پیش‌بینی مقاومت بتن حاوی سنگ‌دانه‌های مختلف از طریق مدل‌سازی در شبکه‌های عصبی مصنوعی

جواد شریفی، محمدرضا نیکودل*؛ دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ: دریافت ۹۱/۱۰/۳۰ **پذیرش** ۹۳/۳/۱۱

چکیده

در این تحقیق از طریق مدل‌سازی در شبکه‌های عصبی مصنوعی، پیش‌بینی مقاومت بتن حاوی سنگ‌دانه‌های مختلف با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب (آلتراسونیک) انجام شد. بدین منظور ابتدا مصالحی با ویژگی‌های متفاوت گردآوری و خواص آن‌ها در آزمایشگاه به‌روش‌های مخرب و غیرمخرب تعیین شده است. نکتهٔ مهم این تحقیق، استفاده از سنگ‌دانه‌های مختلف با خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوت و هم‌چنین استفاده از دو آزمون غیرمخرب استاتیکی و دینامیکی است که به‌ترتیب مقاومت تک‌محوری و سرعت موج فشاری است. بنابراین مدل‌سازی شامل نمونه‌های مختلفی است و فضای پیش‌بینی نیز در برگیرنده روش‌های ایستا و پویا است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نه تنها سبب افزایش دقت می‌شود بلکه باعث کاهش حجم محاسبات و هم‌چنین تأثیر زیادی در کاهش زمان محاسبه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بتن، سنگ‌دانه، سرعت موج فشاری، شبکه‌های عصبی مصنوعی

مقدمه

مقاومت از مهم‌ترین و مرسوم‌ترین پارامترهای بتن است که کارایی و کیفیت آن را تعیین می‌کند. نحوهٔ اندازه‌گیری این پارامتر در استانداردهای مختلف ذکر شده است. مقاومت بتن به‌طور مستقیم با آزمون‌های فشاری و تعیین مقاومت حداکثر در زیر دستگاه فشار به‌دست می‌آید [۱]–[٤]. این روش نسبتاً پیچیده، وقت‌گیر و مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن

* **نویسنده مسئول** nikudelm@modares.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

دستگاه‌های مجهز و حساس است. از طرف دیگر نتایج وابستگی شدیدی به عوامل خارجی مثل خطاهای انسانی، ابعاد نمونه، نحوهٔ بارگذاری و غیره دارد [۳]-[۸]. برای حل این مشکل و گریز از روش مستقیم، همواره مهندسان سعی کرده‌اند به‌وسیله روابط تجربی و دستگاه‌های مختلف، روش کوتاه و غیرمستقیم و در عین حال دقیق، برای پیش‌بینی و تخمین این مهم پیدا کنند. یکی از روش‌های مرسوم، سریع و نسبتاً دقیق، تعیین مقاومت از روش‌های غیرمخرب و استفاده از روابط تجربی است. مهندسان همیشه به ارزیابی خواص بتن با تکنیک‌های غیرمخرب در دنیا علاقه‌مند بوده‌اند. این آزمون‌ها به‌راحتی قابل انجام و ارزیابی نتایج آن‌ها ساده و سریع است، زیرا ساخت نمونه در این روش‌ها اندک و یا اصلاً نیاز به تهیهٔ نمونه نیست (در جایی که امکان نمونه‌گیری نباشد) [۸]-[۱۰]. یکی از این آزمون‌های غیرمخرب، خواص آلتراسونیک یا صوتی است. خواص صوتی شامل محاسبه فرکانس تشدید ارتعاشات طولی، عرضی و پیچشی نمونه‌ای کوچک سنگی یا بتنی است که اطلاعاتی در بارهٔ مقاومت بتن، مدول الاستیسیته دینامیکی، ثابت میرایی و استهلاک لگاریتمی را فراهم می‌سازد [۱]-[۳]، [۱۱]-[۱۳].

از جمله خواص صوتی بتن، سرعت موج فشاری است که به‌طور زیادی در پیش‌بینی و ارزیابی خواص فیزیکی، مکانیکی، بررسی ترک‌ها، عایق گرمایی، عایق صوتی، طرح اختلاط و گیرش بتن سخت شده و هم‌چنین ویژگی‌های بتن تازه و خواص سنگ‌دانه‌ها استفاده شده است. کاربرد عمدهٔ خواص صوتی بیش‌تر در جاهایی است که امکان نمونه‌گیری نیست و یا سنجشی از کیفیت بتن مورد نیاز است [۱٤]-[۲۰]. مدل‌سازی و پیش‌بینی خواص سنگ‌دانه‌ها و بتن اهمیت خاصی در مدرنیزه کردن ساخت سازه‌ها و قضاوت مهندسی دارد. در واقع پیش‌بینی زمان لازم برای قالب برداری، کنترل و زمان‌بندی پروژه، کنترل کیفیت و عوامل دیگر را فراهم می‌کند. هم‌چنین می‌تواند اطلاعات مهمی به مهندسان و طراحان به‌ویژه مهندسان سازه برای کاربرد در مباحث بتن‌های پیش‌تنیده ارایه دهد [۲۰]-[۲۷]. در حال حاضر روش‌های پیش‌بینی خواص بتن، به‌طور عمده در ارتباط با خواص سنگ‌دانه‌ها و یا خواص بتن تازه است. تاکنون از خواص سنگ‌دانه‌ها، حرارت و خواص آلتراسونیک بتن تازه، هم‌چنین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

نسبت آب به سیمان و روانی آن در پیش‌بینی خواص بتن سخت شده استفاده شده است [۱۰]–[۱۶]، [۱۹]–[۲۷].

روش‌های مدل‌سازی سنتی به‌منظور تخمین و پیش‌بینی خواص بتن بر پایهٔ محدودی از اعداد و پارامترها بودند که به‌وسیله رگرسیون‌گیری خطی یا چند متغیره به‌دست می‌آمد. اگر داده‌های جدید تا اندازه‌ای با داده‌های اولیه متفاوت باشند، نه تنها متغیرها، بلکه لازم است شکل روابط نیز تغییر کند [۱۱]. اما در مقایسه، شبکه عصبی لازم نیست که رابطه با شکل و فرم خاص باشد، در عوض لازم است داده‌های ورودی و خروجی کافی در اختیار باشد. توانایی و کارایی شبکه‌های عصبی با رگرسیون‌های خطی و نمایی و حتی چند متغیره مقایسه شده است. این مقایسه‌ها ثابت کرد که شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک رهیافت هوشمند در مقابل روش‌های رگرسیونی چند متغیره است، این در حالی است که روش‌های رگرسیونی کارایی خوبی داشته و در بسیاری از تحقیقات استفاده شده و یا در حال استفاده است. یکی از امتیازات رهیافت شبکه‌های عصبی، تخمین کارایی و ارتباط متغیرهای ورودی مختلف با هم‌دیگر است، یعنی بر خلاف آنالیز رگرسیونی، در شبکه‌های عصبی مصنوعی لازم نیست از قبل دانسته شود که بین متغیرها ارتباطی وجود دارد یا خیر، در واقع شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور هوشمند و با استفاده از الگوریتم‌های آموزش، ارتباطی بین متغیرهای ورودی را پیدا می‌کند [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۲۹]، [۳۰].

