

key words

Expandable Polystyrene
Styrene -Butadiene-Sty-
rene Block Copolymer
Mechanical Strength
Artificial Neural Net-
works

Investigation of Influence of Styrene-Butadiene- Styrene Block Copolymer on the Properties of Expandable Polystyrene and Simulation of Laboratory Data via Artificial Neural Networks

Amir Mehralizadeh¹, Fahimeh Derakhshanfard^{2*}, Zohreh Ghazi Tabatabaei³

1 Department of Chemical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University,
Ahar, Iran

2 Department of Chemical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University,
Ahar, Iran

3 Department of Applied Chemistry, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar,
Iran

Abstract

Research subject: Expandable polystyrene (EPS) has many applications. This polymer is prepared by the radical polymerization. This material has many uses in packaging and insulation industries. Some of the properties of this polymer like low mechanical strength caused its applications to be limited. By adding some materials, these properties can be improved. Styrene-butadiene-styrene (SBS) block copolymer is one of these the materials that can improve quality of the EPS.

Research approach: In this research, EPS having different percentages of SBS (0, 0.01, 0.02, 0.03) in different conversion percentages (0.6, 0.63, 0.66, 0.69) has been prepared. Different tests like impact test, modular melt flow test, Vicat softening temperature test, Tensile at break test, K-value test, Rochwell hardness test and elongation at break test were done on the prepared polymer. Laboratory gained data has been simulated by multi-layer perceptron (MLP) method of artificial neural networks (ANN) and the simulated data covers the laboratory data perfectly.

Main Results: Investigating the tests showed that in constant percentages of SBS in EPS with increase in conversion percentage of EPS, the numerical amount of the tests increases except MFI test (low MFI number means better quality). By increasing SBS percentage in the EPS, the properties of polymer increases. In addition, the results of simulation showed that the laboratory data covers the simulated data perfectly. The data obtained from the results of this research can be used for predicting the data for the points which has not been tested. Adding SBS in different weight percentages of polystyrene in different conversion percentages has been used for the first time in this research in order to increase the properties of polystyrene. Laboratory data results in points which has not been tested has been acquired by applications of ANN.

*To whom correspondence should be addressed:
f.dfard@gmail.com

بررسی تأثیر کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن بر خصوصیات
پلی‌استایرن انبساطی و شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی با شبکه‌های عصبی
مصنوعی

امیر مهرعلیزاده^۱، فهیمه درخشان فرد^{۲*}، زهره قاضی طباطبایی^۳

۱ گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

۲ گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

۳ گروه شیمی کاربردی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: پلی‌استایرن انبساطی کاربرد گسترده‌ای دارد. این پلیمر به روش پلیمری‌شدن رادیکالی تهیه می‌شود. این ماده در صنایع بسته‌بندی و عایق‌کاری کاربرد فراوانی دارد. بعضی از ویژگی‌های این پلیمر از جمله استحکام مکانیکی پایین آن باعث شده تا کاربرد آن محدود شود. با اضافه کردن بعضی از مواد می‌توان ویژگی‌های این پلیمر را بهبود داد. کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن از جمله موادی هستند که با اضافه کردن آن بر پلی‌استایرن انبساطی می‌توان کیفیت پلیمر را بهبود داد.

یافته‌های تحقیق: در این مقاله، پلی‌استایرن انبساطی حاوی درصد‌های وزنی مختلف کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن (۰/۰۳ و ۰/۰۲، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳) در درصد تبدیل‌های مختلف پلی‌استایرن انبساطی (۰/۶۰، ۰/۶۳، ۰/۶۶ و ۰/۶۹ درصد) تهیه شده است. آزمون‌های مختلفی از جمله آزمون ضربه، شاخص جریان مذاب، سنجش میزان نرمی پلیمر، استحکام کشش در نقطه شکست، K-value، سنجش میزان سختی پلیمر، میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست بر روی پلیمر تولیدی انجام شد. داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP شبیه‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی به‌خوبی، داده‌های آزمایشگاهی را پوشش داد.

نتایج تحقیق: مطالعه آزمون‌ها نشان داد که در درصد‌های ثابت کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در پلی‌استایرن انبساطی، با افزایش درصد تبدیل پلی‌استایرن انبساطی به غیر از آزمون شاخص جریان مذاب (که پایین بودن آن نشان از کیفیت بالای پلیمر است)، مقدار عددی بقیه آزمون‌ها افزایش یافته است. افزایش درصد کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در پلی‌استایرن انبساطی، در درصد تبدیل‌های ثابت پلی‌استایرن انبساطی ویژگی‌های پلیمر را بهبود بخشیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که داده‌های آزمایشگاهی به‌خوبی نتایج شبیه‌سازی را پوشش می‌دهد. به کمک نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی می‌توان در نقاطی که آزمایش انجام نشده با نتایج شبیه‌سازی داده‌های مربوط را پیش‌گویی کرد. افزودن درصد‌های مختلف کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن به پلی‌استایرن انبساطی در درصد تبدیل‌های مختلف به‌منظور افزایش خواص پلی‌استایرن برای اولین بار در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج داده‌های آزمایشگاهی برای پیش‌گویی در نقاطی که آزمایش صورت نگرفته با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شده است.

پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای
سال پنجم، شماره ۲، نسخه ۱
تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۱۱۶-۱۰۵

کلمات کلیدی

پلی‌استایرن انبساطی

کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن

استحکام مکانیکی

پلیمری‌شدن

شبکه‌های عصبی مصنوعی

*مسئول مکاتبات:

