

## پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود متراکم تحت شرایط جذر و مد دریای عمان با استفاده از سیستم فازی

احسان عدیلی\*، ماریه سالاری نژاد، محمد رودینی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

### چکیده

در این تحقیق یک سیستم فازی برای پیش بینی رفتار بتن خودمترکم در شرایط جذر و مد در دریای عمان ارائه گردیده است. به دلیل اینکه سازه های دریایی در معرض یون کلراید قرار دارند اغلب دچار خوردگی می گردند و بنابراین بررسی رفتار بتن آنها از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. به منظور تعریف سیستم فازی و توابع تعلق آن تعدادی نمونه بتن خودمترکم با نسبت آب به سیمان متفاوت، در سنین مختلف و مقادیر متفاوتی میکروسیلیس و نانوسیلیس ساخته شدند و بصورت کاملا طبیعی در ساحل دریای عمان قرار گرفتند تا در شرایط جذر و مد باشند. این چهار پارامتر توابع تعلق ورودی فازی را تشکیل دادند و مقاومت فشاری بتن نیز به عنوان تابع تعلق خروجی معرفی گردید. در سیستم فازی موتور استنتاج مدانی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت سیستم

فازی توانست مقاومت فشاری بتن در سازه های ساحلی را تحت شرایط جذر و مد تندها با حداکثر ۳ درصد اختلاف مورد پیش بینی قرار دهد.

کلمات کلیدی: بتن خود متراکم، سیستم فازی، شرایط جذر و مد، مقاومت فشاری

## ۱. سرآغاز

استفاده از سیستم فازی بعنوان شاخه ای از ریاضیات هوشمند در علوم مهندسی به دلیل توانمندی و همچنین سادگی آن رواج پیدا کرده است. با استفاده از این سیستم های هوشمند امکان پیش بینی پارامترهای مختلف و همچنین کنترل عوامل گوناگون وجود دارد. با توجه به هزینه بر بودن و زمان بر بودن بسیاری از آزمایشات بتن، پیش بینی های سیستم فازی می تواند در پیش بینی مشخصات فنی بتن مورد استفاده قرار گرفته و از نظر مالی و زمانی بسیار مقرون به صرفه باشد [۱]. پیش از این سیستم های فازی، هوش مصنوعی و شبکه های عصبی تاکنون در پیش بینی رفتار بتن توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است [۲-۵]. از طرفی تخریب سازه های بتنی در شرایطی که در معرض حملات کلراید و سولفات ها هستند بیشتر بوده است. یون کلراید که در آب های دریا وجود دارد در بسیاری از موارد می تواند خوردگی سازه های بتنی را تسریع بخشد. بنابراین محققان همواره در پی این بوده اند که بدانند میزان اثر کلراید بر خوردگی و در نتیجه مشخصات فنی بتن چقدر است و سازه های دریایی مانند اسکله و پل ها با گذشت زمان چقدر از مقاومت خود را از دست می دهند. تانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۷] با استفاده از یک سری روابط عددی به میزان نفوذ کلراید در بتن تحت شرایط رطوبتی و دماهای مختلف پرداختند. آنها دریافتند که حرارت محیط می تواند بر میزان حمله کلرایدها به بتن تاثیر بگذارد اما اثر چندانی بر نفوذ آن به داخل بتن نخواهد داشت. لی<sup>۲</sup> و همکاران [۸] به تاثیر حضور سرباره لیتیوم بر مقاومت بتن در برابر حمله کلراید پرداختند. آنها بتن هایی با مقاومت های مختلف حاوی سرباره لیتیوم تولید نموده و در معرض حالات مختلفی از حمله کلراید قرار دادند. لیو<sup>۳</sup> و همکاران [۹] برای انتشار یون کلراید در بتن خود متراکم ضریبی تعریف نمودند و آنرا مورد بررسی قرار دادند. آنها این ضریب را بصورت وابسته به زمان تعریف کردند و دریافتند که با افزایش خوردگی بر مقدار این ضریب افزوده می شود. دو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰]

<sup>۱</sup> Tong

<sup>۲</sup> Li

<sup>۳</sup> Liu

<sup>۴</sup> Du

تلاش نمودند تا یک بررسی آزمایشگاهی و عددی بر روی نفوذ یون کلراید در بتن بازیافتی داشته باشند. آنها بتن را از پسماند بتن های قبلی بازیافت کردند. به این صورت که بتن های قدیمی را خرد نموده و در بتن جدید مورد استفاده قرار دادند. پس از آن میزان نفوذ یون کلراید را در آن بررسی کردند. همچنین یک مدل عددی نوشتند که می توانست نفوذ این یون را با دقت بالا در بتن پیش بینی نماید. به هر حال بررسی بتن هایی که در معرض آب های شور قرار دارند و در سازه های ساحلی در معرض یون کلراید هستند همواره مورد توجه محققان بوده است.

در این تحقیق قرار است یک سیستم فازی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خودمترکم که از انواع مدرن بتن بوده و نیاز به تراکم ندارد در سازه های ساحلی و تحت شرایط جذر و مد دریای عمان ارائه گردد. بدلیل اینکه غالباً در مجاورت آب تنها از بتن مسلح در سازه های ساحلی مانند اسکله و پل استفاده می گردد، و با توجه به اینکه این سازه ها در معرض یون کلراید آب قرار دارند، پیش مقاومت بتن این سازه ها برای مهندسین از اهمیت خاصی برخوردار است. اگر توسط ریاضیات هوشمند بتوان میزان اثر آب در شرایط جذر و مد را بر روی این بتن ها پیش بینی نمود می توان براحتی و در موقع لزوم جهت ترمیم این سازه ها اقدام کرد. شکل ۱ نمونه ای از سازه های ساحلی بتنی (اسکله) که تحت جذر و مد قرار دارند و شکل ۲ خوردگی پایه های پل تحت جذر و مد آب دریا را نشان می دهند. با توجه به اینکه در ساعاتی از شبانه روز این سازه ها زیر آب هستند و در ساعاتی نیز خارج از آب قرار می گیرند این رفتار سیکلی باعث می گردد مقاومت بتن آنها با دیگر سازه ها متفاوت باشد.



