

## بررسی تحلیلی تأثیر پارامترهای رئولوژیکی بر کارایی بتن خود تراکم

یاشار اصغری

کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

سید اسماعیل محمدیان یاسوج\*

گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

نازیلا کاردان

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

### چکیده

شاخص ترین وجه تمایز بتن خود تراکم و بتن معمولی کارایی است که این ویژگی به بتن خود تراکم اجازه پر کردن قالب را بدون عملیات ویریه می دهد. یکی از آزمون های اصلی در تعیین کارایی بتن خود تراکم آزمون L-box است که به وسیله آن می توان قابلیت گذرندگی و پرکنندگی بتن را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار Flow-3D، بتن خود تراکم با ارزیابی نتایج آزمون L-box مورد مطالعه قرار گرفته و زمان رسیدن بتن به فاصله ۴۰ سانتی متری از دریچه ثبت شده است. برای این منظور، بتن های مورد استفاده دارای ویسکوزیته پلاستیک ۳۸-۱۰ پاسکال در ثانیه (Pa.s)، تنش تسلیم ۷۵-۱۴ پاسکال (Pa)، وزن مخصوص ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ( $kg/m^3$ ) و مدول برشی الاستیک ۱۰۰ و ۱۰۰۰ پاسکال (Pa) می باشند. به منظور مدل سازی سنگ دانه ها، از اجزای کروی شکل به قطر ۲۰ میلی متر و وزن مخصوص ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ( $kg/m^3$ ) استفاده شده است. برای صرفه جویی در زمان و بررسی پارامترهای مؤثر در مقدار زمان لازم برای رسیدن بتن به فاصله ۴۰ سانتی متری از دریچه بالا رونده (T<sub>40cm</sub>)، طراحی آزمایش به روش تاگوچی انجام شده و تعداد ۱۶ طرح آزمایش پیشنهادی توسط این روش در نرم افزار Minitab بررسی شده است. پس از آنالیز نتایج به روش سیگنال به نویز، مشاهده گردید ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم بتن خود تراکم به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در مقدار T<sub>40cm</sub> دارند که این نتایج با نتایج حاصل از آنالیز واریانس مطابقت دارد.

واژه های کلیدی: بتن خود تراکم؛ آزمون L-box؛ نرم افزار Flow-3D؛ روش تاگوچی؛ آنالیز واریانس.

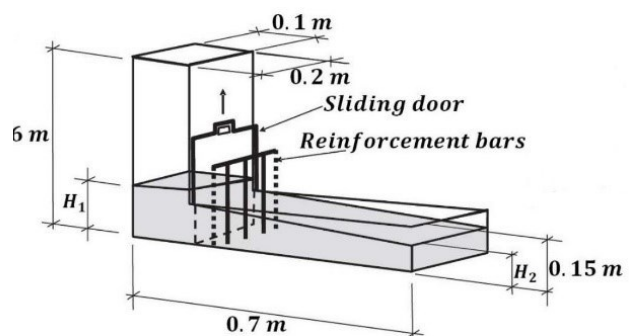
\* نویسنده مسئول: sm7093370@yahoo.com

## ۱- مقدمه

نمود. در بررسی جریان بتن با روش‌های عددی، باید سنگ‌دانه‌ها، دوغاب یا ملات موردنظر، نحوه جایگذاری میلگردها و مشخصات دیواره‌های قالب را در نظر گرفت در مورد رابطه بین پارامترهای رئولوژیکی بتن خود تراکم و نتایج حاصل از آزمایش L-box تعداد تحقیقات محدودی انجام گرفته است [۶-۱۱]. نیوموسنو و همکاران [۱۲]، یک مدل نیمه تجربی را به منظور بهینه کردن حجم بیشینه سنگ‌دانه‌های مورد استفاده، به منظور دستیابی به قابلیت گذرندگی مناسب بتن خود تراکم با مشخصات رئولوژیک و فواصل میلگردهای متفاوت، به کار گرفتند. این پژوهشگران، اصلاح مدل ارائه شده‌ی پیشین خود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل، حاکی از امکان افزایش حجم سنگ‌دانه‌ها در محیط‌هایی با فواصل بیشتر میلگردها بدون کاهش در میزان گذرندگی بتن خود تراکم بود. یاحیا و همکاران [۱۳]، با به کارگیری یک مدل استاتیکی، تأثیر هم‌زمان طرح اختلاط، میزان مواد جایگزین سیمانی و فاصله میلگردها را بر قابلیت گذرندگی بتن خود تراکم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان مواد جایگزین سیمانی سه برابر بیشتر از مقدار حجم سنگ‌دانه‌ها بر روی تنش تسلیم اثرگذار هستند. همچنین، با در نظر گرفتن یک فاصله ثابت بین میلگردهای دستگاه L-box، بتن خود تراکم با ویسکوزیته پلاستیک بالاتر و تنش تسلیم پایین‌تر، روانی کمتری از خود نشان می‌دهد. اسپانگنبرگ و همکاران [۱۱]، با بررسی جریان بتن بر اساس حرکت سنگ‌دانه‌ها، متوجه شدند که حرکت دانه‌های مورد مطالعه که متأثر از جاذبه می‌باشد بیشترین تأثیر را در نتایج جداسدگی دینامیکی داشته‌اند. همین‌طور، در تحقیق دیگری [۱۴]، با مطالعه جداسدگی دینامیکی در حین بتن‌ریزی با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، مشاهده نمودند که جابه‌جایی ذرات مهم‌ترین عامل کاهش ذرات درشت دانه در قسمت افقی در فاصله محل بتن‌ریزی و در قسمت‌های بالایی بتن می‌باشد.