در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی مقاومت بتن حاوی سنگ‌دانه‌های مختلف با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب (آلتراسونیک)، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده و نتایج به‌صورت مدل ارایه شده است. در این راستا، ابتدا مصالحی با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متفاوت گردآوری و خواص آن‌ها در آزمایشگاه به‌روش‌های مخرب و غیرمخرب تعیین شده است. در ادامه با استفاده از طرح اختلاط ثابتی از این مصالح بتن ساخته و خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ساخته شده نیز با روش‌های مخرب و غیرمخرب بعد از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تعیین شده است. سپس نتایج این آزمایش‌ها به تعداد ۲۱۰ عدد برای ورود به مرحلهٔ مدل‌سازی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

از طریق شبکه‌های عصبی مصنوعی آماده شد. شبکه عصبی به‌کار رفته در این تحقیق، پرسپترون چند لایه و از نوع شبکه با ناظر است.

بررسی‌های آزمایشگاهی

مصالح استفاده شده

در این تحقیق طی بررسی‌های میدانی، سنگ‌دانه‌هایی از معادن قرضه مختلف انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شده است. در انتخاب سنگ‌دانه‌ها دقت شده است که از گروه‌های مختلف و هم‌چنین دارای خواص فیزیکی و مقاومتی متفاوت باشد. با توجه به منشأ پیدایش، نمونه‌ها از گروه‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی انتخاب شده است. سنگ‌دانه‌های آذرین به‌کار گرفته شده شامل آندزیت، گرانیت، دیوریت، بازالت، توف و سنگ‌های رسوبی شامل لوماشل، ماسه‌سنگ و دولومیت است. نمونه‌های گنایس و مرمر نیز در رده سنگ‌های دگرگونی قرار می‌گیرند.

تعیین خواص مصالح

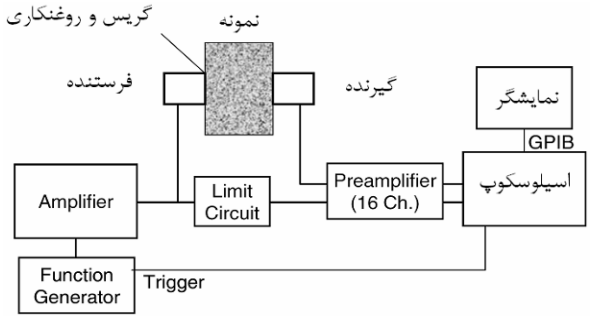
پس از شناسایی ابتدایی سنگ‌ها، در آزمایشگاه خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها تعیین شده است. در ابتدا آزمایش چگالی در حالت خشک و اشباع با سطح خشک طبق استاندارد ISRM بر روی نمونه‌ها انجام شد [۳۱]–[۳٤]. از آزمایش‌های مکانیکی انجام شده روی مصالح می‌توان به مقاومت فشاری تک‌محوری، چکش اشمیت، آزمایش ارزش ضربه، آزمایش ارزش فشاری و برزیلی اشاره کرد [۳]، [۳۳]، [۳٤]. نخست برای این کار، از سنگ مادر مغزه‌هایی به قطر ٥٤ میلی‌متر تهیه و پس از آماده‌سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های مذکور در شرایط خشک و اشباع با سطح خشک روی نمونه‌ها انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۳۱]. لازم به ذکر است که آزمایش‌های ذکر شده در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است (شکل ۱).

برای تعیین سرعت صوت، از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری استفاده و طبق استاندارد ISRM روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع با سطح خشک انجام شده است [۳۱]. روش کار در این آزمایش بر اساس ارسال امواج فشاری به‌داخل نمونه و اندازه‌گیری زمان گذر موج بر حسب میکروثانیه است [۳۱]، [۳۲]. شکل ۲ شماتیک، نحوهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

انجام آزمایش و شکل ۳ تصویر نمونه و دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج برخی از آزمایش‌ها نیز در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

شکل ۱. انجام آزمایش مقاومت فشاری، برزیلی و ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها



شکل ۲. شماتیک دستگاه سرعت موج فشاری و نحوهٔ کارکرد آن[۱۳]

شکل ۳. تعیین سرعت موج فشاری بر روی مغزه‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

جدول۱. برخی از خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

نام	تخلخل (٪)	جذب آب (٪)		وزن مخصوص		سرعت موج فشاری (m/s)	
شرایط	درشت	درشت	ریز	درشت	ریز	خشک	اشباع
توف	١٦	٤/١٤	٩/٢٧	٢/٥٠	٢/٤٠	٤٢٦٣	٤٣١٧
ماسه سنگ	١٠	٤/١٢	٦/٤٥	٢/٦٠	٢/٥٠	٤١٣٤	٤٢١٥
مرمر	٧	٢/١٣	٢/٤٠	٢/٦٨	٢/٦٤	٦٥٦١	٦٨٤٥
لوماشل	٢٥	٦/٠٠	١٠/٠٠	٢/٧٩	٢/٥٥	٣٠٠٨	٣٣٥١
گرانیت	٧	٢/٣٠	٣/٤١	٢/٦٧	٢/٦٥	٤٦٨٧	٤٩١٨
گنایس	٩	٣/١٠	٥/٧٨	٢/٧٩	٢/٦٦	٢٨٠٨	٣٥٥١
دولومیت	١٦	٢/٥٨	٢/٧٤	٢/٧٤	٢/٦٧	٦٠٥٠	٦١٧٢
دیوریت	١٦	٥/٠٠	٦/٤١	٢/٤٠	٢/٣٥	٤٠٢٣	٤١٣٤
بازالت	١١	٢/٦٨	٣/٧٣	٢/٩٠	٢/٧٩	٦٠٧٦	٦٢٩٩
آندزیت	٢٨	٤/١٤	٦/٤٥	٢/٥٥	٢/٥٠	٣٣٢٦	٣٩٩٥

