



پیش بینی روند هیدراتاسیون، تخلخل و مقاومت ملات ماسه-سیمان با استفاده از نرم افزار (VCCTL)

پیمان ایمانی جاجرمی^۱، محمدرضا توکلی زاده^۲، عباس یوسفی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- مدیر عامل، موسسه تحقیقاتی پرتاووس

drt@um.ac.ir

خلاصه

سیمان یکی از مصالح پرکاربرد در صنعت ساخت و ساز است و به حق از آن به عنوان ماده ساختمانی قرن یاد می‌شود. سیمان ماده‌ای چسبنده است که قابلیت چسباندن ذرات به یکدیگر و به وجود آوردن جسم یکپارچه و سخت را دارا می‌باشد و از ترکیب مصالح آهکی، رس، و اکسیدهای معدنی در دمای ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ساخته می‌شود. از آنجایی که ساخت، تولید و آزمایش طرح‌های مختلف سیمان و مواد پایه سیمانی مانند ملات ماسه-سیمان و بتن مستلزم صرف هزینه‌های زیاد اقتصادی، زمانی و محیط زیستی است لذا هدف این پژوهش پیش‌بینی مشخصات مواد پایه سیمانی سخت شده مانند نرخ هیدراتاسیون، تخلخل، مدول الاستیسیته و مقاومت سه نوع طرح اختلاط مختلف از ملات ماسه-سیمان با استفاده از نرم افزار VCCTL می‌باشد. همچنین به منظور بررسی دقت این نرم‌افزار نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از این کار پژوهشی و از طرفی با سایر روابط موجود مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: VCCTL، پیش‌بینی ویژگی‌های بتن، نحوه هیدراتاسیون، محاسبه تخلخل

۱. مقدمه:

به منظور پیش‌بینی خصوصیات سیمان هیدراته و سایر مواد پایه سیمانی، موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۰۱، نرم‌افزاری را ارائه کرد که می‌توانست با استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های کامپیوتری نحوه هیدراتاسیون، مشخصات مکانیکی و ریزساختار این مواد را در اختیار پژوهشگران علوم مهندسی عمران، مکانیک و متالوژی قرار دهد [۱]. این روش مدل‌سازی موجب انتخاب طرح اختلاطی بهینه، حذف بسیاری از هزینه‌ها و آزمایش‌های زمانبر و همچنین مواد و مصالح مختلف می‌شود. ریزساختار، زمان عمل‌آوری، مدول الاستیسیته، مقاومت و پایداری از جمله ویژگی‌هایی است که VCCTL قادر به پیش‌بینی آنها می‌باشد. جدول ۱، به مقایسه موارد لازم برای انجام پژوهش آزمایشگاهی و مجازی (Virtual) پرداخته است.

جدول ۱- مقایسه دو روش آزمایشگاهی و مجازی

پژوهش آزمایشگاهی	پژوهش مجازی
بر پایه فعالیت‌های فیزیکی	بر پایه فعالیت‌های کامپیوتری
صرف مواد و مصالح	عدم نیاز به مواد و مصالح
صرف زمان زیاد (هفته‌ها/ماه‌ها)	صرف زمان کم (ساعت‌ها/روزها)
صرف هزینه نگهداری	بدون صرف هزینه نگهداری

واتس و همکاران [۲] به بررسی گرمای هیدراتاسیون و مقاومت فشاری ملات‌های ساخته شده از سیمان‌های مختلف پرداختند. نتایج میزان خطای مدل‌سازی کامپیوتری را برای گرمای هیدراتاسیون و مقاومت فشاری به ترتیب ۶/۵ و ۵/۰ درصد نشان داد. بولارد و همکاران [۳] به بررسی اثر افزودن سنگ آهک به بتن با استفاده از VCCTL پرداختند. نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته حاصل از روش مجازی حاکی از افزایش این دسته از ویژگی‌های بتن در طی جایگزینی ۱۲/۵ درصد سنگ آهن به جای سنگدانه‌های مصرفی بود. شایان ذکر است، نتایج آزمایشگاهی که پیشتر در این مورد انجام شده بود این نتایج را تأیید می‌نمود. پیش‌بینی مدول الاستیسیته بتن در سن‌های مختلف به وسیله VCCTL توسط اردوغان و همکاران [۴] انجام شد. آنها به این

