

بررسی رشد مقاومت در بتن های سازه ای از سن ۷ به ۲۸ روزه و عوامل موثر بر آن – مطالعه موردی ۱

محسن تدین^۱، نوید نیکزاد^{۲*}، امیر رضا تدین^۳، بهرام ابراهیمی ترکمانی^۴، محمد نوری^۵، حمید جهانگیری^۶

۱- رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران و مهندسین مشاور سیناب غرب

۲- کارشناسی ارشد عمران- ژئوتکنیک، مدیر فنی آزمایشگاه کارگاهی، مهندسین مشاور سیناب غرب

۳- کارشناسی عمران، کارشناس آزمایشگاه کارگاهی، مهندسین مشاور سیناب غرب

۴- کارشناسی عمران، مدیر پروژه تونل مکانیزه، شرکت سایبر بین الملل

۵- کارشناسی عمران، معاونت فنی، شرکت سایبر بین الملل

۶- کارشناسی نقشه برداری، مدیر کنترل کیفیت، شرکت سایبر بین الملل

*navidnikzad69@yahoo.com

چکیده

بتن پرکاربردترین مصالح ساختمانی در ساخت و سازهای عمرانی به حساب می رود. رایج ترین پارامتری که در خصوص کنترل کیفیت بتن ساخته شده در اغلب یا همه پروژه ها اندازه گیری می شود، مقاومت فشاری نمونه های اخذ شده از بتن تازه در تواترهای مشخص برای هر پروژه می باشد. در این خصوص در سازه های مختلف رده های مقاومتی مختلف تعریف می شود که معمولاً اصلی ترین پارامتر در تایید آن سازه توسط دستگاه نظارت می باشد. در پروژه ها اغلب یک یا دو آزمون در سن ۳ یا ۷ روز مورد آزمون قرار می گیرد و دو یا سه آزمون در سن مقاومت مشخصه (۲۸، ۴۲ و...). همواره این سوال مطرح می باشد که مقاومت فشاری کسب شده توسط بتن در سنین زود هنگام چند درصد مقاومت کسب شده در سنین مقاومت مشخصه است. در این خصوص مراجعی مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ضرایبی را ارائه داده اند که رابطه بین مقاومت فشاری سنین مختلف را تنها براساس نوع سیمان نشان می دهد همچنین در برخی مقالات و مراجع روابط پیش رفته تر با در نظر گیری سایر عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است در ابتدا مروری بر روابط و ضوابط ارائه شده توسط سایر مراجع و مقالات انجام شود. سپس با استفاده از تعداد زیادی داده اخذ شده در شرایط مختلف دمایی و رده های مختلف مقاومتی که توسط تیم آزمایشگاهی مستقر در یک پروژه در کشور ایران و با استفاده از سیمان نوع ۲ اخذ شده و مورد آزمایش قرار گرفته اند، نشان داده شود که رشد مقاومت از سنین زود هنگام به سنین مقاومت مشخصه به عوامل گوناگونی بستگی داشته و نمی توان آن را یک ضریب ثابت برای کلیه بتن های ساخته شده حتی با یک نوع سیمان (مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران) در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری بتن، رشد مقاومتی، روابط رشد مقاومت بتن در مراجع مختلف، رده بتن

۱. مقدمه

در یک پروژه ساخت تونل و ایستگاه های مترو رده های مختلف مقاومتی بتن های سازه ای بصورت (C25, C30 و C40) مورد استفاده واقع شده است. به جهت کنترل کیفیت بتن های ساخته شده در محل های مختلف براساس تواترهای ابلاغ شده به آزمایشگاه، نمونه گیری ها از بتن تازه انجام شده و اسلامپ و دمای بتن و هوا ثبت شده است. آزمون ها در ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نتایج ثبت شده اند. آزمون های سن ۷ روز به جهت کنترل بتن در سنین پایین تر و اصلاح مشکلات و موانع احتمالی در بتن ها بوده و آزمون های ۲۸ روزه به جهت انطباق با مقاومت مشخصه مورد نظر در هر رده می باشد. در پروژه های بتنی همواره این سوال مطرح است که مقاومت سن های پایین تر بتن چند درصد مقاومت سن مشخصه می باشد و در این خصوص غالباً ایراداتی به آزمایشگاه ها گرفته می شود که چرا نتایج ارائه شده و رشد نمونه ها از سنین کنترلی به سن مقاومت مشخصه مطابق با ضوابط ارائه شده در مراجع معتبر نظیر مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان نمی باشد؟

در این تحقیق به دلیل آنکه داده های بدست آمده در کشور ایران و با استفاده از سیمان مطابق با مشخصات سیمان پرتلند نوع ۲ ارائه شده در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان بوده، به بررسی میزان دقت ضریب های ارائه شده در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان پرداخته شده است که آیا همواره می توان از یک ضریب ثابت برای تبدیل مقاومت سنین مختلف به هم استفاده نمود یا خیر؟ لذا درصد رشد مقاومت بتن اخذ شده از سن ۷ به ۲۸ روزه در رده های مختلف و تحت شرایط مختلف (دمای بتن، دمای هوا، مشخصات سیمان مصرفی و نیز نوع روان کننده) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است و ضریب همبستگی و خطای نتایج حاصل شده نسبت به نتایج واقعی بدست آمده اند. همچنین سعی شده است تا با استفاده از اطلاعات ثبت شده عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن ها مورد بررسی قرار گیرد.

