

Development of two models for estimation of rapid chloride penetration and investigation on effective parameters using Artificial Neural Networks (ANNs)

Payam Vosoughi^{1,*}, Mahmoud Motahari Karein², Ali Kazemian³, Sasan Tavakol³, Ali Akbar Ramezaniapour⁴

^{1,*} *Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University of Science and Technology, Iowa, USA (Corresponding author)*

² *Department of Civil and Environmental Engineering and Construction, University of Nevada at Las Vegas, Nevada, USA*

³ *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Southern California, California, USA*

⁴ *Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRC), Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*

Abstract:

In this paper Artificial Neural Networks (ANNs) are employed to develop a model which could estimate the RCPT value of various mixtures according to the mix design parameters, age and surface resistivity of concrete specimens. Furthermore, sensitivity analysis is carried out on the best ANN model to determine the influence of each input on the concrete resistance to the rapid chloride penetration. 258 experimental datasets, resulted from 79 mix designs, were used as training data for ANN models; all of which prepared and tested in Concrete Technology and Durability Research Center of Amirkabir University of Technology (CTDRC).

Another simplified model is proposed using linear regression analysis; which estimates the RCPT value simply according to surface resistivity measure. Finally, eight mixtures prepared in Building and Housing Research Center (BHRC) and six mixtures obtained from real-life projects, are employed to compare and validate the proposed models.

Keywords:

Rapid Chloride Permeability Test (RCPT), Surface Resistivity (SR), Artificial Neural Networks (ANNs), Sensitivity Analysis (SA), Linear Regression Analysis.

ارائه مدل‌هایی برای تخمین مقاومت بتن در برابر نفوذ تسریع شده یون کلراید و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

پیام وثوقی^{1*}، محمود مطهری کرین¹، علی کاظمیان¹، ساسان توکل²،
علی اکبر رمضانپور³

چکیده

در این مقاله با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدلی مناسب برای پیش‌بینی نتیجه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) بر اساس مشخصات طرح اختلاط بتن، سن آزمون و همچنین مقاومت الکتریکی سطحی (SR) آن ارائه شده است. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز حساسیت شبکه عصبی منتخب، میزان تأثیرگذاری هر یک از این پارامترها بر مقاومت بتن در برابر نفوذ تسریع شده یون کلراید بررسی شده است. به این منظور و برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی از 258 داده آزمایشگاهی مربوط به 79 طرح اختلاط مختلف استفاده شده است. تمامی این نمونه‌های آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر (CTDRC) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در قسمت بعد بر پایه نتایج به دست آمده، مدل ساده شده‌ای نیز بر مبنای آنالیز رگرسیون خطی داده‌های آزمایشگاهی میان نتایج آزمایش‌های RCPT و SR ارائه شده است. در نهایت برای صحت سنجی مدل‌های ارائه شده، از نتایج هشت نمونه آزمایشگاهی مختلف ساخته شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC) و شش نمونه کارگاهی گرفته شده از سه کارگاه مختلف استفاده شده است.

واژگان کلیدی:
آزمایش نفوذ
تسریع شده یون
کلراید (RCPT)
آزمایش مقاومت
الکتریکی سطحی
(SR)
شبکه عصبی
مصنوعی
آنالیز حساسیت
آنالیز رگرسیون
خطی

1- مقدمه

یکی از مخرب‌ترین عوامل تهاجمی مؤثر بر سازه‌های بتن مسلح یون کلراید می‌باشد که موجب تسریع

خوردگی آرماتورها می‌شود. در حقیقت فرآیند خوردگی آرماتورها در بتن مسلح یک واکنش الکتروشیمیایی می‌باشد که در آن سطح فولاد خورده شده نقش الکترود مرکب و آب منفذی بتن نقش الکترولیت را بر عهده دارند. با این وجود با توجه به محیط شدیداً قلیایی بتن و لایه نازک اکسید آهن غیر فعال تشکیل شده بر روی آرماتورها، در صورت عدم کاهش pH بتن (توسط

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:
p.vosoughi@aut.ac.ir
1. کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
2. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
3. استاد، رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

عواملی مانند کربن‌اسیون و یا گازهایی مانند No_2 و So_2 و یا نبود یون‌های کلراید آزاد با غلظت مناسب در مجاورت سطح آرماتورها نرخ خوردگی بسیار کم خواهد بود [1, 2].

بنابراین یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های بتن پایا در برابر خوردگی آرماتورها، میزان مقاومت آن در برابر نفوذ یون کلراید است. آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT^2) یکی از آزمایش‌های تسریع شده رایج برای ارزیابی این پارامتر است [3]. این آزمایش در حقیقت هدایت الکتریکی بتن را اندازه گیری می‌کند. سپس میان این پارامتر و نفوذپذیری بتن رابطه‌ای در نظر گرفته می‌شود [4]. هدایت الکتریکی بتن به ساختار لوله‌های موئین خمیر سیمان و همچنین خصوصیات شیمیایی آب منفذی وابسته است. در حالی که نفوذپذیری بتن تنها به ساختار لوله‌های موئین خمیر سیمان وابسته می‌باشد. بنابراین بتن‌های ساخته شده با مواد سیمانی مختلف حتی با داشتن نفوذپذیری یکسان در برابر یون‌های کلراید، به علت متفاوت بودن خصوصیات شیمیایی آب منفذی، شار الکتریکی متفاوتی را در آزمایش RCPT از خود عبور می‌دهند. در نتیجه این آزمایش تنها برای مقایسه نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده از ترکیب به خصوصی از سیمان و مواد سیمانی می‌تواند استفاده شود [5].

به هر حال فرایند نمونه گیری، آماده سازی آزمونه‌ها و نهایتاً انجام آزمایش RCPT نسبتاً سخت و

پرهزینه بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی خاصی دارد. با این وجود و با توجه به سایر ایراداتی که به این آزمایش وارد است اما به علت قدمت زیاد آن و در دسترس بودن سوابق زیادی از نمونه‌های ارزیابی شده با این آزمایش در شرایط واقعی، هنوز هم استفاده از نتایج این آزمایش برای طبقه بندی مقاومت بتن‌های مختلف در برابر نفوذ یون کلراید کاربرد گسترده‌ای دارد.

روش دیگری که برای ارزیابی غیرمستقیم مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید مطرح شده است، استفاده از مقاومت الکتریکی سطحی بتن (SR^3) است. در این آزمایش نیز با ایجاد یک اختلاف پتانسیل قابلیت حرکت یون‌ها در داخل بتن سنجیده شده و به مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید ارتباط داده می‌شود. اولین بار دستگاه‌های چند الکترودی، با فواصل و آرایش‌های مختلف، توسط زمین شناسان برای شناسایی لایه‌های مختلف زمین به وسیله اندازه گیری مقاومت الکتریکی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت [6]. اما معمول‌ترین آرایش الکترودها برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطحی بتن، دستگاه چهار الکترودی با آرایش ونر⁴ و فواصل مساوی می‌باشد [7]. در این روش از جریان متناوب (AC) برای جلوگیری از ایجاد دو قطبی‌ها در محل اتصال الکترودها استفاده می‌شود [6]. همچنین با بررسی فرکانس‌های مختلف، فرکانس 300 هرتز برای حداقل کردن اثر این ظرفیت

³ Surface Resistance

⁴ Wenner

² Rapid Chloride Permeability Test

خازنی مناسب تشخیص داده شده است [8]. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی بتن ساختار حفرات خمیر سیمان، خصوصیات شیمیایی آب منفذی، میزان رطوبت بتن و دمای آن هستند [9, 10]. از مقاومت الکتریکی سطحی نیز تنها برای مقایسه میزان نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با مواد سیمانی مشخص می‌توان استفاده کرد [11].