حسین پور و همکاران [۵]، به منظور بررسی اثر پارامترهای رئولوژیکی بتن بر نتایج حاصل از آزمایش L-box، ۲۵ شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D انجام دادند. بتن‌های مورد بررسی دارای ویسکوزیته پلاستیک ۱۰ تا ۵۰ (Pa.s)، تنش تسلیم ۱۴ تا ۷۵ (Pa)، وزن مخصوص ملات ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ( $\text{kg/m}^3$ ) و مدول الاستیک برشی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ (Pa) بودند. همان‌طور که در

بتن خود تراکم یک نوع بتن با کارایی بسیار بالا می‌باشد که برای بتن‌ریزی در مقاطع با تراکم میلگرد بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد و ویژگی اصلی این بتن آن، نسبت به بتن معمولی، عدم نیاز به صرف انرژی و هزینه برای انجام و بهره‌حین هنگام انجام عملیات بتن‌ریزی می‌باشد [۱]. آزمایش‌ها گوناگونی برای اطمینان یافتن از کارایی مناسب بتن خود تراکم انجام می‌پذیرد که از این میان آزمون L-box اغلب به منظور بررسی گذرندگی و جداسدگی جریان بتن خود تراکم انجام می‌گیرد [۲]. شکل ۱ شماتیک و مشخصات جعبه مورد استفاده برای آزمون L-box را نشان می‌دهد. دستگاه L-box شامل یک قسمت افقی و یک قسمت قائم می‌باشد که به وسیله یک دریچه متحرک از هم جدا شده‌اند. در ابتدا بتن به داخل قسمت قائم ریخته می‌شود و با باز شدن تدریجی دریچه، بتن جریان پیدا کرده و با عبور از میلگردهای تعبیه شده در قسمت افقی دستگاه پیشروی می‌کند و در هنگام انجام آزمایش می‌توان زمان لازم برای رسیدن بتن به فاصله‌های ۲۰ سانتی‌متری (T20cm) یا ۴۰ سانتی‌متری (T40cm) از دریچه بالارونده و در آخر نسبت گذرندگی را، با تقسیم ارتفاع بتن موجود در انتهای قسمت افقی بر ارتفاع بتن باقی‌مانده در قسمت قائم، ثبت نمود [۳، ۴].



شکل ۱- شماتیک و مشخصات جعبه مورد استفاده برای آزمون

L-box [۵]

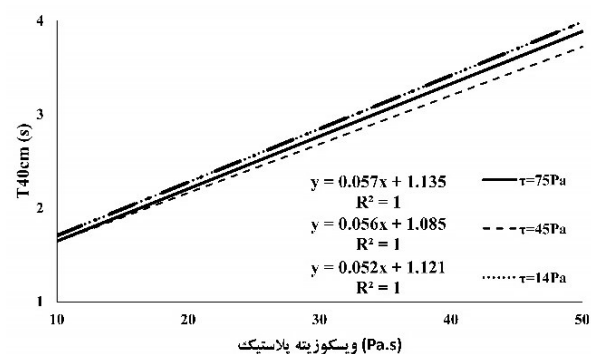
قابلیت گذرندگی از مهم‌ترین مشخصات عملکردی بتن خود تراکم می‌باشد که در عملکرد بتن در سازه نقش اساسی ایفا می‌کند. پیشرفت روش‌های عددی باعث پیش‌بینی هر چه بهتر مشخصات مربوط به جریان بتن خود تراکم شده است، به طوری که می‌توان بر اساس آن کارآمدترین طرح اختلاط را مورد استفاده قرار داده و از عملکرد پرکننده‌گی بتن خود تراکم اطمینان حاصل

**۲- مشخصات بتن های مورد استفاده به منظور شبیه سازی**  
 مشخصات بتن های مورد استفاده در این پژوهش برای شبیه سازی در نرم Flow-3D شامل، چهار ویسکوزیته پلاستیک (۱۰،۱۷،۲۵،۳۸) (Pa.s)، چهار تنش تسلیم (۱۴،۳۰،۴۵،۷۵) (Pa)، و دو مدول الاستیک برشی (۱۰۰ و ۱۰۰۰) (Pa)، به منظور مدل سازی در نظر گرفته شده است. همچنین، دو وزن مخصوص (۲۰۰۰ و ۲۵۰۰) ( $\text{kg/m}^3$ ) برای ملات که شامل اجزای کروی به چگالی (۲۵۰۰) ( $\text{kg/m}^3$ ) می باشد در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی سنگ دانه های بتن خود تراکم، ۱۳۵ عدد اجزای کروی شکل به قطر ۲۰ میلی متر و وزن مخصوص (۲۵۰۰) ( $\text{kg/m}^3$ ) در نظر گرفته شده است. قابل ذکر می باشد که حجم دانه های انتخاب شده حدوداً ۴،۷٪ کل حجم بتن مورد آزمایش می باشد که در قسمت قائم دستگاه L-box در درون دوغاب به صورت اتفاقی پخش شده اند.

### ۳- روند شبیه سازی در نرم افزار Flow3D

نرم افزار Flow-3D نرم افزاری چندجانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در مدل سازی دوبعدی و سه بعدی می باشد که بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی CFD پایه گذاری شده است. روش حل معادلات در این نرم افزار بر اساس روش حجم محدود می باشد. مدل های ریاضی از جمله ابزارهای توانمند در زمینه حل معادلات پیچیده مربوط به مکانیک سیالات می باشند. ابتدا مدل کلی L-box با استفاده از نرم افزار اتو کد طراحی شده و با فرمت STL ذخیره می گردد تا توسط نرم افزار Flow-3D قابلیت فراخوانی داشته باشد. سپس شرایط مرزی مسأله و مشخصات مربوط به مصالح به مدل ساخته شده اعمال می گردد. در مدل سازی برای پژوهش حاضر، شرایط مرزی اصطکاکی<sup>۱</sup> برای مدل سازی برهم کنش های بین دیواره، ذرات کروی و دوغاب با ضریب اصطکاک ۰/۴ مورد استفاده قرار گرفت. نرخ سرعت نیز برای دیواره و کشویی بالارونده به ترتیب صفر و ۰/۳ m/s<sup>۲</sup> انتخاب شده [۱۵]. قابل ذکر می باشد، با فرض رفتار غیر نیوتنی بینگهام برای دوغاب مورد نظر، مدل الاستوپلاستیک با روش حل ضمنی<sup>۲</sup> استفاده شد. همچنین، شتاب گرانش زمان ۹/۸۱ m/s<sup>۲</sup> و جریان دوغاب به عنوان یک جریان

شکل ۲ نیز قابل مشاهده است، این پژوهشگران با بررسی زمان ثبت شده برای رسیدن بتن به فاصله ۴۰ سانتی متری از دریچه متحرک، به این نتیجه رسیدند که، با افزایش ویسکوزیته پلاستیک، سرعت جریان بتن خود تراکم کاهش و در نتیجه زمان ثبت شده افزایش می یابد. در پژوهش حسین پور و همکاران علارقم اینکه برای مجموعه مدلها از دو مقدار ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ( $\text{kg/m}^3$ ) برای وزن مخصوص و ۱۰۰ و ۱۰۰۰ (Pa) برای مدول الاستیک برشی استفاده شده است ولی برای بررسی پارامتر T<sub>40cm</sub> وزن مخصوص و مدول الاستیک برشی ثابت در نظر گرفته شده است در حالی که در پژوهش حاضر مقادیر ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ( $\text{kg/m}^3$ ) برای وزن مخصوص و ۱۰۰ و ۱۰۰۰ (Pa) برای مدول الاستیک برشی استفاده شده است.



