

Using Taguchi method in optimizing the compressive strength of self-compacting lightweight structural concrete containing Nano-silica

Mohammad Mahdi Yoosefi¹, Peyman Hamami^{2*}, Moosa Mazloom³

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Professor of the Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Because of lightweight concrete has less mechanical properties than normal concrete, one of the objectives of engineering society is to design light weight concrete with a structural mechanical characteristic suitable for optimum resistance. Therefore, in this paper, using the Taguchi method to studied the parameters influencing of the compressive strength of Self-Compacting Light Weight Structural Concrete containing Nano-Silica. According to the Taguchi data, a total of 9 mixed designs were considered, taking into account the effects of the whole content, which included the ratio of water to cement materials, the ratio of Nano-silica to cement materials, the ratio of superplasticizer to cement materials, and the ratio of aggregate to total concrete weight. The results show that the maximum effect on the compressive strength is related to the change in water-to-cement ratio, which is about 56.5% of the impact on the pressure resistance. The percentage of Nano-silica to cement was 36.1. The third degree of impact on the compressive strength of the concrete is related to the effect of the superplasticizer ratio on the cement, which is about 7%, and finally the weight ratio of aggregates to the total concrete volume with an impact of about 0.4% in the fourth grade is important. Finally, the quality criterion was considered for lightweight concrete so that the optimal state for achieving Self-Compacting Light Weight Structural Concrete containing Nano-Silica with water to cement ratio was 0.35, the percentage of Nano-silica to cement was 4%, the superplasticizer percentage was 0.8%, the ratio of aggregate to total concrete volume was 0.49 obtained.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 June 2020

Revise Date: 23 October 2020

Accept Date: 05 January 2021

Keywords:

Taguchi method

Self-compacting concrete

Lightweight structural concrete

Nano-silica

Optimal mixing design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.234403.2163>

*Corresponding author: Peyman Homami

Email address: homami@khu.ac.ir

استفاده از روش تاگوچی در بهینه‌سازی مقاومت فشاری بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس

محمد مهدی یوسفی^۱، پیمان همامی^{۲*}، موسی مظلوم^۳.

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

یکی از اهداف توسعه تکنولوژی بتن، طراحی بتن سبک با مشخصات مکانیکی مناسب سازه‌ای است، در حالت کلی، بتن سبک، مشخصات مکانیکی ضعیف‌تری نسبت به بتن متعارف و معمولی دارد، به همین منظور در این پژوهش عوامل تاثیرگذار در مقاومت فشاری بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس ۱ با استفاده از روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته است. طبق داده‌های بدست آمده از روش تاگوچی در مجموع ۹ طرح مخلوط با در نظر گرفتن اثرات محتوای کل، مورد بررسی قرار گرفت که عبارت از نسبت آب به موادسیمانی، نسبت نانوسیلیس به موادسیمانی، نسبت فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی و نسبت سنگدانه به کل وزن بتن می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر در مقاومت فشاری مربوط به تغییر نسبت آب به موادسیمانی است؛ که ۵۶/۵ درصد تاثیر در نتایج مقاومت فشاری دارد. درجه دوم اهمیت مربوط به نسبت نانوسیلیس به موادسیمانی با درصد تاثیر ۳۶/۱ بوده و بعد از آن‌ها تاثیر نسبت فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی و تاثیر نسبت وزنی سنگدانه به کل بتن به ترتیب ۷ درصد در درجه سوم و ۰/۴ درصد در درجه چهارم اهمیت قرار گرفت. در نهایت معیار کیفیت برای بتن سبک مدنظر قرار گرفت تا حالت بهینه برای رسیدن به بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس با نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۵، درصد نانوسیلیس به موادسیمانی ۴، درصد فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی ۰/۸ و نسبت سنگدانه به کل حجم بتن ۰/۴۹ بدست آمد.

کلمات کلیدی: روش تاگوچی، بتن خودتراکم، بتن سبک سازه‌ای، نانو سیلیس، طرح مخلوط بهینه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.234403.2163	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.234403.2163	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۱۶	۱۳۹۹/۱۰/۱۶	۱۳۹۹/۰۸/۰۲	۱۳۹۹/۰۳/۱۹
				نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		
				پیمان همامی homami@khu.ac.ir		

۱. Self-Compacting Light Weight Structural Concrete containing Nano-Silica (SCLWSCNS).

۱- مقدمه

امروزه به‌خاطر کاربرد زیاد بتن خودتراکم^۲، از آن برای ساخت بسیاری از سازه‌ها استفاده می‌شود. چون SCC علاوه بر اینکه هزینه اجرای پروژه‌های سازه‌ای را پایین می‌آورد، به علت روانی و کارایی بسیاری که دارد، برای سازه‌های با تراکم آرماتور زیاد و تعداد گوشه‌های فراوان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن خودتراکم یعنی بتنی که تحت اثر وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاننده، به طور کامل قالب‌ها را پر کند (حتی با حضور میلگردهای متراکم) و حالت همگن بودن خود را حفظ نماید [۱].

از طرفی بتن سبک طبق تعریف مؤسسه بتن آمریکا ACI 116R-87 عبارت است از: «بتنی که وزن مخصوص آن به طور محسوسی کمتر از وزن مخصوص بتنی است که با سنگدانه‌های طبیعی یا شکسته ساخته می‌شود». از جمله مزایای استفاده از بتن سبک، کاهش وزن سازه و بالطبع کاهش نیروی زلزله وارد بر سازه و کاهش بار وارد بر قالب‌های بتنی و ... می‌باشد.

فناوری نانو واژه‌ای است کلی که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. معمولاً منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد [۲]. اولین جرقه فناوری نانو در سال ۱۹۵۹ زده شد. در این سال ریچارد فاینمن طی یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد» ایده فناوری نانو را مطرح ساخت^۳. وی این نظریه را ارائه داد که در آینده‌ای نزدیک می‌توان مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری کرد.

کاربرد بسیار مناسب نانو تکنولوژی در بتن به عنوان کم‌کننده فاصله بین سنگدانه و خمیر سیمان در مقیاس میکروسکوپی است. در واقع نانوذرات می‌توانند گپ موجود در ناحیه انتقال را به حداقل برسانند و باعث افزایش مقاومت و خصوصیات فیزیکی بهتر در بتن شود. با این حال تحقیقات در مورد بتن خودتراکم سبک^۴ بسیار اندک است. بتن خودتراکم سبک نیز همانند بتن خودتراکم معمولی بسیار روان بوده و نیاز به هیچ لرزاننده‌ای ندارد و تحت اثر وزن خود، متراکم می‌شود. بتن خودتراکم سبک، ترکیبی از مزیت‌های شناخته شده بتن سبک و بتن خودتراکم را داراست. با این حال به دلیل استفاده از سنگدانه‌های سبک در این نوع بتن انرژی درونی کافی برای حرکت وجود نداشته و در مقایسه با بتن خودتراکم با سنگدانه‌های طبیعی، حرکت آن در درون مقاطع با تراکم آرماتور زیاد، کمی کندتر می‌باشد. با وجود این اشکال که ناشی از وزن است، طرح‌های بتن خودتراکم سبک، نیازهای اساسی مربوط به همگنی و یکنواختی تراکم را در تمام سطوح مقطع، برآورده می‌سازند. معیار اساسی مورد نیاز در بدست آوردن بتن خودتراکم سبک، قابلیت تغییر شکل بالا، قابلیت عبور بالا و مقاومت در برابر جداسازی می‌باشد.

روش تاگوچی یک روش برای بهینه‌یابی سطح پارامترهای مؤثر بر انواع آزمایش‌ها است. در واقع این روش از طریق به کارگیری مفاهیم آماری و مهندسی، به عنوان ابزار بهبود کیفیت محصولات ارائه شده است. از آنجا که روش آزمایش و خطا عموماً وقت گیر و هزینه بر است، باید با حداقل تعداد آزمایش، به برآورده کردن اهداف طراحی رسید. در این روش، به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی تغییراتی داده می‌شود، تا بتوان میزان تغییرات حاصل در پاسخ فرآیند را شناسایی کرد. پس با بکارگیری این روش می‌توان عوامل ورودی قابل کنترل را به طور سیستماتیک تغییر داده و آثار آن‌ها را بر روی پارامترهای خروجی ارزیابی کرد [۳].

موهینی و همکاران در سال ۲۰۱۹ مطالعاتی بر روی بتن خودتراکم انجام داده [4] که با کمک روش تاگوچی به بررسی طرح مخلوط‌های بتن خودتراکم با مقاومت بالا پرداخته بودند. در این مقاله نسبت آب به سیمان، میزان آب، درصد ریز دانه به کل مواد سنگی، میزان خاکستر بادی، فاکتور جذب هوا و میزان فوق‌روان‌کننده به عنوان فاکتور یا عوامل تاثیر گذار در طرح مخلوط بتن خودتراکم با مقاومت بالا به نرم افزار تعریف کردند و بهترین طرح مخلوط برای مقاومت بالا و وجود کمتر هوای جذب شده را بدست آوردند [۵].

