

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

برآورد ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن‌های در معرض شرایط محیطی

خلیج فارس به کمک شبکه عصبی - فازی

دانشجو : جواد محمدی

استاد راهنما :

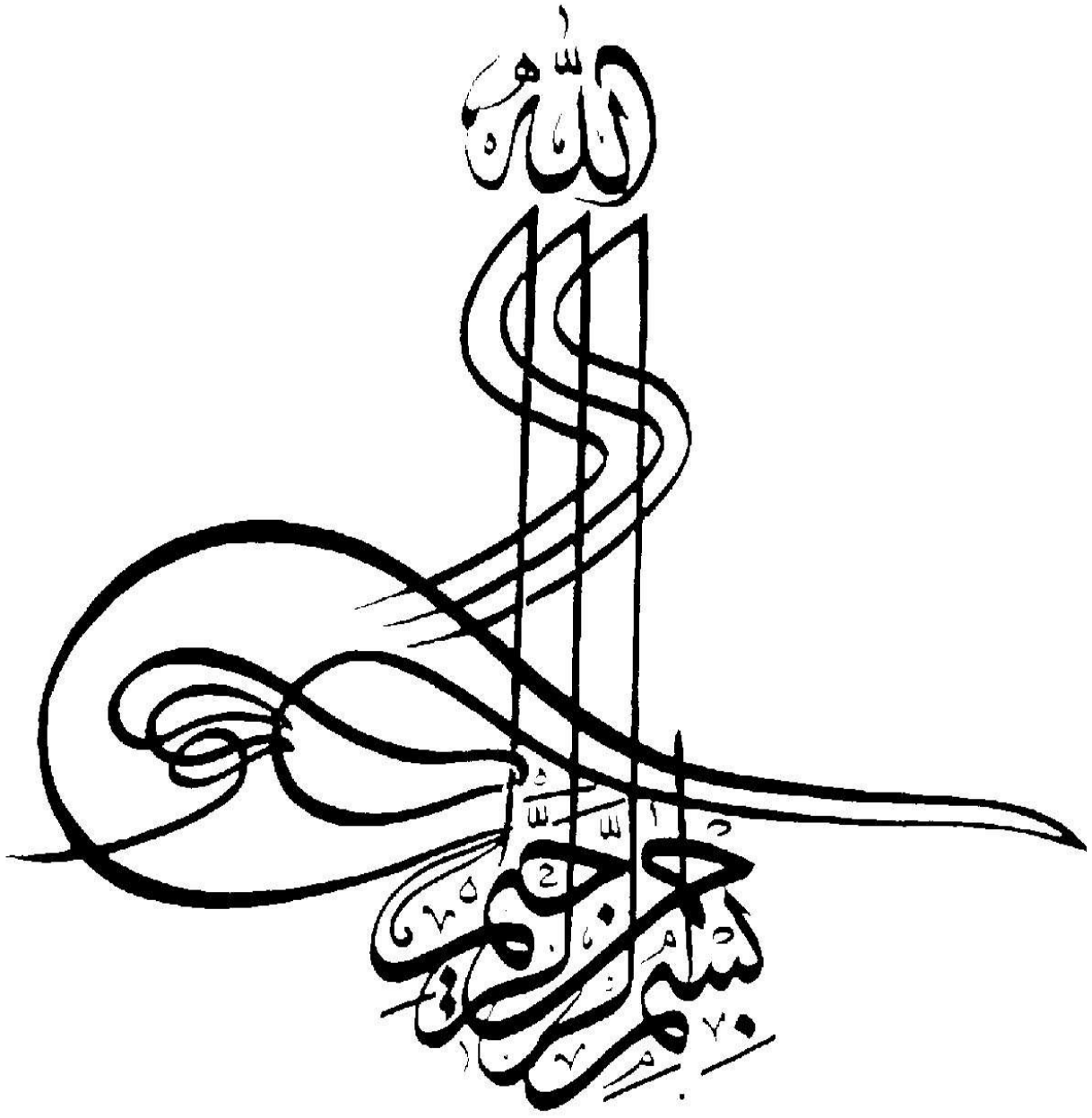
دکتر علی کیهانی

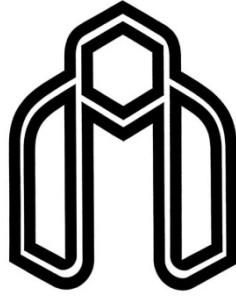
استاد مشاور

دکتر محمد شکرچی‌زاده

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

اردیبهشت ۱۳۸۹





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

برآورد ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن‌های در معرض شرایط محیطی

خلیج فارس به کمک شبکه عصبی-فازی

دانشجو: جواد محمدی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

استاد مشاور

دکتر محمد شکرچی‌زاده

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه


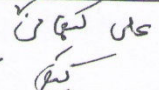


اردیبهشت ۱۳۸۹


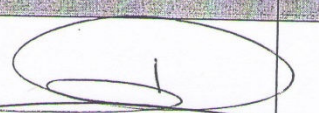
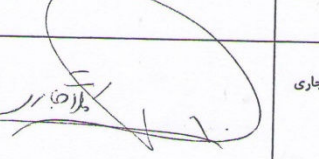
دانشگاه صنعتی شاهرود
 دانشکده: عمران و معماری
 گروه: سازه
 پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جواد محمدی
 تحت عنوان:

برآورد ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن‌های در معرض شرایط محیطی خلیج فارس به کمک شبکه عصبی - فازی

در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه

بسیار خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور:	امضاء	اساتید راهنما:
	نام و نام خانوادگی: دکتر محمد شکرچی زاده		نام و نام خانوادگی: دکتر علی کیهانی
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور:
	نام و نام خانوادگی: آقای مهندس محمدی		نام و نام خانوادگی: دکتر احمد احمدی
			نام و نام خانوادگی: دکتر وحیدرضا کلاتجاری
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند نگارش این پایان‌نامه به پایان رسیده است، وظیفه خود می‌دانم از زحمات همه افرادی که مرا یاری و راهنمایی نمودند تشکر و قدردانی نمایم. در ابتدا از استاد عزیز و گرامی جناب آقای دکتر علی کیهانی که با توصیه‌ها و راهنمایی‌های دلسوزانه خویش در مراحل سخت و دشوار این تحقیق، راهگشا و روشنایی بخش ادامه مسیر بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین مراتب سپاسگذاری خود را از استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد شکرچی‌زاده اعلام می‌دارم؛ بی‌شک راهنمایی این استاد بزرگوار، بسیار راهگشا و آموزنده و شاگردی این عزیز تجربه‌ای ارزشمند برای اینجانب بود.

همچنین از تمامی اعضاء انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب جواد محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "برآورد ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن‌های در معرض شرایط محیطی خلیج فارس به کمک شبکه عصبی- فازی" تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی به عنوان استاد راهنما متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام >> دانشگاه صنعتی شاهرود<< و یا >>shahrood university of technology<< به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۸۹، ۲، ۲۸
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

چکیده:

استفاده روزافزون از سازه‌های بتنی و عدم توجه مطلوب به مسأله پایایی آنها در محیط خلیج فارس باعث شده است که سازه‌های بتنی اجرا شده در سواحل خلیج فارس عمر مفید بسیار کمتری نسبت به عمر طراحی شده داشته باشند. یکی از دلایل عمر کم این سازه‌ها خوردگی آرماتور بوده و عامل اصلی در خوردگی آرماتور، نفوذ یون کلر می‌باشد. نفوذ یون کلر در بتن از مکانیزم‌های متعددی تبعیت میکند. یکی از مکانیزم‌های رایج و مهم، مکانیزم انتشار می‌باشد که به صورت قانون (معادله) دوم فیک بیان می‌شود. در این معادله ضریب انتشارپذیری، ضریب تعیین‌کننده می‌باشد. این ضریب به عواملی همچون نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس و مدت زمان قرارگیری در شرایط محیطی بستگی دارد. برای این منظور نمونه‌های بتنی ساخته و به مدت ۳۶ ماه در شرایط محیطی خلیج فارس، در شرایط رویارویی جزر و مد نگهداری شدند. مسأله مورد نظر در این تحقیق پردازش داده‌های بدست آمده و بررسی اثر آنها بر روی ضریب انتشارپذیری با استفاده از سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی می‌باشد.

در این تحقیق نشان داده شد که سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی می‌تواند تاثیر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس و مدت زمان قرارگیری در شرایط محیطی را در حیطه مشخصی از تغییرات این پارامترها بر روی ضریب انتشارپذیری بتن به خوبی فراگیرد. و در پایان از مجموعه قوانین و نتایج به دست آمده در بررسی اثر این پارامترها بر ضریب انتشارپذیری بتن استفاده گردید.

کلید واژه‌ها: ضریب انتشارپذیری بتن، سیستم عصبی- فازی، خلیج فارس، نسبت آب به مواد

سیمانی، درصد میکروسیلیس، مدت زمان قرارگیری

فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱-۱ هدف از تحقیق	۲
فصل دوم	۵
۱-۲ منطق فازی	۶
۱-۱-۲ مقدمه	۶
۲-۱-۲ مجموعه‌های فازی	۷
۳-۱-۲ متغیرهای زبانی، مقادیر، عبارات و برچسب‌های زبانی	۹
۴-۱-۲ عملگرهای منطقی	۱۰
۵-۱-۲ رابطه ایجاب، قوانین اگر-آنگاه	۱۱
۶-۱-۲ استدلال فازی	۱۳
۷-۱-۲ خارج کردن از حالت فازی	۱۷
۸-۱-۲ سیستم‌های استنباط فازی	۱۸
۲-۲ شبکه‌های عصبی	۲۱
۱-۲-۲ مقدمه	۲۱
۲-۲-۲ عملکرد شبکه‌های عصبی	۲۲

۲۳	..... مدل عصب ۳-۲-۲
۲۳	..... شبکه چند لایه‌ای از عصب‌ها ۴-۲-۲
۲۴	..... یادگیری و یافتن وزن‌های مناسب ۵-۲-۲
۲۵	..... سیستم‌های عصبی- فازی ۳-۲-۳
۲۵	..... مقدمه ۱-۳-۲
۲۵	..... ترکیب شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی ۲-۳-۲
۲۷	..... ساختار شبکه ANFIS ۳-۳-۲
۳۴	..... فصل سوم
۳۵	..... ۱- عوامل تخریب سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی ۱-۳
۳۵	..... ۱-۱-۳ عوامل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن
۳۸	..... ۲-۱-۳ موجودات دریایی
۳۸	..... ۳-۱-۳ دما و رطوبت نسبی
۴۰	..... ۴-۱-۳ باد
۴۰	..... ۵-۱-۳ موج
۴۱	..... ۶-۱-۳ فشار هیدرواستاتیک
۴۱	..... ۲-۳ محیط دریا- خیلج فارس مهاجم‌ترین محیط
۴۱	..... ۱-۲-۳ عوامل مخرب موجود در آب دریا

- ۴۳ ۲-۲-۳ دما و رطوبت نسبی
- ۴۵ ۳-۲-۳ باد
- ۴۶ ۳-۳ ساز و کارهای انتقال یون کلر به بتن
- ۴۷ ۱-۳-۳ انتشار یونی
- ۴۷ ۲-۳-۳ مکش مؤئینه
- ۴۷ ۳-۳-۳ نفوذ
- ۴۷ ۴-۳-۳ مهاجرت
- ۴۷ ۵-۳-۳ جذب
- ۴۷ ۶-۳-۳ انتقال ترکیبی
- ۴۹ ۴-۳ معادلات حاکم بر انتقال یون کلر
- ۴۹ ۱-۴-۳ تابع انتشار و تعریف ضریب انتشارپذیری
- ۵۱ ۲-۴-۳ حالت پایدار انتشار و بعد ضریب انتشارپذیری
- ۵۴ ۳-۴-۳ حالت انتشارپذیری ناپایدار
- ۵۶ ۵-۳ روش اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر یون کلر
- ۵۶ ۱-۵-۳ آزمایش AASHTO T259
- ۵۷ ۲-۵-۳ آزمایش NT Build 443
- ۵۸ ۳-۵-۳ آزمایش AASH TO T277

۶۰	نتیجه‌گیری ۴-۵-۳
۶۱	فصل چهارم
۶۲	مقدمه ۱-۴
۶۲	ساخت آزمون‌ها ۲-۴
۶۳	قرارگیری در محیط ۳-۴
۶۳	آماده‌سازی آزمون‌ها برای قرارگیری در محیط ۱-۳-۴
۶۳	قرارگیری در محیط ۲-۳-۴
۶۵	نمونه‌برداری از آزمون‌ها ۳-۳-۴
۶۶	پودرگیری از آزمون‌ها ۴-۳-۴
۶۷	تعیین میزان یون کلر در پودرهای تهیه شده ۴-۴
۶۹	محاسبه ضریب انتشارپذیری ۵-۴
۷۱	فصل پنجم
۷۲	مقدمه ۱-۵
۷۲	بررسی و پالایش داده‌ها ۲-۵
۷۳	نکات در نظر گرفته شده ۳-۵
۷۳	فرایند یادگیری و معتبرسازی ۱-۳-۵
۷۶	برآورد ضریب انتشارپذیری ۴-۵

۷۶..... ۱-۴-۵ مدل سوگنو درجه یک

۸۶..... ۲-۴-۵ مدل سوگنو درجه صفر

۱۰۴..... ۳-۴-۵ مدل پیشنهادی و بررسی آن

۱۰۹..... فصل ششم

۱۱۲..... مراجع

۱۱۶..... ضمیمه ۱- تصویرها

۱۲۲..... ضمیمه ۲- داده‌ها

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) اشکال مختلف تابع عضویت ۸
- شکل (۲-۲) تقسیم‌بندی مجموعه مرجع به چند تابع عضویت در حالت یک بعدی و دوبعدی. ۹
- شکل (۳-۲) بیان قیاس عمومی با تفسیر ممدانی و عملگر نرم ۱۴
- شکل (۴-۲) استدلال فازی با یک قانون دارای چند شرط ۱۵
- شکل (۵-۲) استدلال فازی با چند قانون و چند شرط برای هر قانون ۱۶
- شکل (۶-۲) سیستم استنباط فازی ممدانی با دو قانون برای ورودی‌های کریسپ و تابع \min برای عملگر and ۱۹
- شکل (۷-۲) سیستم استنباط فازی سوگنو با دو قانون برای ورودی‌های کریسپ ۲۱
- شکل (۸-۲) عملکرد شبکه‌های عصبی ۲۲
- شکل (۹-۲) یک نورون ساده ۲۳
- شکل (۱۰-۲) شبکه چند لایه از نورون‌ها ۲۴
- شکل (۱۱-۲) مکانیزم عملکرد مدل سوگنو درجه یک با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون فازی ۲۷
- شکل (۱۲-۲) ساختار سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی ۲۸
- شکل (۱-۳) دلایل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن ۳۵
- شکل (۲-۳) عوامل فیزیکی تخریب بتن ۳۶

- شکل (۳-۳) دلایل شیمیایی تخریب بتن ۳۷
- شکل (۴-۳) موقعیت‌های قرارگیری هر ناحیه سازه بتنی در معرض آب دریا ۳۹
- شکل (۵-۳) تغییرات دمای آب خلیج فارس طی گرمترین و سردترین ماه سال ۴۳
- شکل (۶-۳) تغییرات درصد رطوبت شهر بندر عباس طی خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌های سال ۴۵
- شکل (۷-۳) - تبخیر/ باران روزانه در منطقه خلیج فارس ۴۶
- شکل (۸-۳) شکل شماتیک انتشار یون‌های کلر در یک سیستم محلول خالص ۵۱
- شکل (۹-۳) انتشار یون‌های کلر در یک سیستم بتن - مایع ۵۲
- شکل (۱۰-۳) آزمایش AASHTO T259 ۵۷
- شکل (۱۱-۳) آزمایش AASHTO T259 ۵۸
- شکل (۱۲-۳) آزمایش AASHTO T277 ۵۹
- شکل (۱-۴) شمای آزمون‌های منشوری پس از اجرای پوشش ۶۳
- شکل (۲-۴) پروفیل‌گیری از آزمون‌های پایگاه بندرعباس ۶۷
- شکل (۳-۴) پروفیل یون کلر در بتن و عبور منحنی مربوط به قانون دوم فیک ۷۰
- شکل (۱-۵) خطای آزمون مدل ۱-۱-۴-۵ ۷۷
- شکل (۲-۵) توابع عضویت پارامترهای ورودی در مدل ۲-۱-۴-۵ ۷۸
- شکل (۳-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف

آب به مواد سیمانی و $SF=12.5\%$ ۷۹

شکل (۴-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری. ۸۰

شکل (۵-۵) توابع عضویت برای پارامترهای ورودی مدل ۳-۱-۴-۵ ۸۱

شکل (۶-۵) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به

مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه ۸۲

شکل (۷-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری برای

نمونه ۳۶ ماهه ۸۳

شکل (۸-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری ۸۴.

شکل (۹-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به

مواد سیمانی و $SF=0\%$ ۸۵

شکل (۱۰-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب

به مواد سیمانی و $SF=12.5\%$ ۸۵

شکل (۱۱-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و درصد میکروسیلیس با ضریب انتشارپذیری ۸۷

شکل (۱۲-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب

به مواد سیمانی و $SF=0\%$ ۸۸

شکل (۱۳-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب

به مواد سیمانی و $SF=12.5\%$ ۸۸

شکل (۱۴-۵) توابع عضویت برای پارامترهای ورودی در مدل ۴-۲-۴-۵ ۹۰

- شکل (۵-۱۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های
 قرارگیری مختلف و $SF=0\%$ ۹۱
- شکل (۵-۱۶) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های
 قرارگیری مختلف و $SF=7.5\%$ ۹۲
- شکل (۵-۱۷) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های
 قرارگیری مختلف و $SF=12.5\%$ ۹۲
- شکل (۵-۱۸) رابطه درصد میکروسلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی برای نمونه ۳ ماهه ۹۳
- شکل (۵-۱۹) رابطه درصد میکروسلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی برای نمونه ۹ ماهه ۹۳
- شکل (۵-۲۰) رابطه درصد میکروسلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی برای نمونه ۳ ساله ۹۴
- شکل (۵-۲۱) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی و $SF=0\%$ ۹۴
- شکل (۵-۲۲) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی و $SF=7.5\%$ ۹۵
- شکل (۵-۲۳) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به
 مواد سیمانی و $SF=12.5\%$ ۹۵
- شکل (۵-۲۴) توابع عضویت برای پارامترهای ورودی در مدل ۵-۴-۲-۳ ۹۷

- شکل (۲۵-۵) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه..... ۹۸
- شکل (۲۶-۵) توابع عضویت برای پارامترهای ورودی در مدل ۴-۲-۴-۵..... ۹۹
- شکل (۲۷-۵) رابطه بین نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های قرارگیری مختلف و $SF=0$ ۱۰۱
- شکل (۲۸-۵) توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی برای مدل ۵-۲-۴-۵..... ۱۰۲
- شکل (۲۹-۵) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه..... ۱۰۴
- شکل (۳۰-۵) مقایسه مقادیر ضریب انتشارپذیری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مدل ۲-۲-۴-۵..... ۱۰۵
- شکل (۳۱-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری..... ۱۰۶
- شکل (۳۲-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری..... ۱۰۷
- شکل (۳۳-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری..... ۱۰۸

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) الگوریتم آموزش ترکیبی در مدل ANFIS ۳۳
- جدول (۱-۳) تجزیه شیمیایی آب خلیج فارس در مقایسه با سایر دریاها (میلیگرم در لیتر) ... ۴۲
- جدول (۲-۳) دمای هوا در شهر بندر عباس ۴۴
- جدول (۳-۳) نفوذپذیری یون کلر در بتن مطابق با استاندارد ASTM C1202 ۵۹
- جدول (۱-۵) اطلاعات مدل ۱-۱-۴-۵ ۷۶
- جدول (۲-۵) اطلاعات مدل ۲-۱-۴-۵ ۷۷
- جدول (۳-۵) خطاها برای مدل ۲-۱-۴-۵ ۷۹
- جدول (۴-۵) اطلاعات مدل ۳-۱-۴-۵ ۸۰
- جدول (۵-۵) خطاها برای مدل ۳-۱-۴-۵ ۸۱
- جدول (۶-۵) اطلاعات مدل ۴-۱-۴-۵ ۸۳
- جدول (۷-۵) خطاهای مدل ۴-۱-۴-۵ ۸۴
- جدول (۸-۵) اطلاعات مدل ۱-۲-۴-۵ ۸۶
- جدول (۹-۵) خطاهای مدل ۱-۲-۴-۵ ۸۷
- جدول (۱۰-۵) اطلاعات مدل ۲-۲-۴-۵ ۸۹
- جدول (۱۱-۵) خطاها برای مدل ۲-۲-۴-۵ ۸۹

جدول (۱۲-۵) اطلاعات مدل در حالت ۳-۲-۴-۵..... ۹۶

جدول (۱۳-۵) خطاها برای مدل ۳-۲-۴-۵..... ۹۶

جدول (۱۴-۵) اطلاعات مدل ۴-۲-۴-۵..... ۹۹

جدول (۱۵-۵) خطاها برای مدل ۴-۲-۴-۵..... ۱۰۰

جدول (۱۶-۵) اطلاعات مدل ۵-۲-۴-۵..... ۱۰۱

جدول (۱۷-۵) خطاها برای مدل ۵-۲-۴-۵..... ۱۰۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱ هدف از تحقیق

بتن به عنوان یکی از مصالح بالنسبه ارزان و پایا در محیطهای دریایی می باشد که می توان با قالب بندی، آن را به هر شکل هندسی مورد نظر در آورد. اما در بعضی موارد به دلایل طراحی ضعیف، ضعف در اجرا، کیفیت نامرغوب مصالح و شرایط محیطی لحاظ نشده در طراحی و یا ترکیبی از این عوامل سازه بتن آرمه ساخته شده، کارآیی مورد نظر را در دوره عمر مفید خود نخواهد داشت. در سالهای اخیر تعداد زیادی از سازه های بتنی در مناطق دریایی کشورهای مختلف دنیا در اثر این عوامل دچار آسیب دیدگی و یا خرابی زودرس شده اند. خوردگی آرماتورها در بتن از جمله رایج ترین این خرابی ها در سازه های بتن آرمه بوده و یکی از مهم ترین مشکلاتی است که مهندسان عمران امروزه در نگهداری سازه های بتن آرمه با آن مواجه می باشند. در گزارشی که در سال ۱۹۹۱ در مرکز تحقیقات حمل و نقل آمریکا تهیه گردیده است، هزینه تعمیر سالانه عرشه پل های خورده شده در برابر نمکهای یخ زدا ۵۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار و نیز ۱۰۰ میلیون دلار برای تعمیر دیگر اجزای سازه های آن تخمین زده شده است. در انگلستان نیز خسارات ناشی از خوردگی پل های بتن آرمه راه ها ۶۱۵/۵ میلیون پوند می باشد. لازم به توضیح است که این خسارات فقط مربوط به ۱۰ درصد از پل های آن کشور می باشد. آمارها در دیگر نقاط دنیا مانند اروپا، آسیا و استرالیا نیز نتایج مشابهی را بیان می نمایند.

در خاورمیانه نیز شرایط گرم آب و هوایی دریا و وجود نمک در آب های زیرزمینی مشکل خوردگی را افزایش داده است، بطوریکه ضعف در عمل آوری بتن باعث کم شدن عمر مفید این سازه ها شده است. در سواحل جنوبی کشور نیز مشکلات موجود در دستیابی بتن با پایایی مناسب و در نتیجه خرابی های ناشی از خوردگی میلگردها، سالیانه خسارات مالی زیادی را برای کشور در بر دارد. بنابراین با توجه به اینکه مساله عدم پایایی بتن در محیط های خورنده یکی از مشکلات اساسی

در دنیا بوده و خوردگی میلگردها ناشی از نفوذ یون کلر از عوامل مهم تاثیر گذار بر پایداری آن می باشد، در سال های اخیر مطالعاتی گسترده برای حل مشکلات ناشی از آن انجام شده است و این در حالی است که در کشور ما با وجود دارا بودن خورنده ترین محیط دریایی در دنیا، تحقیقات جامعی در این خصوص صورت نگرفته است.

برای حل این معضل علاوه بر بررسی روش های جلوگیری از آسیب دیدگی بتن باید به دنبال روش هایی بود که با استفاده از آن بتوان عمر مفید سازه های در حال ساخت و سازه های موجود را با توجه به مشخصات مصالح بکاررفته و شرایط محیطی، تعیین نمود تا از میان روش های موجود بهترین و اقتصادی ترین راه حل را برای جلوگیری از تخریب زودرس سازه ها، انتخاب نمود.

از جمله روش های پیش بینی عمر مفید سازه ها در دنیا، جمع آوری نتایج حاصل از آزمایش ها و اطلاعات سازه های موجود برای ارائه مدلی است که استفاده از آن برای دست اندرکاران امر ساخت و ساز ویژگی ها و مزایای زیر را به همراه خواهد داشت :

۱ - کم هزینه بودن

۲ - عدم نیاز به آزمایش های دراز مدت و متعدد

۳ - قابلیت انعطاف برای استفاده در هر نوع سازه بتنی

۴ - سهولت کاربرد

۵ - برخورداری از دقت مناسب

در کشور ما نیز میتوان با جمع آوری اطلاعات موجود و انجام آزمایش های تکمیلی، این مدل را به صورت نرم افزاری ارائه نمود که به وسیله آن بتوان با سهولت کافی و دقت مناسب عمر مفید سازه مورد نظر را برآورد نمود.

برای نیل به این مقصود، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران در انجام رسالت علمی خویشتن و در راستای کمک به حل معضل پایایی بتن در محیط خلیج فارس، با پشتیبانی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور و نیز مساعدت‌های شرکت نورد بندرعباس (بارکو) اولین گام‌های اساسی (علمی - کاربردی) را در برنامه تحقیقاتی خویش قرارداد و با تعریف چندین پایان نامه کارشناسی ارشد عمران بر روی پارامترهای مهم تاثیر گذار بر روی نرخ نفوذ یون کلر در محیط خلیج فارس کار خود را آغاز نموده است.

پایان نامه حاضر نیز که به برآورد ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن‌های مجاور خلیج فارس به کمک روش عصبی-فازی، می پردازد، در راستای این پروژه بوده و نتایج آن در قالب ” مدل نرم افزاری پیش بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در سواحل خلیج فارس و دریای عمان در معرض تهاجم یون کلر“ بکار گرفته خواهد شد.

امید است که با انجام این پروژه اولین گام‌های اساسی در این زمینه برداشته شود و معضل پایایی بتن در سواحل جنوبی کشور در آینده مرتفع گردد. ان شاء...

فصل دوم

اصول عصبی - فازی

۱-۲ منطق فازی

۱-۱-۲ مقدمه

در ریاضیات کلاسیک، به یک گروه معین از اشیاء مجموعه گفته می‌شود. به عبارت دیگر هر مجموعه با یک ویژگی مشخص و معین تعریف می‌گردد بطوریکه اگر یک شیء مفروض دارای آن ویژگی باشد، عضو آن مجموعه بوده و اگر نباشد، عضو آن مجموعه نخواهد بود. بعنوان مثال اگر مجموعه مرجع U ، مجموعه اعداد حقیقی و P ویژگی "بزرگتر از ده بودن" فرض شوند، آنگاه P یک ویژگی معین می‌باشد که یک مجموعه مثل A با آن متناظر می‌شود. زیرا برای هر عدد حقیقی به قاطعیت می‌توان گفت که آیا آن عدد از ده بزرگتر است یا خیر. حال فرض کنید که در مجموعه اعداد حقیقی، P ویژگی "بزرگ" باشد از آنجا که بزرگ بودن اعداد بسته به نظر افراد مختلف متفاوت می‌باشد لذا P یک ویژگی نامشخص و مبهم خواهد بود. به عبارت دیگر عضویت و یا عدم عضویت اعداد مختلف در یک مجموعه با ویژگی "بزرگ بودن" قطعی نخواهد بود. به عنوان مثال، اینکه ۱۰۰ عددی بزرگ است و یا عضو مجموعه اعداد حقیقی بزرگ است یا خیر، مشخص نمی‌باشد. همچنین در زندگی روزمره و نیز در شاخه‌های مختلف علم، مفاهیم و ویژگی‌های مشابهی وجود دارد که هیچکدام از آنها معلوم نبوده و نمی‌توان مجموعه‌های دقیقی برای هر کدام از آنها تعریف کرد. نظریه مجموعه‌های فازی یک قالب جدید ریاضی برای صورتبندی و تجزیه و تحلیل این مفاهیم و ویژگی‌ها می‌باشد و در واقع تعمیمی از نظریه مجموعه‌های کلاسیک و سازگار با زبان و فهم طبیعی انسانها می‌باشد.

نظریه مجموعه‌های فازی^۱ به وسیله پروفیسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ در مقاله "مجموعه‌های فازی" معرفی گردید. نظریه اولیه وی در سال ۱۹۶۳ بصورت زیر ارائه گردید: "ما اساساً به یک نوع

^۱ Fuzzy Sets

جدیدی از ریاضیات نیازمندیم، ریاضیات مقادیر مبهم یا فازی که توسط توزیع‌های احتمالات قابل توصیف نیستند". هر چند در همان ابتدا نظریه وی با مخالفت شدید ریاضیدانان مواجه شد، که معتقد بودند تئوری احتمالات برای حل مسائل مورد نظر تئوری فازی کفایت می‌کند، ولیکن در نهایت در اواخر سال ۱۹۷۰ تئوری فازی بطور کاملتر شکل گرفت و با معرفی مفاهیم جدید، تصویر تئوری فازی بعنوان یک زمینه جدید در مباحث ریاضی، هر چه بیشتر شفاف گردید. نکته حائز اهمیت اینجاست که نظریه فازی را نباید با نظریه آمار و احتمالات یکی دانست. احتمالات فقط نظریه جدیدی را روی نظریه سیاه و سفید و حالت دو مقداری دارد ولی تصویر سیاه و سفید جهان را تغییر نمی‌دهد و قاعده درست یا غلط منطق ارسطویی همواره در احتمالات برقرار است. در عمل دانشمندان، خاکستری(فازی) را با سیاه و سفید تقریب می‌زنند و سپس قوانین احتمالات را در مورد آن‌ها بکار می‌برند. بارت کاسکو در کتاب تفکر فازی خود جمله زیبایی را در این مورد آورده است: "جهان خاکستری است و علم سیاه و سفید. ما درباره صفر و یک‌ها صحبت می‌کنیم اما حقیقت چیز دیگری است". تئوری سیستم‌ها و مجموعه‌های فازی ابزار موثری را در پرداختن به عدم قطعیت ادراکی فراهم می‌کند. [۱]

۲-۱-۲ مجموعه‌های فازی

مجموعه فازی A در مجموعه مرجع بدین ترتیب تعریف می‌شود: [۲]

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad \mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (1-2)$$

مثلا اگر $X = \{36,37,38,39,40,41,42\}$ باشد، مجموعه فازی A مثلا می‌تواند به ترتیب زیر

تعریف شود:

$$A = \{(36,0), (37,0), (38,0.33), (39,0.66), (40,1), (41,1), (42,1)\} \quad (2-2)$$

همچنین A را می‌توان به صورت زیر نیز تعریف کرد:

$$A = 0/36 + 0/37 + 0.33/38 + 0.66/39 + 1/40 + 1/41 + 1/42 \quad (3-2)$$

اگر X را در بازه $[36,42]$ پیوسته در نظر بگیریم در این صورت مجموعه فازی B ، را می توان اینگونه نیز تعریف کنیم.

$$B = \{(x, \mu_B(x)) \mid x \in X\} \quad (4-2)$$

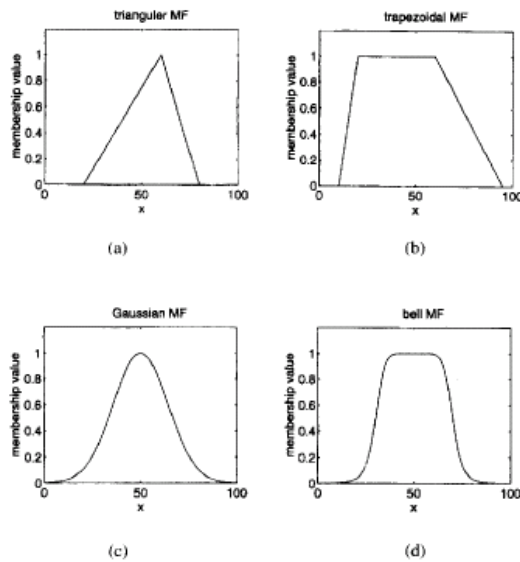
$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0 & x < 37 \\ \frac{x-37}{3} & 37 \leq x \leq 40 \\ 1 & 40 < x \end{cases} \quad (5-2)$$

همچنین این مجموعه فازی را به این شکل نیز می توان نشان داد:

$$B = \int_x \mu_B(x_i) / x_i \quad (6-2)$$

که علامت انتگرال نشانه تمامی نقاط $x \in X$ می باشد. توابع عضویت را می توان به کمک هر نوع

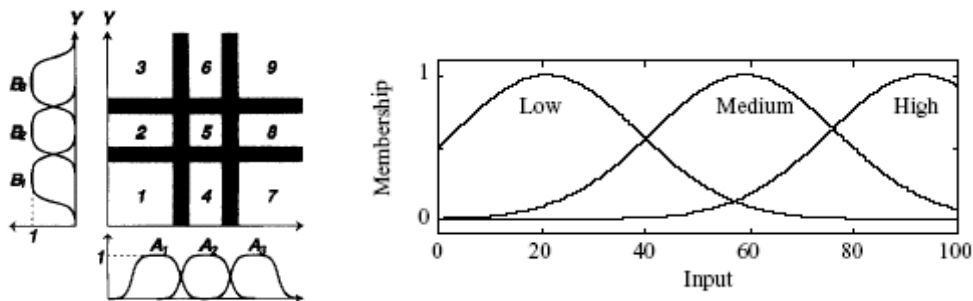
تابعی بیان کرد (شکل ۱-۲).