آزمایش SR بر خلاف آزمایش RCPT غیر مخرب و ساده بوده و می‌تواند بر روی سازه اصلی و یا نمونه‌های گرفته شده انجام شود. به همین علت و با توجه به پایه‌های فیزیکی مشترک آن‌ها مطالعات زیادی برای بررسی امکان جایگزینی آزمایش RCPT با آزمایش SR در بتن‌های مختلف انجام شده است [12, 13].

با توجه به اینکه همگن و نیمه بی نهایت بودن آزمون (در مقایسه با فاصله الکترودها) دو فرض اساسی استفاده از روش وئر برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطحی بتن می‌باشند، در عمل تا 25 درصد خطا نیز در اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطحی قابل انتظار است [14]. بنابراین با وجود اینکه در هر دو آزمایش از میانگین نتایج حداقل سه آزمون استفاده می‌شود، اما مقداری پراکندگی میان نتایج به دست آمده امری طبیعی است. در حقیقت از نتایج آزمایش‌های RCPT و SR تنها برای طبقه بندی میزان نفوذپذیری بتن می‌توان استفاده کرد.

در این مقاله با استفاده از 258 داده آزمایشگاهی مدلی سازگار با مصالح بومی و انواع پوزولان‌های موجود در کشور، با

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی⁵، برای طبقه بندی میزان نفوذپذیری بتن‌های مختلف ارائه شده است. سپس میزان اهمیت 7 پارامتر مختلف مؤثر بر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید، شامل مشخصات طرح اختلاط بتن، سن آزمون و مقاومت الکتریکی سطحی آن، با استفاده از آنالیز حساسیت (SA)⁶ شبکه عصبی مصنوعی منتخب بررسی شده است. در مرحله بعد بر پایه این نتایج، مدلی ساده برای پیش بینی شار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT با استفاده از مقاومت الکتریکی سطحی بتن با به‌کارگیری آنالیز رگرسیون خطی داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. در نهایت برای صحت سنجی مدل‌های ارائه شده، از نتایج دو سری نمونه‌های آزمایشگاهی و کارگاهی مجزا استفاده شده است.

2- برنامه آزمایشگاهی

2-1- مواد و مصالح

برای ساخت تمامی نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ یک مطابق با استاندارد ملی شماره 389 ایران، شن شکسته با حداکثر قطر 19 میلی متر و ماسه طبیعی در محدوده استاندارد ملی شماره 302 ایران استفاده شده است. در این مقاله اثر 11 نوع ماده مختلف به عنوان مواد جایگزین سیمان بررسی شده است. در جدول 1 آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند مصرفی و 9 پوزولان طبیعی و مصنوعی مورد استفاده آورده شده است. استاندارد ملی

⁵ Artificial Neural Network

⁶ Sensitivity Analysis

شماره 3433 ایران حداقل مجموع سه ترکیب اصلی شیمیایی ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) پوزولان‌های طبیعی را برابر 70 درصد و حداکثر SO_3 ، رطوبت و کسر وزن در اثر سرخ شدن (LOI^7) را به ترتیب برابر 4، 3 و 10 درصد وزنی در نظر گرفته است. تمامی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی استفاده شده این محدودیت را رعایت کرده‌اند. علاوه بر این مواد، از نانو سیلیس نیز به عنوان پوزولانی که دارای بیش از 99 درصد سیلیس آمورف می‌باشد استفاده شده است. این ماده به صورت کلوئیدی (محلول در آب) با غلظت 50 درصد استفاده شده است.

طبق تحقیقات جدید پودر سنگ آهک به عنوان یک فیلر خنثی عمل نمی‌کند. کربنات کلسیم با فازهای سیلیکاتی و آلومیناتی سیمان واکنش داده و هیدرات‌های کربوسیلیکات و کربوآلومینات تشکیل می‌دهد. در نتیجه هیدراسیون سیمان تسریع شده و همچنین نسبت Ca/Si در ژل C-S-H بهبود می‌یابد [15]. با توجه به این امر و مصرف رو به گسترش سیمان‌های پرتلند آهکی در این مقاله از پودر سنگ آهک نیز به عنوان یک ماده جایگزین سیمان استفاده شده است. پودر سنگ آهک مصرفی که ضوابط استاندارد ملی شماره 4220 ایران را برآورده کرده، حاوی بیش از 75 درصد CaCO_3 بوده و آنالیز شیمیایی آن نیز در جدول 1 آورده شده است.

2-2- نحوه ساخت، عمل آوری و آزمایش نمونه‌ها

مشخصات 79 طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی در جدول 2 آورده شده است. تمامی این نمونه‌ها در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر⁸ طبق ضوابط استاندارد ملی شماره 581 ایران ساخته شده و سپس تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. اسلالمپ هدف برای این نمونه‌ها بین 7 تا 10 سانتیمتر بوده و در صورت نیاز برای دستیابی به این مقدار به میزان کافی از فوق روان کننده خنثی در ساخت آن‌ها استفاده شده است. برای جابجایی بتن و تراکم آن در قالب‌های استوانه‌ای 20×10 سانتیمتری از دو لایه بتن ریزی و میز ارتعاش با فرکانس مناسب استفاده شده است. پس از باز کردن قالب‌ها تا هنگام انجام آزمایش‌ها عمل آوری تمامی نمونه‌ها به صورت مرطوب انجام شده است.