مقصودی و همکاران در سال ۲۰۱۱ با کمک روش سعی و خطا دو طرح مخلوط را طراحی کرده که هم شرایط روانی بتن خودتراکم در فاز بتن تازه را داشته باشد و هم شرایط وزنی و مقاومت فشاری در بتن سبک را تامین کند [۶].

به علاوه جورج کوریکا و همکاران در سال ۲۰۱۲ از دو طیف نانوسیلیس به عنوان آمورف در بتن خودتراکم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که نانوسیلیس در افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن خودتراکم تاثیر دارد [۷].

² Self-Compacting Concrete (SCC)

³ Richard P. Feynman. "Plenty of Room at the Bottom". (Dated: Dec. 1959).

⁴ Self-Compacting Light Weight Concrete (SCLWC)

ساید و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش تاگوچی به بهینه سازی طرح مخلوط ملات برای بدست آوردن میزان جایگزینی دوده سیلیس با سیمان پرداخته و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتیمتری را بدست آوردند. نتایج نشان داد که نسبت بهینه برای طرح مخلوط، ۱۵۰ گرم دوده سیلیس، ۶۶۰ گرم سیمان و ۱۴۰۰ گرم ماسه است. یعنی $1.18/52$ دوده سیلیس جایگزین سیمان شد. مقاومت فشاری این طرح 54MPa ، PH آن $9/75$ و جذب آب $5/369$ را نشان می‌دهد [۸].

محققان بسیاری از روش تاگوچی به منظور بهینه سازی طرح مخلوط استفاده کرده‌اند. در این مقاله از روش تاگوچی به منظور بدست آوردن طرح مخلوط بهینه برای بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس (SCLWSCNS) استفاده شده است. از آنجاکه مزیت‌های خودتراکمی بتن و مزیت‌های سبک بودن سازه، از دهه‌های قبل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، ساختن بتنی که از مزایای هر دو نوع بتن بهره ببرد، مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. به علاوه مشخص شدن محدودیت‌ها و مزیت‌های استفاده از نانوسیلیس در بتن خودتراکم سبک، از اهداف انجام این پژوهش است. در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده و در ادامه مطالعات، از نرم‌افزارهای مرتبط استفاده خواهد شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مواد و مصالح

سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان پرتلند سپاهان تیپ ۲ با مشخصات زیر است.

جدول ۱: مشخصات سیمان پرتلند سپاهان تیپ ۲

مشخصات شیمیایی												مشخصات فیزیکی					نوع
C_3A (%)	Total Alkalis (%)	Free CaO (%)	I.R (%)	L.O.I (%)	SO_3 (%)	Cl (%)	MgO (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	انبساط اتوکلاو (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	گیرش نهایی (min)	گیرش اولیه (min)	بلین (cm ² /gr)	
6	0/75	1/3	0/35	1	2/2	0/025	2/2	64/2	4	4/9	21/1	0/08	55	210	150	3500	تیپ ۲ سپاهان

آب

آب استفاده شده در این پژوهش، آب آشامیدنی شهر اصفهان با PH حدود ۸ و میزان سختی کمتر از 1000 ppm است.

فوق‌روان کننده

در این پژوهش از فوق‌روان کننده GLENIUM 110P محصول شرکت O-BASF استفاده شده است. این فوق‌روان کننده محلول آبی پلی‌کربوکسیلیک‌اتر است. به توصیه کارخانه سازنده مقدار مناسب استفاده از این فوق‌روان کننده، در مخلوط‌های بتنی بین $0.5/5$ تا $1.5/5$ وزن مصالح سیمانی است. همچنین به منظور دستیابی به بیشینه کارایی، توصیه شده فوق‌روان کننده مذکور پس از اضافه کردن ۵۰

تا ۷۰ درصد آب اختلاط به صورت محلول در باقی آب اختلاط، به مخلوط اضافه شده و حداقل به مدت ۶۰ ثانیه بعد از اضافه کردن، عملیات مخلوط کردن ادامه یابد.

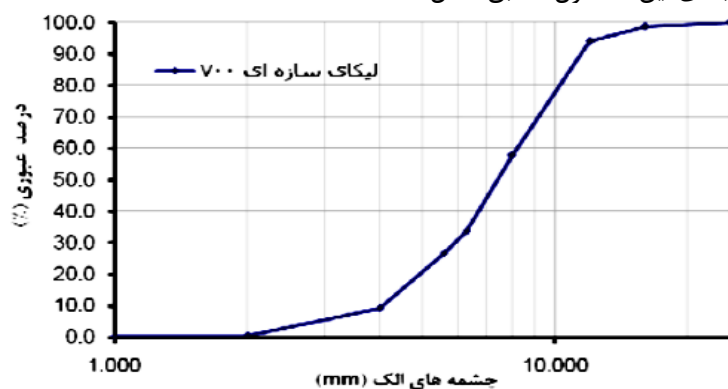
نانوسیلیس

در صنعت، نانوسیلیس به صورت پودر و یا محلول در آب موجود است که در این پژوهش برای ایمنی بیشتر و عدم بروز بیماری‌های ریوی و همچنین اختلاط مناسب، از محلول نانوسیلیس استفاده شده است. از آنجا که محلول ۶۰٪ نانوسیلیس دارای ۶۰ درصد پودر نانوسیلیس و ۴۰ درصد آب است، پس از وزن‌کشی دقیق، باید میزان آب موجود در محلول، از وزن آب اختلاط کسر شود تا خطا در محاسبات به وجود نیاید.

از نقطه نظر خواص فیزیکی، میزان سطح ویژه نانوسیلیس معمولاً بین ۶۰ تا ۶۰۰ مترمربع بر گرم و مقدار چگالی ویژه آن بین ۳۰ تا ۴۰ گرم بر لیتر می باشد. اندازه ذرات نانوسیلیس نیز بایستی از ۱۰۰ نانومتر کوچکتر باشند. از نقطه نظر شیمیایی نیز مقدار خلوص SiO_2 در نانوسیلیس بالاتر از ۹۹/۵ درصد است و مقدار هر کدام از اکسیدهای TiO_2 ، Fe_2O_3 و Al_2O_3 کمتر از ۰/۱ درصد است. سایر اکسیدها در نانوسیلیس یا وجود ندارد یا مقدار کمتر از ۰/۰۱ درصد را به خود اختصاص می دهند.

لیکا

به منظور ساخت بتن سبک، در این پژوهش از لیکای سازه‌ای ۷۰۰ به عنوان درشت دانه در بتن استفاده شده است. وزن مخصوص این محصول طبق ASTM C127 بین ۶۵۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده به همین منظور به آن لیکای سازه‌ای ۷۰۰ گفته می‌شود. همچنین طبق ASTM C136 دانه بندی این محصول مطابق شکل ۱ است.



شکل ۱: دانه بندی لیکا سازه‌ای ۷۰۰

ماسه

در این پژوهش از ماسه دوبار شور استفاده شده که طبق ASTM 211-4R مدول نرمی آن برابر با ۳/۱ بدست آمد. در ضمن میزان اضافه آب مازاد بر SSD موجود در ماسه، از وزن آب بتن کسر گردید.

پودرسنگ

پودرسنگ آهک با فرمول CaCO_3 به پودری اطلاق می‌شود که یکی از سنگ‌های کلسیمی معدنی بوده و دانه‌بندی آن ریزتر از الک شماره ۳۲۵ باشد. پودرسنگ دارای مقدار رطوبت مطلوب ۹٪ و دارای حداکثر چگالی خشک ۲ گرم در سی‌سی و نفوذپذیری ۰/۰۰۲۴ سانتی‌متر در ثانیه است. دلیل استفاده از پودرسنگ به عنوان فیلر، ضریب یکنواختی ۱۳/۸ و زاویه اصطکاک داخلی ۴۱۰ است.

۲-۲- یافتن طرح مخلوط مناسب

باتوجه به هدف این مطالعه برای ساخت بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس، ابتدا با روش سعی و خطا، ۲۸ نمونه بتنی ساخته شد تا در نهایت طرح مخلوط مناسبی بدست آمد (ردیف اول در جدول ۲). این نمونه در فاز بتن تازه بدون آب انداختگی، شرایط خودتراکمی را دارا بوده و در فاز بتن سخت شده شرایط سبک و سازه‌ای داشت. دلیل استفاده از روش سعی و خطا در بدست آوردن طرح

مخلوط، ارایه طرح مخلوط مناسب با کمک مصالح در دسترس به منظور ارایه طرح مخلوط اقتصادی در ساخت بتن خودتراکم سبک سازه-ای حاوی نانو سیلیس بوده تا بتوان در پروژه‌های اجرایی نیز از این بتن استفاده کرد. لازم به ذکر است که در صورت وجود طرح مخلوط مناسب در پژوهش‌های پیشین، نیاز به استفاده از روش سعی و خطا در ساخت نمونه بتنی نمی‌باشد.

