



پیش‌بینی مقاومت بتن‌های معمولی و میکروسیلیسی در مقابل نفوذ یون‌های کلراید به استفاده از شبکه‌های عصبی

مرتضی خادمی بحرینی، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر¹

سینا خادمی بحرینی، دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه هرمزگان²

چکیده

خوردگی آرماتور در اثر نفوذ یون‌های کلراید از محیط اطراف به بتن، مهمترین عامل کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی اجرا شده در محیط‌های خورنده همچون نواحی جنوبی کشورمان است. کنترل کیفی بتن در زمان اجرا، می‌تواند منجر به ساخت سازه‌هایی با عمر طولانی در اینگونه محیط‌ها شود. انجام آزمایش تسریع شده نفوذ یون‌های کلراید در بتن (RCPT)، یکی از روشهای کنترل کیفی بتن‌های ساخته شده در زمان اجرای سازه می‌باشد. طی یک پروژه تحقیقاتی، با انجام آزمایش RCPT بر روی دو نوع بتن معمولی و میکروسیلیسی، مقاومت این بتن‌ها در مقابل نفوذ یون‌های کلراید مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پروژه، از 8 نوع طرح اختلاط با 2 مقدار میکروسیلیس (0 و 7 درصد مواد سیمانی) و 4 نسبت آب به مواد سیمانی 0/35، 0/4، 0/45 و 0/5، استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان‌دهنده بهبود کیفیت بتن در صورت استفاده از میکروسیلیس و همچنین کاهش نسبت آب به مواد سیمانی است. در ادامه این کار تحقیقاتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و به کمک شبکه‌های عصبی، مدلهایی برای پیش‌بینی مقاومت دو نوع بتن معمولی و میکروسیلیسی در مقابل نفوذ یون‌های کلراید، ایجاد شده است. نتایج مدل‌های ایجاد شده نشان‌دهنده کارایی و دقت بالای شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی پدیده‌های نامعلوم و پیچیده در بخش‌های مختلف مهندسی عمران همچون کنترل کیفیت بتن در زمان اجرا می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن‌های معمولی و میکروسیلیسی، نفوذ یون‌های کلراید، آزمایش RCPT مدل‌های شبکه عصبی

1- مقدمه

چهار عامل محیطی خوردگی آرماتور، واکنشقلیایی سنگدانه‌ها، یخ‌زدگی و حمله سولفات‌ها، مهمترین عواملی بوده که موجب خرابی زودرس در سازه‌های بتنی را فراهم می‌سازند [Ozyildirim, 1993]. نفوذ یونهای کلراید در بتن و از بین رفتن لایه اکسیدی خودجوش در اطراف آرماتورها، عامل شروع خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی اجرا شده در بزرگراهها و نواحی ساحلی است [Thompson & Lankard, 1997]. نفوذ این یونها به عواملی چون شرایط

¹تهران، خیابان کریمخان زند، خیابان خردمند شمالی، شماره 149، پژوهشکده حمل و نقل تلفن: 8843069

پست الکترونیک: khademi@rahiran.ir

²پست الکترونیک: sina_morvarid@yahoo.com

محیطی، ترکیبات و کیفیت اجرای بتن بستگی دارد. کاهش نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)، نفوذ یونهای کلراید را در بتن کاهش می‌دهد. تحقیقات متعددی [Detwiler, et al., 1994; Hooton, et al., 1997; Ding & Li, 2002] نیز وجود دارد که نشان می‌دهد استفاده از مواد افزودنی سیمانی نظیر میکروسیلیس در بتن بر کاهش نفوذ یونهای کلراید در بتن تأثیر گذار است.

طی سالهای اخیر به دلیل کشف منابع عظیم گاز و نفت شاهد شدت یافتن ساخت سازه‌های بتنی در نواحی ساحلی جنوب کشورمان بوده‌ایم. مناطق ساحلی خلیج فارس یکی از مستعدترین نواحی در جهان جهت خوردگی آرماتور و در نتیجه کاهش عمر سازه‌های بتنی به شمار می‌آید. بروز این استعداد در این مناطق نتیجه ترکیب عوامل مختلفی است که عبارتند از [Aldred, 1993]: (1) غلظت بالای یونهای کلراید و سولفات در محیط، (2) رطوبت و دمای بالا به همراه بادهای خشک و گرم، (3) تغییرات زیاد دما و رطوبت در طول شبانه‌روز و بالاخره (4) کیفیت پایین مصالح به همراه تکنولوژی نامناسب اجرا.