شکل ۱- نمونه ای از اسکله بتنی



شکل ۲- خوردگی پایه های پل در بخش هایی که تحت جذر و مد هستند.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

یکی از انواع بتن که به دلیل عدم نیاز به تراکم و ویبره نمودن مورد استقبال مهندسان قرار گرفته بتن خود متراکم می باشد. این نوع بتن که اولین بار در سال ۱۹۸۶ در ژاپن ساخته شد هم اکنون در بسیاری از سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. به خصوص در بخش هایی از سازه که تراکم میلگرد بالاست و امکان ویبره کردن به سادگی وجود ندارد استفاده از بتن خودمتراکم مزایای ویژه ای خواهد داشت. در این تحقیق در گام اول نمونه های بتنی خود متراکم که از مدرن ترین و کارآمدترین انواع بتن است با طرح اختلاط های متفاوت ساخته شده و در سنین مختلف در معرض آب دریای عمان قرار گرفتند. این نمونه ها پس از ساخت در آزمایشگاه به ساحل دریا برده شدند تا بطور کاملاً طبیعی در معرض جذر و مد دریای عمان قرار گیرند و رفتار سازه های بتنی مانند پل ها و اسکله های موجود در این ساحل شبیه سازی گردد. پس از آن سیستم فازی تکمیل گردیده و از آن به بعد دیگر نیازی به آزمایشات پرهزینه نبوده و این سیستم می تواند به راحتی مقاومت بتن های خودمتراکم را در ساحل این دریا مورد پیش بینی قرار دهد. در حقیقت بایستی نمونه های بتنی خودمتراکم فراوانی ساخته می شدند تا در معرض جذر و مد دریای عمان قرار گیرند تا با استفاده از آنها بتوان توابع تعلق فازی را تعریف نمود و مقاومت فشاری بتن خود متراکم را مورد پیش بینی قرار داد. به این منظور نمونه های بتنی خودمتراکم با طرح اختلاط ذکر شده در جدول ۱ ساخته شدند. جهت ساخت نمونه ها از سیمان خاش استفاده گردید که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه گردیده است. نکته دیگر وضعیت خاک مورد استفاده در نمونه های بتنی می باشد. منحنی

دانه بندی این خاک مطابق شکل ۳ بوده که رد شرایط استاندارد و قابل قبولی قرار گرفته است. در حقیقت پس از اینکه مصالح سنگی در بتونیر ریخته شدند، آب و سیمان اضافه گردید و عمل اختلاط برای تمامی نمونه ها به میزان سه دقیقه انجام گردید. این میزان از حداقل مقدار اختلاط آیین نامه که یک و نیم دقیقه است بیشتر و رضایتبخش می باشد. در حین اختلاط فوق روان کننده به نمونه اضافه گردیده و باعث افزایش روانی و ساخت بتن خود متراکم گردیده است. وضعیت اسلامپ نمونه های بتنی خود متراکم در شکل ۴ نشان داده شده است. چنانکه مشخص است میانگین قطر بتن ریزی ۵۴ سانتیمتر بوده است.

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه های بتنی خود متراکم (بصورت نسبی)

ردیف	نام	نسبت آب به سیمان	سیمان	آب	شن بادامی	شن نخودی	پودر سنگ	ماسه	فوق روان کننده
۱	W40	۰/۴	۱/۴۵	۰/۵۸	۱/۲۰	۱/۴۶	-	۲/۹۹	-
۲	W45	۰/۴۵	۱/۴۵	۰/۶۵	۱/۲۰	۱/۴۶	-	۲/۹۹	-
۳	W50	۰/۵	۱/۴۵	۰/۷۳	۱/۲۰	۱/۴۶	-	۲/۹۹	-
۴	W40S	۰/۴	۱/۴۵	۰/۵۸	۱/۲۰	۱/۴۶	۰/۳۴	۲/۹۹	۰/۰۰۸
۵	W45S	۰/۴۵	۱/۴۵	۰/۶۵	۱/۲۰	۱/۴۶	۰/۳۴	۲/۹۹	۰/۰۰۸
۶	W50S	۰/۵	۱/۴۵	۰/۷۳	۱/۲۰	۱/۴۶	۰/۳۴	۲/۹۹	۰/۰۰۸

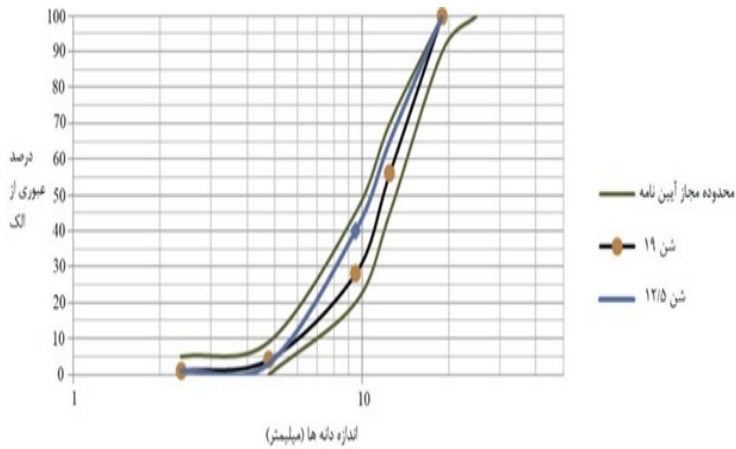
جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده

Physical Test	
Specific surface area (cm <sup>2</sup> /kg)	3110
Setting Time (min)	initial
	final
Compressive Strength (MPa)	3 Day
	5 Day

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده

Chemical analysis	Results
CaO (%)	62.86
SiO <sub>2</sub> (%)	21.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.76
F.CaO (%)	3.2
C <sub>4</sub> AF (%)	10.4
C <sub>3</sub> A (%)	6.9
C <sub>2</sub> S (%)	20.1
C <sub>3</sub> S (%)	53.4
I.R (%)	53.4
LO.I (%)	0.53
CL	1.2
K <sub>2</sub> O (%)	0.04
Na <sub>2</sub> O (%)	0.58
SO <sub>3</sub>	0.21
MgO	3.46

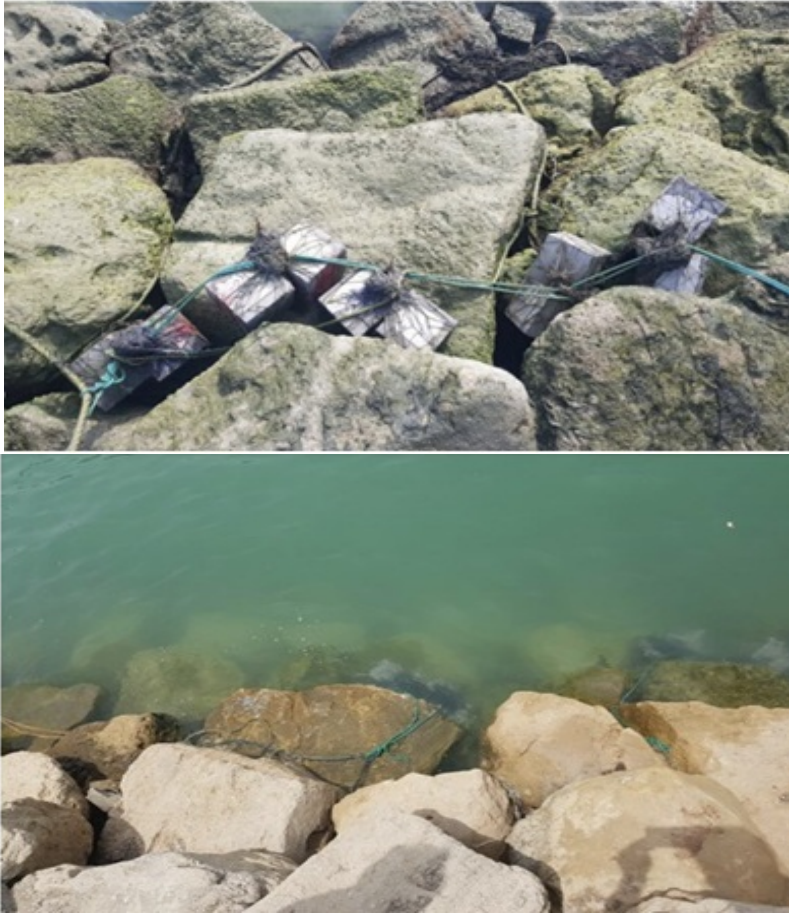
نمونه ها پس از ساخت به ساحل دریای عمان برده شدند تا بصورت واقعی در معرض جذر و مد دریای عمان قرار گیرند. بدین منظور آنها در ساحل قرار داده شدند و با تور روی آنها پوشانده شد تا در اثر اصابت امواج از جای خود جابجا نشوند. در این حالت نمونه ها بتنی خود متراکم تا رسیدن به سن مورد نظر در ساحل دریا باقی ماندند و بصورت مداوم تحت جذر و مد قرار گرفتند. شکل ۵ نمونه های بتنی خود متراکم در ساحل دریای عمان تحت جذر و مد را نشان می دهد.