f.dfard@gmail.com

۱ مقدمه

افزودن کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن (SBS)، به انواع پلی‌استایرن انبساطی (EPS) به خاطر داشتن عملکرد بهتر در مقایسه با همین پلیمر بدون افزودنی اهمیت فراوانی دارد [۱-۳]. EPS به دلیل داشتن خصوصیات مهم همیشه یکی از مهم‌ترین مواد بوده و همچنین در زمینه‌های فراوانی کاربرد دارد [۴]. امروزه، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در صنایع پلیمری کاربرد بسیار زیادی دارد و همچنین، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) امکان پیش‌بینی مقادیر ممکن شده است که به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای دستیابی به داده‌ها، بسیار کارآمد است [۵ و ۶]. در روش متداول تولید EPS، دو آغازگر متفاوت دارای دو درجه دمای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و تمامی مواد در همان مرحله اول پیمانه به راکتور افزوده می‌شوند. طولانی بودن مدت زمان پلیمری‌شدن و سختی‌های کنترل کردن فرایند پلیمری‌شدن از جمله مشکلات روش متداول است. برای رفع این مشکلات، روش تزریق چندمرحله‌ای آغازگر (MID) مورد استفاده قرار گرفت. در روش MID آغازگر مرحله اول، در چندین نوبت تزریق و دمای بالاتر در مقایسه با روش متداول، وارد راکتور می‌شود [۷]. نتایج تحقیقی نشان داده که بهترین عملکرد ترکیب‌های تازه، ترکیب ۲۰٪ Polypropylene/ SBS است و همچنین آزمون ترکیب شده دمای کم و آزمون حرارت دینامیکی، نشان‌دهنده تأثیر بهتر در شکنندگی بودن این ترکیب در دمای پایین بدون افزودن سازگارکننده است [۸]. با افزایش SBS، عملکرد پلیمر افزایش می‌یابد. همچنین مدول و گرانیروی آن با محتوای SBS افزایش یافته است [۹]. پلیمر ساخته شده از SBS نسبت به غشای پلی‌تترافلوئورواتیلن دارای غشایی با منافذ بزرگ‌تر و قطر لیفی بیشتری است و همچنین غشای SBS خروج نمک بهتری داشته است و مهم‌تر از همه این که می‌توان توسط فرایند ساده‌ای آن را ساخت. علاوه بر این، غشای SBS استحکام مکانیکی بهتری نسبت به غشای پلی‌تترافلوئورواتیلن داشته است [۱۰]. برای یافتن خصوصیات کامپوزیت‌های بر پایه دورریزهای پلی‌استایرن انبساطی که توسط ۲۰٪ وزنی الیاف تقویت شده است، خواص مکانیکی، گرمایی، رئولوژی و مورفولوژی آن مورد ارزیابی قرار گرفته شد. این تحقیق نشان داده که کامپوزیت‌های درست شده توسط زمینه‌های بازیافتی نشان‌دهنده پایداری گرمایی بیشتر و گرانیروی مذاب بیشتر در مقایسه با کامپوزیت‌های به‌دست آمده از زمینه‌های پایه است. فضای خالی دیده شده در میکروسکوپی الکترونی پویشی نشان می‌دهد که پیوستگی ضعیفی بین سطوح وجود دارد [۱۱]. خواص پودر کامپوزیت

چوب/ دورریزهای پلی‌استایرن انبساطی که توسط مقاوم‌ساز در برابر آتش اصلاح شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. پایداری ابعادی کلی در شکل جذب آب و قطر تورم با ویژگی مویی از نمونه‌ها با کامپوزیت‌های چوب / پلی‌استایرنی صنعتی قابل مقایسه بودند. کامپوزیت چوب / پلی‌استایرن حاوی دی آمونیوم فسفات (DAP) (diammonium phosphate) قابلیت بیشتری برای استفاده به عنوان محصولات کامپوزیتی دارای مقاوم‌ساز در برابر آتش نشان داد [۱۲]. در تحقیقی، حلالیت و نفوذ نرمال-پنتان در ترکیب‌های پلی-استایرن دارای وزن مولکولی کم و متیل‌متاکریلات با وزن مولکولی بالا مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی قابلیت ترکیب‌های آغشته شده به نرمال پنتان، از معادله حالت استفاده شد. نتایج، نشان‌دهنده توافق خوب میان داده‌های تجربی و تحلیل‌های عددی است [۱۳]. شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از گرانیروی نفت خام حاوی درصد‌های مختلف نانوذرات WO_3 ، TiO_2 ، Fe_2O_3 و ZnO با شبکه‌های عصبی مصنوعی (Radial Basis Function) RBF مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه مشخص کرد که شبکه‌های عصبی RBF به دلیل دارا بودن مبانی علمی مستحکم و همچنین قابلیت صاف کردن نویزها، از عملکرد مناسبی برخوردار است [۱۴]. برای استفاده دوباره از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و کاهش مشکلات زیست‌محیطی، دورریز PET در وزن‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵) با کوپلیمر اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) در شرایط مختلف از لحاظ دمایی، زمانی و سرعتی اکسترودر، با یکدیگر مخلوط شدند. نتایج نشان داد که در شرایط ثابت دما و زمان و سرعت اکسترودر، با افزایش میزان دورریز PET در ABS، مقادیر آزمون‌های ضربه‌ای و میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست کاهش می‌یابند و مقادیر شاخص جریان مذاب، شاخص نرمی پلیمر و شاخص زرد افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای حالتی که میزان دورریز PET در ABS ثابت است تغییرات برای آزمون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های آزمایشگاهی توسط ANN شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده پوشش کامل داده‌های آزمایشگاهی توسط نتایج شبیه‌سازی بود [۱۵].

در این مقاله، پلی‌استایرن انبساطی حاوی درصد‌های مختلف کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن (۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳) در درصد تبدیل‌های مختلف پلی‌استایرن انبساطی (۰/۶۰، ۰/۶۳، ۰/۶۶ و ۰/۶۹ درصد) تهیه شده است. بررسی نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد که تاکنون در این زمینه، مطالعه‌ای انجام نشده است. کارهای قبلی انجام شده مربوط به اضافه کردن کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در

جدول ۱ لیست مواد استفاده شده به همراه منابع تولید مواد
Table 1 List of used materials along with their sources

Material	Source
Deionized water	Tabriz Petrochemical Company (TPC)
Styrene monomer	Tabriz Petrochemical Company (TPC)
Styrene-butadiene-styrene (SBS) block copolymer	Arak Petrochemical Company
Tricalcium phosphate	Merck
Alkylbenzene sulfonate sodium soap	Merck
Dibenzoyl peroxide	Merck
Tertiary-butyl perbenzoate	Merck
Polyvinyl alcohol	Merck
Hydroxyethyl cellulose	Merck
Antioxidants	Merck
CK12	SUNPOR

با افزایش درصد کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در پلی استایرن انبساطی در درصد تبدیل‌های ثابت پلی‌استایرن انبساطی مقدار عددی آزمون ضربه، شاخص نقطه نرمی شدن، K-value، کشش در نقطه تسلیم، افزایش می‌یابد و مقدار عددی شاخص جریان مذاب، تنش در نقطه تسلیم و میزان آزمون سنجش سختی کاهش می‌یابد. علت این تغییرات آن است که حضور کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن به عنوان جزء لاستیکی، نرمی پلیمر را افزایش می‌دهد.