هدف از این مطالعه، مشاهده و بررسی تأثیر استفاده از میکروسیلیس بر مقاومت بتن در مقابل نفوذ یونهای کلر بوده است. شاخص مقاومت بتن در مقابل نفوذ یونهای کلر در این مطالعه، نتایج آزمایش سریع نفوذ یونهای کلراید در بتن (RCPT³) بوده که مطابق استاندارد ASTM C1202 صورت پذیرفته است. همچنین در این مطالعه سعی شده برای پیش‌بینی این شاخص با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مدل‌هایی به کمک شبکه‌های عصبی ایجاد گردد.

جدول 1- ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان و میکروسیلیس مصرفی

ترکیبات شیمیایی			خواص فیزیکی		
نوع ماده شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	سیمان	پارامتر فیزیکی	میکروسیلیس
SiO ₂	۲۰/۱۹۶	۹۱/۱۲۰	۱۲/۱۲۵	چگالی ویژه	۲/۲۰
Al ₂ O ₃	۴/۲	۱/۰۰	در ۱ m ³ kg		
Fe ₂ O ₃	۱/۶	۰/۲۰	۲۳/۱/۶	بلور	-
CaO	۶۱/۸۸	۱/۶۸	-	سختی مخصوص	۱۱۰۰۰
MgO	۲/۱	۱/۸۰	زمان گیرش (دقیقه)		
Na ₂ O + 0.658 K ₂ O	۱/۴۷	-	۱۵۰	اولیه	
SO ₃	۱/۷۹	۰/۸۷	۱۹۰	نهایی	
اقت سرخ شدن	۱/۳۴	-	مقاومت فشاری		
واهمانه با محلول	۰/۵۸	-	۲۲۳	۳ روز	-
انک آرد	۰/۷۶	-	۳۰۶	۷ روز	
C ₃ S	۵۲/۷۴	-	۶۱۴	۲۷ روز	
C ₂ S	۴۰/۲۱	-			
C ₃ A	۶/۲۵	-			

2- مطالعات آزمایشگاهی

1-1- مصالح

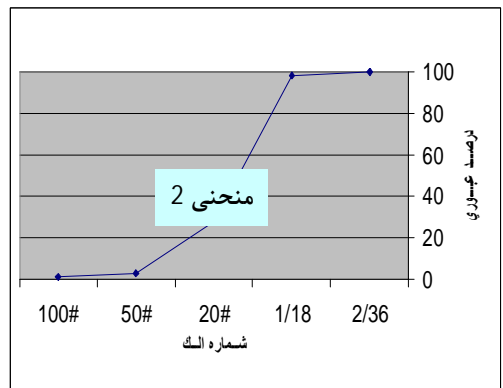
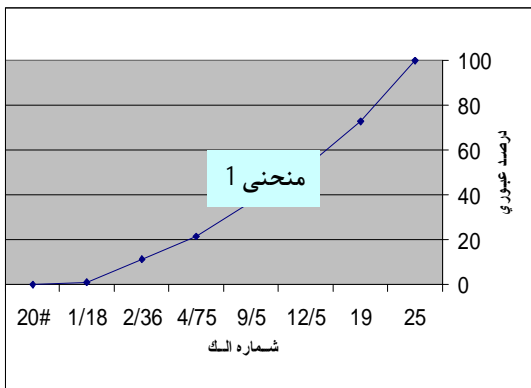
سیمان بکار گرفته شده در ساخت کلیه نمونه‌ها، سیمان نوع 2 تهران می‌باشد. خواص شیمیایی و فیزیکی این نوع سیمان در جدول 1 آمده است. شن و ماسه بکار گرفته شده، از کارخانه متوساک بوده که سایر مشخصات آن در جدول 2 و منحنی دانه‌بندی آن در شکل 1 مشاهده می‌گردد. میکروسیلیس به صورت دوغاب در ساخت بتن مورد استفاده