⁸ Concrete Technology and Durability Research Center

⁷ Loss on ignition

جدول 1- آنالیز شیمیایی سیمان و مواد پوزولانی استفاده شده

زئولیت طبیعی	پودر سنگ آهک	مکانولن			دوده سیلیسی	پومدس	توف	تراس	خاکستر پسته برنج	سیمان برتن	%
		1	2	3							
67.79	1.47	68.99	76.73	72.97	94.66	67.7	62.64	65.74	89.61	21.5	SiO ₂
13.66	0.22	20.46	17.41	22.21	0.31	15.8	15.19	12.24	0.04	3.68	Al ₂ O ₃
1.44	0.29	0.99	0.59	0.81	0.60	3.39	4.47	2.05	0.22	2.76	Fe ₂ O ₃
82.89	1.98	90.44	94.73	95.99	95.57	86.89	82.3	80.03	89.87	27.94	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
1.68	54.77	2.75	3.58	2.22	0.36	3.9	6.83	2.87	0.91	61.5	CaO
0.5	0.06	-	-	-	0.23	0.33	0.38	0	0.15	2.5	SO ₃
1.2	0.30	0.50	0.19	0.13	0.78	0.99	1.71	0.96	0.42	4.8	MgO
2.04	0.05	2.80	0.05	0.05	0.22	2.95	2.77	1.92	0.07	0.12	Na ₂ O
1.42	0.08	2.24	0.31	0.55	0.22	2	2.09	2.02	1.58	0.95	K ₂ O
-	0.01	0.05	0.04	0.05	-	0.12	-	0.03	0.41	0.23	P ₂ O ₅
-	0.05	0.09	0.06	0.06	-	0.33	-	0.29	0.02	0.04	TiO ₂
10.23	42.23	0.89	0.82	0.76	1.77	2.3	2.88	8.5	5.91	1.35	LOI

آنالیز شیمیایی (%)

خواص فیزیکی	3200	3700	4500	4500	3500	≈200000	9800	9000	8500	3300	3200
ریزی (cm ² /gr)	3200	3700	4500	4500	3500	≈200000	9800	9000	8500	3300	3200
(cm ³ /gr)	3.12	2.15	2.66	2.56	2.54	2.14	2.53	2.57	2.67	2.69	2.20
دانسیته	3.12	2.15	2.66	2.56	2.54	2.14	2.53	2.57	2.67	2.69	2.20

جدول 2- جزئیات طرح اختلاط بتن نمونه‌های آزمایشگاهی (CTDR)

سری	شماره	Mixtures	سیمان (kg/m ³)	مواد مضاف		W/C	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	سن انجام آزمایشها (روز)
				نوع	مقدار (kg/m ³)				
اول	1	C250.45	250	--	--	0/45	910	1112	7 ، 28
	2	C250.55	250	--	--	0/55	881	1077	7 ، 28
	3	C250.60	250	--	--	0/6	867	1060	7 ، 28
	4	C300.45	300	--	--	0/45	866	1059	7 ، 28
	5	C300.55	300	--	--	0/55	832	1016	7 ، 28
	6	C300.60	300	--	--	0/6	814	995	7 ، 28
	7	C350.45	350	--	--	0/45	822	1005	7 ، 28
	8	C350.55	350	--	--	0/55	782	956	7 ، 28
	9	C350.60	350	--	--	0/6	762	931	7 ، 28
	10	C425.45	425	--	--	0/45	756	924	7 ، 28
	11	C425.55	425	--	--	0/55	707	864	7 ، 28
	12	C425.60	425	--	--	0/6	683	835	7 ، 28
دوم	13	C450.40	450	--	--	0/4	829	829	42 ، 28 ، 790
	14	SCC450.40	450	فیلر خنثی	150	0/4	610	916	42 ، 28 ، 790
	15	SCC450.40MS7.5	416	میکروسلیس	34	0/4	606	910	42 ، 28 ، 790
	16	SCC484.37MS7.5	450	فیلر خنثی	150	0/37	608	912	42 ، 28 ، 790
	17	SCC450.40P15	382	پومیس	68	0/4	600	900	42 ، 28 ، 790
	18	SCC518.35P15	450	فیلر خنثی	150	0/35	604	905	42 ، 28 ، 790
	19	SCC450.40R10	405	خاکستر پسته برنج	45	0/4	604	905	42 ، 28 ، 790
	20	SCC495.36R10	450	فیلر خنثی	150	0/36	606	909	42 ، 28 ، 790
	21	C350.50R0	350	خاکستر پسته برنج	0	0/5	796	960	90 ، 180 ، 28 ، 56
	22	C350.50R7	325	خاکستر پسته برنج	24/5	0/5	796	960	90 ، 180 ، 28 ، 56
سوم	23	C350.50R10	315	خاکستر پسته برنج	35	0/5	796	960	90 ، 180 ، 28 ، 56

	24	C350.50R15	297/5	خاکستر پوسته برنج	52/5	0/5	796	960	، 90 ، 180 28 ، 56
مصارف	25	C400.45	400	--	--	0/45	796	960	، 90 ، 180 28
	26	C400.45NS4.5	382	نانو سیلیس	18	0/45	796	960	، 90 ، 180 28
	27	C400.45NS7.5	370	نانو سیلیس	30	0/45	796	960	، 90 ، 180 28
	28	C400.45MS4.5	382	میکروسیلیس	18	0/45	796	960	، 90 ، 180 28
	29	C400.45MS7.5	370	میکروسیلیس	30	0/45	796	960	، 90 ، 180 28
تجرب	30	C350.37L0	350	--	0	0/37	973/9	960	، 180 ، 270 28 ، 90
	31	C350.37L5	332.5	پودر سنگ آهک	17.5	0/37	971/6	960	، 180 ، 270 28 ، 90
	32	C350.37L10	315	پودر سنگ آهک	35	0/37	969/6	960	، 180 ، 270 28 ، 90
	33	C350.37L15	297.5	پودر سنگ آهک	52.5	0/37	967/4	960	، 180 ، 270 28 ، 90
	34	C350.37L20	280	پودر سنگ آهک	70	0/37	965/3	960	، 180 ، 270 28 ، 90
	35	C350.45L0	350	پودر سنگ آهک	0	0/45	912/3	950	، 180 ، 270 28 ، 90
	36	C350.45L5	332.5	پودر سنگ آهک	17.5	0/45	910/2	950	، 180 ، 270 28 ، 90
	37	C350.45L10	315	پودر سنگ آهک	35	0/45	908/1	950	، 180 ، 270 28 ، 90
	38	C350.45L15	297.5	پودر سنگ آهک	52.5	0/45	906	950	، 180 ، 270 28 ، 90
	39	C350.45L20	280	پودر سنگ آهک	70	0/45	903/9	950	، 180 ، 270 28 ، 90
	40	C350.55L0	350	پودر سنگ آهک	0	0/55	740/8	1050	، 180 ، 270 28 ، 90
	41	C350.55L5	332.5	پودر سنگ آهک	17.5	0/55	738/7	1050	، 180 ، 270 28 ، 90
	42	C350.55L10	315	پودر سنگ آهک	35	0/55	736/6	1050	، 180 ، 270 28 ، 90
	43	C350.55L15	297.5	پودر سنگ آهک	52.5	0/55	734/5	1050	، 180 ، 270 28 ، 90
	44	C350.55L20	280	پودر سنگ آهک	70	0/55	732/4	1050	، 180 ، 270 28 ، 90
ششم	45	C350.50	350	--	0	0/5	955	815	90 ، 180
	46	C350.50K15	297/5	پومیس خاش	52/5	0/5	955	815	90 ، 180
	47	C350.50K20	280	پومیس خاش	70	0/5	955	815	90 ، 180
	48	C350.50K25	262/5	پومیس خاش	87/5	0/5	955	815	90 ، 180
	49	C350.50A15	297/5	توف آبیگ	52/5	0/5	955	815	90 ، 180
	50	C350.50A20	280	توف آبیگ	70	0/5	955	815	90 ، 180
	51	C350.50A25	262/5	توف آبیگ	87/5	0/5	955	815	90 ، 180
	52	C350.50S10	315	پومیس اسکندان	35	0/5	955	815	90 ، 180
	53	C350.50S15	297/5	پومیس اسکندان	52/5	0/5	955	815	90 ، 180
	54	C350.50S20	280	پومیس اسکندان	70	0/5	955	815	90 ، 180
	55	C350.50T15	297/5	تراس چاجرود	52/5	0/5	955	815	90 ، 180
	56	C350.50T20	280	تراس چاجرود	70	0/5	955	815	90 ، 180
	57	C350.50T25	262/5	تراس چاجرود	87/5	0/5	955	815	90 ، 180
هفتم	58	C400.45	400	--	0	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	59	C400.45MK1.5	380	متاکائولن نوع 1	20	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	60	C400.45MK1.10	360	متاکائولن نوع 1	40	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	61	C400.45MK1.15	340	متاکائولن نوع 1	60	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28

