



آنالیز حساسیت در مدل سازی پیش بینی مقاومت فشاری بتن با خاکستر کوره زباله سوزی به کمک روش یادگیری عمیق

محمد امامی کورنده

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

حسین گنجی دوست

استادگروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

بتن سبز به اصطلاح به بتنی اطلاق می شود که دوستدار محیط زیست بوده و در فرآیند ساخت آن یا از آلودگی محیط زیست بکاهد یا شرایط بهبود وضعیت زیست محیطی را فراهم سازد. تحقیق حاضر به مدفون سازی خاکستر کوره زباله سوزی به عنوان سمی ترین ماده فرآیند دفع مواد زائد در ساخت بتن پرداخته است. این مقاله یک روش تحقیق ترکیبی آزمایشگاهی و عددی داشته که در چند مرحله انجام شده و نهایتاً به آنالیز حساسیت مدل یادگیری عمیق حاصل از نتایج این تحقیق می پردازد. برنامه آزمایشگاهی جهت تکمیل بانک اطلاعاتی در مدل سازی یادگیری عمیق به کمک شبکه عصبی مصنوعی (CNN) و الگوریتم بهینه سازی چند مقدره (MVO) تکمیل شده است. پس از بررسی کارایی مدل یادگیری عمیق و معرفی ساختار بهینه به کمک کدنویسی در نرم افزار MATLAB به آنالیز حساسیت اثر پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی به عنوان موضوع اصلی این مقاله توجه شده است. نتایج آنالیز حساسیت بر روی مدل بهینه معرفی شده نشان داد که در مقایسه اثر پنج پارامتر ورودی بر روی مقاومت فشاری حاصله می توان گفت که با توجه به فاصله دسته های آماری از خط پایه، مقادیر درصدها و مقادیر میانگین می توان گفت که وزن سیمان (W) بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری داراست. **واژگان کلیدی:** بتن سبز، خاکستر زباله سوزی، یادگیری عمیق، آنالیز حساسیت.



مقدمه

اصطلاح بتن سبز در واقع به بتن دوستدار محیط زیست اشاره دارد. با توجه به اینکه در حال حاضر ۷ درصد از آلودگی های زیست محیطی مضر برای لایه اوزون ناشی از فرآیند تولید سیمان است و هر تن سیمان تولیدی معادل یک تن دی اکسید کربن است و از سوی دیگر، تعهد ایران به کاهش گازهای گلخانه ای در پاریس تا سال ۲۰۲۵ بازنگری در صنعت ساختمان کشور با رویکرد استفاده از سیستم بتن سبز اجتناب ناپذیر است. در حال حاضر بسیاری از این سیستم ها در آمریکا و کشورهای اروپایی اجرا می شوند. پژوهش های سازه ای «روش و استاندارد ارزیابی کیفیت ساختمان از دیدگاه پایداری و مصرف انرژی، BREEAM» در انگلستان و «استاندارد پیشرو در طراحی محیطی و انرژی (LEED)» در آمریکا از بهترین نمونه های سیستم های رتبه بندی زیست محیطی هستند. که با هدف تعیین دستورالعمل هایی طراحی شده اند تا به طراحان و مالکان کمک کنند تا اثرات منفی زیست محیطی و اکوسیستمی را به حداقل برسانند. همچنین استفاده موثر و بهینه از تمامی منابع طبیعی در این سامانه مد نظر قرار گرفته است. ساختمان ها تقریباً نیمی از انتشار گازهای گلخانه ای، مصرف انرژی و مصرف مواد خام در سراسر جهان را تشکیل می دهند. از آغاز تاریخ، بشر همواره برای سازماندهی محیط پیرامون خود برای رفع نیازهای اساسی خود دست به ابتکاراتی زده است. انسان به دنبال ایجاد محیطی قابل زندگی برای رفع نیازهای جسمی و روحی خود بوده است. امروزه نیز با استفاده از مصالح جدید و تمامی امکانات تکنولوژیکی که از نظر اقتصادی، پرهزینه و آلاینده زیست محیطی هستند، مشاهده می شود که در برخی موارد آن آسایش و آرامش فراهم نمی شود که امروزه با استفاده از معماری پایدار این مشکل برطرف شده است. رشد صنعت ساخت و ساز در سال های اخیر سریع بوده و مصرف بتن تا حدود زیادی افزایش یافته است. به خاطر منبع محدود استخراج، با کمبود مصالح ساختمانی متداول مثل سیمان و سنگدانه ها روبرو شده ایم. برای کاهش تقاضا برای مصالح ساختمانی معمول، بتن سبز گزینه بهتری است. در عصر امروز، نقش مهم معماری سبز، استفاده از مصالح جدید با فناوری هوشمند و نانو است که با رویکرد استفاده از منابع تجدیدپذیر به جای منابع تجدیدناپذیر بر روی زمین اهمیت زیادی دارد و از این رو بتن سبز می تواند گام موثری باشد و باعث کمک به مردم در ایجاد فضای مناسب و محیطی سالم شود.