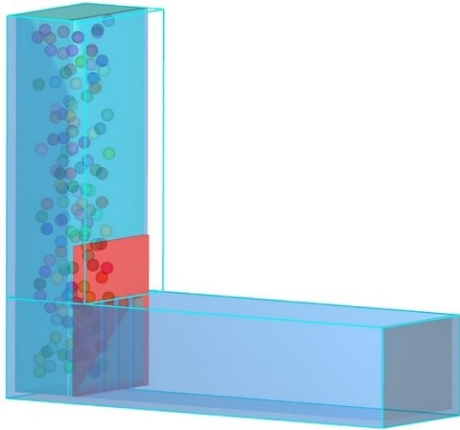
شکل ۲- نمودار تغییرات ویسکوزیته پلاستیک در مقابل نتایج

[۵] T<sub>40cm</sub>

در پژوهش حاضر، با هدف بررسی تأثیر پارامترهای رئولوژیکی بر زمان رسیدن جریان بتن به فاصله ۴۰ سانتی متری از دریچه متحرک (T<sub>40cm</sub>)، شبیه سازی بتن خود تراکم در نرم افزار Flow3D انجام گرفته شده است. قابل ذکر می باشد که طرح آزمایش این پژوهش با استفاده از روش تاگوجی در Minitab انجام شده است. این کار منجر به کاهش هزینه ها و زمان مربوط به شبیه سازی می شود. همچنین، با توجه به اینکه در این پژوهش، هر کدام از عوامل ویسکوزیته پلاستیک، تنش تسلیم، مدول برشی الاستیک و وزن مخصوص، با حداقل دو مقدار، در شبیه سازی ها شرکت دارند می توان تأثیر هر چهار پارامتر را بر روی نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار داد. در انتها با استفاده از آنالیز واریانس میزان تأثیر هر پارامتر بر روی T<sub>40cm</sub> مشخص می شود.

<sup>2</sup> Implicit numerical approximation

<sup>1</sup> friction boundary conditions



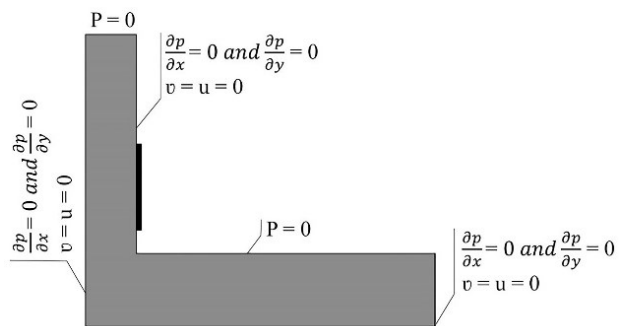
شکل ۴- اعمال شرایط مرزی مسأله به مدل فراخوانی شده توسط نرم افزار Flow-3D

#### ۴- صحت سنجی مدل ساخته شده

تمامی شبیه سازی های این پژوهش به وسیله دستگاہی با سی پی یو I7-6700 HQ و سرعت پردازنده 2.6 GHZ انجام شده است که با توجه به مقدار ویسکوزیته پلاستیک ۱۲ تا ۸۰ ساعت به طول کشیده است. ویسکوزیته پلاستیک مهم ترین پارامتر در تعیین زمان شبیه سازی می باشد. برای بررسی صحت مدل سازی های انجام گرفته در این پژوهش، سه مدل سازی به صورت آزمایشی انجام شد و نتایج حاصله با نتایج شبیه سازی های انجام گرفته در پژوهش آقای حسین پور و همکاران [۵] مقایسه شده. همان طور که در جدول ۱ قابل ملاحظه است، مقایسه نتایج نشانگر صحت و قابلیت اطمینان بسیار بالای مدل ساخته شده در پژوهش حاضر می باشد. اختلاف بسیار جزئی نتایج می تواند ناشی از نحوه قرار گیری ذرات کروی و همین طور ضخامت درجه بالارونده باشد.

بعد از اطمینان از صحت مدل های ساخته شده، به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه و همچنین بررسی میزان تأثیر هر کدام از فاکتورهای موجود بر نتایج مدل های شبیه سازی شده، آزمایش های مورد نیاز با استفاده از روش تاگوچی تعیین می گردد. روش تاگوچی یک روش طراحی آزمایش قدرتمند است که در مهندسی های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد و با تجزیه و تحلیل برای شناسایی عوامل مهم و شرایط بهینه، تعداد آزمایش ها را کاهش داده و موجب صرفه جویی در زمان و هزینه می گردد [۱۶].

لایه ای در نظر گرفته شد. به منظور شبیه سازی حرکت اجسام متحرک مانند کشویی بالارونده و ذرات کروی شکل در بتن خود تراکم، از تکنیک ذرات متحرک<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. تکنیک ذرات متحرک اجازه می دهد تا چندین حرکت مستقل را در یک شبیه سازی وجود داشته باشد. در این مطالعه، برخورد بین ذره با ذره و ذره با دیوار، به صورت کاملاً الاستیک با ضریب بازگشتی ۰/۸ فرض می شود. این ضریب، با بررسی برخورد ذرات شیشه ای به قطر ۲۰ mm با سطوح فولادی و پلگسی گلس، با استفاده از دوربین های سرعت بالا در دانشگاه شریروک اندازه گیری شده است [۵]. مدل ساخته شده در نرم افزار اتوکد به صورت سه بعدی طراحی شده و سپس با فرمت STL ذخیره می گردد. ذخیره کردن به فرمت STL به کاربر امکان فراخوانی توسط نرم افزار Flow-3D را می دهد. در ادامه، بعد از فراخوانی مدل ساخته شده، شرایط مرزی مسئله که بر اساس مطالعات پیشین تعریف شده اند روی مدل اعمال می گردد. همچنین، شکل ۳ نمایانگر شرایط مرزی اعمال شده بر مدل مسأله می باشد که فشار سطوح آزاد برابر صفر در نظر گرفته شده است و همچنین برای دیوارها سرعت صفر که حاکی از ساکن بودن آنها می باشد، تعریف شده است [۵].