³ Rapid Chloride Permeability Test

قرار گرفته شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی این مصالح در جدول 1 آورده شده است. آب مورد مصرفی در ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهری است. ماده افزودنی فوق روان‌کننده، نوعی افزودنی شیمیایی است که مقدار آب لازم برای مخلوط بتنی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد ولی در عین حال غلظت و روانی، ثابت می‌ماند. ماده افزودنی مصرف شده در این تحقیق فوق‌روان‌کننده با نام تجاری Melcrete IR105 بوده که بر پایه پلیمرهای پلی‌کربکسیلیک اتر (Polycarboxylic ether) اصلاح‌شده قرار دارد و به صورت مایع و همراه با آب در ساخت نمونه‌ها مصرف می‌گردد. از این ماده حداکثر تا 1/2 درصد سیمان که حد مجاز توصیه شده از طرف کارخانه سازنده است، استفاده شده است.

جدول 2- مشخصات مصالح سنگی

سنگدانه	منحنی دانه‌بندی	نوع	وزن مخصوص (در حالت SSD) (gr/cm ³)	جذب آب (در حالت SSD) %	درصد عبوری از الک 200
شن	منحنی 1	طبیعی	2/5	2/43	0/6
ماسه	منحنی 2	طبیعی	2/54	3/12	1/26



شکل 1- منحنی‌های دانه‌بندی شن و ماسه

جدول 3- مشخصات انواع طرح اختلاط و نتایج اندازه‌گیری مقاومت 28 روزه

کد طرح اختلاط	W/C	آب (Kg)	سیمان (kg)	شن (Kg)	ماسه (Kg)	میکروسیلیس (Kg)	مقاومت* (MPa)
C.50	0/5	180	360	1000	800	0	34
SC.50	0/5	180	334/8	1000	800	25/2	36/8
C.45	0/45	162	360	1000	800	0	35/9
SC.45	0/45	162	334/8	1000	800	25/2	39/1
C.40	0/4	144	360	1000	800	0	45/5
SC.40	0/4	144	334/8	1000	800	25/2	58/7
C.35	0/35	126	360	1000	800	0	56
SC.35	0/35	126	334/8	1000	800	25/2	61/2

* اندازه‌گیری مقاومت بر اساس نمونه‌های مکعبی 10*10*10 و پس از 28 روز عمل‌آوری صورت پذیرفته است

2-2- مشخصات طرحهای اختلاط

در این پروژه تحقیقاتی از 8 طرح اختلاط مختلف استفاده شد. این طرح اختلاطها دارای مصالح سنگی ثابت بوده و نسبت آب به سیمان و همچنین مقدار میکروسیلیس در مواد سیمانی تغییر می‌کند. چهار نسبت آب به سیمان 0/35، 0/4، 0/45 و 0/5 و دو مقدار میکروسیلیس 0% و 7% وزن سیمان بکار گرفته شده است. جدول 3، 8 طرح اختلاط به کار گرفته در ساخت نمونه‌ها را به تفکیک مقدار مصالح به کار رفته در هر طرح اختلاط نشان می‌دهد. دلیل استفاده از نسبت آب به مواد سیمان و مقدار میکروسیلیس بعنوان متغیر در ساخت نمونه‌ها، اهمیت و تأثیری بوده که این مقادیر در میزان نفوذ یون کلرید در بتن و در نتیجه در ایجاد مدل برای این فرآیند می‌تواند داشته باشد.

2-3- آماده سازی نمونه‌ها

پیش از مخلوط کردن مصالح، دوغاب میکروسیلیس با استفاده از یک مخلوط‌کن کوچک اتوماتیک، تولید می‌شود. این عمل برای اطمینان از یکنواختی میکروسیلیس و برای اختلاط بهتر مصالح صورت می‌پذیرد. عمل اختلاط به صورت دستی و در یک ظرف چهل لیتری انجام شده است. بخشی از فوق روان‌کننده بلافاصله پس از افزودن دوغاب میکروسیلیس و برای افزایش کارایی بتن تولید شده اضافه می‌گردد. برای هر کدام از طرح اختلاطها دو نوع نمونه تولید می‌گردد که عبارتند از: نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلیمتر و نمونه‌های استوانه‌ای 100×100 میلیمتر.

