۹۵۰۴	۴۳/۳۱	۰/۰۳۲	۰/۰۲۵۱	۸۷۶۴۰/۶۳۲
هدایت الکتریکی	مدل صفر	$y = -2247.6x + 3.4164$	-۲۲۴۷/۶	۰/۹۶۳۲	۱۸/۶۹	۰/۱۲	۰/۰۱۸۶	۳۰/۴۶۰
	مدل درجه اول	$y = -1952.7x + 1.3137$	-۱۹۵۲/۷	۰/۹۷۳۲	۱۶/۲۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳۹	۳/۷۲۰
اسید تیوباربتوریک	مدل صفر	$y = -3430.3x + 7.4628$	-۳۴۳۰/۳	۰/۷۱۷۹	۲۸/۵۲	۰/۵۸	۰/۱۵۲۷	۱۷۴۲/۰۱۹
	مدل درجه اول	$y = -2863.3x + 4.9123$	-۲۸۶۳/۳	۰/۷۵۵۲	۲۳/۸۱	۰/۴۴	۰/۱۳۱	۱۳۵/۹۵۲



شکل ۲- رابطه بین میزان تغییرات شاخص‌های کیفی عضله میگوی سفیدغربی منجمدشده در دماهای مختلف، دایره‌ها نشان‌دهنده  $\ln k$  و خطوط نشان‌دهنده منحنی برازش خطی است.

سانتی‌گراد از طریق دو مدل آرنیوس و RBF شبکه عصبی مصنوعی بررسی گردید. برای تأیید عملکرد برازش دو مدل،  $R^2$  و MSE بین مقادیر SA، EC، TVB-N، K، SEP و TBARS میگوهای نگهداری‌شده در دمای ۴۵- درجه سانتی‌گراد مقایسه شدند. مقادیر MSE مدل RBF برای تمام شاخص‌های کیفی میگوی وانامی کمتر از مدل آرنیوس بود.

جدول ۴- MSE و  $R^2$  مدل آرنیوس و RBF شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی شاخص‌های کیفی میگوی سفیدغربی نگهداری‌شده در دمای ۴۵- درجه سانتی‌گراد

شاخص	مدل آرنیوس		مدل شبکه عصبی مصنوعی	
	MSE	$R^2$	MSE	$R^2$
TVB-N	۱/۵۱۵	۰/۸۱۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
SA	۰/۳۱۲	۱/۰۰۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
EC	۰/۰۰۴	۰/۸۱۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
SEP	۱/۵۸۶	۰/۸۶۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
TBARS	۰/۹۸۴	۰/۹۳۵	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
K	۰/۹۱۴	۰/۸۳۵	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

جدول ۳- MSE و  $R^2$  مدل RBF با گستره‌های متفاوت

گستره	MSE	$R^2$
۰/۵	۰/۰۲۱۵۶	۰/۹۹۶۴
۱	۰/۳۲۳۶۱	۰/۹۱۵۹
۲	۰/۱۶۱۰۲	۰/۹۷۷۵
۳	۰/۰۱۱۴۱	۰/۹۹۸۱
۴	۰/۲۳۵۷۶	۰/۹۵۲۳
۵	۰/۲۷۸۴۰	۰/۹۵۴۵
۶	۰/۲۸۷۶۳	۰/۹۵۳۱
۷	۰/۲۰۱۴۸	۰/۹۵۴۲
۸	۰/۳۴۵۶۱	۰/۹۵۶۷
۹	۰/۲۳۵۸۹	۰/۹۵۲۴
۱۰	۰/۱۵۷۸۱	۰/۹۵۲۱

تجزیه و تحلیل مدل شبکه عصبی مصنوعی

براساس نتایج جدول (۳)،  $R^2$  و MSE مدل RBF شبکه عصبی مصنوعی تحت گستره‌های متفاوت که محاسبه شده است، را نشان می‌دهد. کمترین MSE محاسبه شده ۰/۱۱۴۱ بود که  $R^2$  آن ۰/۹۹۸۱ به دست آمد. براساس جدول (۴) کیفیت میگوی سفیدغربی در دمای ۴۵- درجه

