

طراحی و اصلاح خواص بتن بدون اسلامپ و پیش‌بینی مقاومت فشاری آن با استفاده از روش فازی-عصبی تطبیقی

میشم نجیمی

پژوهشگر، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش تحقیقاتی بتن

najimi@bhrc.ac.ir

جعفر سبحانی

عضو هیأت علمی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش تحقیقاتی بتن

علیرضا پورخورشیدی

پژوهشگر، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بخش تحقیقاتی بتن

چکیده

بتن‌های بدون اسلامپ به بتن‌های با اسلامپ ۲۵-۰ mm اطلاق می‌شود که کاربرد وسیعی در تولید قطعات بتن پیش‌ساخته دارند. در این مقاله، ابتدا روش ACI 211.3 برای طراحی این نوع بتن‌ها ارائه شده که بر مبنای این روش، ۳۲ طرح مخلوط بتنی در آزمایشگاه ساخته شده است. تعدادی از این طرح‌ها با استفاده از میکروسیلیس و پوزولان به عنوان مواد جایگزین سیمان، و پودر سیلیس به عنوان پرکننده ساخته شده‌اند که از میان آن‌ها، ۵ طرح بهینه با توجه به خواص مقاومتی و نفوذپذیری تحت فشار آب انتخاب و معرفی شد. همچنین با استفاده از سیستم فازی-عصبی تطبیقی ANFIS مقاومت ۲۸ روزه بتن‌های بدون اسلامپ مورد پیش‌بینی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش ACI 211.3 بر اساس مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی موجود در کشور، مقدار آب زیادی را برآورد می‌کند و معمولاً لازم است مقدار آب مصرفی طرح کاهش داده شود. به علاوه با استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند میکروسیلیس و پوزولان‌ها، و مواد پرکننده می‌توان مقدار سیمان را در طرح مخلوط‌های بتن بدون اسلامپ کاهش داده و به عملکرد مناسبی دست یافت. همچنین نشان داده شد سیستم ANFIS قابلیت پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بدون اسلامپ را با دقت بسیار بالایی دارد. اهمیت این پیش‌بینی از آنجا مشخص می‌شود که نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها بسیار نزدیک یکدیگر بوده و این سیستم با توجه به طبیعت فازی و بهره‌گیری از الگوریتم آموزشی کاهش گرا دیان خطا، قابلیت تفکیک و پیش‌بینی صحیح این شاخص را دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن بدون اسلامپ، مقاومت فشاری، روش فازی-عصبی تطبیقی ANFIS

۱- مقدمه

بر این اساس، بررسی روش طرح مخلوط بتن بدون اسلامپ ویژه قطعات پیش‌ساخته، ساخت مخلوط‌ها براساس آن و ارائه یک مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری از اهداف اصلی این مقاله است.

۲- کارایی بتن بدون اسلامپ

آزمایش اسلامپ، مشهورترین آزمایش برای تعیین کارایی است و در اکثر آیین‌نامه‌ها (برای بتن‌های معمولی)، این آزمایش اساس اندازه‌گیری کارایی بتن است، حال آنکه آزمایش اسلامپ معیار مناسبی برای اندازه‌گیری کارایی بتن‌های بدون اسلامپ نمی‌باشد. آزمایش‌های وی بی (Vebe)، ضریب تراکم، تراکم اصلاح شده و میز سقوط (افتان) Thaulow، آزمایش‌هایی هستند که می‌توانند یک معیار مفید تعیین کارایی برای مخلوط‌های با اسلامپ کم‌تر از ۲۵ میلی‌متر ارائه دهند. از میان این روش‌های اندازه‌گیری کارایی، آزمایش وی بی بهترین و ساده‌ترین آزمایش تعیین کارایی بتن‌های بدون اسلامپ است. مقایسه نتایج آزمایش وی بی با آزمایش اسلامپ متداول به همراه مقادیر تجربی آب مورد نیاز برای هر معیار کارایی در جدول ۱ نشان داده شده است [۱].

۳- روش طرح اختلاط بتن بدون اسلامپ

پارامترهای مختلفی در طرح اختلاط بتن و ساخت بتن مناسب، مؤثر هستند. از آنجا که قالب‌های قطعات بتنی بدون اسلامپ، بلافاصله پس از آنکه بتن ریخته و متراکم شد، برداشته می‌شود یا به عبارت بهتر، بتن بلافاصله پس از ریختن و متراکم کردن هیچ تکیه‌گاه خارجی ندارد، از حساسیت ویژه‌ای برخوردار هستند. بنابراین مخلوط بتن تازه باید به اندازه کافی چسبنده باشد تا شکلش را پس از تراکم و برداشتن قالب‌ها حفظ کند. بر این اساس در ACI 211.3 [۱] روشی برای محاسبه طرح اولیه مخلوط‌های آزمایشگاهی ارائه شده است که در اینجا به صورت گام به گام بیان شده است. شایان ذکر است این آئین‌نامه تأکید می‌کند که به علت پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر مقدار آب، ممکن است آب مصرفی در عمل بسیار متفاوت باشد که در هنگام ساخت طرح مخلوط‌ها این نکته مشاهده شد.

بتن بدون اسلامپ که به عنوان بتن‌های خشک نیز شناخته می‌شود، معمولاً به صورت بتن‌های با اسلامپ ۰ تا ۲۵ میلیمتر تعریف می‌شود [۲-۱]. البته در تعریفی دیگر، بتن‌های با اسلامپ کمتر از ۶ میلی‌متر به عنوان بتن‌های بدون اسلامپ شناخته می‌شوند [۳].