شکل (۱-۲) اشکال مختلف تابع عضویت

۳-۱-۲ متغیرهای زبانی، مقادیر، عبارات و برچسب‌های زبانی

چنانچه یک متغیر بجای مقادیر حقیقی بتواند یک مقدار زبانی را اختیار کند به آن متغیر زبانی می‌گوییم. مثلا "سن" را می‌توان به صورت یک متغیر زبانی بیان کرد، بطوریکه بجای اختیار کردن یک عدد مثل $age=20$ بتواند یک عبارت زبانی را به عنوان مقدار اختیار کند؛ مثلا "age is young". به عبارت دیگر اگر مجموعه مرجع، بازه پیوسته‌ای از اعداد حقیقی باشد، می‌توانیم آنرا به چند مجموعه فازی افراز کنیم؛ بطوریکه آنرا کمابیش به طور یکنواخت ببوشاند (شکل ۲-۲). به این مجموعه‌های فازی می‌توان صفات مورد استفاده در زبان، مانند "بزرگ" و "کوچک" و مانند این‌ها را نسبت داد. به این ترتیب مجموعه مرجع X را متغیر زبانی^۱، زیر مجموعه‌های فازی آن را مقادیر زبانی یا عبارت زبانی^۲ و چنانچه تعداد آنها معین و محدود باشد برچسب‌های زبانی^۳ می‌نامیم. [۲]



شکل (۲-۲) تقسیم بندی مجموعه مرجع به چند تابع عضویت در حالت یک بعدی و دوبعدی

¹ -Linguistic variable

² -Linguistic terms

³ -Linguistic labels

۴-۱-۲ عملگرهای منطقی

بر روی مجموعه‌های فازی و یا گزاره‌های فازی معادل آن، می‌توان عملگرهایی مشابه ریاضیات کلاسیک تعریف کرد. اما در این زمینه دانشمندان مختلف توابع متفاوتی برای عملگرهای "and" و "or" و یا معادل‌های مجموعه‌ای آنها "اشتراک"^۱ و "اجتماع"^۲ پیشنهاد کرده‌اند. در اینجا ما تنها به دو مورد از مشهورترین آنها که زوج عملگرهای منطقی^۳ و احتمالاتی^۴ باشند، اشاره می‌کنیم. به عملگر "and" (یا اشتراک) در حالت کلی نرم t و به عملگر "or" (یا اجتماع) زوج نرم t می‌گوییم و آنها را با S و T نمایش می‌دهیم [۳ و ۱].

اگر دو مجموعه فازی A و B داشته باشیم بطوریکه:

$$\mu_B(x) = b \quad \text{و} \quad \mu_A(x) = a \quad (۷-۲)$$

نرم منطقی:

$$\mu_{A \cap B}(x) \equiv \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(a, b) = T_L(a, b) \quad (۸-۲)$$

زوج نرم منطقی:

$$\mu_{A \cup B}(x) \equiv \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(a, b) = S_L(a, b) \quad (۹-۲)$$

نرم احتمالاتی:

$$\mu_{A \cap B}(x) \equiv \mu_A(x) \times \mu_B(x) = a \times b = T_P(a, b) \quad (۱۰-۲)$$

^۱ - Intersection

^۲ - Union

^۳ -Logical

^۴ -Probabilistic

زوج نرم احتمالاتی:

$$\mu_{A \cup B}(x) \equiv \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) = a + b - a \times b = S_p(a, b) \quad (11-2)$$

برای تکمیل عملگرها ما به عملگری به عنوان نقیض^۱ یک گزاره و یا متمم^۲ یک مجموعه نیاز داریم. اگر فرض کنیم که مجموعه \bar{A} متمم مجموعه A باشد.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) = 1 - a \quad (12-2)$$

در بیان دیگر می توان گفت که $\mu_{\bar{A}}$ درجه درستی نقیض گزاره "x is A" را به ازای هر $x \in X$ بیان می کند.

دقت می کنیم که اگر مقادیر تابع عضویت را در حالت متعارف (صفر و یک) در نظر بگیریم هر دوی این عملگرها به عملگرهای \wedge و \vee در جبر گزاره ها تبدیل می شوند. از لحاظ تئوریک بهتر آنست که وقتی از یک عملگر "and" استفاده می کنیم، برای عملگر "or" نیز از زوج عملگر آن بهره ببریم، اما به علت مشکلات محاسباتی در استفاده از عملگر احتمالاتی در بعضی سیستم ها از "or" منطقی در کنار "and" احتمالاتی استفاده می کنند. همچنین در اکثریت سیستم ها به عنوان عملگر نقیض از (12-2) استفاده می شود، هر چند که عملگرهای دیگری نیز برای این منظور تعریف شده است.

۵-۱-۲ رابطه ایجاب، قوانین اگر-آنگاه

قانون اگر و آنگاه فازی^۳ که به اسامی دیگری چون قانون فازی^۴ و قانون زبانی نیز شناخته

¹ Negative

² Complement

³ if-then rule

⁴ fuzzy rule

می‌شود، به طور عام به این شکل است :

$$\text{If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \quad (13-2)$$

که در آن A و B عبارات زبانی تعریف شده توسط مجموعه‌های فازی A و B به ترتیب در مجموعه های مرجع X و Y می‌باشند. معمولاً به "x is A" فرض و به "y is B" حکم می‌گوییم و به طور خلاصه این قانون را به صورت $A \rightarrow B$ نیز نشان می‌دهیم.

برای رابطه ایجاب یا قانون فازی دو تفسیر مختلف وجود دارد که از هر کدام از این تفاسیر تعاریف مختلفی برای توصیف آن نتیجه می‌شود. ما به دو مورد از آنها اشاره خواهیم کرد. اگر $R = A \rightarrow B$ باشد:

(پیشنهاد شده توسط ممدانی)

$$R_m = A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) / (x, y) \quad (14-2)$$

(پیشنهاد شده توسط لارسن)

$$R_p = A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \times \mu_B(x) / (x, y) \quad (15-2)$$

اگر عملگر "and" را در حالت کلی با * نشان دهیم، دو تعریف فوق به حالت زیر خلاصه می‌شوند [۴]:

$$R_p = \int_{X \times Y} \mu_R(x) f(x, y) \quad (16-2)$$

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (17-2)$$

۲-۱-۶ استدلال فازی

قانون اصلی استدلال در منطق کلاسیک دو مقداره قانون قیاس^۱ نامیده می‌شود و بدین صورت

بیان می‌شود:

If x is A then y is B

X is A

y is B

بطور مثال اگر یک قانون ساده را در نظر بگیریم که: "اگر گوجه فرنگی قرمز است، آنگاه گوجه فرنگی رسیده است." و "گوجه فرنگی قرمز است" گزاره درستی باشد، آنگاه "گوجه فرنگی رسیده است" نیز صحیح خواهد بود. اما عملاً بیشتر ما از استدلال‌هایی تقریبی استفاده می‌کنیم؛ مثلاً اگر همان قانون بالا را داشته باشیم و بدانیم که گوجه فرنگی کمابیش قرمز است "آنگاه نتیجه خواهیم گرفت که: "گوجه فرنگی کمابیش رسیده است" این استدلال را می‌توانیم به ترتیب زیر بیان کنیم:

If x is A then y is B

X is A'

y is B'

که در آن A' و A مجموعه‌های فازی در مجموعه مرجع X ، و B' و B مجموعه‌های فازی در مجموعه مرجع Y هستند. این روند استنباط را و یا قیاس تعمیمی یافته^۲ می‌نامیم. اگر $A \rightarrow B$ را به صورت رابطه فازی R در $X \times Y$ نظر بگیریم در آن صورت تابع عضویت مجموعه فازی B' که بیانگر نتیجه استدلال است به صورت زیر بدست می‌آید.

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B) = A' \circ R \Rightarrow \mu_{B'}(y) = S_x[T(\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y))] \quad (18-2)$$

¹ - Modus Ponens

² -Generalized Modus Ponens

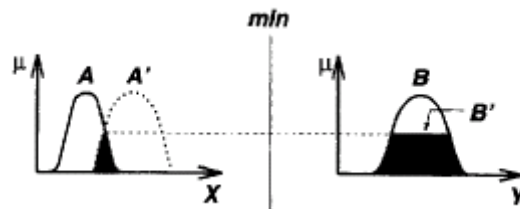
که بسته به این که از چه نرم t استفاده کنیم به ترکیب max-min و یا max-product تبدیل می شود، زیرا همانطور که در قبل گفته شد، معمولاً از تابع max به عنوان زوج نرم t استفاده می شود. ابتدا حالت های مختلف استنباط را با توجه به مدل ممدانی^۱ توضیح می دهیم و سپس به مدل سوگنو خواهیم پرداخت.

۱-۶-۱-۲ قیاس تعمیم یافته برای یک قانون با یک شرط

ساده ترین مدل استدلال این است که ما یک قانون که دارای یک شرط نیست داشته باشیم در این صورت چنانچه فرض کنیم عملگر * که یک نرم t می باشد، نمایانگر عملگر نرم t (عملگر and) باشد و از \vee (or منطقی یا max) برای زوج نرم t استفاده کنیم:

$$\mu_{B'}(y) = [\vee_x (\mu_{A'}(x) * \mu_A(x))] * \mu_B(y) = w * \mu_B(y) \quad (۱۹-۲)$$

همان طور که در بالا می بینیم w به نوعی بیشترین درجه شباهت A و A' می باشد. در شکل (۳-۲) این روند با فرض عملگر min بجای * نشان داده شده است. عملگر * تابع عضویت حکم را بر اساس درجه سازگاری تعدیل می کند [۴].



شکل (۳-۲) بیان قیاس عمومی با تفسیر ممدانی و عملگر نرم

۱-۶-۱-۲ قیاس تعمیم یافته برای یک قانون با چند شرط

شکل کلی این استدلال بدین ترتیب است:

^۱ -Mamdani

قانون If x is A and y is B then z is C

فرض x is A' and y is B'

حکم: z is C'

C' را می توان به صورت زیر نوشت:

$$C' = (A' \times B') \circ (A \times B \rightarrow C) \quad (20-2)$$

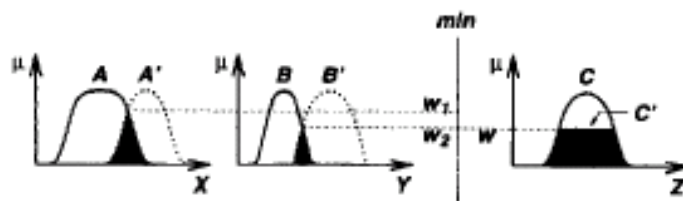
و از آنجا نتیجه می شود که:

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) &= \vee_{x,y} [\mu_{A'}(x) * \mu_{B'}(y)] * [\mu_A(x) * \mu_B(y) * \mu_C(z)] \\ &= \vee_{x,y} [\mu_{A'}(x) * \mu_{B'}(y) * \mu_A(x) * \mu_B(y)] * \mu_C(z) \\ &= \{\vee_y [\mu_{A'}(x) * \mu_A(x)]\} * \{\vee_x [\mu_{B'}(y) * \mu_B(y)]\} * \mu_C(z) \\ &= (w_1 * w_2) * \mu_C(z) \end{aligned} \quad (21-2)$$

w_1 و w_2 به ترتیب ماکزیمم درجه سازگاری^۱ بین A و A' و B و B' نامیده می شوند. $w_1 * w_2$

قدرت آتش^۲ قانون فازی و یا درجه تحقق^۳ آن نامیده می شود. شکل (۲-۴) این استدلال را نمایش

می دهد [۴].



شکل (۲-۴) استدلال فازی با یک قانون دارای چند شرط

¹ -Degree of compatibility

² -Firing strength

³ -Degree of fulfillment

۲-۶-۱-۲ قیاس تعمیم یافته برای چند قانون با چندین شرط

اثر چندین قانون معمولاً به صورت اجتماعی از روابط فازی بیان‌کننده قوانین فازی می‌باشد. بنابراین اگر قیاسی تعمیم یافته به شکل زیر داشته باشیم:

قانون ۱: *if x is A_1 and y is B_1 then z is C_1*

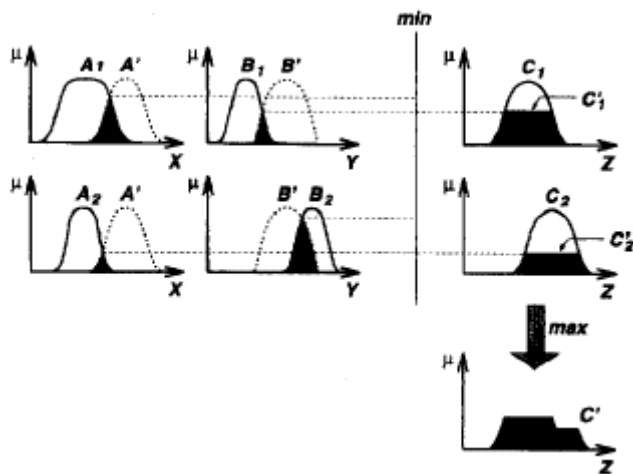
قانون ۲: *if x is A_2 and y is B_2 then z is C_2*

حقیقت: *x is A' and y is B'*

می‌توانیم با فرض $R_1 = A_1 \times B_1 \rightarrow C_1$ و $R_2 = A_2 \times B_2 \rightarrow C_2$ ، C' را بدست آوریم:

$$C' = (A' \times B') \circ (R_1 \cup R_2) = [(A' \times B') \circ R_1] \cup [(A' \times B') \circ R_2] = C'_1 \cup C'_2 \quad (۲۲-۱)$$

C'_1 و C'_2 مجموعه‌های فازی استنباط شده از قوانین ۱ و ۲ می‌باشد. این حالت کلی استدلال با بکارگیری عملگرهای and و or منطقی (max, min) در شکل (۵-۲) نشان داده شده است [۴].



شکل (۵-۲) استدلال فازی با چند قانون و چند شرط برای هر قانون

بطور خلاصه روند استدلال فازی را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد.

درجه سازگاری: مقایسه حقایق موجود با فرض‌های قوانین برای یافتن درجه سازگاری بین

حقایق و فرضیات قوانین.

درجه تحقق: ترکیب درجات سازگاری به کمک عملگرهای and یا or فازی برای تعیین درجه تحقق، به معنی اینکه تا چه اندازه فرض قانون ارضا شده است.

توابع عضویت تعدیل شده احکام: با اعمال درجه تحقق (و وزن قانون در صورت وجود) بر تابع عضویت حکم یک قانون، تابع عضویت تعدیل شده حکم^۱ بدست می‌آید.

تابع عضویت خروجی مرکب: توابع عضویت تعدیل شده با هم جمع می‌شوند تا تابع عضویت خروجی مرکب^۲ بدست آید.

۲-۱-۷ خارج کردن از حالت فازی^۳

اما با این تابع عضویت خروجی مرکب که در اثر چند قانون بدست آمده است چه می‌توان کرد؟ در بسیاری از موارد با وجود عدم قطعیت‌های موجود احتیاج داریم که بتوانیم مقداری قطعی (کریسپ) بعنوان یک نماینده از مجموعه فازی نتیجه شده، بدست آوریم. این عمل، خارج کردن از حالت فازی نامیده می‌شود و روش‌های مختلفی برای آن پیشنهاد شده است. در اینجا ما به دو مورد از معروف‌ترین این روش‌ها اشاره می‌کنیم [۵].

۲-۱-۷-۱ روش مرکز سطح (CoA)

در این روش مرکز سطح تابع عضویت مرکب خروجی بیانگر مقدار کریسپ استخراج شده از این مجموعه فازی است. اگر Z متغیر زبانی خروجی با تابع عضویت مرکب $\mu_C(Z)$ باشد، آنگاه مقدار خارج شده از حالت فازی برابر خواهد بود با:

^۱ -Qualified consequent membership function

^۲ -Overall output membership function

^۳ - Defuzzification

$$Z_{COA} = \frac{\int_C \mu_{C'}(z) z dz}{\int_C \mu_{C'}(z) dz} \quad (23-1)$$

این روش هر چند متداول‌ترین و در عین حال قدیمی‌ترین روش در این زمینه است، اما دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشد. اولین نقطه ضعف آن صرف زمان و تلاش بیشتر در محاسبات می‌باشد. همچنین در مواردی نیز روش CoA نامعقول به نظر می‌آید.

۲-۱-۷-۲ روش مرکز ماکزیممها^۱

در این روش خروجی کریسپ برابر میانگین وزن دار هسته‌های توابع عضویت خروجی (احکام) می‌باشد که درجات تحقق هر حکم وزن آن در میانگین‌گیری به حساب می‌آید. این روش از لحاظ محاسباتی بسیار کارآمدتر از روش COA می‌باشد و تا حدود زیادی مشکل تاثیر شدید شکل تابع عضویت خروجی را در اثر خارج شدن از حالت فازی مرتفع می‌سازد، اما با حذف کامل اثر شکل تابع عضویت می‌توان در مواردی آنرا نامعقول نیز دانست. به نظر می‌آید چنانچه روشی پیدا شود که از لحاظ تاثیر شکل تابعی عضویت بر نتیجه، بینابین این دو روش باشد ایده‌آل خواهد بود. حسن دیگر روش COM آن است که سیستم ممدانی را معادل به مدل سوگنو درجه صفر می‌سازد و لذا به راحتی می‌توان قوانین را از یکی به دیگری منتقل کرد.

۲-۱-۸ سیستم‌های استنباط فازی^۲

ایده اصلی این سیستم‌ها همان ایده استدلال تقریبی فازی است که در قبل آنرا توضیح دادیم و

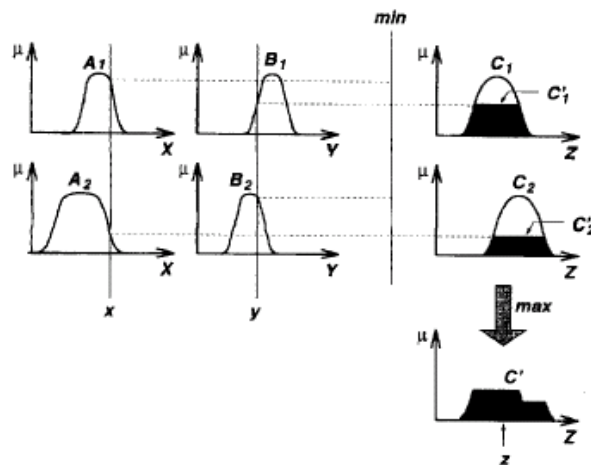
¹ -Center of Maxima

² -Fuzzy inference systems

به نام‌هایی چون سیستم بر پایه قوانین فازی^۱، سیستم خبره فازی^۲ و بطور خلاصه سیستم فازی نیز خوانده می‌شود. از لحاظ تئوریک ورودی این سیستم‌ها می‌تواند فازی با کریسپ باشد اما از آنجایی که دادن ورودی فازی ساده نیست در بیشتر نرم‌افزارهای متداول، ورودی به صورت عدد کریسپ می‌باشد. حالت خاصی از مجموعه فازی (مجموعه فازی یکتا) است. خروجی سیستم فازی معمولا بصورت فازی است اما همانطور که دیدیم به کمک روش‌هایی می‌توان در صورت نیاز، خروجی را از حالت فازی خارج کرد. ما به دو مدل از مشهورترین این سیستم‌ها، که مدل ممدانی و مدل سوگنو باشند، اشاره خواهیم کرد.

۲-۱-۸-۱ سیستم استنباط فازی ممدانی

این سیستم تقریبا معادل آنچه در مبحث استدلال فازی با چندین قانون و چند فرض برای هر قانون گفته شد، می‌باشد جز اینکه الگوهای ورودی (مثلا A' و B')، بجای یک مجموعه فازی عادی، یک مجموعه فازی یکتا و یا به عبارت دیگر عدد کریسپ می‌باشند [۴].



شکل (۲-۶) سیستم استنباط فازی ممدانی با دو قانون برای ورودی‌های کریسپ و تابع \min برای عملگر and

¹ -Fuzzy-rule-based system

² -Fuzzy expert system

این سیستم استنباط را برای اولین بار ابراهیم ممدانی برای کنترل یک موتور بخار بکار برد و از توابع \max و \min به ترتیب برای عملگرهای or و and استفاده کرد. شکل (۲-۶) یک سیستم استنباط فازی ممدانی را با دو قانون و تحت تاثیر تغییر دو متغیر کریسپ X و Y نشان می‌دهد.

۲-۸-۱-۲ سیستم فازی سوگنو

این سیستم که توسط تاکاگی^۱، سوگنو^۲ و کانگ^۳ ارائه شد در حالت عمومی به شکل زیر می‌باشد:

$$\text{if } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n \text{ then } z = f(x_1, \dots, x_n) \quad (۲۴-۱)$$

می‌بینیم که فرض قانون متشکل از مجموعه‌های فازی A_1 تا A_n است که توسط عملگرهای منطقی به هم مرتبط شده‌اند در حالیکه حکم آن یک تابع عادی می‌باشد. تابع f می‌تواند هر تابعی قرار داده شود هر چند که معمولا توابع چند جمله‌ای برای این منظور به کار می‌روند. یکی از حالت‌های خاص مدل سوگنو که اصطلاحاً مدل سوگنو درجه صفر^۴ نامیده می‌شود، وقتی است که تابع f یک عدد ثابت باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که مجموعه فازی حکم یک یکتای فازی یا یک عدد کریسپ را دارا می‌باشد. در این حالت برای استخراج نتیجه اثر چند قانون، میانگین وزن دار مقادیر کریسپ احکام را که وزن‌ها همان درجات تحقق فرض‌ها می‌باشند، بدست می‌آوریم. همانطور که در قبل دیدیم اگر در مدل ممدانی از روش CoM برای در آوردن از حالت فازی استفاده کنیم مشابه روش سوگنو خواهد شد. در مدل سوگنو درجه صفر در صورتیکه توابع عضویت ورودی همپوشانی

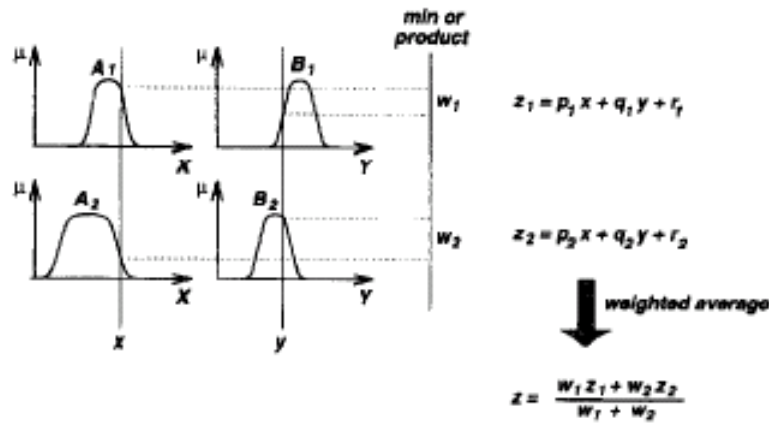
¹ -Takagi

² -Sugeno

³ -Kang

⁴ -Zero-order

کافی داشته باشند تابع خروجی هموار^۱ خواهد بود (شکل ۷-۲).



شکل (۷-۲) سیستم استنباط فازی سوگنو با دو قانون برای ورودی‌های کریسپ

۲-۲ شبکه‌های عصبی

۱-۲-۲ مقدمه

شبکه عصبی از زمره مدل‌های پیوندگرا می‌باشند، سیستم‌هایی هستند که در آنها تلاش شده است از اصول سازماندهی شناخته شده و یا مورد انتظار از مغز انسان، استفاده شود. شبکه‌های عصبی از تعدادی پردازشگر ساده و مستقل به نام نورون تشکیل شده است و این نورون‌ها با یکدیگر از طریق ارتباطاتی وزن‌دار که به آنها وزن‌های سیناپسی گفته می‌شود تبادل اطلاعات می‌کنند. تحقیقات بر روی شبکه‌های عصبی ابتدا در زمینه نورویبولوژی آغاز شد و مدل‌سازی عصب‌ها و قوانین یادگیری برای تغییر وزن‌های سیناپسی اولین موضوعات تحقیقی بودند.

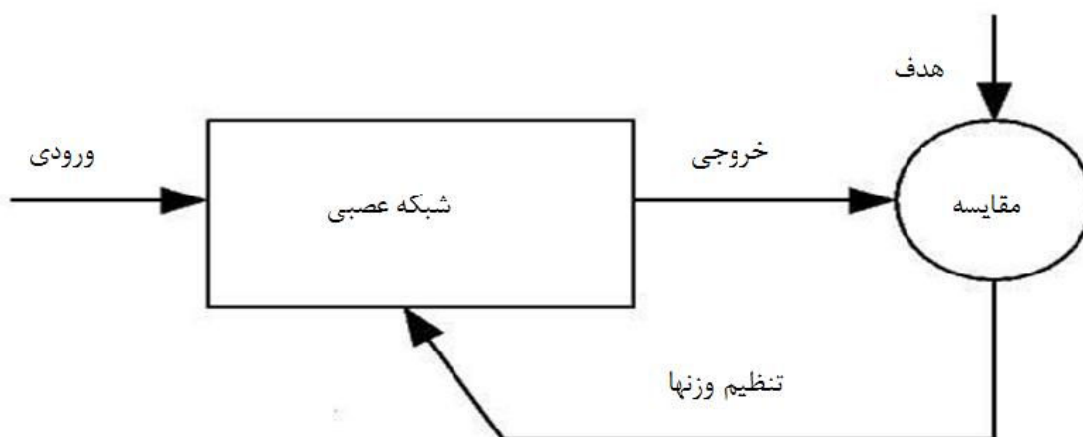
مشکل اصلی این است که شبکه عصبی برای استفاده‌کنندگان مانند جعبه سیاه می‌باشد و معمولاً نمی‌توان راه‌حلی را که یافته است، به طور صریح از آنها استخراج کرد. به عبارت دیگر شبکه‌های عصبی مساله را حل می‌کنند ولی چگونگی آن را به ما نمی‌گوید.

¹ -smooth

همچنین اگر بخواهیم دانش فعلی خود را درباره روابط بین الگوهای ورودی و خروجی در شبکه تاثیر دهیم مشکلات مشابهی داریم و غیر ممکن است که از این دانش برای ساده کردن و یا سرعت بخشیدن به روند یادگیری استفاده کنیم. به عبارت دیگر: "شبکه عصبی از صفر شروع می کند." در یک نگاه نقطه قوت شبکه های عصبی در توانایی یادگیری و ساختار گسترده آنهاست که اجازه استفاده از نرم افزارها و یا سخت افزارهای موازی را می دهد. نقاط ضعف آنها نیز عدم توانایی در ترکیب دانش موجود و نیز عدم توانایی استخراج راه حل مساله از آنها می باشد [۶].

۲-۲-۲ عملکرد شبکه های عصبی

شبکه های عصبی معمولی به شکلی تنظیم یا تعلیم داده می شوند که اعمال یک ورودی خاص منجر به یک خروجی مشخص می شود. این عمل را می توان با تنظیم مقدار رابطه بین اعضاء (وزن ها) انجام داد. این عملکرد در شکل (۸-۲) به نمایش گذاشته شده است [۲].



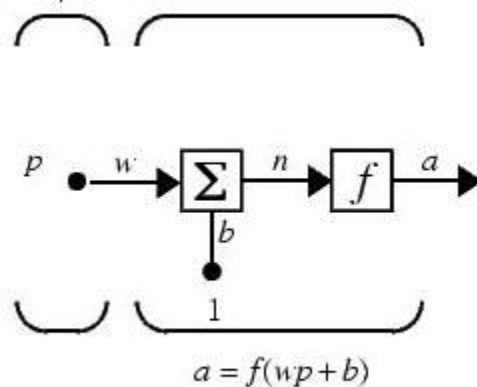
شکل (۸-۲) عملکرد شبکه های عصبی

همانطور که در شکل مشاهده می شود تنظیم شبکه بر اساس مقایسه بین خروجی و مقدار هدف انجام می شود. این عمل تا آنجا که مقدار خروجی با مقدار هدف تطابق داشته باشد ادامه دارد. بنابراین به مقدار زیادی جفت ورودی، خروجی های نمونه نیاز است. امروزه از شبکه عصبی برای حل

مسائلی که انسان و کامپیوترهای معمولی برای حل آنها دچار مشکل هستند استفاده می‌شود.

۳-۲-۲ مدل عصب

یک عصب ساده با یک ورودی عددی تک و با یک انحراف^۱ در شکل (۹-۲) دیده می‌شود.



شکل (۹-۲) یک نورون ساده

ورودی عددی p ، در وزن^۲ عددی w ، ضرب می‌شود و این حاصل ضرب با انحراف b جمع شده و به عنوان ورودی به تابع انتقالی^۳ اعمال می‌شود و یک خروجی عددی تولید می‌شود. تابع فعالساز معمولاً یک تابع پله‌ای یا یک تابع S شکل می‌باشد. همچنین به w و b پارامترهای قابل تنظیم در شبکه عصبی گفته می‌شود.

۴-۲-۲ شبکه چند لایه‌ای از عصب‌ها

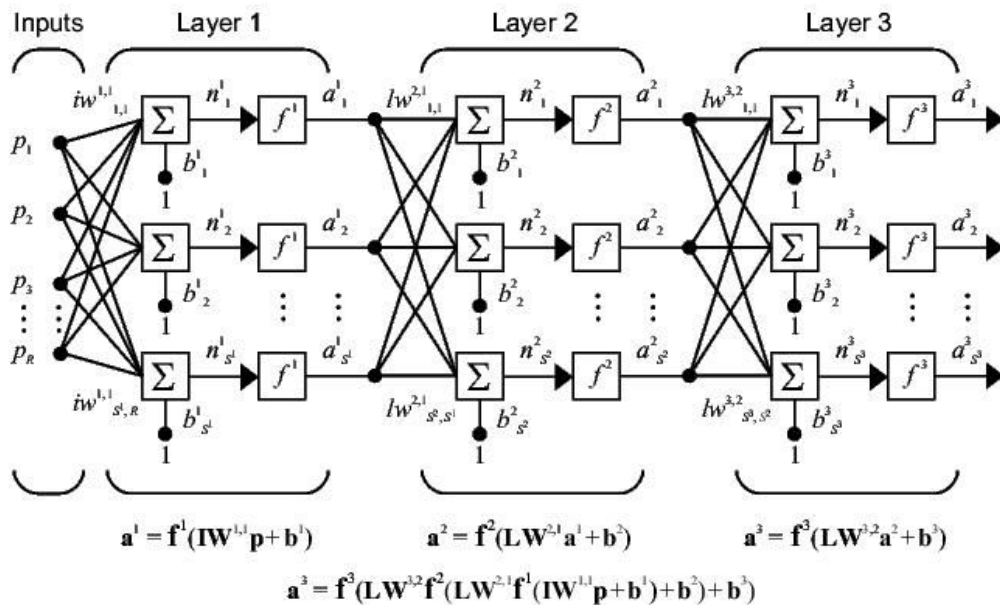
یک شبکه می‌تواند شامل چند لایه باشد. هر لایه شامل ماتریس وزن‌ها W و بردار انحراف‌ها b و بردار خروجی a می‌باشد شکل (۱۰-۲).

^۱ bias

^۲ weight

^۳ transfer function

لایه‌های یک شبکه چندلایه نقش‌های متفاوتی دارند. لایه‌ای که خروجی شبکه را تولید می‌کند لایه خروجی نامیده می‌شود. بقیه لایه‌ها لایه‌های مخفی نامیده می‌شود. شبکه ۳ لایه نشان داده شده در شکل (۲-۱۰) دارای یک لایه خروجی و دو لایه مخفی می‌باشد [۲].



شکل (۲-۱۰) شبکه چند لایه از نورون‌ها

۲-۲-۵ یادگیری و یافتن وزن‌های مناسب

بخش مهم شبکه‌های عصبی الگوریتم‌هایی هستند که توسط آنها ماتریس W را تغییر می‌دهیم. هدف این الگوریتم‌های یادگیری تعیین W به طریقی است که شبکه، مقادیر خروجی مورد نظر را به ازای ورودی‌های مشخص تولید و نیز به داده‌های جدید و ناشناخته واکنشی معقول نشان دهد. برای دستیابی به این هدف خروجی‌های شبکه را پس از انتشار الگوهای ورودی در آن با مقادیر خروجی هدف مقایسه می‌کنیم. سپس W به نوعی تغییر می‌یابد که خروجی شبکه به خروجی هدف نزدیک شود. برای بیان شباهت بین الگوها و نزدیکی آنها، ما به معیاری برای شباهت یا خطا نیاز داریم. این معیار وابسته به نوع شبکه و الگوریتم یادگیری می‌باشد [۶].