جدول ۵- مقادیر پیش‌بینی‌شده و آزمایشگاهی شاخص‌های کیفی میگوی سفید‌غریبی نگهداری‌شده در دمای ۴۵- درجه سانتی‌گراد

شاخص	زمان نگهداری	مقدار اندازه‌گیری‌شده	مقدار پیش‌بینی‌شده		درصد خطا
			مدل آرنیوس	مدل شبکه عصبی مصنوعی	
بازهای نیتروژنی فرار کل (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم)	۰	۵/۳۳	۹/۲۳	۵/۳۳	-۷۳/۱۷
	۳۰	۶/۴۸	۵/۵۰	۶/۴۸	۱۵/۱۲
	۶۰	۹/۴۰	۱۱/۳۶	۹/۴۰	-۲۰/۸۵
	۹۰	۱۰/۵۰	۱۳/۳۳	۱۰/۵۰	-۲۶/۹۵
	۱۲۰	۱۱/۷۲	۱۱/۰۱	۱۱/۷۲	۲/۲۸
	۱۵۰	۱۱/۹۱	۱۳/۸۵	۱۱/۹۱	-۱۶/۲۸
	۱۸۰	۱۱/۱۲	۱۰/۰۱	۱۱/۱۲	۹/۹۸
پروتئین‌های قابل استخراج از نمک (درصد)	۰	۹۹/۶۷	۹۹/۶۷	۹۹/۶۷	۰/۰۰
	۳۰	۹۸/۲۰	۹۷/۴۰	۹۸/۲۰	۰/۸۲
	۶۰	۹۸/۶۷	۹۸/۱۲	۹۸/۶۷	۰/۵۵
	۹۰	۹۲/۶۷	۹۴/۰۲	۹۲/۴۲	-۱/۴۵
	۱۲۰	۸۹/۷۲	۸۹/۹۲	۸۹/۷۰	-۰/۲۲
	۱۵۰	۸۶/۶۴	۹۰/۱۲	۸۶/۷۱	-۴/۰۱
	۱۸۰	۸۶/۲۰	۹۰/۰۲	۸۶/۶۲	-۵/۵۹
شاخص K (درصد)	۰	۱۰/۷۵	۱۰/۵۷	۱۰/۷۵	۰/۰۰
	۳۰	۱۱/۳۵	۱۴/۳۰	۱۱/۳۵	-۲۵/۹۹
	۶۰	۱۱/۱۳	۱۳/۴۱	۱۱/۱۳	-۲۰/۴۸
	۹۰	۱۲/۸۶	۱۴/۳۱	۱۲/۸۶	-۱۱/۲۷
	۱۲۰	۱۳/۱۳	۱۴/۱۸	۱۳/۱۳	-۷/۹۹
	۱۵۰	۱۳/۳۶	۱۳/۰۹	۱۳/۳۶	۲/۰۲
	۱۸۰	۱۵/۳۱	۱۵/۰۳	۱۵/۳۱	۱/۸۶
اسید تیوباربتوریک (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۰/۰۰
	۳۰	۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۴	-۰/۷۴
	۶۰	۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۲۱	۰/۰۰
	۹۰	۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۷	۰/۰۰
	۱۲۰	۱/۴۵	۱/۴۶	۱/۴۵	-۰/۶۸
	۱۵۰	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۰/۰۰
	۱۸۰	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۲۳	-۰/۸۱
هدایت الکتریکی (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر)	۰	۲/۱۶	۲/۱۶	۲/۱۶	۰/۰۰
	۳۰	۲/۴۹	۲/۴۸	۲/۴۹	۰/۴۰
	۶۰	۲/۴۶	۲/۴۲	۲/۴۶	۱/۶۲
	۹۰	۲/۵۷	۲/۶۱	۲/۵۷	-۱/۵۵
	۱۲۰	۲/۶۱	۲/۷۷	۲/۶۲	-۶/۱۳
	۱۵۰	۲/۴۷	۲/۶۳	۲/۴۷	-۶/۴۷
	۱۸۰	۲/۵۷	۲/۵۷	۲/۵۷	۰/۰۰
ارزیابی حسی	۰	۳۰/۳۳	۳۰/۳۳	۳۰/۳۳	۰/۰۰
	۳۰	۲۷/۳۳	۲۷/۳۳	۲۷/۳۳	۰/۰۱
	۶۰	۲۳/۰۰	۲۲/۰۰	۲۳/۰۰	۴/۳۴
	۹۰	۱۹/۳۳	۱۹/۴۳	۱۹/۳۳	-۰/۰۵
	۱۲۰	۱۷/۶۷	۱۸/۱۲	۱۷/۶۷	-۲/۵۴
	۱۵۰	۱۵/۳۳	۱۳/۳۳	۱۵/۳۳	۱۳/۰۴
	۱۸۰	۱۲/۶۷	۱۲/۵۸	۱۲/۶۷	۰/۷۱