حین پلیمری‌شدن است که نتیجه افزایش استحکام مکانیکی در این حالات خیلی کم است [۵-۷]. در همه این پژوهش‌ها هدف از اضافه کردن کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن بهبود خاصیت پلیمر پلی‌استایرن انبساطی بوده است. آزمون‌های مختلفی بر روی پلیمر تولیدی انجام شده است. داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها با شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی به خوبی، داده‌های آزمایشگاهی را پوشش داده است.

جدول ۲ مقادیر مواد مورد استفاده
Table 1 Amounts of materials used

material	formulation	amount (g- %wt)
Deionized water	H ₂ O	510- 59.81
Styrene monomer	C ₈ H ₈	309- 36.2
SBS block copolymer	C ₁₂ H ₁₄	3.1 - 0.36
Tricalcium phosphate	Ca ₃ (PO ₄) ₂	12 - 1.407
Alkylbenzene sulfonate sodium soap	C ₁₆ H ₂₅ NaO ₃ S	8.184 - 0.95t
Dibenzoyl peroxide	C ₁₄ H ₁₀ O ₄	0.45 - 0.05
Tertiary-butyl perbenzoate	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	1.21 - 0.14
Polyvinyl alcohol	(C ₂ H ₄ O) _x	0.26 - 0.03
Hydroxyethyl cellulose	C ₂₉ H ₅₂ O ₂₁	0.195 - 0.02
Antioxidants	-----	0.33-0.34
CK12	-----	0.195

تولید شده با غلظت‌های مختلف آنتی‌اکسیدان از روش آزمون ASTM D-785 استفاده شد و دستگاه این آزمون ساخت شرکت WILSON ROCKWALL-Series ۲۰۰۰ بود. مقدار K-value نمونه‌ها توسط گرانیوی سنج، مدل BP-۲۲ ساخت Normandia-labo فرانسه اندازه‌گیری شد و از روش SUNPOR 7.2.4 (DIN EN ISO 1628-1) استفاده شد. در این روش، نسبت گرانیوی محلول پلیمر (دارای غلظتی برابر با ۵٪ وزنی) در تولوئن به گرانیوی تولوئن خالص اندازه‌گیری می‌شود و برای تعیین میزان K-value استفاده می‌شود. محاسبات میزان K-value بر پایه معادله (۱) است [۷].

$$k = \frac{1.51g\eta_r - 1 + \sqrt{1 + (\frac{2}{c} + 2 + 1.51g\eta_r)1.51g\eta_r}}{150 + 300c} \quad (1)$$

and K value = 1000 × k

در این معادله c غلظت محلول پلیمر (g/cm³) و η_r نسبت گرانیوی که به صورت t/t₀ مشخص شده که در آن t مدت زمان جریان خروجی محلول پلیمر از لوله موئین گرانیوی سنج و t₀ مدت زمان جریان حلال خالص است.

۳-۲ روش کار

سامانه آزمایشگاهی که در شکل ۱ نشان داده شده در ابتدا به دهانه راکتور و در شیشه‌ای آن، روغن سیلیکون مالیده می‌شود تا در دمای بالا بتوان در راکتور را از بدنه آن جدا کرد. به داخل راکتور ۵۱۰ میلی‌لیتر آب اضافه شده و سپس ۱۲ گرم تری‌کلوسیم‌فسفات (عامل تعلیق‌ساز) و ۶/۲ میلی‌لیتر صابون الکیل بنزن سولفونات سدیم افزوده شده و به مدت نیم ساعت با همزن با دور rpm ۴۰۰ هم زده می‌شود. کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در درصد وزنی‌های مختلف (۰، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳) داخل ۳۴۰ میلی‌لیتر استایرن حل شده و مقدار ۰/۳۳ گرم آنتی‌اکسیدان به آن اضافه شده و توسط همزن همزده شد تا کاملاً در آن حل شود. سپس مخلوط به داخل راکتور اضافه می‌شود. دمای راکتور تا ۸۸ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود. قبل از رسیدن به ۴۰ درجه سانتی‌گراد آغازگر به داخل راکتور اضافه می‌شود و بعد دما به ۸۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. وقتی دما به ۸۸ درجه سانتی‌گراد رسید مقدار ۰/۱۹۵ گرم کمک پراکنده ساز آلی با نام تجاری CK۱۲ که در ۳۰ میلی‌لیتر آب حل شده است به راکتور اضافه می‌شود که دو ساعت بعد از رسیدن به ۸۸ درجه سانتی‌گراد به میزان ۲۶ میلی‌لیتر پلی‌وینیل الکل) اضافه می‌شود. سه ساعت بعد از افزودن پلی‌وینیل الکل، حمام روغن خاموش شده و جریان آب به داخل حمام روغن وصل می‌شود

بهتر است افزایش کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن در پلی‌استایرن انبساطی در درصد تبدیل بالای پلی‌استایرن انبساطی انجام شود؛ چون بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش این ماده مقدار همه آزمون‌ها به غیر از شاخص جریان مذاب که پایین بودن آن نشان از بالا بودن کیفیت پلیمر است در بالاترین میزان خود بوده است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد

۲-۲ تجهیزات

برای پلیمری شدن، راکتور شیشه‌ای یک لیتری ته گرد با قطر ۴ اینچ استفاده شده که در داخل حمام روغن قرار دارد. به منظور گرم کردن روغن از گرم‌کن برقی دارای تنظیم دمایی و برای سرمایش از جریان آب سرد داخل لوله‌های مارپیچی حمام استفاده می‌شود. همزن به کاررفته از نوع سه‌پره‌ای با زاویه ۴۵ درجه و از جنس فولاد ضدزنگ دو ردیف با موتور قابل تنظیم ساخت شرکت HEIDOLPH آلمان بود که در سرعت rpm ۴۰۰ استفاده شد. درپوش راکتور به وسیله گیره استیلی و با استفاده از پیچ و مهره سر آن به روی راکتور قرار داده می‌شد. درپوش دارای چهار دهانه است که دهانه وسطی برای قرار گرفتن میله همزن در نظر گرفته شده است. با استفاده از دماسنج وارد شده از یکی از دهانه‌ها، دمای داخل راکتور کنترل می‌شد. دهانه‌های دیگر نیز برای افزایش مواد و واکنشگرها در نظر گرفته شده است (در فشار اتمسفری). دستگاه قالب‌گیری تزریقی به کار رفته برای تهیه نمونه‌های آزمون، ساخت کشور فرانسه و با مارک بلیون بود که در آن فشار تزریق ۶۰ بار و فشار برگشت ۲۰ بار و دما بین ۱۹۵ تا ۲۱۰ درجه سانتیگراد، حجم محوطه تزریق ۱۱۶ سانتی‌متر مکعب و حجم قالب ۲۵ سانتی‌متر مکعب است. برای به‌دست آوردن شاخص مذاب مخلوط پلیمری طبق استاندارد ASTM D1238 از دستگاه ژوئیک مدل ۴۱۰۶ با وزنه ۵ کیلوگرمی در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. جهت اندازه‌گیری نقطه نرمی مخلوط پلیمری طبق استاندارد ASTM D1525 از دستگاه کیت ایتالیا با وزنه ۱۰ نیوتن استفاده شد که در آن، سوزن استاندارد به اندازه ۱ میلی‌متر در قطعه نفوذ می‌کند. آزمون ضربه‌ای آیزود طبق استاندارد ASTM D256 در شرایط شیار روی قطعات تزریق شده در اندازه ۸۰ در ۱۰ در ۴ میلی‌متر توسط دستگاه Ceast ایتالیا انجام شد. آزمون کششی توسط دستگاه Lloyd LR10k، بر اساس استاندارد ASTM D638 با سرعت کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. آزمون کشش برای تعیین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در نقطه شکست و تسلیم استفاده شد. برای اندازه‌گیری سختی سطح نمونه‌های