از زمانی که Henry Reed پیشنهاد داد که «بتن با نسبت آب به سیمان پایین‌تر مقاومت‌های بالاتری ارائه می‌دهد»، تئوری استفاده از حداقل ممکن آب در بتن توسعه داده شد. در سال‌های اولیه قرن بیستم، بتن‌های خشک که بدون تراکم مناسب ساخته می‌شدند، منتج به بتن‌های با مقاومت کم و کیفیت پایین می‌شدند [۲]. با پیشرفت و توسعه لرزاننده‌ها، تراکم مناسب بتن بدون اسلامپ میسر شد و در نتیجه کاربرد آن توسعه یافت. امروزه این نوع بتن، با دو کاربرد ویژه؛ به عنوان بتن‌های غلطکی (RCC) و بتن‌های پیش‌ساخته مطرح می‌باشد.

برای اولین بار در حدود سال ۱۹۶۰، تولید بتن بدون اسلامپ در حجم وسیع در سد Aple Gere، واقع در ایتالیا [۵-۴] و Manicougan در کانادا مورد استفاده قرار گرفت. این مخلوط‌ها توسط دسته‌ای از لرزاننده‌های داخلی یا توسط بولدوزورها تحکیم شدند [۶]. در آمریکای شمالی، استفاده از بتن بدون اسلامپ، در طی دهه‌های اخیر رشد فزاینده‌ای پیدا نموده است. به عنوان نمونه، به دلیل افزایش سهم روسازی‌های بتنی در بزرگراه‌ها، و توسعه استفاده از بتن غلتکی سدهای ساخته شده در ایالات متحده و کانادا، استفاده از این نوع بتن توسعه زیادی پیدا کرده است [۹-۴].

از طرف دیگر، استفاده از بتن بدون اسلامپ، به دلیل امکان قالب‌برداری سریع سبب صرفه‌جویی اقتصادی زیادی می‌شود و بسیاری از تولیدکنندگان محصولات بتنی گرایش ویژه‌ای به بتن‌های بدون اسلامپ دارند تا زمان تولید را به حداقل برسانند. امروزه، این نوع بتن در کارخانجات تولید بتن پیش‌ساخته، مانند واحدهای بتن بنایی، بلوک‌های روسازی، جداول پیش‌ساخته، و لوله‌های بتنی کاربرد وسیعی پیدا نموده است [۲-۱ و ۱۴-۱۰].

از دو کاربرد اشاره شده، استفاده از بتن‌های بدون اسلامپ (خشک) برای قطعات پیش‌ساخته به خصوص برای تولید لوله‌های بتنی و جداول بتنی، سالها در ایران مورد استفاده قرار گرفته است.

بر آورد می گردد. به عبارت بهتر، مقدار سیمان از تقسیم آب بر نسبت آب به مصالح سیمانی به دست می آید.

جدول ۱- مقایسه معیارهای کارایی و آب مورد نیاز مخلوط بتنی برای کارایی های مختلف [۱]

مقدار نسبی آب (%)	وی بی (ثانیه)	اسلامپ (میلی متر)	توصیف کارایی
۷۸	۱۸ تا ۳۲	-	بسیار خشک
۸۳	۱۰ تا ۱۸	-	خیلی سفت
۸۸	۵ تا ۱۰	۰ تا ۲۵	سفت
۹۳	۳ تا ۵	۲۵ تا ۷۵	خمیری سفت
۱۰۰	۰ تا ۳	۷۵ تا ۱۲۵	خمیری
۱۰۶	-	۱۲۵ تا ۱۹۰	خیلی خمیری

گام اول: تعیین نسبت آب به مصالح سیمانی

با استفاده از شکل ۱، نسبت آب به مصالح سیمانی، برای تأمین مقاومت میانگین ۲۸ روزه مورد نیاز محاسبه می شود.

گام دوم: تعیین مقدار آب بتن

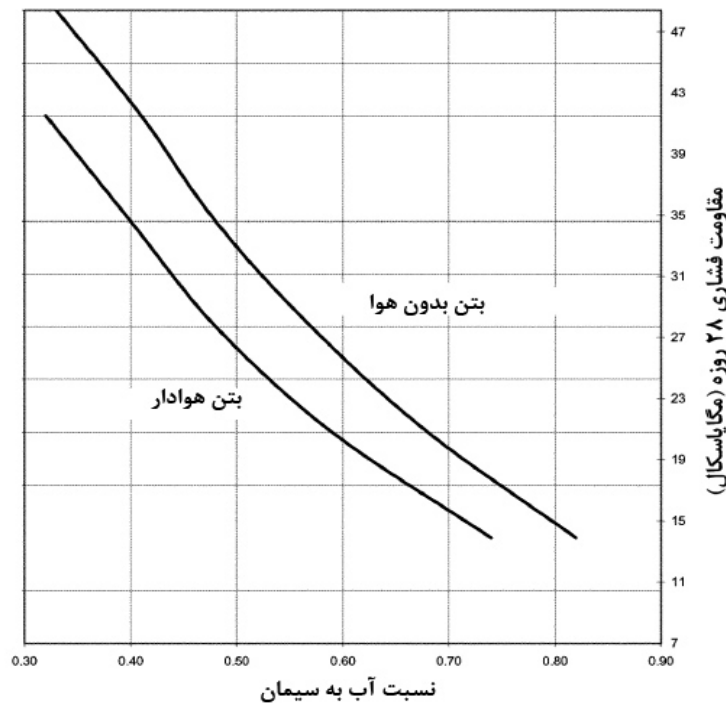
مقدار تقریبی آب مورد نیاز مخلوط، با در نظر گرفتن کارایی مورد نیاز و حداکثر اندازه سنگ دانه برای بتن بدون هوا و بتن هوادار به ترتیب با استفاده از شکل های ۲ و ۳ تعیین می شود.