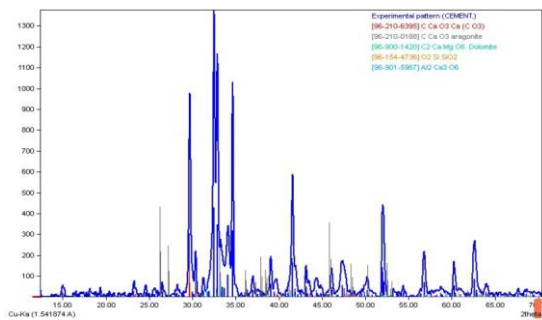
نتیجه رسیدند که دقت نتایج با افزایش سن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در مدل VCCTL رفتار مواد به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود و در سن‌های اولیه که رفتار مواد ویسکوالاستیک است این روش دارای درصد خطای بیشتری نسبت به سن‌های بالا دارد. همچنین در مورد قابلیت VCCTL و اعتبارسنجی نتایج آن در مورد گیرش خمیر سیمان پژوهش‌های زیادی انجام شده است که تمامی آنها دقت بالای این روش را در پیش‌بینی زمان گیرش نشان می‌دهند [۷-۵]. گروه سیمان سیام [۸] اثر مقدار سولفات موجود در پودر سیمان و همچنین نرمی سیمان را بر روی مقاومت ملات ماسه-سیمان را با استفاده از VCCTL بررسی نمود. نتایج نشان داد که می‌توان از VCCTL به عنوان ابزاری دقیق و قابل اطمینان به منظور تعیین و بهینه‌سازی ترکیبات و فازهای پودر سیمان استفاده کرد. تحقیقات والتینی و همکاران [۹] حاکی از دقت بالای روش مجازی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری دو نوع سیمان استفاده شده بود.

هدف از انجام مطالعه‌ی پیش‌رو، بررسی دقت نرم‌افزار VCCTL در پیش‌بینی نرخ هیدراتاسیون، تخلخل، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری سه نوع ملات با طرح اختلاط متفاوت می‌باشد. از اینرو نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین به منظور بررسی‌های بیشتر نتایج به‌دست آمده از روش شبیه‌سازی با روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف مقایسه می‌شود.

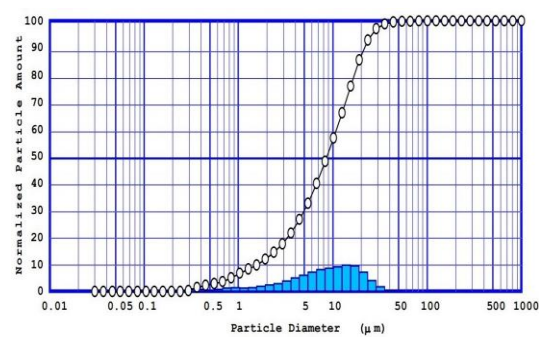
۲. مواد و مطالعات آزمایشگاهی:

۱.۲. مواد:

برای ساخت ملات ماسه-سیمان از سیمان تیپ یک با توجه به استاندارد [۱۰] ASTM C150 استفاده شد. شکل ۱ ویژگی‌های سیمان مصرفی از نظر ساختار کریستالی (XRD) و توزیع اندازه ذرات (PSD) این پژوهش را نشان می‌دهد.



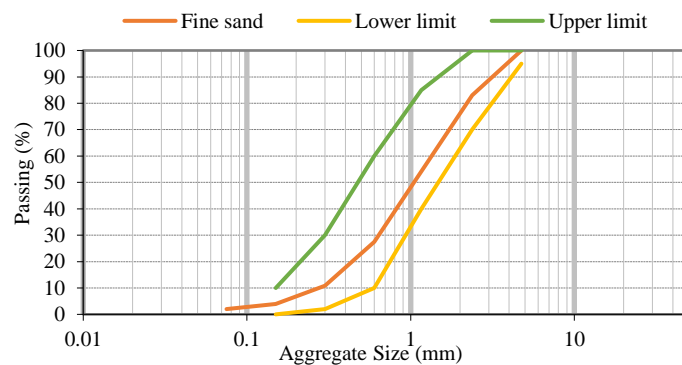
(الف)