است. شکل ۲ نتایج آزمون ضربه در درصد های مختلف و درصدهای مختلف SBS در EPS را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است با اضافه کردن SBS که باعث افزایش فاز لاستیکی و پراکنده ساختن

تا اینکه دمای داخل راکتور به ۳۰ درجه سانتی‌گراد برسد. سپس محتویات راکتور تخلیه شده، پلیمر با آب شست‌وشو داده شده و در نهایت خشک می‌شود. از این مرحله به بعد نمونه برای انجام آزمون آماده می‌شود.



شکل ۱ تصویر راکتور تولید پلی استایرن انبساطی در بعد آزمایشگاهی
Figure 1: Reactor used for production of EPS in laboratory scale

انرژی جذب شده در مقابل ضربه با سرعت بالا و در نتیجه باعث بالا رفتن استحکام در مقابل ضربه می‌شود. برای همه درصد تبدیل‌ها نمودارها با شیب یکسانی افزایش یافته است. در درصد تبدیل‌های یکسان SBS/EPS با افزایش درصد تبدیل به دلیل بالا رفتن درصد پلیمر نسبت به مونومر مقدار آزمون ضربه و به دنبال آن استحکام افزایش می‌یابد.

نتایج آزمون شاخص جریان مذاب (MFI) در درصد تبدیل‌های مختلف و درصدهای مختلف SBS/EPS در شکل ۳ نشان داده شده است. در درصد تبدیل‌های ثابت با افزایش درصد وزنی SBS/EPS با توجه به پخش شدن فاز لاستیکی در ماتریس و ایجاد پیوند بین فازها و تشکیل پیوند عرضی در بین ذرات، MFI کاهش می‌یابد. همچنین در درصد وزنی‌های ثابت SBS/EPS با افزایش درصد تبدیل از ۰/۶ تا ۰/۶۹ به دلیل افزایش درصد پلیمر به مونومر، مقدار MFI اندکی کاهش می‌یابد.

نتایج آزمون (Vicat) در درصد وزنی مختلف SBS/EPS و درصد تبدیل‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با اضافه شدن درصد وزنی SBS/EPS در درصد تبدیل ثابت به دلیل افزایش درصد جزء لاستیکی، نرمی پلیمر افزایش می‌یابد. شیب افزایش نرمی پلیمر برای درصد تبدیل پایین به خاطر بالا بودن میزان مونومر، کم‌تر است؛ ولی در درصد تبدیل ۰/۶۶ افزایش نرمی پلیمر نسبت به حالت بدون SBS خیلی بیشتر است. بررسی استحکام کششی در نقطه شکست در درصد های مختلف SBS/EPS در درصد تبدیل‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این که افزایش

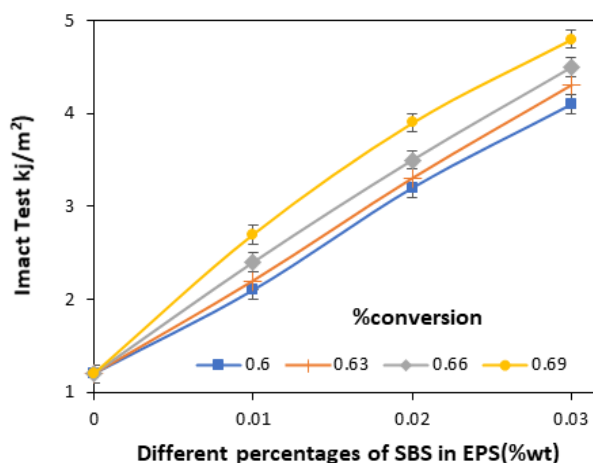
۲-۴ شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های MLP از تعدادی نورون در لایه‌های منظم ساخته شده است. با اینکه در شبکه‌های MLP می‌توان از چندین لایه میانی استفاده کرد ولی شبکه‌های دارای یک لایه میانی به دلیل داشتن ساختاری ساده، برای کاربردهای جزئی مفیدتر هستند. استفاده از چندین لایه میانی به درجه آزادی غیر لازم منجر می‌شود. شبکه‌های MLP تثبیت ضرایب وزنی که در فناوری انتشار برگشتی (back-propagation) یا هر دو روش بهینه‌سازی دیگر به کار می‌رود آموزش داده می‌شود. در این روش با مطالعه نتایج شبیه‌سازی که منجر به نمودارهای سه‌بعدی می‌شود، از یک طرف می‌توان میزان پوشش داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با نتایج شبیه‌سازی را ارزیابی کرد و از طرف دیگر می‌توان برای نقاطی که آزمایش انجام نشده با کمک این نتایج، داده‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرد.