در ادامه برای بهبود عملکرد این نوع بتن با توجه به عدم حضور میکروسیلیس و تعیین تعداد سطوح مورد نیاز برای بررسی آن‌ها، نمونه‌های بتنی با درصد نانوسیلیس بین صفر تا ۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت [۱۷] (ردیف دو به بعد در جدول ۲). همانطور که از این جدول پیداست، با توجه به نبود میکروسیلیس در تمام طرح مخلوط‌ها، نمونه‌های داری ۰ و ۱ درصد نانوسیلیس نتوانستند شرایط بتن سازه‌ای را فراهم کنند و مقاومت فشاری کمتری از خود نشان دادند. به همین دلیل می‌توان این درصد‌های نانوسیلیس را حذف کرد. از طرفی در این طرح مخلوط، مقاومت فشاری نمونه دارای ۵ درصد نانوسیلیس، تفاوت چندانی با نمونه‌های دارای ۴ درصد نانوسیلیس نداشته که به علت کاهش هزینه‌های اجرایی این درصد نیز مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

جدول ۲: طرح مخلوط بتن خودتراکم سبک سازه‌ای (با توجه به درصد نانوسیلیس)

مصالح							نام طرح مخلوط
پودرسنگ (Kg)	لیکا (Kg)	ماسه (Kg)	فوق‌روان‌کننده (Kg)	نانوسیلیس (Kg)	آب (Kg)	سیمان (Kg)	
200	420	400	3/6	13/5	180	436/5	T28-0
200	420	400	3/6	0	180	450	T28-1
200	420	400	3/6	4/5	180	445/5	T28-2
200	420	400	3/6	9	180	441	T28-3
200	420	400	3/6	18	180	432	T28-4
200	420	400	3/6	22/5	180	427/5	T28-5

نتایج آزمایش‌ها در فاز بتن تازه، هم‌خوانی مناسبی با آزمایش‌های انجام شده توسط هادی‌پودو و همکاران در سال ۲۰۱۰ داشت. آن‌ها با روش تاگوچی، به بررسی تاثیر میزان مصالح روی مشخصات بتن خودتراکم تازه پرداخته بودند [۲۱].

۲-۳- ساخت و آماده سازی و نگهداری نمونه‌های بتنی:

برای ساخت مخلوط‌ها، ابتدا مصالح مصرفی به دقت توزین می‌گردند. آنگاه شن و ماسه توزین شده، ابتدا در داخل مخلوط‌کن الکتریکی کج شونده، ریخته شده و در مرحله بعد سیمان به مخلوط اضافه شده و به مدت 30 ثانیه اختلاط انجام می‌شود. در مرحله بعد نیمی از آب اختلاط به مخلوط‌کن اضافه شده و به مدت 1 دقیقه مخلوط هم زده می‌شود. در مرحله آخر آب باقیمانده به همراه نانوسیلیس و فوق‌روان‌کننده کاملاً مخلوط شده و به مخلوط‌کن افزوده می‌شود به مدت 2 دقیقه عملیات اختلاط انجام می‌شود. بلافاصله بعد از پایان یافتن اختلاط، آزمایش‌های خودتراکمی بر روی مخلوط انجام می‌گیرد و نمونه‌ها قالب‌گیری می‌شوند. برای جلوگیری از تبخیر آب از سطح بتن‌های قالب‌گیری شده، روی قالب‌ها با کاورهای نایلونی پوشانده شده و نمونه‌ها بعد از 24 ساعت از قالب خارج می‌شوند. نمونه‌ها پس از خروج از قالب بلافاصله در استخر آب با دمای حدود ۱۹ تا 23 درجه نگهداری می‌شوند [۲۹]. طبق آیین نامه بهتر است که آب عمل آوری نمونه‌ها با آب ساخت نمونه یکسان باشد.

۲-۴- آزمایشات بتن خود تراکم و سبک سازه‌ای:

برای بررسی خودتراکمی نمونه‌های طراحی شده، از بین آزمایشات مربوط به SCC پنج آزمایش به عنوان آزمایشات اساسی انتخاب شده‌اند، که عبارت از آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه J، قیف V، جعبه L، جعبه U است. به علاوه برای تعیین سبک و سازه‌ای بودن به آزمایش‌های مقاومت فشاری و وزن مخصوص نیاز است.

آزمایش جریان اسلامپ [۹]



شکل ۲: آزمایش جریان اسلامپ

این آزمایش یکی از آزمایشات رایج برای سنجش خصوصیات SCC، خصوصاً روانی آن است و به منظور تعیین توانایی تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان، تعریف شده است. برای انجام این آزمایش باید ابتدا محور مخروط را بر محور صفحه قرار داده و صفحه و مخروط را مرطوب نمود. مخروط با حدود ۶ لیتر بتن پر می‌شود. در نهایت مخروط با سرعتی ثابت که نه سریع باشد و نه آهسته به صورت کاملاً قائم به بالا کشیده می‌شود. ابتدا زمان رسیدن جریان اسلامپ بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر اندازه گرفته شده و بعد از توقف حرکت بتن، دو قطر عمود بر هم آن اندازه گیری می‌شود. هرگونه شیره در اطراف بتن پخش شده، باید توسط کاربر ثبت شود.

آزمایش حلقه J [۱۰]



شکل ۳: آزمایش حلقه J

این آزمایش نوعی شبیه سازی برای توانایی عبور بتن از موانع، بخصوص آرماتورهای متراکم موجود در قالب را نشان می‌دهد. از این آزمایش می‌توان برای تعیین ویژگی قابلیت عبور بتن تازه که خود متاثر از دو پارامتر اساسی تنش تسلیم و لزجت خمیری می‌باشد، استفاده نمود. برای انجام این آزمایش ابتدا مرکز حلقه J را بر محور صفحه قرار داده و مخروط را در وسط حلقه قرار می‌دهند. صفحه و مخروط را مرطوب کرده و مخروط با حدود ۶ لیتر بتن پر می‌کنند. حال مخروط با سرعتی ثابت که نه سریع باشد و نه آهسته به صورت کاملاً قائم به بالا کشیده شده و اجازه داده می‌شود که بتن از حرکت بازایستد. در نهایت

اختلاف ارتفاع بتن در قبل و بعد از میلگرد در ۴ نقطه محاسبه شده و از آن‌ها میانگین گرفته می‌شود. وجود هرگونه شیره در اطراف بتن پخش شده، باید توسط کاربر ثبت شود.

آزمایش قیف V [۱۱]



شکل ۴: آزمایش قیف V

این آزمایش به عنوان معیاری برای تعیین جدادگی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین به صورت شهودی، معیاری برای همگنی بتن می‌باشد. بعد از قرار دادن قیف V شکل روی پایه آن سطوح درونی آن مرطوب می‌شوند. قیف با ۱۲ لیتر بتن پر می‌شود. مطابق شکل ۴، سطلی در زیر آن قرار می‌گیرد و بعد از گذشت ۱۰ ثانیه، دریچه قیف باز شده و بتن تحت اثر وزن خود به بیرون جریان می‌یابد. زمان خروج بتن از قیف ثبت می‌شود. در انتها دوباره قیف را از بتن پر کرده و این بار بعد از گذشت ۵ دقیقه دریچه باز می‌شود و مجدداً زمان خروج بتن از قیف یادداشت می‌شود.

آزمایش جعبه L [۱۲]



شکل ۵: آزمایش جعبه L

این آزمایش بر اساس یک طرح ژاپنی برای بتن‌های زیر آب توسعه یافته است. این آزمایش قابلیت پرنندگی و قابلیت عبور SCC را مشخص می‌کند. همچنین به بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگرد می‌پردازد. برای انجام این آزمایش ابتدا درون جعبه مرطوب شده و قسمت عمودی با حدود ۱۴ لیتر بتن پر می‌شود. بعد از گذشت ۱ دقیقه دریچه بتن را با سرعت ثابت برداشته و بتن تحت اثر وزن خود در قسمت افقی جعبه حرکت می‌کند. زمان عبور بتن از فاصله ۲۰ سانتیمتری و همچنین زمان عبور بتن

از فاصله ۴۰ سانتیمتری از ابتدای دریچه ثبت شده و در نهایت پس از توقف جریان ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی (h_2) و انتهای بخش عمودی (h_1) اندازه گیری می‌شود و از تقسیم (h_2/h_1) نسبت انسداد در بتن بدست می‌آید.

آزمایش جعبه U [۱۳]



شکل ۶: آزمایش جعبه U

این آزمایش سخت‌گیرانه‌ترین آزمایش بتن خودتراکم می‌باشد که توسط مرکز تحقیقات تکنولوژی شرکت تاسی^۵ در ژاپن توسعه یافته است و برای اندازه گیری قابلیت پرکردن و عبور بتن خودتراکم استفاده می‌شود. این آزمایش به کمک جعبه U شکل انجام می‌شود که در مرکز آن میلگردهایی با قطر ۱۴ میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز ۵۰ میلیمتر نصب شده‌اند. در نتیجه فاصله آزاد بین میلگردها ۳۵ میلیمتر است که در اصل باید حداقل سه برابر اندازه بزرگترین قطر سنگدانه باشد [۱۴]. برای انجام این آزمایش یک سمت جعبه با ۲۰ لیتر بتن پر می‌شود و پس از یک دقیقه دریچه متحرک بالا کشیده می‌شود تا بتن در مجرای دیگر جریان یابد، پس از توقف جریان زمان تخلیه ثبت شده و همچنین ارتفاع بتن در مجرای اول و دوم اندازه گیری می‌شود.