۳-۲ سیستم‌های عصبی - فازی

۱-۳-۲ مقدمه

تا به اینجا ما سیستم‌های عصبی و سیستم‌های فازی را به صورت سیستم‌های مجزا بررسی کردیم، اما در این قسمت، مزایا و معایب سیستم فازی و شبکه عصبی را بررسی کرده و به ویژگی‌های ترکیب این دو رهیافت خواهیم پرداخت.

۲-۳-۲ ترکیب شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی

اساس شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی که ما در این نوشته بر آن تکیه داریم تقریباً تابعی است؛ یعنی مسائلی که یک یا چند الگوی ورودی می‌توانند یک الگوی خروجی را نتیجه دهند.

اگر داده‌هایی برای تعلیم داشته باشیم می‌توانیم از شبکه عصبی استفاده کنیم بدون آنکه مدل ریاضی حاکم بر مساله را بدانیم و یا هیچگونه معلومات قبلی در مورد مساله داشته باشیم. اما از طرف دیگر راه‌حلی که شبکه عصبی در حین یادگیری فرا گرفته است قابل استخراج و تفسیر نیست. شبکه عصبی یک جعبه سیاه است و نمی‌توانیم ببینیم که راه‌حلی که یافته است تا چه اندازه معقول می‌باشد؛ به عبارت دیگر حالت نهایی آن قابل تفسیر به شکل قوانین نیست. همچنین اگر دانشی قبلی در مورد مساله داشته باشیم به سختی می‌توانیم آنرا به راه حل اضافه کنیم تا یادگیری را سریعتر کنیم. روند یادگیری می‌تواند خیلی طولانی باشد و تضمینی نیز برای موفقیت نیست.

منطق فازی را وقتی برای حل یک مساله می‌توان بکار برد که معلوماتی در مورد راه حل به شکل قوانین زبانی داشته باشیم. با تعریف مجموعه‌های فازی مناسب برای بیان عبارات زبانی مورد استفاده در قوانین می‌توانیم از این قوانین یک سیستم فازی بسازیم. اما برای تنظیم این قوانین

به طوری که جواب مناسب بدست بیاید، هیچ روش مدونی وجود ندارد. لذا تنها روش‌های تکراری^۱ قابل استفاده است.

در جدول (۱-۲) می‌بینیم، ترکیب مناسبی از این دو رهیافت می‌تواند مزایای این دو را جمع کرده و از معایب پرهیز کند.

جدول (۱-۲) مزایا و معایب شبکه‌های عصبی و منطق فازی

شبکه های عصبی	منطق فازی
مزایا	
نیازی به مدل پردازش ریاضی ندارد نیاز به انتقال دانش از طریق قوانین ندارد الگوهای یادگیری متنوعی فراهم است	نیازی به مدل پردازش ریاضی ندارد معلومات قبلی به شکل قوانین قابل استفاده است. تفسیر بیان راه‌حل ساده‌تر است
معایب	
جعبه سیاه نمی‌توان از آن قوانین استخراج کرد (معمولا) معلومات قبلی نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (یادگیری از صفر) تضمینی برای همگرایی یادگیری نیست	باید قوانین فراهم باشد نمی‌تواند یاد بگیرد هیچ روش مدونی برای تدوین آن وجود ندارد تنظیم ممکن است ناموفق باشد

مهم‌ترین دلیل ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی است این ترکیب باید بتواند توابع عضویت را یاد بگیرد [۷].

^۱ -Heuristic

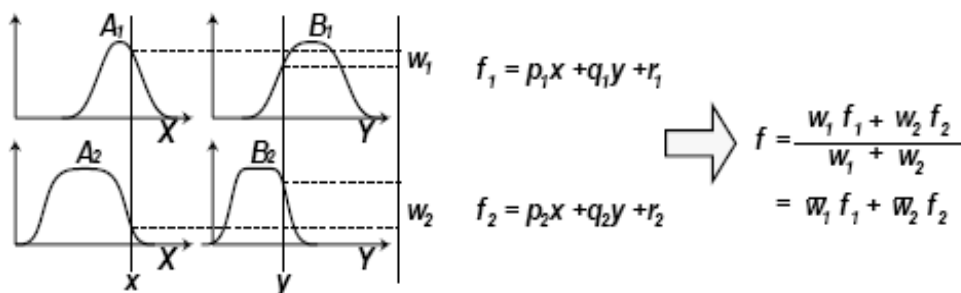
۳-۳-۲ ساختار شبکه ANFIS

سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی یا ANFIS در حقیقت یک سیستم استنباط فازی است که در چارچوب شبکه‌های عصبی تطبیقی ارائه شده است. در این ساختار، پارامترهای توابع عضویت فازی با استفاده از یک الگوریتم یادگیری تنظیم می‌شوند و از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی در این سیستم به منظور آموزش شبکه با استفاده از داده‌های ورودی - خروجی استفاده می‌شود. سیستم ANFIS معادل یک سیستم فازی تاکاگی - سوگنو و کانگ است که در قالب شبکه های عصبی مصنوعی بیان شده است [۸۴].

چنانچه فرض کنیم که یک سیستم فازی سوگنو درجه یک با دو ورودی x و y ، خروجی $z=f(x,y)$ و دو قانون فازی زیر مد نظر باشد:

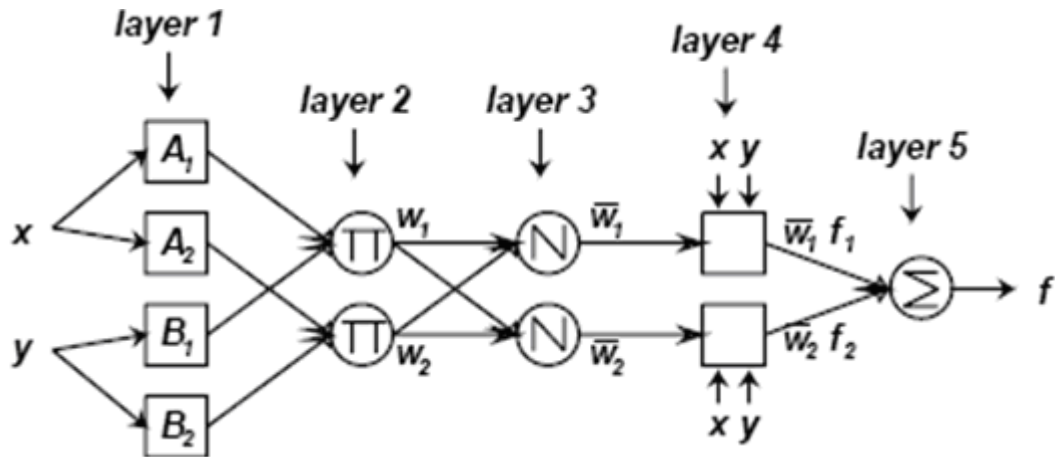
$$\begin{aligned} \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then } f_1 &= p_1x + q_1y + r_1 \\ \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then } f_2 &= p_2x + q_2y + r_2 \end{aligned} \quad (2-25)$$

آنگاه مکانیزم عملکرد این سیستم را می‌توان مطابق شکل (۲-۱۱) نمایش داد. و مدل معادل ANFIS برای این سیستم استنباط فازی مطابق شکل (۲-۱۲) خواهد



بود.

شکل (۲-۱۱) مکانیزم عملکرد مدل سوگنو درجه یک با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون فازی



شکل (۱۲-۲) ساختار سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی

با نماد گذاری $O_{1,i}$ برای خروجی گره i از لایه 1 لایه‌های پنج گانه مدل ANFIS را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

لایه ۱: هر گره در این لایه یک گره تطبیقی است که خروجی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) & i = 1, 2 \\ O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) & i = 3, 4 \end{cases} \quad (۲۶-۲)$$

که در آن x (یا y) ورودی به یک گره و A_i (یا B_{i-2}) یک تابع فازی اختصاص یافته به آن گره است. در واقع خروجی این لایه مقدار عضویت متغیر ورودی خواهد بود. توابع عضویت برای A_i و B_i را می‌توان هر یک از توابع عضویت پارامتری فازی مانند توابع مثلثی یا تابع گوسین و غیره تعریف کرد. به عنوان مثال، A_i را می‌توان توسط یک تابع عضویت گوسین به صورت پارامتری زیر بیان کرد:

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۲۷-۲)$$

که در آن $\{c, \sigma\}$ مجموعه پارامترها خواهد بود. پارامترهای این لایه به عنوان پارامترهای مقدم

خوانده می‌شوند.

لایه ۲: هر گره در این لایه یک گره ثابت است که سیگنال‌های ورودی را در هم ضرب می‌کند و حاصل ضرب را به صورت خروجی ارائه می‌کند. به عنوان مثال:

$$O_{2,i} = \omega_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (28-2)$$

خروجی هر گره در این لایه قدرت آتش قانون مطابق با آن گره است.

لایه ۳: هر گره در این لایه یک گره ثابت است که کسر قدرت آتش قانون مطابق با خود را نسبت به مجموع قدرت آتش کلیه قوانین موجود برمی‌گرداند. به بیان دیگر، خروجی این لایه، قدرت آتش نرمال قانون مطابق با آن است:

$$O_{3,i} = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2 \quad (29-2)$$

لایه ۴: هر گره در این لایه یک گره تطبیقی با تابع زیر است:

$$O_{4,i} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (30-2)$$

که در آن $\bar{\omega}_i$ خروجی لایه ۳ است و $\{p_i, q_i, r_i\}$ مجموعه پارامترهای تطبیقی است. این مجموعه پارامترها به عنوان پارامترهای تالی شناخته می‌شوند.

لایه ۵: گره یگانه موجود در این لایه یک گره ثابت است که خروجی کلی را به عنوان مجموع تمام سیگنال‌های ورودی به آن محاسبه می‌کند:

$$O_{5,1} = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \quad (31-2)$$

با تعاریف فوق و با در نظر گرفتن این ساختار، یک شبکه تطبیقی حاصل می‌شود که دقیقاً معادل مدل فازی مورد بحث عمل خواهد کرد. مزیت اصلی این طرح امکان استفاده از الگوریتم‌های آموزش و یادگیری به منظور تنظیم پارامترهای مدل است. در ادامه به بررسی الگوریتم یادگیری در ANFIS پرداخته می‌شود [۸۴].

۲-۳-۱ یادگیری در ANFIS

الگوریتم پس انتشار خطا یک الگوریتم آموزش با نظارت است که با استفاده از یک سیگنال خارجی به عنوان سیگنال مرجع و مقایسه آن با سیگنال خروجی شبکه، مدل را آموزش می‌دهد. سیگنال خطا در این روش از مقایسه سیگنال مرجع و سیگنال خروجی تولید می‌شود و پارامترهای شبکه با استفاده از آن تصحیح می‌شوند. الگوریتم پس انتشار خطا در سال ۱۹۸۶ توسط راملهارت و همکارانش ارائه شد. در این الگوریتم از روش شیب گرادیان برای تصحیح پارامترها استفاده می‌شود. داده‌های آموزش در این روش الگوریتم، جفت‌های ورودی - خروجی هستند. خطای E^P برای الگوریتم در لایه آخر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E^P = (y^P - O_5^P)^2 \quad (۳۲-۲)$$

در این رابطه P تعداد عناصر موجود در مجموعه داده‌های ورودی آموزش است. مجموع این خطا را E می‌نامیم:

$$E = \sum_{p=1}^P (y^p - O_5^p)^2 \quad (۳۳-۲)$$

از نرخ تغییرات خطا نسبت به خروجی لایه آخر برای کمینه‌سازی خطا استفاده می‌شود. از آنجا که در معماری کلی شبکه، خروجی‌های گره‌های تطبیقی به پارامترهای طراحی بستگی دارند، به منظور تنظیم پارامترهای طراحی شبکه، لازم است که خطای خروجی در لایه آخر به لایه‌های پیشین

تعمیم داده شود. مقدار خطای لایه آخر را دلتا (δ) نامیده و از قاعده مشتق‌گیری زنجیره‌ای برای استخراج رابطه مابین خطای خروجی شبکه با پارامترهای لایه‌های قبل استفاده می‌کنیم. با این توصیف:

$$\delta = \frac{\partial E}{\partial O_5} = -2(y - O_5) \quad (34-2)$$

و برای لایه چهارم

$$\frac{\partial E}{\partial O_4} = \frac{\partial E}{\partial O_5} \cdot \frac{\partial O_5}{\partial O_4} \quad (35-2)$$

به طور مشابه، برای هر لایه K ام در شبکه مقدار دلتا به صورت زیر و با کمک قاعده زنجیره‌ای محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial E}{\partial O_K} = \frac{\partial E}{\partial O_{K+1}} \cdot \frac{\partial O_{K+1}}{\partial O_K} \quad (36-2)$$

حال اگر α مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی شبکه تطبیقی باشد، نحوه تغییرات خطای شبکه بر اساس تغییر مقدار این پارامترها از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{Q' \in Q} \frac{\partial E}{\partial Q'} \cdot \frac{\partial Q'}{\partial \alpha} \quad (37-2)$$

در این رابطه، Q مجموعه گره‌های تطبیقی است که خروجی آنها به α وابسته است. نحوه تصحیح پارامتر α از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (38-2)$$

$$\alpha_{next} = \alpha_{current} + \Delta\alpha \quad (39-2)$$

در رابطه اخیر، η نرخ آموزش است و معیاری است که سرعت همگرایی شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به این امر که مقدار خطا از مقایسه خروجی شبکه با خروجی واقعی در پاسخ به ورودی مشابه به دست می‌آید، تنظیم پارامترهای طراحی که در حقیقت شکل توابع عضویت را تغییر می‌دهند، منجر به ایجاد خروجی مناسب‌تری از شبکه خواهد گردید. شبکه آموزش دیده در واقع می‌تواند مدلی واقعی‌تر از سیستم اصلی را ارائه نماید.

به منظور تنظیم مناسب‌تر پارامترهای مقدم شبکه ANFIS، به جای رابطه (2-38) می‌توان از رابطه زیر که به قانون دلتای تعمیم یافته مشهور است استفاده کرد:

$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} + \mu \cdot \Delta\alpha_{previous} \quad (40-2)$$

در این رابطه، $\Delta\alpha_{previous}$ مقدار تصحیح α در مرحله قبل یادگیری است و μ عدد مثبت کوچکی است که ثابت مومنتوم نامیده می‌شود [۸ و ۴].

۲-۳-۳-۲ یادگیری ترکیبی

در یادگیری ترکیبی در ANFIS، مدل در دو فاز رفت و برگشت آموزش می‌بیند. در این نوع یادگیری که کارآمدتر از روش یادگیری ساده و تک فاز پس انتشار خطاست، از دو الگوی کلی تخمین حداقل مربعات و شیب گرادیان در کنار هم استفاده می‌شود. همگرایی این روش سریعتر از الگوریتم پس‌انتشار خطاست و پاسخ‌های با قابلیت تفسیر بهتری را ارائه می‌کند. در یادگیری ترکیبی در سیستم استنباط فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)، هر مرحله یادگیری در دو فاز یا مسیر رفت و برگشت صورت می‌گیرد. در مسیر رفت، پارامترهای ورودی شبکه ثابت فرض می‌شوند و خروجی شبکه را می‌توان به صورت ترکیبی خطی از پارامترهای قسمت تالی تشکیل داد. با استفاده از روش

حداقل مربعات، پارامترهای تالی با فرض ثابت بودن پارامترهای مقدم به صورت بهینه تعیین می‌گردند. بدین صورت فاز اول یا مرحله رفت الگوریتم یادگیری درسیستم در یک تکرار خاص به پایان می‌رسد.

در ادامه، خروجی شبکه به داده‌های ورودی محاسبه می‌شود و مقدار خطا با استفاده از روابط مورد بحث در قسمت قبل محاسبه می‌شود. این مقدار خطا برای تشکیل سیگنال خطا و مشتقات آن نسبت به خروجی هر گره در فاز برگشت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشتقات به صورت پس‌انتشار از لایه آخر به سمت لایه‌های قبل محاسبه می‌شوند و با استفاده از روش شیب گرادیان در فاز برگشت، پارامترهای قسمت مقدم با فرض ثابت بودن پارامترهای تالی تصحیح و بهینه‌سازی می‌شوند. در واقع، نتیجه فاز رفت، اصلاح پارامترهای خطی بخش تالی و نتیجه فاز برگشت، اصلاح پارامترهای توابع عضویت ورودی یا شکل توابع عضویت ورودی خواهد بود. دو فاز رفت و برگشت به صورت تکراری ادامه می‌یابند تا عملکرد شبکه به حالت مطلوب برسد و یا خطا از یک حد آستانه تعیین‌شده کمتر شود.

می‌توان الگوریتم آموزش ترکیبی را در مدل ANFIS به صورت جدول (۲-۲) خلاصه کرد.

جدول (۱-۲) الگوریتم آموزش ترکیبی در مدل ANFIS

	مسیر رفت	مسیر برگشت
پارامترهای مقدم	ثابت	شیب گرادیان
پارامترهای تالی	تخمین حداقل	ثابت
سیگنال مرتبط	خروجی گره	سیگنالهای خطا

فصل سوم

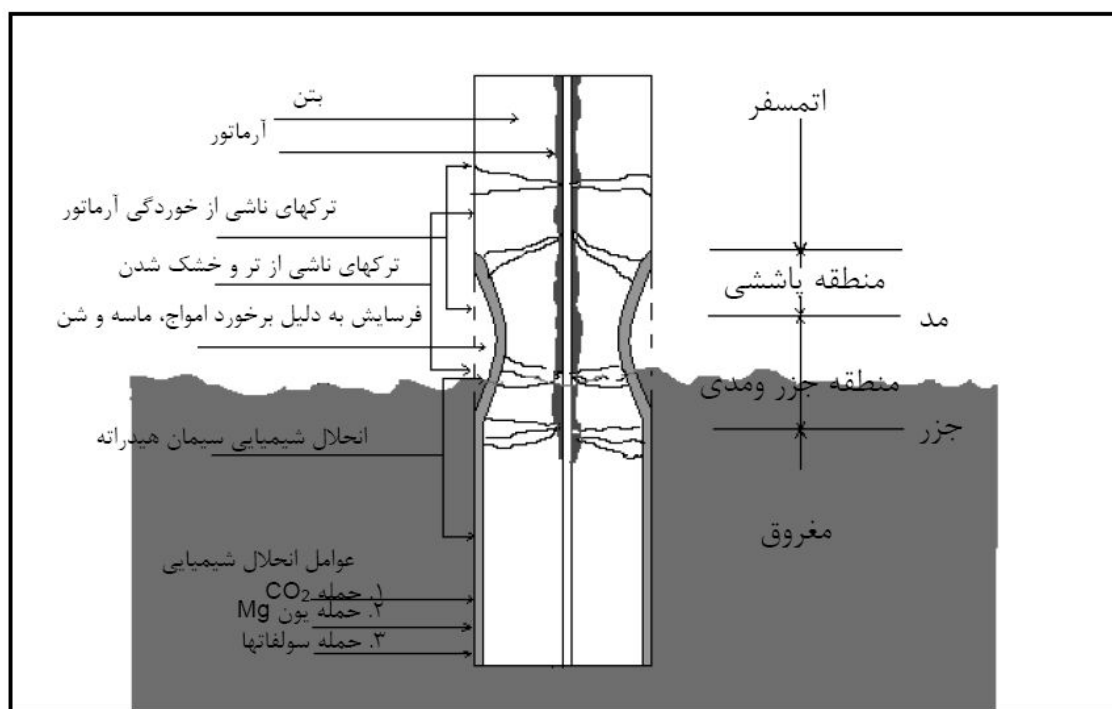
اصول دوام و پایداری

سازه‌های بتنی

۱-۳ عوامل تخریب سازه های بتنی در محیطهای دریایی

۱-۱-۳ عوامل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن

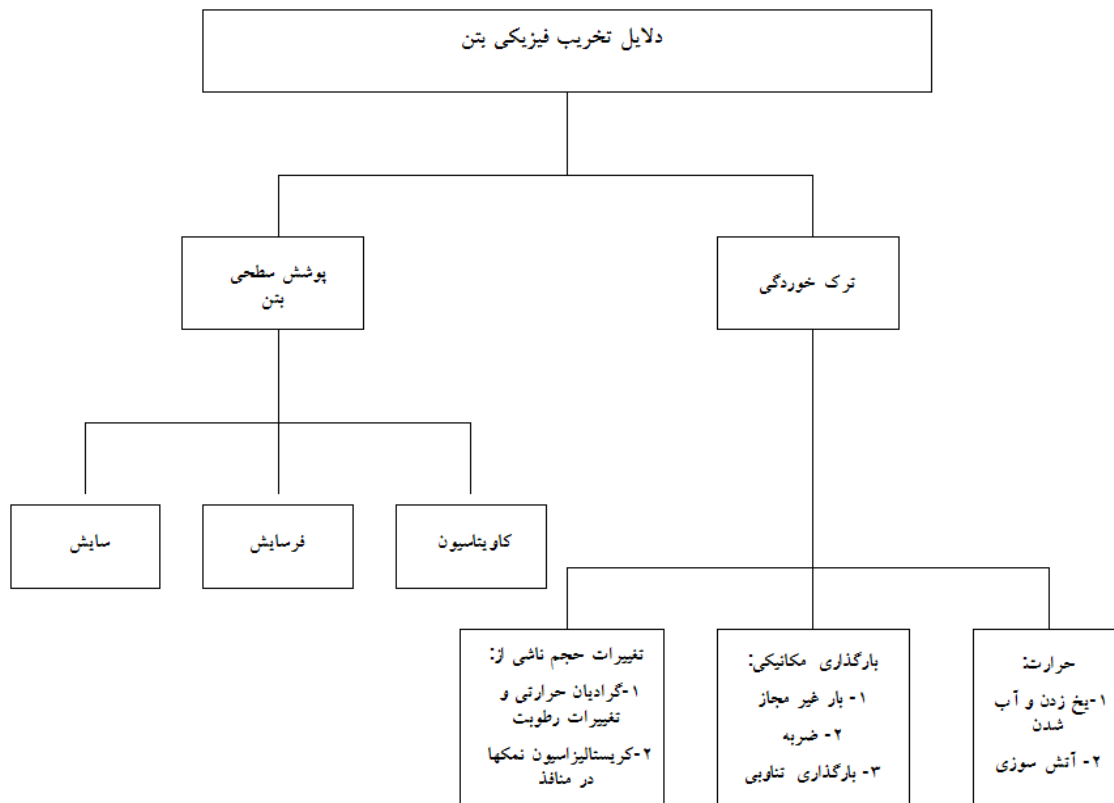
از مطالعه تاریخچه پایایی بتن در مناطق دریایی چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بسیاری از عوامل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن، در محیطهای دریایی وجود دارد. از این امر که به صورت شماتیک در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، نتیجه می‌شود که سازه‌های بتنی در محیطهای دریایی در معرض یکی از حادثترین محیطهای طبیعی در دنیا قرار دارند [۹].



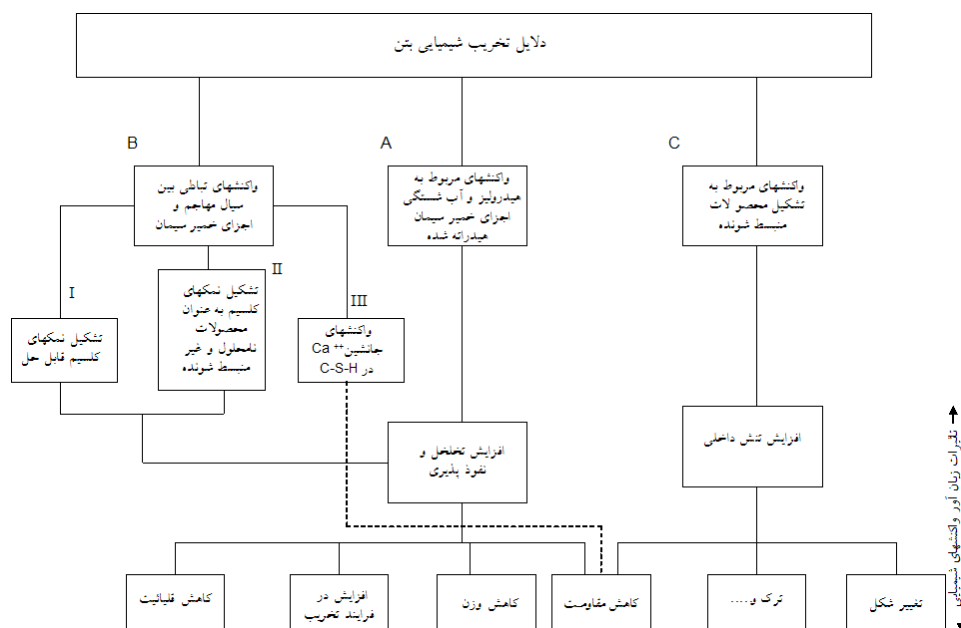
شکل (۱-۳) دلایل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن

باید توجه داشت که با وجود طبقه‌بندی ارائه شده در شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳)، معمولاً یک عامل به تنهایی در تخریب سازه بتنی موثر نیست و گاهی ترکیب دو یا چند عامل فیزیکی و شیمیایی به صورت همزمان یا متوالی، عامل تخریب هستند [۱۰]. به عنوان مثال، انبساط و ایجاد ترک به علت

تأثیر فیزیکی فشار کریستالیزاسیون نمک‌ها در یک بتن نفوذ پذیر، باعث افزایش بیشتر نفوذپذیری و هموارکردن راه برای نفوذ یون‌ها از دریا به بتن و تخریب‌های شیمیایی می‌شود. بطور مشابه، تجزیه شیمیایی و آب شستگی (Leaching) اجزای خمیر سیمان هیدراته شده، باعث افزایش تخلخل و در نهایت منجر به کاهش مقاومت و در نتیجه هموارکردن تأثیرات فیزیکی می‌شود. با این وجود، دسته بندی فرایندهای تخریب بتن به فیزیکی و شیمیایی مطابق شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳)، امکان بررسی پدیده‌های مربوط با موضوع را بطور جداگانه فراهم می‌آورد که پی بردن به علت و در نتیجه کنترل آن را آسانتر می‌کند.



شکل (۲-۳) عوامل فیزیکی تخریب بتن



شکل (۳-۳) دلایل شیمیایی تخریب بتن

انواع واکنش‌های شیمیایی مخرب بتن. A: حمله آب نرم به هیدروکسید کلسیم و C-S-H موجود در سیمان پرتلند سخت شده، B (I): محلول اسیدی تشکیل‌دهنده ترکیبات کلسیم قابل حل مانند کلرید کلسیم، سولفات کلسیم، استات کلسیم، بیکرینات کلسیم، B(II): محلولهای اسید اکسالیک و نمک‌های آن، تشکیل اگزالیات کلسیم، B(III): حمله دراز مدت آب دریا، C-S-H را با جایگزینی Mg^{++} به جای Ca^{++} تضعیف می‌کند، C: (۱) حمله سولفاتی که تشکیل گچ و اترینگایت می‌دهد. (۲) حمله سیلیکاتی - قلیایی (۳) خوردگی فولاد در بتن (۴) هیدراتاسیون تاخیری MgO و CaO بلوری شده .

در محیط‌های دریایی، مهمترین عامل تخریب سازه بتنی بر اثر حملات شیمیایی نفوذ یون کلر به داخل بتن، از بین بردن لایه غیر فعال میلگردهای آرماتور و در نتیجه خوردگی آنها است؛ که این پدیده منجر به انبساط مواد حاصل از خوردگی آرماتور و تخریب پوشش بتنی می‌شود. این فرآیند اگر با سایر عوامل نظیر دما، و نیز عواملی که باعث کاهش قلیائیت بتن و یا افزایش نفوذپذیری آن می‌شوند، همراه باشد، اثرهای مخرب آن در زمان کوتاهتری نمایان می‌شوند [۱۱]. در بخش‌های بعد در مورد ساز و کارهای انتقال یون کلر و عوامل موثر بر آن در بتن به طور مفصل توضیح داده خواهد شد.

۳-۱-۲ موجودات دریایی

رشد و نمو موجودات دریایی مانند صدفها و حلزونها معمولا در سطح بتن‌های متخلخل که خاصیت قلیایی آنها بر اثر آب‌شستگی کاهش داده شده است، دیده می‌شوند. از آنجا که رشد و نمو موجودات دریایی تحت تأثیر دما، اکسیژن، PH، جریان‌ات آب و نور هستند، معمولا تا عمق ۲۰ متری از سطح آب دریا محدود می‌شوند و در آب و هوای سرد مشکل کمتری به شمار می‌روند.

صدفها، توتیای دریایی و حلزونها از خود اسیدهایی ترشح می‌کنند که باعث ایجاد سوراخهایی در بتن و خوردگی موضعی (حفره ای) روی سطح میلگردهای آرماتور می‌شود. همانطور که توسط Lea [۱۲]، گزارش داده شده است، برخی حلزونها، کربنات آمونیوم تولید می‌کنند که برای بتن بسیار زیان‌آور است.

بر پایه مطالعات Gerwick [۱۳]، یک گونه حلزون مهاجم که می‌تواند به داخل سنگدانه‌های آهکی سخت بتن نفوذ کند در آب‌های خلیج فارس یافت شده است.

رشد و نمو موجودات دریایی همچنین از بازرسی‌های مناسب سطح بتن برای بررسی نقص‌های احتمالی جلوگیری می‌کنند. با این وجود در برخی منابع از بعضی از ارگانیس‌ها که بر سطح بتن تشکیل می‌شوند به عنوان یک پوشش مناسب طبیعی در جلوگیری از نفوذ آب دریا به داخل بتن یاد شده است.

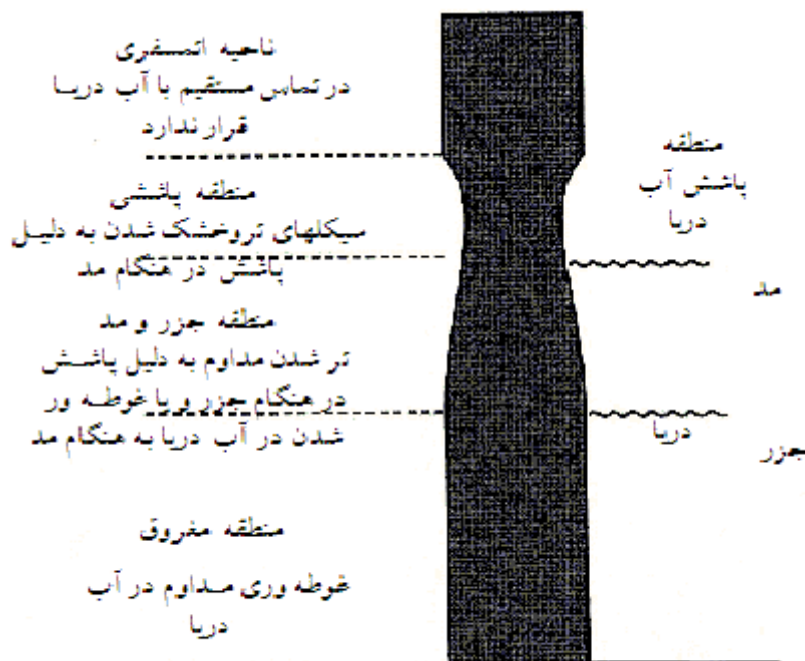
۳-۱-۳ دما و رطوبت نسبی :

دمای سطحی آب دریا از 20°C - در مناطق سردسیر تا مقادیر زیاد حدود 30°C در مناطق گرمسیر متغیر است. دمای آب دریا بر سرعت واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی در بتن موثر است.

برای سازه‌های بتنی واقع در آب و هوای گرم، خود حرارت یک عامل مهاجم است زیرا منشاء انرژی محرک است که شروع و پیشرفت ساز و کارهای خرابی را تسریع می‌کند [۱۴]. قانون کلاسیک thumb که در مورد رابطه تغییرت دما و سرعت واکنشهای شیمیایی است بیان می‌کند که برای هر ۱۰ درجه سلیسیوس افزایش دما، سرعت واکنشهای شیمیایی دو برابر می‌شود [۱۵].

تأثیرات جزر و مد، وقتی با تفاوت دما بین هوا و آب دریا همراه شوند ممکن است باعث شوند که قسمتی از سازه بتنی در معرض گرم و سرد شدن، یخ زدن و آب شدن و یا تر و خشک شدن قرار بگیرد.

بطور کلی، ۴ ناحیه سازه‌های دریایی که هر کدام یک مشخصه تخریب معین بر اثر رویارویی با محیط دریایی دارند، می‌تواند مشخص شود. شکل (۳-۴)، موقعیت هر ناحیه را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل (۳-۴) موقعیت‌های قرارگیری هر ناحیه سازه بتنی در معرض آب دریا

ناحیه‌های پاشش و جزرومد، بحرانی‌ترین قسمت‌های سازه بتنی هستند که به علت تغییرات رطوبت در این نواحی، در برابر آسیب دیدگی استعداد بیشتری دارند.