گام سوم: تعیین مقدار هوای بتن

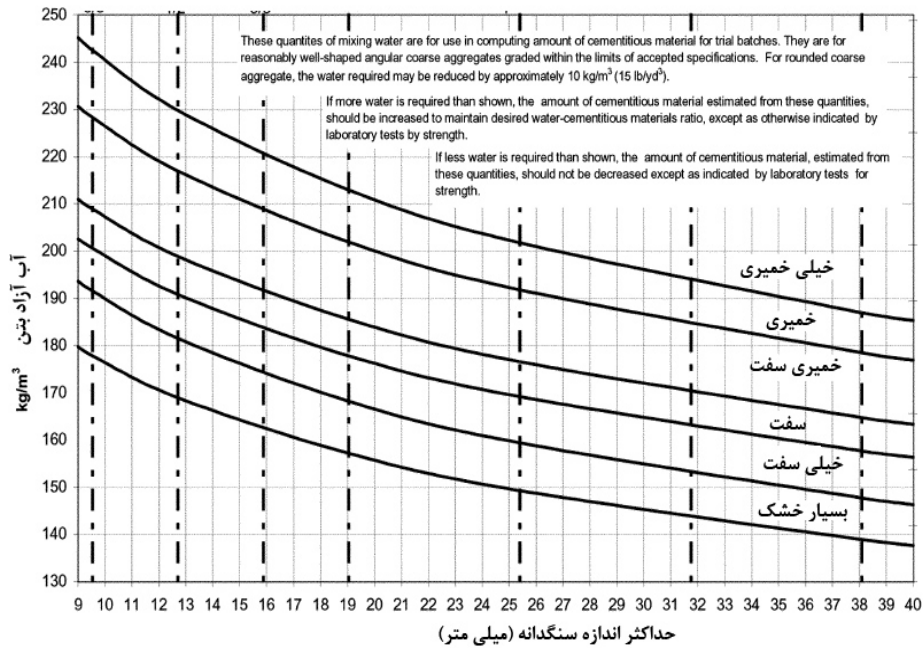
مقدار هوای بتن با در نظر گرفتن هوادار بودن بتن یا بدون هوا بودن بتن و حداکثر اندازه سنگ دانه با استفاده از شکل ۴ تعیین می شود.

گام چهارم: تعیین مقدار سیمان

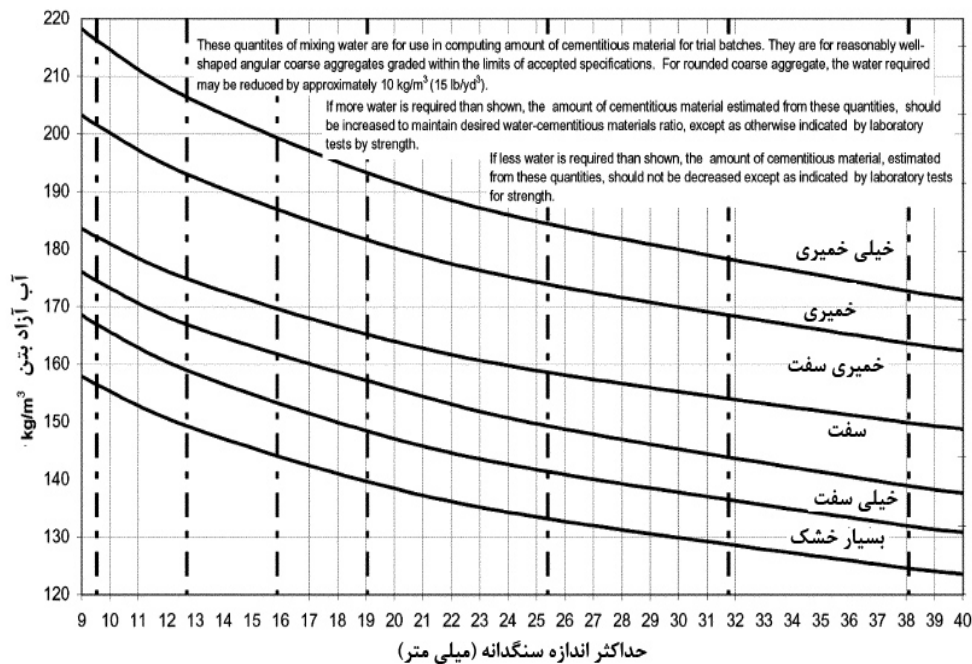
با استفاده از نسبت آب به مصالح سیمانی و مقدار آب محاسبه شده در گام های اول و دوم، مقدار مصالح سیمانی مورد نیاز



شکل ۱- ارتباط بین نسبت آب به مصالح سیمانی و مقاومت فشاری بتن [۱]



شکل ۲- مقادیر آب اختلاط برای شرایط کارایی مختلف و حداکثر اندازه سنگ‌دانه مختلف برای بتن بدون هوا [۱]