بررسی و تحلیل تحقیقات انجام شده در زمینه روش های مدیریت و بی خطر سازی خاکستر زباله سوز زباله شهری در سال ۱۴۰۰ با تاکید بر تثبیت و انجماد، پژوهش دیگری است که توسط مکنون و همکاران انجام شده است در این قرن با روند صعودی تولید زباله در جهان، استفاده از زباله سوزها به دلیل کاهش حجم و وزن زباله های شهری و بازیافت انرژی از آن افزایش یافته است. با توجه به وجود فلزات سنگین و سایر مواد سمی مانند دیوکسین و فوران در خاکستر زباله سوز شهری، مدیریت و رفع خطر سازی این ماده به روش های مختلف نیاز به بررسی دارد. در سال ۱۴۰۱ دیواندری و مکنون عملکرد آسفالت گرم ساخته شده با افزودنی خاکستر زباله سوز را ارزیابی کردند. امروزه با افزایش روزافزون جمعیت کره زمین و در نتیجه تولید زباله و گسترش محل های دفن زباله، آلودگی محیط زیست اجتناب ناپذیر است. در این راستا می توان فناوری زباله سوز را به عنوان روشی مطلوب برای کاهش ۹۰ درصدی حجم زباله های جامد شهری شناخت. زباله های جامد شهری باقی مانده پس از سوزاندن، خاکستر کف زباله سوز نامیده می شود، میلیون ها تن خاکستر کف زباله سوز هر ساله در محل های دفن زباله انباشته می شود. اخیراً خاک سطحی زباله سوز در صنایع ساختمانی مانند سرامیک، بلوک سیمانی و مخلوط بتن مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی به دست آمده است. راضیه گرشاسبی در سال ۱۳۹۷ به بررسی استفاده از خاکستر زباله سوز در تحقیقات خود پرداخت. انسان به روش های مختلف زباله تولید می کند و تولید زباله به طور چشمگیری در حال افزایش است. فناوری تولید بتن سبک ساخته شده از خاکستر زباله سوز از دیگر تحقیقاتی است که توسط سعیدی و عابدینی در سال ۱۳۹۸ انجام شده است. نقش مدیریت فعال پسماند جامد در توسعه پایدار زیست محیطی مهم است. صحرای و همکاران در سال ۱۳۹۹ امکان سنجی استفاده از خاکستر بادی و خاکستر کف زباله سوز را در ساخت روسازی های بتنی و آسفالتی بررسی کردند. زباله های جامد یکی از مشکلات مدیریت شهری است. زباله های پزشکی حاوی پاتوژن های خطرناک و سرطان زا هستند. این ممکن است شامل لوله های آزمایش، مواد کشت بافت و سلول، باند، سوزن، سرنگ، اندام های انسان و سایر زباله های پلاستیکی باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). واکنش همه گیر (COVID-19) ده ها هزار تن زباله جدید تولید کرد که بر سیستم های دفع زباله های پزشکی در سراسر جهان فشار وارد کرد و توجه محققان و جامعه را به خود جلب کرد (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۲۲). میزان زباله های پزشکی به

دلیل همه گیری COVID-19 به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، زباله های پزشکی در مقایسه با مدت مشابه قبل از همه گیری بیش از شش برابر افزایش یافته است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعه ای در سال ۲۰۲۳ بر روی دوام و پایداری بتن مصنوعی ساخته شده از خاکستر زیرین زباله سوزاندن زباله شهری (MSWIBA) توسط لی و همکاران انجام شده است. این مطالعه استفاده از سه ماده سیمانی رایج، سیمان پرتلند (OPC)، سرباره کوره بلند دانه بندی شده (GGBFS) و خاکستر بادی (FA) را به عنوان چسب برای تولید سه سنگدانه درشت مصنوعی سبک وزن (ALCA) از طریق پیوند سرد با خاکستر زیرین زباله سوز زباله شهری بررسی کرد.

با توجه به آنکه بتن یکی از اصلی ترین مصالح در فرآیند ساخت و ساز در ایران است، هدف اصلی تحقیق حاضر به آنالیز حساسیت در مدلسازی پیش بینی مقاومت فشاری بتن با خاکستر کوره زباله سوزی به کمک روش یادگیری عمیق می پردازد. داده های مورد استفاده در این تحقیق از مجموعه آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه تکنولوژی بتن شرکت سازه پی تحلیل استخراج شده است. بخش اول مقاله حاضر به مقدمه و مروری بر ادبیات فنی تحقیق پرداخته است. در بخش دوم این مقاله، به معرفی و تعریف روش تحقیق این مقاله پرداخته شده است. بخش سوم به بررسی روش یادگیری عمیق به کار رفته پرداخته است. در بخش چهارم، بانک اطلاعاتی و شرایط مدلسازی بیان شده است. بخش پنجم به تجزیه و تحلیل نتایج آنالیز حساسیت پرداخته است.

روش تحقیق

روش تحقیق مقاله حاضر شامل چند مرحله است. مرحله اول انجام برنامه آزمایشگاهی جهت تکمیل بانک اطلاعاتی مورد نیاز مدلسازی به کمک روش یادگیری عمیق است. در این مرحله آزمایشات مقاومت فشاری مهمترین بخش بوده در حالیکه جهت بررسی و رسیدن به طرح اختلاط بتن مرکب با خاکستر کوره زباله سوزی تمامی آزمایشات مورد نیاز با درصدهای مختلف خاکستر کوره زباله سوزی انجام شده است. شکل (۱) نمونه از تصاویر انجام آزمونهای مورد نیاز را نشان می دهد. همچنین جدول (۱) نیز نمونه ای از درصدهای وزنی مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط بتن مورد نظر (در اینجا C30) را نشان می دهد.