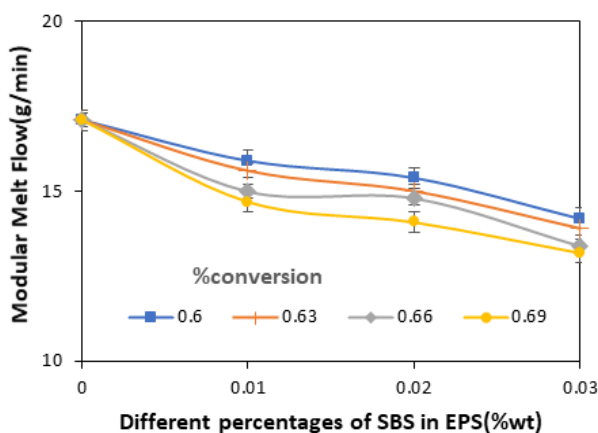
۳ نتایج و بحث

۳-۱ نتایج آزمایشگاهی

کوپلیمر قطعه‌ای استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) با ترکیب درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳) طی فرایند سنتز پلی‌استایرن انبساطی (EPS) تا درصد تبدیل (۰/۶۰، ۰/۶۳، ۰/۶۶ و ۰/۶۹ درصد) اضافه شد و آزمون‌های مختلف (میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست، شاخص K-value، مقدار سختی پلیمر، تنش در نقطه شکست، شاخص نرمی پلیمر، شاخص جریان مذاب و آزمون ضربه) روی پلیمر تولیدی انجام شد. نتایج آزمون‌ها در نمودارهای ۲ تا ۸ نشان داده شده



شکل ۲: نتایج آزمون ضربه در درصد‌های مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 1: Results of Impact Test in different percentages of SBS in EPS in different conversion percentages



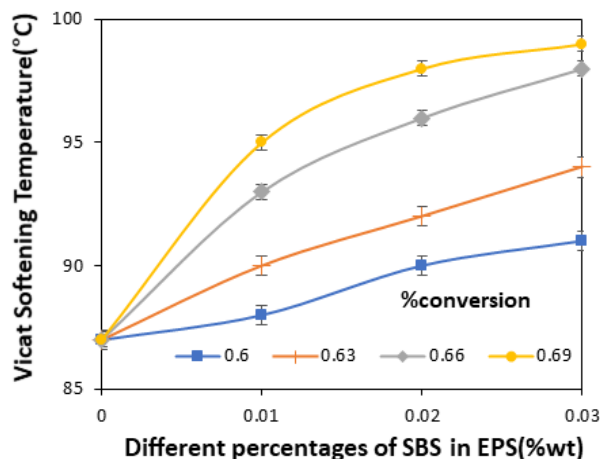
شکل ۳: نتایج آزمون شاخص جریان مذاب در درصد‌های مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 2: Results of Modular Melt Flow in different percentages of EPS and different percentages of SBS/EPS

کاهش مقدار سختی پلیمر با افزایش جزء لاستیکی در درصد تبدیل‌های ثابت در شکل ۷ نشان داده شده است. نسبت شیب کاهش سختی برای درصد تبدیل پایین پلیمر نسبت به بقیه حالت‌ها به دلیل بالا بودن مونومر بیشتر است. در ضمن با افزایش درصد تبدیل در درصد ثابت SBS/EPS به دلیل افزایش مقدار پلیمر نسبت به مونومر، مقدار سختی پلیمر افزایش می‌یابد.

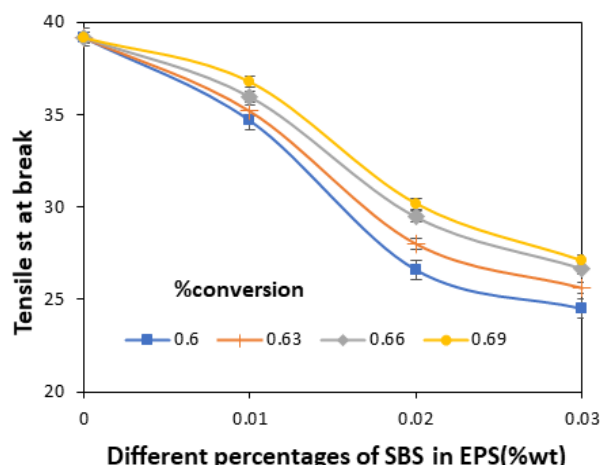
در شکل ۸ میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست برای درصد تبدیل‌های ثابت با افزایش درصد SBS/EPS با شیب تندی افزایش می‌یابد ولی این افزایش با تغییر درصد تبدیل برای درصد‌های ثابت SBS/EPS تقریباً ثابت و افزایش خیلی جزئی است. افزایش SBS باعث افزایش فاز لاستیکی پلیمر نهایی شده و به دنبال آن باعث افزایش میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست می‌شود.

SBS باعث تغییر حالت پلاستیک از حالت صلب به لاستیک انعطاف‌پذیر می‌شود؛ با افزایش درصد SBS/EPS در درصد تبدیل‌های ثابت، مقدار تنش در نقطه شکست نسبت به حالت بدون SBS کاهش می‌یابد. افزایش درصد تبدیل در درصد‌های ثابت SBS/EPS باعث افزایش تنش در نقطه تسلیم می‌شود که دلیل آن، افزایش استحکام کششی است. بالا بودن درصد مونومر در پلیمر باعث کاهش تنش در نقطه تسلیم می‌شود.

نتایج مربوط به شاخص K-value در شکل ۶ گزارش شده است. افزایش درصد تبدیل در درصد‌های ثابت SBS/EPS باعث افزایش K-value شده است چون در درصد تبدیل‌های پایین، امکان تشکیل زنجیرهای کوتاه نسبت به درصد تبدیل‌های بالا بیشتر است. به دلیل پراکنده شدن فاز لاستیکی در ماتریس و ایجاد پیوند بین آن‌ها، میزان K-value در درصد تبدیل ثابت با افزایش SBS افزایش یافته است.



شکل ۴: نتایج آزمون (Vicat) در درصد‌های مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 4: Results of Vicat Softening Temperature in different percentages of SBS in EPS and different conversion percentages of EPS



شکل ۵: نتایج استحکام کششی در نقطه شکست در درصد‌های مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 5: Results of Tensile at break in different percentages of SBS in EPS in different conversion percentages of EPS

و داده‌های آزمایشگاهی به‌خوبی داده‌های شبیه‌سازی را پوشش داده است.

شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی مربوط به آزمون شاخص نرمی پلیمر را نشان می‌دهد که تجمع نقاط و قرار گرفتن آن‌ها بر روی هم نشان از پوشش کامل نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی دارد. نمودار عملکرد تعمیم به‌صورت یک سطح است که هیچ‌گونه نوسان در آن وجود ندارد.

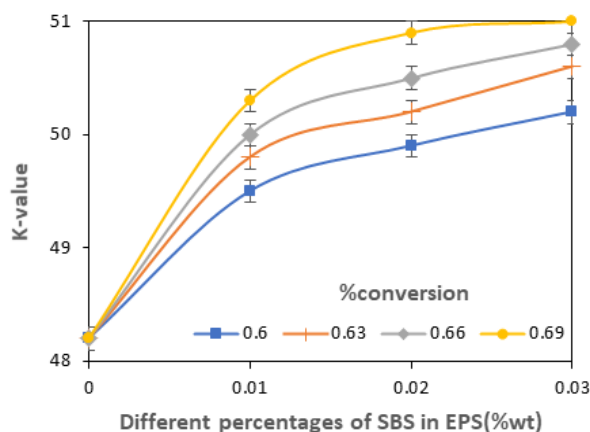
نمودار عملکردی و تعمیم نتایج آزمون تنش در نقطه شکست در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌صورت کامل داده‌های آزمایشگاهی را پوشش داده است.