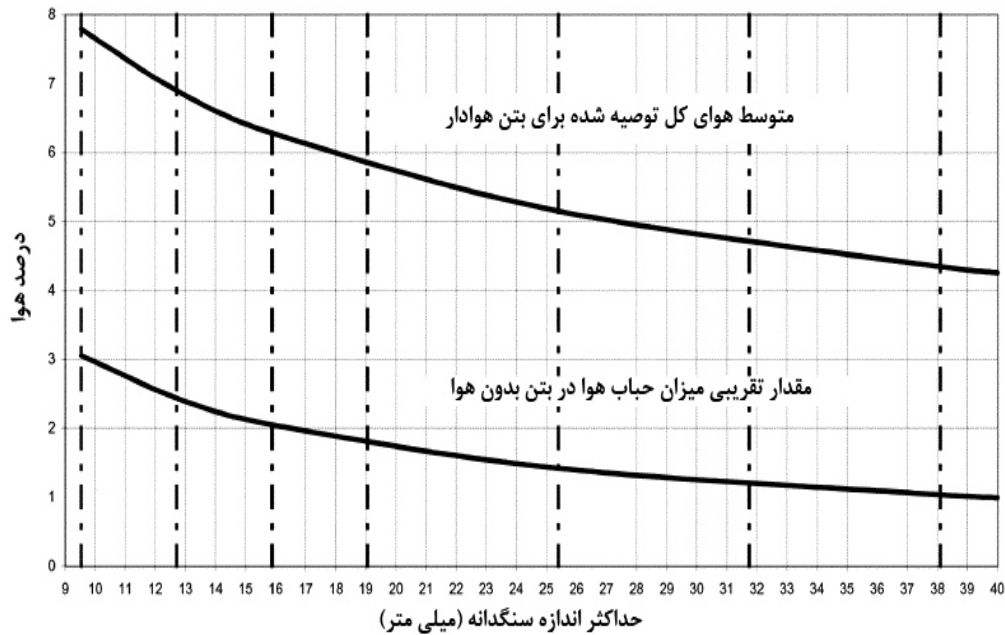


شکل ۳- مقادیر آب اختلاط برای شرایط کارایی مختلف و حداکثر اندازه سنگ‌دانه مختلف برای بتن هوادار [۱]

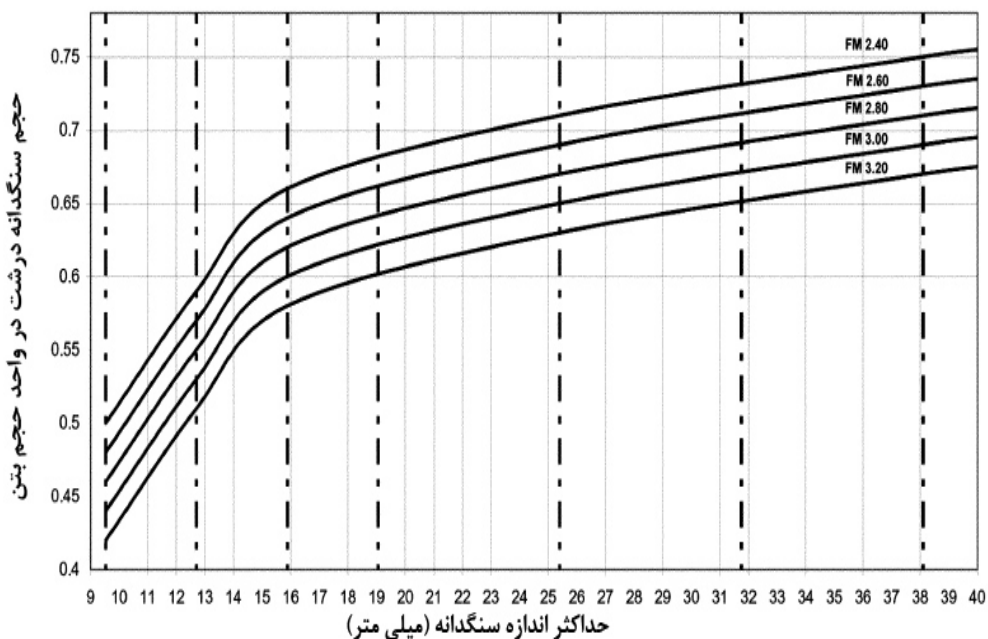
گام پنجم: تعیین حجم درشت‌دانه برای بتن خمیری (با اسلایمپ) گام ششم: اصلاح حجم درشت‌دانه برای کارایی موردنظر
 ۷۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر) ضریب اصلاح حجم درشت‌دانه با در نظر گرفتن نوع کارایی
 در این مرحله، حجم درشت‌دانه برای بتن خمیری با در نظر گرفتن مخلوط و حداکثر اندازه سنگ‌دانه با استفاده از شکل ۶ محاسبه
 حداکثر اندازه سنگ‌دانه و مدول نرمی ریزدانه با استفاده از شکل می‌شود.
 ۵ تخمین زده می‌شود.

گام هفتم: تعیین مقدار ریزدانه

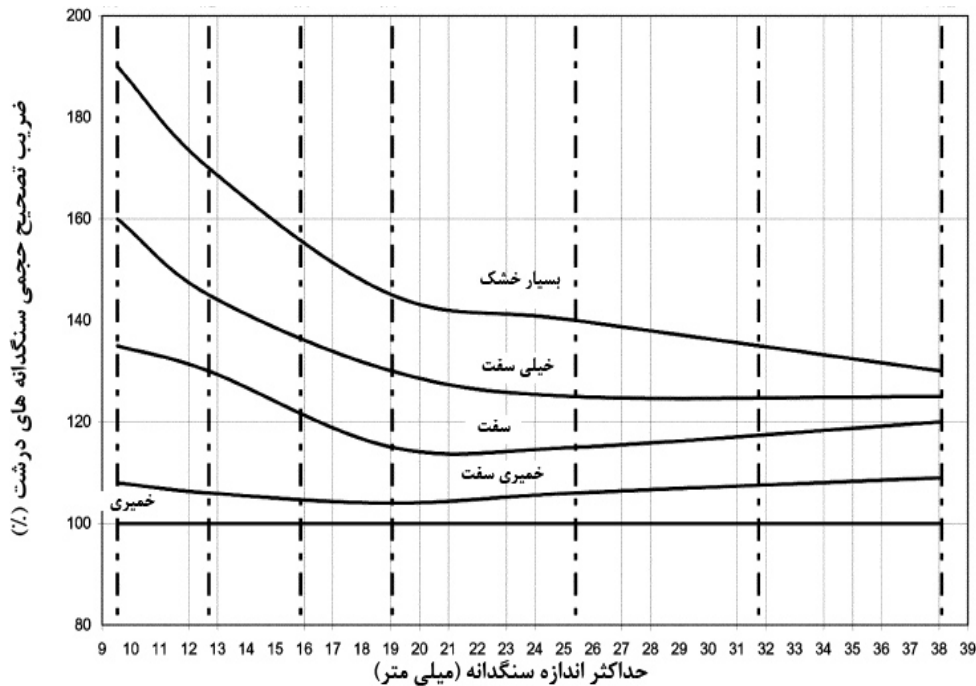
ابتدا حجم مواد محاسبه شده در گام‌های قبل برای تولید یک متر مکعب بتن محاسبه می‌شود. باقیمانده حجم بتن مربوط به حجم ماسه است. به عبارت بهتر حجم ماسه از فرمول زیر محاسبه می‌شود. در نهایت وزن مصالح با داشتن وزن مخصوص آنها محاسبه می‌شود. (حجم سایر اجزا بتن) - ۱ = حجم ماسه (۱)