شکل ۱- مصالح مصرفی وزن شده بر اساس طرح اختلاط

جدول ۱- مشخصات نمونه های ساخته شده در برنامه آزمایشگاهی برای بتن C30

مصالح	C30F0	C30F5	C30F10	C30F15	C30F20
وزن سیمان	4.2kg	3.99kg	3.7kg	3.77kg	3.84kg
وزن خاکستر	0 kg	0.21 kg	0.42 kg	0.566 kg	0.768 kg
وزن شن	10.30 kg	10.30 kg	10.39 kg	10.19 kg	10.04 kg

13.11 kg	13.11 kg	13.2 kg	12.97 kg	12.76 kg	وزن ماسه
2.4kg	2.4kg	2.24kg	2.4kg	2.544kg	وزن آب
0.11 kg	0.11 kg	0.124 kg	0.111 kg	0.115 kg	وزن سوپرپلازیستر
0%	5%	10 %	15 %	20 %	درصد خاکستر زباله سوزی

پس از انجام برنامه آزمایشگاهی به مدلسازی روش یادگیری عمیق پرداخته شده است. برای این منظور از ترکیب شبکه عصبی پیچشی (CNN) به عنوان یکی از پر کاربردترین در یادگیری عمیق شبکه عصبی و الگوریتم بهینه سازی چند متغیره (MVO) به کدنویسی در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در این مرحله ساختار بهینه شبکه عصبی بوسیله شاخص های ارزیابی مورد استفاده بررسی شده و بهترین ساختار معرفی شده است. مرحله آخر تحقیق حاضر به آنالیز حساسیت و بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی مدلسازی پرداخته شده است.

بانک اطلاعاتی

برنامه آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی تهیه شد. بر اساس این برنامه ۱۰۰ نمونه مکعبی بتنی با ابعاد ۱۵ در ۱۵ در ۱۵ سانتی-متری ساخته شد و طرح اختلاط آن ثبت گردید. پس از گذشت ۲۸ روز از ساخت نمونه و عمل آوری آن در شرایط استاندارد نمونه تحت آزمایش شکست قرار گرفت. بانک اطلاعاتی مطابق جدول (۲) برای این مجموعه آزمایشات جمع آوری شد. پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه های درشت، سنگدانه ریز (ماسه) و درصد خاکستر زباله سوزی به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. سعی بر این شده است با این فرضیات تعداد پارامترهای ورودی کاهش یابد تا با داده های موجود شبکه عصبی در مدلسازی همگرایی مناسبتری داشته باشد. وزن آب و سیمان هم به عنوان پارامترهای ورودی دیگر انتخاب شدند. بنابراین پنج پارامتر ورودی سنگدانه درشت (CA) Coarse Aggregate، سنگدانه ریز (FA) Fine Aggregate، وزن خاکستر زباله سوزی (Ash Weight) (AW)، سیمان (C) و آب (W) می باشند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Fc) به عنوان تنها پارامتر خروجی مدلسازی در نظر گرفته شده است.

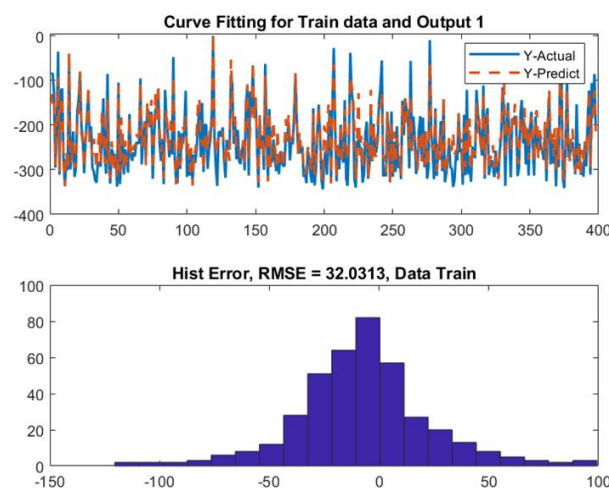
جدول ۲- نمونه ای از بانک اطلاعاتی ورودی و خروجی

Output Parameter	Input Parameters				
F _c (kg/cm ²)	CA (kg)	FA (kg)	AW (kg)	C (kg)	W (kg)
115	11.05	14.11	0.35	1.92	2.58
105	11.08	14.15	0.38	1.95	2.55
125	11.04	14.08	0.32	2.04	2.56
116	11.08	14.12	0.35	2.18	2.61
128	11.12	14.13	0.31	2.27	2.48
123	11.06	14.15	0.36	2.42	2.54
118	11.07	14.21	0.33	2.35	2.55
119	11.10	14.16	0.31	1.98	2.63
305	10.08	12.95	0.798	3.85	2.55
312	10.15	12.85	0.78	3.75	2.54
318	10.18	12.88	0.58	3.78	2.45
325	10.23	12.91	0.58	3.76	2.56
331	10.38	13.23	0.46	3.68	2.23
326	10.45	13.15	0.45	3.73	2.35

315	10.33	13.23	0.25	3.75	2.38
310	10.35	13.15	0.23	4.02	2.48
316	10.38	13.26	0	4.20	2.53