2-4- عمل آوری نمونه‌ها

عمل آوری کلیه نمونه‌ها در شرایط اشباع و در مدت 28 روز صورت پذیرفته است.

2-5- نتایج آزمایش‌ها و توضیحات

2-5-1- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلیمتر و پس از 28 روز عمل آوری انجام شده است. نتایج این آزمایش برای طرح‌اختلاطهای مختلف در جدول 3 آمده است.



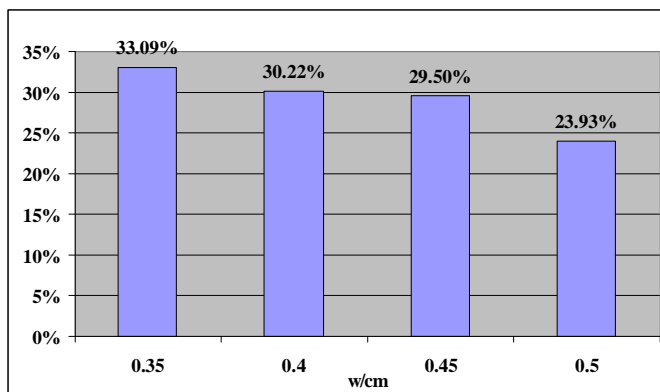
شکل 2- دستگاه آزمایش RCPT در حین انجام آزمایش (مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن - دانشکده عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

2-5-2- آزمایش سریع نفوذپذیری یون کلراید (RCPT)

بر اساس برنامه‌ریزی‌های انجام شده در این تحقیق جهت انجام آزمایش RCPT، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر 10 سانتیمتر و ضخامت 10 سانتیمتر برای تبدیل به نمونه‌هایی با قطر 10 سانتیمتر و ضخامت 5 سانتیمتر برش داده می‌شوند. پیش از انجام آزمایش مرحله آماده‌سازی نمونه‌ها در شرایط اشباع و خلأ انجام می‌شود. سپس شارژ عبوری در مدت 6 ساعت توسط رایانه ثبت می‌گردد (شکل 2). برای هر طرح اختلاط سه نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرند. قابل توجه می‌باشد که نتایج این آزمایش نمایانگر میزان مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلر بوده و نمی‌تواند شاخصی برای نفوذپذیری بتن به حساب آید. گرچه باید اذعان نمود که این میزان مقاوت می‌تواند شاخص مناسبی برای کنترل کیفیت بتن در زمان اجرا باشد. جدول 4 مقادیر میانگین نتایج RCPT را برای طرح اختلاط‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از میکروسلیس در کاهش نتایج مؤثر می‌باشد. شکل 4 تأثیر استفاده از 7 درصد میکروسلیس بر روی نتایج آزمایش RCPT به تصویر می‌کشد.

جدول 4- نتایج آزمایش RCPT

کد طرح اختلاط	مقدار کلمب اندازه‌گیری شده			میانگین مقدار کلمب اندازه‌گیری شده
	نمونه 1	نمونه 2	نمونه 3	
C.50	3646	3990	3736	3791
SC.50	2976	2865	2810	2884
C.45	3427	3390	3585	3461
SC.45	2332	2456	2531	2440
C.40	2669	2643	2511	2608
SC.40	1828	1913	1718	1820
C.35	1707	1802	1735	1748
SC.35	1333	1198	977	1169



شکل 3- نمودار میله‌ای درصد کاهش (بهبود) مقادیر کلمب اندازه‌گیری شده برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی در صورت افزودن میکروسلیس

3- مدل‌های شبکه عصبی

طی سالهای اخیر از روش شبکه‌های عصبی به عنوان شاخه‌ای از دانش هوش مصنوعی، در حل بسیاری از مسائل عمران به ویژه مهندسی سازه بکار گرفته شده است [Ni & Wang, 2000; Dias & Pooliyadda, 2001]

[2003], Bai, et al., در این روش به واقع با استفاده از آموزش روابط پیچیده بین داده‌های تجربی، می‌توان تعداد فرضیات مسئله را کاهش داد و روابط واقعی‌تری را برای پدیده‌های طبیعی ایجاد نمود. در این مقاله از این روش برای پیش‌بینی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید استفاده گردیده است. با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان نتایج RCPT (coulombs) را پیش‌بینی کرد. در این مدل پارامتر ورودی مشخصات طرح اختلاط می‌باشد. برای آموزش شبکه‌های عصبی از الگوریتم انتشار برگشتی و روش Levenberg-Marquardt استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، روشی عملی و مناسب می‌باشد.