جدول۲. برخی از خصوصیات مکانیکی سنگ‌دانه‌ها

نام	مقاومت فشاری (MPa)		مقاومت کششی (MPa)		ارزش ضربه (٪)		ارزش فشاری (٪)		عدد سختی چکش اشمیت	
شرایط	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
توف	١٠٧/٠٣	٥٧/٨٨	١١/٥٠	٩/٩٤	١٢/٣١	١٧/٢١	١٣/٣٣	١٥/٠٢	٤٩	٤٧
ماسه سنگ	١٧/٠٠	١٥/٠٠	٣/٥٠	٣/٢٠	٢٤/٠٠	٢٨/٠٠	٢٩/٠٠	٣١/٠٠	٢٨	٢٥
مرمر	٩٧/٧٤	٦٨/٧٨	٨/١٥	٥/٧٣	٢٦/٩٩	٣١/٨٣	٣٦/١١	٣٩/٢٧	٣٣	٣٠
لوماشل	١١/٤٠	٦/٢٨	١/٦٠	١/١٠	٤٦/٠٢	٥٣/٢٠	٦٦/٢٣	٧٠/٦٨	١٣	١٠
گرانیت	١٢٠/٣٢	١١٥/٦٠	١١/٦٦	٨/٦٥	١٧/٥٦	١٨/٥٦	٢٠/٤٤	٢٠/٨١	٣٢	٢٩
گنایس	٦٩/٩٠	٥٣/٣٠	٧/٦٨	٦/٩٤	١٧/٩١	٢١/١١	٣٠/٨٠	٣٣/٤٤	٣٩	٣٧
دولومیت	٨٩/٥٦	٦٩/٢٩	٧/٠٨	٥/٤٧	١٢/٣٢	١٦/٠٨	٢٤/٥٤	٣٠/٨٣	٤٨	٤٦
دیوریت	٣٥/٠٠	٢٨/٠٠	٢/٩٠	٢/٧٠	٢٦/٦٨	٢٩/٠١	٤٤/٨١	٤٨/٦٦	١٤	١١
بازالت	٩٢/٠٠	٧٨/٠٠	١٠/٢٦	٧/٦٩	١٣/١٧	١٥/١٩	٢٥/٦٢	٢٩/٨٤	٣٧	٣٥
آندزیت	٦٧/٧١	٥٦/٧٩	٩/٠١	٧/٠٨	١٨/٦٢	٢١/٣٤	٣٣/٨٢	٣٨/٤١	٤٢	٤٠

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

ساخت بتن و تعیین خواص آن

پس از شناسایی سنگ‌دانه‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف، سنگ‌های موجود به ذراتی در اندازهٔ شن و ماسه خرد و سپس با استفاده از طرح اختلاطی از نمونه‌های موجود بتن تهیه شده است. برای شکست نمونه‌ها از یک سنگ‌شکن استفاده شده تا تأثیر شکل سنگ‌دانه‌ها و خطاهای آزمایش ناشی از تفاوت شکل سنگ‌دانه‌ها بر پارامترهای بتن به‌حداقل برسد [۳۵]، [۳٦].

در این تحقیق از سیمان پرتلند پوزلانی ساخت شرکت سیمان تهران مطابق با استاندارد ASTM C959 استفاده شده است [۳۷]. نسبت اختلاط مصالح برای ساخت بتن بر اساس روش حجمی است و برای تمام سنگ‌دانه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در طرح اختلاط، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/٤٤ و مقاومت فشاری طراحی برابر با ۲۵ مگاپاسکال تعیین شده است. هم‌چنین اسلامپ این طرح برابر با ۳۰ میلی‌متر و درصد هوای غیرعمدی در بتن نیز ۱ درصد در نظر گرفته شده است. مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برای هر مخلوط بتنی ساخته شده از سنگ‌دانه‌های مختلف بین ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر متغیر است.

از نمونه‌های استاندارد مکعبی به اضلاع ۱۵ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری بتن و برای آزمایش مقاومت کششی و سرعت صوت از قالب‌های استوانه‌ای استفاده شده است. پس از نمونه‌گیری، سطح خارجی نمونه‌ها تا ۲٤ ساعت در دمای آزمایشگاه و با گونی پوشش داده شد و در پایان این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج و در حوضچهٔ آب با دمای ۲±۲۲ درجهٔ سانتی‌گراد تا روز آزمایش نگه‌داری شد[۱]-[٤]. سپس در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نمونه‌ها از آب خارج و آزمایش‌های چگالی، آزمایش سختی چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد BS 1881: Part 116(EN 12390-3:2002) روی آن‌ها انجام است [به نقل از ۲]. قبل از انجام آزمایش‌های مخرب، اندازه‌گیری سرعت موج فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی در شرایط اشباع با سطح خشک انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۱۳]، [۱٤]. نتایج برخی از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

جدول۳. برخی از خصوصیات بتن ساخته شده

نام	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی (MPa)			سرعت موج فشاری (m/s)			عدد سختی چکش اشمیت		
سن بتن	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰
توف ماسه	۱۷/۱٦	۲٦/۰۰	۳٤/۲۲	۲/۹٦	۲/۱۰	۱/۵۰	۳۸٤٦/۱۵	۳۹۵۱/۲۱	٤۲۳۷/۲۹	۲۵	۲۳	۱۸
سنگ	۱۳/۳۳	۱۵/۱۱	۲٦/٦۷	۲/۷۲	۲/۰۰	۱/۸۰	۳٤۵٦/۲۲	۳۵۵٤/۵۰	۳۸٤٦/۱۵	۲۵	۱۸	۱۷
مرمر	۲۰/۰۰	۲۷/۳۳	۳٤/۲۲	۳/۷۷	۳/۱۰	۲/۰۹	٤۱۹۰/۰۷	٤۵۳۱/۷۲	٤٦۲۹/٦۳	۳۰	۲۳	۱۸
لوماشل	۸/۲۹	۱۳/۰۰	۱۸/٤۲	۲/۱۰	۱/٦۰	۱/۲۰	۳۷۵۰/۰۰	٤۱٦٦/٦۷	٤۲۸۵/۷۱	۲۸	۱۹	۱۷
گرانیت	۱٦/۳٦	۲۵/۳۳	۳۳/۳۳	۲/۹۹	۲/۲۳	۱/۹۱	۳۸۰۷/۱۳	٤۳۰٤/۱۷	٤٤۹۱/۰۲	۲۹	۲٦	۱۷
گنایس	۲۰/۲۲	۲۸/٤٤	۳۲/۸۹	۳/٦۸	۲/۳۰	۱/۸٦	٤۰۲٦/۸۵	٤۳۹۲/٤۷	٤۵۵۹/۲۷	۳۲	۲٦	۲۱
دولومیت	۱۸/٦۷	۳۲/٤٤	۳۷/۳۳	٤/۲۳	۳/۸۰	۲/۹۵	۳٤۷۵/۰٦	۳۸۰۲/۳٤	٤۷۹۲/۳۳	۳۱	۲٤	۱۹
دیوریت	٤/٤۰	۱٤/٤٤	۲۳/۷۸	۲/۱۰	۱/۸۰	۱/۰۵	۳٤۳۵/۱۲	٤۲۱٦/۳۰	۳۸٦۵/۹۸	۲۳	۱۷	۱۵
بازالت	۱۲/۰۰	۲۲/٦۷	۳۰/۲۲	۳/۳۳	۲/٤۰	۱/۸۰	۳۸۹٦/۱۰	٤۳۳۵/۲٦	٤٤۹۱/۰۲	۲۷	۱۹	۱٦
آندزیت	۱٦/۰۰	۱۸/٦۷	۲۸/۲۸۰	۲/۵۱	۲/۰۰	۱/۷۰	۳٤۹۰/۲۳	۳۷۰۱/۳۲	٤۲۸٤/۳۱	۲۷	۱٦	۱۵

شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی روش‌های ریاضی هستند، با سیستم‌های پردازش اطلاعات و تطبیق‌پذیری که ارتباط بین موضوعات را برای پاسخ به تحریک ایجاد شده از طرف محیط توسعه می‌دهند، یعنی قابلیت یادگیری برای مثال‌های مختلف را دارند. شبکه‌های عصبی نوعی از ساختارهای محاسباتی هستند که کدبرداری و مدل‌های پردازش اطلاعاتشان مانند مغز است و رفتارهای مشابه مغز نظیر یادگیری، ترکیب، رده‌بندی، عمومیت‌دهی، استخراج ویژگی و بهینه‌سازی را از خود نشان می‌دهند. نرون‌ها بلوک‌های اصلی سازنده یک شبکه عصبی هستند که از آن‌ها به‌عنوان عناصر پردازش‌گر شبکه نام برده می‌شود [۳۸]، [۳۹]. هر نرون دارای یک یا چند ورودی است که با استفاده از یک تابع تبدیل یا تابع فعالیت (خطی، سیگموئید و لجستیک-سیگموئید)، ترکیب خطی این ورودی‌ها را به خروجی مورد نظر تبدیل می‌کند. توابع تبدیل مختلفی برای استفاده در یک نرون وجود دارد که با توجه به‌کاربرد متصور از شبکه، هر یک از آن‌ها آزمایش و پس از ارزیابی کارایی هر یک، نسبت به انتخاب تابع تبدیل نهایی تصمیم‌گیری می‌شود [۳۸].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

شبکه‌های عصبی مختلف با توجه به نوع ارتباط بین نرون‌ها و نحوه آموزش به یادگیری با ناظر و بدون ناظر تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مثال در یادگیری نظارتی با استفاده از نمونه‌های موجود به شبکه آموزش داده و خروجی شبکه با خروجی مطلوب مقایسه می‌شود. سپس در هر تکرار آموزش، اندازه خطا بین خروجی شبکه و خروجی مورد انتظار محاسبه و از آن برای محاسبه پارامترهای داخلی شبکه شامل وزن‌ها و مقادیر ثابت استفاده می‌شود. نوع اتصال نرون‌ها در معماری شبکه‌های عصبی به دو نوع پیش خور و پس‌خور تقسیم می‌شوند. گره‌های شبکه پیش‌خور در لایه‌های متوالی قرار گرفته و ارتباط یک‌طرفه است و زمانی که یک الگوی ورودی به شبکه اعمال می‌شود، اولین لایه مقدارش را محاسبه کرده و در اختیار لایهٔ بعدی قرار می‌دهد. لایهٔ بعدی این مقادیر را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و مقادیر خروجی‌اش را به لایهٔ بعدی منتقل می‌کند و هر گره فقط به گره‌های لایهٔ بعد سیگنال منتقل می‌کند. یکی از متداول‌ترین معماری‌های استفاده شده برای اهداف تخمین توابع مختلف، شبکه‌های چندلایه پیش‌خور است که شبکه پرسپترون چند لایه نامیده می‌شود [۱٦]، [۱۹]، [۳۸].

پس از انتخاب معماری شبکه، نوبت به آموزش شبکه می‌رسد. آموزش شبکه فرآیندی است که طی آن وزن‌ها و مقادیر ثابت بهینه هر نرون در لایه‌های مختلف شبکه، با استفاده از یک الگوریتم آموزش تعیین می‌شود. آموزش شبکه با توجه به ساختار و هدف مسئلهٔ بررسی شده می‌تواند با ناظر یا بدون ناظر باشد [۳۸]، [۳۹].

پیش‌بینی مقاومت از طریق شبکه‌های عصبی

پس از ساخت بتن و انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی، نتایج در پایگاه داده مدل‌سازی ثبت شد. معمولاً در پیش‌بینی‌ها، متغیرهای راهنما یا اندکس طوری انتخاب می‌شود که اندازه‌گیری آن‌ها آسان و هزینه کمی در برداشته باشد. از طرف دیگر نتیجه پیش‌بینی نیز بستگی به انتخاب پارامترها داشته و مطلوب بودن پیش‌بینی از دقت به‌دست آمده ارزیابی می‌شود. در این تحقیق در مرحلهٔ اول سعی شد که متغیرهای انتخاب شده (ورودی مدل) به‌راحتی با آزمایش‌های آزمایشگاهی قابل تعیین باشد و دوم این‌که نتایج آن با کم‌ترین هزینه در دسترس واقع شود.

پارامترهای ورودی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

پس از اخذ نتایج از آزمایش‌های آزمایشگاهی، تعداد ۲۱۰ نمونه از آن‌ها انتخاب و برای ورود به شبکه آماده شد. برای مدل‌سازی از پارامترهای شاخص سنگ‌دانه مثل سختی اشمیت (AS)، سرعت موج فشاری (AW)، جنس سنگ‌دانه‌ها (AT)، تخلخل (AP)، وزن مخصوص (AG) و ارزش ضربه (AA) به‌عنوان ورودی و مقاومت فشاری بتن (CH) به‌عنوان خروجی یا هدف استفاده شده است. جدول ٤ محدوده مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی به شبکه را نشان می‌دهد. در ادامه مجموعه داده‌ها به ۲ یا ۳ مجموعه مجزا برای جلوگیری از بیش برازش شبکه تقسیم شدند. در مدل‌هایی که از روش تحلیل اوزان استفاده می‌شود، ۷۵ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد برای آزمایش شبکه در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌هایی که از روش توقف زودرس استفاده می‌شود، ۵۰ درصد برای آموزش، ۲۵ درصد برای ارزیابی و ۲۵ درصد باقی‌مانده برای آزمایش شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از تحلیل اوزان استفاده و سپس تقسیم‌بندی داده‌ها به‌صورت تصادفی انجام شد، به‌طوری‌که از داده‌های یک‌سانی برای آموزش، ارزیابی و آزمایش شبکه استفاده شده است.