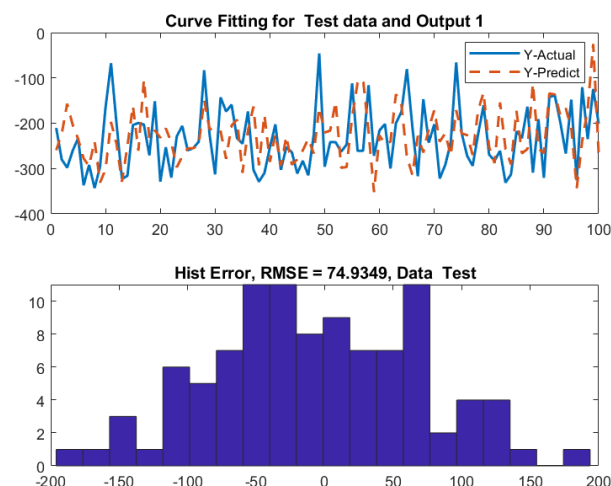
پیاده سازی روش یادگیری عمیق

برای پیاده سازی کدنویسی مورد استفاده، آموزش و ارزیابی آنها از نرم افزار MATLAB 9.5 (20018b) استفاده شده است. این نرم افزار با توجه به توابع متعدد، قابلیت برنامه نویسی، الگوریتمهای آموزشی و ساختارهای متعدد برای شبکه های عصبی و قدرت پردازش و تحلیل های آماری در حل مسائل مهندسی بسیار مورد توجه محققین بوده است. در این بخش جهت ارزیابی کارایی روش یادگیری عمیق از دو شاخص ارزیابی استفاده شده است. ضریب رگرسیون (R) و شاخص خطا (MSE) که در شکل های ادامه ارایه شده اند. در شکل (۲) منحنی آموزشی برای کدنویسی انجام شده، نشان داده شده است. پس از پایان آموزش مقادیر وزنها ذخیره شده و شبکه مورد نظر آماده است.

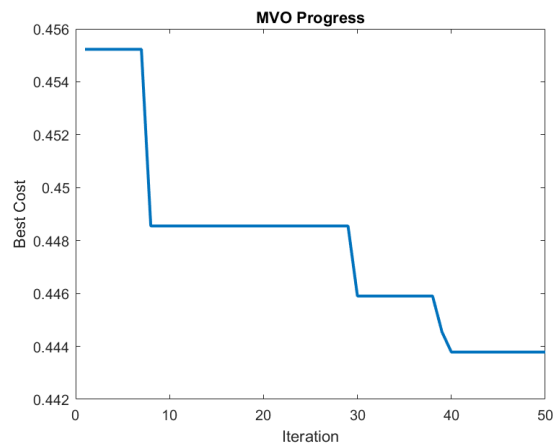


شکل ۲- دیاگرام آموزش یادگیری عمیق

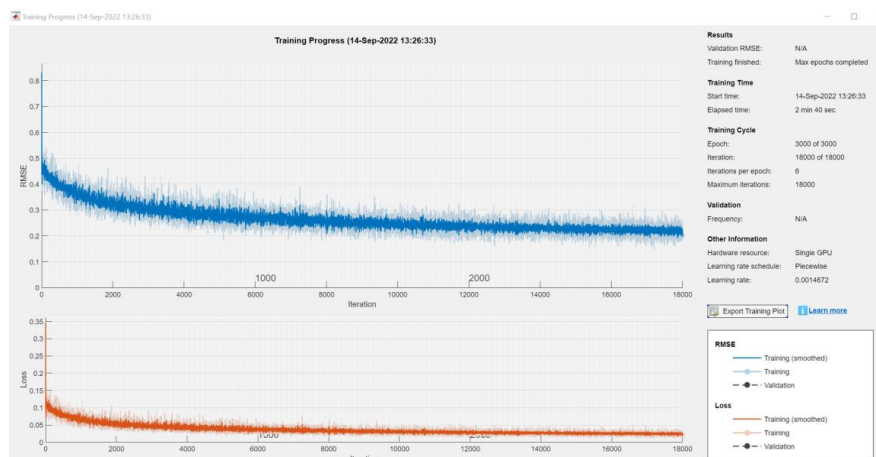
همچنین نمودار هیستوگرام خطا و شکل رگرسیون داده های در فرآیندهای آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است.