شرایط انجماد از ۱۵- تا ۴۵- درجه سانتی‌گراد استفاده کرد. با اندازه‌گیری شاخص‌های کیفی SA، TVB-N، K-value، TBARS و EC میگوهای ذخیره‌شده در دمای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد، نشان داده شد که با گذشت زمان، کیفیت میگو به تدریج کاهش می‌یابد. هرچه درجه حرارت بالاتر باشد، میگو سریع‌تر فاسد و خراب می‌شود. با مقایسه مدل آرنیوس با مدل RBF برای پیش‌بینی کیفیت میگو، نشان داده شد که محدوده خطای نسبی مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده مدل RBFNN ۱۰ درصد است. نتایج نشان داد مقادیر MSE مدل RBF در اکثریت فاکتورهای کیفی کمتر از مدل آرنیوس بودند.  $R^2$  فاکتورهای کیفی میگو منجمد مدل RBF به‌جز در مورد فاکتور SA، بیشتر از آرنیوس بود.

### نتیجه‌گیری

تغییرات کیفیت فیله میگوی سفیدغری متأثر از دما و زمان نگهداری بود. فیله میگوهای نگهداری‌شده در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد TVB-N، PV، K-value و TBARS بیشتری نسبت به سایر دماها نشان داد. کاهش کیفیت پروتئین بیشتر تحت تأثیر زمان نگهداری بود. به‌طور کلی، مدل RBF ارزیابی بهتری از تغییرات کیفیت میگو در دماهای ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد طی ۶ ماه نگهداری در شرایط انجماد در مقایسه با مدل آرنیوس نشان داد.

### تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم از حمایت‌های معنوی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی-واحد اهواز تشکر و قدردانی نماییم.

### مشارکت نویسندگان

الهام عیسوند حیدری: جمع‌آوری داده‌ها، نوشتن پیش‌نویس مقاله، آنالیز داده‌ها؛ لاله رومیانی: تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، ارائه ایده پژوهشی و طراحی مطالعه، بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخه نهایی.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده فاکتورهای کیفی میگوی وانامی در دمای ۴۵- درجه سانتی‌گراد در مدت زمان ۱۸۰ روز نگهداری توسط دو مدل موردبررسی و محاسبه درصد خطای هر مدل در جدول (۵) مشاهده می‌شود. برای مدل آرنیوس دامنه خطای نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده برای فاکتورهای کیفی TVB-N، SA، EC، TBARS، K و SEP به ترتیب ۱۷/۱۲-، ۷۳/۱۵-، ۱۳/۰۴-، ۲/۵۴-، ۶/۴۷-، ۰/۶۲-، ۰/۸۱-، ۰/۰۰-، ۲۵/۹۹-، ۲/۰۲- و ۵/۵۹- درصد قرار داشت. در مورد مدل RBF، دامنه خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده برای فاکتورهای کیفی TVB-N، SA، EC، TBARS، K و SEP به ترتیب ۰/۰۰-، ۰/۰۰-، ۰/۰۰-، ۰/۰۰-، ۰/۳۸-، ۰/۰۰-، ۰/۰۰- و ۰/۰۰- درصد قرار داشت.