نتایج آزمون‌های K-value، میزان سنجش سختی پلیمر، ازدیاد طول در نقطه شکست هم به‌ترتیب در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند. نمودارهای

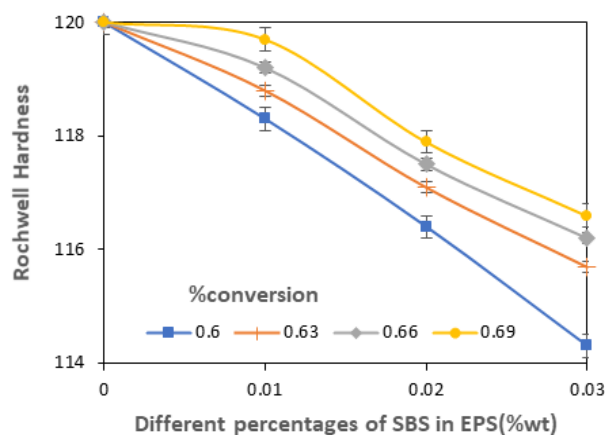
۲-۳ نتایج شبیه‌سازی

برای پیش‌بینی و مطالعه‌ی بهتر، نتایج داده‌های آزمایشگاهی با شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP شبیه‌سازی شد. شکل ۹ عملکرد یادآوری و تعمیم شبکه MLP برای آزمون ضربه در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/EPS را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده دقیقاً روی هم قرار گرفته و نهایتاً شکل به صورت یک سطح مشخص شده که امکان استفاده از داده‌ها برای نقاطی که آزمایش انجام نیافته است وجود دارد.

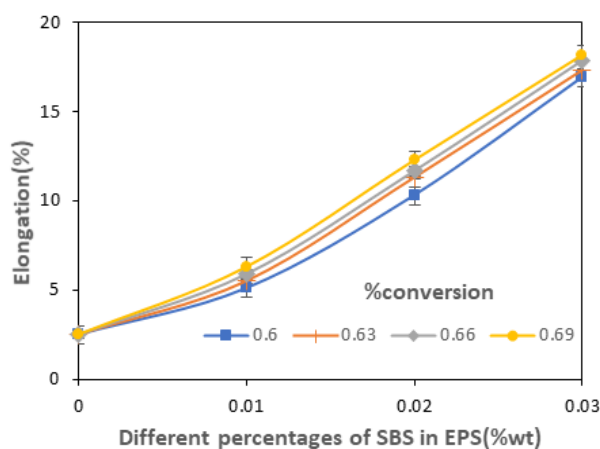
نتایج شبیه‌سازی آزمون شاخص جریان مذاب در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد مختلف SBS/EPS در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است پدیده Overfitting وجود ندارد



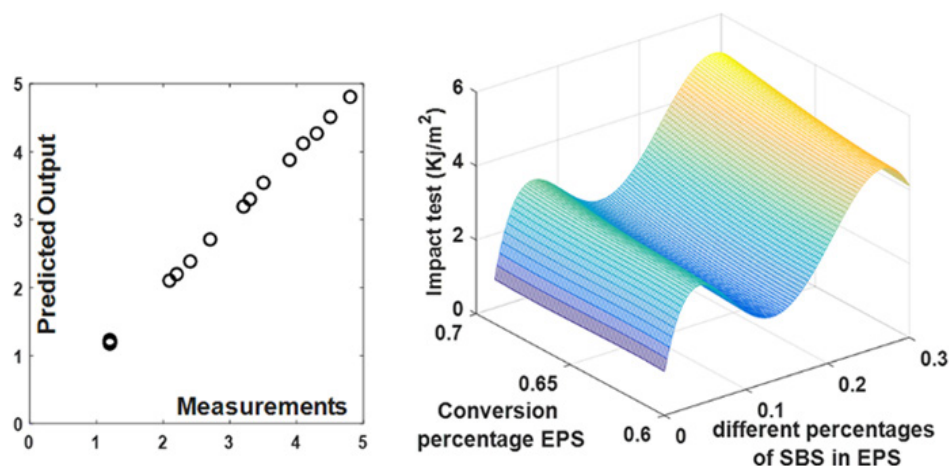
شکل ۶: نتایج آزمون شاخص K-value در نقطه شکست در درصدهای مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 6: Results of K-value in different percentages of SBS in EPS in different conversion percentages of EPS



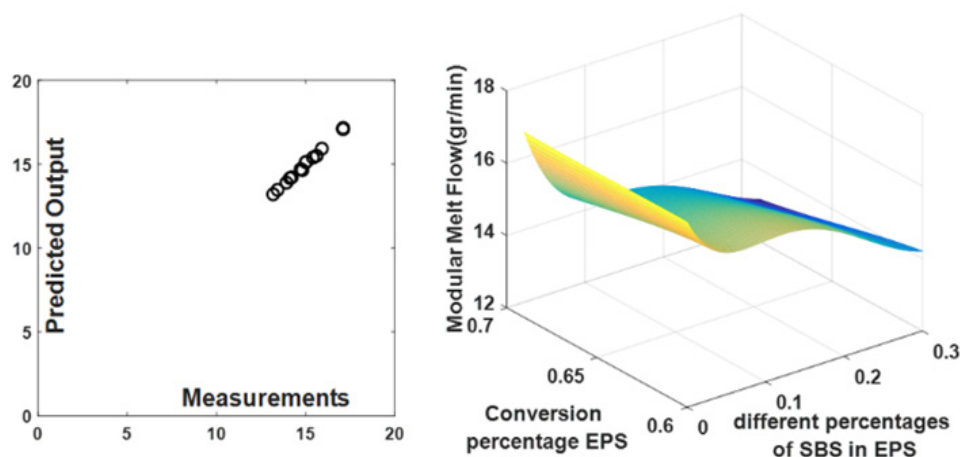
شکل ۷: نتایج مقدار سختی پلیمر در درصدهای مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 7: Results of Rockwell Hardness in different percentages of SBS in EPS in different conversion percentages of EPS