شکل ۳- شرایط مرزی مدل ساخته شده [۵]

نرم افزار Flow-3D امکان رسم مدل های مورد نیاز را دارا می باشد ولی به دلیل اینکه نرم افزار اتوکد یک نرم افزار تخصصی برای رسم شکل های سه بعدی است، مدل اولیه ابتدا در این نرم افزار اتوکد رسم و سپس توسط نرم افزار Flow-3D فراخوانی می گردد. همچنین همان طور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، اجزای کروی و به طور کلی شرایط مرزی به مدل اضافه شده اند.

<sup>1</sup> General Moving Object (GMO)

۱۷]. تاگوجی دو روش متفاوت برای تحلیل نتایج به دست آمده پیشنهاد می کند. در روش اول که روش استاندارد نیز نامیده می شود، نتایج به وسیله آنالیز واریانس تحلیل می گردند و در روش دوم که توسط تاگوجی برای آزمایش های همراه با تکرار توصیه شده است، استفاده از نسبت سیگنال به نویز برای تحلیل نتایج می باشد [۱۸].

جدول ۱: مقایسه نتایج شبیه سازی پژوهش حاضر و نتایج شبیه سازی رفرنس [۵]

| آزمایش | ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s) | تنش تسلیم (Pa) | وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> ) | مدول برشی الاستیک (Pa) | T <sub>40cm</sub> در پژوهش حاضر | T <sub>40cm</sub> در مرجع [۵] | درصد مطابقت |
|--------|--------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------|
| ۱      | ۱۷                       | ۷۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    | ۲/۱۲۴                           | ۲/۱۰۱                         | ۰/۹۹۰       |
| ۲      | ۱۷                       | ۴۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    | ۲/۰۳۲                           | ۲/۰۳۷                         | ۰/۹۹۷       |
| ۳      | ۲۵                       | ۱۴             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    | ۲/۴۱۶                           | ۲/۴۱۲                         | ۰/۹۹۸       |

جدول ۳- فاکتورها و سطوح پیشنهاد شده توسط روش تاگوجی

| شماره آزمایش | فاکتورها                 |                |                                |                        |
|--------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
|              | ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s) | تنش تسلیم (Pa) | وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> ) | مدول برشی الاستیک (Pa) |
| ۱            | ۱۰                       | ۱۴             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۲            | ۱۰                       | ۳۰             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۳            | ۱۰                       | ۴۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۴            | ۱۰                       | ۷۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۵            | ۱۷                       | ۱۴             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۶            | ۱۷                       | ۳۰             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۷            | ۱۷                       | ۴۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۸            | ۱۷                       | ۷۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۹            | ۲۵                       | ۱۴             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۱۰           | ۲۵                       | ۳۰             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۱۱           | ۲۵                       | ۴۵             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۱۲           | ۲۵                       | ۷۵             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۱۳           | ۳۸                       | ۱۴             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۱۴           | ۳۸                       | ۳۰             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۱۵           | ۳۸                       | ۴۵             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۱۶           | ۳۸                       | ۷۵             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰                    |

با توجه به اینکه تعداد سطوح در تمامی فاکتورها یکسان نمی باشد، از طراحی به روش مختلط استفاده شده است که طرح های پیشنهادی را می توان بر اساس تعداد فاکتورها و سطوح انتخاب کرد. بر اساس فاکتورها و سطوح ارائه شده، ۶۴ حالت کلی برای انجام آزمایش ها وجود دارد که روش تاگوجی ۱۶ آزمایش پیشنهادی را ارائه می دهد. مقادیر هر فاکتور برای هر آزمایش

تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نسبت سیگنال به نویز عمدتاً با استفاده از سه ویژگی آماری با عنوان های بزرگتر-بهرتر، کوچکتر-بهرتر و اسمی-بهرتر انجام می گیرد [۱۶، ۱۷]. رابطه های (۱)، (۲) و (۳) مربوط به این سه عامل عملکردی می باشند.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^n y_{ij}^2 \right] \quad (۱)$$

(بزرگتر-بهرتر)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right] \quad (۲)$$

(کوچکتر-بهرتر)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^n (y_{ij} - m)^2 \right] \quad (۳)$$

(اسمی-بهرتر)

در این پژوهش، با توجه به اینکه کمتر بودن زمان رسیدن دوغاب به ۴۰۰ میلی متری از دریچه، نشان گر روانی بالاتر بتن می باشد، کوچکتر-بهرتر انتخاب گردیده است. همچنین، همان طور که در جدول ۲ مشاهده می گردد، در این مطالعه ویسکوزیته پلاستیک، تنش تسلیم، وزن مخصوص دوغاب و مدول الاستیک برشی به عنوان فاکتورهای مورد استفاده در روش تاگوجی معرفی شده اند. دو فاکتور ویسکوزیته پلاستیک و تنش تسلیم دارای چهار سطح می باشند، در حالی که دو فاکتور وزن مخصوص ملات و مدول الاستیک برشی دارای دو سطح می باشند.