مقادیر آزمایشی و تجربی فاکتورهای مطالعه‌شده بر کیفیت میگوهای منجمدشده در دماهای متفاوت برای ایجاد مدل RBF شبکه عصبی مصنوعی به‌کارگرفته شدند. گسترش و تعداد نورون‌ها در لایه پنهان با آزمایش MSE تعیین شد (جدول ۳). کمترین MSE برای ادامه انتخاب شد. عملکرد پیش‌بینی‌شده مدل RBF با مقایسه مقادیر پیش‌بینی و مقادیر تجربی ارزیابی شد. خطاهای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر تجربی میگوهای منجمد در ۱۵-، ۲۵-، ۳۵- و ۴۵- درجه سانتی‌گراد در جدول (۵) ارائه شده است. خطاهای نسبی TVB-N، K، EC، TBARS و SA در دماهای مختلف تمامی در محدوده خطای  $\pm 5$  درصد بودند. همان‌طور که توسط Kaymak و Ertekin (۲۰۰۵) گزارش شد، مدلی با خطاهای نسبی زیر ۱۰ درصد می‌تواند قابل قبول باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدل RBF از مقبولیت بالایی برخوردار است و می‌تواند به‌طور قابل اعتمادی برای تخمین کیفیت میگوهای منجمد در دماهای مختلف انجماد اعمال شود. در مطالعه دیگری نشان داده شد که مدل RBF توانست با دقت ماندگاری میگو را پیش‌بینی و کیفیت چربی و پروتئین را در دماهای ۲۰- تا ۴۰- درجه سانتی‌گراد ارزیابی کند (Shi et al., 2017). برای ارزیابی عملکرد برازش کلی مدل RBF برای هر شاخص در دماهای مختلف، MSE و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی‌شده محاسبه شد. کمترین MSE و بیشترین  $R^2$  در این مطالعه نشان‌دهنده عملکرد برازش کامل مدل RBF است. بنابراین، مدل ایجادشده را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت پروتئین و چربی در میگوی وانامی در طول نگهداری در