آزمایش مقاومت فشاری نمونه بتنی

مقاومت فشاری نمونه بتنی بیانگر روند فعالیت سیمان و کیفیت بتن می‌باشد. در این مقاله برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و عمل‌آوری نمونه‌ها از آیین نامه BS 1881: part 116-1983 استفاده شده‌است [۱۵]. در این مقاله از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر استفاده شده که تا سن مورد نظر برای شکست نمونه در آب، عمل‌آوری می‌شود. توجه به این نکته نیز مهم است که بهتر است با همان آبی که نمونه با آن ساخته شده است، عمل‌آوری انجام پذیرد. آزمایش مقاومت فشاری در این تحقیق بر روی نمونه بتنی ۲۸ روزه انجام گرفت. بدین صورت که بعد از رسیدن نمونه به سن مورد نظر، نمونه را از آب خارج کرده و بعد از خشک شدن تمام سطوح آن نمونه را تحت بار وارده توسط جک هیدرولیکی قرار داده و مقاومت نهایی گسیخته شدن نمونه یادداشت می‌شود.



شکل ۷: آزمایش مقاومت فشاری

تعیین وزن مخصوص نمونه بتنی [۱۶]

طبق BS EN 12390-7:2019، ابتدا حجم قالب با کمک آب سنجیده می‌شود و طبق رابطه ۱ وزن مخصوص نمونه بتنی بدست می‌آید. که D وزن مخصوص (Kg/m^3)، M_2 وزن قالب حاوی بتن (Kg)، M_1 وزن قالب خالی (Kg) و V حجم داخلی قالب (m^3) است.

$$D = (M_2 - M_1) / V \quad (1)$$

معیار کیفیت:

در این مقاله، معیار کیفیت مطلوب نمونه بتنی با توجه به ساخت بتن سبک سازه‌ای از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$Q = (F/D) * 1000 \quad (2)$$

که در آن Q معیار کیفیت، F مقاومت فشاری (Kg/cm^2) و D وزن مخصوص (Kg/m^3) می‌باشد. هرچه این عدد بالاتر باشد، نشان دهنده کیفیت بالاتر نمونه بتنی است.

⁵ . Taisei

جدول ۳ نتایج آزمایشات ارایه شده در دو فاز بتن تازه و بتن سخت شده را بر روی طرح مخلوط‌های جدول ۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی مربوط به طرح مخلوط بتن خودتراکم سبک سازه‌ای

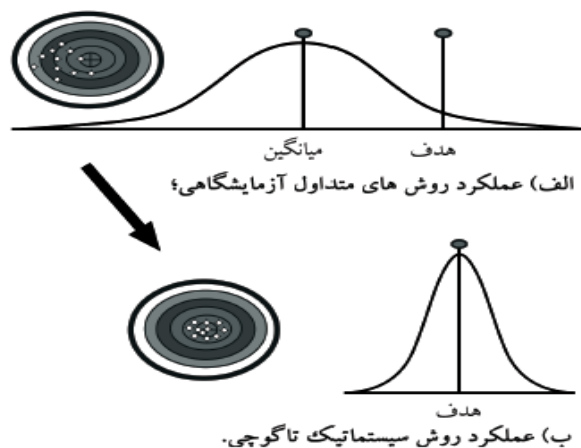
بتن سخت شده		بتن تازه					نام طرح مخلوط
وزن مخصوص (kg/m ³)	مقاومت فشاری (Mpa)	جعبه U (mm)	جعبه L (نسبت)	قیف V (S)	حلقه J (mm)	جریان اسلامپ (mm)	
1656	22/41	18	1	7/6	10	730	T28-0
1651/9	15/01	7	1	6/5	7	835	T28-1
1651/3	16/24	12	1	6/8	9	775	T28-2
1655/3	18/79	28	0/88	13/2	10	690	T28-3
1651/5	23/42	36	0/74	15/8	10	655	T28-4
1651/4	23/56	7	1	6/5	7	835	T28-5

۲-۵- روش تاگوچی:

فلسفه تاگوچی در سه مفهوم اصلی و ساده بنا شده است. این مفاهیم عبارتند از [۲۲]:

- کیفیت باید هنگام تولید طراحی شود نه اینکه در طی فرایند ساخت محصول بررسی شود.
- کیفیت با به کمینه رساندن انحراف از مقدار مشخص به بهترین وجه حاصل می‌شود.
- محصول باید طوری طراحی شود که در برابر عوامل محیطی غیر قابل کنترل، ایمن باشد.

این فلسفه را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. شکل ۸-الف مربوط به روش‌های متداول آزمایشگاهی است. نتایج علاوه بر اینکه با هدف مورد نظر اختلاف زیادی دارند، پراکنده نیز هستند. اما در شکل ۸-ب که نشان دهنده فلسفه روش تاگوچی است، همزمان نتایج به هدف معین مورد نظر نزدیک می‌شود و پراکندگی آن‌ها نیز کمتر است.



شکل ۸: مقایسه نحوه عملکرد روش تاگوچی با سایر روش‌های آزمایشگاهی [۲۲]

طراحی آزمایشات به روش تاگوچی، دو دسته عوامل را در نظر می‌گیرد. دسته اول عوامل قابل کنترل بوده که در طراحی سطوح مشخص دارند و تحت کنترل هستند؛ در روش تاگوچی به آن سیگنال (S) گفته می‌شود. دسته دوم عوامل اغتشاشی بوده که بر واکنش یک فرآیند تأثیر دارند ولی نمی‌توانند کنترل شوند؛ در روش تاگوچی به آن نویز (N) می‌گویند. هدف طراحی آزمایش‌های تاگوچی، ایجاد بهترین حالت به نحوی است که کمتر تحت تأثیر عوامل اغتشاشی قرار گیرد [۲۳].

یکی دیگر از قابلیت‌های مهم این روش، تعیین سهم مشارکت هر یک از عوامل در نتایج آزمایش است. این قابلیت که از طریق جدول آنووا^۶ برای داده‌های آزمایش به دست می‌آید، به تصمیم گیرنده کمک می‌کند تا عوامل را بر اساس اهمیت‌شان رتبه بندی کند. این رتبه بندی ممکن است تصمیم گیرنده را متقاعد کند تا دو یا چند عامل قابل کنترل را در هم ترکیب کرده تا هزینه‌های طراحی آزمایش کاهش یابد. در واقع با مطالعه آنووا، اثر نسبی عوامل را در بخش‌های مختلف تعیین می‌شود [۲۴].

درواقع تاگوچی برای ارائه آزمایش‌هایش، گروه‌های ویژه از آرایه‌های متعامد را ترکیب و ایجاد می‌کند [۲۵]. جدول ۴ نحوه انتخاب این آرایه‌ها را نشان می‌دهد [۲۶].

بر اساس جدول آرایه‌های متعامد، باید تعدادی آزمایش با سطح پارامتر مشخص انجام شده و نتیجه‌ی هر آزمایش بیان شود. برای اثبات پایایی نتایج، باید هر آزمایش چندین بار تکرار شود. روش تاگوچی برای رسیدن به پایایی نتایج از رابطه سیگنال به نویز (رابطه ۳) استفاده می‌کند. در واقع برای تحلیل نتایج، به جای میانگین گرفتن از تکرارها، از نسبت پارامترهای قابل کنترل (S) به فاکتورهای اغتشاشی (N) بهره می‌برد تا بتواند بهترین و قویترین شرایط کاری را تعریف کند.

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD) \quad (۳)$$

که در آن MSD^y برابر با میانگین مجذور انحراف از مقدار مشخصه کیفیت است. مشخصه کیفیت تعریف متفاوتی دارد. برای مشخصه کیفی "هرچه بزرگتر، بهتر" رابطه ۴، برای مشخصه کیفی "هرچه به مقدار اسمی نزدیکتر، بهتر" رابطه ۵ و برای مشخصه کیفی "هرچه کوچکتر، بهتر" رابطه ۶ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$MSD = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots)}{n} \quad (۴)$$

$$MSD = \frac{[(y_1 - m)^2 + (y_2 - m)^2 + (y_3 - m)^2 + \dots]}{n} \quad (۵)$$

$$MSD = \frac{\left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3^2} + \dots\right)}{n} \quad (۶)$$

که در آن y متغیر پاسخ برای هر آزمایش، n تعداد تکرارهای هر آزمایش و m مورد اسمی مورد نظر آزمایش می‌باشد [۲۷].

به منظور استفاده از روش تاگوچی از نرم افزار مینی‌تب^۸ استفاده شد [۲۸]. این نرم افزار، یکی از نرم‌افزارهای جامعه آماری است که یکی از قابلیت‌های طراحی سیستماتیک آزمایش‌های DOE^۹ است. گام اول برای طراحی روش تاگوچی تعیین آرایه‌های متعامد می‌باشد. همانطور که از جدول ۴ پیداست، تعداد پارامترهای مورد بررسی از اعداد سطر دوم و تعداد سطوح هر پارامتر از ستون دوم انتخاب می‌شود تا آرایه متعامد مربوط به روش تاگوچی مشخص شود.