۳-۱-۴ باد

باد می‌تواند به عنوان یک عامل، رطوبت دریا و نیز گرد و خاک و ماسه را، که ممکن است حاوی املاح باشند، به مصالح دپو شده بتن یا آرماتورها انتقال دهد و یا حتی در سازه‌های تکمیل شده کنار دریا، املاح را به درون بتن هدایت کند و موجب آغاز آسیب‌دیدگی گردد [۱۶].

همچنین بادهای قوی می‌توانند مقدار زیادی آب و رطوبت دریا را با خود حمل کرده و تا مسافت‌های دور منتقل کنند. بنابراین مشکلات برای پایایی، که در نتیجه خوردگی آب دریا به وجود می‌آیند، تنها محدود به سازه‌های دریایی نیست. همچنین باد مخصوصا در سنین اولیه بتن‌ریزی، باعث تبخیر سریع و ایجاد ترک‌های خمیری در بتن تازه می‌شود [۹].

از طرف دیگر باد به صورت گردبادها و طوفان‌ها باعث ایجاد موج‌های بلند و قوی می‌شود که علاوه بر وارد آوردن فشار زیاد روی سازه، در قسمتی از سازه که در معرض پاشش شدید آب است باعث فرسایش بتن و در نتیجه ضعیف شدن و کنده شدن ذرات آن می‌گردد [۹].

۳-۱-۵ موج

نیروی اعمال شده توسط امواج بسیار زیاد است و معمولا یکی از عوامل مهم در طراحی سازه‌های دریایی به شمار می‌رود. گردبادها، طوفانها، زمین لغزه‌ها و زمین لرزه‌ها عوامل اصلی تولید موج‌های بلند و قوی هستند. فشار یک موج بر روی یک سازه ممکن است به 30 ton/m^2 هم برسد که چنین فشاری می‌تواند باعث تخریب سازه شود.

قسمتی از سازه که در معرض موج می‌باشد ناحیه پاشش نامیده می‌شود که در برابر فرسایش

ناشی از شن و ماسه و سایر مواد جامد معلق در آب دریا، آسیب پذیر می‌باشد [۹].

۳-۱-۶ فشار هیدرواستاتیک

فشار هیدرواستاتیک آب دریا روی قسمت مغروق سازه از قاعده زیر پیروی می‌کند:

$$p = \rho \cdot h \quad (۱-۳)$$

که در آن، P فشار واحد، ρ چگالی آب دریا و h عمق آب است. اگرچه چگالی متوسط آب دریا 1026 kg/m^3 است، ولی برای مقاصد عملی، فشار هیدرواستاتیک را می‌توان ۱ تن بر متر مربع بر متر عمق فرض کرد. فشار هیدرواستاتیک به عنوان یک نیروی فشاری برای وارد کردن آب دریا به مصالح نفوذپذیر عمل می‌کند.

در بتن‌های خیلی متخلخل، مکش موئینگی (Capillary Suction) که به وسیله فشار هیدرواستاتیک تقویت می‌شود، باعث هدایت آب دریا به قسمت‌های غیر مستغرق سازه می‌شود که در آنجا سرعت زیاد تبخیر سطحی، باعث ایجاد فشار نمک‌های بلوری شده می‌شود [۹].

۳-۲ محیط دریا - خلیج فارس مهاجم‌ترین محیط

۳-۲-۱ عوامل مخرب موجود در آب دریا

خلیج فارس با وسعتی حدود ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع فقط از تنگه هرمز به عرض ۳۵ کیلومتر با آب‌های آزاد جهان در ارتباط است و دورترین منطقه خلیج فارس تا این تنگه حدود ۱۹۰۰ کیلومتر فاصله دارد. مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده که املاح موجود در این آب از دیگر آب‌های جهان بیشتر است. زیاد بودن غلظت کلرید در این آب‌ها زمینه خوردگی فولاد در سازه‌های ساحلی و دریایی را فراهم می‌سازد. افزون بر این، آب خلیج فارس نمک بسیار زیاد دارد که در جدول (۱-۳) منعکس شده است [۱۷].

چنانچه با آب خلیج فارس به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم برمتر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۵ بتن ساخته شود، مقدار کلر ۱/۱۷ درصد بر حسب وزن سیمان و یا ۰/۲ درصد بر حسب وزن بتن خواهد بود. اگر مقدار مجاز کلر ۰/۴ درصد بر حسب وزن سیمان و یا ۰/۰۶ درصد بر حسب وزن بتن فرض گردد، مقدار آلودگی بتن ساخته شده با آب خلیج فارس بسیار شدید می‌باشد. در حالی که اگر بتن با آب تصفیه شده ساخته شود، مقدار کلر بین ۰/۰۱ درصد تا ۰/۰۳ درصد وزن بتن خواهد بود [۱۵].

جدول (۱-۳) تجزیه شیمیایی آب خلیج فارس در مقایسه با سایر دریاها (میلیگرم در لیتر)

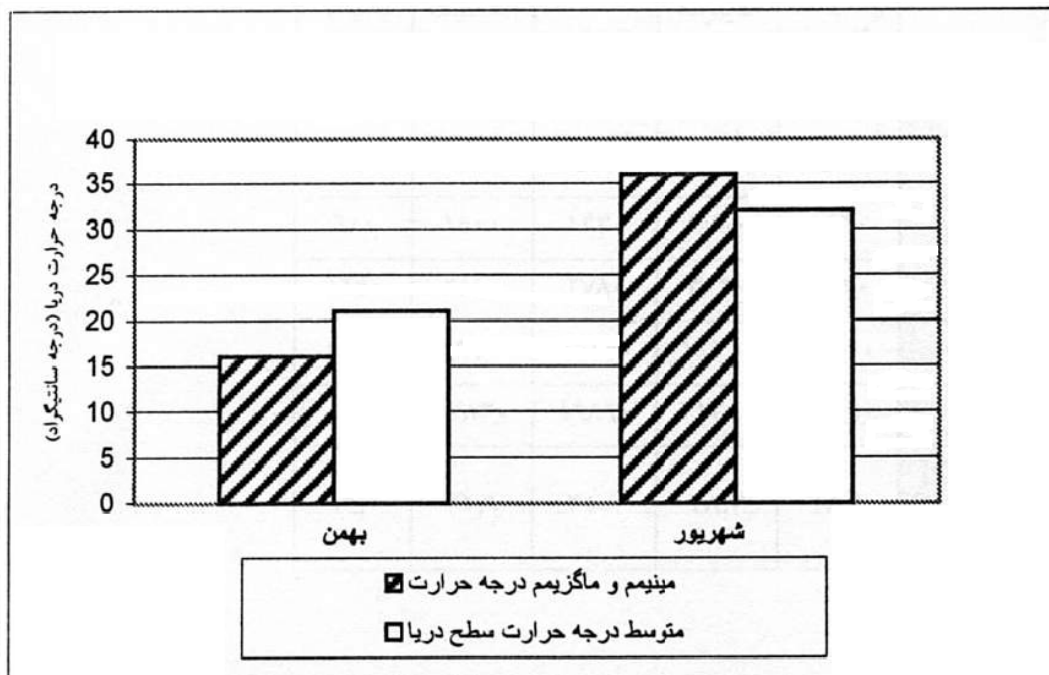
دریاها عناصر	خلیج فارس	مدیترانه	دریای شمال	دریای آتلانتیک	دریای بالتیک
K ⁺	۴۵۰	۴۲۰	۴۰۰	۴۳۰	۱۸۰
Ca ⁺⁺	۴۳۰	۴۷۰	۴۳۰	۴۱۰	۱۹۰
Mg ⁺⁺	۱۴۶۰	۱۷۸۰	۱۳۳۰	۱۵۰۰	۶۰۰
SO ₄ ⁻⁻	۲۷۲۰	۳۰۶۰	۲۷۸۰	۲۵۴۰	۱۲۵۰
Na ⁺	۱۲۴۰۰	۱۱۵۶۰	۱۱۰۵۰	۹۹۵۰	۴۹۸۰
Cl ⁻	۲۱۴۵۰	۲۱۳۸۰	۱۹۸۹۰	۱۷۸۳۰	۸۹۶۰
مقدار نمک	۳۸۹۰۰	۳۸۷۰۰	۳۵۹۰۰	۳۲۶۰۰	۱۶۲۰۰

در سواحل خلیج فارس، آب‌های زیرزمینی نیز شدیداً آلوده به یون کلر می‌باشند. مقدار این عناصر از محلی به محل دیگر متفاوت است. منبع دیگر آلودگی بتن به عناصر کلر و سولفات از طریق نفوذ مستقیم آب دریا به شکل پاشیدن است. معمولاً مقدار نفوذ کلر در لایه سطحی بتن حدود ۲/۶٪ تا ۳/۴٪ وزن سیمان است که به تدریج در عمق بتن کاهش می‌یابد. باد نیز نمک‌های دریا را با خود

حمل کرده و منبع دیگری را برای آلودگی بتن به یون کلر تشکیل می‌دهد. به طور کلی غلظت نمک موجود در اتمسفر منطقه خلیج فارس زیاد بوده و حدود 5 gr/m^3 است [۱۵].

۲-۲-۳ دما و رطوبت نسبی

در شکل (۵-۳) و جدول (۲-۳)، دمای هوا در یکی از شهرهای ساحلی خلیج فارس (بندرعباس) در طی سال و نیز تغییرات درجه حرارت آب خلیج فارس طی گرمترین و سردترین ماه‌های سال نشان داده شده است:



شکل (۵-۳) تغییرات دمای آب خلیج فارس طی گرمترین و سردترین ماه سال

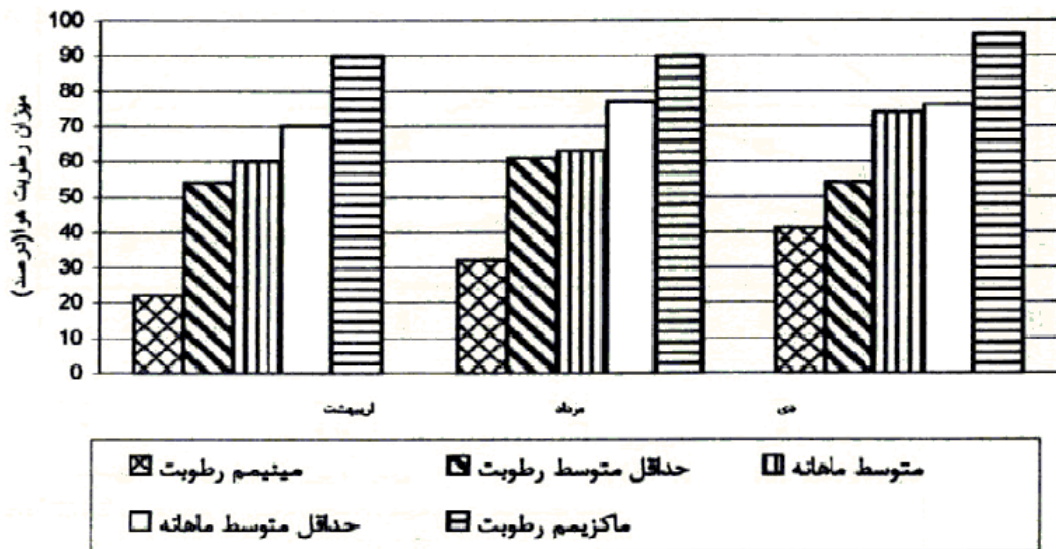
جدول (۲-۳) دمای هوا در شهر بندر عباس

میانگین دمای هوا (درجه سانتیگراد)			ماه‌های سال
متوسط روزانه	حداقل متوسط	حداکثر متوسط	
۱۸/۱	۱۳	۲۳/۲	دی
۱۹/۷	۱۴/۹	۲۴/۵	بهمن
۲۳/۲	۱۸/۲	۲۸/۱	اسفند
۲۶/۶	۲۱/۶	۳۱/۵	فروردین
۳۰/۸	۲۵/۴	۳۶/۲	اردیبهشت
۳۳/۵	۲۸/۵	۳۸/۴	خرداد
۳۴/۵	۳۰/۵	۳۸/۳	تیر
۳۴/۲	۳۰/۵	۳۷/۹	مرداد
۳۲/۸	۲۸/۴	۳۷/۲	شهریور
۲۹/۸	۲۴/۳	۳۵/۲	مهر
۲۴/۵	۱۸/۸	۳۰/۲	آبان
۱۹/۷	۱۴	۲۵/۵	آذر

رطوبت نسبی در شبانه روز و همچنین در ماه‌های مختلف بسیار متغیر است . بطوریکه در ماه

اردیبهشت متوسط ماهانه رطوبت نسبی ۶۰ درصد بوده و در ماه دی این مقدار به ۷۴ درصد افزایش

پیدا کرده است (شکل ۳-۶).



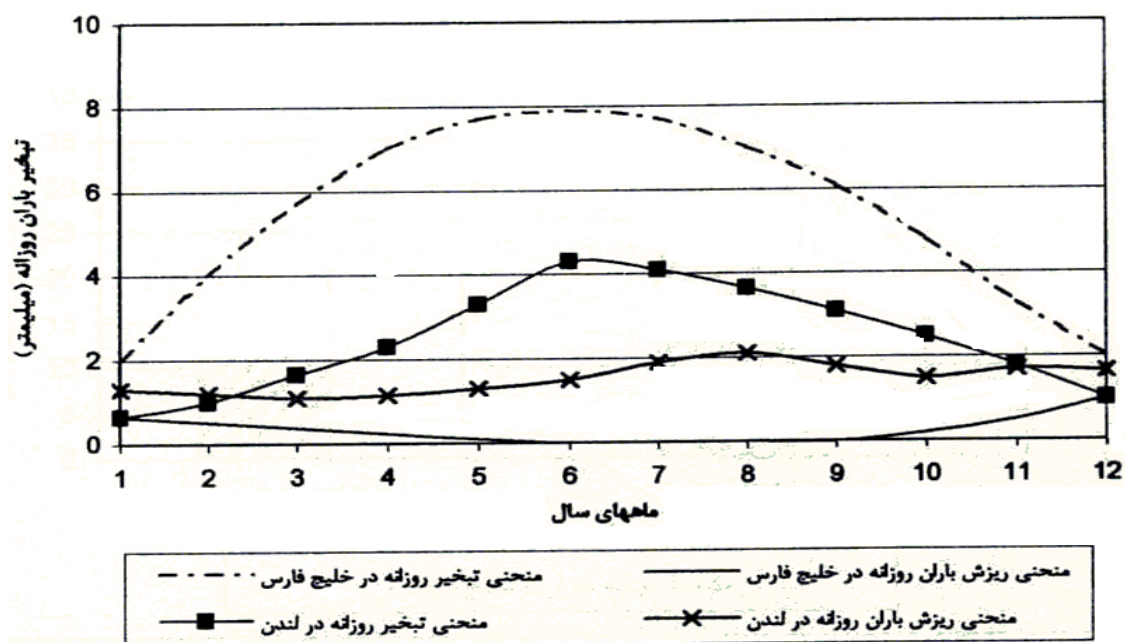
شکل (۳-۶) تغییرات درصد رطوبت شهر بندرعباس طی خشک‌ترین و مرطوب‌ترین ماه‌های سال

۳-۲-۳ باد

در ناحیه خلیج فارس جهت گلباد غالب معمولاً شمالی - غربی است. وزش باد در ماه‌های دی، بهمن، اسفند و فروردین معمولاً شدیدتر است. اگرچه متوسط سرعت باد در بخش‌هایی از اروپا و خلیج فارس یکسان است، اما احتمال وزش بادهای سریع‌تر از ۱۷ km/hr در این ناحیه یک چهارم بیشتر است.

۳-۲-۴ سرعت تبخیر:

گرمای شدید و وزش باد باعث تبخیر سریع آب می‌شود. در چنین شرایطی، سرعت تبخیر از سرعت تعرق بیشتر است. که این امر باعث افزایش غلظت نمک آب دریا می‌شود. شدت تبخیر در منطقه خلیج فارس در شکل (۳-۷) نشان داده شده است.



شکل (۳-۷) - تبخیر/ باران روزانه در منطقه خلیج فارس

ضمناً از آنجا که بیشترین مقدار آب زیرزمینی در اراضی مجاور ساحل از آب خلیج فارس تأمین می‌گردد، تبخیر آب از سطح زمین باعث آلودگی خاک به نمک شده است. بنابراین اغلب مشاهده می‌شود که مصالح در سطح زمین آلوده می‌باشند [۱۵].

۳-۳ ساز و کارهای انتقال یون کلر به بتن:

همانطور که می‌دانیم یون‌های کلر هم از محیط خارجی (بیرونی)، در صورت تماس با خاک آلوده یا آب دریا، و هم از محیط داخلی (مصالح حاوی یون کلر) وارد بتن می‌شوند. در هر صورت با توجه به اهمیت زیاد نفوذ کلر به عنوان یک عامل بسیار مهم در کاهش پایداری بتن، ساز و کارهای نفوذ یون کلر به داخل بتن باید به خوبی شناخته شوند. باید توجه داشت که نفوذ یون کلر به داخل بتن تنها تحت تأثیر یک عامل نیست بلکه ممکن است عوامل مختلفی به صورت همزمان در این امر دخیل

باشند. ساز و کارهای نفوذ یون کلر به داخل بتن را می‌توان به موارد زیر محدود نمود:

۱-۳-۳ انتشار یونی

انتشار یونی در حقیقت حرکت ماده تحت تأثیر اختلاف غلظت می‌باشد و یا به صورت دقیقتر می‌توان گفت انتشار یونی، پتانسیل شیمیایی از یک محیط با غلظت زیاد به یک محیط با غلظت کم است.

باید توجه داشت که وقتی در مورد انتقال کلر صحبت می‌شود، فقط یون‌های کلر آزاد هستند که در این اختلاف غلظت یا پتانسیل شیمیایی می‌توانند شرکت داشته باشند [۱۸].

۲-۳-۳ مکش موئینه

مکش موئینه حرکت (انتقال) آب و یون‌ها در داخل محیط متخلخل بتن به دلیل کشش سطحی منافذ موئینه می‌باشد [۱۸].

۳-۳-۳ نفوذ

انتقال سیال تحت عمل گرادیان یا تغییر فشار را نفوذ نامند.

۴-۳-۳ مهاجرت

مهاجرت عبارت از حرکت یون‌ها تحت تأثیر گرادیان پتانسیل الکتریکی است [۱۸].

۵-۳-۳ جذب

حرکت یون‌ها تحت تأثیر گرادیان رطوبت را جذب گویند.

۶-۳-۳ انتقال ترکیبی

در ناحیه جزرومدی و منطقه پاشش، یعنی در موقعیت‌هایی که بتن به طور کامل اشباع نیست و بطور مداوم تر و خشک می‌شود، نفوذ یون کلر به داخل بتن بسیار سریع‌تر نسبت به انتشار خالص به

وقوع می‌پیوندد [۱۹].

در این ناحیه بطور همزمان نمک‌ها با مکانیزم انتشار برای افزایش عمق نفوذ، حرکت می‌کنند و اثر همزمان انتشار و مکش موئینه ساز و کار ترکیبی از حرکت یون‌ها به داخل بتن را به وجود می‌آورد. در بتن‌های در معرض محیط‌های دریایی، نفوذ یون کلر می‌تواند تا سه برابر بیشتر از سازه‌های معمولی باشد [۲۰]. در سازه‌های دریایی مقادیر زیادی از آب دریای حاوی کلر در هنگام تر شدن بتن به داخل آن مکیده می‌شود و هنگامی که بتن در معرض هوا قرار می‌گیرد رطوبت سطح آن خشک می‌شود و مقدار زیادی از یون‌های کلر بر روی سطح بتن به جای می‌ماند [۱۹].

خشک شدن سریع بتن (بر اثر دمای محیطی زیاد) باعث می‌شود که اکسیژن زیادی در منافذ بتن وجود داشته باشد و فشار منفی زیادی را ایجاد کند در نتیجه در هنگام تر شدن بتن، آب بیشتری جذب آن می‌شود.

تکرار تر و خشک شدن بتن، غلظت نمک را در محیط داخلی بتن افزایش داده و ممکن است که غلظت یون کلر در منافذ حتی بیشتر از غلظت یون کلر آب دریا شود. به دلیل خاصیت آب دوستی یون‌های کلر، میزان رطوبت داخل بتن با افزایش یون‌ها، افزایش می‌یابد و در نتیجه اگر رطوبت کافی موجود باشد یون‌های کلر از طریق انتشار به اعماق بیشتری راه می‌یابند [۱۹].

با تمامی این تفاسیر باید دانست که تمامی یون‌های کلر که در داخل بتن وجود دارند و یا نفوذ می‌کنند به صورت آزاد باقی نخواهند ماند. و برخی از آنها با محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و به شکل نمک فریدل (Calcium chloroaluminate hydrate) در می‌آیند و برخی از یون‌های کلر به طور فیزیکی جذب هیدرات‌های مختلف سیمان می‌شوند به عبارت دیگر قسمتی از یون‌های کلر به صورت کلر مقید در آمده و فقط بخشی از یون‌های کلر به صورت آزاد باقی می‌مانند و در حقیقت همین بخش است که مسئول تخریب بتن در ساختمان‌های بتن‌آرمه می‌باشد. در عمل کلر

پیوندی می‌تواند به عنوان عاملی برای جلوگیری و یا به تأخیر انداختن خوردگی با کاهش غلظت یون‌های کلر در محلول منفذی عمل نماید [۱۹].

۳-۴ معادلات حاکم بر انتقال یون کلر

همانطور که می‌دانیم نفوذ کلر به بتن پروسه پیچیده‌ای دارد که شامل انتشار، مکش موئینه و حرکت انتقالی با آب می‌باشد گاهی اوقات پتانسیل الکتریکی خارجی به منظور حرکت یون‌های کلر بر روی بتن اعمال می‌شود تا ضریب انتشارپذیری به صورت تسریع شده اندازه‌گیری شود. در این بخش تنها به مکانیزم انتشار و قوانین حاکم بر آن پرداخته می‌شود [۱۸].

۳-۴-۱ تابع انتشار^۱ و تعریف ضریب انتشارپذیری^۲

با در نظر گرفتن یک سیستم مایع که در آن انتشار یون‌های کلر به وقوع می‌پیوندد (شکل ۳-۸) تابع پتانسیل شیمیایی یون‌های کلر را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln(\gamma c) \quad (۲-۳)$$

که در آن، μ تابع پتانسیل شیمیایی، μ_0 تابع پتانسیل شیمیایی استاندارد، R ثابت جهانی گازها برابر $8.314 \frac{J}{mol \cdot ^\circ K}$ ، T دمای مطلق، γ ضریب اکتیواسیون و c میزان کلر آزاد در واحد حجم سیال با واحد $\frac{kg_{cl}}{m^3_{solution}}$ می‌باشد.

تحت اثر گرادیان پتانسیل شیمیایی یون‌ها در جهت این اختلاف پتانسیل حرکت می‌نمایند و چون یون‌های کلر نمی‌توانند به تنهایی حضور داشته باشند پس واضح است که باید حضور کاتیون‌ها

¹ Diffusion function

² Diffusion Coefficient

را هم در نظر گرفت. در نتیجه حرکت یون‌های کلر، یک کانتور میدان الکتریکی ϕ' بین یون‌های کلر و کاتیون‌های اطراف به وجود می‌آید و در نتیجه این کانتور میدان الکتریکی، یون‌های کلر به عقب کشیده می‌شوند و در نتیجه متوسط سرعت حرکت یون‌های کلر (v) برابر:

$$v = -B \frac{\partial \mu}{\partial x} + u' \frac{\partial \phi'}{\partial x} = -BRT \left(\frac{\partial \ln c}{\partial x} + \frac{\partial \ln \gamma}{\partial x} \right) + u' \frac{\partial \phi'}{\partial x} \quad (3-3)$$

و یا

$$v = -BRT \frac{\partial \ln c}{\partial x} \left(1 + \frac{\partial \ln \gamma}{\partial \ln c} \right) + u' \frac{\partial \phi'}{\partial x} \quad (4-3)$$

می‌گردد.

که در آن B فاکتور تناسب¹ و u' قابلیت حرکت یون‌ها می‌باشد. با در نظر گرفتن $D=BRT$ ، ضریب انتشارپذیری، نرخ جریان یون‌ها در واحد سطح (شار) به صورت زیر در می‌آید.

$$J_d = c \cdot v = -D \frac{c \partial \ln c}{\partial x} \left(1 + \frac{\partial \ln \gamma}{\partial \ln c} \right) + cu' \frac{\partial \phi'}{\partial x} \quad (5-3)$$

و یا

$$J_d = -D \frac{\partial c}{\partial x} \left(1 + \frac{c}{\gamma} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial c} \right) + cu' \frac{\partial \phi'}{\partial x} \quad (6-3)$$

که در آن J_d همان نرخ جریان یون‌ها در واحد سطح (شار) در یک محیط همگن می‌باشد شکل (3-8).

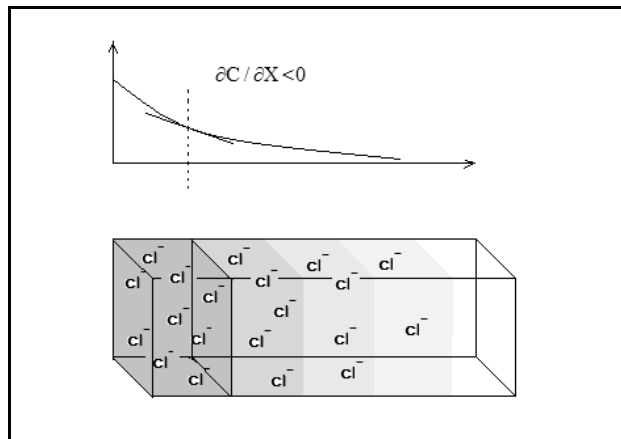
ضریب اکتیواسیون (γ) و کانتور میدان الکتریکی ϕ' به غلظت کلر آزاد وابسته است. با توجه

¹ Proportionality factor

به اینکه حل جملات $\frac{c}{\gamma} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial c}$ و $cu' \frac{\partial \phi'}{\partial x}$ مشکل می‌باشد این جملات عموماً حذف می‌شوند و قانون

اول فیک^۱ به صورت زیر مطرح می‌شود:

$$J_d = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (۷-۳)$$



شکل (۸-۳) شماتیک انتشار یون‌های کلر در یک سیستم محلول خالص

۲-۴-۳ حالت پایدار انتشار^۲ و بعد ضریب انتشارپذیری

در حالت انتشارپذیری پایدار، تغییری در غلظت، نسبت به زمان مشاهده نمی‌شود. حالت

انتشارپذیری پایدار با وضعیت زیر مشخص می‌شود [۲۱]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (۸-۳)$$

^۱ Fick

^۲ Steady state

در یک سیستم مایع خالص، آحاد شار (J) در معادله (۷-۳) برابر $\frac{kg_{cl}}{m^2_{solution} \cdot s}$ و گرادیان غلظت

برابر $\frac{kg_{cl}}{m^3_{solution} \cdot m_{x-coordinate}}$ می باشد. بنابراین واحد ضریب انتشارپذیری به صورت زیر می باشد:

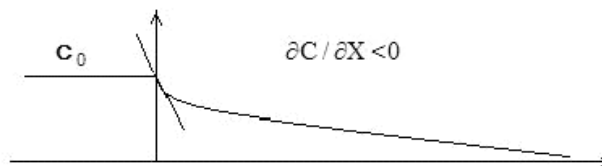
$$D = \frac{J_d}{-\frac{\partial c}{\partial x}} \Rightarrow \frac{\frac{kg_{cl}}{m^2_{solution} \cdot s}}{\frac{kg_{cl}}{m^3_{solution} \cdot m_x}} = \frac{\frac{kg_{cl}}{m^2_{solution} \cdot s}}{\frac{kg_{cl}}{(m^2_{solution} \cdot m_x)}} = \frac{m_x^2}{s} \quad (9-3)$$

در بیشتر موارد (در مورد انتشار یون کلر به داخل بتن) منبع کلر در مایع خارج بتن مانند

شکل (۹-۳) قرار دارد. در حالت انتشار پایدار، شار ثابت می ماند (شار با زمان تغییر نمی کند) و ضریب

انتشار پذیری که از حالت پایدار بدست می آید (D_{ss})، به صورت زیر عنوان می گردد:

$$D_{ss} = \frac{J_{concrete}}{-\frac{\partial c}{\partial x}} \Rightarrow \frac{\frac{kg_{cl}}{m^2_{concrete} \cdot s}}{\frac{kg_{cl}}{m^3_{solution} \cdot m_x}} = \frac{m^3_{solution} \cdot m_x}{m^2_{concrete} \cdot s} \quad (10-3)$$



شکل (۹-۳) انتشار یون های کلر در یک سیستم بتن - مایع

همانطور که مشاهده می‌شود D_{ss} دارای بعد پیچیده‌ای است. برای ساده‌تر کردن این موضوع یک ساختار متخلخل همگن در نظر گرفته می‌شود که در آن منافذ در راستای X برابر تخلخل آن (ϵ) در نظر گرفته می‌شود. و این به این معنی است که سطح منافذ در هر سطح قطع مستقل از جهت X می‌باشد. بنابراین حجم منافذ و یا تخلخل به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

(۱۱-۳)

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{V_{\text{pore}}}{V_{\text{material}}} = \frac{A_{\text{pore}} \cdot \int dx}{A_{\text{material}} \cdot \int dx} \longrightarrow \frac{m^3_{\text{pore}}}{m^3_{\text{material}}} = \frac{m^2_{\text{pore}} \cdot m_x}{m^2_{\text{material}} \cdot m_x} \\ &= \frac{m^2_{\text{pore}}}{m^2_{\text{material}}} \end{aligned}$$

در شرایط اشباع:

(۱۲-۳)

$$\begin{aligned} \frac{A_{\text{solution}}}{A_{\text{material}}} &= \frac{A_{\text{pore}}}{A_{\text{material}}} = \epsilon \longrightarrow \frac{m^2_{\text{solution}}}{m^2_{\text{material}}} = \frac{m^2_{\text{solution}} \cdot m_x}{m^2_{\text{material}} \cdot m_x} \\ &= \frac{m^3_{\text{solution}}}{m^3_{\text{material}}} \end{aligned}$$

بنابراین:

$$D_0 = \frac{D_{ss}}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{J_{\text{concrete}}}{-\frac{\partial c}{\partial x}} \longrightarrow \frac{1}{\left(\frac{m^2_{\text{solution}}}{m^2_{\text{concrete}}}\right)} \cdot \frac{(m^2_{\text{solution}} \cdot m_x) m_x}{m^2_{\text{concrete}} \cdot S} = \frac{m^2_x}{S} \quad (۱۳-۳)$$

چنین ضریبی، ضریب انتشارپذیری واقعی نامیده می‌شود که با D_0 نشان داده می‌شود و برابر

است با:

$$D_0 = \frac{D_{ss}}{\epsilon} \quad (۱۴-۳)$$

و یا:

$$J_{0d} = -D_0 \frac{\partial c}{\partial x} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن J_{od} شار در یک سطح واحد می‌باشد.

۳-۴-۳ حالت انتشارپذیری ناپایدار^۱

در اکثر موقعیت‌های واقعی پروفیل غلظت و گرادیان غلظت با زمان تغییر می‌کند. همانطور که می‌دانیم در داخل بتن مقداری از یون‌های کلر پیوند می‌یابند. این یون‌ها با یون‌های دیگر واکنش داده و اصطلاحاً در داخل بتن گیر می‌افتند. ولی یون‌های آزاد به راحتی داخل و خارج می‌شوند.

در شرایط ناپایدار، این افزایش میزان کل یون‌های کلر (پیوندی و آزاد) است که منجر به تفاوت

شار می‌شود بنابراین:

$$\frac{\partial c_t}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c_b}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} \left(1 + \frac{\partial c_b}{\partial c} \right) = - \frac{\partial J_{od}}{\partial x} = D_0 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن c_t میزان کل یون‌های کلر، c میزان یون‌های کلر آزاد، c_b میزان یون‌های کلر پیوندی می‌باشد.