جدول٤. محدودهٔ مقادیر ورودی به شبکه

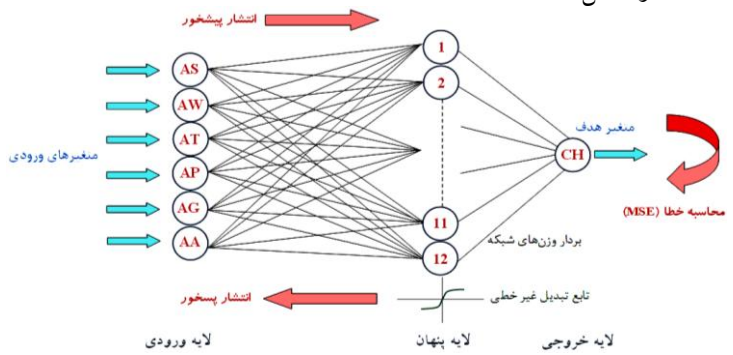
خواص	نام نرون	مقدار حداقل	مقدار حداکثر	میانگین
عدد سختی اشمیت	AS	٦	٥١	٢٩
سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	AW	٢٦٥١/٣٦	٦٨٩٣/٣٤	٤٦٢٤/٩٢
تخلخل (درصد)	AP	٦/١٢	٢٩/٢٠	١٤/٦٩
وزن مخصوص	AG	٢/٣١	٢/٩٠	٢/٦٢
ارزش ضربه (درصد)	AA	١٠/٧٥	٥٤/٧٠	٢٣/٤٠
جنس سنگ‌دانه‌ها	AT	-	-	-
مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	CH	٤/١٠	٣٩/٤٠	٢٤/٥٠

معماری شبکه

پس از پردازش اولیه داده‌ها، ساختار شبکه مورد نظر برای آموزش تعیین شد. پارامترهایی متغییر در ارتباط مدل‌سازی شبکه شامل تعداد لایه‌های شبکه، تعداد نرون‌ها در هر لایه به‌جز لایهٔ خروجی، تابع فعالیت هر لایه و الگوریتم آموزش شبکه است. در این تحقیق تعداد لایه‌ها بین ۲ تا ٤ عدد و تعداد نرون‌های لایه‌های قبل از خروجی بین ۱ تا ۱۲ عدد انتخاب شده است. سپس تابع فعالیت هرکدام از لایه‌ها یکی از توابع خطی، سیگموئید و لجستیک-سیگموئید انتخاب و نتایج تابع بهینه برای مدل استفاده شده است. هم‌چنین از ۱۰ الگوریتم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

مختلف برای آموزش شبکه استفاده شده است. پس از ساختن و آموزش، شبکه‌های مختلف با استفاده از معیارهای ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا برای داده‌های آزمایشی با هم مقایسه و بهترین شبکه انتخاب شده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۳۸]، [۳۹]. در این تحقیق از شبکهٔ پرسپترون پیش‌خور سه‌لایه (با الگوریتم آموزشی انتشار برگشتی خطا و انطباقی) استفاده شده که مدل آن در شکل ٤ نشان داده شده است.



شکل ٤. معماری شبکه

در این تحقیق از شش نرون در لایهٔ ورودی، یک نرون در لایهٔ خروجی و یک لایهٔ نرون پنهان نیز در معماری شبکه چندلایه‌ای استفاده شده است. معماری به‌گونه‌ای طراحی شده که نرون‌های همسایه به‌صورت تمام در ارتباط با دیگر لایه‌ها به‌وسیله وزن‌ها هستند و در نهایت نرون‌های لایهٔ خروجی نتیجه شبکه را تولید می‌کند. تعداد نرون در لایهٔ مخفی نیز به‌عنوان پارامتری متغیر در نظر گرفته شده است. در ادامه شبکه‌هایی با تعداد نرون‌های مختلف در لایه مخفی طراحی و میزان خطای حاصل از پیش‌بینی مقایسه شده است، به‌طوری‌که با ۱۲ نرون در لایه مخفی کم‌ترین خطا حاصل شده و این تعداد نرون به‌عنوان عدد بهینه برای پیش‌بینی و تخمین مقامت بتن انتخاب شده است.

آموزش و آزمون شبکه

پس از طراحی مدل، داده‌های تجربی حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی به دو سری آموزش و سری ارزیابی (پیش‌بینی شونده) تقسیم‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از سری آموزش، شبکه طراحی شده آزموده می‌شود. برای اطمینان از این که شبکه آموزش دیده قادر است سایر مقادیر را مدل‌سازی کند، از سری ارزیابی استفاده می‌شود. پس از اتمام آموزش،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

فقط داده‌های ورودی مربوط به سری ارزیابی به شبکه داده شده و داده‌های خروجی برای این سری محاسبه می‌شود. در نهایت میزان خطا برای سری ارزیابی به‌عنوان معیاری برای عمومیت‌پذیری شبکه تعیین می‌شود [۱٦]، [۳۸].

از ۲۱۰ داده موجود در این تحقیق، تعداد ۱٦۰ نمونه در مرحلهٔ آموزش وارد و بقیه به‌عنوان مجموعه آزمایش استفاده شده است. در ادامه برای شروع مدل‌سازی، شبکه مقداردهی و ورودی‌ها به شبکه وارد و فرآیند آموزش با داده‌های آزمایشگاهی شروع شد. فرآیند آموزش و یادگیری بعد از این که حلقه تکرار (Epoch) به ۱۰۰۰ دور و خطای آن به زیر ۰/۰۵ رسید متوقف شده است. فرآیند یادگیری در سه مرحله با تغییر پارامترهای ورودی و لایه‌های پنهان همراه است که در مرحلهٔ سوم بعد از ٦۰۰ بار سعی و خطا، تقریباً خطای آن تا مقدار ۰/۰۳ ثابت شده است، ولی حلقه تا ۱۰۰۰ دور ادامه یافته است. شکل ۵ حلقه تکرار فرآیند آموزش و یادگیری برای پیش‌بینی مقاومت بتن را نشان می‌دهد. در این شکل خطای شبکه (MSE) و تعداد دورهای آموزش (Training) در مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. برای محاسبهٔ MSE از رابطهٔ (۱) استفاده شده است [۱۰]، [۱۲]، [۱٦]. در این رابطه N تعداد داده‌ها و CSi نیز مقاومت تجربی و مقاومت پیش‌بینی شده بتن است.