## منابع

- Abu-Bakar, F., Salleh, A., Razak, C., Basri, M., Ching, M., & Son, R. (2008). Biochemical changes of fresh and preserved freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*) during storage. *Int Food Res J*, 15(2), 181-191.
- Bhagya Raj, G., & Dash, K. K. (2022). Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(10), 2756-2783. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1858398>
- Byrne, C., Troy, D., & Buckley, D. (2000). Postmortem changes in muscle electrical properties of bovine M. longissimus dorsi and their relationship to meat quality attributes and pH fall. *Meat science*, 54(1), 23-34. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00055-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00055-8)
- Cadun, A., Kışla, D., & Çaklı, Ş. (2008). Marination of deep-water pink shrimp with rosemary extract and the determination of its shelf-life. *Food Chemistry*, 109(1), 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.021>
- Choe, E., & Min, D. B. (2009). Mechanisms of antioxidants in the oxidation of foods. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 8(4), 345-358. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00085.x>
- De Abreu, D. P., Losada, P. P., Maroto, J., & Cruz, J. (2011). Natural antioxidant active packaging film and its effect on lipid damage in frozen blue shark (*Prionace glauca*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12(1), 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.12.006>
- Erkan, N., & Özden, Ö. (2008). Quality assessment of whole and gutted sardines (*Sardina pilchardus*) stored in ice. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(9), 1549-1559. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01579.x>
- Estévez, M. (2011). Protein carbonyls in meat systems: A review. *Meat science*, 89(3), 259-279. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.025>
- Goncalves, A. A., & Santos, T. C. L. (2019). Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging. *LWT*, 99, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.083>
- Haghshenas, M., Hosseini, H., Nayebzadeh, K., Khanghah, A., Kakesh, B., & Fonood, R. (2014). Production of prebiotic functional shrimp nuggets using  $\beta$ -glucan and reduction of oil absorption by carboxymethyl cellulose: Impacts on sensory and physical properties. *J. Aquacul. Res. Dev*, 5, 245-248. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000245>
- Hultmann, L., & Rustad, T. (2004). Iced storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*)—effects on endogenous enzymes and their impact on muscle proteins and texture. *Food Chemistry*, 87(1), 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.10.013>
- IMP, I. (1959). A new method for estimating the freshness of fish. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 24(9), 749.
- Jiang, Q., Gao, P., Liu, J., Yu, D., Xu, Y., Yang, F., . . . Xia, W. (2021). Endogenous proteases in giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*): Changes and its impacts on texture deterioration during frozen storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(11), 5824-5832. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15197>
- Kalleda, R. K., Han, I. Y., Toler, J. E., Chen, F., Kim, H. J., & Dawson, P. L. (2013). Shelf life extension of shrimp (white) using modified atmosphere packaging. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 63(2).
- Kaymak-Ertekin, F., & Gedik, A. (2005). Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. *Journal of Food Engineering*, 68(4), 443-453. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.022>
- Lan, W., Yang, X., Gong, T., & Xie, J. (2023). Predicting the shelf life of *Trachinotus ovatus* during frozen storage using a back propagation (BP) neural network model. *Aquaculture and Fisheries*, 8(5), 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.12.016>
- Lepetit, J., Salé, P., Favier, R., & Dalle, R. (2002). Electrical impedance and tenderisation in bovine meat. *Meat science*, 60(1), 51-62. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(01\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(01)00104-8)

- Liu, X., Jiang, Y., Shen, S., Luo, Y., & Gao, L. (2015). Comparison of Arrhenius model and artificial neuronal network for the quality prediction of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during storage at different temperatures. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.030>
- Okpala, C. O. R. (2015). The physicochemical changes of farm-raised Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as influenced by iced storage. *Food and Nutrition Sciences*, 6(10), 906. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.610095>
- Pan, C., Chen, S., Hao, S., & Yang, X. (2019). Effect of low-temperature preservation on quality changes in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6121-6128. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9905>
- Shi, J., Zhang, L., Lu, H., Shen, H., Yu, X., & Luo, Y. (2017). Protein and lipid changes of mud shrimp (*Solenocera melantho*) during frozen storage: Chemical properties and their prediction. *International Journal of Food Properties*, 20(sup2), 2043-2056. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1361973>
- Song, Y., Luo, Y., You, J., Shen, H., & Hu, S. (2012). Biochemical, sensory and microbiological attributes of bream (*Megalobrama amblycephala*) during partial freezing and chilled storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(1), 197-202. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4572>
- Soyer, A., Özalp, B., Dalmış, Ü., & Bilgin, V. (2010). Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat. *Food Chemistry*, 120(4), 1025-1030. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.042>
- Sun, K., Pan, C., Chen, S., Liu, S., Hao, S., Huang, H., . . . Xiang, H. (2023). Quality changes and indicator proteins of *Litopenaeus vannamei* based on label-free proteomics analysis during partial freezing storage. *Current Research in Food Science*, 6, 100415. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.100415>
- Tsironi, T., Dermesonlouglou, E., Giannakourou, M., & Taoukis, P. (2009). Shelf life modelling of frozen shrimp at variable temperature conditions. *LWT-Food Science and Technology*, 42(2), 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.07.010>
- Tsironi, T. N., Stoforos, N. G., & Taoukis, P. S. (2020). Quality and Shelf-Life Modeling of Frozen Fish at Constant and Variable Temperature Conditions. *Foods*, 9(12), 1893. <https://doi.org/10.3390/foods9121893>
- Van Boekel, M. (1996). Statistical aspects of kinetic modeling for food science problems. *Journal of Food Science*, 61(3), 477-486. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb13138.x>
- Wang, H., Kong, C., Li, D., Qin, N., Fan, H., Hong, H., & Luo, Y. (2015). Modeling quality changes in brined bream (*Megalobrama amblycephala*) fillets during storage: comparison of the Arrhenius model, BP, and RBF neural network. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 2429-2443. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1595-8>
- Wang, H., Zheng, Y., Shi, W., & Wang, X. (2022). Comparison of Arrhenius model and artificial neuronal network for predicting quality changes of frozen tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Food Chemistry*, 372, 131268. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131268>
- Wang, L., Chen, Z., Yang, G., Sun, Q., & Ge, J. (2020). An interval uncertain optimization method using back-propagation neural network differentiation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 366, 113065. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113065>
- Wu, H., Wang, Z., Luo, Y., Hong, H., & Shen, H. (2014). Quality changes and establishment of predictive models for bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets during frozen storage. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3381-3389. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1340-8>
- Xu, Z., Liu, X., Wang, H., Hong, H., & Luo, Y. (2017). Comparison between the Arrhenius model and the radial basis function neural network (RBFNN) model for predicting quality changes of frozen shrimp (*Solenocera melantho*). *International Journal of Food Properties*, 20(11), 2711-2723. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1248292>
- Yin, C., Wang, J., Qian, J., Xiong, K., & Zhang, M. (2022). Quality changes of rainbow trout stored under different packaging conditions and mathematical modeling for predicting the shelf life. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100824. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100824>