3-1- مدل شبکه عصبی برای نتایج RCPT

نسبت آب به سیمان (W/CM) و مقدار میکروسیلیس (به صورت درصدی از وزن سیمان) به عنوان دو پارامتر ورودی در ساخت مدل انتخاب گردیده است. دلیل این انتخاب میزان تأثیری بوده که این دو پارامتر در نفوذ یون کلراید در بتن دارند.

داده‌های لازم برای ساخت مدل از نتایج آزمایش RCPT برداشت گردیده است. دو شبکه عصبی مجزا برای ساخت این مدل آموزش دیده است. هر کدام از این شبکه‌ها دارای دو ورودی (نسبت W/CM و مقدار میکروسیلیس) و یک خروجی (نتایج آزمایش RCPT بر حسب کلمب) می‌باشند. تعداد بهینه نرون‌ها در لایه‌های پنهان به روش تجربی تعیین می‌گردد (روش دقیق ریاضی که تعداد بهینه نرون در لایه پنهان را بدهد وجود ندارد). اگر چه تعدادی روش آماری وجود دارد (به طور مثال تعداد نرون‌ها در لایه پنهان بایستی برابر مجموع تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی باشد) اما این روش‌ها برای بعضی مسائل خاص کاربرد دارند.

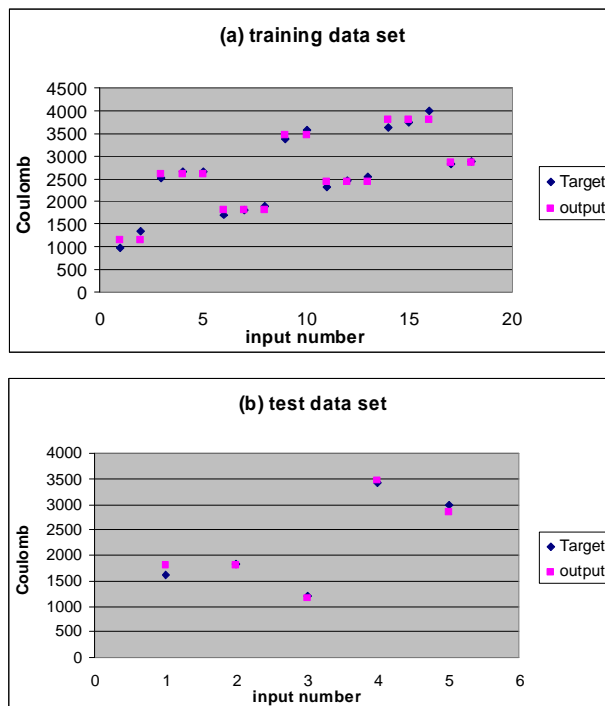
در اغلب موارد استفاده از یک مجموعه آموزشی به کارایی خوب مدل‌ها منتهی نمی‌شود. یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به کارایی خوب مدل‌های ایجاد شده، تعیین میزان کارایی مدل برای داده‌های جدید می‌باشد (مستقل از مجموع آموزش). بنابراین کل داده‌های بدست آمده از آزمایش به دو مجموعه آموزش و تست تقسیم می‌شوند، که به ترتیب 80 و 20 درصد مجمع کل داده‌ها را شامل می‌شوند.

ارزیابی آماری مدل برای دو مجموعه آموزش و تست در جدول 5 آمده است. R نمایانگر ضریب وابستگی خطی بین نتایج واقعی و خروجی مدل می‌باشد. در صورتی که بیشترین مقدار R، 1 می‌باشد مقادیر آن در جدول نشانگر دقت بالای مدل در انطباق نتایج واقعی است. Avg. abs. نمایانگر متوسط قدرمطلق اختلافات میان نتایج واقعی و خروجی‌های مدل می‌باشد. Max. abs. نمایانگر ماکزیمم قدرمطلق اختلافات میان نتایج واقعی و خروجی‌های مدل می‌باشد. RMS نمایانگر جذر متوسط مربع اختلافات میان نتایج واقعی و خروجی‌های مدل می‌باشد.