شکل ۳- منحنی دانه بندی شن



شکل ۴- اسلامپ بتن خود متراکم

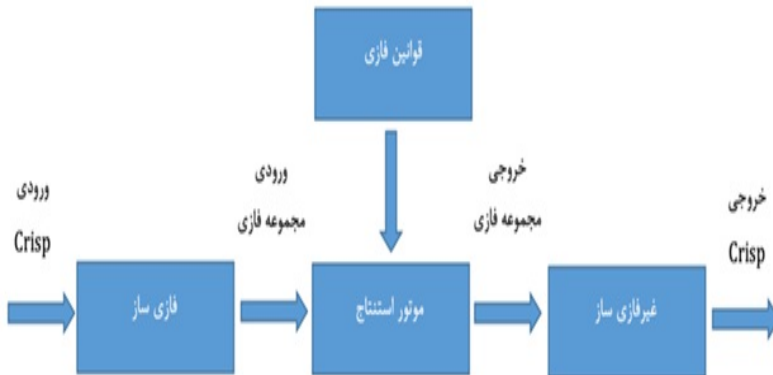


شکل ۵- نمونه های بتن خودمتراکم در ساحل دریای عمان تحت جذر و مد

### ۳. سیستم فازی

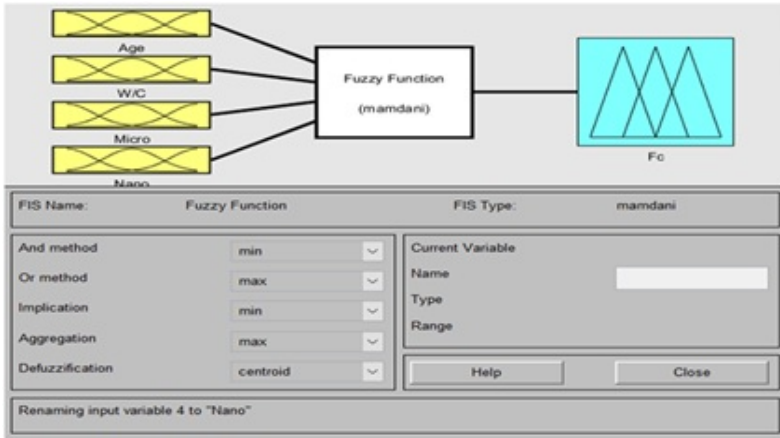
یک سیستم فازی بر مبنای منطق فازی تعریف می گردد و روابط درون سیستم نیز به کمک ریاضیات فازی برنامه ریزی می شود. چنین سیستم هایی که در حقیقت نوعی ریاضیات هوشمند هستند در علوم مهندسی غالباً در دو جنبه مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از کاربردهای مهم آن پیش بینی است که می تواند یک یا چند پارامتر را مورد پیش بینی قرار داده و در صرف هزینه های مالی و زمانی صرفه جویی نماید. دیگر اینکه می تواند با کنترل یک پارامتر در محدوده خاص و مورد نظر در مهندسی کنترل مورد استفاده قرار گیرد. در یک سیستم فازی ابتدا بایستی توابع تعلق فازی برای پارامترهای ورودی و خروجی تعریف گردند. این توابع تعلق به دو صورت تعریف می شوند، یا اینکه توسط یک فرد خبره و متخصص در آن حوزه خاص مشخص می گردند یا اینکه بر اساس

نتایج آزمایشات یا نتایج محاسبات تدوین می گردند. پس از آن قواعد اگر-آنگاه فازی شکل گرفته و موتور استنتاج فازی وارد عمل می شود. این موتور در حقیقت قواعد اگر-آنگاه را ترکیب نموده و می تواند خروجی های یک سیستم فازی را مشخص نماید. در نهایت نیز نتایج سیستم فازی به ریاضیات کلاسیک بازگشته و خروجی مجموعه بصورت کلاسیک خواهد بود. شکل ۶ اجزاء یک سیستم فازی را نشان می دهد. در این تحقیق آزمایشات عملی مبنای تعریف توابع تعلق فازی بوده است و برای آن که توابع دقیق تری تعریف گردند نمونه های بتنی خود متراکم ساخته شده و در ساحل دریای عمان قرار گرفته است. سیستم فازی ارائه شده در این تحقیق که کلیات آن در شکل ۶ نشان داده شده بصورت جزئی و دقیق تر در شکل ۷ مشخص است.



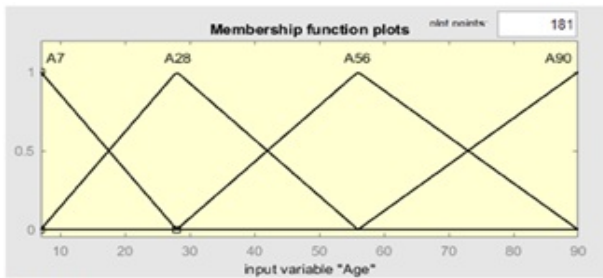
شکل ۶- اجزاء یک سیستم فازی

در این تحقیق برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن SCC از سیستم فازی استفاده گردید که بصورت شماتیک در شکل ۷ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می گردد چهار تابع تعلق ورودی سن نمونه، (Age)، نسبت آب به سیمان، (W/C) مقدار میکروسیلیس و میزان نانوسیلیس، و تابع تعلق خروجی مقاومت فشاری بتن ( $F_c$ ) در این سیستم وجود دارند.

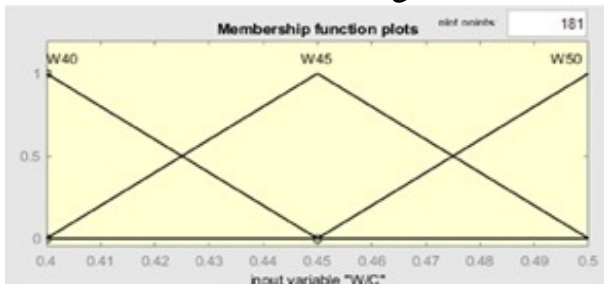


شکل ۷- سیستم فازی تشکیل شده برای پیش بینی مقاومت فشاری SCC تحت جذر و مد دریای عمان.