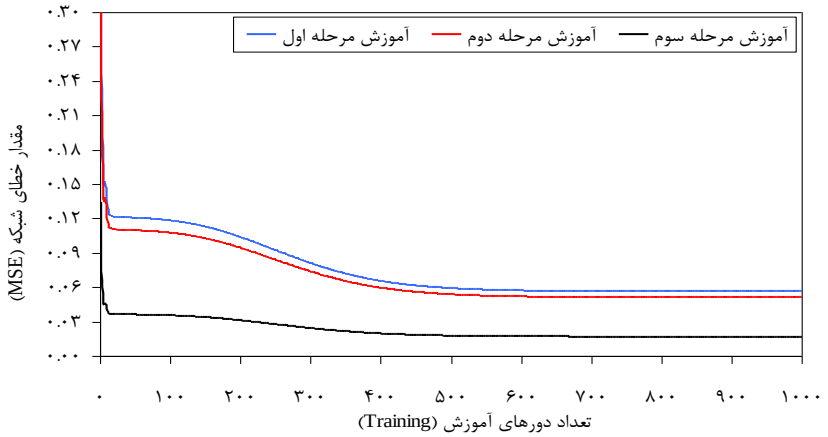
تجزیه و تحلیل شبکه

پس از مراحل آموزش و آزمون شبکه، نتایج تجزیه و تحلیل شد و دقت محاسبات ارزیابی شده است. در این راستا برای ارزیابی شبکه، مقادیر هدف (نتایج تجربی) و مقادیر حاصل از پیش‌بینی بر روی یک نمودار رسم و انحراف از مقاومت هدف تعیین شده است (شکل ٦). برای نمایش بهتر میزان خطا یا انحراف از مقاومت هدف، از نمودار شکل ۷ استفاده شده است. مشاهده می‌شود که میزان انحراف از مقاومت هدف برای شبکه ساخته شده همواره کوچک‌تر از ۳ مگاپاسکال است. در ادامه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده روی یک نمودار رسم و ضریب هم‌بستگی آن‌ها تعیین شد (شکل ۷).

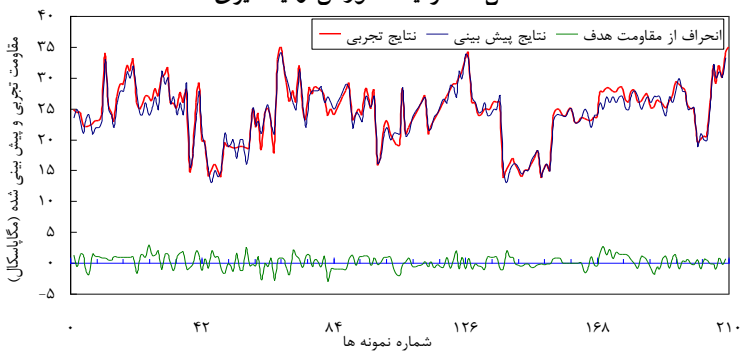
برخی از داده‌های اخذ شده در آزمایشگاه و نتایج حاصل از مدل در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(CSi_{measured} - CSi_{estimated})^2 \qquad (۱)$$

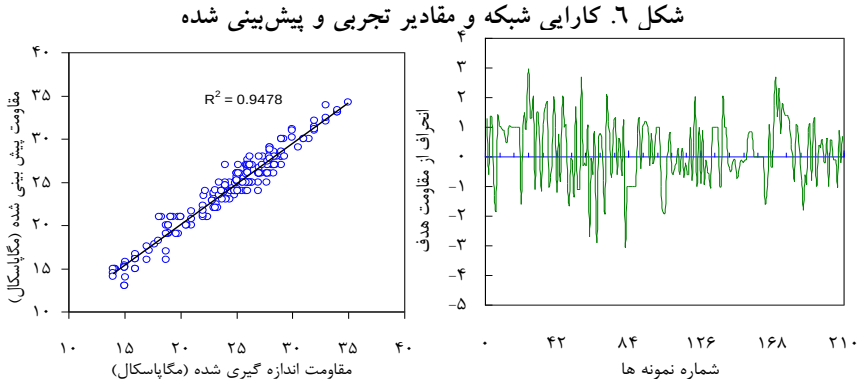
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]



شکل ۵. فرآیند آموزش و یادگیری



شکل ٦. کارایی شبکه و مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده



شکل ۷. انحراف از مقاومت هدف (راست)، هم‌بستگی بین نتایج تجربی و پیش‌بینی (چپ)

جدول ۵. برخی از داده‌های ورودی و خروجی در فرآیند پیش‌بینی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

جنس	تخلخل (٪)	وزن مخصوص	سرعت موج فشاری (m/s)	ارزش ضربه (٪)	عدد سختی اشمیت سنگدانه	مقاومت بتن (آزمایشگاهی) (MPa)	مقاومت بتن (پیش‌بینی) (MPa)
توف	۰/۱٦	۲/۵۰	٤۳۱۷	۱۷	٤۷	۲٦/۲	۲٦/۹۰
ماسه سنگ	۰/۱۰	۲/٦۰	٤۲۱۵	۲۸	۲۵	۱٦/۰	۱۵/۲۰
مرمر	۰/۰۷	۲/٦۸	٦۸٤۵	۳۱	۳۰	۲۸/۱	۲۸/٤۰
لوماشل	۰/۲۵	۲/۷۹	۳۳۵۱	۵۳	۱۰	۱۳/۲	۱۵
گرانیت	۰/۰۷	۲/٦۷	٤۹۱۸	۱۹	۲۹	۲۵/۵	۲۳/۵
گنایس	۰/۰۹	۲/۷۹	۳۵۵۱	۲۱	۳۷	۲۹/۰	۳۰
دولومیت	۰/۱٦	۲/۷٤	٦۱۷۲	۱٦	٤٦	۳۲/٤	۳۲/٦۰
دیوریت	۰/۱٦	۲/٤۰	٤۱۳٤	۲۹	۱۱	۱۵/۳	۱۳/۹
بازالت	۰/۱۱	۲/۹۰	٦۲۹۹	۱۵	۳۵	۲۳/۱	۲۲/۵
آندزیت	۰/۱۸	۲/۵۵	۳۹۹۵	۲۱	٤۰	۲۰/۱	۱۹/۱
توف	۰/۱۷	۲/۵۱	٤۳۷۸	۱٦	٤۳	۲٤/۳	۲۳/۸
ماسه سنگ	۰/۱۲	۲/٦۲	٤۲۲۵	۲۵	۲۱	۱٤/۲	۱۳/۹
مرمر	۰/۰۵	۲/٦۱	٦۷۹۵	۲۹	۲۸	۲۷/۸	۲۷/٤
لوماشل	۰/۲۸	۲/۷٤	۳۳۲۰	۵٤	۱۳	۱۵/۳	۱۵/٦
گرانیت	۰/۰٤	۲/٦٦	٤۸۹۰	۱۸	۳٤	۲۷/۱	۲٦/۷
گنایس	۰/۰۷	۲/۷۸	۳٤۳۱	۲۱	۳۹	۳۰/۱	۲۹/٦
دولومیت	۰/۱٤	۲/۷۲	٦۲٤۵	۱۷	٤۳	۳۲/۰	۳۱/۳
دیوریت	۰/۱۳	۲/٤۲	٤۲۵۰	۲۷	۱٤	۱۵/۲	۱٤/۵
بازالت	۰/۱۳	۲/۸۹	٦۱۲۷	۱٦	۳۸	۲۳/۷	۲۳/٦
آندزیت	۰/۱٤	۲/۵۲	٤۲۱۵	۱۹	۳۹	۲۲/۸	۲۲/۷
توف	۰/۱۵	۲/۵۱	٤۲۳٤	۱۸	۳۵	۲٤/۸	۲٤/٦
ماسه سنگ	۰/۱۵	۲/٦۳	٤۲۵٦	۲۵	۲۲	۱۵/۰	۱٤/۳
مرمر	۰/۰۵	۲/٦۵	٦۸۹۰	۲۸	۳۵	۲۸/۱	۲۷/٦
لوماشل	۰/۲۲	۲/۷٦	۳۳٦۰	۵٦	۹	۱۲/۵	۱۲/۹
گرانیت	۰/۰٤	۲/۷۱	۵۰۳۲	۲۱	۳۵	۱۹/۱	۱۹/۱
گنایس	۰/۰۷	۲/۸۱	۳٤۳۲	۲۵	٤۱	۲۹/۳	۲۸/۸
دولومیت	۰/۱۲	۲/۷۵	۵۸۹۰	۱۵	٤۲	۳٤/۷	۳۳/۹
دیوریت	۰/۱٤	۲/٤٤	۳۹۸۰	۲۹	۱۳	۱٤/۹	۱۵/۲
بازالت	۰/۰۹	۲/۸۸	٦۱۹۳	۱۷	٤۱	۲۰/۲	۲۰/۲
آندزیت	۰/۱۵	۲/٤۹	۳۸۷۰	۲۰	۳۸	۱۸/٤	۱۷/۹
توف	۰/۱٤	۲/۵۲	٤۳۲٤	۱٦	٤۰	۲٦/٦	۲۷/۱
ماسه سنگ	۰/۱۳	۲/٦٤	٤۳۸۰	۲۵	۲۱	۱۷/۹	۱۸/۰
مرمر	۰/۰۹	۲/٦۳	٦۷۲۵	۲۷	۳۵	۲۸/۱	۲۷/۷
لوماشل	۰/۲۵	۲/۷۱	۳۲۵٦	۵۵	۱۱	۱۲/۵	۱۲/۹
گرانیت	۰/۰۷	۲/۷۷	۵۰٤۰	۲۵	۳٤	۱۹/۱	۱۹/۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