۲. پیشینه تحقیق

۲.۱. مروری بر روابط ارائه شده در خصوص ارتباط بین مقاومت بتن در سنین مختلف

در خصوص ارتباط بین مقاومت فشاری در سنین مختلف، مراجعی مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [۱] ضریبی را ارائه داده اند که رابطه بین مقاومت فشاری سنین مختلف را تنها براساس نوع سیمان پرتلند نشان می دهد:

جدول ۱- تاثیر نوع سیمان پرتلند و سن بتن بر روی مقاومت فشاری نسبی بتن

(از مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران)

نوع سیمان	مقاومت فشاری (بصورت نسبی)			
	۱ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
سیمان نوع I	0.3	0.66	1	1.2
سیمان نوع II	0.23	0.56	0.9	1.2
سیمان نوع III	0.57	0.79	1.1	1.2
سیمان نوع IV	0.17	0.43	0.75	1.2
سیمان نوع V	0.2	0.5	0.85	1.2

کمیته ACI 209 [۲] معادله (۱) را برای پیش بینی مقاومت فشاری استوانه استاندارد (قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر) بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی مطابق مشخصات ASTM C150 TYPE 1 [۳] که در شرایط مرطوب نگه داشته شده و در شرایط استاندارد (ASTM C 39 و ASTM C 192) [۴ و ۵] مورد آزمایش قرار گرفته اند، توصیه می کند. که در آن f_{ct} مقاومت فشاری در سن t روزه و f_{c28} مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه است:

$$f_{ct} = f_{c28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (۱)$$

CEB-FIP MODEL CODE [۶] معادله (۲) را برای پیش بینی مقاومت سنین مختلف با استفاده از مقاومت سن ۲۸ روزه و شرایط نگهداری دمای ۲۰ درجه سانتی گراد پیشنهاد می دهد: که در آن t_1 برابر ۱ روز است.

$$f_{ct} = f_{c28} \exp \left[0.25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right] \quad (۲)$$

با استفاده از معادلات بالا و با قراردادن روزه های مختلف در آن، می توان نسبت های پیشنهادی کمیته ACI 209 و CEB-FIP MODEL CODE را بصورت جدول زیر ارائه نمود:

جدول ۲- مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد کمیته ACI 209 و

CEB-FIP MODEL CODE

سن مورد نظر (روز)	مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد کمیته ACI 209	مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد CEB-FIP MODEL CODE
1	0.21	0.34
3	0.46	0.60
7	0.70	0.78
28	1.0	1.00
90	1.12	1.12

از جمله پیش بینی های اولیه در خصوص مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت سنین کمتر می توان به Slater 1926 [۷] با معادله $f_{c28} = f_{c7} + 2.49\sqrt{f_{c7}}$ (مقاومت ها در واحد MPa هستند) و Neville 1996 [۸] با معادله $f_{c28} = 1.3t_0 1.7 f_{c7}$ اشاره نمود.

با استفاده از معادلات ارائه شده توسط Slater 1926 و Neville 1996 و با قراردادن مقاومت های مختلف در آن ها، می توان مقاومت های ۲۸ روزه ای که براساس مقاومت سن ۷ روزه پیش بینی می شوند را بدست آورد که با جایگذاری چند عدد بصورت نمونه این دو رابطه در جدول های شماره ۳ و ۴ ارائه شده اند. همانطور که در جدول شماره ۳ مشاهده می شود براساس رابطه Slater 1926 با افزایش مقاومت در سن ۷ روزه درصد رشد مقاومت ۲۸ روزه به نسبت به مقاومت سن ۲۸ روز کاهش می یابد در رابطه Neville 1996 برای درصد رشد مقاومت و نیز نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه محدوده ای بیان شده است که نشان دهنده تاثیر عوامل مختلف بر آنها می باشد.

جدول ۳- پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت ۷ روزه آن با استفاده از رابطه Slater 1926

مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد Slater 1926 (مگاپاسکال)	نسبت مقاومت فشاری سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه براساس Slater 1926	درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه براساس Slater 1926
15	25	0.61	39
20	31	0.64	36
25	37	0.67	33
30	44	0.69	31
35	50	0.70	30
40	56	0.72	28
45	62	0.73	27

جدول ۴- پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت ۷ روزه آن با استفاده از رابطه Neville 1996