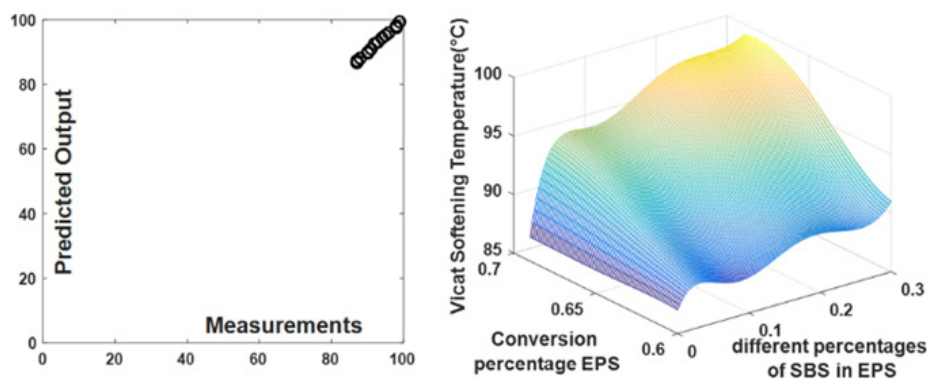
شکل ۸: نتایج میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست در درصدهای مختلف SBS در EPS در درصد تبدیل‌های مختلف EPS
Figure 8: Results of Elongation at break in different percentages of SBS in EPS in different conversion percentages of EPS



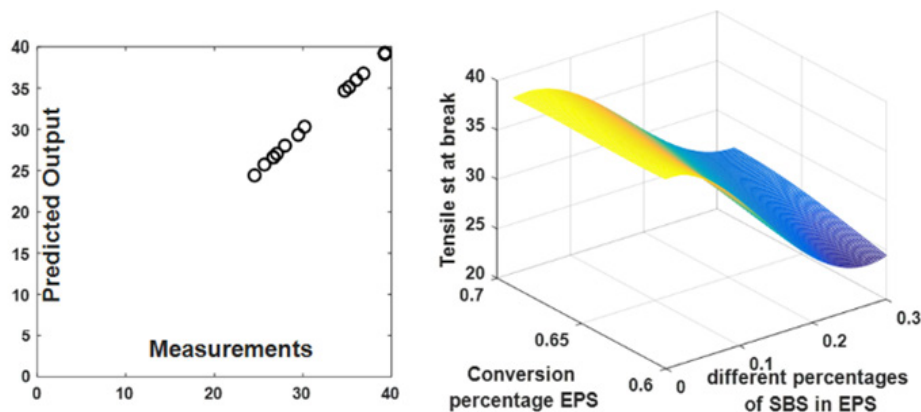
شکل ۹: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای آزمون ضربه در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/EPS
Figure 9: Recall and Regeneration of ANN for Impact Test in different conversion percentages of EPS and different percentages of SBS/EPS



شکل ۱۰: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای تست شاخص جریان مذاب در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/EPS
Figure 10: Results of simulation of Modular Melt Flow Test in different conversion percentages of PES and different percentages of SBS/EPS

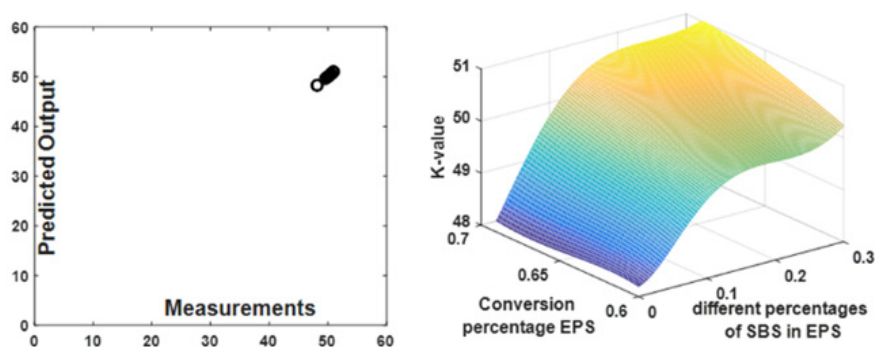


شکل ۱۱: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای آزمون شاخص نرمی پلیمر در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/EPS
Figure 11: Results of simulation of Vicat Softening Temperature Test in different conversion percentages of PES and different percentages of SBS/EPS



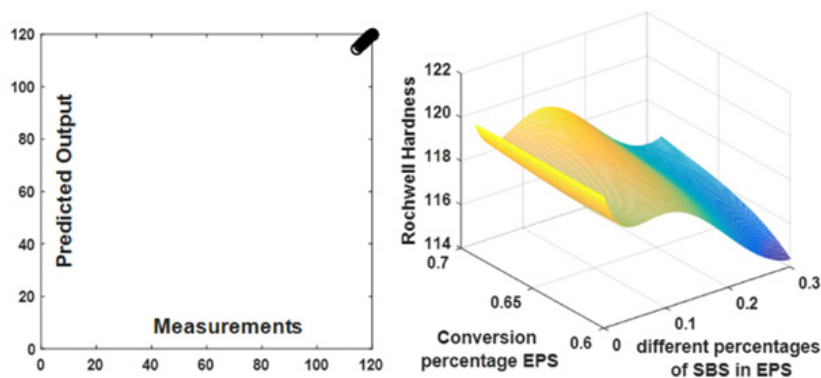
شکل ۱۲: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای آزمون تنش در نقطه شکست در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/

Figure 12: Results of simulation of Tensile at Break Test in different conversion percentages of PES and different percentages of SBS/EPS

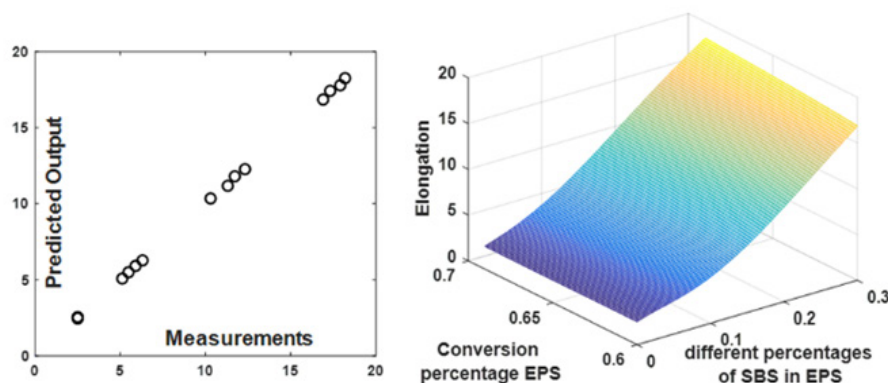


شکل ۱۳: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای تست شاخص K-value در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/

Figure 13: Results of simulation of K-value Test in different conversion percentages of PES and different percentages of SBS/EPS