شکل ۴- مقدار هوای مخلوط‌های بتنی برحسب حداکثر اندازه سنگدانه [۱]



شکل ۵- حجم درشت‌دانه در واحد حجم بتن با شرایط کارایی خمیری (اسلامپ ۷۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر)، FM = مدول نرمی [۱]



شکل ۶- ضرایب اصلاح حجم برای سنگ‌دانه به صورت خشک متراکم شده برای بتن با کارایی‌های مختلف [۱]

۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱ مصالح مصرفی

سنگ‌دانه: خواص فیزیکی و مکانیکی درشت‌دانه و ریزدانه مصرفی در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خواص سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ‌دانه	چگالی (g/cm^3)	جذب آب (%)	مدول نرمی	گذشته از الک ۷۵ میکرون (%)
ریزدانه (۰-۴/۷۵) (mm)	۲/۵۳	۲/۶۰	۳/۲	۱/۱
درشت‌دانه (۴/۷۵-۱۹) (mm)	۲/۵۶	۱/۴۶	-	۰/۲

۴-۲- ساخت و جمع‌آوری اطلاعات
در این تحقیق، ۳۲ طرح براساس روش ارائه شده ACI 211.3 ساخته شد [۱۵]. این طرح‌ها، با مقادیر مختلف مصالح شامل محدوده‌های ۲۵۲/۶ تا ۴۱۰ کیلوگرم سیمان، ۰ تا ۲۷/۳ کیلوگرم میکروسلیس، ۹۵ تا ۱۳۹/۷ کیلوگرم آب، ۳۵۴/۲ تا ۱۳۰۰ کیلوگرم ریزدانه، ۶۰۰ تا ۱۴۴۰/۶ کیلوگرم درشت‌دانه و ۰ تا ۱۸۸ کیلوگرم فیلر در مترمکعب بتن ساخته شدند. این طرح‌ها به صورتی در نظر گرفته شدند تا مقادیر مختلف و به عبارت بهتر محدوده وسیع آب به مواد سیمانی از ۰/۲۷ تا ۰/۴۰ را در برگیرند. از هر طرح ساخته شده، ۳ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۳ نمونه برای تعیین نفوذپذیری تحت فشار آب گرفته شد که مقاومت‌هایی در محدوده ۵۰ تا ۷۷ مگاپاسکال و نفوذپذیری ۲ تا ۲۰ میلی‌متر ارائه می‌داد.

۴-۳- طرح‌های بهینه برای بتن‌های بدون اسلایمپ

با توجه عملکرد بتن‌های تولید شده در آزمون‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری، از میان ۳۲ طرح ساخته شده، مشخصات ۵ طرح به عنوان طرح‌های انتخاب شده‌اند که در جدول ۴ ارائه شده است. از این طرح‌ها، طرح NS1 بدون استفاده از فیلر و مواد جایگزین سیمان و تنها با استفاده از روش طراحی ACI 211.03

مواد سیمانی: در این تحقیق، سیمان نوع ۲ و میکروسلیس به عنوان مصالح سیمانی مورد استفاده قرار گرفتند که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین از نوعی پرکننده سیلیسی با بیش از ۹۹ درصد سیلیس در این تحقیق استفاده شد.

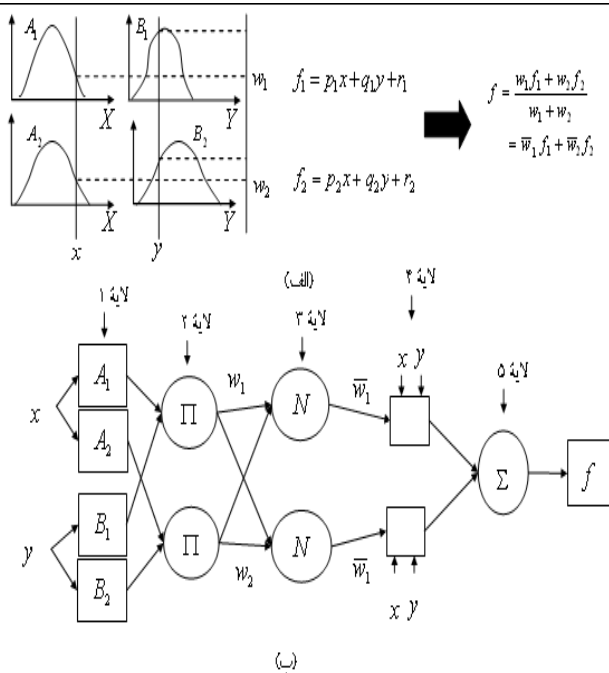
جدول ۳- خواص شیمیایی و فیزیکی مصالح سیمانی