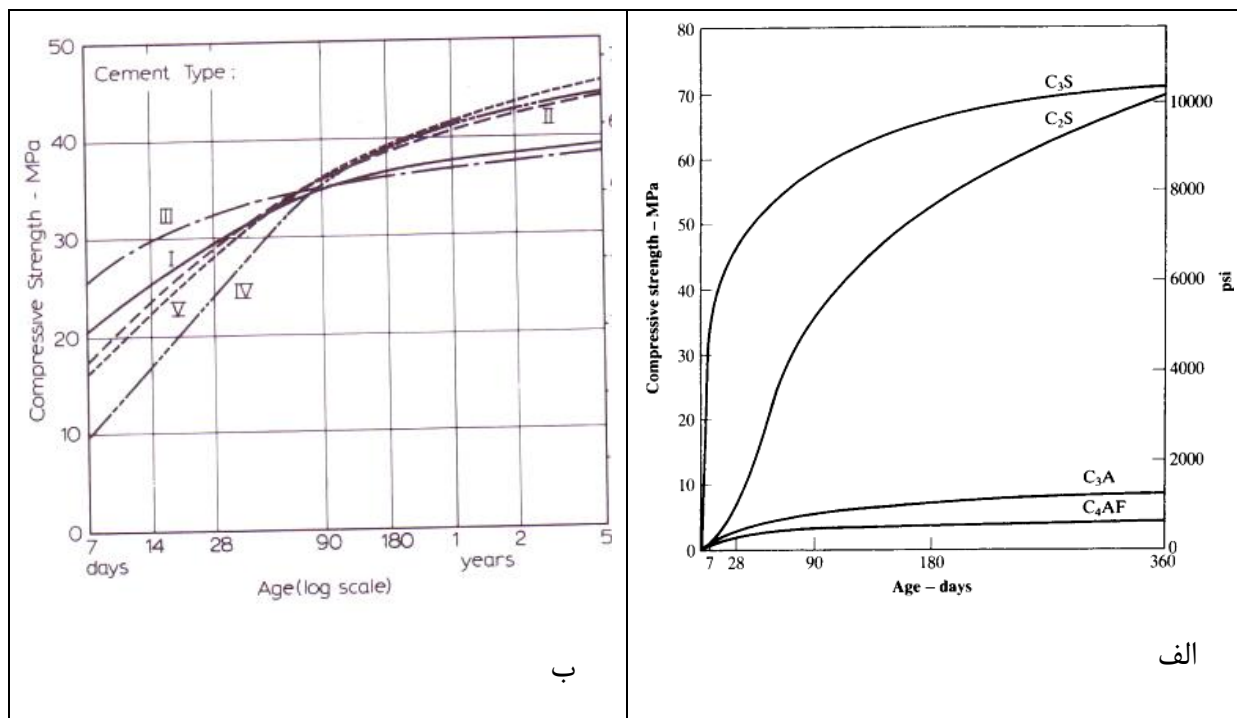
مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	محدوده مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد Neville 1996 (مگاپاسکال)	محدوده نسبت مقاومت فشاری سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه براساس Neville 1996	درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه Neville 1996
15	20 → 26	0.77 → 0.59	23 → 41
20	26 → 34		
25	33 → 43		
30	39 → 51		
35	46 → 60		
40	52 → 68		
45	59 → 77		

در این خصوص محققین بسیاری سعی بر پیش بینی f_{c28} براساس اطلاعات اختلاط بتن داشته اند [۹ و ۱۰]. همچنین تعدادی دیگر از محققین تکنیک های کامپیوتری و عددی را در این خصوص بکار بسته و با استفاده از شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و منطق فازی مقاومتهای ۲۸ روزه را به مقاومت های سنین کمتر و گاه مشخصات اختلاط بتن ربط داده اند. [۱۱-۱۳]

۲.۲. مروری بر عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن

در مورد عوامل موثر بر رشد مقاومت و نیز روند آن تحقیقاتی صورت گرفته که در این قسمت به اختصار مرور می گردند. بطور کلی می توان عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن را به ۳ گروه کلی تقسیم نمود: ۱- ویژگی های سیمان مصرفی (مانند ترکیبات اصلی و نرمی) ۲- طرح اختلاط بتن ساخته شده (مانند نسبت آب به سیمان) ۳- عوامل محیطی که بتن در آن ساخته و عمل آوری (مانند دما و رطوبت) می شود.

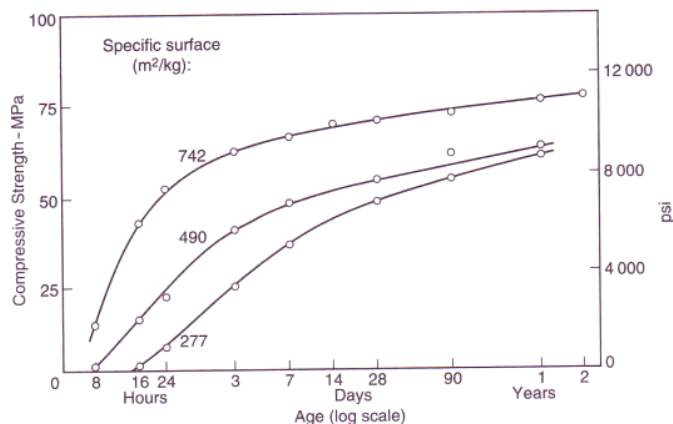
یکی از عوامل موثر بر روند کسب مقاومت مخلوط های بتنی ترکیبات اصلی سیمان آنها می باشد. همانطور که در شکل (۱-الف) دیده می شود هرکدام از ترکیبات اصلی سیمان اگر به تنهایی مورد بررسی قرار گیرند مشخص می شود که روندهای کسب مقاومت متفاوتی دارند پس میزان این ترکیبات اصلی در انواع مختلف سیمان قطعاً بر روند کسب مقاومت در سنین مختلف تاثیر گذار می باشد. [۱۴] نتایج نشان داده شده در شکل ۱-الف برای عیار سیمان ثابت ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب بوده پس با تغییر عیار این روند می تواند دستخوش تغییراتی شود.