جدول ۲- فاکتورها و سطوح مربوط به هر فاکتور

| سطوح | فاکتورها                 |                |                                |                        |
|------|--------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
|      | ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s) | تنش تسلیم (Pa) | وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> ) | مدول برشی الاستیک (Pa) |
| ۱    | ۱۰                       | ۱۴             | ۲۰۰۰                           | ۱۰۰                    |
| ۲    | ۱۷                       | ۳۰             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                   |
| ۳    | ۲۵                       | ۴۵             | -                              | -                      |
| ۴    | ۳۸                       | ۷۵             | -                              | -                      |

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های پیشنهادی روش تاگوچی در

| شماره<br>آزمایش | T <sub>40cm</sub><br>(S) |
|-----------------|--------------------------|
| ۱               | ۱/۷۱۲                    |
| ۲               | ۱/۷۲۷                    |
| ۳               | ۱/۵۸۰                    |
| ۴               | ۱/۶۵۸                    |
| ۵               | ۲/۱۹۵                    |
| ۶               | ۲/۲۶۲                    |
| ۷               | ۲/۰۳۲                    |
| ۸               | ۲/۱۲۴                    |
| ۹               | ۲/۴۱۶                    |
| ۱۰              | ۲/۴۴۵                    |
| ۱۱              | ۲/۹۰۸                    |
| ۱۲              | ۳/۰۶۵                    |
| ۱۳              | ۳/۱۱۵                    |
| ۱۴              | ۳/۱۶۹                    |
| ۱۵              | ۳/۷۵۳                    |
| ۱۶              | ۳/۹۳۷                    |

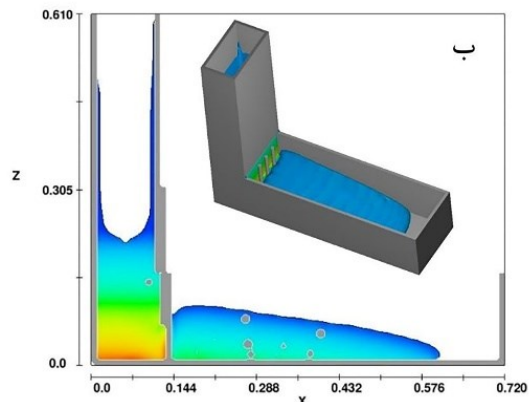
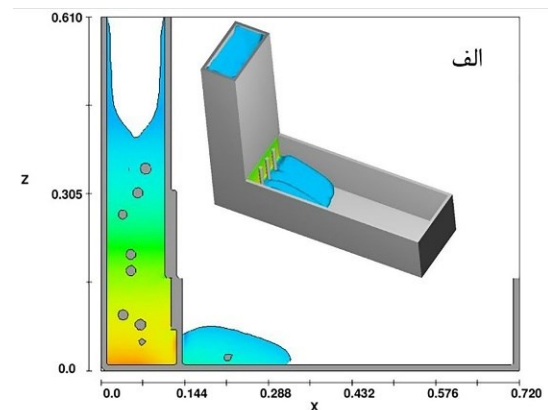
#### ۵- صحت‌سنجی روش تاگوچی

برای اطمینان از عملکرد روش تاگوچی در مورد پیش‌بینی نتایج، دو شبیه‌سازی با پارامترهای نشان داده شده در جدول ۵ انجام گرفته و زمان رسیدن بتن به فاصله ۴۰ سانتی متری از دریچه ثبت گردیده است. سپس با استفاده از روش تاگوچی و وارد کردن مشخصات هر کدام از بتن‌های مورد آزمایش نتایج پیش‌بینی شده استخراج گردیده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد که نتایج آزمایش‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۹ درصد با پیش‌بینی انجام گرفته توسط روش تاگوچی مطابقت دارند. با استناد به درصد‌های بالای مطابقت، می‌توان ادعا داشت که روش تاگوچی توانایی پیش‌بینی دقیقی در این مسأله داشته است.

#### ۶- تحلیل و بررسی نتایج

در ادامه نتایج به دست آمده از نسبت سیگنال به نویز، آنالیز واریانس و رگرسیون درجه دوم مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

ارائه شده توسط روش تاگوچی در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۵ نمایانگر خروجی‌های دوبعدی و سه‌بعدی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو نوع بتن با مشخصات مختلف در زمان ۲ ثانیه می‌باشد. هر دو نمونه دارای وزن مخصوص دوغاب  $2000 \text{ Kg/m}^3$  و مدول برشی الاستیک  $100 \text{ Pa}$  می‌باشند و همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه (ب) با ویسکوزیته پلاستیک  $10 \text{ Pa.s}$  و تنش تسلیم  $14 \text{ Pa}$  تقریباً  $2/5$  برابر نمونه (الف) با ویسکوزیته  $38 \text{ Pa.s}$  و تنش تسلیم  $75 \text{ Pa}$  پیشروی داشته است.

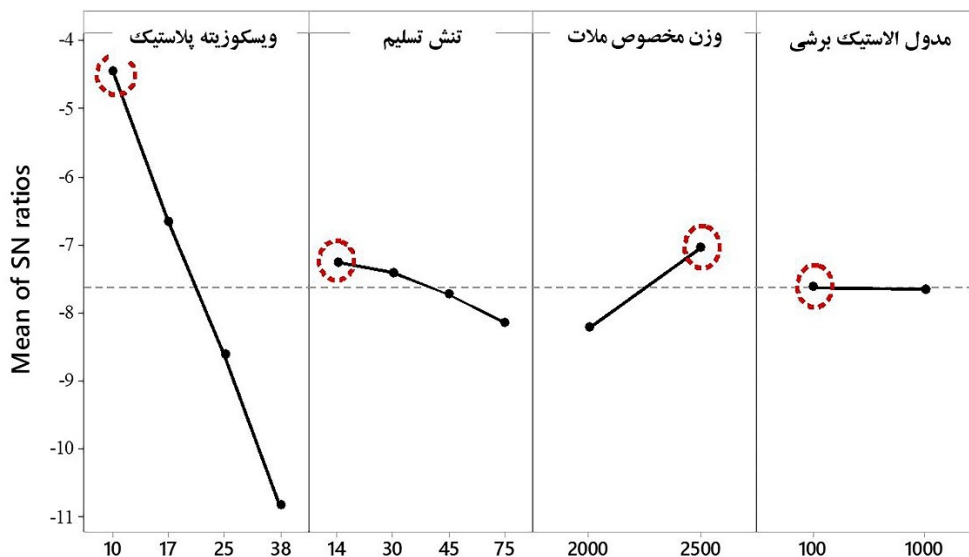


شکل ۵- خروجی گرافیکی دوبعدی و سه‌بعدی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی (الف) بتن خود تراکم با ویسکوزیته پلاستیک  $38 \text{ Pa.s}$ ، تنش تسلیم  $75 \text{ Pa}$  و (ب) ویسکوزیته پلاستیک  $10 \text{ Pa.s}$ ، تنش تسلیم  $14 \text{ Pa}$

در ادامه، با استفاده از نتایج سیگنال به نویز به دست آمده از روش تاگوچی و همین‌طور تعیین درصد مشارکت هر فاکتور با استفاده از آنالیز واریانس، تأثیر هر فاکتور بر روی نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌شود. با انجام ۱۶ آزمایش پیشنهادی توسط روش تاگوچی مقدار  $T_{40cm}$  به عنوان نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴ ثبت شده است.

جدول ۵- مقادیر فاکتورهای مربوط به شبیه‌سازی‌های آزمایشی

| شماره آزمایش | ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s) | تنش تسلیم (Pa) | وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> ) | تنش برشی الاستیک (Pa) | روش تاگوچی | نرم‌افزار Flow3D | درصد مطابقت |
|--------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------|------------|------------------|-------------|
| ۱            | ۲۵                       | ۷۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰                   | ۲/۷۲۷      | ۲/۶۴۱            | ۰/۹۷        |
| ۲            | ۱۰                       | ۴۵             | ۲۵۰۰                           | ۱۰۰۰                  | ۱/۵۳۰      | ۱/۵۲۶            | ۰/۹۹        |



سیگنال به نویز : کوچکتر بهتر

شکل ۶- نمودارهای استخراج شده سیگنال به نویز توسط نرم‌افزار Minitab

جدول ۶- نتایج مربوط به سیگنال به نویز استخراج شده از نرم‌افزار Minitab

| سطوح  | مدول الاستیک | وزن مخصوص | تنش تسلیم | ویسکوزیته پلاستیک |
|-------|--------------|-----------|-----------|-------------------|
| ۱     | -۷/۶۱۷       | -۸/۲۱۶    | -۷/۲۵۷    | -۴/۴۴۵            |
| ۲     | -۷/۶۴۶       | -۷/۰۴۸    | -۷/۴۰۵    | -۶/۶۵۵            |
| ۳     | -            | -         | -۷/۷۲۳    | -۸/۶۰۷            |
| ۴     | -            | -         | -۸/۱۴۲    | -۱۰/۸۲۰           |
| Delta | ۰/۰۲۹        | ۱/۱۶۸     | ۰/۸۸۴     | ۶/۳۴۷             |
| Rank  | ۴            | ۲         | ۳         | ۱                 |

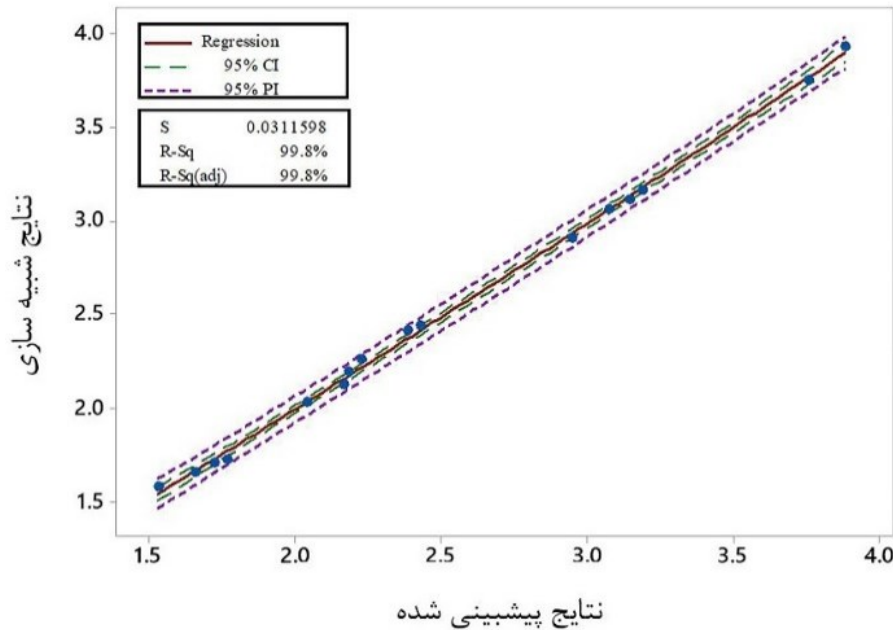
### ۱-۶- تحلیل نتایج با استفاده از سیگنال به نویز

می‌باشد به طوری که با افزایش مقادیر ویسکوزیته پلاستیک، مقدار T<sub>40cm</sub> افزایش می‌یابد. با توجه به بخش مربوط به تنش تسلیم، با افزایش تنش تسلیم زمان مربوط به T<sub>40cm</sub> افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، کمترین زمان مربوط به بتن با ویسکوزیته پلاستیک ۱۰ Pa.s، تنش تسلیم ۳۰ Pa و وزن مخصوص ملات ۲۵۰۰ Kg/m<sup>3</sup> و مدول الاستیک برشی ۱۰۰ Pa می‌باشد. همین‌طور، بیشترین زمان مربوط به بتن با ویسکوزیته پلاستیک