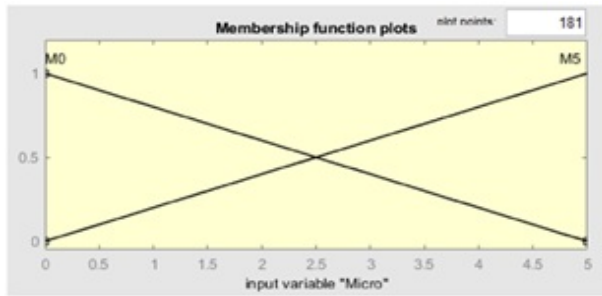
جهت تعیین توابع تعلق فازی، در ابتدا این توابع بصورت بسیار ساده و خطی در نظر گرفته شدند. این شرایط سیستم فازی اولیه ای را ایجاد نمود که توانست با مقداری خطا مقاومت فشاری نمونه های SCC تحت جذر و مد دریای عمان را مورد پیش بینی قرار دهد. در ادامه این توابع تعلق بهینه سازی گردیدند. توابع تعلق اولیه فازی مورد استفاده در شکل های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده اند.



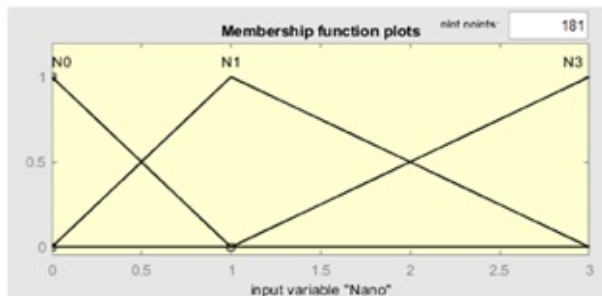
شکل ۸- تابع تعلق اولیه سن نمونه (ورودی)



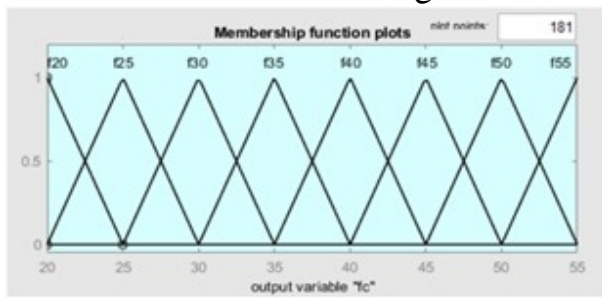
شکل ۹- تابع تعلق اولیه نسبت آب به سیمان (ورودی)



شکل ۱۰- تابع تعلق اولیه مقدار میکروسیلیس (ورودی)



شکل ۱۱- تابع تعلق اولیه مقدار نانوسیلیس (ورودی)



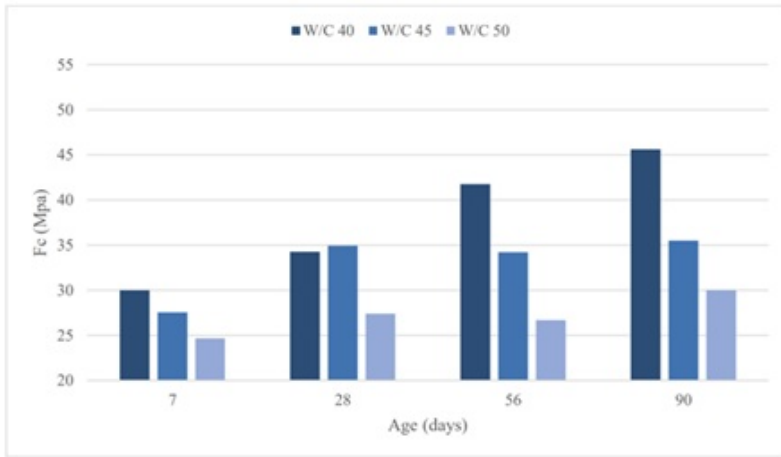
شکل ۱۲- تابع تعلق اولیه مقاومت فشاری (خروجی)

#### ۴. تحلیل و بررسی نتایج

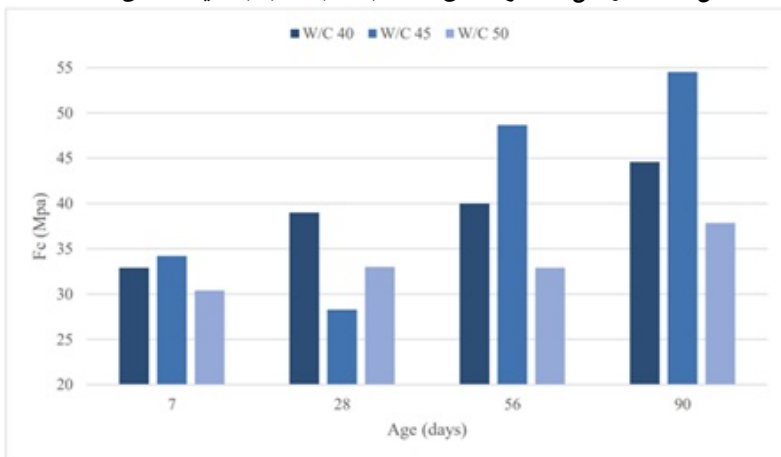
پس از ساخت نمونه های بتنی خودمتراکم موسوم به SCC آنها به مدت های مختلف و در سنین متفاوت در ساحل دریای عمان قرار داده شدند تا بصورت طبیعی در شرایط جذر و مد قرار گیرند. در نهایت پس از شکست نمونه ها نتایج بدست آمد که در ادامه در نمودارهایی نشان داده می شود.

۴-۱ اثر سن نمونه بر مقاومت فشاری بتن خودمتراکم تحت جذر و مد  
 تمامی نمونه های بتن خودمتراکم که تحت جذر و مد دریای عمان قرار گرفتند و عملا سازه های ساحلی را شبیه سازی نمودند با افزایش سن مقاومت بیشتری یافتند. هرچند با افزایش سن بیشتر

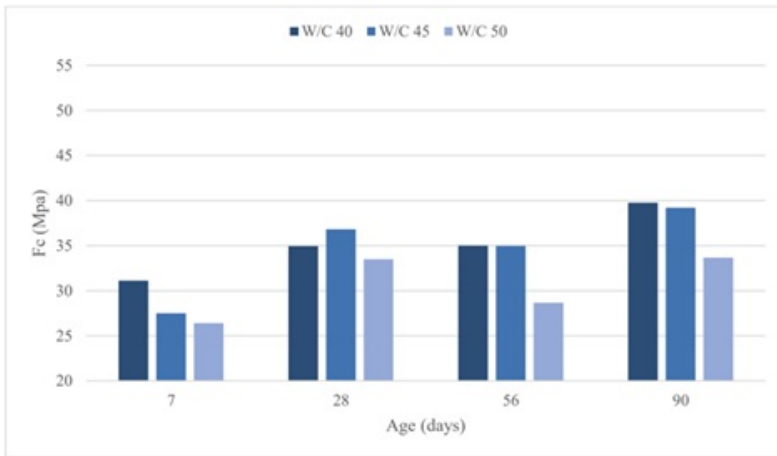
تحت جذر و مد قرار داشتند اما در عین حال به مقاومت آنها افزوده شد. البته میزان این افزایش متفاوت بوده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۱۳ تا ۱۶ وضعیت رشد مقاومت نمونه ها در سنین مختلف را نشان می دهند.