- Zhang, L., Li, X., Lu, W., Shen, H., & Luo, Y. (2011). Quality predictive models of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) at different temperatures during storage. *Food control*, 22(8), 1197-1202. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.017>
- Zhu, S., Luo, Y., Feng, L., & Bao, Y. (2015). Establishment of kinetic models based on electrical conductivity and global stability index for predicting the quality of allogynogenetic crucian carps (*C arassius auratus gibelio*) during chilling storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(2), 167-174. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12218>

## Prediction of Shelf life of Vannamei Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Fillet in Freezing Conditions Based on Arrhenius Model and Artificial Neural Network

Elham Isvand Heydari<sup>1</sup>, Laleh Roomiani<sup>2\*</sup>

1- Department of Food Sciences and Technology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- Department of Fisheries, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

\* Corresponding author (laleh.roomiani@iau.ac.ir)

### Abstract

In order to the shelf-life prediction of white shrimp fillet (*Litopenaeus vannamei*) using Arrhenius mathematical model and Artificial Neural Network at different temperatures (-15, -25, -35, -45 °C), the qualitative changes of the fillet including salt extractable protein (SEP), K index, total volatile nitrogen bases (TVB-N), peroxide index (PV), barbituric acid (TBARS), electrical conductivity (EC) and sensory evaluation (SA) were investigated. For the Arrhenius model, the relative error range between the measured and predicted values for the quality factors i.e. TVB-N, SA, EC, TBRAS, K and SEP was -73.17-15.12, -2.54-13.04, -6.47-1.62, -0.81-0.00, -25.99-2.02, -5.59-0.82%, respectively. Regarding to Artificial Neural Network model, the relative error range between the predicted and measured values for the quality factors TVB-N, SA, EC, TBRAS, K and SEP were 0.00, 0.00, -0.38-0.00, 0.00, 0.00 and -0.08-0.03%, respectively. The MSE values of the Artificial Neural Network model were lower than the Arrhenius model in most of the qualitative factors. The R<sup>2</sup> of the frozen shrimp quality factors of the Artificial Neural Network model was higher than the Arrhenius model, except for the SA factor. The artificial neural network model was able to better show the trend of changes in the quality of shrimp stored during the 6 months of the freezing period, at of -15 to -45 °C, compared to the Arrhenius model.

**Keywords:** Arrhenius model, Artificial Neural Network, *Litopenaeus vannamei*, Shelf life