(ب)

شکل ۱- ویژگی‌های سیمان پرتلند مصرفی، (الف) XRD و (ب) PSD

از سویی دیگر نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی به صورت شکل ۲ می‌باشد که در محدوده ASTM C144 [۱۱] می‌باشد. مدول نرمی ماسه و اندازه بزرگترین سنگدانه مصرفی به ترتیب ۳/۸۱ و ۴/۷۷ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مطابق ASTM C128 [۱۲] وزن مخصوص و میزان جذب آب ماسه به ترتیب ۲/۵۷ و ۱/۶۷ درصد وزنی به‌دست آمد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی



۲.۲. طرح اختلاط:

برای تهیه ملات‌های ماسه-سیمان از سه طرح مختلف استفاده شده است. در جدول ۲، طرح‌های اختلاط به کار رفته مشاهده می‌شود.

جدول ۲- طرح اختلاط و میزان مواد مصرفی برای هر طرح

Mortar Mix	W/C	S/C	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)
A	0.45	2.75	592.00	1628.00	292.90
B	0.55	2.75	559.00	1537.25	332.45
C	0.45	2.00	702.00	1404.00	338.70

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، طرح A و B دارای نسبت ماسه به سیمان (S/C) یکسان می‌باشند، در حالی که نسبت آب به سیمان (W/C) ملات‌های A و C با هم برابر است. به منظور تهیه ملات تازه، در ابتدا سیمان به همراه ماسه براساس نسبت وزنی با هم مخلوط شده تا ذرات سیمان به خوبی در ماسه پخش شده و رنگ خاکستری روشنی به دست آید. در ادامه، آب به تدریج به مخلوط اضافه شده و اختلاط به مدت ۵ دقیقه ادامه پیدا کرد تا خیمیر مناسبی حاصل شود. به منظور عمل‌آوری، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب در آورده شده و سپس در حوضچه آب آهک در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

۳.۲. آزمایش‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی:

به منظور ارزیابی حد روانی ملات‌های تازه از میز جریان استفاده شده است [۱۳]. برای اندازه‌گیری جذب آب موئینه و جذب آب به ترتیب از نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری [۱۴] و مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری [۱۵] استفاده شد. از نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری برای محاسبه مقاومت فشاری استفاده شد [۱۶].

۴.۲. وارد کردن اطلاعات در نرم افزار VCCTL:

مهمترین بخش استفاده از VCCTL وارد کردن دقیق و واقعی مواد مصرفی است. مهمترین مشخصه‌های مواد خام مصرفی که برای رسیدن به یک نتیجه واقعی نیاز به تعریف دقیق آنها است شامل: درصد فازهای تشکیل دهنده سیمان، PSD، دانه‌بندی سنگدانه‌ها و چگالی سنگدانه‌ها می‌باشد که پیش از این به معرفی مقادیر و ویژگی‌های هر یک از آنها پرداخته شد.

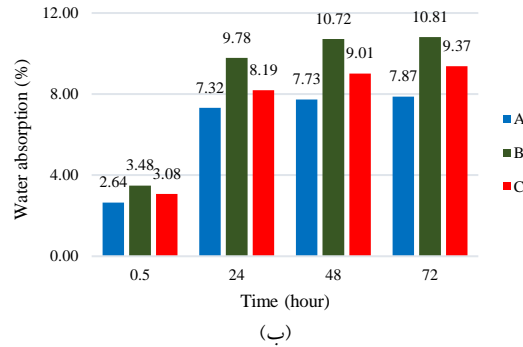
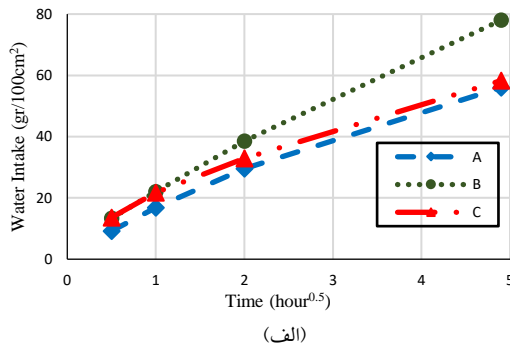
۳. نتایج:

۱.۳. میزان جریان:

نتایج حد روانی سه طرح اختلاط در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که میزان روانی ملات با افزایش نسبت W/C افزایش می‌یابد و این افزایش به صورت خطی می‌باشد.