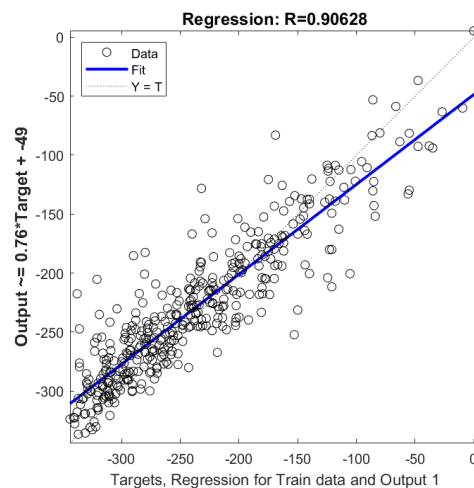
شکل ۳- دیاگرام آزمایش یادگیری عمیق



شکل ۴- منحنی عملکرد کد ترکیبی یادگیری عمیق



شکل ۵- منحنی آموزش کد ترکیبی یادگیری عمیق



شکل ۶- ضریب رگرسیون کد ترکیبی یادگیری عمیق

آنالیز حساسیت

روشهای یادگیری عمیق و الگوریتمهای یادگیری ماشین بسیار پر کاربرد بوده و در صورت وجود دادههای قابل اطمینان و مناسب از لحاظ تعداد داده، عملکرد موافقی خواهند داشت. اگر چه روند عملکردشان و نحوه اثرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی مشخص نیست. از اینرو انجام آنالیز حساسیت بسیار مهم بوده و نحوه اثر پارامترهای ورودی و خروجی را قابل تفسیر می کند. روشهای مختلفی جهت انجام آنالیز حساسیت در این مدلها وجود دارد، که در مقالات مختلف ارایه شده است. لو و همکاران با بررسی این روشها به این نتیجه رسیدند که اثر هر پارامتر ورودی بر روی متغیرهای خروجی از نظر مقدار و جهت با این روش در کل فضای ورودی قابل تعیین نیست [۱۴]. از اینرو آنها با روشی مبتنی بر آنالیز آماری مشتق خروجی شبکه نسبت به ورودی (حساسیت خروجی به ورودی)، آنالیز حساسیتی روی مسأله بهره وری در تولید لوله های انتقال انجام دادند و بیان کردند که مطالعه روی روابط درون شبکه های عصبی به استفاده کننده از آن اطمینان بیشتری به قدرت پیش بینی شبکه داده و همچنین استفاده از این مدلها را در کارهای علمی و مهندسی تسهیل می کند [۱۴]. با این هدف در این بخش، ابتدا رابطه مشتق خروجی نسبت به ورودی برای ساختارهای بهینه شبکه ارایه شده در هر مرحله تعیین شده است. سپس اثر پنج متغیر اصلی ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه مبتنی بر آنالیز آماری مقادیر مشتق نسبی خروجیهای مدل نسبت به ورودیهای مورد نظر در ۵۰۰ نقطه واقع در فضای پنج بعدی ورودیهای مورد بحث است. این نقاط با تابع توزیع نرمال انتخاب شده اند. با توجه به وجود ۱۰۰ دسته داده و نیاز به دادههای بسیار بیشتر جهت آنالیز حساسیت از نرم افزار SIMLAB استفاده شده است. با این هدف از روش آماری مقادیر حساسیت نسبی که توسط لو و همکاران (۲۰۰۱) بکار گرفته شد [۱۴] استفاده شده است. در این روش پنج درصد آماری (D10، D25، D50، D75 و D90) مقادیر حساسیت نسبی خروجیها نسبت به ورودی مورد نظر محاسبه می شود. به وسیله این روش می توان اثر افزایش و یا کاهش هر ورودی را به خروجی و روند کلی حاکم را در کل فضای ورودی براساس نمونه های تصادفی گرفته شده تعیین کرد. توضیح و تعریف نتایج بدست آمده از این روش به شرح ذیل است [۴۸]:

- D10: نشاندهنده مقداری برای حساسیت نسبی است که ۹۰٪ مقادیر از آن بیشتر و ۱۰٪ مقادیر از آن کمتر هستند. بنابراین اگر مثبت شود نشان می دهد که احتمال اینکه مقدار حساسیت نسبی مثبت باشد، بالای ۹۰٪ است یا به عبارتی احتمال اینکه خروجی با افزایش ورودی مورد نظر اضافه شود بالای ۹۰٪ است.
- D90: نشاندهنده مقداری برای حساسیت نسبی است که ۹۰٪ مقادیر از آن کمتر و ۱۰٪ مقادیر از آن بیشتر هستند. بنابراین اگر منفی شود نشان می دهد که به احتمال بالای ۹۰٪، خروجی با افزایش ورودی مورد نظر کاهش می یابد.
- توضیحات D25 و D75 مانند D10 و D90 هستند.
- D50: اگر این مقدار بر روی خط پایه (حساسیت صفر) باشد نشان می دهد که احتمال اینکه با افزایش ورودی، خروجی افزایش یا کاهش پیدا کند ۵۰٪ است.

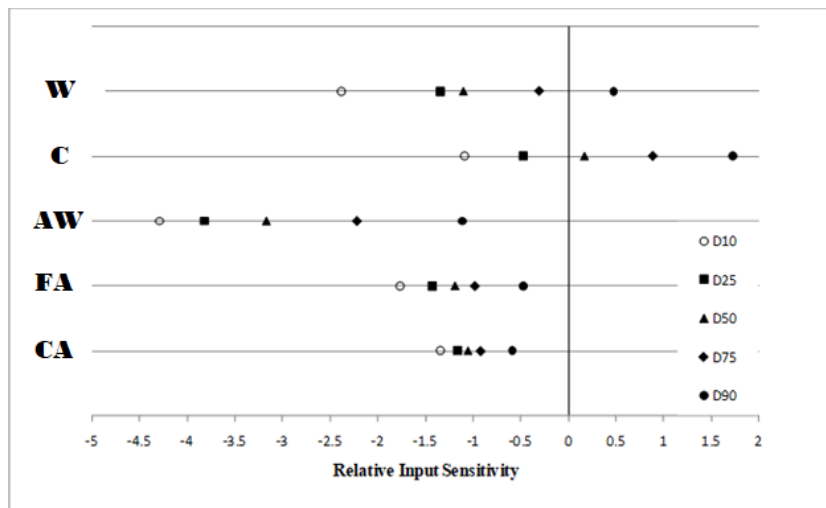
ورودی که دارای پخش مقادیر درصدی حساسیت نسبی حول خط پایه باشد، دارای اثر کمتری روی خروجی نسبت به ورودی است که دسته درصدی حساسیت نسبی آن دورتر از خط پایه است. بدین صورت با توجه به فاصله دسته و مقادیر درصدیهای آماری می توان درجه تأثیر هر متغیر را بر روی خروجی بررسی کرده و اثر آنها را با هم مقایسه کرد. همانگونه که قبلاً توضیح داده شد، برای مقایسه درجه اثر متغیرهای ورودی بجای استفاده از مقادیر حساسیت مطلق بهتر است از حساسیت نسبی استفاده شود. در جدول (۳) مقادیر میانگین حساسیتهای نسبی مقاومت فشاری نسبت به ورودیهای مورد بحث ارایه شده است.