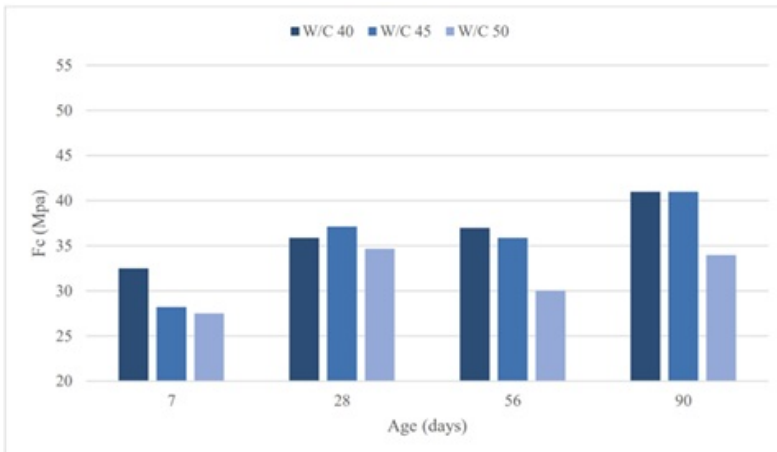
شکل ۱۳- اثر سن در نمونه های شاهد با نسبت آب به سیمان های مختلف



شکل ۱۴- اثر سن در نمونه های حاوی ۵ درصد میکروسیلیس



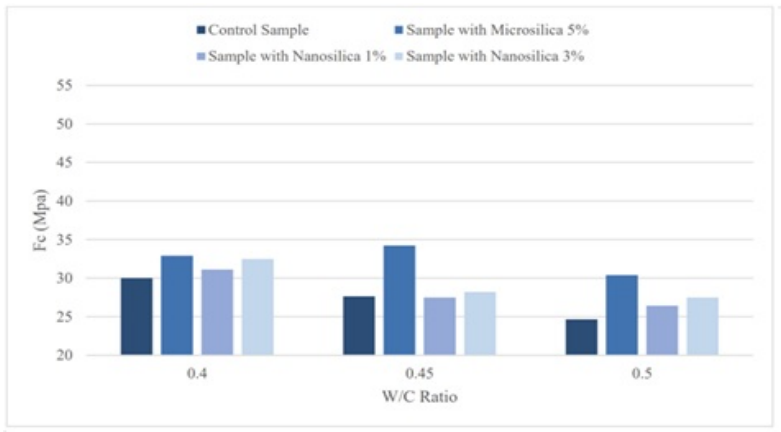
شکل ۱۵- اثر سن در نمونه های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس



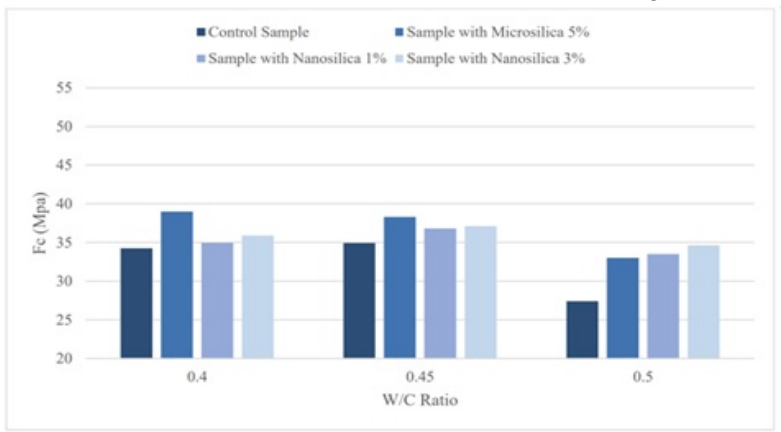
شکل ۱۶- اثر سن در نمونه های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس

چنانکه ملاحظه می گردد عمدتاً حضور میکروسیلیس و نانوسیلیس در نمونه های بتنی خودمتراکم تحت جذر و مد آب دریا مفید ارزیابی گردیده و به خصوص میکروسیلیس توانسته مقاومت فشاری بتن را حتی به بالای ۵۰ مگاپاسکال برساند.

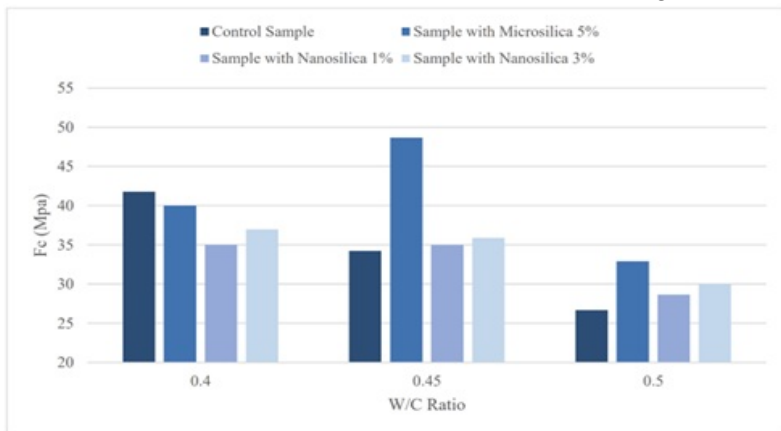
۲-۴ اثر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن خودمتراکم تحت جذر و مد  
 اثر نسبت آب به سیمان در نمونه های بتن خودمتراکم که تحت جذر و مد دریای عمان قرار گرفتند در شکل های ۱۷ تا ۲۰ نشان داده شده است. چنانکه در این شکل ها ملاحظه می گردد عمدتاً نسبت های آب به سیمان کمتر مقاومت های بیشتری ارائه نموده اند.