شارژ عبوری از بتن برحسب کلمب برای مقادیر مختلف نسبت آب به سیمان و میکروسیلیس و برای دو مجموعه آموزش و تست با استفاده از مدل‌های آموزش دیده تولید شده و سپس با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند (شکل 4). این مقایسه نشان می‌دهد مدل‌های شبکه عصبی تخمین خوبی از مقادیر کلمب واقعی از نتایج آزمایشگاهی ایجاد می‌نمایند. مدل ایجاد شده واقعی و دقیق بوده و بنابراین از آنها می‌توان برای پیش‌بینی نتایج RCPT برای دو مقدار میکروسیلیس و مقادیر مختلف نسبت آب به سیمان بین 0/35 تا 0/5 استفاده نمود.

جدول 5- ارزیابی مدل شبکه عصبی

مدل	داده‌ها	R	Avg. abs.	Max. abs.	RMS	Records
RCPT	آموزش	0.992	84.031	199.3	101.958	19
	تست	0.991	92.2	138.5	112.359	5



شکل 4- مقایسه نتایج RCPT پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی و مقادیر واقعی

4- نتیجه‌گیری

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و مدل‌های شبکه عصبی که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ایجاد شده، نتیجه‌گیریهای زیر قابل برداشت می‌باشد:

1- نتایج آزمایش سریع نفوذپذیری یون کلراید (ASTM C1202) استفاده از 7% میکروسیلیس جایگزین سیمان در بتن 23/9 تا 33/1 درصد در افزایش نتایج مؤثر می‌باشد.

2- روش بکارگرفته در مدل‌سازی داده‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های شبکه عصبی ساخته شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در عمل برای پیش‌بینی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید مفید می‌باشد.

منابع

- Aldred J., 'the application of an absorption-based performance specification for durability in the Persian Gulf', Presented at the 4th International conf. Deterioration and repair of reinforced concrete in the Arabian Gulf, Bahrain, 1993, pp. 895-903.
- C1202-97, 1997 "Standard Test Method for Electrical Indication of Chloride's ASTM Annual Book of ASTM Standards, V. 04.02, ASTM, Ability to Resist Chloride", Philadelphia, pg. 620-5
- Bai, J., Wild, S., Ware, J. A. and Sabir B. B., "Using neural networks to predict Workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash", Advances in Engineering Software, Vol. 34, Issue 11-12, December, 2003, pp. 663-669.

- Detwiler, R.J., Fapohunda C., and Natale, J., "Use of Supplementary Cementing Materials to Increase the Resistance to Chloride Ion Penetration of Concrete Cured at Elevated Temperatures", ACI Materials Journal, V. 91, No. 1, January-February, 1994, pp. 63-66.
- Dias, W. P. S. and Pooliyadda, S. P., "Neural networks for predicting properties of concrete with admixtures", Construction and Concrete Materials, Volume 15, Issue 7, October, 2001, pp. 371-379.
- Ding, J.T. and Li, Z., "Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete", ACI Materials Journal, V. 99, No. 4, July-August, 2002, pp. 393-398.
- Hooton, R.D., Pun, P., Kojundic, T. and Fidjestol, P., "Influence of Silica fume on Chloride Resistance of Concrete", Presented at the PCI/FHWA International Symposium on HPC, October, 1997.
- Ni H., Wang J., "Prediction of compressive strength of concrete by neural networks", Cement and Concrete Research, 2000, 30(8), 1245-1250.
- Ozyildirim, C., "Durability of Concrete Bridges in Virginia", ASCE Structures Congress '93: Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation, American Society of Civil Engineers, New York, 1993, Vol. 2, pp. 996-1001.
- Thompson, N.G., Lankard, D.R., Improved concretes for corrosion resistance, Georgetown Pike, McLean VA, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-96-207, 1997.