۲.۳. میزان جذب آب موئینه و جذب آب:

در شکل ۳ مقادیر میانگین مقادیر جذب آب موئینه و جذب آب کل آورده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش نسبت W/C نفوذپذیری ملات افزایش می‌یابد. یادآور می‌شود، با افزایش میزان W/C، میزان تخلخل و همچنین عرض ترک‌های موئینه افزایش می‌یابد و بنابراین میزان جذب آب موئینه و درصد جذب آب کل افزایش خواهد یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان جذب آب نمونه B بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۳- تغییرات جذب آب نمونه‌های ملات ماسه-سیمان (الف) جذب آب مؤثر، (ب) جذب آب کل

۳.۲. مقاومت فشاری و ضریب کشسانی:

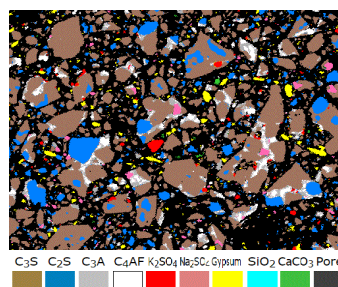
مقادیر میانگین مقاومت فشاری و ضریب کشسانی نمونه‌ها در سن‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۳ آورده شده است. نتایج جدول براساس میانگین پنج نمونه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، ملات A دارای بیشترین مقاومت فشاری در تمام سنین است. خاطر نشان می‌کند، برای ملاتی با نسبت S/C مشخص، با افزایش نسبت W/C مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و این موضوع به سبب افزایش فضای خالی بین مواد هیدراتاسیون سیمان و همچنین آب موجود در منافذ است. همچنین به دلیل کاهش ذرات هیدراته نشده و عرض و میزان منافذ، با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است.

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری، ضریب کشسانی و میز جریان برای ملات‌های ماسه-سیمان مختلف

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)			مدول یانگ (GPa)	میز جریان (%)
	3	7	28		
A	23.98	32.26	39.23	29.62	69.29
B	20.81	23.07	33.75	27.47	108.66
C	21.47	26.40	38.35	29.29	121.46

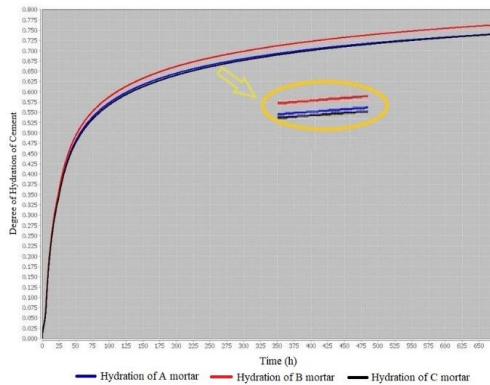
۴.۲. نتایج VCCTL:

پس از وارد کردن مشخصات سیمان مورد استفاده در نرم افزار، مدل شبیه‌سازی کلینکر سیمان به صورت شکل ۴ به دست آمد.