جنس	تخلخل (٪)	وزن مخصوص	سرعت موج فشاری (m/s)	ارزش ضربه (٪)	عدد سختی اشمیت سنگدانه	مقاومت بتن (آزمایشگاهی) (MPa)	مقاومت بتن (پیش‌بینی) (MPa)
گنایس	۰/۰۵	۲/۸۳	۳۳۵۲	۲۱	٤۰	۲۹/۳	۲۸/۲
دولومیت	۰/۱۰	۲/۷۰	۵۹۲٤	۱۳	۳۹	۳٤/۷	۳۳/۱
دیوریت	۰/۱۵	۲/٤۱	۳۸۱٤	۳۲	۱٤	۱٤/۹	۱۵/۵
بازالت	۰/۰۵	۲/۸٤	٦۰۵۰	۱۹	۳۵	۲۰/۲	۲۰/۲

بررسی رهیافت‌هایی برای بهبود نتایج

پس از بررسی نتایج به‌دست آمده از شبکه، اختلاف بین خروجی شبکه و مقادیر واقعی در بعضی از نقاط به‌طور چشم‌گیری نسبت به‌سایر نقاط افزایش نشان می‌دهد. برای مثال علیرغم مقاومت زیاد سنگ‌دانه گرانیت، مقاومت بتن ساخته شده از آن در حد بالایی نیست. مورد دیگر مربوط به سنگ‌دانه لوماشل است که مقاومت کمی داشته و در نتایج هم‌بستگی خوبی را نشان نمی‌دهد. با توجه به این‌که این نمونه‌ها در مجموعه داده‌های آزمایش قرار دارند، مقدار زیادی خطا در پیش‌بینی ایجاد خواهند کرد. نکته قابل توجه این است که حذف این داده‌ها از مجموعه آموزش تأثیری در بهبود عمل‌کرد شبکه ندارد و فقط باعث کاهش خطای داده‌های آموزش می‌شوند. برای نیل به هم‌بستگی بیش‌تر نتایج، با تغییر در نرون‌های ورودی و ساخت شبکه‌هایی با دو و سه لایه، مدل‌سازی دوباره انجام و در نهایت ضریب هم‌بستگی بین نتایج تجربی و پیش‌بینی ۹۰ تا ۹۵ درصد به‌دست آمده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این بررسی از شبکه پرسپترون پیش‌خور سه‌لایه برای پیش‌بینی مقاومت بتن از طریق خواص آلتراسونیک استفاده شده است. در ادامه مدل‌های ساخته شده، پردازش و نتایج به‌دست آمده با مقدار هدف مقایسه و مقدار خطای حاصل از عمل‌کرد شبکه تعیین شده است. به‌دلیل زیاد بودن خطا در مراحل اولیه، شبکه با تغییراتی در پارامترهای ورودی و هم‌چنین تغییر در لایه‌های ورودی و پنهان، در سه مرحلهٔ بازسازی شده و محاسبات انجام شد. در نهایت با عمل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

سعی و خطا شبکه بهینه طراحی و پیش‌بینی مقاومت بتن انجام شده است. شبکهٔ نهایی ساخته شده دارای شش ورودی و یک خروجی و ضریب هم‌بستگی بین نتایج تجربی و پیش‌بینی شده ۰/۹٤ به‌دست آمده است. بنا بر این نتایج نشان می‌دهد که مقاومت بتن ارتباط زیادی با پارامترهای سنگ‌دانه دارد، به‌طوری‌که هر چه پارامترهای موجود و نمونه‌های بیش‌تری از آزمایش‌های آزمایشگاهی در دسترس باشد خطای پیش‌بینی کم‌تر و مقاومت پیش‌بینی شده دقت بیش‌تری دارد. نتایج این تحقیق دارای دو کاربرد متفاوت است، نخست پیش‌بینی مقاومت بتن با استفاده از خواص سنگ‌دانه‌ها برای اکتشاف منابع قرضه و دوم هنگامی که نیاز است اطلاعاتی از سنگ‌دانه‌ها و مقاومت بتن حاصل شود وقتی که جزئیات و امکان انجام آزمایش‌های بتن فراهم نباشد. با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان بدون ساخت بتن تخمینی از کیفیت آن با استفاده از خواص سنگ‌دانه‌ها به‌دست آورد و از نتایج آن برای شناسایی سنگ‌دانه‌های مناسب برای مصرف در بتن در مراحل اکتشاف معادن شن و ماسه استفاده کرد. از آن‌جاکه شبکه‌های عصبی قابلیت یادگیری و به روز شدن دارند، شبکه ساخته شده در این تحقیق نیز دارای این قابلیت است و برای بتن‌های با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف قابل گسترش است. برای این منظور کافی است که داده‌های جدید به مدل وارد و مدل‌سازی انجام شود.