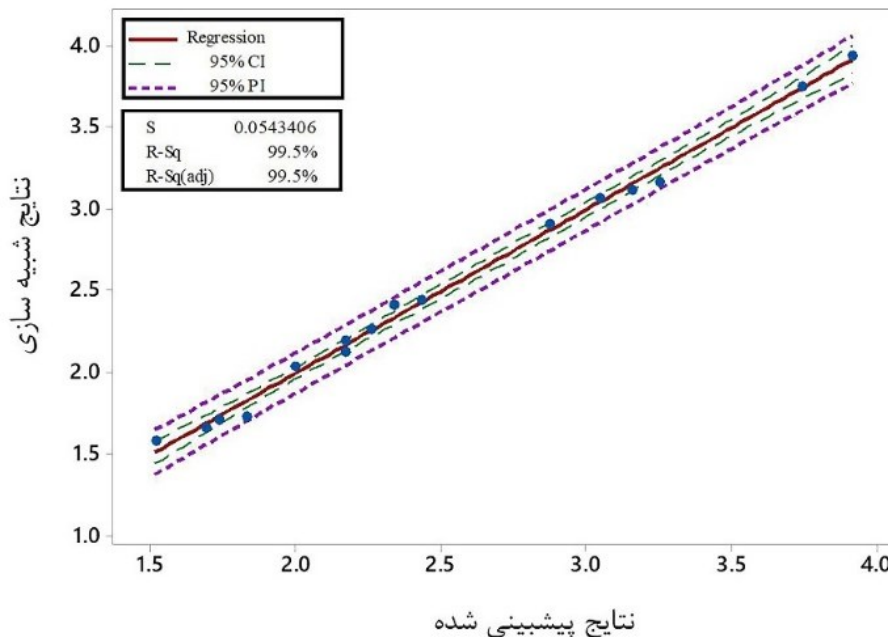
در ادامه، نمودارهای مربوط به نسبت سیگنال به نویز استخراج شده از نرم‌افزار Minitab در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها، می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف بر نتایج موردنظر را بررسی نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش مدول الاستیک برشی باعث افزایش جزئی مقدار T<sub>40cm</sub> می‌گردد، در حالی که تغییرات ویسکوزیته پلاستیک به شدت بر نتایج تأثیر گذار

در این قسمت، ۱۶ آزمایش پیشنهادی حاصل از روش تاگوچی پیش‌بینی شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Flow-3D و نتایج پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی می‌توان نتیجه گرفت که این روش با دقت بسیار بالایی توانایی پیش‌بینی نتایج را دارا می‌باشد. با توجه به شکل ۷، ضریب همبستگی ۹۹/۸ درصد نشان از دقت بسیار بالای این روش در پیش‌بینی نتایج می‌باشد.

۳۸ Pa.s، تنش تسلیم ۷۵ Pa، وزن مخصوص دوغاب  $\text{Kg/m}^3$  ۲۰۰۰ و مدول الاستیک برشی ۱۰۰۰ Pa می‌باشد. جدول ۶ نشان‌گر رتبه هر کدام از فاکتورهای مورد مطالعه بر اساس میزان تأثیر بر زمان رسیدن بتن به ۴۰۰ میلی‌متری از دریچه L-box می‌باشد. با توجه به رتبه هر فاکتور، مشخص می‌گردد که تغییرات ویسکوزیته پلاستیک، وزن مخصوص ملات، تنش تسلیم و مدول الاستیک برشی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نتایج دارند.



شکل ۷- مقایسه بین پاسخ‌های استخراج شده از نرم‌افزار Flow-3D و پیش‌بینی شده با تاگوچی



شکل ۸- مقایسه بین پاسخ‌های استخراج شده از نرم‌افزار Flow-3D و پیش‌بینی شده با رگرسیون



## ۲-۶- تحلیل نتایج با استفاده از آنالیز واریانس

در ادامه، درصد مشارکت هر یک از فاکتورهای مورد بررسی با استفاده از آنالیز واریانس تعیین می‌گردد. با توجه به جدول ۷ و مقایسه‌ی درصد مشارکت‌های به‌دست آمده برای هر یک از فاکتورها، مشخص می‌گردد که فاکتور ویسکوزیته پلاستیک بیشترین تأثیر را در نتایج مربوط به مقدار  $T_{40cm}$  دارد. به عبارتی، به‌منظور کاهش هر چه بیشتر نتایج، تغییر ویسکوزیته پلاستیک نسبت به تغییر دیگر فاکتورها اولویت دارد. همچنین، درصد مشارکت‌های ۶/۹۲، ۳/۵۲ و ۰/۰۳ به ترتیب، برای فاکتورهای وزن مخصوص، تنش تسلیم و تنش برشی الاستیک به‌دست آمده است که نشانگر تأثیر بسیار کم تنش برشی الاستیک بر نتایج در مقایسه با دیگر فاکتورها می‌باشد.

## ۳-۶- تحلیل نتایج با استفاده از آنالیز رگرسیون

آنالیز رگرسیون به‌منظور تعیین رابطه موجود بین پارامترهای مستقل

جدول ۷- نتایج حاصله از آنالیز واریانس

| فاکتور            | درجه آزادی | SS Seq | Adj SS  | Adj MS | F - value | V - Value | درصد مشارکت |
|-------------------|------------|--------|---------|--------|-----------|-----------|-------------|
| ویسکوزیته پلاستیک | ۳          | ۷/۳۶۳  | ۷/۳۶۰   | ۲/۴۵   | ۳۳/۵۹     | ۰         | ۸۹/۳۶       |
| تنش تسلیم         | ۳          | ۰/۲۹   | ۰/۲۹۰۱  | ۰/۰۹۷  | ۰/۱۵      | ۰/۹۳      | ۳/۵۲        |
| وزن مخصوص دوغاب   | ۱          | ۰/۵۷   | ۰/۵۷    | ۰/۵۷   | ۱/۰۴      | ۰/۳۲      | ۶/۹۲        |
| تنش برشی الاستیک  | ۱          | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۰۰۲۳۵ | ۰/۰۰۲۴ | ۰         | ۰/۹۵      | ۰/۰۳        |

## ۷- نتیجه‌گیری

- ویسکوزیته پلاستیک، تنش تسلیم، وزن مخصوص دوغاب و مدول برشی الاستیک بر زمان رسیدن بتن به ۴۰ سانتی‌متری درجه در دستگاه L-box تأثیر گذار می‌باشد.  
 - ویسکوزیته پلاستیک و وزن مخصوص بتن به ترتیب، بیشترین تأثیر را بر زمان رسیدن بتن به ۴۰ سانتی‌متری درجه در دستگاه L-box دارند، در حالی که مدول برشی الاستیک و تنش تسلیم به ترتیب کمترین تأثیر را بر نتایج دارند.  
 - با توجه به ضریب همبستگی ۹۹/۸٪ بین نتایج شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده توسط تاگوچی، می‌توان نتیجه گرفت روش تاگوچی به خوبی توانایی پیش‌بینی نتایج آزمایش را دارد.  
 - با توجه به آنالیز آماری، ویسکوزیته پلاستیک و وزن مخصوص با درصد مشارکت به ترتیب ۸۹/۳۶ و ۶/۹۲ بیشترین تأثیر را بر نتایج داشته و مدول برشی الاستیک با درصد مشارکت ۰/۰۳ کمترین میزان تأثیر بر نتایج را داشته‌اند.  
 - روش رگرسیون درجه دوم مدل پیشنهادی قابل قبولی برای رابطه بین پارامترهای مستقل و نتایج ارائه می‌دهد. به طوری که ضریب همبستگی ۹۹/۵٪ حاکی از تطابق خیلی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده توسط روش رگرسیون می‌باشد.  
 - با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای سیگنال به نوبه به‌دست آمده از روش تاگوچی، مقدار  $T_{40cm}$  زمانی کمترین مقدار خود را دارد که مقدار ویسکوزیته پلاستیک ۱۰ Pa.s، وزن مخصوص  $2500 \text{ Kg/m}^3$ ، مدول برشی الاستیک ۱۰۰ Pa و تنش تسلیم ۱۴ Pa باشد.