جدول ۳- مقادیر میانگین حساسیت نسبی مقاومت فشاری نسبت به پارامترهای ورودی

Output	FC				
Input	W	C	AW	FA	CA

Relative Mean	-0.928	0.246	-2.920	-1.165	-1.015
---------------	--------	-------	--------	--------	--------

در ادامه مقادیر درصدی آماری مربوط به حساسیت‌های نسبی مقادیر مقاومت فشاری در مقابل هر پنج ورودی برای مدل به کار رفته در شکل (۷) ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، بیش از ۷۵٪ مقادیر حساسیت نسبی برای وزن آب (W) منفی است. این امر نشان‌دهنده کاهش مقادیر مقاومت فشاری در اثر بالا رفتن شاخص وزن آب (W) است. در مورد پارامتر ورودی دیگر یعنی وزن سیمان (C) مشخص است که مقادیر بیشتری از حساسیت نسبی در این پارامتر در حول محور صفر است ولی مقادیر مثبت درصد بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند که نشان‌دهنده افزایش مقدار مقاومت فشاری در اثر افزایش مقدار این پارامتر است.



شکل ۷- آنالیز حساسیت روش یادگیری عمیق در پارامترهای ورودی

بیشترین مقادیر منفی در حساسیت نسبی متعلق به وزن خاکستر کوره زباله‌سوزی است که بیشترین تأثیر کاهش در مقاومت فشاری اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، دو پارامتر ورودی دیگر شامل وزن مصالح سنگدانه درشت و ریز دارای مقادیر حساسیت نسبی منفی هستند و این نشان‌دهنده اثر کاهشی افزایش این دو پارامتر بر روی مقاومت فشاری بتن حاصل می‌باشد. البته شایان ذکر است که مطابق شکل اثر سنگدانه ریز بیشتر است. در مقایسه اثر این پنج پارامتر ورودی بر روی مقاومت فشاری حاصله می‌توان گفت که با توجه به فاصله دسته‌های آماری از خط پایه، مقادیر درصدی (شکل (۷)) و مقادیر میانگین نسبی (جدول (۳)) می‌توان گفت که وزن سیمان (W) بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری داراست.

بحث و نتیجه‌گیری

اصطلاح بتن سبز در واقع به بتن دوستدار محیط زیست اشاره دارد. با توجه به اینکه در حال حاضر ۷ درصد از آلودگی‌های زیست محیطی مضر برای لایه اوزون ناشی از فرآیند تولید سیمان است و هر تن سیمان تولیدی معادل یک تن دی اکسید کربن است و از سوی دیگر، تعهد ایران به کاهش گازهای گلخانه‌ای در پاریس تا سال ۲۰۲۵ بازنگری در صنعت ساختمان کشور با رویکرد استفاده از سیستم بتن سبز اجتناب ناپذیر است. در حال حاضر بسیاری از این سیستم‌ها در آمریکا و کشورهای اروپایی اجرا می‌شوند. روش تحقیق مقاله حاضر شامل چند مرحله است. مرحله اول انجام برنامه آزمایشگاهی جهت تکمیل بانک اطلاعاتی مورد نیاز مدلسازی به کمک روش یادگیری عمیق است. در این مرحله آزمایشات مقاومت فشاری مهمترین بخش بوده در حالیکه جهت بررسی و رسیدن به طرح اختلاط بتن مرکب با خاکستر کوره زباله‌سوزی تمامی آزمایشات موردنیاز با درصدیهای مختلف خاکستر کوره زباله سوزی انجام شده است. پس از انجام برنامه آزمایشگاهی به مدلسازی روش یادگیری عمیق پرداخته شده است. برای این منظور از ترکیب شبکه عصبی پیچشی (CNN) به عنوان یکی از پرکاربردترین در یادگیری عمیق شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی چند متغیره (MVO) به کدنویسی در نرم‌افزار

MATLAB استفاده شده است. در این مرحله ساختار بهینه شبکه عصبی بوسیله شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده بررسی شده و بهترین ساختار معرفی شده است. مرحله آخر تحقیق حاضر به آنالیز حساسیت و بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی مدلسازی پرداخته شده است.

پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه‌های درشت، سنگدانه ریز (ماسه) و درصد خاکستر زباله‌سوزی به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. سعی بر این شده است با این فرضیات تعداد پارامترهای ورودی کاهش یابد تا با داده‌های موجود شبکه عصبی در مدلسازی همگرایی مناسبتری داشته باشد. وزن آب و سیمان هم به عنوان پارامترهای ورودی دیگر انتخاب شدند. بنابراین پنج پارامتر ورودی سنگدانه درشت (CA) Coarse Aggregate، سنگدانه ریز (FA) Fine Aggregate، وزن خاکستر زباله‌سوزی (AW) Ash Weight، سیمان (C) و آب (W) می‌باشند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Fc) به عنوان تنها پارامتر خروجی مدلسازی در نظر گرفته شده است. برای پیاده‌سازی کدنویسی مورد استفاده، آموزش و ارزیابی آنها از نرم‌افزار MATLAB 9.5 (2001b) استفاده شده است. این نرم‌افزار با توجه به توابع متعدد، قابلیت برنامه‌نویسی، الگوریتمهای آموزشی و ساختارهای متعدد برای شبکه‌های عصبی و قدرت پردازش و تحلیلهای آماری در حل مسایل مهندسی بسیار مورد توجه محققین بوده است. در این بخش جهت ارزیابی کارایی روش یادگیری عمیق از دو شاخص ارزیابی استفاده شده است. ضریب رگرسیون (R) و شاخص خطا (MSE) که در شکلهای ادامه ارائه شده‌اند. نتایج مدلسازی به کمک یادگیری عمیق عبارتند از:

۱- ضریب رگرسیون (R) برابر ۹۰ درصد در این مدلها نشان دهنده کارایی مناسب روش یادگیری عمیق در مدلسازی طرح مخلوط حاضر است.

۲- روش یادگیری عمیق به کار رفته بهترین کارایی را بر اساس ضریب رگرسیون در سه مجموعه یادگیری، آزمایشی و ارزیابی از خود نشان داده است.

۳- شاخص خطا نیز در نتایج گزارش شده و در این شاخص نیز مشاهده می‌گردد که شبکه دولایه پرسپترون با ۸ نرون با میانگین ۰/۱۴ بهترین عملکرد را داشته است.

۴- مهمترین نتیجه تحقیق حاضر مربوط به انجام آنالیز حساسیت بر روی مدل بهینه معرفی شده است. بر این اساس مشاهده شد که بیشترین مقادیر منفی در حساسیت نسبی متعلق به وزن خاکستر کوره زباله‌سوزی است که بیشترین تاثیر کاهشی در مقاومت فشاری اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، دو پارامتر ورودی دیگر شامل وزن مصالح سنگدانه درشت و ریز دارای مقادیر حساسیت نسبی منفی هستند و این نشاندهنده اثر کاهشی افزایش این دو پارامتر بر روی مقاومت فشاری بتن حاصل می‌باشد. البته شایان ذکر است که مطابق شکل اثر سنگدانه ریز بیشتر است. در مقایسه اثر این پنج پارامتر ورودی بر روی مقاومت فشاری حاصله می‌توان گفت که با توجه به فاصله دسته‌های آماری از خط پایه، مقادیر درصدها (شکل (۷)) و مقادیر میانگین نسبی (جدول (۳)) می‌توان گفت که وزن سیمان (W) بیشترین تاثیر را بر مقاومت فشاری داراست.

منابع

- گرشاسبی، راضیه و زارع نژاد، حمیدرضا، ۱۳۹۰، مصارف خاکستر زباله سوز، پنجمین همایش ملی مهندسی محیط زیست، تهران، <https://civilica.com/doc/122065>
- سعیدی، فرزاد و عابدینی کارشک، محمد، ۱۳۸۹، تکنولوژی تولید بتن سبک ساخته شده از خاکستر زباله سوزها، همایش ملی انسان، محیط زیست و توسعه پایدار، همدان، <https://civilica.com/doc/106687>
- صحرائی کرم بستی، محمد و دیواندری، حسن و ابوالفتحی، بهنام، ۱۳۹۸، امکان سنجی استفاده از خاکستربادی و خاکسترکف زباله سوزها در ساخت بتن و روسازی های آسفالتی، <https://civilica.com/doc/1006682>
- گسکین تبریزی، محمدرضا و مکنون، رضا و عبادی، تقی و نیکروان، مرتضی، ۱۳۹۹، بررسی و تحلیل تحقیقات صورت گرفته در زمینه روش های مدیریت و بی خطر سازی خاکستر زباله سوز شهری با تاکید بر تثبیت و جامد سازی، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، <https://civilica.com/doc/1120332>



دیواندری، حسن و حسین جان زاده، حسین و صحرایی کرم بستی، محمد، ۱۴۰۰، ارزیابی عملکرد آسفالت گرم ساخته شده با افزودنی خاکستر زباله سوز، سیزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات، تهران، <https://civilica.com/doc/1360885>

آخوندی، مهدی، رامشت، محمد حسن، پور رستم، توحید، & گلصورت پهلویانی، علی. (۱۴۰۰). ارائه یک روش جدید برای تولید بتن دوستدار محیط زیست با استفاده از خرده پلاستیک ضایعاتی (PET) و دوده سیلیسی و بررسی مشخصات مکانیکی و دوام آن در روسازی بتنی غلتکی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۳)، ۱۱۰۷-۱۱۱۶. doi: 10.22060/ceej.2020.16789.6346

نقی پور، مرتضی و احمدی، شیرین و گرجی نژاد، فاطمه، ۱۴۰۰، بررسی تاثیر باطله زغال سنگ بر رفتار مکانیکی بتن سبز، <https://civilica.com/doc/1995308>

امامی کورنده، محمد، نوربخش، سیده نگار. (۱۳۹۹). 'بهینه سازی وزن سازه فولادی به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی'، رویکردهای نوین در مهندسی عمران ۴ (۴)، صفحات ۶۳-۷۷.