جدول ۴: نحوه انتخاب آرایه‌های متعامد [۲۶]

تعداد پارامترها						تعداد سطوح
۶	۵	۴	۳	۲		
L12	L8	L8	L4	L4	۲	
L18	L18	L9	L9	L9	۳	
L32	L16	L16	L16	L16	۴	
L25	L25	L25	L25	L25	۵	

۶. ANOVA (Analysis Of Variance)

۷. Mean-Square Deviation

۸. Minitab

۹. Design Of Experiments

همانطور که بیان شد در این پژوهش چهار عامل تاثیر گذار برای مقاومت فشاری نمونه بتنی در طرح مخلوط مشخص شد که عبارت از نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت نانوسیلیس به مواد سیمانی، نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی و در نهایت نسبت کل سنگدانه به کل مصالح موجود در طرح مخلوط هستند. این عوامل به عنوان پارامتر مشخص می‌شوند. از طرفی هر یک از عوامل تاثیر گذار در سه سطح به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفتند.

نسبت آب به مواد سیمانی در سطوح ۰/۳۵ و ۰/۴۰ و ۰/۴۵ مورد استفاده قرار گرفت که با توجه به بالا بودن کارایی و همچنین عدم آب‌انداختگی و تامین مقاومت مورد نظر، این نتایج بدست آمده است. نسبت نانوسیلیس به مواد سیمانی در سطوح ۲ و ۳ و ۴ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که قبلاً بیان شد، درصدهای ۰ و ۱ جایگزینی نانوسیلیس در سیمان با توجه به عدم وجود میکروسیلیس در طرح مخلوط، شرایط سازه‌ای را تامین نکرد و درصدهای ۵ و بالاتر جایگزینی علاوه بر تاثیر ناچیز در مقاومت فشاری بتن، صرفه اقتصادی مناسبی ندارد. نسبت فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی نیز در سه سطح ۰/۸ و ۱ و ۱/۲ درصد مورد استفاده قرار گرفت که با توجه به بالا بودن کارایی و همچنین عدم آب‌انداختگی این نتایج بدست آمده است و در نهایت نسبت سنگدانه به کل مصالح شامل ۴۸، ۴۹ و ۵۰ درصد بوده که کل مصالح شامل سیمان، آب، نانوسیلیس، فوق‌روان‌کننده، ماسه، لیکا و پودرسنگ به عنوان پرکننده و مصالح سنگی شامل لیکا و ماسه هستند. دلیل عدم استفاده از پودرسنگ به عنوان مصالح سنگی، نقش پرکنندگی پودرسنگ بوده که باعث جلوگیری از آب‌انداختگی بتن می‌شود ولی قابلیت بارگذاری همانند مصالح سنگی را ندارد.

باتوجه به اینکه تعداد عوامل تاثیرگذار در این پژوهش چهار مورد در نظر گرفته شده و هر کدام در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته‌اند، طبق جدول ۴ از آرایه متعامد L9 استفاده می‌شود. نکته قابل توجه در مورد L9 این است که در این روش ۹ آزمایش باید انجام شود تا داده‌ها مورد تحلیل قرار گیرند. در صورت عدم استفاده از روش تاگوچی باید ۳^۴ یعنی ۸۱ آزمایش انجام شود تا بتوان تحلیل حساسیت بر روی پارامترها انجام داد. در نهایت در قسمت آنالیز تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب، داده‌های مربوط به ۴ فاکتور و ۳ سطح آن‌ها وارد شده تا جدول ۵ از نرم‌افزار استخراج شود.

جدول ۵: نتایج بدست آمده برای طرح مخلوط در نرم افزار مینی تب

نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	درصد نانوسیلیس به مواد سیمانی	درصد فوق‌روان‌کننده به مواد سیمانی	نسبت سنگدانه به کل مصالح
Ta01	0/35	2	0/8	0/48
Ta02	0/35	3	1	0/49
Ta03	0/35	4	1/2	0/5
Ta04	0/4	2	1	0/5
Ta05	0/4	3	1/2	0/48
Ta06	0/4	4	0/8	0/49
Ta07	0/45	2	1/2	0/49
Ta08	0/45	3	0/8	0/5
Ta09	0/45	4	1	0/48

همانطور که از جدول ۵ پیداست، کلاً ۹ آزمایش توسط نرم‌افزار مینی تب از کاربر خواسته شده است که با توجه آن‌ها، طرح مخلوط به شرح جدول ۶ مورد استفاده قرار گرفت. طراحی جدول ۶ به این صورت بوده که درصد نانوسیلیس، آب و فوق‌روان‌کننده نسبت به مواد سیمانی توسط نرم‌افزار مشخص شده که باتوجه به طرح مخلوط اولیه ستون‌های دوم تا پنجم جدول طراحی می‌شوند. ستون‌های ششم تا هشتم نیز طبق نظر نویسندگان برای اینکه مصالح سنگی نیز مورد تحلیل حساسیت قرار گیرند، در سه سطح با توجه به جدول ۵ طراحی شده‌اند. طبق جدول سطوح ماسه ۳۷۰، ۴۰۰ و ۴۳۰، سطوح لیکا ۳۹۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ و سطوح پودرسنگ ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده‌اند.

جدول ۶: طرح مخلوط‌های مورد استفاده در روش تاگوچی (Kg/m^3)

نام طرح	سیمان	نانوسیلیس	آب	فوق‌روان‌کننده	ماسه	لیکا	پودرسنگ
Ta01	441	9	157/5	3/6	370	390	210
Ta02	436/5	13/5	157/5	4/5	400	390	210
Ta03	432	18	157/5	5/4	430	390	200
Ta04	441	9	180	4/5	430	420	220
Ta05	436/5	13/5	180	5/4	370	420	210
Ta06	432	18	180	3/6	400	420	220
Ta07	441	9	202/5	5/4	370	450	200
Ta08	436/5	13/5	202/5	3/6	400	450	200
Ta09	432	18	202/5	4/5	370	450	220

۳- بررسی نتایج

۳-۱- نتایج آزمایشگاهی

بر اساس طرح مخلوط‌های ارایه شده و آزمایشات بیان شده نتایج آزمایشات به شرح جدول ۷ محاسبه شدند. در ضمن نتایج مقاومت فشاری و وزن مخصوص بر اساس میانگین ۳ نمونه ارایه شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایشات نمونه‌های ساخته شده

نام طرح	جریان اسلامپ (mm)	حلقه J (mm)	کیف V (S)	جعبه L (نسبت)	جعبه U (mm)	مقاومت فشاری (Mpa)	وزن مخصوص (kg/m^3)	معیار کیفیت
Ta01	620	11	6/8	0/87	10	21/46	1580	135/82
Ta02	660	10/2	7/3	0/9	8	22/86	1613/4	141/69
Ta03	700	8/3	7/9	0/91	7	23/71	1630/5	145/42
Ta04	680	7/4	7/1	0/9	8/5	19/18	1705/3	112/47
Ta05	770	7	6/5	0/94	6	20/63	1632/9	126/34
Ta06	600	12	8/1	0/86	12	22/1	1675/2	131/92
Ta07	790	6/5	5/3	0/96	4	17/23	1679/7	102/58
Ta08	670	9	6/2	0/9	8	19/12	1705/6	112/10
Ta09	650	10	6/5	0/89	10	19/68	1696/2	116/02

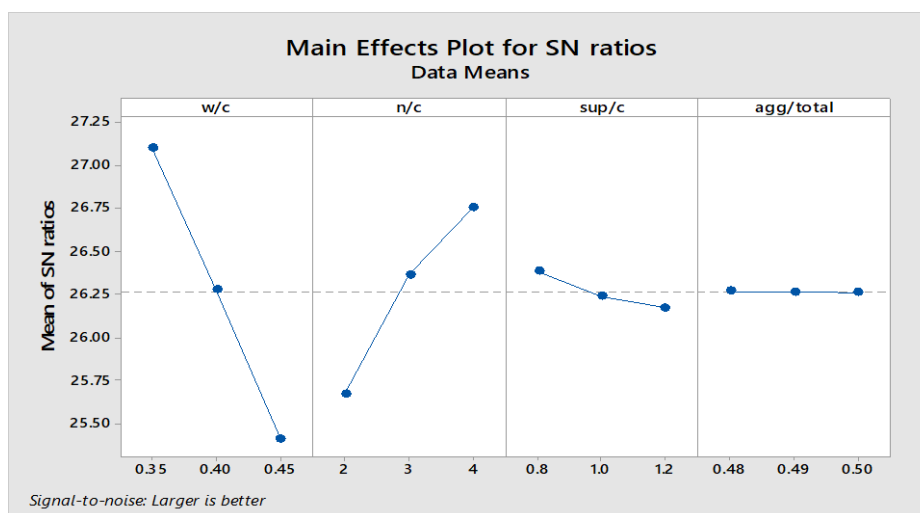
همانطور که از جدول ۷ پیداست، در فاز تازه، تمامی نمونه‌ها جریان اسلامپ بیشتر از ۵۰ سانتیمتر دارند، حداکثر میانگین اختلاف در ۴ نقطه برای آزمایش J برابر ۱۲ میلیمتر است، بیشترین زمان برای تخلیه از کیف V شکل ۸/۱ ثانیه، نسبت ارتفاع بتن در ابتدا و انتهای بازوی افقی جعبه L شکل در تمام موارد بیشتر از ۰/۸۶ بوده و اختلاف سطح بتن در دو سمت جعبه U شکل حداکثر ۱۲ میلیمتر است. به علاوه نتایج مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از ۱۶ مگاپاسکال بیشتر بوده که نشان‌دهنده سازه‌ای بودن نمونه‌هاست و وزن مخصوص آنها از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کمتر بوده که نشان‌دهنده سبک بودن تمامی نمونه‌ها می‌باشد.