و یا در قالب قانون دوم فیک [۲۲]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_0}{1 + \frac{\partial c_b}{\partial c}} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D_{nss} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (۱۷-۳)$$

که در آن D_{nss} ضریب انتشارپذیری در حالت ناپایدار می‌باشد:

$$D_{nss} = \frac{D_{ss}}{\varepsilon \left(1 + \frac{\partial c_b}{\partial c} \right)} \quad (۱۸-۳)$$

^۱ Non-steady state

ظرفیت پیوندی کلر وابستگی زیادی به غلظت یون‌های کلر آزاد دارد. در مدل‌ها معمولاً با ساده سازی معمولاً D_{nss} را به صورت ثابت در نظر می‌گیرند. معادله (۱۶-۳) را می‌توان به صورت تحلیلی با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه به صورت زیر حل نمود:

$$c = c_0 \quad x = 0 \quad t > 0 \quad \text{شرایط مرزی:}$$

$$c = c_i \quad x > 0 \quad t = 0 \quad \text{شرایط اولیه:}$$

و در نتیجه راه حل تحلیلی معادله (۱۶-۳) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{c_0 - c}{c_0 - c_i} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{nss} \cdot t}}\right) \quad (۱۹-۳)$$

هنگامی که غلظت کلر اولیه $C_i=0$ باشد، معادله (۱۹-۳) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{c}{c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{nss} \cdot t}}\right) \quad (۲۰-۳)$$

که این همان تابع خطای قانون دوم فیک می‌باشد و باید توجه داشت که در معادلات ۱۹-۳ و ۲۰-۳، کلیه غلظت‌ها برابر غلظت یون‌های کلر آزاد در نظر گرفته می‌شوند. واضح است که اگر هیچ کلر پیوندی وجود نداشته باشد و یا رابطه بین یون‌های کلر پیوندی و آزاد خطی باشد (یعنی رابطه بین کلر پیوندی و کلر آزاد به صورت $C_b = \alpha \cdot C$ در نظر گرفته شود) غلظت‌ها را می‌توان به صورت غلظت کل یون کلر تعریف نمود. در حال حاضر رابطه خطی میان کلر پیوندی و کلر آزاد کمتر در نظر گرفته می‌شود و معمولاً رابطه بین آنها را به صورت $C_b = \alpha \cdot C^\beta$ فرض می‌شود. در این حال حتی اگر مقدار ضریب انتشار پذیری D_{nss} ثابت فرض شود بازهم در معادلات فوق میزان کلر آزاد نمی‌تواند با کلر کل جایگزین شود زیرا:

$$\frac{c_{ts} - c_t}{c_{ts} - c_{ti}} = \frac{(c_0 + \alpha c_0^\beta) - (c + \alpha c^\beta)}{(c_0 + \alpha c_0^\beta) - (c_i + \alpha c_i^\beta)} \neq \frac{c_0 - c}{c_0 - c_i} \quad (21-3)$$

بنابراین از نتایج فوق مشخص است که استفاده از راه حل تابع خطا به صورت زیر:

$$c(x, t) = c_{ts} - (c_{ts} - c_{ti}) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{nss} \cdot t}} \right) \quad (22-3)$$

دارای ساده‌سازی بسیار زیادی است. بنابراین تخمین ضریب انتشارپذیری و غلظت سطحی که بوسیله پروفیل حاصل از داده‌ها بدست می‌آید فقط توصیفی از پروفیل کلر برای شرایط خاصی از بتن تحت شرایط رویایی مشخص می‌باشد. و از این داده‌ها نمی‌توان برای دیگر شرایط و حتی برای پیش بینی نفوذ کلر تحت دیگر شرایط رویارویی استفاده نمود [۱۸].

۳-۵ روش اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر یون کلر

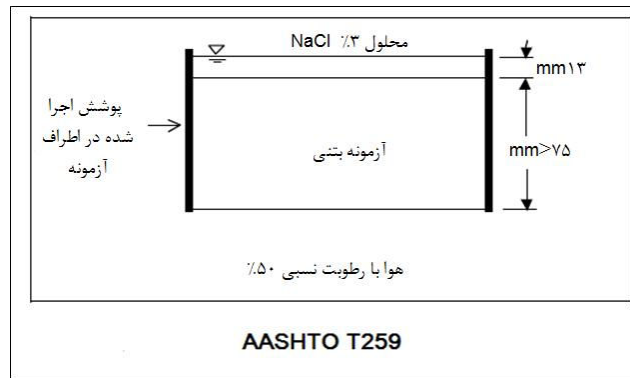
این قسمت مروری بر روش‌های معمول تخمین نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر می‌باشد.

۳-۵-۱ آزمایش AASHTO T259^۱

آزمایش AASHTO T259 [۲۳] یک آزمایش دراز مدت برای اندازه‌گیری نفوذ کلر به داخل بتن می‌باشد. برای انجام این آزمایش از آزمون‌هایی با ارتفاع بیشتر از ۷۵^{mm} و سطح مقطع ۳۰۰^{mm}² استفاده می‌شود. این آزمون‌ها به مدت ۱۴ روز تحت عمل‌آوری مرطوب قرار می‌گیرند و پس از آن در یک اتاق با رطوبت نسبی ۵۰٪ به مدت ۲۸ روز نگهداری می‌شوند. اطراف آزمون‌ها (به استثنای دو انتهای بالایی و پایینی) پوشانده می‌شوند و پس از آن بر روی سطح بالایی آزمون به ارتفاع ۱۳^{mm}،

^۱ - Standard Method of Test for Resistance of Concrete to chloride Ion penetration (Salt ponding Test)

محلول NaCl ۳٪ به مدت ۹۰ روز قرار داده می‌شود (شکل ۳-۱۰). در حالیکه قسمت انتهایی آزمون در محیط با رطوبت نسبی ۵۰٪ قرار دارد. پس از این مدت غلظت یون کلر در قطعات 0.5^{inch} آزمون مورد آزمایش قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۱۰) آزمایش AASHTO T259

۳-۵-۲ آزمایش NT Build 443^۱

آزمایش Bulk Diffusion [۲۴] برای حل کمبودهای آزمایش Salt Ponding به وجود آمده است .

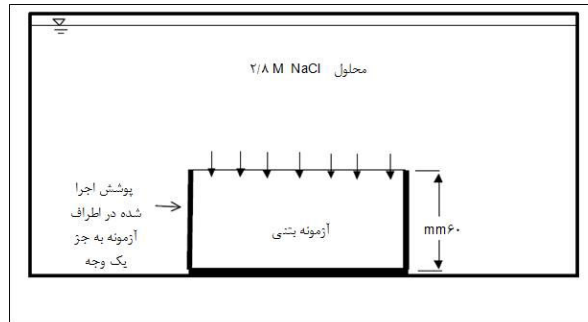
اولین تفاوت آزمایش Bulk Diffusion در شرایط رطوبتی اولیه آزمون‌ها می‌باشد. در این روش آزمایش، آزمون‌ها ابتدا با آب آهک اشباع می‌شوند (بر خلاف Salt Ponding Test که ابتدا به مدت ۲۸ روز خشک می‌شوند) این کار هرگونه جذب اولیه^۲ به هنگام رویارویی با کلر را حذف می‌کند.

علاوه بر آن به جای پوشاندن اطراف آزمون (مطابق با Salt Ponding) تنها یک وجه آزمون در معرض محلول 2.8M NaCl قرار می‌گیرد. و آزمون‌ها به مدت حداقل ۳۵ روز در این شرایط نگهداری

^۱ - Bulk Diffusion Test (Nord Test NT Build 443)

^۲ Initial sorption effect

می‌شوند. مطابق شکل (۳-۱۱) برای اندازه‌گیری میزان یون کلر، پودرهایی با گامهای 0.5^{mm} از آزمون تهیه می‌شود. و میزان یون کلر مطابق با AASHTO T260 [۲۴] اندازه‌گیری می‌شود. پس از آن حل تابع خطای قانون دوم Fick بر آن برآزش شده و میزان ضریب انتشارپذیری تخمین زده می‌شود.

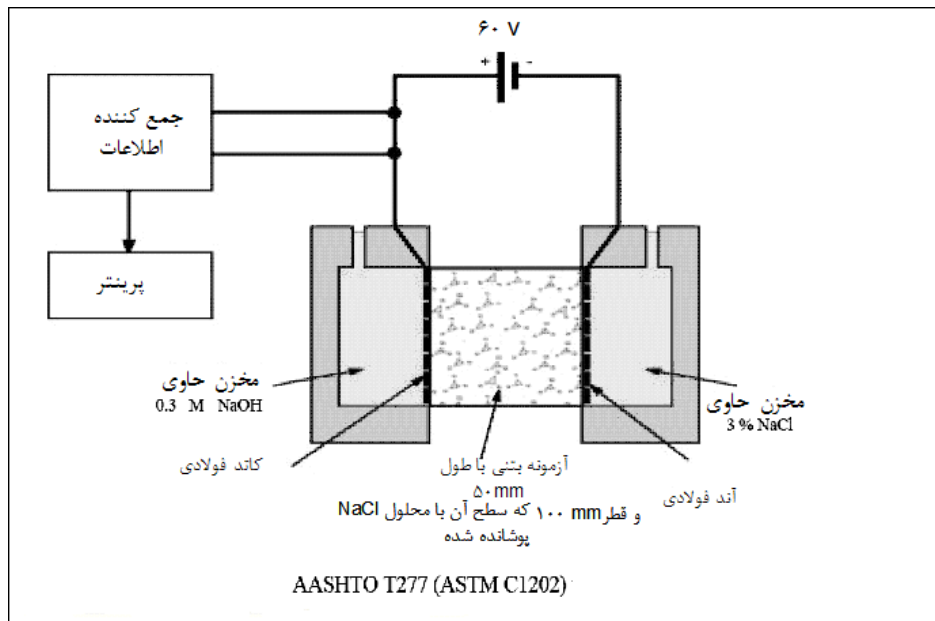


شکل (۳-۱۱) آزمایش AASHTO T259

۳-۵-۳ آزمایش AASH TO T277^۱

در روش آزمایش AASHTO T277 [۲۵] آزمون اشباعی با ابعاد $50 \times 100 \text{ mm}$ (ضخامت 50 mm و قطر 100 mm) در معرض جریان مستقیم 6.7 به مدت 6 ساعت قرار می‌گیرد شکل (۳-۱۲). در یک مخزن محلول $0.3\% \text{ NaCl}$ و در دیگری 3 M NaOH ریخته می‌شود. جریان کل عبور کرده اندازه‌گیری و با جدول (۳-۳) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. این آزمایش که توسط Whiting در سال ۱۹۸۱ ابداع شده معمولاً به نام Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) مشهور است. در حالی که این نام نادرست می‌باشد چرا که این حرکت یون‌هاست که اندازه‌گیری می‌شود و نه نفوذپذیری. علاوه بر آن حرکت تمامی یون‌ها (ونه فقط یون کلر) نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

^۱ -Electrical Indication of concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration (Rapid Chloride Permeability Test)



شکل (۳-۱۲) آزمایش AASHTO T277

جدول (۳-۳) نفوذپذیری یون کلر در بتن مطابق با استاندارد ASTM C1202

RCPT ratings (per ASTM C1202)

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
> 4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very Low
< 100	Negligible

۳-۵-۴ نتیجه‌گیری

آزمایش‌های شرح داده شده به دو دسته (بلند مدت و کوتاه مدت) تقسیم شده‌اند که هر کدام مزایا و معایبی دارد.

به عنوان مثال می‌توان ملاحظه نمود که روش AASHTO T259 و Nordtest نفوذ یون‌های کلر را به خوبی مدل می‌نمایند ولی طولانی مدت بوده و به عنوان کنترل کیفیت در هنگام ساخت نمی‌توانند به کاربرده شوند حال آنکه RCPT رابطه کمتری با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد دارد ولی در هر حال یک آزمایش کوتاه مدت است.

فصل چهارم

آزمایش‌ها

براساس مطالعات انجام شده که در بخش‌های قبل ارائه شد، عوامل مختلفی در مسأله پایایی بتن که همواره بصورت یک معضل در سواحل جنوبی کشور محسوب می‌شود، تأثیر دارند. برای این منظور، آزمون‌های بتنی مشخصی ساخته شده و پس از قرارگیری در معرض یون کلر، با محاسبه پروفیل نفوذ یون کلر در بتن مقادیر ضریب انتشارپذیری برای حالات مختلف بدست آمده است.

۴-۲ ساخت آزمون‌ها

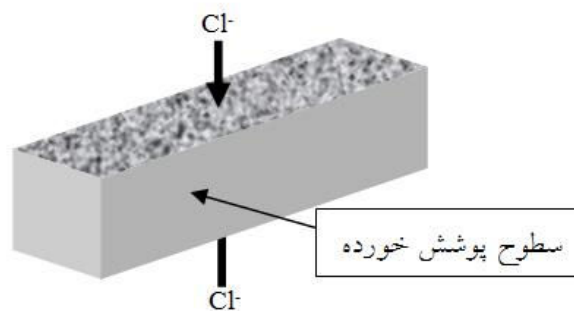
پس از مطالعه و بررسی چندین طرح مشابه تحقیقاتی در کشورهای دیگر با توجه به نوع پروژه و نیاز به حضور آزمون‌ها برای سال‌های متوالی در منطقه به منظور تحقیقات آینده، نهایتاً آزمون‌های منشوری در ابعاد $15 \times 15 \times 60$ cm به عنوان آزمون‌های اصلی برای قرارگیری در محیط خلیج فارس انتخاب شد. طرح اختلاط بتن براساس دستیابی به کارائی یکنواخت با اسلامپ ۵ تا ۸ سانتی‌متر برای تمامی حالات انجام شد. با توجه به تجربیات مشابه در دیگر پروژه‌های تحقیقاتی و همچنین برای مقایسه نتایج با دیگر طرح‌های پژوهشی، مقدار عیار مواد سیمانی به میزان ثابت 400 kg/m^3 ، درصد آب به مواد سیمانی طرح‌های اختلاط ۰.۳۵٪، ۰.۴۰٪، ۰.۴۵٪ و ۰.۵۰٪ و همچنین درصد میکروسیلیس طرح‌های اختلاط ۰٪، ۰.۵٪، ۱.۷/۵٪، ۱۰٪ و ۱۲/۵٪ در نظر گرفته شد. (تصویر ۱)

پس از پر کردن قالب‌های منشوری از میز لرزان برای تراکم بتن استفاده شد و بعد از صاف کردن سطوح، قالب‌ها با گونی خیس پوشانده شده، به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز کردن قالبها، آزمون‌های بتنی به مدت ۲۸ روز داخل آب آهک اشباع با دمای 20 ± 2 درجه سانتیگراد نگهداری شدند.

۳-۴ قرارگیری در محیط

۱-۳-۴ آماده‌سازی آزمون‌ها برای قرارگیری در محیط

پس از پایان عمل آوری، چهار سطح جانبی آزمون‌های منشوری مطابق شکل (۱-۴) با پوشش سطحی با پایه پلی اورتان که در برابر شرایط حاد جنوب بسیار مقاوم است پوشانده شد تا نفوذ بصورت یک‌بعدی صورت گیرد و در نتیجه محاسبات مربوط به ضریب انتشارپذیری بتن و مدل‌سازی این پدیده آسانتر گردد. این پوشش پس از دو روز کاملاً خشک شده و آزمون‌ها آماده قرارگیری در محیط می‌شوند (تصویر ۲).



شکل (۱-۴) شمای آزمون‌های منشوری پس از اجرای پوشش

۲-۳-۴ قرارگیری در محیط

پس از آماده‌سازی سایت بندرعباس آزمون‌های منشوری که در آزمایشگاه ساخته شده بودند به محل اسکله فولاد منتقل شدند. در هر قسمت رویارویی، تمهیدات لازم برای رویارویی کنترل شده و حفاظت آزمون‌ها انجام گرفته بود. مشخصات هر یک از این شرایط رویارویی و نحوه استقرار آزمون‌ها در ذیل بطور کامل توضیح داده شده است.

الف) اتمسفر :

برای استقرار آزمون‌های منشوری در شرایط رویارویی اتمسفر، سکویی چوبی به ارتفاع حدود ۱/۵ متر از سطح زمین در ساحل ساخته شد، که فاصله آن از نزدیکترین نقطه دریا حدود ۷ متر می‌باشد.

این فاصله به گونه‌ای انتخاب شده بود که پاشش آب دریا در طول مدت رویارویی اثری بر آزمون‌ها نگذارد و همواره در حالت خشک باقی بمانند. آزمون‌ها بر روی این سکو قرار داده شدند و در زیر آنها از نوارهای چوبی برای عبور هوا استفاده گردید (تصویر ۳). آزمون‌های منشوری بصورتی قرار داده شدند که سطوح پوشیده نشده آنها در بالا و پایین باشد.

ب) خاک :

برای استقرار آزمون‌ها در شرایط مدفون در خاک گودالی به عمق حدود ۱ متر در کنار سکوی شرایط اتمسفر حفر گردید و آزمون‌های مربوطه داخل آن قرار گرفتند (تصویر ۳). همانند حالت اتمسفر کلیه آزمون‌های منشوری طوری قرار داده شدند که سطوح پوشیده نشده آنها، در جهت‌های بالا و پایین باشد. تراز قرارگیری آنها در خاک به نحوی انتخاب شدند که بالا و پایین رفتن سطح تراز آب، در فصول مختلف سال آزمون‌ها را اشباع نکند.

ج) جزر و مد:

در قسمت جزرومد، آزمون‌ها داخل سبدهای مشبک پلاستیکی به نحوی قرار گرفتند که سطوح پوشش نخورده به سمت بالا و پایین باشد و برای برقراری جریان آب دریا در زیر آزمون‌ها، از نوارهای چوبی استفاده گردید. کلیه سبدها به هم بسته شدند، تا آزمون‌ها در اثر برخورد امواج مفقود نگردند (تصویر ۴). سبدهای حاوی آزمون‌ها بر روی یک سکوی بتنی ساخته شده در منطقه جزرومد دریا قرار

داده شدند. تراز این سکو از سطح تراز آب دریا‌های آزاد حدود ۲/۲ متر می‌باشد و این تراز به نحوی محاسبه شده است که مجموع زمان‌های استغراق آزمون‌ها در زیر سطح آب دریا با مجموع زمان‌های خشک شدن آن‌ها در خارج از آب حدوداً برابر باشد. به عبارت دیگر آزمون‌ها در نیمی از زمان کل استقرار، اشباع می‌باشند.

(د) مغروق :

در ناحیه مغروق، آزمون‌ها داخل وان‌های پلی‌اتیلین قرار گرفتند که همواره از آب دریا پر می‌باشند. این وان‌ها در کنار ناحیه جزرومد قرار داده شدند و با میله‌های داربست کاملاً ثابت گشتند تا با نیروی موج دریا جابجا نشوند (تصویر ۵). در این ناحیه نیز وجه‌های پوشش نخورده آزمون‌ها در سمت‌های بالا و پایین قرار گرفتند و در زیر آنها برای عبور آزاد آب دریا از نوارهای چوبی استفاده گردید.

البته قابل ذکر است که در این تحقیق از نمونه‌های قرار گرفته در قسمت جزر و مد استفاده شده است.

۳-۳-۴ نمونه برداری از آزمون‌ها

پس از قرارگیری آزمون‌های منشوری در محل سایت پایائی بتن در بندرعباس، در سه دوره زمانی ۳ ماهه، ۹ ماهه و ۳ ساله عملیات نمونه‌برداری از آزمون‌ها برای آزمایش تعیین میزان یون کلر انجام شد. طبق برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته، قرار شد در هر زمان نمونه‌برداری تکه‌ای به عرض ۱۰ سانتی‌متر از انتهای آزمون‌های منشوری بریده شود و سطح بریده شده، پوشش خورده تا در زمان‌های بعد نیز قابل نمونه‌گیری برای آزمایش باشد. برای این منظور، ابتدا اره‌ای برقی برای برش آزمون‌ها طراحی و ساخته شد که طرح آن از اره آتشی مورد استفاده برای برش پروفیل‌های فولادی الهام گرفته شده بود (تصویر ۶).

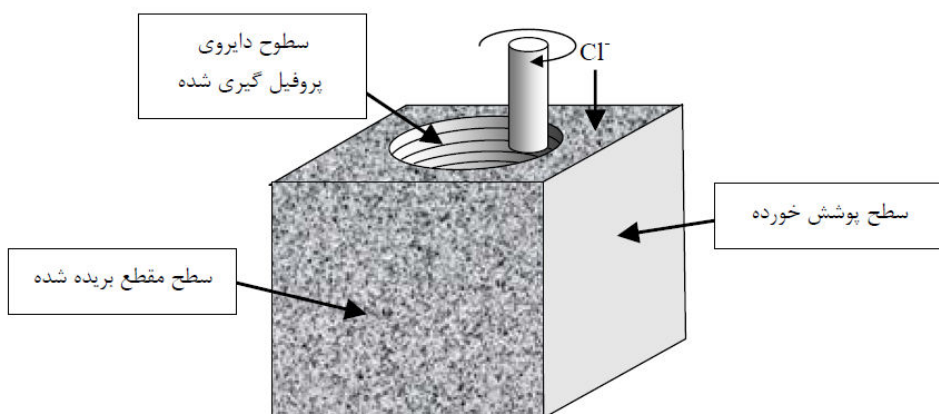
با انتقال اره به محل سایت و اعزام کارشناسان انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی به تدریج آزمون‌های شرایط مختلف رویارویی بریده شده، روی قسمت بریده شده کد گذاری شد و سطح بریده شده آزمون باقیمانده با پوشش پایه پلی‌اورتان پوشانده شد تا آماده قرارگیری در محل برای آزمایش‌ها در دوره‌های زمانی بعد شود.

۴-۳-۴ پودرگیری از آزمون‌ها

پس از انتقال نمونه‌های بریده شده به تهران، کار پودرگیری از آزمون‌ها طبق استاندارد NT Build 443 در آزمایشگاه مصالح ساختمانی آغاز شد. برای این منظور، از قبل دستگاه پروفیل‌گیری تهیه و گیره نگهداری متناسب با آزمون‌های منشوری ساخته شد. در این دستگاه مطابق شکل (۴-۲)، با دو نوع چرخش متعادل بر روی سطح پروفیل‌هایی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر در مساحت‌های قابل تنظیم در سطوح دایروی از آزمون‌ها تهیه می‌شود. جنس این مته از آلیاژ خاصی بوده که احتیاج به سرد کردن با آب نداشت (تصاویر ۷ و ۸).

طبق این استاندارد لایه‌ای به ضخامت ۱ mm از روی نمونه برداشته شد. که به دلیل تأثیر عوامل دیگر بر نفوذ یون کلر مانند کلر شستگی یا بلوری شدن آزمایش نمی‌شود. از آن به بعد در ۸ لایه از بتن پودرگیری می‌شود. [۲۶]

عمق هر لایه پس از خارج کردن پودر در شش نقطه نسبت به سطح بتن با کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. میانگین این شش نقطه به عنوان عمق از سطح بتن در آن لایه پودرگیری منظور شد. با تفاضل عمق‌ها از هم و محاسبات مربوطه عمق متوسط هر لایه نسبت به سطح بتن بدست آمد. لازم بذکر است طبق استاندارد حداقل ۶ لایه پودر برای ترسیم پروفیل یون کلر و محاسبات مربوط به ضریب انتشارپذیری مورد احتیاج است.



شکل (۴-۲) پروفیل گیری از آزمون‌های پایگاه بندرعباس

در اینجا، تخمین عمق نفوذ یون کلر که تا آن عمق باید پروفیل‌گیری شود، برای شرایط مختلف رویارویی و طرح‌های مختلف اختلاط از اهمیت ویژه‌ای به لحاظ صرفه‌جویی در وقت و هزینه، برخوردار بود. برای تعیین حدود نفوذ یون کلر، سطوح بریده شده با محلول ۰/۱ نرمال $AgNO_3$ اسپری شد. در این کار که طبق استاندارد NT Build 492 انجام می‌گردد با تشکیل رسوب سفید رنگ $AgCl$ ، عمق نفوذ یون کلر در طرح‌های مختلف بدست آمد. به این ترتیب این ضخامت نفوذ به ۸ قسمت تقسیم شده و دستور العملی برای قطر سطوح و گام‌های پودرگیری در عملیات پودرگیری به منظور دستیابی به حداقل ۱۰ گرم پودر در هر لایه تهیه شد. همچنین برای نگهداری پودرها از قوطی فیلم عکاسی که برحسب نام آزمون و عمق لایه پودرگیری نام گذاری شده بودند، استفاده شد. [۲۷]

(تصویر شماره ۹)

۴-۴ تعیین میزان یون کلر در پودرهای تهیه شده

روش رایج برای تعیین درصد یون کلر در بتن یا سیمان، انجام تیتراسیون با نیترات نقره است.

که طبق استاندارد ASTM C114 یا AASHTO T269 انجام می‌شود [۲۸ و ۲۹].

در استاندارد ASTM مقدار کل کلرید موجود در سیمان با آزمایش تیتراسیون با نیترا نقره اندازه گیری می شود. این روش برای بتن سخت شده، کلینکر و همچنین سیمان پرتلند خام نیز قابل استفاده است. در این آزمایش هیچ ترکیب کننده دیگری نباید در واکنش های آزمایش تداخل ایجاد کند. بطور خلاصه، طی این آزمایش ۱۰ گرم از پودر مورد نظر داخل ۷۵ میلی لیتر آب مقطر و بعد ۲۵ میلی لیتر اسیدنیتریک حل شده و پس از دو دقیقه، تا رسیدن به نقطه جوش حرارت داده می شود. پس از سرد شدن محلول و عبور آن از صافی، محلول آماده آزمایش می گردد. قبل از آن ۲ میلی لیتر کلرید سدیم با نرمالیت ۰/۰۵ داخل بشر حاوی محلول ریخته می شود. پس از نصب الکترودهای مخصوص، کم کم نیترا نقره ۰/۰۵ نرمال به محلول حاوی یون کلر اضافه شده و با تشکیل رسوب AgCl، اختلاف پتانسیل زیاد می شود. هر دفعه مقدار نیترا نقره اضافه شده و اختلاف پتانسیل مربوطه ثبت می گردد (تصویر شماره ۱۰).

طی این آزمایش تغییرات اختلاف پتانسیل که ابتدا کم است، زیاد شده و سپس دوباره کم می شود. در این حالت، آزمایش تمام شده و با رسم نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل بر حسب مقدار نیترا نقره، نقطه عطف بدست آمده، که با رابطه ای به درصد یون کلر مربوط می شود. در استاندارد AASHTO مرحله محلول سازی با روش ASTM متفاوت است.

با توجه به تعداد زیاد پودرهای مورد آزمایش در این پروژه، روش تیتراسیون مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار زیادی بود. پس از انجام چند آزمایش به این نتیجه رسیده شد که برای این پروژه نیاز به روش سریع و دقیق دیگری است. سرانجام پس از مدتی تحقیق و بررسی به کمک گروه شیمی دانشکده علوم دانشگاه تهران روش رنگ سنجی نوری (فتومتری) برای اندازه گیری میزان یون کلر در محلول راه اندازی شد (تصویر شماره ۱۱).

در این روش، محلول سازی همانند استاندارد ASTM C114 انجام شده، محلول نهائی برای

مشخص ماندن میزان یون کلر به حجم 250^{cc} رسانده شده و در قوطی‌های در بسته مخصوص ذخیره می‌گردید. در آزمایش اندازه‌گیری یون کلر از دستگاه فتومتری با فیبرنوری استفاده گردید. در این دستگاه ابتدا اشعه نوری با طول موج معین قابل تنظیم از طریق فیبرنوری از داخل محلول عبور کرده و پس از بازتاب از آینه داخل محلول به دستگاه برمی‌گردد. اختلاف طول موج نور بازگشتی با طول موج نور ارسالی معرف میزان نور جذب شده توسط محلول است که می‌تواند به میزان یون کلر مربوط شود. برای شناسایی یون کلر که محلول اولیه آن بی‌رنگ است، از مواد شیمیایی نیترات آهن و تیوسیانید جیوه استفاده می‌شود. کمپلکس حاصل از ترکیب این دو ماده تولید رنگ نارنجی می‌نماید که در حضور یون کلر شدت رنگ آن متفاوت بوده و بستگی به میزان یون کلر دارد و با افزایش آن بیشتر می‌شود. به این ترتیب در اثر تغییر شدت رنگ کمپلکس فوق میزان نور جذب شده توسط محلول تفاوت کرده و میزان یون کلر به راحتی توسط رابطه مستقیمی به میزان جذب نور مربوط می‌شود. این رابطه در ابتدا با ساخت محلول‌های با مقدار مشخص یون کلر و اندازه‌گیری جذب نور آنها بدست می‌آید و برای محلول‌های با میزان نامشخص یون کلر استفاده می‌شود.

سرعت این روش تقریباً ۵ برابر بیشتر از روش تیتراسیون است و انرژی بسیار کمتری برای انجام آزمایش می‌خواهد و محاسبات بعدی آن آسان‌تر است.

۴-۵ محاسبه ضریب انتشارپذیری

میزان نفوذ یون کلر برحسب عمق از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشارپذیری

فیک بیان می‌شود: [۲۲]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (۲-۴)$$

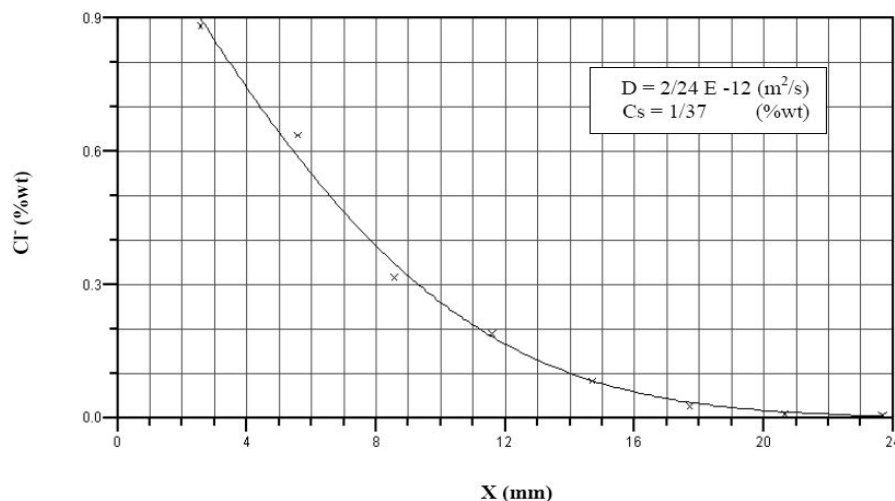
پس از حل، معادله دیفرانسیل فوق بصورت زیر درمی‌آید:

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (3-4)$$

که در آن x فاصله از سطح بتن برحسب متر، t زمان شروع نفوذ برحسب ثانیه، D_c ضریب انتشارپذیری بتن برحسب متر مربع بر ثانیه، میزان درصد وزنی یون کلر در سطح بتن C_s و $C(x,t)$ میزان درصد وزنی یون کلر در عمق x نسبت به سطح و در زمان t است. erf هم تابع خطاست که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\beta^2} d\beta \quad (4-4)$$

در هر پروفیل، دو سری هشت‌تایی درصد وزنی یون کلر و عمق مربوطه وجود دارد. با استفاده از نرم افزار Matlab، منحنی مربوط به معادله (3-4) از میان نتایج آزمایش برازش شده و مقادیر D_c و C_s بدست می‌آید. با توجه به منحنی عبور داده شده توسط نرم افزار، نقاط خطا شناسائی و حذف شده، محاسبات تکرار می‌گردند تا اعداد نهائی D_c و C_s قابل اطمینان باشند. نمونه‌ای از پروفیل یون کلر در شکل (3-4) آورده شده است.



شکل (3-4) پروفیل یون کلر در بتن و عبور منحنی مربوط به قانون دوم فیک از میان نقاط مربوط

فصل پنجم

مدلسازی ضریب انتشارپذیری بتن

به روش ANFIS

برآوردی کلی از آثار پارامترهای مختلف بر ضریب انتشار پذیری بتن می‌تواند ما را در قضاوت‌ها و تصمیم‌گیری‌ها، بسیار یاری کند. رهیافت عصبی - فازی می‌تواند در این زمینه بسیار مفید باشد. با توجه به شناختی که تاکنون از سیستم عصبی - فازی پیدا کرده‌ایم، می‌دانیم که می‌تواند توسط یک مجموعه از داده‌ها تعلیم دیده و بدون اینکه هیچ معلومات قبلی یا پیش فرضی در مورد سیستم داشته باشیم، ساختار آنرا به صورت روشن با قوانین زبانی بیان کند. این مجموعه از قوانین علاوه بر اینکه می‌تواند ما را در شناخت کلی و قضاوت یاری کند، از آنجا که قوانین کلی حاکم بر سیستم را ارائه می‌کند، می‌تواند پایه‌ای برای تحقیقات بعدی در این زمینه باشد.

۵-۲ بررسی و پالایش داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این تحقیق از آزمون‌هایی با سنین ۳ ماهه، ۹ ماهه و ۳ ساله استخراج شده است. همچنین پارامترهای تاثیرگذار بر ضریب انتشارپذیری، نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس و زمان در نظر گرفته شده است.

همچنین با توجه به آن که پودرگیری از آزمون‌ها از دو وجه بالا و پایین آن صورت پذیرفته است و با توجه به آن که شرایط بالا و پایین آزمون‌ها یکسان نمی‌باشد، میانگین‌گیری از نتایج نمی‌تواند بیان‌کننده رفتار بتن باشد. وجه پایین آزمون‌ها به علت تماس با تکیه‌گاه خود پس از چند سال در بعضی از موارد شرایط ایده‌آل خود را از دست داده‌اند. بنابراین بحث در مورد آزمون‌ها با استناد به نتایج وجه بالای آزمون‌ها می‌باشد.

با توجه به نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی خلیج فارس و بررسی‌های به عمل آمده ۶۰ سری داده برای استفاده در این تحقیق در نظر گرفته شد.

۳-۵ نکات در نظر گرفته شده

در مدل‌های ارائه شده در این تحقیق، آب به مواد سیمانی (W/C)، درصد میکروسیلیس (SF)، مدت زمان قرارگیری در محیط (Time) به عنوان ورودی و ضریب انتشارپذیری بتن (D) به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. شرایط رویارویی نمونه‌ها در ناحیه جزر و مد قرار داشته و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند.