منابع

۱. شاه‌نظری م.، سحاب م.ق. *دستورالعمل آزمایشگاه بتن*، چاپ اول، تهران، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰ (۱۳۷۱).

۲. نویل ا.م.، بروکس ج.ج.، *خواص بتن*، ترجمهٔ هرمز فامیلی، چاپ اول، تهران، انتشارات ابوریحان بیرونی (۱۳۷۸).

۳. رمضانیان‌پور ع.ا.، طاحونی ش.، پیدایش م.، *دست‌نامه اجرای بتن*، چاپ اول، تهران، مؤسسهٔ انتشارات و چاپ دانشگاه تهران (۱۳۸۰).

٤. مستوفی‌نژاد د.، *تکنولوژی و طرح اختلاط بتن*، چاپ یازدهم، اصفهان، انتشارات ارکان دانش (۱۳۸۵).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

5. Yilmaz I., "A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 1349-1357.

6. Kahraman S., "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38, (2001) 981-994.

7. Alexandre B.J., Glória G.M., Gomes A., "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method", Ultrasonics, Volume 53, Issue 5 (2013) 962-972.

8. Greco R., Sorriso-Valvo M., "Relationships between joint apparent separation, Schmidt hammer rebound value, and distance to faults, in rocky outcrops, Calabria, Southern Italy", Engineering Geology 78 (2005) 309-320.

9. Garnier V., Corneloup G., Sprauel J.M., "Setting time study of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals", NDT & E International, Volume 28, Issue 1 (1995) 15-22.

10. Benardos P.G., "Optimizing feedforward artificial neural network architecture", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 20, Issue 3 (2007) 365-382.

11. Trtnik G., Kavčič F., Turk G., "Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks", Ultrasonics, Volume 49, Issue 1 (2009) 53-60.

12. Lee S., "Prediction of concrete strength using artificial neural networks", Engineering Structures 25 (2003) 849-857.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

13. Kim B.C., Kim, J.Y., "Characterization of ultrasonic properties of concrete" Mechanics Research Communications, Volume 36, Issue 2 (2009) 207-214.

14. Hernández M.G., Izquierdo M.A.G., Ibáñez A., Anaya J.J., Ullate L.G., "Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE", Ultrasonics, Volume 38, Issues 1–8 (2000) 531-533.

15. Del Rio L.M., Jim, A., Opez F., Rosa F.J., Rufo M.M., Paniagua J.M., "Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing", Ultrasonics 42 (2004) 527-530.

16. Kewalramani M.A., Gupta R., "Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks", Automation in Construction 15 (2006) 374-379.

17. Nicolas R.N., Gruyaert E., Grosse C.U., Belie N., "Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity", Cement and Concrete Research 38 (2008) 1169-1176.

18. Shah A.A., Ribakov Y., "Effectiveness of nonlinear ultrasonic and acoustic emission evaluation of concrete with distributed damages", Materials and Design 31 (2010) 3777-3784.

19. Atici U., "Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network", Expert Systems with Applications 38 (2011) 9609-9618.

20. Nicolas R., Christian, Grosse U., De Belie .N., "Relating ultrasonic measurements on fresh concrete with mineral additions to the microstructure development simulated by Cemhyd3D", Cement and Concrete Composites, Volume 33, Issue 6 (2011) 680-693.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

21. Benmeddour F., Villain G., Abraham O., Choinska M., "Development of an ultrasonic experimental device to characterise concrete for structural repair", Construction and Building Materials, Volume 37 (2012) 934-942.

22. Yim H.J., Kim J.H., Park S.J., Kwak H.G, "Characterization of thermally damaged concrete using a nonlinear ultrasonic method, Cement and Concrete Research", Volume 42, Issue 11 (2012) 1438-1446.

23. Hassan A.M.T., Jone S.W., "Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques", Construction and Building Materials, Volume 35 (2012) 361-367.

24. Planès T., Larose E., "A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete", Cement and Concrete Research, Volume 53 (2013) 248-255.

۲۵. شریفی ج.، نیکودل م.ر.، ایزدی ه.، *مدل‌سازی اعداد چکش اشمیت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت بتن*، مجموعه مقالات ششمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان (۱۳۹۰).

۲۶. شریفی ج.، نیکودل م.ر.، یزدانی م.، *تأثیر جنس سنگ‌دانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن*، مجموعه مقالات هشتمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز (۱۳۸۸).

۲۷. شریفی ج.، نیکودل م.ر.، یزدانی م.، *تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت بتن*، فصل‌نامه زمین‌شناسی مهندسی ایران، سال ششم، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۲، ص ۶۷–۸۲.

28. Liu M.Y.J, Alengaram U.J., Jumaat M.Z., Kim H.M., "Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete", Energy and Buildings, Volume 72 (2014) 238-245.

29. Shah A.A., Ribakov Y., Zhang C., "Efficiency and sensitivity of linear and non-linear ultrasonics to identifying micro and macro-scale defects in concrete", Materials & Design, Volume 50 (2013) 905-916.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]

30. Wei S., Yunsheng Z., Jones M.R., "Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete", Construction and Building Materials, Volume 51, 31 (2014) 62-74.

31. Brown E.T., "Rock Characterization for Testing and Monitoring", Oxford, New York, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press (1981).

۳۲. فهیمی‌فر ا.، *آزمایش‌های مکانیک سنگ*، جلد اول، مبانی نظری و آزمایش‌ها» تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر (۱۳۸۰).

33. ASTM C294-12, "Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, Construction: Soil and Rock (I), Philadelphia, PA (2011).

34. ASTM C33/C33M-13, "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, Construction: Soil and Rock (I), Philadelphia, PA (2011).

۳۵. شریفی ج.، نیکودل م.ر.، یزدانی م.، *بررسی ویژگی‌های نامطلوب مصالح سنگ‌دانه‌ای چابهار بر خواص بتن*، مجموعه مقالات چهارمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، جلد دوم، تهران، دانشگاه تهران (۱۳۸۷) ۵۲۳-۵۳۱.

۳٦. شریفی ج.، نیکودل م.ر.، *بررسی تأثیر کانی‌شناسی سنگ‌دانه‌ها بر کیفیت بتن*، نشریه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی(تربیت معلم)، جلد چهارم، شماره۲ پاییز و زمستان (۱۳۸۹) ۹۷۱-۹۸٦.

37. ASTM C150/ C150M-12, "Standard Specification for Portland Cement", Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.01, Construction: Soil and Rock (I), Philadelphia, PA (2011).

۳۸. قربانی ف.، پایان‌نام، کارشناسی ارشد، *استفاده از توابع شعاع مدار برای ارائه روش‌های یادگیری پیوندی در شبکه‌های عصبی مصنوعی*، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (۱۳۸۵).

۳۹. منهاج ر.، *هوش محاسباتی*، جلد اول: مبانی شبکه‌های عصبی، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۷۹).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.5.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.2983]