	62	C400.45MK1.20	320	مٹاکائولن نوع 1	80	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	63	C400.45MK3.5	380	مٹاکائولن نوع 3	20	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	64	C400.45MK3.10	360	مٹاکائولن نوع 3	40	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	65	C400.45MK3.15	340	مٹاکائولن نوع 3	60	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
	66	C400.45MK3.20	320	مٹاکائولن نوع 3	80	0/45	954	796	، 90 ، 180 7 ، 28
هشتم	67	SCC350.45Z10	315	زنولیت فیلر خنئی	35 124	0/45	531	1240	، 90 ، 180 28
	68	SCC350.45Z15	297.5	زنولیت فیلر خنئی	52/5 124	0/45	530	1237	، 90 ، 180 28
	69	SCC350.45Z20	280	زنولیت فیلر خنئی	70 123	0/45	528	1233	، 90 ، 180 28
	70	SCC350.45Z25	262.5	زنولیت فیلر خنئی	87/5 123	0/45	526	1228	، 90 ، 180 28
	71	SCC350.45Z30	245	زنولیت فیلر خنئی	105 122	0/45	525	1224	، 90 ، 180 28
	72	C400.45NS0	400	نانو سیلیس	0	0/45	875	875	28 ، 90 ، 180 7 ،
نهم	73	C400.45NS2.5	390	نانو سیلیس	10	0/45	875	875	28 ، 90 ، 180 7 ،
	74	C400.45NS4.5	382	نانو سیلیس	18	0/45	875	875	28 ، 90 ، 180 7 ،
	75	C400.45NS6.5	374	نانو سیلیس	26	0/45	875	875	28 ، 90 ، 180 7 ،
	76	C400.45NS8.5	366	نانو سیلیس	34	0/45	875	875	28 ، 90 ، 180 7 ،
	77	C400.45N4.5M4.5	364	نانو سیلیس میکروسیلیس	18 18	0/45	875	875	7 ، 28 ، 90
	78	C400.45N4.5M6	358	نانو سیلیس میکروسیلیس	18 24	0/45	875	875	7 ، 28 ، 90
	79	C400.45N4.5M7.5	352	نانو سیلیس میکروسیلیس	18 30	0/45	875	875	7 ، 28 ، 90

استاندارد ملی شماره 3205 ایران، گرفته شده و در سنین 28 و 90 روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. این نمونه‌ها نیز در دو لایه ریخته شده و توسط حداقل 25 ضربه میله استاندارد متراکم شده‌اند. نمونه‌ها پس از یک هفته عمل‌آوری مرطوب در کارگاه با دقت کافی و در کیسه‌های پلاستیکی دربسته به آزمایشگاه منتقل شده و تا هنگام آزمایش تحت عمل‌آوری مرطوب قرار گرفته‌اند. طرح اختلاط کارگاهی این نمونه‌ها در جدول 4 آورده شده است. قابل ذکر است که با توجه به اینکه در این کارگاه‌ها امکان کنترل دقیق میزان رطوبت سنگدانه‌ها و نسبت آب به سیمان وجود نداشته است، ارائه طرح اختلاط

به منظور صحت سنجی و ارزیابی مدل‌های بدست آمده، هشت طرح اختلاط آزمایشگاهی نیز مطابق با جدول 3 به طور مجزا در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC) پیشنهاد، ساخته و تحت عمل‌آوری مرطوب قرار گرفته‌اند. سپس این نمونه‌ها به CTDRC منتقل شده و در سن 28 روزه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. قابل توجه است که در ساخت این نمونه‌ها از مصالح متفاوتی نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی CTDRC استفاده شده است.

از دیدگاه دیگر برای بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و امکان تعمیم آن به نمونه‌های واقعی، شش نمونه کارگاهی از سه کارگاه مختلف در استان تهران، بر اساس

دقیق این نمونه‌ها میسر نمی باشد.

جدول 3- جزئیات طرح اختلاط بتن نمونه‌های آزمایشگاهی مرکز تحقیقات BHRC

ردیف	Mixtures	سیمان (kg/m ³)	میکروسیلیس (kg/m ³)	W/C	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)
1	C325.40MS0	325	0	0/4	825	1009
2	C325.40MS7.5	300	25	0/4	825	1009
3	C325.50MS0	325	0	0/5	755	923
4	C325.50MS7.5	300	25	0/5	755	923
5	C400.40MS0	400	0	0/4	863	1054
6	C400.40MS7.5	370	30	0/4	863	1054
7	C400.50MS0	400	0	0/5	801	979
8	C400.50MS7.5	370	30	0/5	801	979

جدول 4- جزئیات طرح اختلاط تقریبی نمونه‌های کارگاهی

ردیف	Mixtures	سیمان (kg/m ³)	آب اضافه شده (kg/m ³)	شن اضافه شده (kg/m ³)	ماسه اضافه شده (kg/m ³)	اسلامپ (cm)
1	F350	350	165	1080	775	7
2	F300	300	210	1020	750	10
3	M450	450	110	1100	700	14
4	M350	350	80	1150	700	6
5	I400	400	90	1050	770	6
6	I350	350	75	1100	770	9

هوا در زیر الکترودها، مقاومت الکتریکی سطحی هر آزمونه از میانگین هشت قرائت انجام گرفته بر روی محیط آن به دست آمده است. نتیجه نهایی نیز میانگین نتایج 3 آزمونه می باشد. قابل توجه است که تمامی آزمایش‌ها در دمای آزمایشگاه و بر روی آزمونه‌های کاملاً اشباع انجام شده‌اند.