شایان ذکر است که مدل‌های ارائه شده در این تحقیق توسط نرم‌افزار MATLAB آماده شده است.

۱-۳-۵ فرایند یادگیری و معتبر سازی

با توجه به تعداد داده‌های موجود برای این تحقیق، تعداد ۴۲ سری داده برای فرایند یادگیری (تعلیم) و تعداد ۱۸ سری داده متفاوت از داده‌های تعلیم، برای فرایند ارزش‌گذاری^۱ استفاده شد.

در این تحقیق ابتدا سیستم سوگنو درجه یک برای مدل‌ها در نظر گرفته شد که با بررسی خروجی و قوانین بدست آمده، جواب منطقی از این مدل‌ها بدست نیامد. سپس از سیستم سوگنو درجه صفر استفاده شد که این مدل‌ها قوانین و نتایج منطقی‌تری نشان دادند. و در انتها منطقی‌ترین مدل به عنوان مدل منتخب در نظر گرفته شد و با بررسی خروجی و قوانین بدست آمده از آن، اثر پارامترهای مختلف بر ضریب انتشارپذیری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از تابع گوسین برای مقادیر زبانی پارامترهای ورودی استفاده شد.

¹- Validation

تابع گوسین^۱ (دو پارامتری)

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۱-۵)$$

برای بهینه کردن پارامترهای توابع عضویت، از یادگیری ترکیبی استفاده شد. همچنین جهت جلوگیری از تطابق بیش از حد^۲ از کمترین خطای آزمون^۳ به عنوان ملاک متوقف سازی عملیات استفاده شد.

برای محاسبه خطای موجود بین پارامترهای اندازه گیری شده و پارامترهای پیش بینی شده در این تحقیق از دو نوع خطا استفاده شد:

۱- جذر میانگین مربعات خطا^۴:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{p}} \quad (۳-۵)$$

۲- مجموع مربعات خطا^۵:

$$SSE = \sum_i (t_i - o_i)^2 \quad (۴-۵)$$

1- Gaussian

2- Over fitting

3- Testing error

4 - Root-Mean -Squared Error

5- Sum of Squared Error

همچنین کسر تغییرات مطلق (R^2) ^۱ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{\sum_i (o_i)^2} \right) \quad (5-5)$$

که در این روابط t مقدار هدف، o خروجی مدل و p تعداد داده‌ها می‌باشد.

۴-۵ برآورد ضریب انتشارپذیری

۱-۴-۵ مدل سوگنو درجه یک

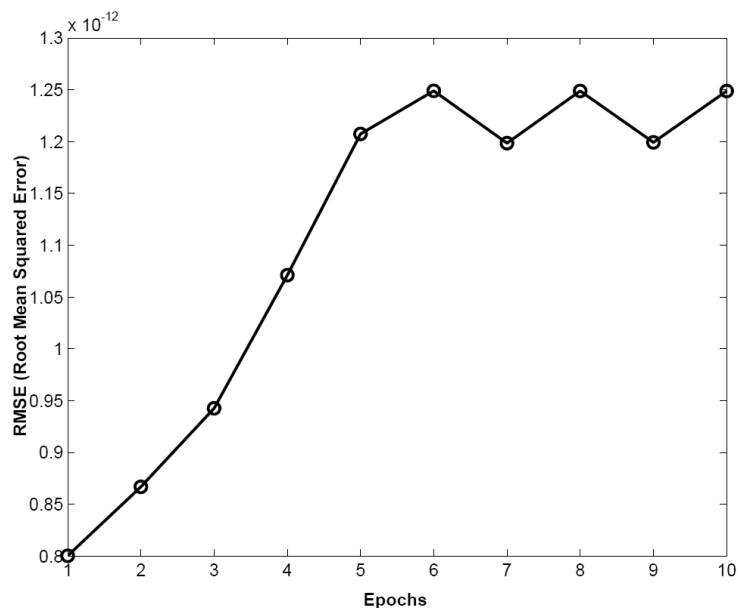
۱-۱-۴-۵

در این مدل دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قرارگیری و دو مقدار زبانی کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۱-۵) آمده است.

جدول (۱-۵) اطلاعات مدل ۱-۱-۴-۵

Number of linear parameters	16	Input Parameters	SF,W/C,Time
Number of nonlinear parameters	10	Output Parameters	D
Total number of parameters	26	Linguistic Label for Time	Long,Short
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for SF	Low,High
Number of testing data pairs	18	Input Membership function type	Gaussian
Number of fuzzy rules	4	Output Membership function type	Linear

همانطور که در شکل (۱-۵) مشاهده می‌شود در حین آموزش سیستم، خطای آزمون افزایش می‌یابد. بنابراین مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.



شکل (۱-۵) خطای آزمون مدل ۱-۱-۴-۵

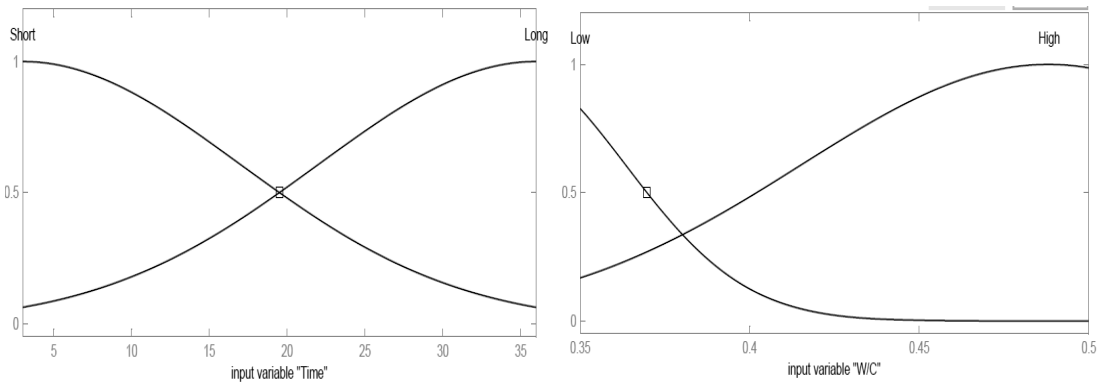
۲-۱-۴-۵

در این مدل دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قرارگیری و دو مقدار زبانی کم و زیاد برای نسبت آب به مواد سیمانی فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۲-۵) آمده است.

جدول (۲-۵) اطلاعات مدل ۲-۱-۴-۵

Number of linear parameters	16	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	10	Output Parameters	D
Total number of parameters	26	Linguistic Label for Time	Long, Short
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low, High
Number of testing data pairs	18	Input Membership function type	Gaussian
Number of fuzzy rules	4	Output Membership function type	Linear

همانطور که در شکل (۲-۵) مشاهده می‌شود توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی منطقی می‌باشد.



شکل (۲-۵) توابع عضویت پارامترهای ورودی در مدل ۲-۱-۴-۵

قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

1-If (Time is Short) and (W/C is Low) then

$$D = (-0.04148 \times \text{Time} - 13.28 \times \text{SF} + 92.58 \times \text{W/C} - 29.25) E-12$$

2-If (Time is Short) and (W/C is High) then

$$D = (-0.2691 \times \text{Time} - 68.12 \times \text{SF} + 22.38 \times \text{W/C} - 0.4747) E-12$$

3-If (Time is Long) and (W/C is Low) then

$$D = (0.4315 \times \text{Time} + 0.7274 \times \text{SF} - 42.14 \times \text{W/C} - 0.6124) E-12$$

4-If (Time is Long) and (W/C is High) then

$$D = (0.06228 \times \text{Time} - 9.273 \times \text{SF} + 0.6862 \times \text{W/C} - 0.01168) E-12$$

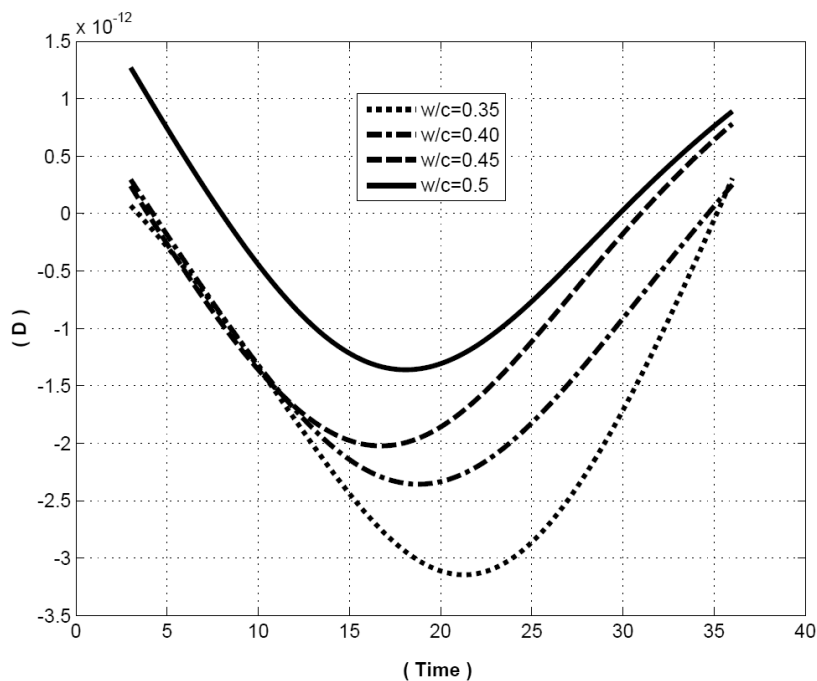
خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۳-۵)

نشان داده شده است.

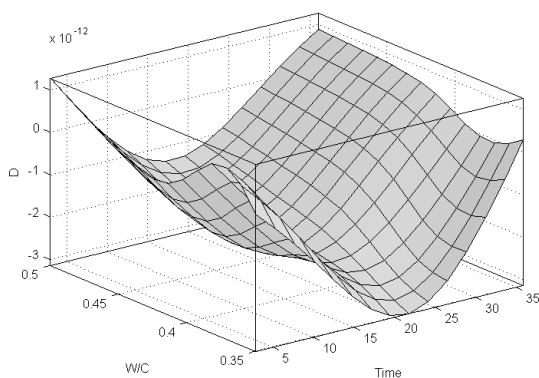
جدول (۳-۵) خطاها برای مدل ۲-۱-۴-۵

$RMSE$	SSE	R^2
1.03E-12	19.3E-24	0.855

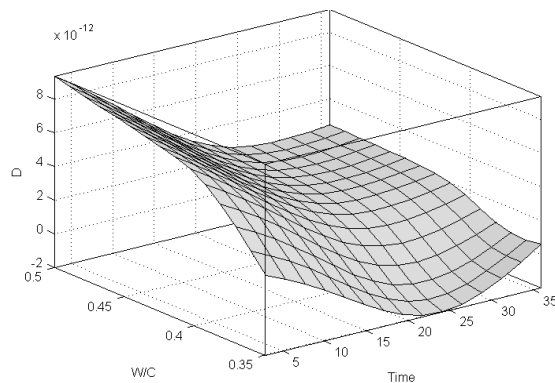
با بررسی خروجی مدل به ازای مقادیر مختلف ورودی مشاهده می‌شود که در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و به‌خصوص در درصدهای میکروسیلیس بالا، با افزایش زمان ابتدا کاهش و سپس افزایش در ضریب انتشارپذیری مشاهده می‌شود و همچنین در بسیاری از نقاط ضریب انتشارپذیری منفی بدست می‌آید. نتایج بدست آمده با فیزیک مساله مطابقت ندارد زیرا با افزایش زمان، افزایش در درجه هیدراسیون، بهبود در ریز ساختار بتن و کاهش در ضریب انتشارپذیری انتظار می‌رود و همچنین ضریب انتشارپذیری منفی، غیرمنطقی می‌باشد. بنابراین مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد (اشکال ۳-۵ و ۴-۵).



شکل (۳-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و $SF=12.5\%$



SF=0%



SF=12.5%

شکل (۴-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری

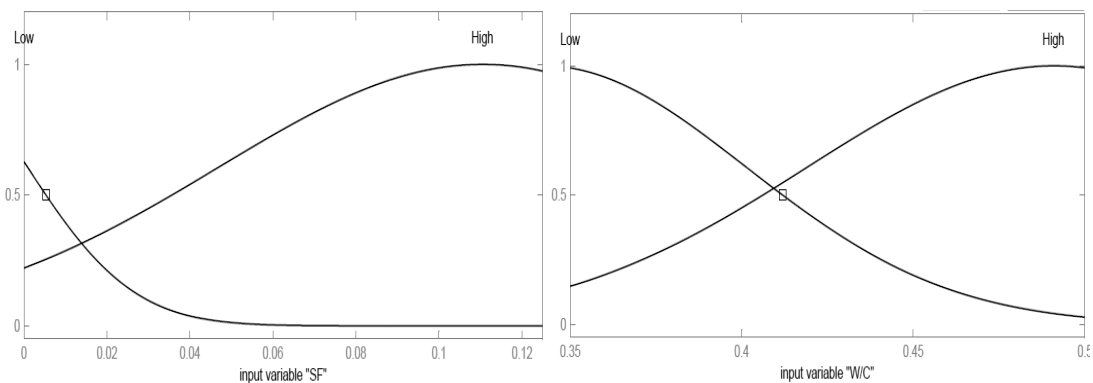
۳-۱-۴-۵

در این حالت دو مقدار زبانی کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۴-۵) آمده است.

جدول (۴-۵) اطلاعات مدل ۳-۱-۴-۵

Number of linear parameters	16	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	10	Output Parameters	D
Total number of parameters	26	Linguistic Label for SF	Low, High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low, High
Number of testing data pairs	18	Input Membership function type	Gaussian
Number of fuzzy rules	4	Output Membership function type	Linear

توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی منطقی می‌باشد (شکل ۵-۵).



شکل (۵-۵) توابع عضویت برای پارامترهای ورودی مدل ۳-۱-۴-۵

قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

1- If (SF is Low) and (W/C is Low) then

$$D = (-0.1252 \times \text{Time} - 84.64 \times \text{SF} + 56.83 \times \text{W/C} - 18.14) E-12$$

2- If (SF is Low) and (W/C is High) then

$$D = (-0.3205 \times \text{Time} + 199.3 \times \text{SF} - 61.45 \times \text{W/C} + 43.3) E-12$$

3- If (SF is High) and (W/C is Low) then

$$D = (0.00139 \times \text{Time} + 2.731 \times \text{SF} + 48.42 \times \text{W/C} - 16.07) E-12$$

4- If (SF is High) and (W/C is High) then

$$D = (-0.03795 \times \text{Time} - 9.639 \times \text{SF} + 43.05 \times \text{W/C} - 18.01) E-12$$

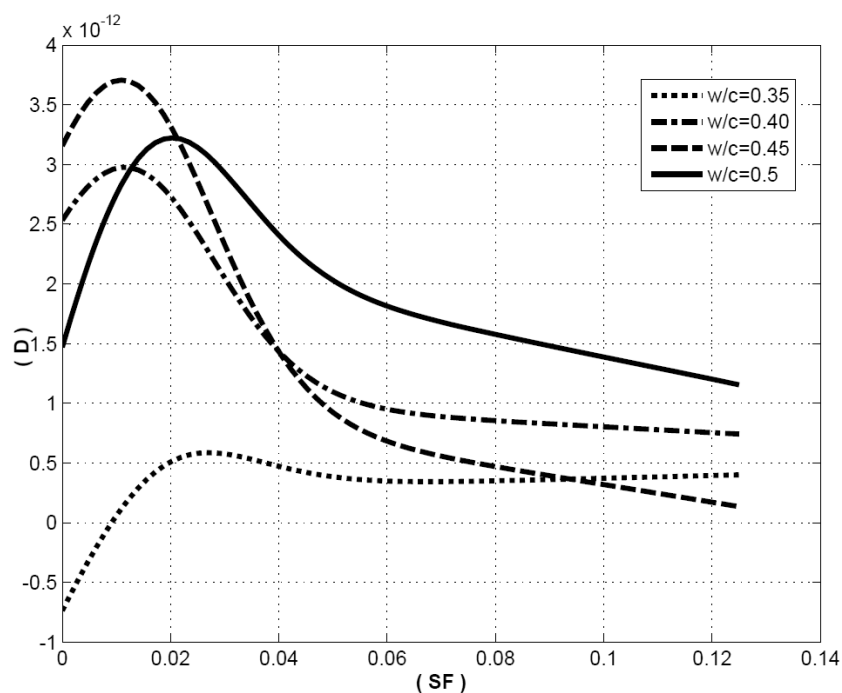
خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۵-۵)

نشان داده شده است.

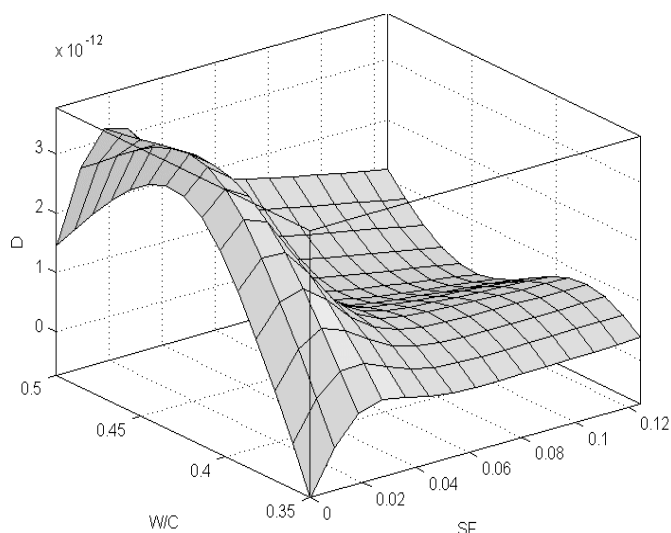
جدول (۵-۵) خطاها برای مدل ۳-۱-۴-۵

$RMSE$	SSE	R^2
4.61E-13	3.83E-24	0.96

با بررسی خروجی مدل به ازای مقادیر مختلف درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های ۳۶ ماهه، با افزایش درصد میکروسیلیس، بخصوص در نسبت‌های آب به مواد سیمانی پایین، ابتدا افزایش و سپس کاهش در ضریب انتشارپذیری مشاهده می‌شود. همچنین در بعضی از نقاط با نسبت آب به مواد سیمانی پایین، ضریب انتشارپذیری منفی بدست می‌آید. که این نتایج با فیزیک مساله مطابقت ندارد. زیرا با افزایش درصد میکروسیلیس، بهبود در ریزساختار بتن و کاهش ضریب انتشارپذیری انتظار می‌رود و همچنین ضریب انتشارپذیری منفی، غیرمنطقی می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج، مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.



شکل (۵-۶) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه



شکل (۷-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری برای نمونه ۳۶ ماهه

۴-۱-۴-۵

در این حالت دو مقدار زبانی کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی و دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قرارگیری فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۶-۵) آمده است.

جدول (۶-۵) اطلاعات مدل ۴-۱-۴-۵

Number of linear parameters	32	Input Parameters	SF,W/C,Time
Number of nonlinear parameters	12	Output Parameters	D
Total number of parameters	44	Linguistic Label for SF	Low,High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low,High
Number of testing data pairs	18	Linguistic Label for Time	Short,Long
Number of fuzzy rules	8	Input Membership function type	Gbell
		Output Membership function type	linear

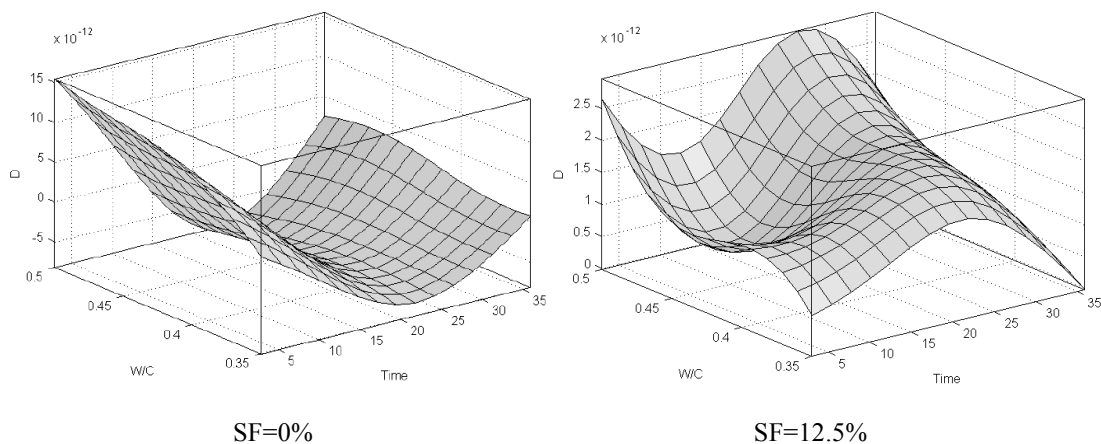
خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در

جدول (۷-۵) به نمایش درآمده است.

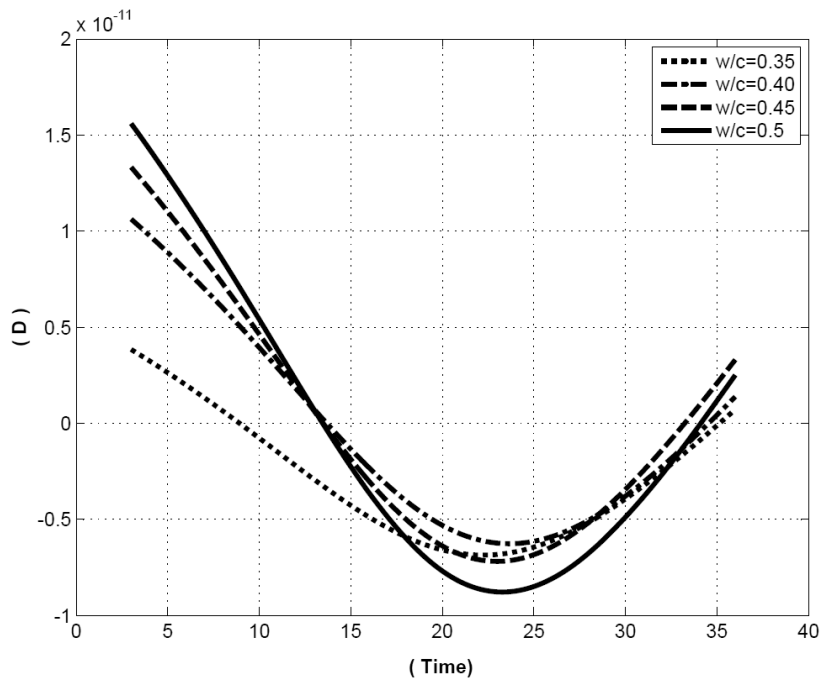
جدول (۷-۵) خطاهای مدل ۴-۱-۴-۵

$RMSE$	SSE	R^2
1.2E-12	26E-24	0.90

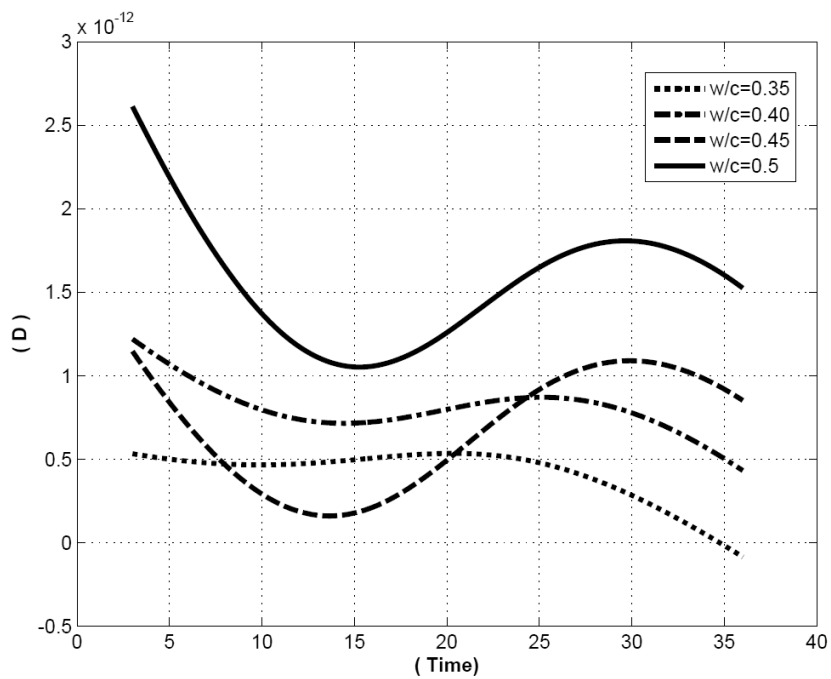
با توجه به آنکه تعداد پارامترهایی که بهینه می‌شوند از تعداد داده‌های موجود بیشتر است، مدل قابل اطمینان نمی‌باشد. با بررسی خروجی مدل نیز می‌توان به این نتیجه رسید، به عنوان مثال در درصد‌های میکروسیلیس پایین و در تمامی نسبت‌های آب به مواد سیمانی، با افزایش زمان، ضریب انتشارپذیری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد (شکل ۵-۸ و شکل ۵-۹). و همچنین در درصد‌های میکروسیلیس بالا و نسبت آب به مواد سیمانی پایین، با افزایش زمان ضریب انتشارپذیری ابتدا افزایش سپس کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵-۸ و شکل ۵-۱۰). در درصد میکروسیلیس‌های بالا و نسبت‌های آب به مواد سیمانی بالا نیز با افزایش زمان ابتدا کاهش، سپس افزایش و بعد کاهش در ضریب انتشارپذیری مشاهده می‌شود (شکل ۵-۸ و شکل ۵-۱۰). و در بعضی از نقاط ضریب انتشارپذیری بدست آمده منفی می‌باشد. که تمامی این نتایج غیرمنطقی بوده و نشان‌دهنده آن است که مدل از روند خاصی تبعیت نمی‌کند. بنابراین، همانطور که انتظار داشتیم، مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.



شکل (۸-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری



شکل (۹-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌ها مختلف آب به مواد سیمانی و SF=0%



شکل (۱۰-۵) رابطه بین مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌ها مختلف آب به مواد سیمانی و SF=12.5%

۲-۴-۵ مدل سوگنو درجه صفر

۱-۲-۴-۵

در این مدل دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قراگیری و دو مقدار زبانی کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۸-۵) آمده است.

جدول (۸-۵) اطلاعات مدل ۱-۲-۴-۵

Number of linear parameters	4	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	10	Output Parameters	D
Total number of parameters	14	Linguistic Label for SF	Low, High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low, High
Number of testing data pairs	18	Input Membership function type	Gaussian
Number of fuzzy rules	4	Output Membership function type	Constant

قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

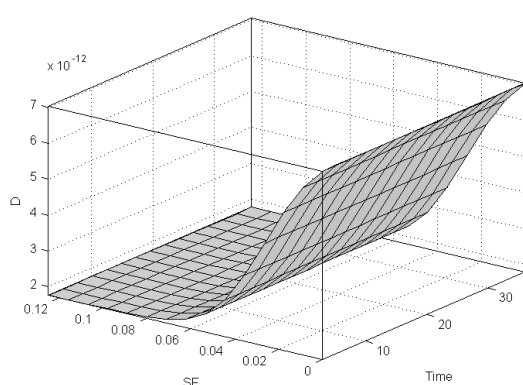
1. If (SF is Low) and (W/C is Low) then $D=3.86E-12$
2. If (SF is Low) and (W/C is High) then $D= 14E-12$
3. If ((SF is High) and (W/C is Low) then $D= 0.2255E-12$
4. If (SF is High) and (W/C is High) then $D= 2.314E-12$

خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۹-۵)

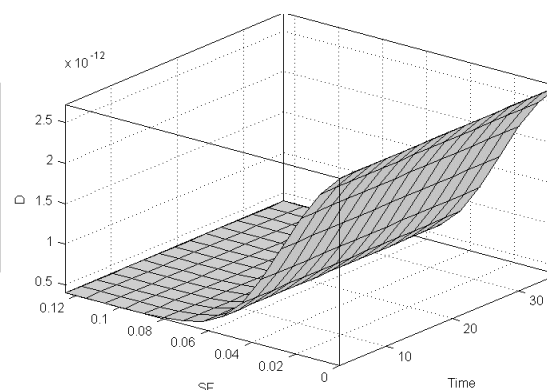
نشان داده شده است.

$RMSE$	SSE	R^2
0.962E-12	16.7E-24	0.772

در این مدل با توجه به آنکه برای یکی از پارامترهای ورودی (مدت زمان قرارگیری) هیچ مقدار زبانی در نظر گرفته نشده است، درجه عضویت برای تمامی مقادیر مدت زمان قرارگیری برابر یک می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه از سیستم سوگنو درجه صفر برای مدل‌سازی استفاده شده و خروجی یک مقدار ثابت می‌باشد. بنابراین تغییرات مدت زمان قرارگیری موجب هیچ نوع تغییری در ضریب انتشارپذیری نمی‌شود (اشکال ۵-۱۱، ۵-۱۲ و ۵-۱۳). بنابراین مدل بدست آمده مورد قبول نمی‌باشد.

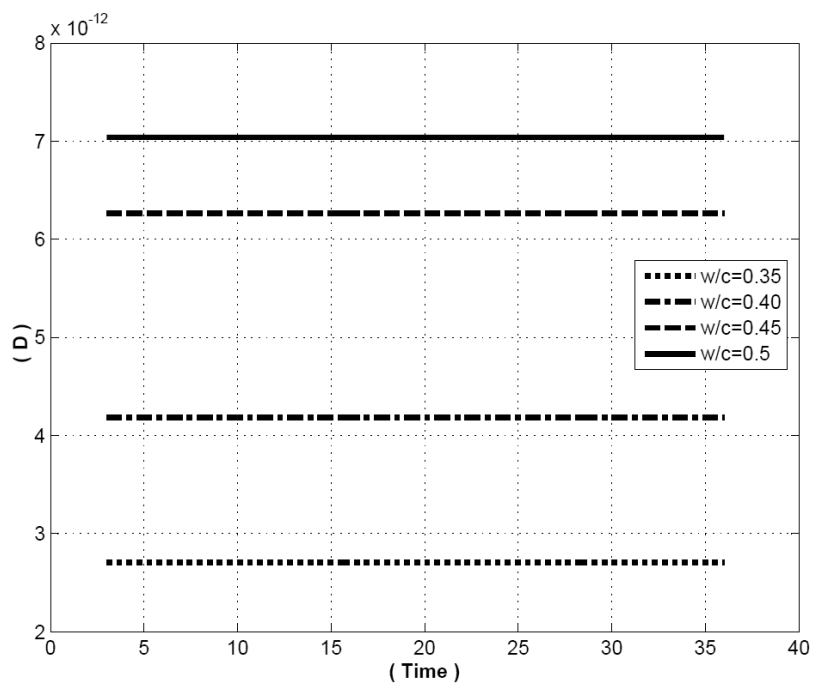


W/C=0.5

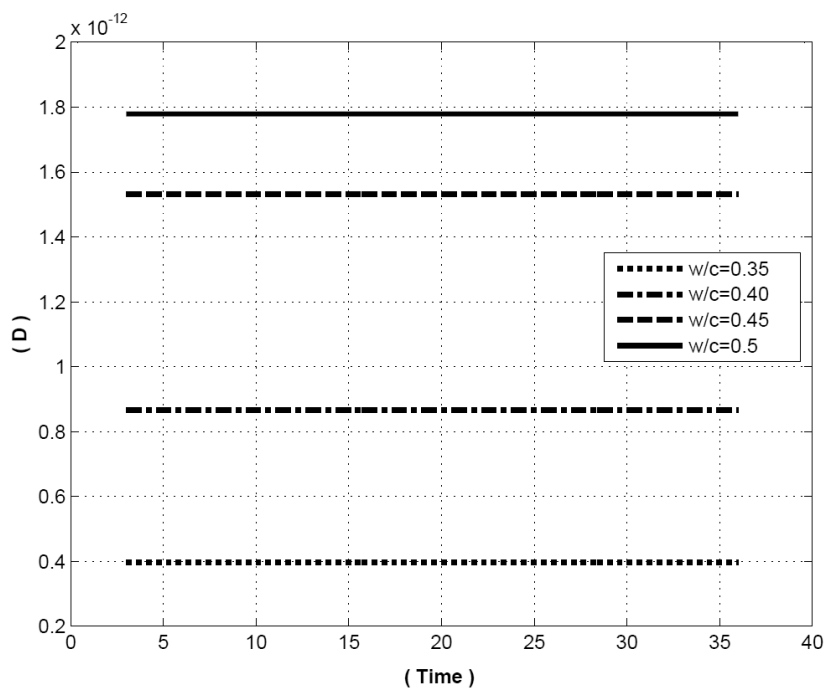


W/C=0.35

شکل (۵-۱۱) رابطه مدت زمان قرارگیری و درصد میکروسیلیس با ضریب انتشارپذیری



شکل (۵-۱۲) رابطه بین مدت زمان فرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و SF=0%



شکل (۵-۱۳) رابطه بین مدت زمان فرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و SF=12.5%

۲-۲-۴-۵

در این حالت دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قرارگیری و دو مقدار زبانی کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۱۰-۵) آمده است.