مستوفی نژاد، د، "تکنولوژی و طرح اختلاط بتن"، ارکان دانش، چاپ ۲۲، ۱۳۸۹.

افزودنی خاکستر بادی به بتن"، کلینیک فنی و تخصصی بتن ایران، ۱۳۹۴.

- Emami M., 2014. Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
- Emami M. Application of artifitial neural networks in pressuremeter test results. Master of Science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. 2009.
- Kim Hung Mo, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Soon Poh Yap, Feasibility study of high volume slag as cement replacement for sustainable structural lightweight oil palm shell concrete, Journal of Cleaner Production, Volume 91, 2015, Pages 297-304, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.021>.
- Emami, M. and Yasrobi, S.S., 2014. Modeling and interpretation of pressuremeter test results with artificial neural networks. Geotechnical and Geological Engineering, 32(2), pp.375-389.
- Yasrebi SS, Emami M. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in prediction and interpretation of pressuremeter test results. In The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 2008 Oct 1 (pp. 1634-1638).
- Javad Nodeh Farahani, Payam Shafigh, Hilmi Bin Mahmud, Production of A Green Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating High Volume Locally Available Waste Materials, Procedia Engineering, Volume 184, 2017, Pages 778-783, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.158>.
- M Emami, SS Yasrobi., Modelling of pressuremeter tests with artifitial neural networks - Sharif Journal of Civil Engineering, 2012
- Alderete, N. M., Joseph, A. M., Van den Heede, P., Matthys, S., & De Belie, N. (2021). Effective and sustainable use of municipal solid waste incineration bottom ash in concrete regarding strength and durability. Resources, Conservation and Recycling, 167, 105356.
- Li, J. (2021). Municipal solid waste incineration ash-incorporated concrete: One step towards environmental justice. Buildings, 11(11), 495.
- Wu, M. H., Lin, C. L., Huang, W. C., & Chen, J. W. (2016). Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. Construction and Building Materials, 111, 618-624.
- Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2022). Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete: Preliminary approach with Oporto wastes. Construction and Building Materials, 323, 126548.
- Wu, Z., Jiang, Y., Guo, W., Jin, J., Wu, M., Shen, D., & Long, Y. (2021). The long-term performance of concrete amended with municipal sewage sludge incineration ash. Environmental Technology & Innovation, 23, 101574.
- Zeng, C., Lyu, Y., Wang, D., Ju, Y., Shang, X., & Li, L. (2020). Application of fly ash and slag generated by incineration of municipal solid waste in concrete. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(1), 7802103.
- Liu, J., Fan, X., Li, Z., Zhang, W., Jin, H., Xing, F., & Tang, L. (2022). Novel recycling application of high volume municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) into sustainable concrete. Science of the Total Environment, 838, 156124.
- Kaur, H., Siddique, R., & Rajor, A. (2019). Influence of incinerated biomedical waste ash on the properties of concrete. Construction and Building Materials, 226, 428-441.
- Liu, Y., Kumar, D., Lim, K. H., Lai, Y. L., Hu, Z., Sanalkumar, K. U. A., & Yang, E. H. (2023). Efficient utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash for autoclaved aerated concrete formulation. Journal of Building Engineering, 71, 106463.



Sensitivity Analysis in the Prediction Modeling of Compressive Strength of Concrete with Incinerator Ash using Deep Learning Method

Mohammad Emami Korandeh

Assistant Professor, Department of Civil
Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran

Hossein Ganji Dost

Professor Department of Environmental
Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran,
Iran

Abstract

Green concrete refers to concrete that is environmentally friendly and in the process of making it either reduces environmental pollution or provides conditions for improving the environmental situation. The current research deals with the burial of incinerator ash as the most toxic substance in the process of disposal of waste materials in concrete production. This article has a combined laboratory and numerical research method that was carried out in several stages and finally deals with the sensitivity analysis of the deep learning model resulting from the results of this research. The laboratory program to complete the database in deep learning modeling with the help of artificial neural network (CNN) and multivariate optimization algorithm (MVO) has been completed. After checking the efficiency of the deep learning model and introducing the optimal structure with the help of coding in MATLAB software, attention has been paid to the sensitivity analysis of the effect of the input parameters on the output parameter as the main topic of this article. The results of the sensitivity analysis on the introduced optimal model showed that comparing the effect of five input parameters on the resulting compressive strength, it can be said that according to the distance of the statistical groups from the baseline, the percentage values and the average values, it can be said that the weight Cement (W) has the greatest effect on compressive strength.

Keywords: Green concrete, waste incineration ash, deep learning, sensitivity analysis.