3- مدل‌سازی با کمک شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی الگوریتم‌هایی هستند که به منظور شبیه سازی سیستم بیولوژیکی مغز انسان به وجود آمده‌اند. این الگوریتم‌ها از طریق فرایند یادگیری قادر به تشخیص روابط پیچیده موجود بین مجموعه ورودی و خروجی‌های

آزمایش نفوذ سریع شده یون کلراید طبق استاندارد ASTM C1202 بر روی آزمونه‌های به قطر 5 سانتیمتر که از ناحیه میانی نمونه‌های استوانه‌ای 20×10 سانتیمتری برش داده شدند، انجام شده است [16]. میانگین شار الکتریکی عبوری از سه آزمونه، طی 6 ساعت و تحت اختلاف پتانسیل 60 ولت، پس از حذف اعداد ناهمخوان برای هر نمونه ثبت شده است. آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی نیز به روش چهار الکترودی با استفاده از آرایش ونر طبق استاندارد FM 5-578 انجام شده است [17]. در این روش مقاومت الکتریکی سطحی بتن بین 0 تا 99 کیلو اهم- سانتی متر و با دقت 0/1 واحد اندازه گیری می‌شود. برای جلوگیری از تأثیر قرارگیری اتفاقی سنگدانه و یا حفرات

مختلف هستند. این قابلیت، که به اطلاعات چندانی در مورد ماهیت داده‌ها وابسته نیست، می‌تواند به عنوان مهم‌ترین عامل گسترش و رواج استفاده از آن‌ها، به خصوص در ارتباط با پیش‌بینی رفتار پیچیده مواد مختلف، باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه پیش‌خور⁹، که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از متداول‌ترین انواع این شبکه‌ها هستند که توسط محققین زیادی برای پیش‌بینی رفتار بتن و ملات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [18-20].

اولین گام در ایجاد یک مدل شبکه عصبی مصنوعی، تعیین ساختار شبکه می‌باشد. در حالت کلی در مورد تعداد لایه‌ی لازم و تعداد نرون‌های مورد احتیاج در هر لایه برای دست‌یابی به بهترین شبکه قانون مشخصی وجود ندارد [21]. از این رو برای پیدا کردن بهترین ساختار شبکه از سعی و خطا استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی نرم افزار MATLAB، برنامه‌ای بازگشتی کد نویسی شده است تا با تغییر تعداد نرون‌ها در هر لایه و نیز تغییر تعداد لایه‌ها و توابع محرک، خروجی‌های شبکه‌های مختلف ارزیابی و بهترین ساختار شبکه پیدا شود.

به این منظور داده‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند؛ به این صورت که 60 درصد داده‌ها برای آموزش شبکه، 20 درصد برای اعتبار سنجی و 20 درصد دیگر داده‌ها برای آزمون شبکه مورد

استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، به منظور بالا بردن بازدهی شبکه عصبی مصنوعی، پیش از وارد نمودن داده‌ها همگی داده‌ها بین 0 و 1 نرمال شده‌اند.

شبکه‌های عصبی با یک لایه پنهان، با تعداد نرون‌های 1 الی 15 و توابع محرک Purelin، Logsig و Tansig با تغییر تصادفی مقادیر اولیه وزن‌ها به تعداد 100 بار اجرا شده‌اند. شبکه‌های عصبی با دو لایه پنهان نیز با تعداد نرون‌های 1 تا 15 برای هر لایه پنهان و ترکیب توابع محرک خطی، Log-sigmoid و Tan-sigmoid با تغییر تصادفی مقادیر وزن‌ها به تعداد 100 بار اجرا گردیده‌اند. خروجی برنامه میانگین و حداکثر ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شبکه برای داده‌های آموزش، اعتبار سنجی، آزمون و نیز کل داده‌ها است. در نهایت بهترین شبکه بر اساس معیار بزرگترین ضریب همبستگی برای هر گروه و از هر ساختار شبکه انتخاب شده است.

3-1- پیش‌بینی مقاومت بتن در برابر نفوذ تسریع شده یون کلراید

با توجه به اینکه بتن یک ماده سه فازی است، اجزای مختلف آن می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر هدایت الکتریکی بتن داشته باشند. سنگدانه‌های معمول از تخلخل و هدایت الکتریکی بسیار پایینی برخوردار هستند. خمیر سیمان نیز در مقایسه با آب منفذی هدایت الکتریکی پایینی دارد. بنابراین هدایت الکتریکی بتن به شدت به میزان

⁹ Multi-layer feed forward neural networks

حفرات خمیر سیمان، اشباع بودن آن‌ها و خصوصیات شیمیایی آب منفذی (نوع و غلظت یون‌های محلول در آن) وابسته بوده و هر تغییری در این مشخصات به شدت بر هدایت الکتریکی بتن تأثیرگذار است. با توجه به دشوار بودن اندازه‌گیری حجم حفرات خمیر سیمان می‌توان از پارامترهایی مانند حجم سنگدانه‌های مصرف شده، عیار مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی برای ارزیابی آن استفاده کرد. با افزایش سن و پیشرفت واکنش‌های هیدراسیون نیز بسیاری از لوله‌های مؤئینه بتن منقطع شده و یا از بین می‌روند. بنابراین سن نمونه نیز می‌تواند پارامتر مؤثری در تعیین هدایت الکتریکی بتن باشد.

بسیاری از پوزولان‌ها با کاهش حجم و پیوستگی لوله‌های مؤئین نفوذپذیری بتن را کاهش داده و مقاومت الکتریکی آن را به شدت افزایش می‌دهند [4, 22]. با این وجود در صورت استفاده از پوزولان‌های فعال هدایت الکتریکی بتن بسیار بیشتر از نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. علت این امر مصرف بخش زیادی از هیدروکسید کلسیم موجود در بتن در واکنش‌های ثانویه پوزولانی می‌باشد. زیرا هدایت الکتریکی یون OH^- حدود سه برابر یون‌هایی مانند K^+ ، Na^+ ، Cl^- و ... است [23]. بنابراین عیار و نوع مواد جایگزین سیمان مصرفی می‌تواند به عنوان عامل دیگری در تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید مطرح باشد. در این قسمت به منظور ارائه مدل جامعی برای پیش‌بینی

مقاومت بتن در برابر نفوذ تسریع شده یون کلراید، با توجه به موارد مطرح شده، مشخصات طرح اختلاط (عیار سیمان، عیار مواد جایگزین سیمان و ضریب فعالیت آن‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی، حجم سنگدانه‌ها)، سن آزمونه و مقاومت الکتریکی سطحی آن به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور تخمین میزان فعالیت مواد جایگزین سیمان مصرف شده، مقدار حاصل از تقسیم مقاومت فشاری 28 روزه نمونه‌های ملات استاندارد حاوی 10 درصد ماده جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری ملات شاهد به عنوان ضریب فعالیت آن‌ها، مطابق جدول 5، در نظر گرفته شده است.

جدول 5- ضرایب فعالیت مواد جایگزین سیمان

ماده جایگزین سیمان	ضریب فعالیت منظور شده
میکروسیلیس	2.00
متاکائولن (1)	1.30
متاکائولن (2)	1.28
متاکائولن (3)	1.28
ژئولیت طبیعی	1.17
خاکستر پسته برنج	1.05
تراس	0.93
توف	0.89
پومیس	0.88
پودر سنگ آهک	0.76

نتایج حاصل از 100 بار اجرای شبکه‌ها با توابع فعالیت مختلف، حاکی از قرار گرفتن تابع تانژانت هیپربولیک در لایه پنهان اول و تابع لگاریتمی در لایه پنهان دوم برای ایجاد شبکه عصبی منتخب می‌باشد. تعداد نرون‌های این شبکه 11 و 4 در لایه پنهان اول و دوم می‌باشد. قابل ذکر است

که ضریب همبستگی بین پیش بینی های شبکه منتخب و مقادیر واقعی داده های آزمون برابر 0.978 می باشد که با توجه به اینکه این داده ها طی فرایند آموزش توسط شبکه دیده نشده اند، می توان گفت شبکه منتخب از دقت بسیار بالایی برای تخمین مقادیر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید برخوردار می باشد.