شکل ۱- (الف) روند کسب مقاومت هر یک از ترکیبات اصلی سیمان پرتلند بطور مجزا- (ب) روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با عیار ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب از انواع مختلف سیمان [۱۴]

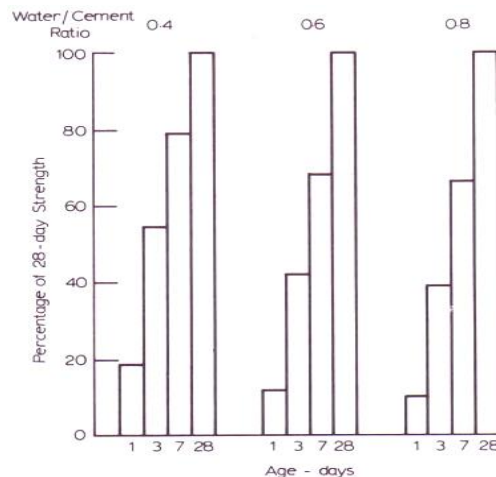
همانطور که در شکل (۱-ب) مشاهده می شود بتن های ساخته شده با یک نسبت آب به سیمان و عیار سیمان ثابت با انواع مختلف سیمان، میزان رشد مقاومتی از سنین زودرس (مثلا ۷ روزه) به سن ۲۸ روزه مختلفی را از خود نشان داده اند که این موضوع نیز خود بیانگر تاثیر ترکیبات اصلی و نرمی سیمان بر روند کسب مقاومت می باشد. [۱۵]

یکی دیگر از ویژگی های سیمان که بر روند کسب مقاومت بتن در سنین مختلف اثر می گذارد نرمی (ریزی) سیمان می باشد. با ثابت در نظر گرفتن سایر مشخصات سیمان و مخلوط بتنی، هرچه سیمان نرمتر باشد روند کسب مقاومت زودتر اتفاق می افتد و قاعدتا نسبت مقاومت ۲۸ روزه به مقاومت سنین زودرس مانند ۷ روزه کاهش می یابد. نمونه ای از این روند و اثرات نرمی سیمان در شکل ۲ نشان داده شده است. [۱۵]



شکل ۲- روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ با استفاده از سیمان های پرتلند با سطح مخصوص (با استفاده از آزمایش نفوذ هوا) مختلف [۱۵]

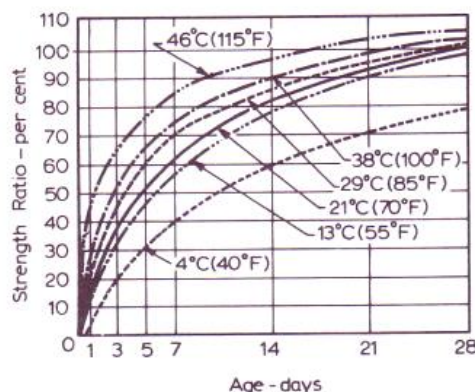
علاوه بر ویژگی هایی که ذاتا به مشخصات سیمان مربوط می شود عوامل دیگری نظیر مشخصات طرح مخلوط بتن نیز می توانند در رشد مقاومت از سنین زودرس به سنین بالاتر تاثیر گذار باشند. یکی از عوامل موثر در این خصوص نسبت آب به سیمان می باشد. تحقیقات نشان می دهد کسب مقاومت مخلوط های با نسبت آب به سیمان پایین نسبت به مخلوط های با نسبت آب به سیمان بالاتر، سریع تر می باشد. شکل زیر این موضوع را بیان می کند: [۱۵]



شکل ۳- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند معمولی [۱۵]

دلیل این موضوع آن است که در مخلوط های با نسبت پایین آب به سیمان، ذرات سیمان به یکدیگر نزدیک تر بوده و سیستم پیوسته ژل سریعتر تشکیل می گردد. [۱۵]
همچنین در آب و هوای گرم کسب مقاومت های زودرس بالاتر بوده و نسبت مقاومت ۲۸ روزه به مقاومت ۷ روزه کمتر خواهد بود. [۱۵]

شکل ۴ تاثیر دمای نگهداری بتن در نسبت مقاومت کسب شده در سنین و شرایط مختلف را نسبت به سن ۲۸ روزه و در دمای نگهداری ثابت ۲۱ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. همانطو که در آن مشاهده می گردد هرچه دمای نگهداری نمونه ها کمتر شده نسبت مقاومت زودرس کسب شده توسط نمونه ها کاهش یافته است. [۱۵]



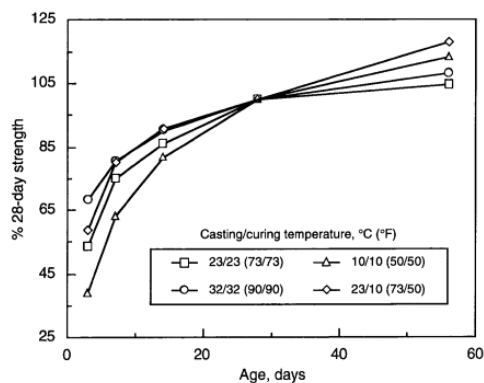
شکل ۴- نسبت مقاومت بتن عمل آوری شده در دماهای مختلف به مقاومت ۲۸ روزه بتن در عمل آوری ۲۱ درجه سانتی گراد (نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۰، نمونه ها ساخته و در دمای مشخص و ثابت نگهداری شده اند) [۱۵]

همچنین در تحقیقی دیگر اثر دما در هنگام بتن ریزی و نیز دمای نگهداری بتن بر میزان رشد مقاومت بتن ساخته شده با استفاده از دو نوع سیمان که یکی (سیمان A) مطابق با نوع I و دیگری (سیمان B) مطابق با نوع I و II طبق مشخصات