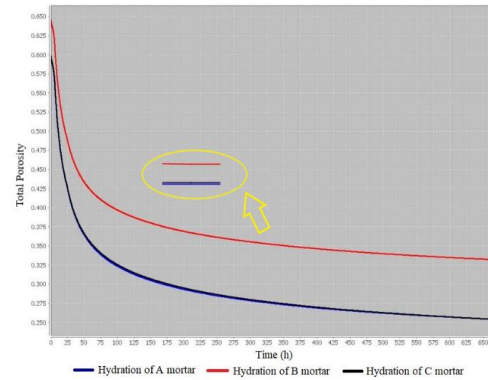


شکل ۴- مدل شبیه‌سازی شده کلینکر سیمان در نرم افزار VCCTL

در شکل ۵ خروجی‌های نرم‌افزار از قبیل نرخ هیدراتاسیون و تغییرات تخلخل در طی زمان را برای سه نوع ملات مورد بررسی با هم مقایسه شده است. واضح است، با افزایش زمان، درجه هیدراتاسیون سیمان افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نرخ هیدراتاسیون نمونه B بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد که این موضوع مربوط به بیشتر بودن میزان آب طرح اختلاط می‌باشد (شکل ۵ الف). همانطور که از شکل ۵ ب یافت می‌شود، میزان تخلخل نمونه A از دو نمونه دیگر کمتر شده است در حالی که تخلخل کلی نمونه B بیشترین مقدار را دارد.



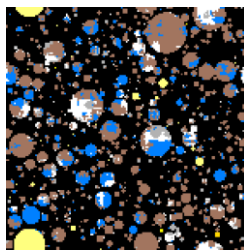
(الف)



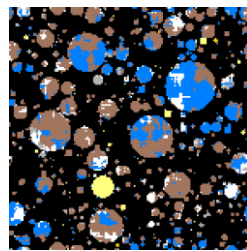
(ب)

شکل ۵- مقایسه روند تغییر ساختار ملات ماسه-سیمان با زمان الف) نرخ هیدراتاسیون ب) تخلخل

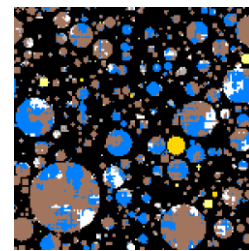
تصاویر دو بعدی و سه بعدی از ریزساختار بتن به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. این شکل‌ها به خوبی نشان می‌دهد که تخلخل نمونه B بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. راهنمای این تصاویر در شکل ۶ آمده است.



(الف)

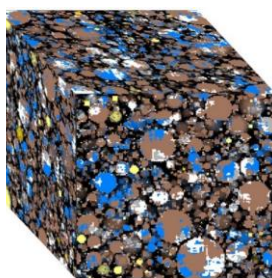


(ب)

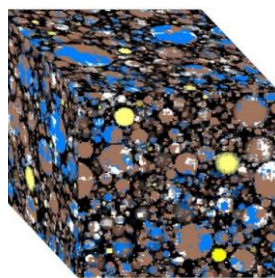


(پ)

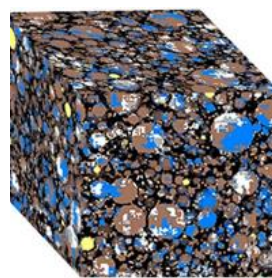
شکل ۶- تصاویر دو بعدی از ریزساختار ملات‌های ماسه-سیمان الف) A، ب) B، پ) C



(الف)



(ب)



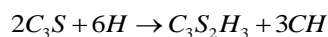
(پ)

CH	Other Solid	MS	Brucite
Ettringite	AFm	Stratlingite	CaCl ₂
'bozz C-S-H	C-S-H	ASG	Empty Porosity
riedel Salt	FH ₃	Slag C-S-H	

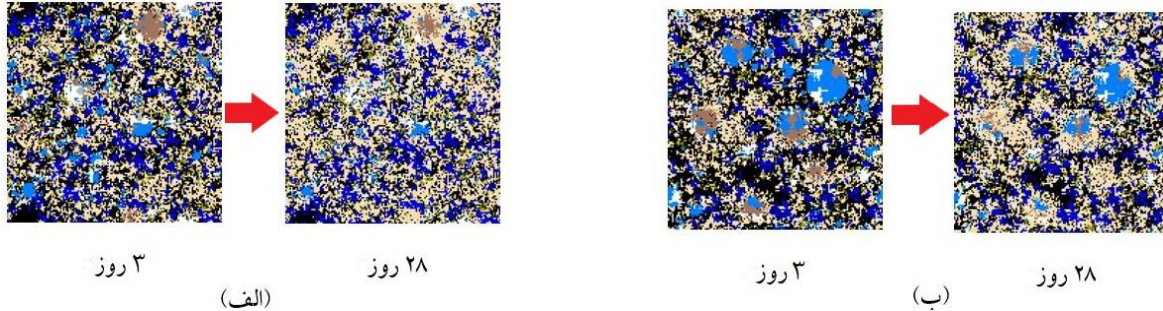
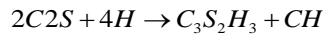
(ت)