طبق این جدول بیشترین کارایی و در عوض کمترین مقاومت فشاری مربوط به Ta07 به علت دارا بودن درصد نانوسیلیس کمتر و مقدار آب و درصد فوق‌روان‌کننده بیشتر است و کمترین کارایی مربوط به Ta06 به علت درصد نانوسیلیس بیشتر و درصد فوق‌روان‌کننده کمتر می‌باشد. بیشترین مقاومت فشاری نیز برای Ta02 ثبت شده که دلیل آن می‌تواند مربوط به کمتر بودن نسبت آب به موادسیمانی

دانست. در نهایت در این جدول بهترین معیار کیفیت را Ta03 به خود اختصاص داده که هم کمترین نسبت آب به موادسیمانی را داراست و هم بیشترین درصد نانوسیلیس و بیشترین درصد فوق روان کننده را دارد. با توجه به جدول ۷ و قابل قبول بودن تمام نتایج اعم از نتایج خودتراکمی و نتایج سبک سازه‌های نمونه‌ها، نتایج مقاومت فشاری را در ستون مربوط به خود در نرم افزار وارد کرده و با توجه به انتظاراتی که از نرم افزار وجود داده، به تحلیل نتایج پرداخته می شود.

۲-۳ نتایج تحلیل تاگوچی

نتایج تحلیل عددی و نموداری که جزء خروجی نرم افزار بوده، مطابق شکل ۹ و جدول ۸ است.



شکل ۹: نتایج تحلیل نموداری روش تاگوچی استخراج شده از نرم افزار

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین مقاومت عبارتست از نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۵، درصد نانوسیلیس به موادسیمانی ۴، درصد فوق روان کننده به موادسیمانی ۰/۸ و نسبت سنگدانه به کل ۰/۴۹ است.

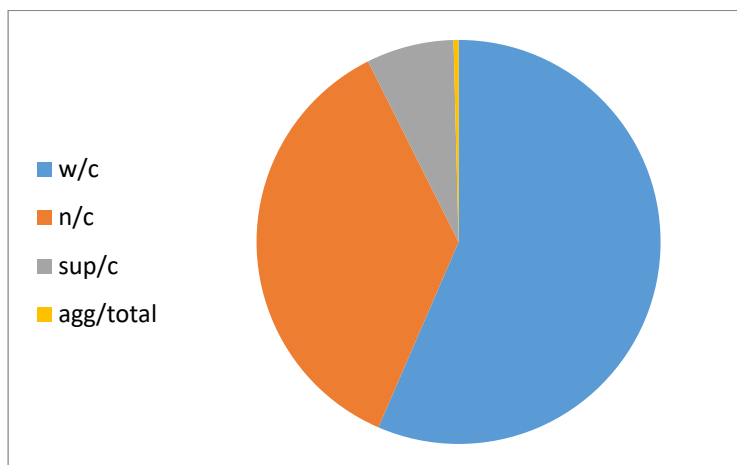
جدول ۸: نتایج تحلیل عددی روش تاگوچی استخراج شده از نرم افزار

تأثیر فاکتور نسبت آب به موادسیمانی	تأثیر فاکتور درصد نانوسیلیس به موادسیمانی	تأثیر فاکتور درصد فوق روان کننده به موادسیمانی	تأثیر فاکتور سنگدانه به کل مصالح مصرفی
27/10	25/67	26/38	26/27
26/28	26/37	26/24	26/27
25/41	26/76	26/17	26/26
1/69	1/08	0/21	0/01

با توجه به خروجی نرم افزار، می توان میزان تاثیر هر کدام از فاکتورهای تاثیر گذار را به شرح جدول ۹ و شکل ۱۰ تفسیر کرد.

جدول ۹: درصد تاثیر فاکتورهای مورد بررسی در ساخت بتن خودتراکم سبک سازه‌ای

تاثیر فاکتور	تاثیر فاکتور درصد فوق- روان کننده به مواد	تاثیر فاکتور درصد نانوسیلیس به مواد	تاثیر فاکتور نسبت آب به مواد	
سنگدانه به کل مصالح مصرفی (Agg/Total)	سیمانی (Sup/C)	سیمانی (N/C)	سیمانی (W/C)	
0/4	7	۳۶/۱	۵۶/۵	درصد تاثیر



شکل ۱۰: درصد تاثیر فاکتورهای مورد بررسی در ساخت بتن خودتراکم سبک سازه‌ای

۳-۳ مقایسه نتایج

هاسنی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به کمک روش تاگوچی به بهینه‌سازی مقاومت فشاری بتن خودتراکم پرداخته و به این نتیجه رسیده بودند که بیشترین تاثیر در فاز بتن تازه مربوط به میزان فوق‌روان‌کننده و در فاز بتن سخت شده مربوط به میزان الیاف فولادی و آمورف می‌باشد [۳۰]. نتایج این تحقیق نیز این مهم را اثبات کرد که در فاز بتن سخت شده بعد از نسبت آب به سیمان بیشترین تاثیر مربوط به آمورف که همان نانوسیلیس است می‌باشد.

پراستی و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز به بررسی میزان نانوسیلیس در بتن دارای سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته بودند و با توجه به اینکه در پژوهش آنان نسبت آب به مواد سیمانی یکسان بوده، مهمترین عامل تاثیر گذار در مقاومت فشاری میزان نانوسیلیس به حساب آمد [۳۲]. همچنین سابریش و همکاران در سال ۲۰۱۹ با کمک روش تاگوچی به بررسی خاکستریابی در بتن به عنوان آمورف پرداخته بودند که با توجه به ثابت بودن نسبت آب به مواد سیمانی، میزان آمورف بیشترین تاثیر در افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی داشت [۳۳]. در این پژوهش نیز بعد از نسبت آب به مواد سیمانی، بیشترین تاثیر مربوط به وجود نانوسیلیس به عنوان آمورف در نمونه بتنی است.

ابراهیم شریفی و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز با کمک روش تاگوچی به بررسی طرح مخلوط بهینه بتن خودتراکم با مقاومت بالا پرداخته که مهمترین عوامل تاثیرگذار را مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان بدست آوردند [۳۴]. همچنین در سال ۲۰۱۸ اگنچوکو و اوری با روش تاگوچی به تاثیر مصالح بر روی بتن پرداخته و به این نتیجه رسیدند که بیشترین تاثیر بر روی مقاومت فشاری بتن مربوط به میزان سیمان و نسبت آب به سیمان بوده، بعد از آن تاثیر میزان فوق‌روان‌کننده مهم بوده و در نهایت تاثیر میزان ریزدانه و میزان درشت دانه اهمیتی کمتری دارند [۳۱]. با توجه به ثابت بودن مواد سیمانی، در این پژوهش نیز بیشترین تاثیر در مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به مواد سیمانی و کمترین اهمیت مربوط به میزان سنگدانه‌ها بدست آمد.

۳-۴ مقایسه روش تاگوچی با تحلیل آنووا^{۱۰}

در این قسمت، به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده با روش تاگوچی، از آنالیز آنووا استفاده می‌شود. برای این آنالیز در نرم‌افزار مینی‌تب از مسیر زیر، روش "یک طرفه"^{۱۱} انتخاب می‌شود.

Stat > ANOVA > One-Way Analysis of Variance

برای این تحلیل، نتایج مقاومت فشاری به عنوان پاسخ و هر کدام از چهار پارامتر تاثیرگذار به صورت جداگانه به عنوان فاکتور به نرم‌افزار وارد می‌شود. نتایج این تحلیل در جدول ۱۰ و جدول ۱۱ نشان داده شده است. در ضمن در هر چهار حالت میزان خطای قابل قبول ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۰: نتایج بدست آمده از تحلیل آنووا

فاکتور تاثیرگذار	مجموع مربعات تطبیق یافته	میانگین مربعات تطبیق یافته	مقدار تابع	مقدار احتمال	S	R ²	R ² (منطبق شده)	R ² (پیش‌بینی شده)
نسبت آب به موادسیمانی	24/00	12/002	7/10	0/026	1/30006	70/30%	60/40%	33/17%
نسبت نانوسیلیس به موادسیمانی	9/870	4/935	1/22	0/359	2/01141	28/91%	5/21%	0/00%
نسبت فوق‌روان-کننده به موادسیمانی	0/2418	0/1209	0/02	0/979	2/37706	0/71%	0/00%	0/00%
نسبت سنگدانه به کل مصالح	0/0296	0/01480	0/00	0/997	2/38448	0/09%	0/00%	0/00%

که منظور از R² درصد تغییرات در پاسخ و S برای مقایسه سازگاری مدل‌هایی که ثابتی ندارند، استفاده می‌شود.