جدول (۱۰-۵) اطلاعات مدل ۲-۲-۴-۵

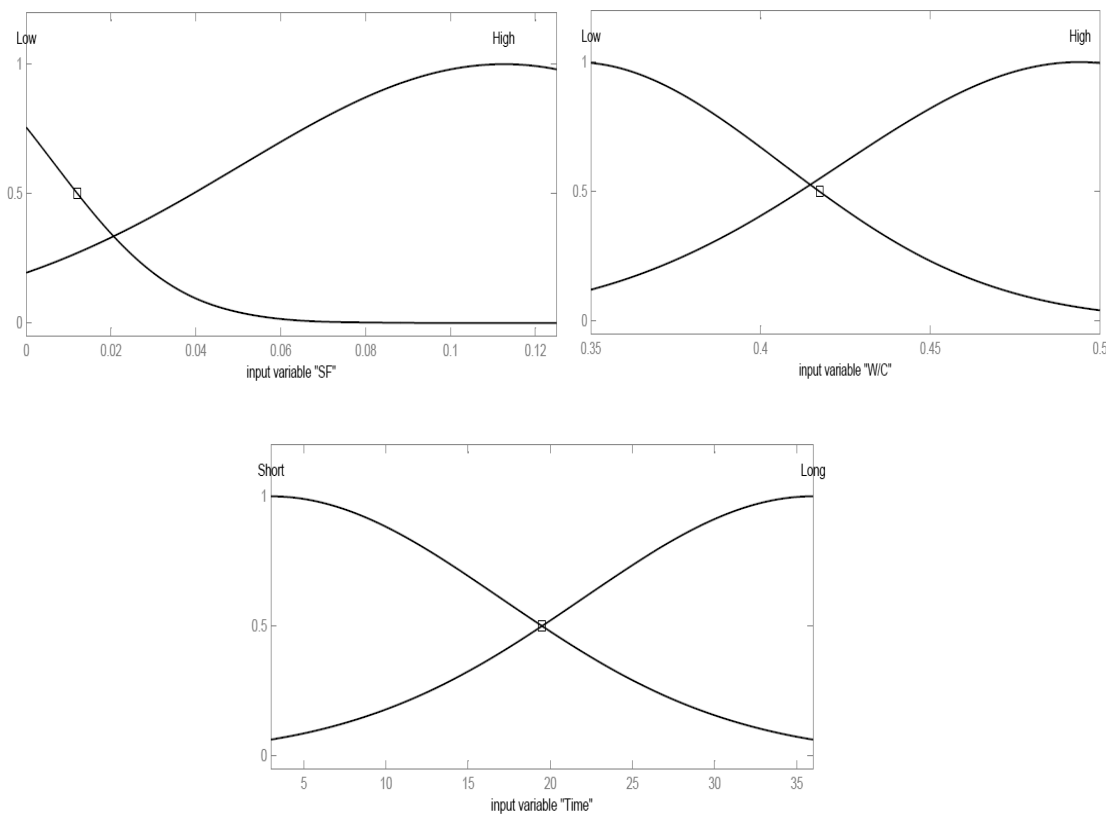
Number of linear parameters	8	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	12	Output Parameters	D
Total number of parameters	20	Linguistic Label for SF	Low, High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low, High
Number of testing data pairs	18	Linguistic Label for Time	Long, Short
Number of fuzzy rules	8	Input Membership function type	Gaussian
		Output Membership function type	Constant

خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۱۱-۵) نشان داده شده است.

جدول (۱۱-۵) خطاها برای مدل ۲-۲-۴-۵

$RMSE$	SSE	R^2
0.336E-12	2.03E-24	0.984

توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی منطقی می‌باشند و در شکل (۱۴-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۴-۵) توابع عضویت برای پارامترهای

ورودی در مدل ۴-۲-۴-۵

قوانین بدست آمده منطقی بوده و به شرح زیر است:

1. If (Time is short) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D=3.86E-12$
2. If (Time is short) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D= 14E-12$
3. If (Time is short) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D= 0.2255E-12$
4. If (Time is short) and (SF is High) and (W/C is High) then $D= 2.314E-12$
5. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D= 0.09854E-12$
6. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D= 2.697E-12$
7. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D= 0.1191E-12$
8. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is High) then $D= 1.102E-12$

با توجه به اشکال (۵-۱۵) تا (۵-۲۳) نتایج زیر حاصل می‌شود:

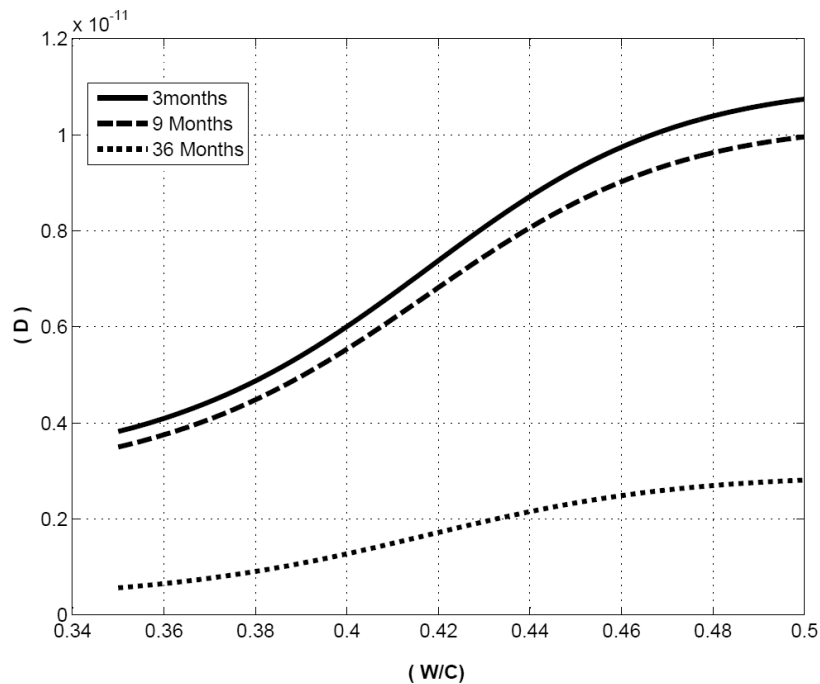
۱- با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، ضریب انتشارپذیری افزایش پیدا می‌کند.

۲- با افزایش درصد میکروسیلیس، ضریب انتشارپذیری کاهش پیدا می‌کند.

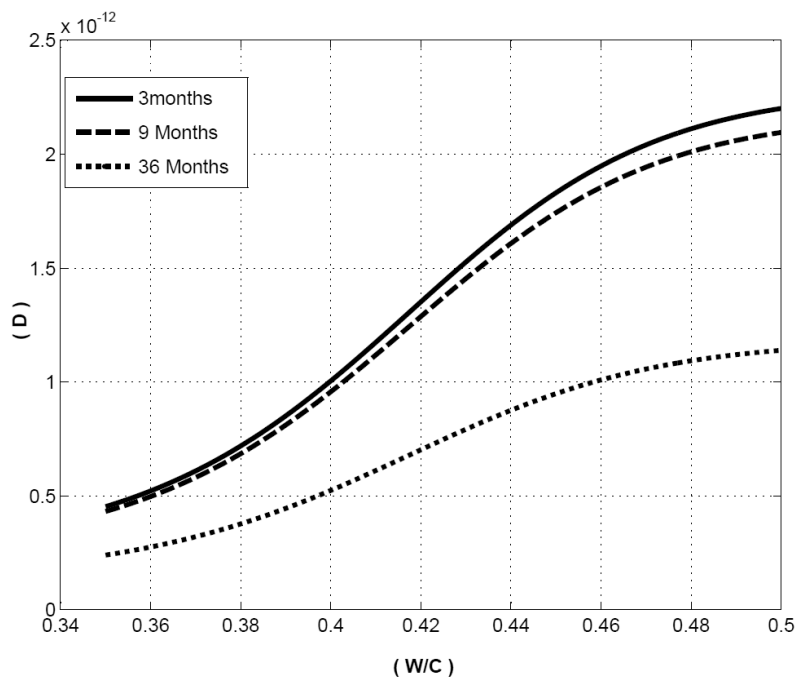
۳- با افزایش مدت زمان قرارگیری (افزایش سن نمونه)، ضریب انتشارپذیری کاهش پیدا می‌کند.

با توجه به فیزیک مسأله و داده‌هایی که در مدل‌سازی استفاده شده است نتایج بدست آمده

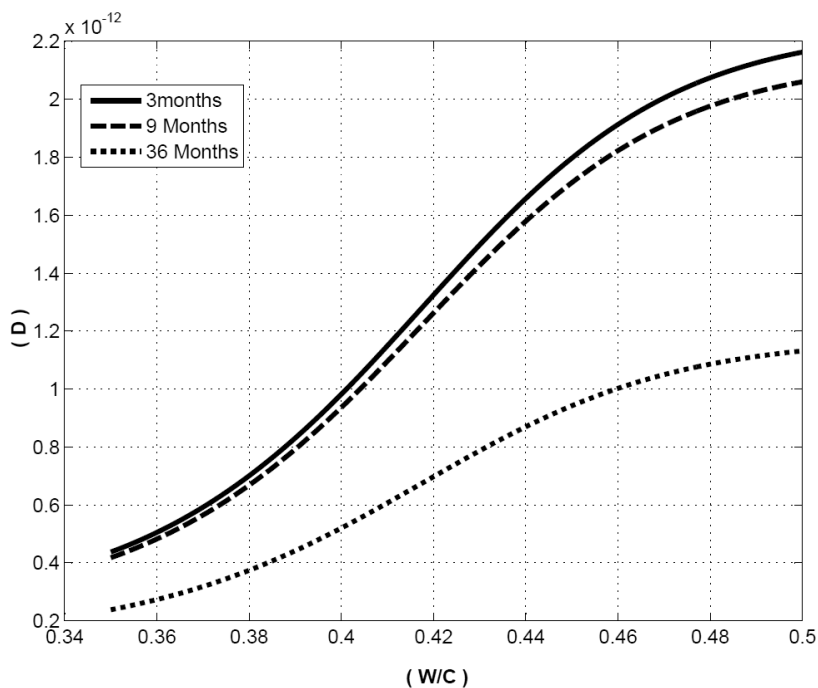
منطقی می‌باشد. بنابراین مدل بدست آمده مورد قبول می‌باشد.



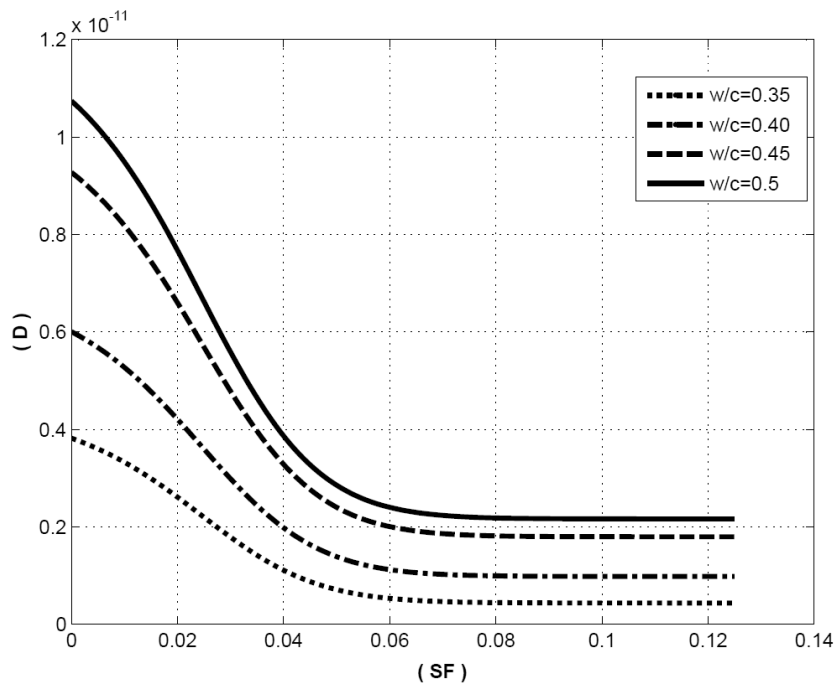
شکل (۵-۱۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های قرارگیری مختلف و SF=0%



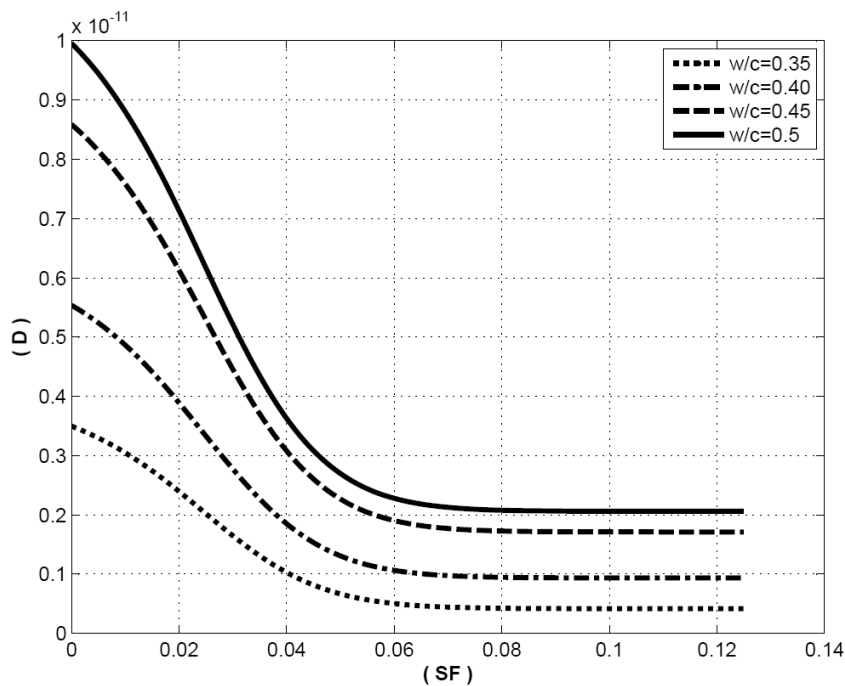
شکل (۱۶-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های قرارگیری مختلف و SF=7.5%



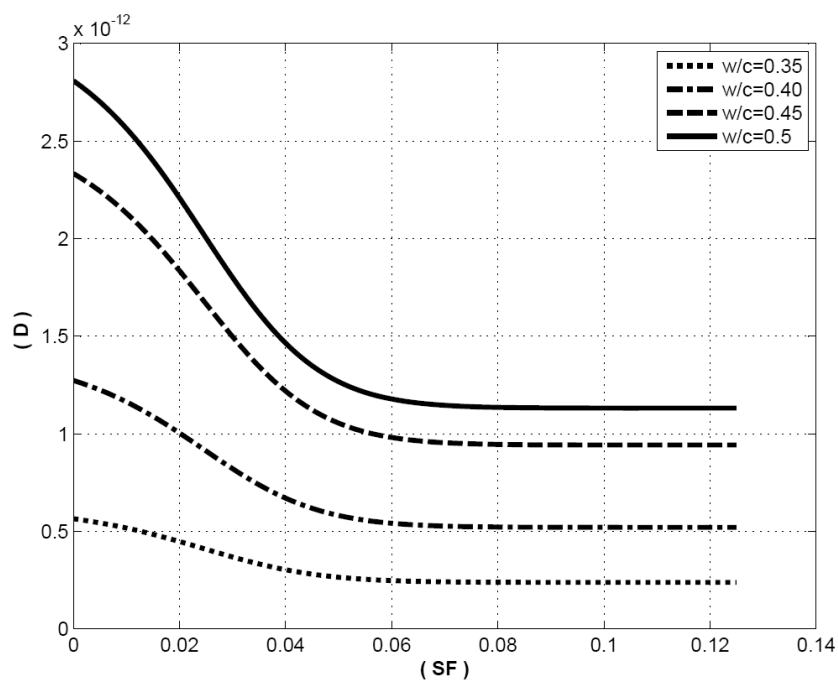
شکل (۱۷-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های قرارگیری مختلف و SF=12.5%



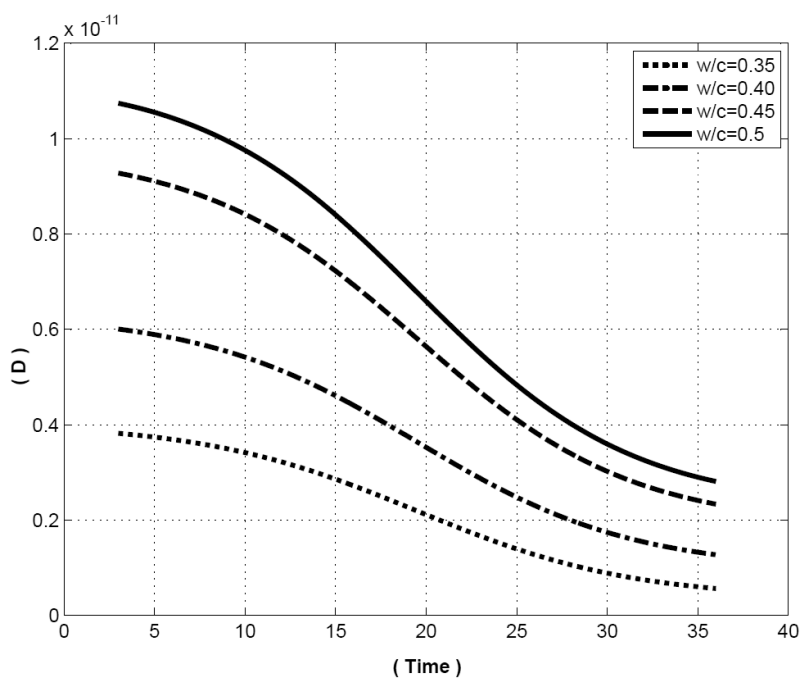
شکل (۱۸-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳ ماهه



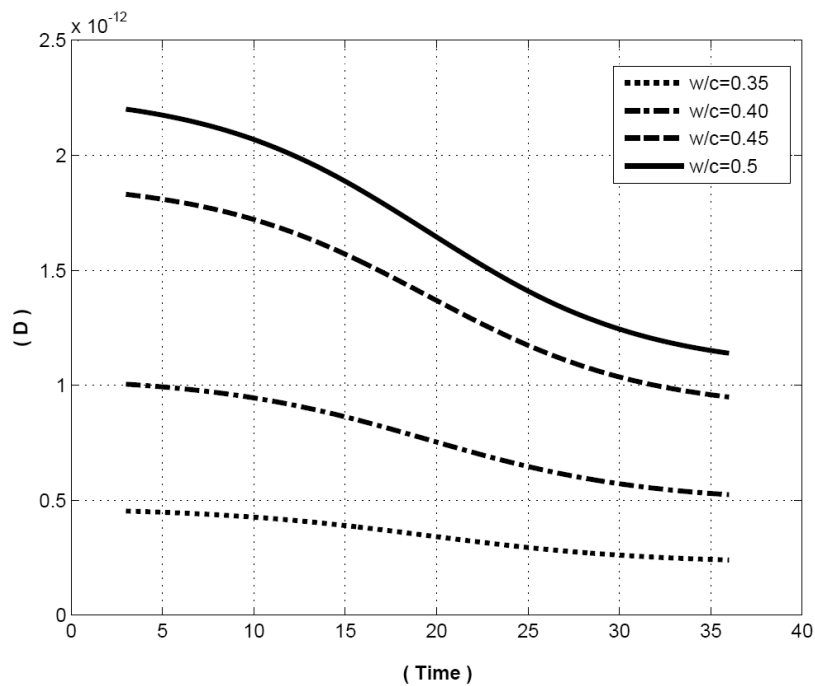
شکل (۱۹-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۹ ماهه



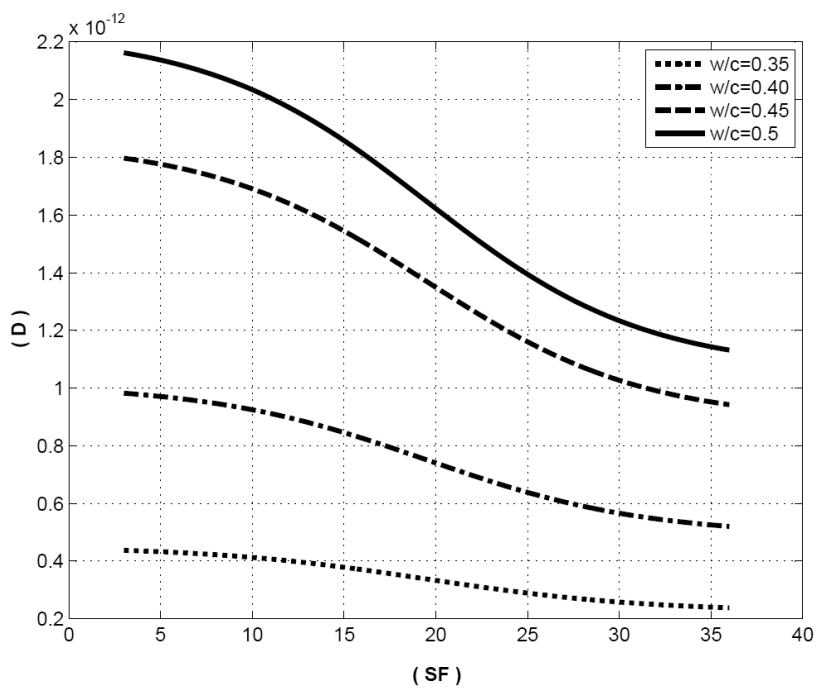
شکل (۲۰-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳ساله



شکل (۲۱-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و SF=0%



شکل (۲۲-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و $SF=7.5\%$



شکل (۲۳-۵) رابطه مدت زمان قرارگیری و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و $SF=12.5\%$

در این مدل دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان قرارگیری و دو مقدار زبانی کم و زیاد برای نسبت آب به مواد سیمانی و سه مقدار زبانی کم، متوسط و زیاد برای درصد میکروسیلیس فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۱۲-۵) آمده است.

جدول (۱۲-۵) اطلاعات مدل در حالت ۳-۲-۴-۵

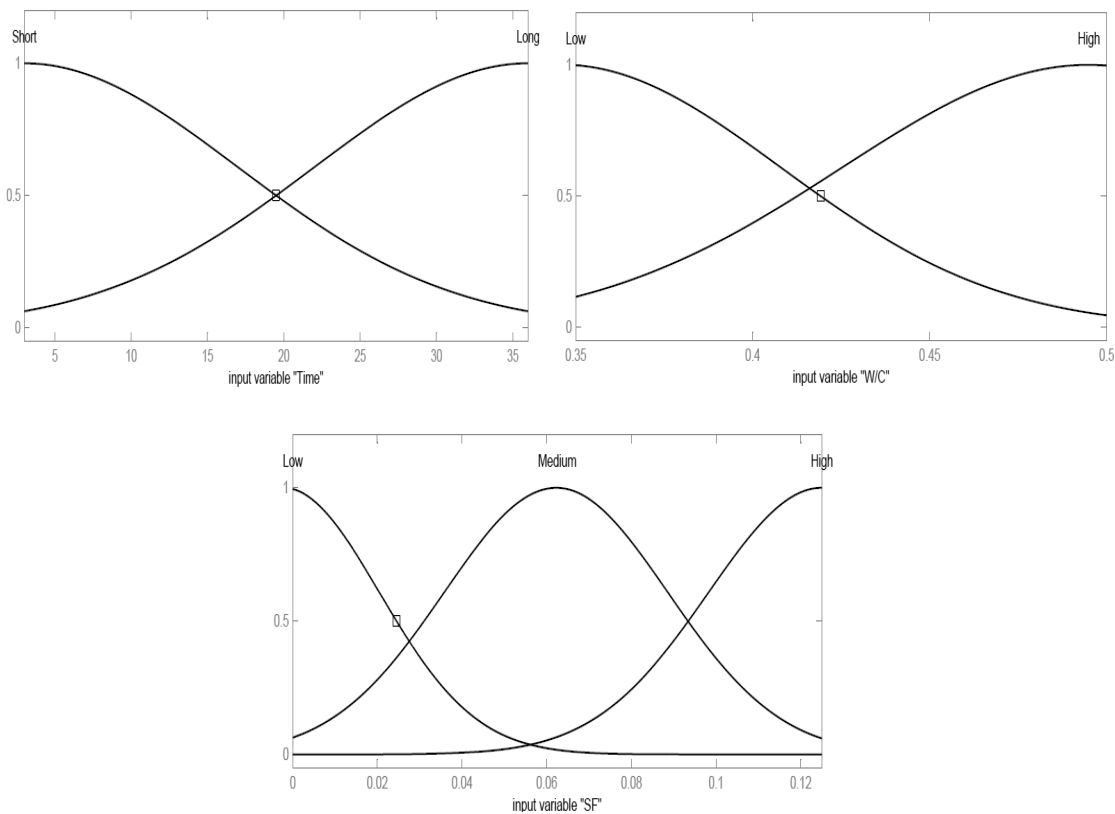
Number of linear parameters	12	Input Parameters	SF,W/C,Time
Number of nonlinear parameters	14	Output Parameters	D
Total number of parameters	26	Linguistic Label for SF	Low,Medium,High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for W/C	Low,High
Number of testing data pairs	18	Linguistic Label for Time	Long,Short
Number of fuzzy rules	12	Input Membership function type	Gaussian
		Output Membership function type	Constant

خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۱۳-۵) نشان داده شده است.

جد

$RMSE$	SSE	R^2
0.493E-12	4.38E-24	0.96

توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی منطقی می‌باشند و در شکل (۲۴-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲۴-۵) توابع عضویت برای پارامترهای

ورودی در مدل ۳-۲-۴-۵

قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

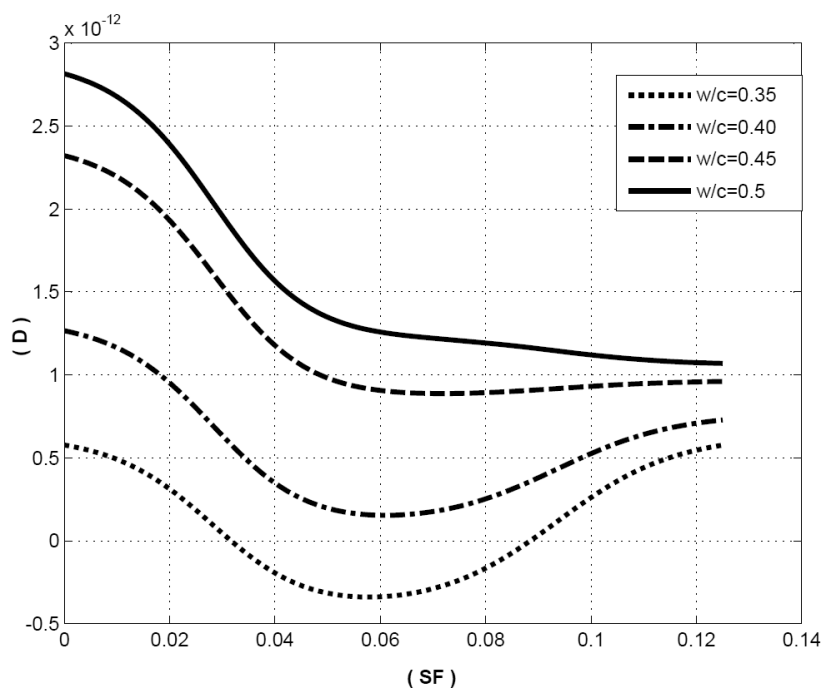
1. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 3.412E-12$
2. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 12.19E-12$
3. If (Time is Short) and (SF is Medium) and (W/C is Low) then $D = 0.1652E-12$
4. If (Time is Short) and (SF is Medium) and (W/C is High) then $D = 2.777E-12$
5. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 0.3815E-12$
6. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 0.3815E-12$
7. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 0.1715E-12$
8. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 2.461E-12$
9. If (Time is Long) and (SF is Medium) and (W/C is Low) then $D = -0.6616E-12$

10. If (Time is Long) and (SF is Medium) and (W/C is High) then $D = 1.223E-12$

11. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 0.5969E-12$

12. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 1.031E-12$

با توجه به شکل (۵-۲۵) و قوانین بدست آمده، برای نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری طولانی و نسبت آب به مواد سیمانی کم با افزایش درصد میکروسیلیس ابتدا کاهش و سپس افزایش در ضریب انتشارپذیری را شاهد هستیم و همچنین در درصدهای متوسط میکروسیلیس، ضریب انتشارپذیری منفی بدست می‌آید. که نتایج بدست آمده منطقی نبوده و در نتیجه مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.



شکل (۵-۲۵) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه

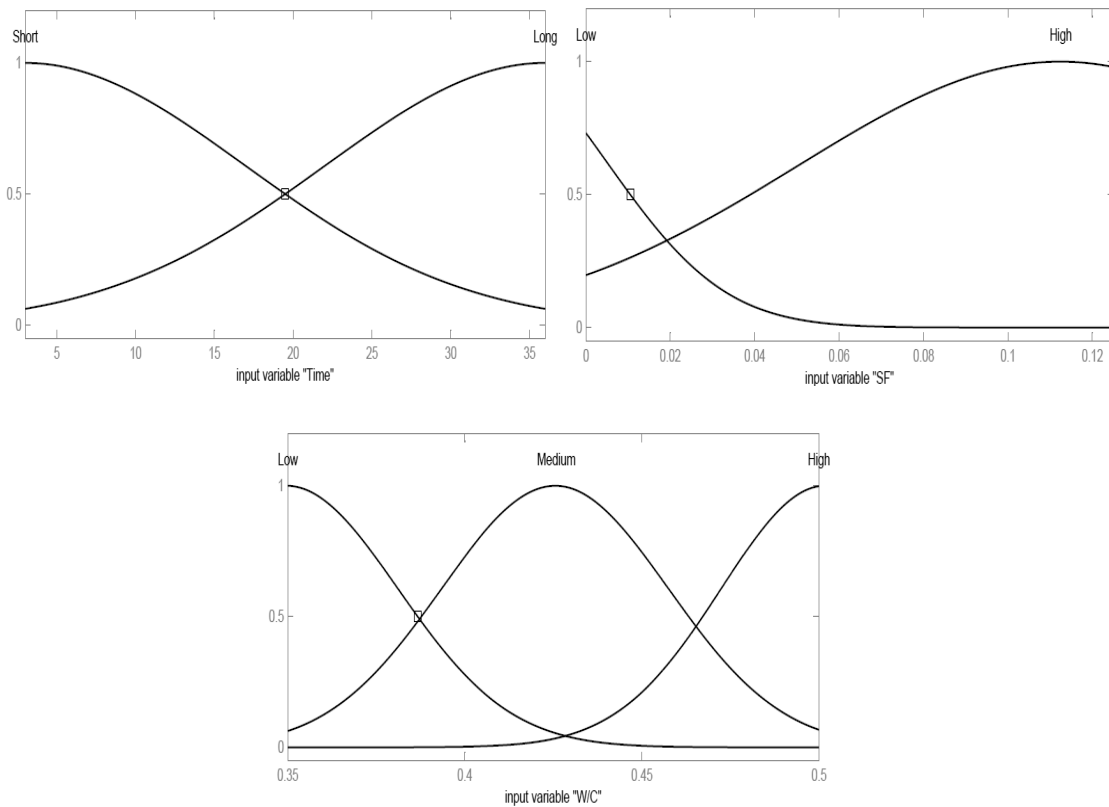
۴-۲-۴-۵

در این مدل دو مقدار زبانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان رویارویی، دو مقدار کم و زیاد برای درصد میکروسیلیس و سه مقدار زبانی کم، متوسط و زیاد برای نسبت آب به مواد سیمانی فرض

می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۱۴-۵) آمده است.

جدول (۱۴-۵) اطلاعات مدل ۴-۲-۴-۵

Number of linear parameters	12	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	14	Output Parameters	D
Total number of parameters	26	Linguistic Label for W/C	Low, Medium, High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for SF	Low, High
Number of testing data pairs	18	Linguistic Label for Time	Long, Short
Number of fuzzy rules	12	Input Membership function type	Gaussian
		Output Membership function type	Constant



شکل (۲۶-۵) توابع عضویت برای پارامترهای

ورودی در مدل ۴-۲-۴-۵

خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۱۵-۵) نشان داده شده است.