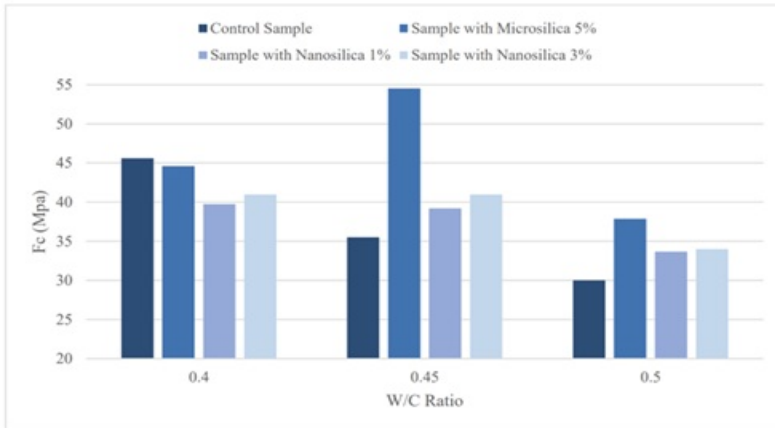
شکل ۱۷- اثر نسبت آب به سیمان در نمونه های مختلف ۷ روزه



شکل ۱۸- اثر نسبت آب به سیمان در نمونه های مختلف ۲۸ روزه



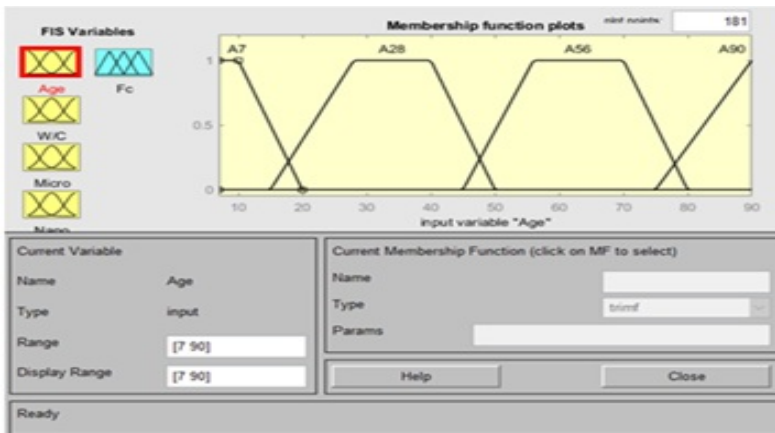
شکل ۱۹- اثر نسبت آب به سیمان در نمونه های مختلف ۵۶ روزه



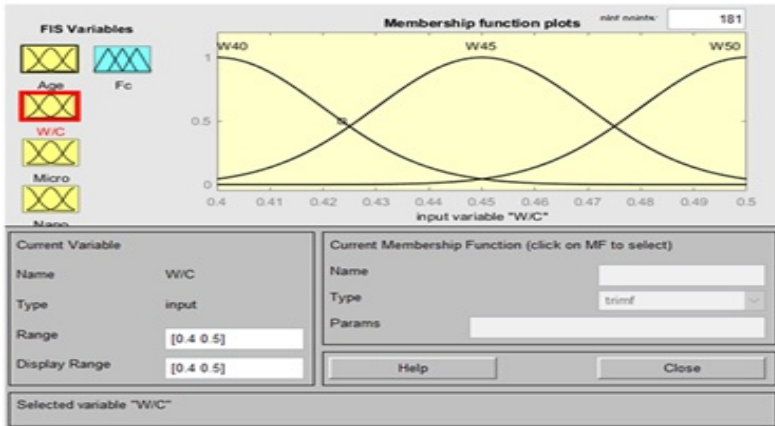
شکل ۲۰- اثر نسبت آب به سیمان در نمونه های مختلف ۹۰ روزه

### ۳-۴ تکمیل سیستم فازی نهایی

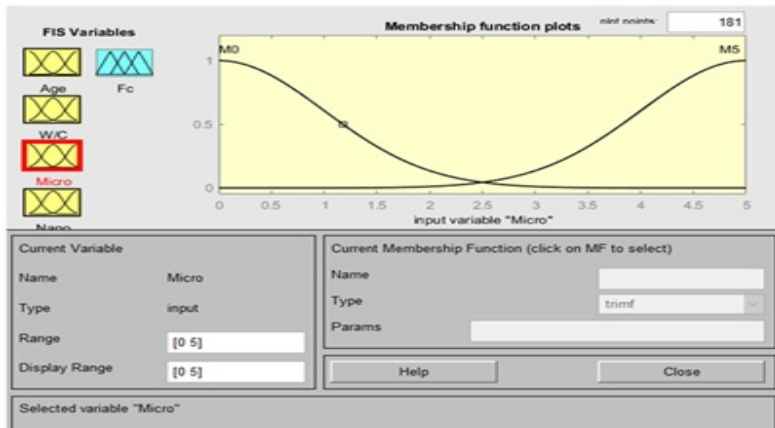
پس از اینکه بر اساس توابع اولیه مدل فازی تکمیل گردید و موتور استنتاج فازی شکل گرفت، سیستم فازی توانست مقاومت فشاری بتن خود متراکم را تحت جذر و مد دریای عمان مورد پیش بینی قرار دهد. در این سیستم اگرچه در مواردی پیش بینی با دقت مناسب انجام گردیده بود اما در مواردی نیز همراه با خطا بود و از خطای آن نمی شد صرف نظر نمود. لذا توابع تعلق ورودی و خروجی بقدری عوض شدند و بارها و بارها اصلاح گردیدند تا اینکه سیستم فازی نهایی شکل گرفت و این سیستم توانست با حداکثر خطای ۳ درصد پیش بینی دقیقی انجام دهد. توابع تعلق سیستم فازی نهایی عبارتند در شکل های ۲۱ تا ۲۵ نشان داده شده اند.



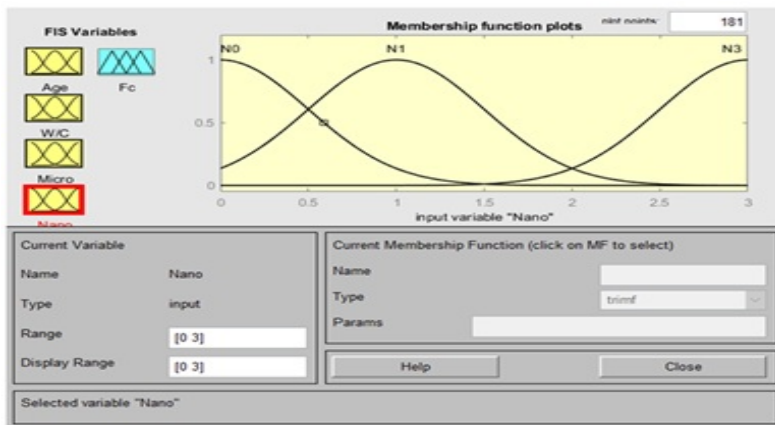
شکل ۲۱- تابع تعلق نهایی سن نمونه



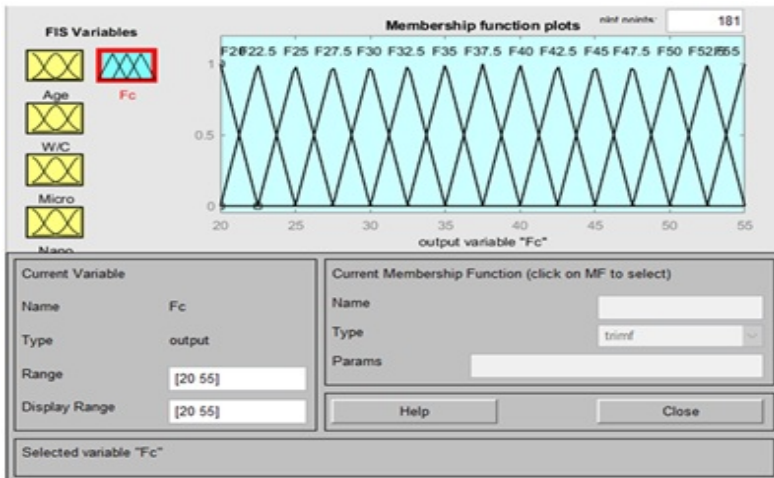
شکل ۲۲- تابع تعلق نهایی نسبت آب به سیمان