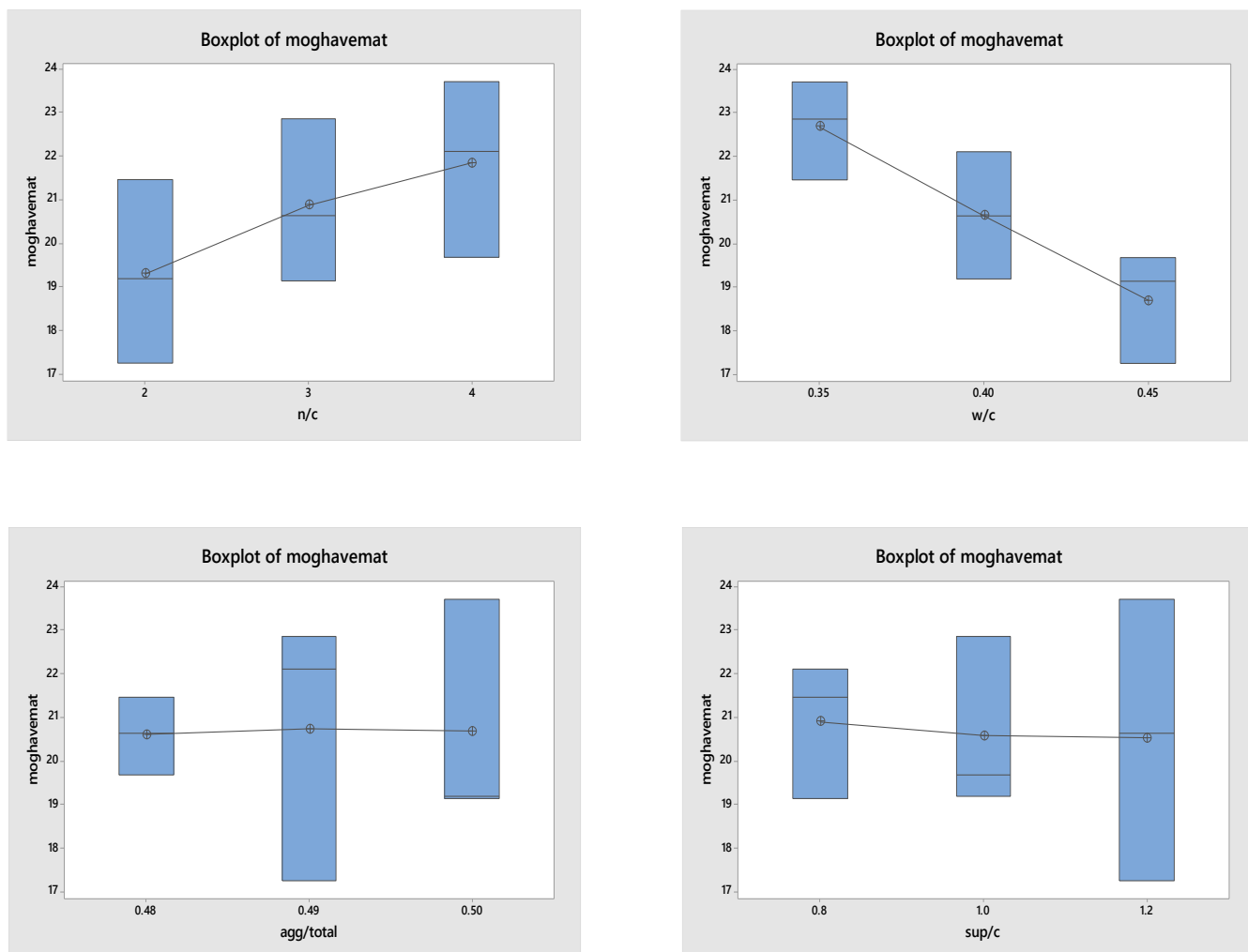
جدول ۱۱: نتایج بدست آمده از تحلیل آنووا

فاکتور تاثیرگذار	سطوح	میانگین	انحراف معیار	سطح اطمینان ۹۵٪	واریانس وزنی
نسبت آب به موادسیمانی	0/35	22/677	1.136	(20/840, 24/513)	1/30006
	0/40	20/637	1/460	(18/800, 22/473)	
	0/45	18/677	1/284	(16/840, 20/513)	
نسبت نانوسیلیس به موادسیمانی	2	19/29	2/12	(16/45, 22/13)	2/01141
	3	20/87	1/88	(18/03, 23/71)	
	4	21/83	2/03	(18/99, 24/67)	
نسبت فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی	0/8	20/893	1/569	(17/535, 24/251)	2/37706
	1/0	20/57	2/00	(17/22, 23/93)	
	1/2	20/52	3/24	(17/17, 23/88)	
نسبت سنگدانه به کل مصالح	0/48	20/590	0/891	(17/221, 23/959)	2/38448
	0/49	20/73	3/05	(17/36, 24/10)	
	0/50	20/67	2/63	(17/30, 24/04)	

10 ANOVA

11 One-Way

تحلیل آنوا علاوه بر جداول فوق، تحلیل به صورت نمودار نیز ارایه می‌دهد که معمول‌ترین آن‌ها نمودار جعبه ای است. در این نمودار داده‌های حداکثر، حداقل، میانه و میانگین هر پارامتر در هر سطح مشخص می‌شود که تحلیل و بهینه‌یابی را آسان می‌کند. نمودار جعبه‌ای چهار پارامتر بیان شده در سطوح مورد بررسی به صورت شکل ۱۱ می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار جعبه‌ای تحلیل آنوا برای فاکتورهای تاثیرگذار تاثیرگذار

در نمودار جعبه‌ای حداقل و حداکثر در محدوده جعبه مشخص می‌شوند. خط افقی داخل جعبه نشان‌دهنده میانه بوده و دایره کوچک داخل جعبه نشان‌دهنده میانگین داده‌ها می‌باشد. اعداد روی محور عمودی نمودار مقاومت فشاری نمونه و اعداد روی محور افقی نمودار، سطوح مورد بررسی در هر پارامتر هستند. بنابراین برای پیدا کردن حالت بهینه هر کدام از جعبه‌ها که میانه بالاتری نسبت به بقیه جعبه‌ها داشت، به علت داشتن مقاومت فشاری بیشتر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق شکل ۱۱ نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۵، درصد نانو سیلیس به موادسیمانی ۰/۴، نسبت فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی ۰/۸ و نسبت سنگدانه به کل مصالح ۰/۴۹ به عنوان طرح مخلوط بهینه می‌توان در نظر گرفت.

۴- طرح مخلوط بهینه

در نهایت باتوجه به هر دو روش تاگوچی و آنووا و مشاهده مقادیر بدست آمده، حالت بهینه برای رسیدن به بیشترین مقاومت عبارت از نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۵، درصد نانوسیلیس به موادسیمانی ۴، درصد فوق‌روان‌کننده به موادسیمانی ۰/۸، و نسبت سنگدانه به کل ۰/۴۹ است. حال برای سنجش، نمونه بتنی با شرایط فوق ساخته شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد که نتایج آن به شرح جدول ۱۲ می‌باشد.

جدول ۱۲: طرح مخلوط بهینه و نتایج آزمایشگاهی آن

نام طرح مخلوط	سیمان (Kg)	آب (Kg)	نانوسیلیس (Kg)	فوق‌روان‌کننده (Kg)	ماسه (Kg)	لیکا (Kg)	پودرسنگ (Kg)	جریان اسلامپ (mm)	حلقه J (mm)	قیف V (S)	جعبه L (نسبت)	جعبه U (mm)	مقاومت فشاری (Mpa)	وزن مخصوص (kg/m ³)	معیار کیفیت
Ta10	432	157/5	18	3/6	370	390	210	650	10	7	0/9	9	25/07	1579	158/77

همانطور که در جدول ۱۲ دیده می‌شود، مقاومت فشاری و معیار کیفیت نمونه بتنی بهینه در مقایسه با دیگر نمونه‌های ساخته شده بالاتر می‌باشد یعنی این نمونه، مقاومت بیشتری در وزن مخصوص مشابه یا کمتر از نمونه‌های دیگر دارد.

۵- نتیجه گیری

نمونه‌های به کارگرفته شده در روش تاگوچی، همگی دارای عیار موادسیمانی ۴۵۰ بوده ولی محدوده نسبت آب به موادسیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵، محدوده درصد نانوسیلیس نسبت به موادسیمانی ۲، ۳، ۴، محدوده درصد فوق‌روان‌کننده نسبت به موادسیمانی ۰/۸، ۱، ۱/۲ و محدوده درصد مصالح سنگی نسبت به کل بتن ۴۸، ۴۹ و ۵۰ می‌باشد. با توجه به این موارد، نتایج بدست آمده از روش تاگوچی به شرح ذیل است.

۱- بیشترین تاثیر در مقاومت فشاری نمونه بتن خودتراکم سبک سازه‌ای حاوی نانوسیلیس (SCLWSCNS)، مربوط به میزان نسبت آب به موادسیمانی بوده که ۵۶/۵ درصد تاثیر را به خود اختصاص داده است. البته کم کردن نسبت آب به سیمان باعث پایین آمدن کارایی بتن می‌شود که کارایی توسط فوق‌روان‌کننده تامین می‌شود.