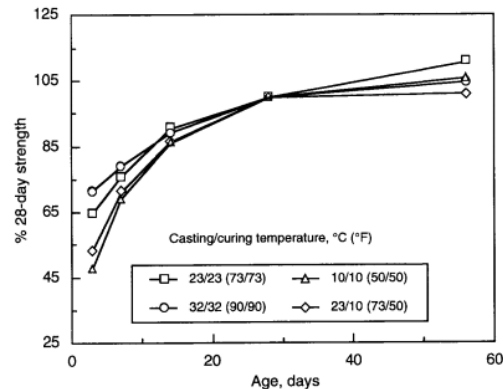
استاندارد ASTM C150 می باشد، در سنین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات سیمان های مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج این تحقیق در شکل ۵ ارائه شده است: [۱۶]
همانطور که از نتایج این تحقیق بر می آید، هرچه دمای بتن ریزی و عمل آوری آن بیشتر باشد درصد رشد مقاومت سنین زود هنگام نسبت به مقاومت ۲۸ روزه افزایش می یابد.

جدول ۵- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان A و B [۱۶]

Parameter, %	Cement A	Cement B
SiO ₂	19.43	21.55
Al ₂ O ₃	4.73	3.58
Fe ₂ O ₃	2.97	3.23
CaO	61.32	63.66
MgO	3.74	2.79
SO ₃	4.51	3.02
Na ₂ O	0.40	0.35
K ₂ O	0.78	0.35
TiO ₂	0.23	0.18
P ₂ O ₅	0.11	0.07
Mn ₂ O ₃	0.08	0.05
SrO	0.05	0.07
Loss on ignition	1.22	1.50
Equivalent alkalis as Na ₂ O	0.91	0.58
C ₃ S	51	57
C ₂ S	17	19
C ₃ A	8	5
C ₄ AF	9	10
Fineness, m ² /kg	385	371
ASTM C 109 mortar cube strength, MPa (psi)		
1 day	14.8 (2150)	11.4 (1650)
3 days	26.1 (3780)	27.0 (3920)
7 days	34.6 (4610)	33.3 (4830)
14 days	43.6 (5050)	39.4 (5710)
28 days	45.6 (5700)	41.4 (6010)
56 days	45.4 (6120)	45.3 (6570)
Time of set, Vicat, min		
Initial	93	214
Final	195	360



سیمان B - مطابق با نوع II استاندارد ASTM C150



سیمان A - مطابق با نوع I استاندارد ASTM C150

شکل ۵-الف) رشد مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان A (ب) رشد مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان B [۱۶]

۳. روش تحقیق

در تحقیق انجام شده تعداد زیادی نمونه مکعبی ۱۵ سانتیمتری بتن از محل های مختلف پروژه با رده ها، اسلامپ ها، شرایط محیطی و دمایی بتن و کارخانه های تولید کننده سیمان و مواد افزودنی مختلف براساس استاندارد های (ISIRI 3201-1 و ISIRI 1608-2 و ISIRI 3203-2) اخذ شده و در حوضچه ها در شرایط استاندارد نگهداری شده و تحت

آزمون مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفته اند (براساس استاندارد ISIRI 1608-3). نمونه ها توسط یک تیم مستقر در پروژه گرفته شده اند. [۱۷-۲۰]

داده ها با دقت در آزمایشگاه ثبت شده و سپس در قالب تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفته اند. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از داده های موجود نشان داده شود که با استفاده از یک ضریب نمی توان با دقت مناسبی مقاومت سنین مختلف را به هم ربط داد و باید سایر عوامل نیز در نظر گرفته شوند.

۴. نتایج و تحلیل ها

در این مقاله صرفا نتایج حاصل شده از کاربرد یک نوع سیمان پرتلند نوع ۲ با مشخصات ارائه شده در جداول زیر استفاده شده است:

جدول ۶- نتایج آزمایش های شیمیایی سیمان*

ردیف	عنوان	مقدار	محدوده تعیین شده برای سیمان نوع ۲ در استاندارد ملی ایران و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان
۱	Insoluble Residue	0.34	-
۲	SiO ₂ %	21.40	حداقل ۲۰/۰۰ درصد
۳	Al ₂ O ₃ %	4.60	حداکثر ۶/۰۰ درصد
۴	Fe ₂ O ₃ %	3.88	حداکثر ۶/۰۰ درصد
۵	CaO %	62.98	-
۶	MgO %	3.12	حداکثر ۵ درصد
۷	SO ₃ %	2.12	حداکثر ۳/۰۰ درصد
۸	Na ₂ O %	0.16	-
۹	K ₂ O %	0.64	-
۱۰	L.O.I %	1.09	حداکثر ۳/۰۰ درصد
۱۲	L.S.F %	91.00	-
ترکیبات سیمان			
۱	C3S %	51.1	-
۲	C2S %	22.7	-
۳	C3A %	5.6	حداکثر ۸/۰۰ درصد
۴	C4AF %	11.8	-
۵	CaO free %	0.67	-