3-2- آنالیز حساسیت شبکه عصبی مصنوعی منتخب

هر شبکه عصبی در واقع یک نگاشت از فضای پارامترهای ورودی به فضای پارامترهای خروجی است. شبکه آموزش دیده در پژوهش حاضر دارای 7 ورودی و 1 خروجی می باشد. بنابراین اگر این شبکه عصبی یک تابع فرض شود، تابعی به شکل زیر خواهد بود:

رابطه 1 $O = \text{net}(I_1, I_2, \dots, I_7)$ که در آن O خروجی شبکه و I ها ورودی های آن می باشند. برای بررسی حساسیت خروجی شبکه نسبت به هر یک از ورودی ها در یک نقطه خاص (یعنی برای مقادیر ثابت ورودی ها) می توان از این تابع نسبت به آن متغیر خاص مشتق گرفت و حساسیت خروجی O را به ورودی I_i به شکل زیر تعریف کرد:

رابطه 2 $S_{O-I_j} = \frac{\partial O}{\partial I_j}$

با توجه به اینکه خروجی O حاصل اعمال توابع محرک متعدد روی ترکیب های وزنی مختلف از ورودی ها است قاعده تاً با اعمال قانون زنجیره ای مشتق در رابطه فوق، به روش تحلیلی و با توجه به اندازه وزن ها در هر نرون

عبارت فوق قابل محاسبه است. اما محققان نشان داده اند که این روش برای بررسی حساسیت خروجی نسبت به یک ورودی خاص موثر نیست [24, 25]. این امر به دلیل آن است که از طرفی پیچیدگی روابط در نرون های داخلی یک شبکه عصبی معمولاً به حدی است که یافتن رابطه تحلیلی بین ورودی ها و خروجی به سادگی امکان پذیر نیست و از طرف دیگر وجود مقادیر بایاس باعث می شود که برخی نرون ها در نگاشت یک آرایه ورودی خاص به مقدار متناظر آن در فضای خروجی عمل نکنند. اما در نظر گرفتن این خاصیت در روابط تحلیل دشوار خواهد بود. از این رو معمولاً لازم است از روش های عددی برای محاسبه حساسیت خروجی یک شبکه عصبی به ورودی های آن استفاده کرد [24]. در این پژوهش شاخص حساسیت 10 خروجی O به یک ورودی مشخص مانند I_j در دامنه تغییرات آن ورودی به شکل زیر تعریف شده است:

رابطه 3

$$IS_{O-I_j} = \int_0^1 \frac{\partial O}{\partial I_j} dI_j$$

در این رابطه IS_{O-I_j} شاخص حساسیت خروجی O به یک ورودی خاص مثل I_j است. محاسبات روی مقادیر نرمال شده ورودی ها در بازه [0,1] انجام گرفته است تا مقادیر به دست آمده با یکدیگر قابل مقایسه باشند. برای محاسبه شاخص حساسیت خروجی نسبت به یک ورودی مشخص مقادیر بقیه پارامترهای ورودی برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است. در مورد انتخاب مقادیر ثابت

برای سایر پارامترها باید مقادیر به نحوی انتخاب شود که شبکه در آن نقطه قابل استفاده باشد و به بیان دیگر مقادیر مشابه را در طول فرآیند آموزش دیده باشد.

در این پژوهش رابطه 3 برای گام‌های 0.05 روی بازه [0,1] منفصل شده است. به این معنی که مقدار خروجی شبکه عصبی با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای خروجی روی مقدار 0.5 و تغییر دادن پارامتر مورد بررسی با گام‌های 0.05 محاسبه شده است. سپس مقدار $\frac{\partial O}{\partial I_j}$ با تقسیم تفاضل مقدار به دست آمده خروجی برای دو گام متوالی بر طول گام یعنی 0.05 به دست می‌آید. سپس لازم است این مقادیر دوبار در طول گام ضرب شوند و روی بازه با یکدیگر جمع گردند. بنابراین رابطه نهایی محاسبه شاخص حساسیت خروجی به یک پارامتر خاص مانند I_j با گام‌هایی به بزرگی 0.05 به شکل ساده زیر خواهد بود:

$$IS_{O-I_j} = \sum_{k=1}^{20} \frac{\Delta O_{k,j}}{\Delta x} \Delta x = \sum_{k=1}^{20} \Delta O_{k,j} \quad \text{رابطه 4}$$

که در آن $\Delta O_{k,j}$ تفاضل دو مقدار متوالی k و $k+1$ خروجی برای تغییرات پارامتر ورودی I_j با گام‌های 0.05 می‌باشد در حالی که سایر پارامترهای ورودی برابر با 0.5 می‌باشند. شایان ذکر است که مقادیر به دست آمده با در نظر گرفتن گام‌های 0.1 و 0.025 نیز محاسبه گردید که تفاوت در نتایج بسیار کوچک (کمتر از 0.1 درصد) بود.

در جدول 6 شاخص حساسیت خروجی نسبت به هفت ورودی شبکه عصبی

مصنوعی آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود خروجی شبکه، شار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT، بیشترین حساسیت را نسبت به مقاومت الکتریکی سطحی (SR) نمونه‌ها دارد. این موضوع نشان دهنده این امر است که پارامترهای طرح اختلاط بتن اثر یکسانی بر نتایج آزمایش‌های SR و RCPT دارند. به همین علت اثر آن‌ها در آزمایش SR دیده شده و سایر متغیرها شاخص حساسیت بسیار کمی دارند. بنابراین با دقت مناسبی می‌توان آزمایش SR را جایگزین آزمایش RCPT در طبقه بندی مقاومت بتن‌های مختلف در برابر نفوذ یون کلراید کرد.

تنها پارامتر حجم سنگدانه های مصرفی، که به طور غیرمستقیم نشان دهنده حجم خمیر سیمان نیز می‌باشد، شاخص حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارد. علت این امر نیز وابسته بودن آزمایش RCPT به خصوصیات حجمی بتن و سطحی بودن آزمایش SR می‌باشد که باعث می‌شود این پارامتر اثر متفاوتی در نتایج این دو آزمایش داشته باشد.