شکل ۷- تصاویر سه بعدی از ریزساختار ملات‌های ماسه-سیمان الف) A ب) B پ) C و ت) راهنمای شکل

تصاویر مربوط به تغییرات ریزساختار بتن در طی فرآیند هیدراتاسیون در سن‌های ۳ و ۲۸ روز برای ملات‌های A و B در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان هیدراتاسیون فازهای بیشتری از سیمان هیدراته شده و از طرفی از میزان حفره‌ها موجود کاسته می‌شود. یادآور می‌شود، هیدراتاسیون C₃S و C₂S در سیمان پرتلند تولید یک خانواده از هیدرات‌های سیلیکات کلسیم آبدار می‌کنند که از نظر ساختاری مشابه ولی از نظر نسبت اکسید کلسیم به اکسید سیلیسیم و نیز از نظر مقدار آب ترکیب شده شیمیایی متفاوتند. محصول اصلی هیدراتاسیون این دو فاز C-S-H می‌باشد. رابطه ۱ و ۲ واکنش هیدراتاسیون مربوط به C₃S و C₂S را نشان می‌دهد.



(۱)



شکل ۸- نمای دو بعدی از نحوه هیدراتاسیون ملات‌های ماسه سیمان در سن‌های ۳ و ۲۸ روز (الف) A (ب) B

همانطور که مشاهده می‌شود، محصول دیگر واکنش این دو فاز با آب، هیدروکسید کلسیم یا آهک آزاد (CH) می‌باشد. در شکل ۸ این دو محصول واکنش سیمان با آب کاملاً مشهود است و با پیشرفت واکنش به میزان این کریستال‌ها افزوده می‌شود. از دیگر اجزای تشکیل دهنده سیمان هیدراته می‌توان به فازهای Aft و Afm ، کریستال‌های هیدروگارت و هیدروآلسیک، آب و فضاهای خالی بین کریستال‌های اشاره کرد. همانطور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، میزان منافذ (مناطق سیاه رنگ) نمونه B بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. در هر صورت با افزایش زمان میزان حفرات برای تمامی نمونه‌ها کم شده است. وجود کریستال‌های $C-S-H$ و CH به عنوان محصولات اصلی هیدراتاسیون به وضوح دیده می‌شود. جدول ۴ مقادیر مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تخلخل سه نوع ملات مورد بررسی که به وسیله VCCTL به دست آمده است را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج حاصل از نرم افزار VCCTL

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)			مدول یانگ GPa	تخلخل (%)	ضریب پواسون ν
	3	7	28			
A	27.15	35.74	41.26	37.88	0.25	0.27
B	18.80	25.26	29.69	31.51	0.33	0.28
C	26.69	34.26	39.14	34.36	0.25	0.27

در ادامه و در جدول ۵ میزان درصد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و روش مجازی آورده شده است.

جدول ۵- میزان خطای روش مجازی با نتایج آزمایشگاهی

نمونه	مقاومت فشاری (%)			مدول یانگ (%)
	3	7	28	
A	13.21	10.78	5.17	27.88
B	-9.65	-9.49	-12.03	14.70
C	24.31	29.77	2.06	17.31

با توجه به مقادیر خطای ارائه شده در جدول ۵، مشاهده می‌شود نرم افزار VCCTL توانسته است با تقریب خوبی ویژگی‌های نمونه‌ها را پیش بینی نماید بدون آنکه نیازی به صرف هزینه‌ی و زمان زیادی باشد.