شکل ۱۴: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای تست مقدار سختی پلیمر در درصد تبدیل‌های مختلف EPS و درصد‌های مختلف SBS/



شکل ۱۵: عملکرد یاد آوری و تعمیم شبکه MLP برای تست میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست در درصد تبدیل های مختلف EPS و درصد های مختلف SBS/EPS

Figure 15: Results of simulation of Elongation at Break Test in different conversion percentages of PES and different percentages of SBS/EPS

نرمی پلیمر، K-Value و ازدیاد طول در نقطه شکست افزایش و مقدار آزمون‌های شاخص جریان مذاب و تنش در نقطه تسلیم و سختی پلیمر کاهش یافت. - در درصدهای ثابت SBS در EPS با افزایش درصد تبدیل EPS به غیر از شاخص جریان مذاب، مقدار عددی بقیه آزمون‌ها افزایش یافت؛ زیرا به دلیل بالا بودن مقدار مونومر در درصد تبدیل‌های پایین، مقدار شاخص جریان مذاب افزایش می‌یابد ولی مقادیر آزمون‌های دیگر در درصد تبدیل‌های بالا بیشتر است. - با توجه به این که بالا بودن مقدار عددی همه آزمون‌ها به غیر از شاخص جریان مذاب نشان از افزایش کیفیت پلیمر دارد، بنابراین برای دست یافتن به پلیمری با کیفیت بالاتر، بهتر است کار در درصد تبدیل بالاتری انجام شود.

عملکرد آزمون K-value و میزان سنجش سختی پلیمر به صورت تجمیع شده در بالای نمودار قرار دارد و نمودار تعمیم ازدیاد طول در نقطه شکست به صورت صفحه‌ای هست که با نمودارهای قبلی تفاوت زیادی ندارد ولی چون نمودار عملکرد بهتری دارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پوشش داده‌ها بخوبی انجام گرفته است. در کل، همه نمودارها نشان از این دارند که می‌توان برای قسمت‌های که آزمایش انجام نشده از نمودارهای شبیه‌سازی استفاده کرد.

۴ نتیجه‌گیری

- داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP شبیه‌سازی شده، و نتایج شبیه سازی، به خوبی داده‌ها تجربی را پوشش داده است. - با افزایش درصد SBS در EPS، مقادیر ضربه، شاخص

مراجع

1. Jing Xin, Peng Xiang-Fang, Mi Hao-Yang, Wang Yuan-Sheng, Zhang Shuidong, Chen Bin-Yi, Zhou Hau-Min, Mou Wen-jie, Cell evolution and compressive properties of styrene-butadiene-styrene toughened and calcium carbonate reinforced polystyrene extrusion foams with supercritical carbon dioxide, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016 ,43518-43508,(23)133.
2. Zhang Sheng, Ji Wenfei, Han Yi, Gu Xiaoyu, Li Hongfei, Sun Jun, Flame-retardant expandable polystyrene foams coated with ethanediol modified melamine-formaldehyde resin and microencapsulated ammonium polyphosphate, *Journal of Applied Polymer Science*, ,(28)135 2018 ,46493-46471.
3. Wang Luyao, Wang Cheng, Liu Pingwei, Jing Zhijiao, Ge Xuesong, Jiang Yijun, the flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer, *Construction and Building Materials*, ,176 2018 ,414-403.
4. Varnagir Sarunas, Tuckute Simona, Lelis Maria de Fátima Fontes, Milcius Darius, SiO₂ films as heat resistant layers for protection of expandable polystyrene foam from flame torch-induced heat, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018 ,667-657,(5)31.
5. Sankar Ponraj Lakshmaniah, Sivasankar Sandrasekaran, Shunmugasundaram M, Kumar A Praveen, Predicting the polymer modified ferrocement ultimate flexural strength using artificial neural network and adaptive network based fuzzy inference system, *Materials Today: Proceedings*, 2020 ,1380-1375 ,27.
6. Sharma Aanchna, Kumar S. Anand, Kushvaha Vinod, Effect of aspect ratio on dynamic fracture toughness of particulate polymer composite using artificial neural network, *Engineering Fracture Mechanics*, ,106907 ,228 2020.
7. Derakhshanfard Fahimeh, Fazeli Naghmeh, Vaziri Ali, Heydarinasab Amir, Kinetic study of the synthesis of expandable polystyrene via multi-stage initiator dosing method, *Journal Polymer Research*, 2015 ,126-118 , (6)22.
8. Yimit M, Ni L, Du Y, Bkan R, Mechanical and aging properties of polypropylene and styrene-butadiene-styrene composites under outdoor and indoor conditions, *Strength of Materials*, 2018 ,799-788,(148)50.
9. Hasan M.D.Amanul, Ahmad Mohiuddin, Mannan Umme Amina, Tarefder Rafigul A, Laboratory investigation and modeling of high temperature performance of polymer modified binders (PMBs) with different concentration of styrene-butadiene-styrene (SBS) polymer, *airfield and highway pavements Modified asphalt binder characterization, International Airfield and Highway Pavements Conference*, 2019 ,254-248
10. Duong Hong Cong, Chuai Dan, Woo Yun Chul, Shon Ho Kyong, Nghiem Long Duc, Sencadas Vitor, A novel Electrospun, hydrophobic, and elastomeric styrene-butadiene-styrene membrane for membrane distillation applications, *Journal of Membrane Science*, ,427-420 ,549 2018.
11. Borsoi Cleidi, Scienza Lisete.C, Zattera Ademir.J, Characterization of composites based on recycled expanded polystyrene reinforced with Curaua fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2013 ,659-653 ,(1)128.
12. Chindaprasirt Prinya, Hiziroglu Salim, Waisurasingha Chattichai, Kasemsiri Pornnapa, Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with Diammonium phosphate flame retardant, *Polymer Composites*, 2014 ,612-604 ,(4)36.
13. Azimi Hamidreza, Jahani Davoud, Nofar Mohammadreza, Experimental and Numerical Analyses of n-Pentane Solubility and Diffusivity in Polystyrene/Poly (methyl methacrylate) Blends, *Journal Chemical Engineering*, ,4604-4596 ,(9)65 2020.
14. Derakhshanfard Fahimeh, Mehralizadeh Amir, Application of artificial neural networks for viscosity of crude oil-based nanofluids containing oxides nanoparticles, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018 ,272-263 ,168.
15. Derakhshanfard Fahimeh, Mehralizadeh Amir, Characterization of polyethylene terephthalate wastes/ Acrylonitril-Butadiene styrene (PETW/ABS) composites with applications of artificial neural networks, *SN Applied Sciences*, 2020 ,1883-1868,(2)11.