شکل ۲۳- تابع تعلق نهایی میکروسیلیس

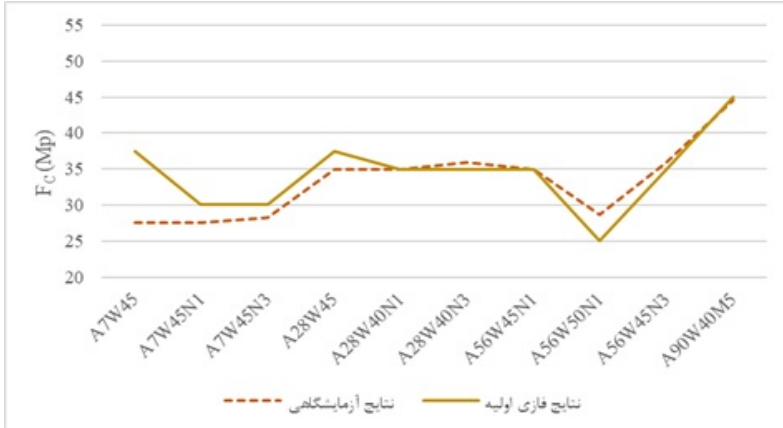


شکل ۲۴- تابع تعلق نهایی نانوسیلیس

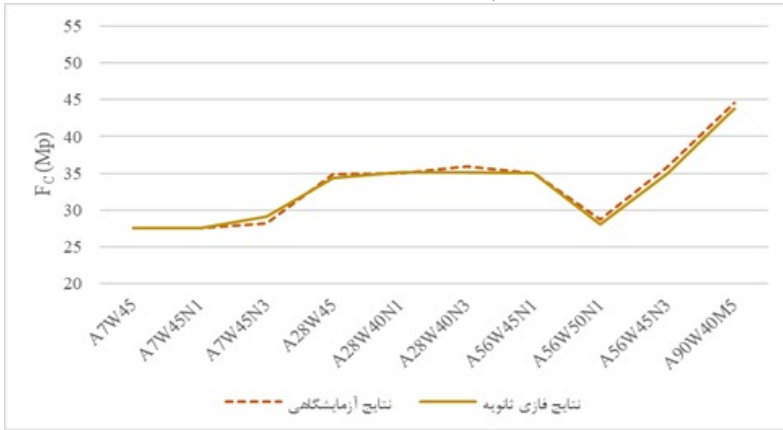


شکل ۲۵- تابع تعلق نهایی مقاومت فشاری

با استفاده از توابع تعلق فازی نهایی، سیستم فازی توانست با دقت بالاتری مقاومت فشاری بتن خودمترکم در شرایط جذر و مد دریای عمان را مورد پیش بینی قرار دهد. در این بخش جهت کنترل سیستم فازی تعداد ۱۰ عدد نمونه بتن خودمترکم بصورت اتفاقی و با نسبت آب به سیمان مختلف، در سنین متفاوت و با افزودنی های مورد نظر ساخته شدند و مقاومت آنها توسط سیستم فازی پیش بینی گردید. همین نمونه ها دقیقاً در محل قبلی در شرایط جذر و مد دریای عمان قرار گرفتند. میزان توانمندی سیستم فازی اولیه در پیش بینی مقاومت آنها در شکل ۲۶ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می گردد در مواردی این سیستم توانسته با دقت خوبی مقاومت فشاری نمونه ها را پیش بینی نماید و در مواردی نیز دچار خطا گردیده است. غیر از دو نمونه، تقریباً پیش بینی های این سیستم قابل قبول بوده است و میزان خطای آن کمتر از ۱۰ درصد بوده است. شکل ۲۷ پیش بینی سیستم فازی اصلاح شده نهایی را نشان می دهد که چنانکه در این نمودار ملاحظه می گردد دقت سیستم در پیش بینی بسیار بهبود یافته است. چنانکه ملاحظه می گردد در مواردی حتی پیش بینی کاملاً با نتایج آزمایشگاهی منطبق بوده است. در این حالت بیشینه خطای سیستم ۳ درصد بوده که کاملاً قابل قبول است. جدول ۴ میزان دقت سیستم های فازی اولیه و نهایی را در پیش بینی مقاومت فشاری بتن خودمترکم در شرایط جذر و مد دریای عمان با واقعیت مورد مقایسه قرار می دهد.

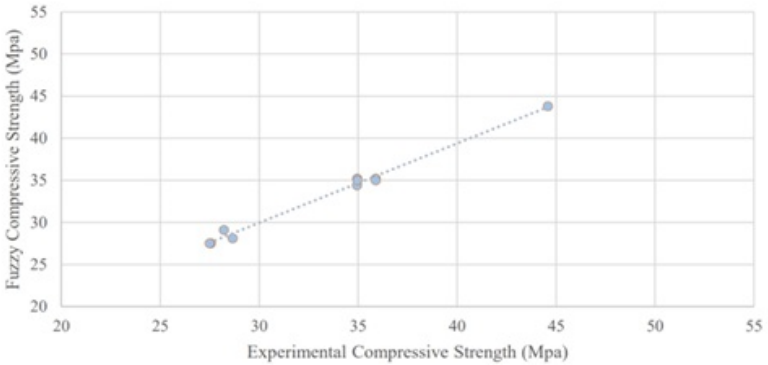


شکل ۲۶- میزان دقت سیستم فازی اولیه در پیش بینی مقاومت فشاری نمونه ها



شکل ۲۷- میزان دقت سیستم فازی نهایی در پیش بینی مقاومت فشاری نمونه ها

MSE = 0.33  
r = 0.93



شکل ۲۸- میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی نتایج

جدول ۴- مقایسه دقت سیستم فازی اولیه و سیستم اصلاح شده نهایی در پیش بینی مقاومت فشاری بتن خودمتراکم در شرایط جذر و مد