جدول 6 - شاخص حساسیت پارامترهای مختلف در خروجی مدل شبکه عصبی

رتبه	پارامتر	شاخص حساسیت
1	مقاومت الکتریکی سطحی	0.46
2	حجم کل سنگدانه ها	0.14
3	ضریب فعالیت مواد جایگزین سیمان	0.079
4	عیار سیمان	0.066
5	عیار مواد جایگزین سیمان	0.057
6	نسبت آب به مواد	0.043

	سیمانی	
7	سن آزمونه	0.033

4- مدل‌سازی با کمک روش رگرسیون خطی

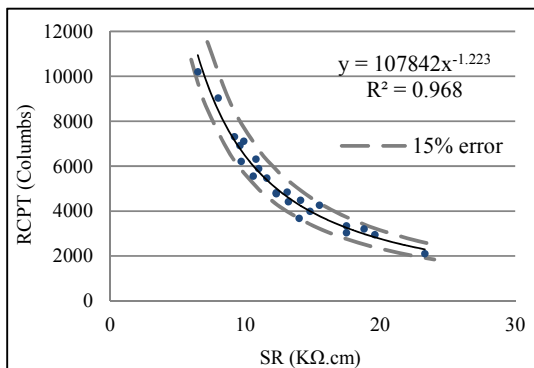
با وجود اینکه مدل ارائه شده بر اساس شبکه‌های عصبی به خوبی نشان دهنده پارامترهای مؤثر بر شار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT می‌باشد و با دقت بسیار خوبی می‌تواند آن را تخمین بزند، اما در ارزیابی مقاومت سازه‌های موجود در برابر نفوذ یون کلراید، در صورتی که مشخصات دقیق طرح اختلاط بتن موجود نباشد، و یا برای کنترل کیفیت اجرای سازه، ارائه مدلی ساده برای تخمین سریع مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید بر اساس نتایج آزمایش سریع، ساده و غیر مخرب مقاومت الکتریکی سطحی بتن، می‌تواند بسیار مفید و کاربردی باشد. به همین منظور در این قسمت با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی داده‌های حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده در CTRC، بر اساس حداقل کردن مربعات خطاها، مدلی ساده میان نتایج آزمایش‌های RCPT و SR ارائه شده است.

در حالت کلی رابطه توانی خوبی با ضریب همبستگی (R^2) و جذر میانگین مربعات خطاها ($RMSE^{11}$) نسبتاً مناسب بین نتایج این دو آزمایش در میان تمام نمونه‌ها، همان‌طور که در شکل 1 و جدول 7 نشان داده شده است، برقرار می‌باشد. علت توانی بودن این رابطه افزایش شدید دما در

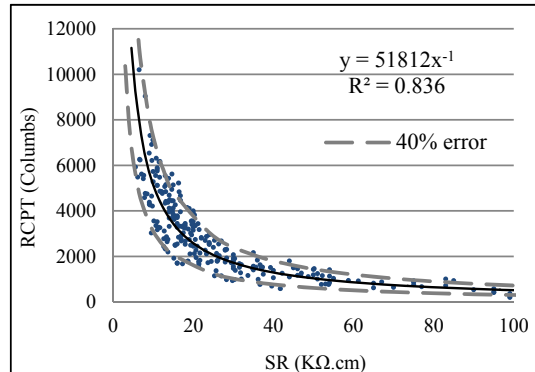
آزمایش RCPT (به خصوص در بتن‌های با کیفیت پایین‌تر) و تأثیر بسیار زیاد این امر بر هدایت الکتریکی بتن می‌باشد [26].

با توجه به تأثیر سایر پارامترها بر رابطه میان نتایج این دو آزمایش، در صورتی که برای هر نوع بتن رابطه جداگانه‌ای میان نتایج این آزمایش‌ها در نظر گرفته شود، طبق شکل 2 (به عنوان نمونه) و جدول 7 همبستگی و دقت این روابط بسیار بالاتر خواهد بود. به طوری که میانگین $RMSE$ برای نه سری نمونه مورد بررسی، برابر 408 کولمب خواهد شد که در مقایسه با 833 کولمب برای رابطه کلی، به میزان قابل توجهی کمتر می‌باشد.

¹¹ Root Mean Square Error



شکل 2- رابطه میان نتایج آزمایش‌های RCPT و SR برای نمونه‌های سری اول



شکل 1- رابطه میان نتایج آزمایش‌های RCPT و SR برای تمامی نمونه‌ها

جدول 7- روابط بدست آمده بین نتایج آزمایش‌های RCPT و SR با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

شرح	رابطه بدست آمده	R ²	RMSE
نمونه‌های سری اول	$Charge = 107842SR^{-1.223}$	0.968	353
نمونه‌های سری دوم	$Charge = 47794SR^{-0.947}$	0.968	413
نمونه‌های سری سوم	$Charge = 58254SR^{-1.186}$	0.961	184
نمونه‌های سری چهارم	$Charge = 51440SR^{-0.924}$	0.942	203
نمونه‌های سری پنجم	$Charge = 162361SR^{-1.342}$	0.830	596
نمونه‌های سری ششم	$Charge = 123786SR^{-1.209}$	0.941	266
نمونه‌های سری هفتم	$Charge = 50839SR^{-1.147}$	0.957	396
نمونه‌های سری هشتم	$Charge = 106524SR^{-1.241}$	0.918	222
نمونه‌های سری نهم	$Charge = 54231SR^{-0.983}$	0.965	353
رابطه کلی بین تمام نمونه‌ها	$Charge = 51812SR^{-1}$	0.836	883

خطای کمتری شار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT را پیش بینی کرده است. البته استفاده از تنها یک ورودی در مدل کلی حاصل از آنالیز رگرسیون خطی یک مزیت مهم می‌باشد که به تناسب اطلاعات موجود از بتن مورد نظر، یکی از دو مدل می‌تواند بر دیگری برتری داشته باشد.

در مورد نمونه‌های کارگاهی نیز که به منظور صحت سنجی مدل‌ها تهیه شده‌اند، مشاهده می‌شود که مدل رگرسیون خطی ارائه شده، قادر به تخمین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید با ضریب همبستگی بالا و خطای قابل قبولی می‌باشد. قابل ذکر است

5- بررسی و مقایسه مدل‌های ارائه شده

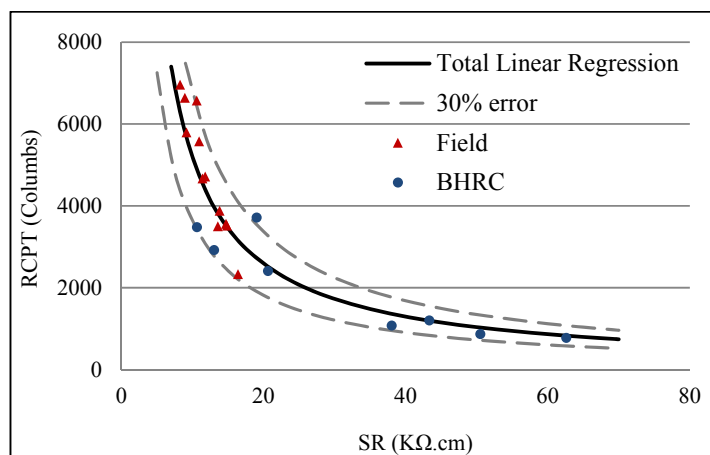
در این قسمت مدل‌های ارائه شده، به منظور اعتبار سنجی، برای دو سری داده‌های BHRC و کارگاهی مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته‌اند. به این منظور پارامترهای آماری مرتبط با تخمین‌های صورت گرفته توسط مدل‌ها در جدول 8 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ارتباط با نمونه‌های BHRC هر دو مدل ارائه شده از دقت خوبی برخوردارند اما مدل شبکه عصبی با توجه به پارامترهای مختلفی که در آن در نظر گرفته شده است، با

امکان پذیر نمی‌باشد. در شکل 3 دقت مدل رگرسیون خطی کلی برای تخمین نتایج نمونه‌ها نشان داده شده است.