۵.۳. رابطه مقاومت فشاری و تخلخل:

به طور کلی، رابطه بین مقاومت فشاری و تخلخل به صورت تابعی از مقاومت فشاری ماده بدون تخلخل و میزان تخلخل در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma = \sigma_0 \times f(V) \quad (3)$$

در این رابطه مقاومت فشاری ماده متراکم (بدون تخلخل) با σ_0 و میزان تخلخل با V نشان داده شده است. ریشکویتز [۱۷]، رابطه بین مقاومت فشاری آلومینیوم و میزان تخلخل را براساس نتایج آزمایشگاهی به صورت رابطه ۴ بیان کرد.

$$\sigma = \sigma_0 \times \exp(-\beta\rho) \quad (4)$$

که در آن، ρ و β به ترتیب تخلخل و ثابت آزمایشگاهی می‌باشد. بر اساس رابطه بنیادی ۳، بو و تیان [۱۸] رابطه ۵ را برای نمونه‌های بتنی معرفی نمود.

$$\sigma = \sigma_0 \times \exp(-0.032\rho - 0.244d_0 - 4.073Slope(L) - 0.317r_2') \quad (5)$$

در این رابطه $Slope(L)$ شیب نمودار آزمایش تخلخل سنجی جیوه (MIP) بوده و d_0 و r_2' معرف ویژگی‌های حفرات بتن می‌باشند. چن و همکاران [۱۹] با استفاده از تئوری شکست رابطه بین تخلخل و مقاومت فشاری بتن را به صورت رابطه ۶ ارائه نمود که با نتایج آزمایشگاهی همبستگی مناسبی داشت.

$$\sigma = \sigma_0 \left[\left(\frac{\rho_c - \rho}{\rho_c} \right)^{1.85} (1 - \rho^{2/3}) \right]^{0.5} \quad (۶)$$

ρ_c در رابطه بالا معرف ویژگی‌های منافذ می‌باشد. ژانگ و همکاران [۲۰] برای بررسی رابطه مقاومت فشاری-تخلخل بتن‌های سبک سلولی با توجه به درصد افزودنی‌ها روابطی را ارائه کردند (رابطه ۷).

$$\sigma = \sigma_0 \left[\frac{r \times (1 - \frac{\rho}{u})}{r + \frac{\rho}{u}} \right] \quad (۷)$$

جدول ۶ به مقایسه میزان تخلخل محاسبه شده از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین و نتایج به دست آمده از نرم افزار VCCTL پرداخته است.

جدول ۶- تخلخل نمونه‌های A، B و C محاسبه شده با رابطه‌های پیشنهادی مقاومت فشاری-تخلخل و مقایسه آنها با نتایج VCCTL

مقدار تخلخل	ملاط	رابطه	مرجع
0.269	A	$\sigma = 69.4 \left[\left(1 - \frac{\rho}{0.562} \right)^{0.925} (1 - \rho^{2/3}) \right]^{0.5}$	Chen et al. [19]
0.328	B		
0.278	C		
0.177	A	$\sigma = 26.3 \times \ln(0.78/\rho)$	Schiller [21]
0.216	B		
0.182	C		
0.181	A	$\sigma = 70.8 \times (1 - \rho)^{2.91}$	Balshin [22]
0.224	B		
0.189	C		
0.189	A	$\sigma = 62.6 - 123.1\rho$	Hasselman [23]
0.234	B		
0.197	C		
0.253	A	VCCTL	Present
0.331	B		
0.254	C		

با توجه به نتایج جدول می‌توان ادعا نمود که VCCTL به خوبی توانسته است میزان تخلخل ملاط‌ها را پیش‌بینی کند. نتیجه این روش با نتیجه حاصل شده از رابطه ۶ بسیار نزدیک است و دارای دقت بسیار بالاتری از روابط ساده پیشنهادی توسط مراجع ۲۲ تا ۲۴ است.

۴. نتیجه‌گیری:

به منظور پیش‌بینی ویژگی‌های ملاط‌های ماسه-سیمان سخت شده از نرم‌افزار VCCTL استفاده شد. استفاده از این نرم‌افزار و مدل سازی مجازی فرآیند هیدراتاسیون سیمان به دلیل صرف هزینه‌های بسیار کمتر نسبت به روش‌های آزمایشگاهی روز به روز در حال افزایش است. نتایج این پژوهش حاکی از دقت بالای این روش برای پیش‌بینی ویژگی‌های مهم مواد پایه سیمانی مانند درجه هیدراتاسیون، ضریب کشسانی، مقاومت فشاری و تخلخل می‌باشد. به منظور بررسی میزان خطای مدل‌سازی مجازی، مقاومت و ضریب کشسانی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند که به طور میانگین میزان خطای مقاومت برابر با ۱۲/۹۴ و ضریب کشسانی برابر ۱۹/۹۶ درصد می‌باشد. از سویی دیگر و به منظور ارزیابی میزان تخلخل به دست آمده از این روش، نتایج با روابط ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر بررسی شد. بررسی‌ها حاکی از دقت بالای این روش در محاسبه تخلخل نمونه‌های مورد بررسی بود. از سویی دیگر ارائه تصاویر دو و سه بعدی و همچنین امکان تصویرسازی از تغییرات ریزساختار سیمان با گذشت زمان از ویژگی‌هایی است که کمک شایانی به داشتن درک کلی از روند فرآیند هیدراتاسیون برای مهندسان و پژوهشگران خواهد نمود.

مراجع:

1. Bullard, J.W. (2014), "Virtual cement and concrete testing laboratory: Version 9.5 user guide".
2. Watts, B., Tao, C., Ferraro, C. and Masters, F. (2018), "Proficiency analysis of VCCTL results for heat of hydration and mortar cube strength," Construction and Building Materials, 161, pp 606-617.



3. Bullard, J.W., Stutzman, P.E., Belloc, L.O., Garboczi, E.J. and Bentz, D.P. (2009), "Virtual cement and concrete testing laboratory for quality testing and sustainability of concrete," Special Publication, 266, pp 27-36.
4. Erdoğan, S.T, Garboczi, E.J. and Bullard, J.W. (2007), "Prediction of elastic properties of concrete using the virtual cement and concrete testing laboratory," 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turkey.
5. Haecker, C, Bentz, D, Feng, X. and Stutzman, P. (2003), "Prediction of cement physical properties by virtual testing," Cement International, 1(3), pp 86-92.
6. Bullard, J.W. and Garboczi, E.J. (2006) "A model investigation of the influence of particle shape on portland cement hydration," Cement and Concrete Research, 36(6), pp 1007-1015.
7. Watts, B.E. and Ferraro, C. (2017), "Prediction of setting for admixture modified mortars using the VCCTL," Cement and Concrete Composites, 78, pp 63-72.
8. Sahachaiyunta, P., Pongpaisanseree, K., Bullard, J.W., Stutzman, P.E., Garboczi, E.J. and Vichit-Vadakan, W (2012), "Virtual testing in a cement plant," Concrete international, 34(9), pp 33-39.
9. Valentini, L., Parisatto, M., Russo, V., Ferrari, G., Bullard, J.W. and Angel, R.J. (2014), "Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling," Cement and Concrete Composites, 52, pp 54-63.
10. ASTM C150. (2020), "Standard specification for Portland cement", American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
11. ASTM C144. (2018). "Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
12. ASTM C128. (2015). "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate" American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
13. ASTM C230. (2020). "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
14. ASTM C642. (2013), "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
15. ASTM C1403. (2015) "Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars", American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
16. ASTM C109. (2020), "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, International West Conshohocken, PA.
18. Ryshkewitch, E. (1953), "Compression strength of porous sintered alumina and zirconia: 9th communication to ceramography," Journal of the American Ceramic Society, 36(2), pp 65-68.
19. Bu, J. and Tian, Z. (2016), "Relationship between pore structure and compressive strength of concrete: Experiments and statistical modeling," Sādhanā, 41(3), pp 337-344.
20. Chen, X., Wu, S. and Zhou, J. (2013), "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar," Construction and Building Materials, 40, pp 869-874.
21. Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Deng, G. and Wei, P. (2020), "Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores" Construction and Building Materials, 235, pp 117-136.
22. Schiller K. Strength of porous materials. Cement and Concrete Research. 1971;1(4):419-22.
23. Balshin, M.Y. (1949), "Relation of mechanical properties of powder metals and their porosity and the ultimate properties of porous metal-ceramic materials," Dokl Akad Nauk SSSR 67/5/(1949).
24. Hasselman, D. (1969), "Griffith flaws and the effect of porosity on tensile strength of brittle ceramics," Journal of the American Ceramic Society, 52(8), pp 457-45.