میکروسیلیس	سیمان	آنالیز شیمیایی (درصد)
۰/۶	۶۱/۹	CaO
۹۰/۹	۲۱/۲	SiO ₂
۰/۶	۴/۲	Al ₂ O ₃
۰/۷	۴/۶	Fe ₂ O ₃
۱/۳	۳/۴	MgO
۰/۴	۰/۶	Na ₂ O
۱/۱	۰/۵	K ₂ O
---	۱/۷	SO ₃
خواص فیزیکی		
---	۲۲/۳	مقاومت فشاری ۳ روزه (مگاپاسکال)
---	۳۰/۶	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)
---	۴۱/۴	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
---	۱۵۰	زمان گیرش اولیه، دقیقه
---	۱۹۰	زمان گیرش نهایی، دقیقه
---	۳۲۹/۶	سطح مخصوص، متر مربع بر کیلوگرم

عملکرد مناسبی را نشان داده است که این حاکی از آن است که می توان با استفاده از مصالح موجود به راحتی نتایج مناسبی گرفت. طرح NS2 طرح اصلاح شده NS1 است که با جایگزینی ۷ درصد میکروسیلیس به جای سیمان، خواص مقاومتی و نفوذ آن بهبود یافته است. طرح NS3، به عنوان طرح بهینه به دست آمده از روش ACI 211.03 که اصلاح شده است معرفی می شود که با استفاده از فیلر و میکروسیلیس، به راحتی می توان با کاهش حدوداً ۸۰ کیلوگرمی مواد سیمانی به مقاومت فشاری زیاد و نفوذپذیری کمتری دست یافت. همچنین طرح NS4 نشان می دهد که با استفاده از ترکیب پوزولان و میکروسیلیس می توان به مقدار قابل توجهی مصرف سیمان را در بتن کاهش داد و در عین حال عملکرد مطلوبی را از لحاظ مقاومتی و نفوذپذیری انتظار داشت. طرح NS5، که دارای مقاومت فشاری بسیار بالا و نفوذپذیری مناسب می باشد، با استفاده از مقدار زیادتری از سهم مواد سیمانی و فیلر و حجم بالای سنگدانه درشت به دست آمده است. قابل توجه اینکه طرح های NS1 تا NS4 برای رده خیلی سفت طراحی شده بودند در حالی که طرح NS5 برای رده بسیار خشک طرح گردیده بود. لازم به ذکر است که سایر طرح ها نیز خواص مورد نظر را برآورده کرده بودند لیکن از بین آنها پنج طرح مذکور با بهترین عملکرد انتخاب شدند.

۵- شبکه های تطبیق فازی-عصبی شبکه مبنا برای پیش بینی مقاومت فشاری

سیستم فازی-عصبی ANFIS در سال ۱۹۹۳ توسط Jung ابداع شد [۱۶-۱۸]. این سیستم با بهره گیری از روش استنتاج انسان در قالب منطق فازی و به صورت تطبیقی، از خواص محاسبات موازی شبکه های عصبی بهره برداری می نماید. سیستم فازی این ساختار از نوع تاگاکاکی-سوگنو-کانگ (TSK) می باشد (شکل ۷). قواعد این سیستم به صورتی است که از تعیین رابطه بین ورودی ها و خروجی ها با استفاده از روش کاهش گرادیان به دست می آید. این روش یکی از محبوب ترین روش های پیش بینی و مدل سازی خواص مصالح و یا سیستم های کنترلی می باشد.

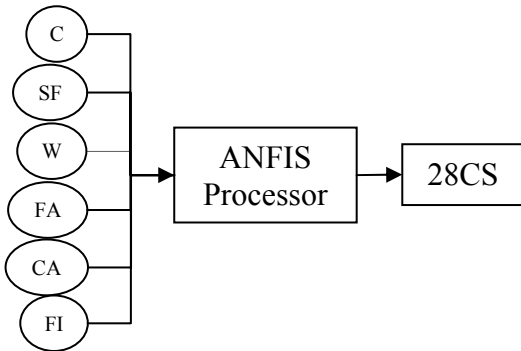


شکل ۷- الف) استنتاج فازی TSK و ب) ساختار معادل ANFIS

جدول ۴- مشخصات طرح مخلوط‌های بهینه بتن بدون اسلالمپ

خواص بتن سخت شده		نسبت آب به مواد سیمانی	مصالح (kg/m ³)							شناسه مخلوط
مقاومت فشاری تحت فشار آب (میلی‌متر)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال)		فیلر	شن	ماسه	آب آزاد	پوزولان	میکروسیلیس	سیمان	
۱۲	۶۱/۵	۰/۳۱	-	۱۲۴۷	۵۳۵	۱۰۷/۶	-	-	۳۵۰	NS1
۱۰	۶۵	۰/۳۱	-	۱۲۴۷	۵۳۵	۱۰۷/۶	-	۲۴/۵	۳۲۵/۵	NS2
۲	۶۴	۰/۳۸	۱۳۵	۱۰۶۳/۳	۸۳۶/۱	۱۰۳/۴	-	۱۹/۶	۲۵۲/۶	NS3
۷	۴۷	۰/۳۵	-	۱۰۳۸/۴	۸۴۹	۱۳۵	۷۷	۳۸	۲۷۰	NS4
۶	۷۶/۷	۰/۳۱	۱۵۶/۳	۱۲۸۹	۴۸۴	۱۱۵/۶	-	۲۷/۳	۳۴۶	NS5

برای سادگی فرض می‌کنیم که سیستم استنتاجی فازی دارای دو ورودی x و y و یک خروجی z باشد. تصور کنید که پایگاه قواعد دارای دو قاعده اگر-آنگاه فازی نوع TSK به صورت زیر باشد.