که با توجه به مشخص نبودن طرح اختلاط دقیق نمونه‌های کارگاهی، استفاده از نتایج آن‌ها برای ارزیابی مدل شبکه عصبی منتخب

جدول 8 - میزان دقت مدل‌های ارائه شده در تخمین از الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT

نمونه‌های کارگاهی		نمونه‌های BHRC		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	
-	-	598	0.92	مدل شبکه عصبی منتخب
680	0.89	725	0.90	مدل رگرسیون خطی کلی



شکل 3 - بررسی دقت مدل رگرسیون خطی کلی برای تخمین نتایج نمونه‌های BHRC و کارگاهی

6- نتیجه گیری

مقاومت الکتریکی سطحی آن شبکه عصبی منتخب در حالت کلی با دقت مطلوبی قادر به پیش بینی مقاومت بتن در برابر نفوذ تسریع شده یون کلراید می‌باشد. از سوی دیگر، مدل ارائه شده بر اساس آنالیز رگرسیون خطی نیز با دقت مناسبی قادر به پیش بینی همین پارامتر، تنها با استفاده از مقاومت الکتریکی سطحی بتن، می‌باشد. این مدل به طور خاص در مواردی که طرح اختلاط دقیق بتن در دسترس نیست، می‌تواند بسیار مناسب و کاربردی باشد.

با توجه به پایه‌های فیزیکی مشترک دو آزمایش RCPT و SR وجود ارتباط بین نتایج این دو آزمایش منطقی به نظر می‌رسد. بر همین اساس دو مدل برای پیش بینی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و نیز آنالیز رگرسیون خطی ارائه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از این است که در صورت معلوم بودن مشخصات طرح اختلاط (عیار سیمان، عیار مواد جایگزین سیمان و ضریب فعالیت آن‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی، حجم سنگدانه ها)، سن آزمونه و

علاوه بر این، بر اساس آنالیز حساسیت انجام شده بر روی شبکه عصبی منتخب، مشخص شد که مقاومت الکتریکی سطحی با اختلاف زیادی مهم‌ترین پارامتر در تعیین شار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT می‌باشد. این امر نشان دهنده اثر یکسان پارامترهای طرح اختلاط بتن بر نتایج آزمایش‌های RCPT و SR می‌باشد. تنها حجم سنگدانه ها که به طور غیرمستقیم نشان دهنده حجم خمیر سیمان نیز می‌باشد، اثر متفاوتی در این آزمایش‌ها دارد. علت این موضوع نیز وابسته بودن نتایج آزمایش SR به خصوصیات سطحی بتن می‌باشد.

- [1] Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25(4-5 SPEC), pp. 459-471.
- [2] Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B. (1987). Assessment of simple methods of determining the free chloride ion content of cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 17(6), pp. 907-918.
- [3] Whiting, D. (1981). RAPID MEASUREMENT OF THE CHLORIDE PERMEABILITY OF CONCRETE. *Public Roads*, Vol. 45(3), pp. 101-112.
- [4] Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Tin, S.S. (2000). Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. *ACI Structural Journal*, Vol. 97(2), pp. 221-232.
- [5] Ozyildirim, C., Halstead, W., Resistance to Chloride Ion Penetration of Concretes Containing Fly Ash, Silica Fume, or Slag, in Special Publication 1081988, American Concrete institute: MI, USA. p. 35-62.
- [6] Ewins, A.J. (1990). Resistivity measurements in concrete. *British Journal of Non-Destructive Testing*, Vol. 32(3), pp. 120-126.
- [7] Millard, S.G. (1991). Reinforced concrete resistivity measurement techniques. *Proceedings - Institution of Civil Engineers. Part 2. Research and theory*, Vol. 91(pt 2), pp. 71-88.
- [8] Millard, S., Harrison, J. (1989). Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assessment of corrosion risk. *Brit. J. Nondestructive Testing*, Vol. 31(11), pp. 617-621.
- [9] Hope, B.B., Ip, A.K., Manning, D.G. (1985). Corrosion and electrical impedance in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 15(3), pp. 525-534.
- [10] Hunkeler, F. (1996). The resistivity of pore water solution - A decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. *Construction and Building Materials*, Vol. 10(5 SPEC. ISS.), pp. 381-389.
- [11] Andrade, C. (2005). Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity. *IBRACON Mater J*, Vol. 1(1), pp. 1-5.
- [12] Chini, A.R., Muszynski, L.C., Hicks, J., Determination of acceptance permeability characteristics for performance-related specifications for Portland cement concrete, in Final Report submitted to Florida Department of Transportation (Contract No. BC 354-41).
- [13] Ramezaniapour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, Vol. 25(5), pp. 2472-2479.
- [14] Polder, R.B. (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, Vol. 15(2-3), pp. 125-131.
- [15] Péra, J., Husson, S., Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21(2), pp. 99-105.
- [16] ASTM, C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards 1997: Philadelphia, USA.
- [17] FDOT, FM 5-578: Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability, in Florida Department of Transportation 2004: Florida, USA.
- [18] Fuat, D. (2008). Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, Vol. 22(7), pp. 1428-1435.
- [19] Jeyasehar, C.A., Sumangala, K. (2006). Damage assessment of prestressed concrete beams using artificial neural network (ANN) approach. *Computers & Structures*, Vol. 84(26-27), pp. 1709-1718.
- [20] Kewalramani, M.A., Gupta, R. (2006). Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. *Automation in Construction*, Vol. 15(3), pp. 374-379.
- [21] منهج، م.ب.م. هوش محاسباتی (جلد اول: مبانی شبکه‌های عصبی) 1388، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [22] Savas, B.Z., Effects of microstructure on durability of concrete, in Department of Civil Engineering 1999, North Carolina State University: Raleigh, NC.
- [23] Shi, C., Stegemann, J.A., Caldwell, R.J. (1998). Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results. *ACI Materials Journal*, Vol. 95(4), pp. 389-394.
- [24] Montañó, J.J., Palmer, A. (2003). Numeric sensitivity analysis applied to feedforward neural networks. *Neural Computing & Applications*, Vol. 12(2), pp. 119-125.
- [25] Wang, W., Jones, P., Partridge, D. (2000). Assessing the Impact of Input Features in a Feedforward Neural Network. *Neural Computing & Applications*, Vol. 9(2), pp. 101-112.
- [26] Julio-Betancourt, G.A., Hooton, R.D. (2004). Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(6), pp. 1007-1015.