ردیف	نام	نتایج آزمایشگاهی (مگاپاسکال)	نتایج فازی اولیه (مگاپاسکال)	درصد خطای اولیه	نتایج فازی نهایی (مگاپاسکال)	درصد خطای ثانویه
۱	A۷W۴۵	۲۷/۵۶	۳۷/۵	-۳۶/۰۷	۲۷/۵	۰/۲۲
۲	A۷W۴۵N۱	۲۷/۵	۳۰	-۹/۰۹	۲۷/۵	۰
۳	A۷W۴۵N۳	۲۸/۲۲	۳۰	-۶/۳۱	۲۹/۱	-۳/۱۲
۴	A۲۸W۴۵	۳۴/۹۴	۳۷/۵	-۷/۳۳	۳۴/۴	۱/۵۵
۵	A۲۸W۴۰N۱	۳۴/۹۵	۳۵	-۰/۱۴	۳۵/۲	-۰/۷۲
۶	A۲۸W۴۰N۳	۳۵/۸۹	۳۵	۲/۴۸	۳۵/۲	۱/۹۲
۷	A۵۶W۴۵N۱	۳۴/۹۸	۳۵	-۰/۰۶	۳۵	-۰/۰۶
۸	A۵۶W۵۰N۱	۲۸/۶۶	۲۵	۱۲/۷۷	۲۸/۱	۱/۹۵
۹	A۵۶W۴۵N۳	۳۵/۸۹	۳۵	۲/۴۸	۳۵	۲/۴۸
۱۰	A۹۰W۴۰M۵	۴۴/۵۹	۴۵	-۰/۹۲	۴۳/۸	۱/۷۷

ضمناً جهت بررسی میزان دقت کل کار و مقدار خطاهای موجود، میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی مورد محاسبه قرار گرفتند که در شکل ۲۸ نشان داده شده اند.

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق تلاش گردید تا رفتار بتن خود متراکم که یک بتن مدرن و پرکاربرد است و برای اجرا نیازی به عملیات تراکم ندارد، در شرایط یک سازه ساحلی که تحت جذر و مد دریای عمان قرار دارد، توسط یک سیستم فازی پیش بینی گردد. سیستم فازی بارها و بارها اصلاح گردید تا در نهایت سیستم نهایی توانست با دقت مناسب مقاومت فشاری بتن خود متراکم تحت شرایط جذر و مد دریای عمان را مورد پیش بینی قرار دهد. اهم نتایج حاصله بصورت زیر بوده اند:

۱. مقاومت فشاری در تمامی نمونههای بتن خودمتراکم که تحت جزر و مد دریای عمان قرار داشتند با افزایش سن افزایش یافت، اما این روند در نمونههای با نسبت آب به سیمان بالاتر کندتر بود.
۲. در نمونه های بتن خودمتراکم تحت جذر و مد دریا حاوی ۱% و ۳% نانوسیلیس، مقاومت در بازه ۲۸ تا ۵۶ روز کاهش داشت اما پس از آن مجدداً افزایش یافت.

۳. کاهش نسبت آب به سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری در تمامی سنین در نمونه های بتن خود متراکم تحت جذر و مد دریا، به ویژه در نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ شد.
۴. افزودن ۳% نانوسیلیس در مقایسه با ۱% تاثیر بیشتری بر مقاومت فشاری بتن خودمتراکم در شرایط جزر و مد دریای عمان در سنین بالا داشت.
۵. نمونه های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس نسبت به نمونه شاهد به ویژه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز عملکرد بهتری داشتند.
۶. افزودن ۵% میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری در تمامی نسبت های آب به سیمان شد. نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۴ به ویژه در سنین ۵۶ و ۹۰ روز بهترین عملکرد را داشتند.
۷. به طور کلی، افزودنی های نانوسیلیس و میکروسیلیس و کاهش نسبت آب به سیمان تاثیر چشمگیری در افزایش مقاومت فشاری بتن خودمتراکم داشته اند. نمونه های با نانوسیلیس ۳% و نسبت آب به سیمان ۰/۴ بهترین عملکرد را نشان دادند.
۸. مدل فازی اولیه مقاومت فشاری نمونه های بتن خودمتراکم تحت تاثیر شرایط جزر و مد آب دریای عمان را با مقداری خطا پیشبینی نمود؛ این مقدار خطا جز در دو مورد قابل چشم پوشی بود. در همین راستا جهت بهبود دقت پیشبینی از طریق اصلاح توابع تعلق ورودی و خروجی درصد خطا به مقدار قابل توجهی کاهش یافت.
۹. مدل فازی نهایی پیشنهادی توانست با دقت بالا مقاومت فشاری این نمونه های بتنی خودمتراکم تحت تاثیر جزر و مد آب دریای عمان را پیشبینی نماید (حداکثر خطا در این حالت ۳/۱۲% بود).
۱۰. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل فازی نشان داد که سیستم های فازی در پیشبینی مشخصات فنی بتن میتواند راهکاری ساده، اقتصادی و کارآمد برای پروژه های عمرانی به ویژه در محیط های ساحلی باشد.

## مراجع

- [1] Adili, E., Sohrabi, M. R., & Nehi, H. M. (2014). Prediction of microcracks in concrete using fuzzy systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(3), 1161-1168. <https://doi.org/10.3233/IFS-131079>
- [2] Haseli, B., Nouri, G., Mardi, M., Adili, E. and Bahari, M. (2023). Prediction of strength parameters of concrete containing different additives using optimized neural network algorithm. *Numerical Method in Civil Engineering*, 7(4), 12-23.

- [3] Mangir. A, Okumus. F. (2023). Pre-earthquake fuzzy logic-based rapid hazard assessment of reinforced concrete buildings. *Case Studies in Construction Materials*. 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02534>.
- [4] Fang. J, Liang. J, Bian. J, Dang. F, Qin. Y, He. Min. Research on the static and dynamic tensile damage mechanism of concrete based on fuzzy sets. *Construction and Building Materials*, Volume 443, 2024, 137676, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137676>.
- [5] Tanyildizi. H. Fuzzy logic model for the prediction of bond strength of high-strength lightweight concrete. *Advances in Engineering Software*, Volume 40, Issue 3, 2009, Pages 161-169, ISSN 0965-9978, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.05.013>.
- [6] Chuang. K, Lan. T, Zhang. L, Chen. Y and Dai. X (2019). Parameter optimization for computer numerical controlled machining using fuzzy and game theory. *Symmetry*. DOI: 10.3390/sym11121450
- [7] Tong. L, Šavija. B, Zhang. M, Xiong. Q. X, Liu. Q. F. Chloride penetration in concrete under varying humidity and temperature changes: A numerical study. *Construction and Building Materials*, Volume 458, 2025, 138380, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138380>.
- [8] Li. Y, Zhu. W, Zheng. X, Hao. E, Zhang. D, Wang. T. Study on chloride attack resistance of concrete with lithium slag content. *Journal of Building Engineering*, Volume 97, 2024, 110723, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110723>.
- [9] Liu. D, Wang. C, Guo. T, Gonzalez-Libreros. J, Ge. Y, Tu. Y, Elfgrén. L, Sas. G. Time–depth dependent chloride diffusion coefficient of self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, Volume 76, Issue 12, 2024, Pages 600-616, ISSN 1751-763X, <https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00237>.
- [10] Du. T, Xiao. J, Li. C, Gan. Y, Jiang. X, Experimental and numerical study on the chloride ions penetration in recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 451, 2024, 138702, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138702>.