## ۸- مراجع

[1] A.C. Institute, Self-consolidating Concrete, in,

- characteristics of SCC, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 699-706.
- [14] J. Spangenberg, N. Roussel, J.H. Hattel, E.V. Sarmiento, G. Zirgulis, M.R. Geiker, Patterns of gravity induced aggregate migration during casting of fluid concretes, *Cement and Concrete Research*, 42(12) (2012) 1571-1578.
- [15] E. Ramyar, G. Cusatis, Discrete Fresh Concrete Model for Simulation of Ordinary, Self-Consolidating, and Printable Concrete Flow, *Journal of Engineering Mechanics*, 148(2) (2022) 04021142.
- [15] Y. Vanhove, C. Djelal, Friction mechanisms of fresh concrete under pressure, *Int J Civil Eng Technol (IJCIET)*, 4(6) (2013) 67-81.
- [16] M.S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall PTR, 1995.
- [17] R.J. Davis, P. Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes, In *Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, (2018).
- [18] G.a.K. Taguchi, S, *Taguchi Methods Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering*, American Supplier Institute, Dearborn, Michigan, 1987.
- ACI Committee 237R-07, 2007, pp. p. 30.
- [2] EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Rep. from EFNARC, 44 (2002) 32.
- [3] T.L.H. Nguyen, N. Roussel, P. Coussot, Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid, *Cement and Concrete Research*, 36(10) (2006) 1789-1796.
- [4] H. Lashkarbolouk, M.R. Chamani, A.M. Halabian, A.R. Pishehvar, Viscosity evaluation of SCC based on flow simulation in the L-box test, *Magazine of Concrete Research*, 65(6) (2013) 365-376.
- [5] M. Hosseinpoor, K.H. Khayat, A. Yahia, Numerical simulation of self-consolidating concrete flow as a heterogeneous material in L-Box set-up: Effect of rheological parameters on flow performance, *Cement and Concrete Composites*, 83 (2017) 290-307.
- [6] L.N. Thrane, *Form filling with self-compacting concrete*, Danish technological institute, 2007.
- [7] N. Roussel, M.R. Geiker, F. Dufour, L.N. Thrane, P. Szabo, Computational modeling of concrete flow: General overview, *Cement and Concrete Research*, 37(9) (2007) 1298-1307.
- [8] J. Yammine, M. Chaouche, M. Guérinet, M. Moranville, N. Roussel, From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions, *Cement and Concrete Research*, 38 (2008) 890-896.
- [9] N. Roussel, A. Gram, M. Cremonesi, L. Ferrara, K. Krenzer, V. Mechtcherine, S. Shyshko, J. Skocek, J. Spangenberg, O. Svec, L.N. Thrane, K. Vasilic, Numerical simulations of concrete flow: A benchmark comparison, *Cement and Concrete Research*, 79 (2016) 265-271.
- [10] L. Shen, L. Struble, D. Lange, Modeling dynamic segregation of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 106(4) (2009) 375.
- [11] J. Spangenberg, N. Roussel, J.H. Hattel, H. Stang, J. Skocek, M.R. Geiker, Flow induced particle migration in fresh concrete: Theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids, *Cement and Concrete Research*, 42(4) (2012) 633-641.
- [12] M.C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, S.M.R. Lopes, R.M.C. Franco, Maximum coarse aggregate's volume fraction in self-compacting concrete for different flow restrictions, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 851-856.
- [13] Y. Ammar, K.H. Kamal, S. Mohammed, Statistical modelling of the coupled effect of mix design and rebar spacing on restricted flow

## Analytical study of the effect of rheological parameters on the workability of self-consolidating concrete

Yashar Asghari

Department of Civil Engineering, Sahand University Of Technology, Tabriz, Iran.

Esmail Mohammadyan-Yasouj \*

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Nazila Kardan

Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

### Abstract

The most significant difference between self-consolidating concrete and ordinary concrete is workability, which allows self-consolidating concrete to fill the mold without vibrating operations. One of the main tests in determining the workability of self-compacting concrete is the L-box test, which can be used to check the permeability and filling properties of concrete. In this study, using Flow3D software, self-compacting concrete is investigated by evaluating the results of L-box test and the time when the concrete reaches a distance of 40 cm from the gate is recorded. For this purpose, the concrete used has plastic viscosity range of 10-38 (Pa.s), yield stress range of 14-75 (Pa), specific gravity of 2000 and 2500 ( $\text{kg/m}^3$ ) and elastic shear modulus of 100 and 1000 (Pa). In order to model the aggregates, spherical components with a diameter of 20 mm and a specific weight of 2500  $\text{kg/m}^3$  have been used. To save time and evaluate the effective parameters in the amount of time required for the concrete to reach a distance of 40 cm from the gate ( $T_{40\text{cm}}$ ), the test design was performed by Taguchi method and 16 experimental designs proposed by this method in Minitab software. Been investigated. After analyzing the results by signal-to-noise method, it was observed that the plastic viscosity and yield stress of self-compacting concrete have the maximum and minimum effect on  $T_{40\text{cm}}$ , respectively, which are consistent with the results of analysis of variance.

**Keywords:** Self-consolidating concrete, L-box test, Flow3D Software, Taguchi method, Analysis of Variance.

---

\* Corresponding Author: sm7093370@yahoo.com