۲- میزان درصد نانوسیلیس در مقاومت فشاری نمونه SCLWSCNS، در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد که ۳۶/۱ درصد تاثیر در مقاومت فشاری نمونه دارد. نانوسیلیس به عنوان آمورف در بتن نقش قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی دارد.

۳- با کاهش درصد فوق‌روان‌کننده، مقاومت فشاری SCLWSCNS افزایش می‌یابد ولی درجه اهمیت نسبتاً کمی دارد که درصد تاثیر آن ۰/۷٪ می‌باشد. در حالتی که روانی بالا و کارایی بیشتر مد نظر باشد، بهتر است از این افزایش مقاومت جزئی چشم‌پوشی شود.

۴- کمترین تاثیر در افزایش مقاومت فشاری SCLWSCNS، مربوط به درصد مصالح سنگی نسبت به کل مصالح است که ۰/۴٪ تاثیر در مقاومت فشاری دارد. البته این مهم در شرایطی است که طرح مخلوط مناسب و با دقت فراوان تهیه شده باشد. هرچند ممکن است موارد تاثیرگذاری مانند نوع دانه‌بندی و تغییر در درصد ریزدانه نسبت به لیکا و یا تغییر بیشتر در درصد مصالح سنگی نسبت به کل بتن، در مقاومت فشاری تاثیر بیشتری داشته باشد.

۵- نتایج روش تاگوچی، بهترین طرح مخلوط برای بالا بردن معیار کیفیت را پیش‌بینی کرد و این درحالی است که این روش کمترین هزینه زمانی و مادی را نسبت به روش‌های معمول آزمایشگاهی به همراه دارد.

۶ - استفاده از نانوسیلیس در ساخت بتن خودتراکم سبک سازه‌ای بسیار موثر است و حداقل درصد استفاده از نانوسیلیس به منظور تامین مقاومت سازه‌ای ۲ درصد نسبت به موادسیمانی می‌باشد. در این پژوهش، درصدهای نانوسیلیس بیشتر از ۴ درصد تاثیر مقاومتی چندانی نداشته و هزینه عملیات اجرایی را نیز بالا می‌برد. البته ناگفته نماند در عبارهای مختلف سیمان، درصد استفاده از آمورف متفاوت خواهد بود.

۷ - برای صحت‌سنجی روش تاگوچی از روش یک طرفه تحلیل آنووا استفاده شد که نتایج هر دو روش مورد تایید قرار گرفت. درضمن به عنوان پیشنهاد، می‌توان از روش‌های دیگر آنووا و یا حتی شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی طرح مخلوط بهینه استفاده کرد.

مراجع

- [1] Bartos, P.J.M. Gibbs, J.C. and Zhu, W.Z. (2001). "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full scale structure elements", *Cement and Concrete Composites*.
- [2] B. Bhushan. (2004). "*Handbook of Nanotechnology*" Springer, Berlin.
- [3] Mohini Undal¹, Dr. P.O. Modani², Prof. A.S. Gadewar. (May 2019). "Study of Self Compacting Concrete - A Review". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 06 Issue: 03.
- [4] Albert W.L.Yao, S.C.Chi. (May 2004). "Analysis and design of a Taguchi-Grey based electricity demand predictor for energy". *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issues 7-8, Pages 1205-1217.
- [5] Erdoğan Özbay, Ahmet Öztaş, Adil Baykasoglu, Hakan Ozbebek. (February 2009). "Investigating mix proportions of high strength self-compacting concrete by using Taguchi method." *Construction and Building Materials*, n. 2, v. 23. Pages: 694-702.
- [6] Ali Akbar Maghsoudi, Sh. Mohamadpour, Mohammad Maghsoudi. (September 2011). "Mix design and mechanical properties of self-compacting light weight concrete." *International Journal of Civil Engineering*. 9(3):230-236.
- [7] George Quercia Bianchi, Przemek Spiesz, Götz Hüsken, H.J.H. Brouwers. (June 2012). "EFFECTS OF AMORPHOUS NANO-SILICA ADDITIONS ON MECHANICAL AND DURABILITY PERFORMANCE OF SCC MIXTURES." *International Congress on Durability of Concrete (ICDC)*, Trondheim, Norway.
- [8] G N De Side, N N Kencanawati and Hariyadi. (2019). "An application of Taguchi experiment design methods on optimization of mortar mixture composition with Silica Fume as a partial substitute for cement". *The 2019 International Conference on Mining and Environmental Technology*.
- [9] ASTM C1611/C1611M – 18. (2018). "*Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*".
- [10] ASTM C1621 / C1621M – 17. (2017). "*Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring*".
- [11] BS EN 12350-9. (2010). "*Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. V-funnel test*".
- [12] BS EN 12350-10. (2010). "*Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. L box test*".
- [13] Haykawa, M. (1993). "development and application of super workable concrete", *proceeding of international RILEM workshop on special concretes-workability and mixing*.
- [14] Brite Eu Ram. (Spring 2001). "*Guidelines, Task, End Prodoc*", No. BE 96-3801.
- [15] BS 1881-116. (1983). "*Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes*".
- [16] BS EN 12390-7. (2019). "*Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete*".
- [17] Afzali Naniz, O. and Mazloom, M. (2018). "Effects of colloidal Nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete", *Journal of Building Engineering*, Vol. 20, 400-410.
- [18] Afzali Naniz, O. and Mazloom, M. (2019). "Fracture behaviour of self-compacting semi-lightweight concrete containing nano-silica", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 22, No. 10, 2264-2277.
- [19] Mazloom, M., Homayooni, S.M. and Miri, S.M. (2018). "Effect of rock flour type on rheology and strength of self-compacting lightweight concrete", *Computers and Concrete*, 21(2), 199-207.
- [20] Alireza Habibi, Jian Ghomashi. (2018). "Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results". *Construction and Building Materials*. 168, P:113-123.

- [21] Yoyok Setyo Hadiwidodo and Sabarudin Bin Mohd. (2010). "Taguchi Experiment Design for Investigation of Freshened Properties of Self-Compacting Concrete". *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 3 (2): 300-306.
- [22] Ranjit K. Roy. (2010). "A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD" SECOND EDITION. *Society of Manufacturing Engineers*.
- [23] Chien-Wen Hong. (April 2012). "Using the Taguchi method for effective market segmentation". *Expert Systems with Applications*, 39(5):5451-5459.
- [24] Balamurugan Gopalsamy, Biswanath Mondal, Sukamal Ghosh. (August 2009). "Taguchi method and ANOVA: An Approach for process parameters optimisation of Hard Machining while machining hardened steel". *Journal of scientific and industrial research*, 68:686-695.
- [25] Samruddhi Rao, Pragati Samant, Athira Kadampatta, Reshma Shenoy. (October 2013). "An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 10, 621 ISSN 2229-5518.
- [26] Sorana D. Bolboacă and Lorentz Jäntschi. (2007). "Design of Experiments: Useful Orthogonal Arrays for Number of Experiments from 4 to 16". *Entropy* 9, 198-232.
- [27] S. Kamaruddin, Zahid A. Khan and S. H. Foong. (December 2010). "Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parameters for Manufacturing Products from Plastic Blend". *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.2, No.6, ISSN: 1793-8236.
- [28] MelesseWorknehWakjira, Holm Altenbach and Janaki Ramulu Perumalla. (2019). "Analysis of CSN 12050 Carbon Steel in Dry Turning Process for Product Sustainability Optimization Using Taguchi Technique". *Hindawi Journal of Engineering*, Article ID 7150157, 10 page.
- [29] Mazloom, M. and Yoosefi, M.M. (2013), "Predicting the Indirect Tensile Strength of Self Compacting Concrete Using Artificial Neural Networks", *Computers and Concrete*, 12(3), 285-301.
- [30] Kheti Huseni, PanaskarSourabhVilasrao, Tashi DorjiTamang, Abdul Rahim. A. (August 2016). "Optimization of strength properties for Self-Compacting Concrete by Taguchi Method". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 8, 1719 ISSN 2229-5518.
- [31] D. E. Oghenechuko and O. U. Orié. (July 2018). "OPTIMIZATION OF SUPERPLASTICIZED CONCRETE USING TAGUCHI APPROACH: A CASE STUDY OF HYDROPLAST 200". *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, Vol. 37, No. 3, pp.611 – 618.
- [32] Rajeswari Prusty, Bibhuti B. Mukharjee and Sudhirkumar V. Barai. (December 2015). "Nano-engineered concrete using recycled aggregates and nano-silica: Taguchi approach". *Advances in Concrete Construction*, Vol. 3, No. 4. 253-268.
- [33] Sabarish K.V, Akish Remo M, Pratheeba Paul. (2019). "Optimizing the Concrete Materials by Taguchi Optimization Method". *International Conference on Materials Engineering and Characterization*.
- [34] EbrahimSharifi, Seyed JafarSadjadi, M.R.MAliha, Ali Moniri. (March 2020). " Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method". *Construction and Building Materials*, Volume 236, 117547.