شکل ۸- ساختار ANFIS برای پیش‌بینی مقاومت فشاری

(۲)

Rule 1: IF x is A_1 and y is B_1 , THEN $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$
 Rule 2: IF x is A_2 and y is B_2 , THEN $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$
 در شکل ۷- الف روش استنتاج فازی نوع ۳ (TSK) نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷- ب معادل ساختار ANFIS برای این نوع استنتاج نشان داده شده است.

۲-۵ نتایج پیش‌بینی با سیستم ANFIS

در شکل ۹ نتایج پیش‌بینی سیستم ANFIS در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی (به صورت نرمال شده) برای نمونه‌های آموزشی ترسیم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که سیستم مذکور به خوبی قادر به پیش‌بینی مقاومت در فضای آموزش دیده می‌باشد. همچنین در شکل ۱۰ نتایج پیش‌بینی این سیستم با نتایج آزمایشی (در مختصات نرمال شده) ارائه شده است. همچنین در جدول ۶ دقت سیستم ANFIS برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های بدون اسلالمپ ارائه شده است. در این جدول منظور از RMS، ریشه دوم مجذور خطاها و CF ضریب همبستگی می‌باشد که به ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^P (f_{ci} - \hat{f}_{ci})^2 / P} \quad (3)$$

۱-۵ ساختار ANFIS

در شکل ۸ ساختار ANFIS مورد استفاده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های بدون اسلالمپ ارائه شده است. این ساختار دارای شش ورودی شامل مقدار سیمان (C)، میکروسیلیس (SF)، آب (W)، ریزدانه (SF)، درشت‌دانه (CA)، پودر سیلیس (FI) به عنوان فیلر و یک خروجی، به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه (28CS) می‌باشد.

در جدول ۵، مشخصات ANFIS برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بدون اسلالمپ ارائه شده است. با توجه به ساخت ۳ نمونه تعیین مقاومت فشاری برای هر طرح (از ۳۲ طرح بتن بدون اسلالمپ)، به ترتیب تعداد ۷۹ و ۱۷ نمونه مقاومتی شامل ۶ ورودی و یک خروجی برای آموزش و آزمایش سیستم استفاده شده

پیش ساخته ارائه می دهد که برای بهبود وضعیت تولید قطعات پیش ساخته موجود در کشور که با سیستم بتن بدون اسلامپ کار می کنند، بسیار مناسب است. تنها باید توجه داشت که مقدار آب محاسبه شده براساس این روش باید برای سنگ دانه های کشور اصلاح و معمولاً به مقدار قابل توجهی کمتر شود (معمولاً ۱۰ تا ۱۵ درصد).

- با استفاده از بتن های بدون اسلامپ، ساخت بتن های با مقاومت بالا و نفوذپذیری کم به راحتی امکان پذیر است. در این تحقیق بتن با مقاومت فشاری ۷۷ مگاپاسکال و نفوذپذیری ۲ میلی متر به راحتی ساخته شد.

- طرح های ساخته شد نشان می دهد که با جایگزین کردن نسبی پوزولان و میکروسیلیس به جای سیمان و با استفاده از فیلر می توان به بتن هایی با مقاومت بالا و نفوذ کم دست یافت. این کار در عمل می تواند به کاهش ۳۰ درصدی مصرف سیمان در صنعت تولید قطعات پیش ساخته منجر گردد.

- نشان داده شد که سیستم ANFIS قابلیت پیش بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بدون اسلامپ را با دقت بسیار بالا دارد. اهمیت این پیش بینی از آنجا مشخص می شود که نتایج مقاومت فشاری نمونه ها بسیار نزدیک یکدیگر بوده و این سیستم با توجه به طبیعت فازی و بهره گیری از الگوریتم آموزشی کاهش گرادیان خطا، قابلیت تفکیک و پیش بینی صحیح این شاخص را دارد.

به طوری که، P تعداد کل نمونه های بتنی، f_{ci} مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمایشگاهی و \hat{f}_{ci} مقاومت فشاری ۲۸ روزه پیش بینی شده توسط ANFIS می باشند.

$$CF(f_c, \hat{f}_c) = \text{cov}(F_c, \hat{F}_c) / \text{cov}(\hat{F}_c, \hat{F}_c) \times \text{cov}(F_c, F_c) \quad (4)$$

که در آن

$$F_c = (f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cp}) \quad \hat{F}_c = (\hat{f}_{c1}, \hat{f}_{c2}, \dots, \hat{f}_{cp})$$

$$\text{cov}(F_c, \hat{F}_c) = E[(F_c - \mu_c) \cdot (\hat{F}_c - \hat{\mu}_c)]$$

$$\mu_c = E(F_c), \quad \hat{\mu}_c = E(\hat{F}_c)$$

به طوری که E امید ریاضی می باشد.

جدول ۵- جزئیات سیستم ANFIS برای پیش بینی مقاومت

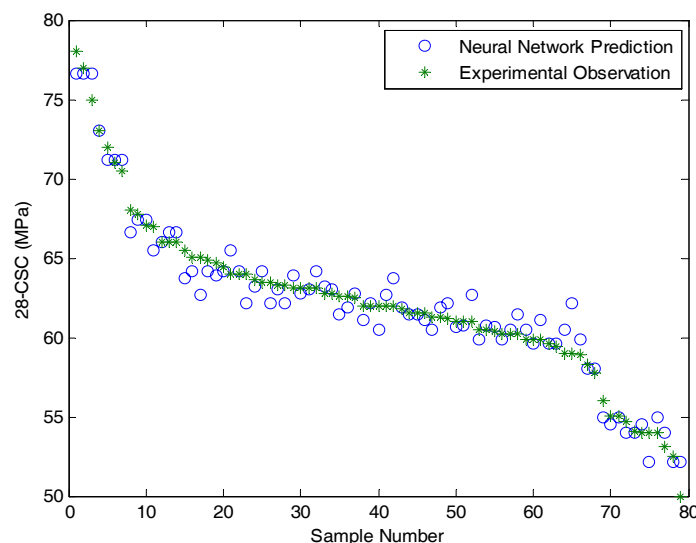
روش استنتاج	تابع شکل	تعداد قواعد	نمونه های آموزشی	نمونه های آزمایشی
TSK	گوسی	۷۲۹	۷۹	۱۷