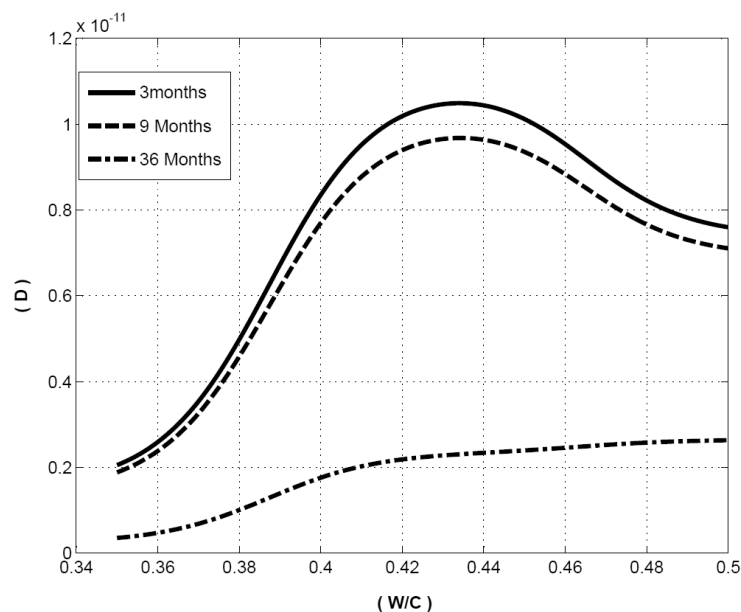
جدول (۱۵-۵) خطاها برای مدل ۴-۲-۴-۵

$RMSE$	SSE	R^2
0.818E-12	12.1E-24	0.841

قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

1. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 1.834E-12$
2. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is Medium) then $D = 14.39E-12$
3. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 8.977E-12$
4. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 0.6308E-12$
5. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is Medium) then $D = 0.9987E-12$
6. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 2.895E-12$
7. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 0.1259E-12$
8. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Medium) then $D = 2.054E-12$
9. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 2.636E-12$
10. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 0.2168E-12$
11. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Medium) then $D = 0.6821E-12$
12. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 1.224E-12$

با توجه به شکل (۲۷-۵) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با سنین ۳ ماهه و ۹ ماهه با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی ضریب انتشارپذیری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. که با توجه به فیزیک مسأله و داده‌های استفاده شده در تعلیم سیستم، نتایج بدست آمده منطقی نمی‌باشد. بنابراین مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.



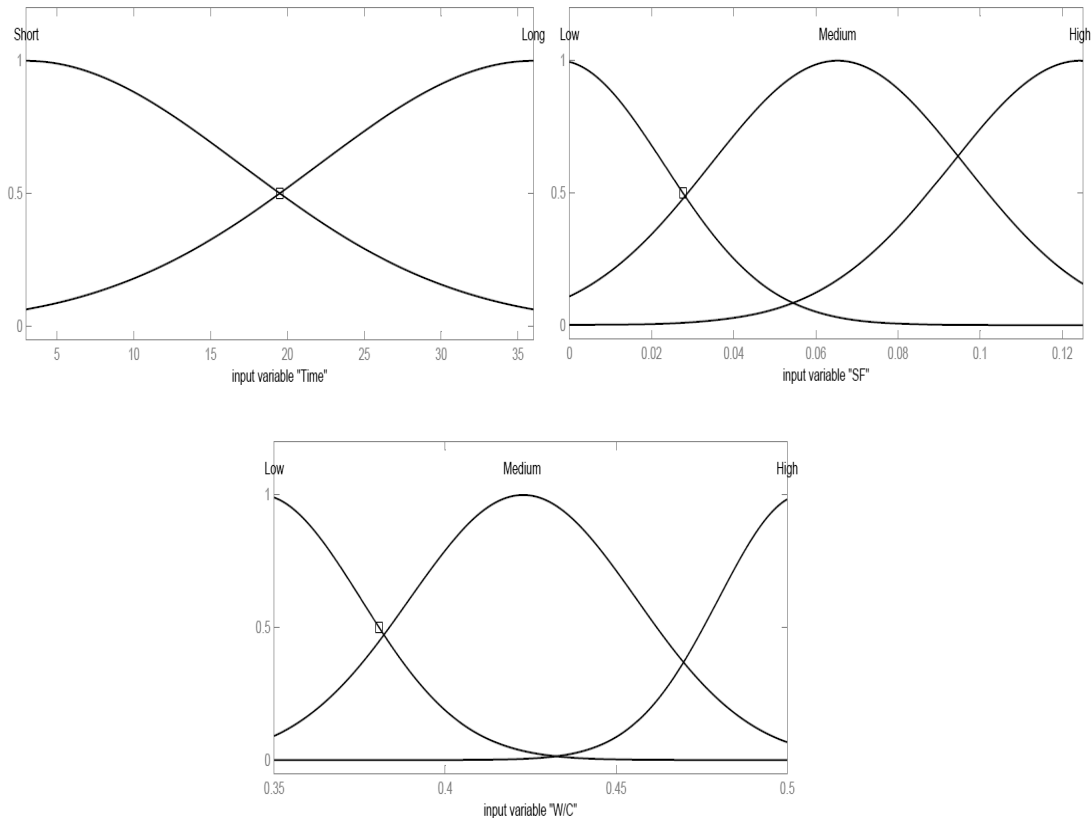
شکل (۲۷-۵) رابطه بین نسبت آب به مواد سیمانی و ضریب انتشارپذیری در مدت زمان‌های قرارگیری مختلف و SF=0

۵-۲-۴-۵

در این مدل دو مقدار زمانی کوتاه و طولانی برای مدت زمان رویارویی و سه مقدار زمانی کم، متوسط و زیاد برای درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی فرض می‌شود. اطلاعات مدل در جدول (۱۶-۵) آمده است.

Number of linear parameters	18	Input Parameters	SF, W/C, Time
Number of nonlinear parameters	16	Output Parameters	D
Total number of parameters	34	Linguistic Label for W/C	Low, Medium, High
Number of training data pairs	42	Linguistic Label for SF	Low, Medium, High
Number of testing data pairs	18	Linguistic Label for Time	Long, Short
Number of fuzzy rules	18	Input Membership function type	Gaussian
		Output Membership function type	Constant

توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی منطقی می‌باشند و در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده‌اند.



شکل (۵-۲۸) توابع عضویت بدست آمده برای پارامترهای ورودی برای مدل ۵-۴-۲-۵

خطاهای آزمون و R^2 (با استفاده از ۱۸ سری داده، متفاوت با داده‌های تعلیم) در جدول (۵-۱۷) نشان داده شده است.

جد

$RMSE$	SSE	R^2
1.7E-12	52.2E-24	0.55

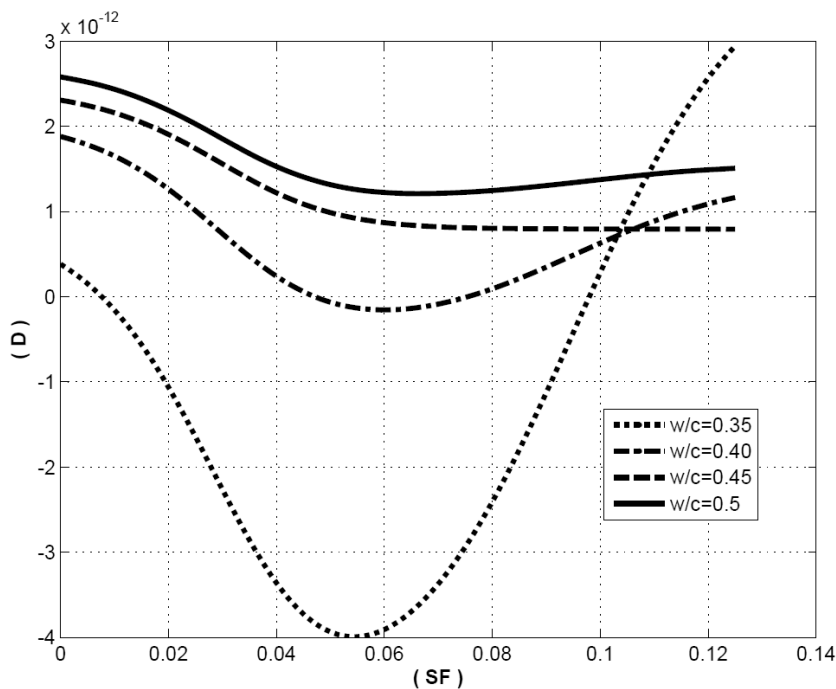
قوانین بدست آمده به شرح زیر است:

1. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 1.325E-12$
2. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is Medium) then $D = 11.89E-11$
3. If (Time is Short) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 8.14E-12$
4. If (Time is Short) and (SF is Medium) and (W/C is Low) then $D = 1.342E-12$
5. If (Time is Short) and (SF is Medium) and (W/C is Medium) then $D = 0.645E-13$
6. If (Time is Short) and (SF is Medium) and (W/C is High) then $D = 3.908E-12$
7. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 0.0275E-12$
8. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is Medium) then $D = 1.358E-12$
9. If (Time is Short) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 1.811E-12$
10. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D = 0.8248E-12$
11. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Medium) then $D = 1.852E-12$
12. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D = 2.426E-12$
13. If (Time is Long) and (SF is Medium) and (W/C is Low) then $D = -6.157E-12$
14. If (Time is Long) and (SF is Medium) and (W/C is Medium) then $D = 0.78E-12$
15. If (Time is Long) and (SF is Medium) and (W/C is High) then $D = 0.9508E-12$
16. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D = 4.818E-12$
17. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Medium) then $D = 0.6377E-12$
18. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is High) then $D = 1.621E-12$

با توجه به شکل (۵-۲۹)، برای نمونه با مدت زمان قرارگیری طولانی و نسبت آب به مواد

سیمانی کم، با افزایش درصد میکروسیلیس ابتدا کاهش و سپس افزایش در ضریب انتشارپذیری را

شاهد هستیم. و همچنین با توجه به قوانین بدست آمده (قانون ۱۳) و با توجه به شکل (۵-۲۹) در نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری طولانی و نسبت آب به مواد سیمانی کم و درصد میکروسیلیس متوسط، ضریب انتشارپذیری منفی بدست آمده است که با توجه به فیزیک مسأله و داده‌های استفاده شده در آموزش سیستم، نتایج بدست آمده منطقی نمی‌باشد. بنابراین مدل بدست آمده قابل قبول نمی‌باشد.

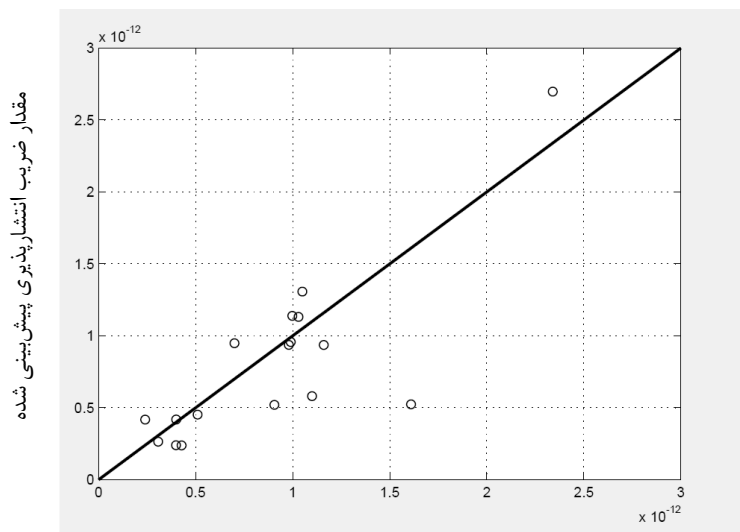


شکل (۵-۲۹) رابطه بین درصد میکروسیلیس و ضریب انتشارپذیری در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی برای نمونه ۳۶ ماهه

۳-۴-۵ مدل پیشنهادی و بررسی آن

با بررسی خروجی مدل‌های مختلف، مدل ۲-۲-۴-۵ رفتار منطقی‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه می‌دهد. همچنین این مدل دارای خطاهای آزمون پایین‌تر و R^2 بزرگتری نسبت به دیگر مدل‌ها می‌باشد. بنابراین مدل ۲-۲-۴-۵ به عنوان مدل منتخب پیشنهاد می‌شود. همچنین یک خط با

معادله $y=x$ برای مقایسه ضریب انتشارپذیری پیش‌بینی شده و ضریب انتشارپذیری اندازه‌گیری شده در شکل (۲۸-۵) ترسیم شده است. ضرایب انتشارپذیری اندازه‌گیری شده و ضرایب انتشارپذیری پیش‌بینی شده نشان داده شده در این شکل با استفاده از ۱۷ سری داده، متفاوت از داده‌های تعلیم ترسیم شده است. قابل ذکر است که با توجه به فاصله زیاد یک نقطه با مختصات $(10.74E-12, 10.7444E-12)$ از بقیه نقاط این نقطه در شکل (۲۸-۵) ترسیم نشده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل ۲-۲-۴-۵ به خوبی توانسته است ضرایب انتشارپذیری را پیش‌بینی کند.



مقدار ضریب انتشارپذیری اندازه‌گیری شده

شکل (۳۰-۵) مقایسه مقادیر ضریب انتشارپذیری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مدل ۲-۲-۴-۵

حال به بررسی ضریب انتشارپذیری با استفاده از مدل بدست آمده می‌پردازیم.

قوانین بدست آمده از مدل ۲-۲-۴-۵ به شرح زیر است:

1. If (Time is short) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D=3.86E-12$
2. If (Time is short) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D= 14E-12$

3. If (Time is short) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D= 0.2255E-12$

4. If (Time is short) and (SF is High) and (W/C is High) then $D= 2.314E-12$

5. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is Low) then $D= 0.09854E-12$

6. If (Time is Long) and (SF is Low) and (W/C is High) then $D= 2.697E-12$

7. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is Low) then $D= 0.1191E-12$

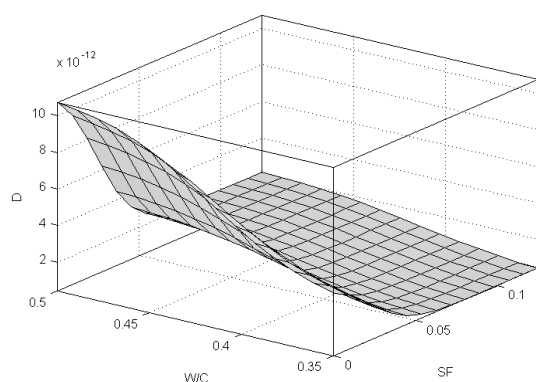
8. If (Time is Long) and (SF is High) and (W/C is High) then $D= 1.102E-12$

۱- با مقایسه قوانین ۱ و ۳ با قوانین ۲ و ۴، قوانین ۵ و ۷ با قوانین ۶ و ۸ و همچنین با توجه به

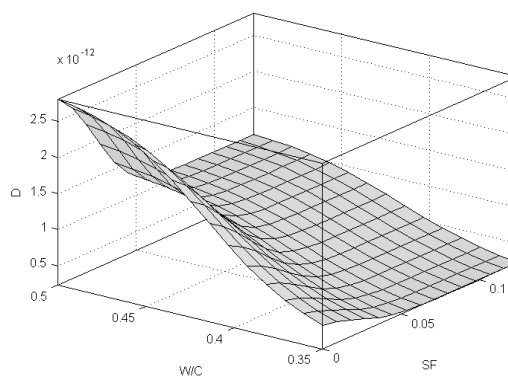
شکل (۳۱-۵) مشاهده می‌شود که افزایش درصد میکروسیلیس در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بالا، در مقایسه با نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی پایین، موجب کاهش بیشتری در مقدار ضریب انتشارپذیری می‌شود.

۲- با مقایسه قوانین ۱ و ۲ با قوانین ۳ و ۴، قوانین ۵ و ۶ با قوانین ۷ و ۸ و همچنین با توجه

به شکل (۳۱-۵) مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در نمونه‌های با درصد میکروسیلیس پایین، در مقایسه با نمونه‌های با درصد میکروسیلیس بالا، موجب کاهش بیشتری در مقدار ضریب انتشارپذیری می‌شود.



Time=36 Months

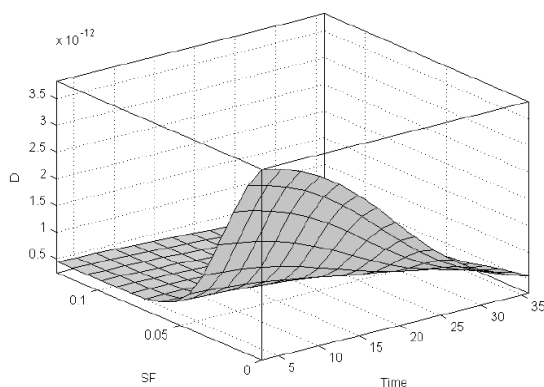


Time=3 Months

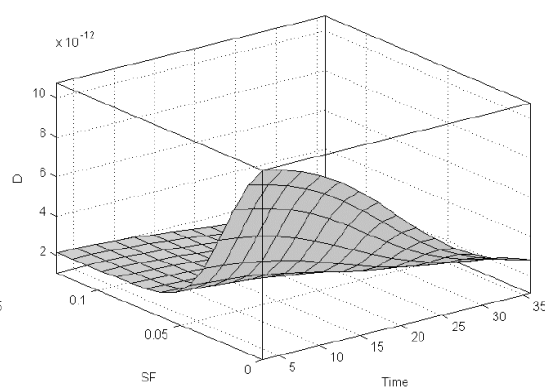
شکل (۳۱-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی با ضریب انتشارپذیری

۳- با مقایسه قوانین ۱ و ۳ با قوانین ۵ و ۷ و قوانین ۲ و ۴ با قوانین ۶ و ۸ و همچنین با توجه به شکل (۳۲-۵) مشاهده می‌شود که افزایش درصد میکروسیلیس در نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری کوتاه، در مقایسه با نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری طولانی، موجب کاهش بیشتری در مقدار ضریب انتشارپذیری می‌شود.

۴- با مقایسه قوانین ۱ و ۵ با قوانین ۳ و ۷، قوانین ۲ و ۶ با قوانین ۴ و ۸ و همچنین با توجه به شکل (۳۲-۵) مشاهده می‌شود که افزایش مدت زمان قرارگیری در نمونه‌های با درصد میکروسیلیس پایین، در مقایسه با نمونه‌های با درصد میکروسیلیس بالا، موجب کاهش بیشتر در مقدار ضریب انتشارپذیری می‌شود.



W/C=0.35



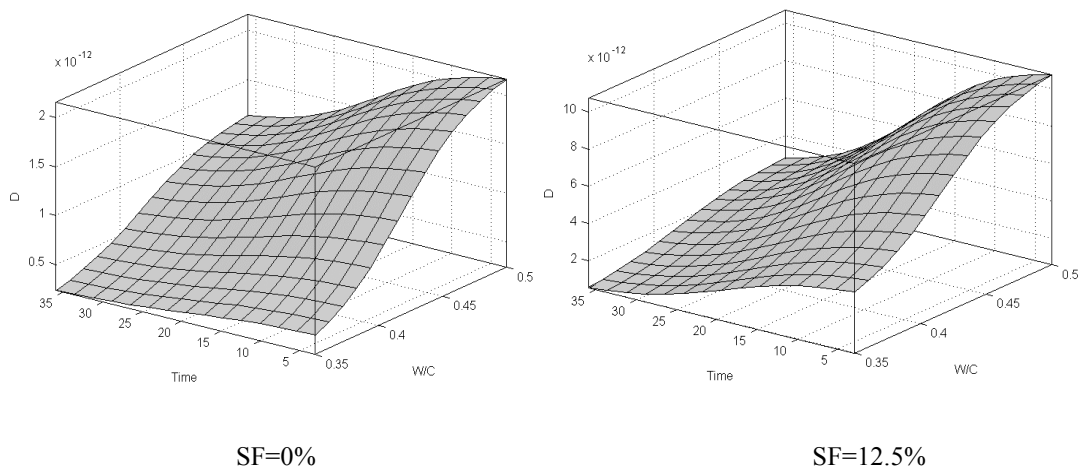
W/C=0.5

شکل (۳۲-۵) رابطه درصد میکروسیلیس و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری

۵- با مقایسه قوانین ۱ و ۲ با قوانین ۵ و ۶، قوانین ۳ و ۴ با قوانین ۷ و ۸ و همچنین با توجه به شکل (۳۳-۵) مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری کوتاه، در مقایسه با نمونه‌های با مدت زمان قرارگیری طولانی، موجب کاهش بیشتری در مقدار ضریب انتشارپذیری می‌شود.

۶- با مقایسه قوانین ۱ و ۵ با قوانین ۲ و ۶، قوانین ۳ و ۷ با قوانین ۴ و ۸ و همچنین با توجه

به شکل (۳۳-۵) مشاهده می‌شود که افزایش مدت زمان قرارگیری (سن نمونه) در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی زیاد، در مقایسه با نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی کم، موجب کاهش بیشتری در ضریب انتشارپذیری می‌شود.



شکل (۳۳-۵) رابطه نسبت آب به مواد سیمانی و مدت زمان قرارگیری با ضریب انتشارپذیری

۷- با مشاهده اشکال (۱۸-۵)، (۱۹-۵) و (۲۰-۵) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از ۵ درصد میکروسیلیس در نمونه‌های با سنین مختلف و همچنین نسبت‌های آب به مواد سیمانی مختلف، موجب کاهش بسیار زیادی در ضریب انتشارپذیری می‌شود. همچنین استفاده از میکروسیلیس بیشتر از ۸ درصد، در کاهش ضریب انتشارپذیری تقریباً بی‌تاثیر است.

فصل ششم

نتیجه‌گیری

خلاصه و نتیجه گیری

عامل اصلی تخریب سازه‌های بتنی ساخته شده در محیط خلیج فارس خوردگی آرماتور بوده و عامل اصلی خوردگی آرماتور، نفوذ یون کلر می‌باشد. یکی از مکانیزم‌های مهم نفوذ یون کلر، انتشار می‌باشد که از قانون دوم فیک تبعیت می‌کند. در این معادله ضریب انتشارپذیری ضریب تعیین‌کننده بوده که به عواملی همچون نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس و مدت زمان قرارگیری در شرایط محیطی بستگی دارد. مساله مورد نظر در این تحقیق پردازش داده‌های بدست آمده از نمونه‌های بتنی ساخته در شرایط محیطی خلیج فارس و در شرایط روبارویی جزر و مد با استفاده از سیستم استنباط فازی - عصبی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق در زیر آمده است.

۱- در این تحقیق، سیستم فازی-عصبی تطبیقی توانست، تاثیر پارامترهای مختلف را در حیطه مشخصی از تغییرات این پارامترها به خوبی و با دقت فراگیرد و از مدل بدست آمده در بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار ضریب انتشارپذیری استفاده شد.

۲- با توجه به طبیعت و اساس تئوری فازی، سیستم‌های فازی شامل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مدل شده هستند. بنابراین به این طریق یک سیستم فازی که رفتار یک پارامتر را شبیه‌سازی می‌کند، عدم قطعیت موجود در سیستم را نیز مورد توجه قرار می‌دهد.

۳- استفاده از میکروسیلیس در طرح اختلاط بتن موجب کاهش در ضریب انتشارپذیری می‌شود. این تاثیر در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بالا و یا در نمونه‌های با سنین پایین (مدت زمان قرارگیری کم) چشمگیرتر است.

۴- کاهش در نسبت آب به مواد سیمانی موجب کاهش در ضریب انتشارپذیری می‌شود. این تاثیر در نمونه‌های با درصد میکروسیلیس پایین و یا در نمونه‌های با سنین کم (مدت زمان

قرارگیری کم) محسوس تر است.

۵- افزایش در سن نمونه (مدت زمان قرارگیری در شرایط محیطی)، موجب کاهش در ضریب انتشارپذیری می‌شود. این تاثیر در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بالا و یا در نمونه‌های با درصد میکروسیلیس پایین قابل توجه‌تر می‌باشد.

۶- استفاده از ۵ درصد میکروسیلیس، در طرح اختلاط بتن موجب کاهش زیادی در ضریب انتشارپذیری می‌شود. همچنین استفاده از میکروسیلیس بیشتر از ۸ درصد در طرح اختلاط بتن، در کاهش ضریب انتشارپذیری تقریباً بی‌تاثیر است.

مراجع

[1]. H. J. Zimmermann, "fuzzy Sets theory and its application," Third edition, Published by Prentice Hall, Inc., 1997

[2]. "Fuzzy logic Toolbox User's Guide", Published by Mathworks. Inc., (1998)

[3]. J.-S R. Jang, C.-T. Sun E. Mizutani, "Neuro Fuzzy & Soft computing," Published by, Prentice Hall, Inc., 1997.

[4]-J.-S. R. Jang and C.-T. Sun, " Neuro-Fuzzy Modeling and Control," The Proceedings of the IEEE, vol. 83, pp. 378-406, Mar. 1995

[۵]- سیستم‌های فازی و کنترل فازی -نوشته:لی وانگ-ترجمه:محمد تشنه لب-دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، چاپ دوم،مهرماه ۱۳۸۰

[6]- Kosko, Bart. "Neural networks and Fuzzy systems- A dynamical system approach to Machine Intelligence," Published by Prentice Hall Inc., 1992

[7]- Detlef Nauck and Rudolf Kruse, "Choosing Appropriate Neuro-Fuzzy Models", In: Proc. EUFIT'94, Aachen 1994, pp. 552-557

[8]-J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," IEEE Transaction Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685, May 1993

[9]- Mehta, P.K., "Concrete in the Marine Environment", Elsevier Applied Science. 1991.

[10]- Mehta, P.K., "Concrete: Structure, and Materials", Prentice Hall, Englewood Cliffs. NJ. 1986.

[11]- Gonzalez, J.A. et al, "Comparison of rates of General Corrosion and Maximum Pitting Penetration on Concrete Embedded steel Reinforcement", Cement and Concrete Research , 25(2) , 1995.

[12]- Lea. F. M., "The Chemistry of Cement and Concrete", 3rd edition, Chemical Publishing Co., 1971

[13]-Gerwick. B.C., "Construction of Offshore Structures", Wiley Interscience, 1986

[14]- Idorn, G.M. "Marine Concrete Technology - viewed by Danish eyes", Gerwick

Symposium on Durability of concrete in Marine Environment, Berkeley, 1989.

[15]- Taheri. A. , "Durability of Reinforced Concrete Structures In Aggressive Marine Environment" , PhD Thesis, Delft University , 1998.

[۱۶]- زارع امامی ، علی ، تاثیر ضخامت پوشش بتن بر روی مقاومت بتنهای معمولی و توانمند در برابر نفوذ یون کلر، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران ، ۱۳۸۰

[۱۷]- قدوسی ،رمضانیاپور، پرهیزگار ودیگران ، فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، ۱۳۷۸

[18]- Luping, T. “Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction”,

Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, publication P-96:6, Goteborg, Sweden.

[19]- Taheri-Motlagh, A. “Durability of Reinforced Concreted Structures in Aggressive Marine Environment”, Thesis presented for the degree of doctor, Delft University of Technology, 1998.

[۲۰]- دکتر پرویز قدوسی، دکتر اسماعیل گنجیان، مهندس طیبه پرهیزگار و دکتر علی اکبر رمضانیاپور، فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، آسیب شناسی و ارزیابی آن، چاپ اول، بهار ۱۳۷۸

[21]-Mehrer,H.,”Diffusion in Solids,Fundamentals,Methods,Materials,Diffusion-Controlled Processes”,Springer Series in Solid State Siences.

[22]- Crank J., “The Mathematics of Diffusion”, 2nd ed., Oxford Press, London, 1975.

[23]-”Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration.” (T259-80), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1980.

[24]- Nordtest Method: Accelerated Chloride Penetration into Hardened Concrete, Nordtest, Espoo, Finland, Proj. 1154-94, 1995.

[25]-"Standard Method for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Rea Materials", (T260-94), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A, 1994.

[26]- NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration," ESPOO, Finland, 1995.

[27]- NordTest NT Build 492, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration," ESPOO, Finland, 1995.

[28]- ASTM C114-00, Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.

[29]- AASHTO T260, Acid Soluble Chloride in Concrete and Concrete Raw Materials.

ضمیمه ۱ - تصویرها

کلیه داده‌های استفاده شده در این تحقیق از آرشیو انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران استخراج شده

است.



تصویر ۱- قالب‌گیری آزمون‌های مکعبی، استوانه‌ای و منشوری



تصویر ۲- اجرای پوشش بر روی سطوح جانبی آزمون‌های منشوری



تصویر ۳- استقرار آزمون‌های منشوری در خاک و اتمسفر



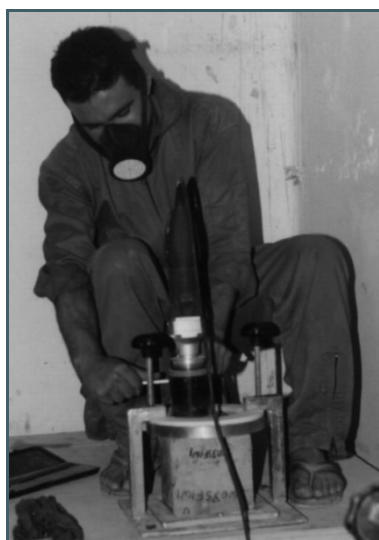
تصویر ۴- استقرار آزمون‌های منشوری در منطقه جزر و مد



تصویر ۵- استقرار آزمون‌های منشوری در حالت مغروق



تصویر ۶- برش آزمون‌های منشوری



تصویر ۷- پودر گیری از نمونه‌ها در لایه‌های مختلف



تصویر ۸- نمونه منشوری پس از پروفیل گیری



تصویر ۹- نگهداری پودرها در قوطی پس از پروفیل گیری



تصویر ۱۰- اندازه گیری مقدار یون کالر محلول ها به روش تیتراسیون پتانسیومتری



تصویر ۱۱- اندازه‌گیری مقدار یون کلر محلول‌ها به روش اسپکترو فتومتری

(اندازه‌گیری جذب نور)

ضمیمہ ۲ - دادہا

Time	SF	W/C	D
3	0	0.35	2.75E-12
3	0	0.4	12.47 E-12
3	0	0.45	12.58 E-12
3	0	0.5	10.74 E-12
3	0.05	0.35	0.94 E-12
3	0.05	0.4	1.22 E-12
3	0.05	0.45	2.13 E-12
3	0.05	0.5	4.38 E-12
3	0.075	0.35	0.51 E-12
3	0.075	0.4	1.75 E-12
3	0.075	0.45	1.31 E-12
3	0.075	0.5	3.33 E-12
3	0.10	0.35	0.56 E-12
3	0.10	0.4	1.28 E-12
3	0.10	0.45	1.12 E-12
3	0.10	0.5	4.31 E-12
3	0.125	0.35	0.34 E-12
3	0.125	0.4	1.50 E-12
3	0.125	0.45	1.30 E-12
3	0.125	0.5	1.84 E-12
9	0	0.35	1.135 E-12
9	0	0.4	3 E-12
9	0	0.45	6.74 E-12
9	0	0.5	6.98 E-12
9	0.05	0.35	0.62 E-12
9	0.05	0.4	1.05 E-12
9	0.05	0.45	1.8 E-12
9	0.05	0.5	2.34 E-12
9	0.075	0.35	0.26 E-12
9	0.075	0.4	0.99 E-12
9	0.075	0.45	1.04 E-12

9	0.075	0.5	1.59 E-12
9	0.10	0.35	0.4 E-12
9	0.10	0.4	0.98 E-12
9	0.10	0.45	0.57 E-12
9	0.10	0.5	1.97 E-12
9	0.125	0.35	0.24 E-12
9	0.125	0.4	1.16 E-12
9	0.125	0.45	0.88 E-12
9	0.125	0.5	1.48 E-12
36	0	0.35	0.618 E-12
36	0	0.4	1.56 E-12
36	0	0.45	3.26 E-12
36	0	0.5	2.5 E-12
36	0.05	0.35	0.307 E-12
36	0.05	0.4	1.1 E-12
36	0.05	0.45	1.08 E-12
36	0.05	0.5	1.39 E-12
36	0.075	0.35	0.399 E-12
36	0.075	0.4	1.61 E-12
36	0.075	0.45	0.7 E-12
36	0.075	0.5	0.998 E-12
36	0.10	0.35	0.28 E-12
36	0.10	0.4	0.668 E-12
36	0.10	0.45	0.662 E-12
36	0.10	0.5	1.54 E-12
36	0.125	0.35	0.428 E-12
36	0.125	0.4	0.906 E-12
36	0.125	0.45	0.934 E-12
36	0.125	0.5	1.03 E-12

Abstract:

Deterioration of concrete structures in marine environments, especially in Persian Gulf region is a serious problem mainly due to chloride ingress into concrete. It is generally assumed that the diffusion of chloride ions follows Fick's second law. In this equation, Diffusion coefficient is a quantified representative of different effective parameters like water to binder ratio, silica fume content and etc. This study attempts to model the relation between diffusion coefficient and various parameters collected from experimental works in Persian Gulf by using an Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS). The predicted results were satisfactory and by comparing the obtained rules and results, significant conclusion can be drawn to illustrate the behavior of a natural system and evaluate the general trend in a system such as chloride diffusion. Therefore it can assist researchers in finding out the effect of different parameters in chloride diffusion.

Keywords: Chloride diffusion coefficient, Fick's second law, ANFIS, Persian Gulf



Shahrood University of Technology

Faculty of Engineering

Civil Engineering Department

**Evaluation of chloride diffusion
Coefficient into concrete exposed to Persian
Gulf environment using adaptive-network
based fuzzy inference system (ANFIS)**

By:

Javad Mohammadi

Supervisor:

Dr. Ali Keyhani

Advisor:

Dr. Mohammad Shekarchizadeh

A thesis submitted to the Graduate Studies Office in
Partial fulfillment of the requirements for the degree of
M.Sc.in Structural Engineering

May 2010