جدول ۶- عملکرد ANFIS برای مجموعه های آزمایشی و آموزشی

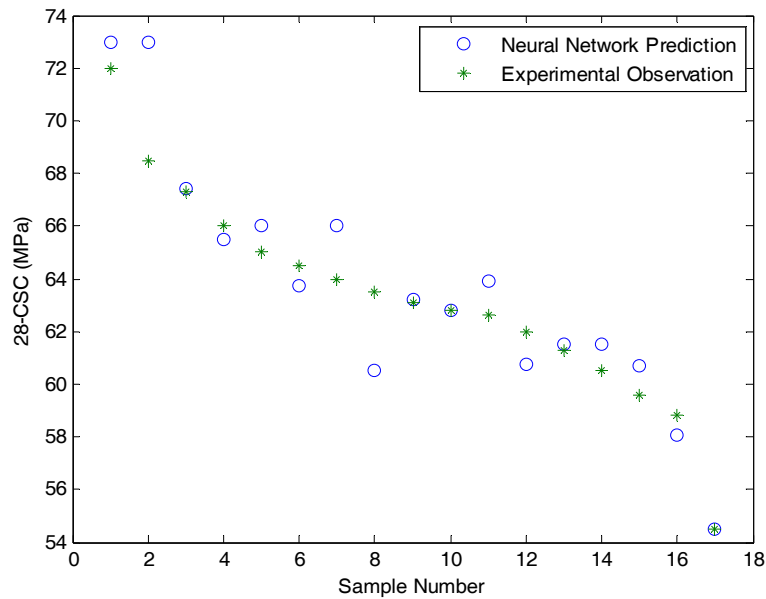
مجموعه آموزشی		مجموعه آزمایشی	
RMS	CF	RMS	CF
۱/۵۷۵۰	۰/۹۴۷۲	۰/۹۸۲۰	۰/۹۸۰۶

۶- نتیجه گیری

- روش طرح اختلاط ACI 211.03، روش مناسبی برای طرح اختلاط بتن های بدون اسلامپ مورد استفاده در ساخت قطعات



شکل ۹- مقایسه نتایج پیش بینی ANFIS با مشاهدات آزمایشگاهی برای داده های آموزشی



شکل ۱۰- مقایسه نتایج پیش‌بینی ANFIS با مشاهدات آزمایشگاهی برای داده‌های آزمایشی

۷- مراجع

- [9].Hansen, K. D., "RCC for Rehabilitation of Dams in USA—An Overview," Roller-Compacted Concrete III, ASCE, New York, Feb. 1992, pp. 22-46.
- [10].Cannon, R. W., "Proportioning No-Slump Concrete for Expanded Applications," Concrete International, Vol.4, No.8, August, 1982, pp. 43-47.
- [11].Marchand, J., Boisvert, L., Tremblay, S., Maltais, J. and Pigeon, M., "Air Entrainment in No-Slump Mixes," Concrete International, April, 1998, pp. 38-44.
- [12].Käppi, A. and Nordenswan, E., "Workability of No-Slump Concrete," Concrete International, March, pp. 37-41, 2007.
- [13].Cusens, A. R., "The Measurement of the Workability of Dry Concrete Mixes," Magazine of Concrete Research, Vol. 8, No. 22, Mar., pp. 23-30., 1956
- [14].Flora, G. S., "A Study of No-Slump Concrete," Master's thesis, Pittsburgh University, 122 pages, 1965.
- [15].Sobhani J., Najimi M., Pourkhorshidi A.R., Parhizkar T., "Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression," neural network and ANFIS models, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 709–718, 2010.
- [1].ACI 211.3, "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
- [2].Shelestynsky, E. C., "The Workability of No-Slump Concrete, Master's thesis," University of Western Ontario, February, 94 pages, 1972.
- [3]. ACI Concrete terminology
- [4]."Concrete Gravity Dam Built Like Earthfill," Engineering News-Record, Vol. 173, Dec. 24, p. 32, 1964.
- [5].Gentile, G., "Study, Preparation, and Placement of Low Cement Concrete, with Special Regard to its use in Solid Gravity Dams, Transactions, International Congress on Large Dams," R16 Q 30, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, France, 1964.
- [6].Wallingford, V. M., "Proposed New Technique for Construction of Concrete Gravity Dams, Transactions, 10th International Congress on Large Dams," Montreal, Quebec, Canada,; International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, Vol. 4, pp. 439-452, 1970.
- [7].ACI 207.5, "Roller-Compacted Mass Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999.
- [8].Schrader, E. K., "Roller-Compacted Concrete for Dams, State of the Art," International Conference on Advances in Concrete Technology, Athens, Greece; 2nd Edition, CANMET, Ottawa, Canada, 1994.

[۱۸]. رمضانیان پورع. ا.، سبحانی م.، سبحانی ج.، «کاربرد سیستم فازی - عصبی شبکه مینا، برای پیش بینی مقاومت بتنهای با مقاومت بالا.» مجله امیرکبیر؛ شماره ۱۵، ج-۵۹، ص ص. ۷۸-۹۳، تابستان ۱۳۸۳.

[16].Jang J. S. R., "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System." IEEE Trans Syst Man Cyber Vol. 23, No. 3, pp. 665-85, 1993.

[17].Jang J. S. R., and Sun C. T., "Nuro-Fuzzy Modeling and Control." Proc IEEE Vol. 83, No. 3 1995.