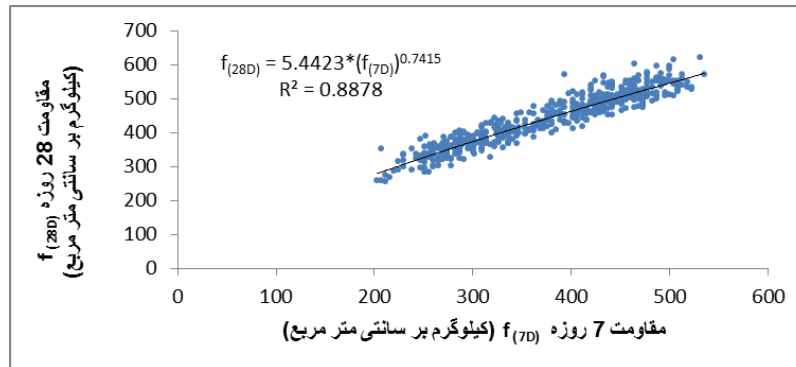
جدول ۷- نتایج آزمایش های فیزیکی سیمان*

ردیف	عنوان	مقدار	محدوده تعیین شده برای سیمان نوع ۲ در استاندارد ملی ایران و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان
۱	بلین (سانتی متر مربع بر گرم)	3084	حداقل ۲۸۰۰
۲	گیرش اولیه (دقیقه)	160	حداقل ۴۵
۳	گیرش نهایی (دقیقه)	250	حداکثر ۳۶۰
۴	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۳ روزه)	250	حداقل ۱۰۰
۵	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۷ روزه)	368	حداقل ۱۷۵
۶	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۲۸ روزه)	535	حداقل ۳۱۵

*نتایج آزمایش های شیمیایی و ویژگی سیمان بطور طبیعی در طول اجرای پروژه دستخوش نوساناتی بوده است و این نتایج، تقریباً میانگین آنهاست.

در بررسی اولیه مشاهده شد که رشد مقاومت بتن از ۷ روزه به ۲۸ روزه برای تمامی رده های بتن یکسان نمی باشد. از این رو با ثابت نگه داشتن سیمان مصرفی، داده ها مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از اطلاعات ۶۲۷ نوبت نمونه برداری آزمایشگاهی، رابطه (۳) (ارائه شده در شکل ۵) بین مقاومت ۷ روزه و مقاومت ۲۸ روزه حاصل گردید:

$$f_{(28D)} = 5.4423 * (f_{(7D)})^{0.7415} \quad (3)$$



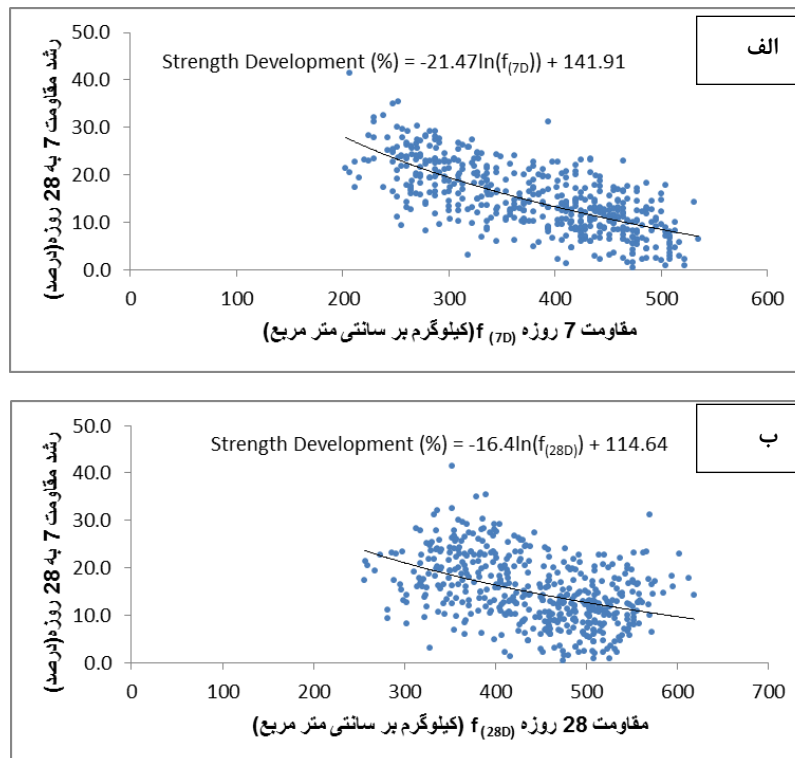
شکل ۵- رابطه بین مقاومت ۷ روزه و مقاومت ۲۸ روزه

که در رابطه (۳) $f_{(28D)}$ و $f_{(7D)}$ به ترتیب مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۱۵ سانتیمتری ۷ و ۲۸ روزه بر حسب kg/cm^2 می باشند. برداشت داده های آزمایشگاهی از محدوده اوایل سال ۱۳۹۶ تا اوایل سال ۱۳۹۷ بوده اند. بازه دمایی بتن از حدود ۱۰ تا ۳۲ درجه سانتیگراد و دمای هوا از حدود ۶ تا ۳۶ درجه سانتیگراد بوده است. همچنین براساس داده های برداشت شده روابط (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده رابطه میان درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ به ۲۸ روزه و مقاومت ۷ روزه (شکل ۶- الف) و ۲۸ روزه (شکل ۶- ب) ارائه شده اند:

$$\text{Strength Development (\%)} = -21.47 \ln(f_{(7D)}) + 141.91 \quad (4)$$

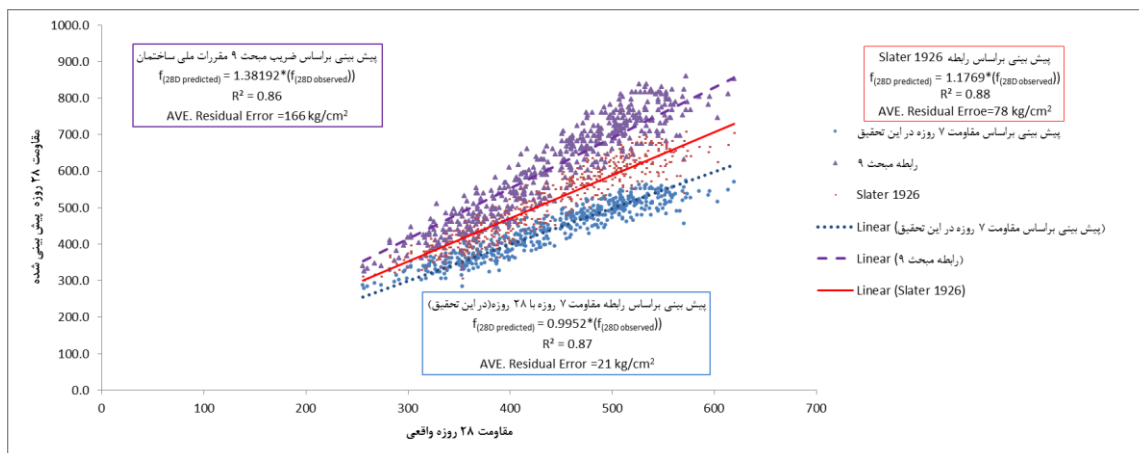
$$\text{Strength Development (\%)} = -16.4 \ln(f_{(7D)}) + 114.64 \quad (5)$$

که در روابط بالا درصد رشد مقاومت یا Strength Development (%) معادل تفاوت مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه بصورت درصد در نظر گرفته شده است.



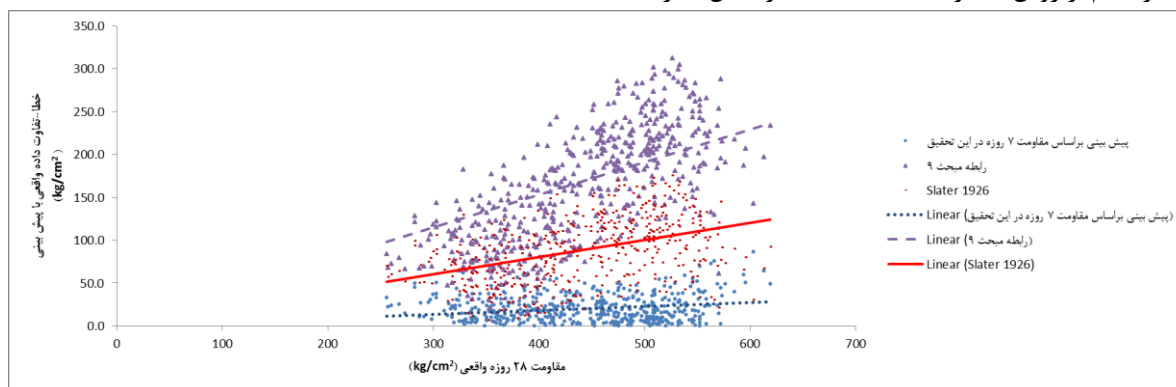
شکل ۶- الف) رابطه تخمینی بین مقاومت ۷ روزه بتن و درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز، ب) رابطه تخمینی بین مقاومت ۲۸ روزه بتن و درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز

از شکل های ۶- الف و ۶- ب می توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ به ۲۸ در یک نوع سیمان از یک کارخانه، مقاومت ۷ روزه بتن و به بیان دیگر رده مقاومتی آن می باشد و این درصد رشد خود تابعی از مقاومت ۷ روزه می تواند باشد. این در حالی است که در جدول مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان یک ضریب ثابت برای تمامی شرایط در نظر گرفته شده است و فقط نوع سیمان پرتلند مد نظر بوده است. با توجه به اینکه مهمترین پارامتر در ارتباط با مقاومت کسب شده در سن مقاومت مشخصه یکسان در بتن هایی که با یک نوع سیمان ساخته می شوند، نسبت آب به سیمان می باشد، لذا این نتیجه حاصل می گردد که رشد مقاومت از سنین زود هنگام (در این تحقیق سن ۷ روزه) به سن مقاومت مشخصه (در این تحقیق ۲۸ روزه) به نسبت آب به سیمان می تواند وابسته باشد و همانطور که در شکل های ۶- الف و ب مشاهده می شود بطور کلی با افزایش مقاومت (کاهش نسبت آب به سیمان) درصد رشد مقاومتی روند کاهشی داشته است. با این حال پراکندگی زیاد داده ها از رابطه ارائه شده نشان می دهد که عوامل دیگر نیز بر رشد مقاومت بتن تاثیر گذار هستند. بنابراین براساس رابطه بدست آمده میان مقاومت ۷ روزه بتن و مقاومت ۲۸ روزه واقعی، مقاومت ۲۸ روزه پیش بینی شده بدست آمده و با مقادیر ۲۸ روزه که با استفاده از جدول مبحث ۹ و نیز رابطه Slater 1926 ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل ۷ ارائه شده است:



شکل ۷- رابطه بین مقاومت ۲۸ روزه واقعی و پیش بینی شده

به منظور بررسی دقیقتر، بزرگی خطای قیمانده (Residual Error) (قدر مطلق اختلاف داده واقعی با داده پیش بینی شده) هر کدام از روش ها در تک تک داده ها در شکل ۸ ارائه شده است:



شکل ۸- خطای مطلق داده پیش بینی شده بر اساس رابطه مبحث ۹ و نیز رابطه رشد مقاومت در تحقیق حاضر

به منظور بررسی بیشتر داده ها اطلاعاتی در مورد خطاها در روش ارائه شده در این مقاله و مبحث ۹ در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۸- بررسی خطای مطلق روش های پیش بینی نتایج ۲۸ روزه

روش پیش بینی	خطای مطلق باقیمانده kg/cm^2			
	متوسط	حداقل	حداکثر	انحراف معیار استاندارد
از رابطه ارائه شده در این مقاله	21	0	114	16
از ضریب ثابت مبحث ۹	166	15	312	65

همانطور که در داده های شکل ۷ و ۸ و نیز جدول ۸ مشخص می باشد، پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه با استفاده از یک ضریب ثابت (جدول مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان) در یک نوع سیمان بدون در نظر گیری شرایط دیگر با خطاهای بالا روبه رو بوده و هرچه رده مقاومتی بتن بالاتر رفته میزان این خطا بیشتر شده و در حقیقت دارای خطای افزایشی بوده است. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می شود میانگین خطاها برای روش ارائه شده در این مقاله در محدوده مقاومت های اخذ شده در پروژه، بسیار کمتر از خطای ضریب ارائه شده در مبحث ۹ می باشد. با بررسی آماری داده ها این نتیجه حاصل شد که

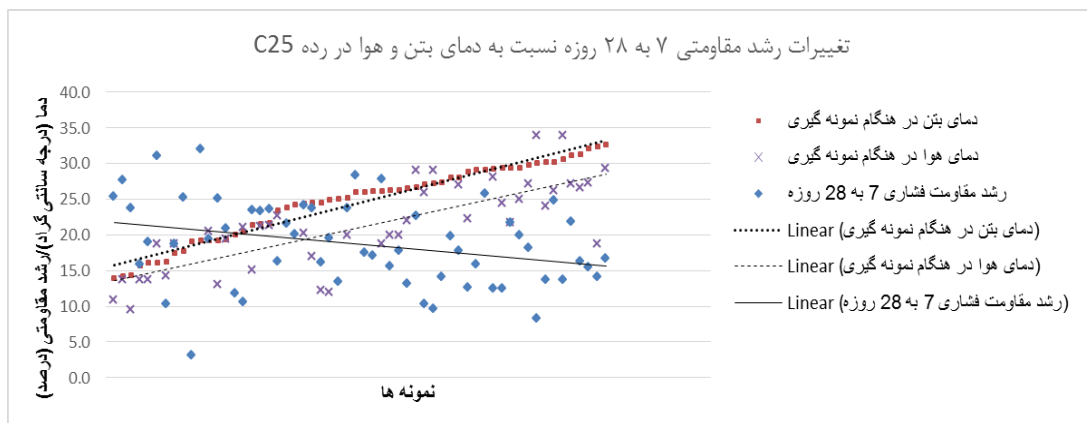
حدود ۷۳ درصد داده های پیش بینی شده با رابطه ارائه شده در این مقاله خطای مطلق کمتر از 29 kg/cm^2 دارند این در حالی است که حدود ۷۵ درصد از داده های پیش بینی شده با ضریب مبحث ۹ خطایی بین ۷۸ تا 234 kg/cm^2 داشته اند. متوسط درصد رشد مقاومت برای رده های مختلف بتن در این تحقیق در جدول ۹ ارائه شده است. در تمامی این داده ها سیمان مصرفی پرتلند نوع ۲ و از یک کارخانه ثابت بوده است:

جدول ۹- متوسط درصد رشد مقاومت ۷ به ۲۸ روز برای هر رده براساس داده های برداشت شده در این تحقیق*

رده بتن	(درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روزه)				(مقاومت نمونه مکعبی ۱۵ سانتیمتری برحسب kg/cm^2)			
	مقدار متوسط	انحراف معیار استاندارد	کمینه مقدار	بیشینه مقدار	مقدار متوسط	انحراف معیار استاندارد	کمینه مقدار	بیشینه مقدار
C25	19	6	3	32	328	12	303	349
C30	20	7	6	41	373	15	350	399
C35	16	7	1	29	422	13	400	446
C40	11	6	0	30	475	14	451	498
C45	11	5	1	26	520	14	501	548
C50	15	5	6	31	565	12	551	596

* لازم به ذکر است که رده های طراحی شده C25، C30 و C40 بوده که در حین اجرا بدلیل نوسانهای اجرایی نتایج از C25 تا C50 حاصل گردیده است.

در تمام داده ها تنها کارخانه سیمان یکسان بوده است و این امکان وجود دارد که با تغییر جنس سیمان (ترکیبات اصلی و ریزی سیمان) این روندها و همچنین میزان تغییرات مقاومت بتن در سنین مختلف دستخوش تغییرات شوند. بنابراین می توان دریافت علاوه بر رده بتن عوامل دیگر نیز می توانند در رشد مقاومتی از سنین کم به سنین بالاتر موثر باشند. از جمله این عوامل می توان به دمای هوا و دمای بتن در هنگام بتن ریزی و نمونه برداری از بتن اشاره نمود. به منظور بررسی اثر دما تغییرات درصد رشد مقاومتی به همراه تغییرات دما در شکل ۹ برای رده C25 رسم شده است:

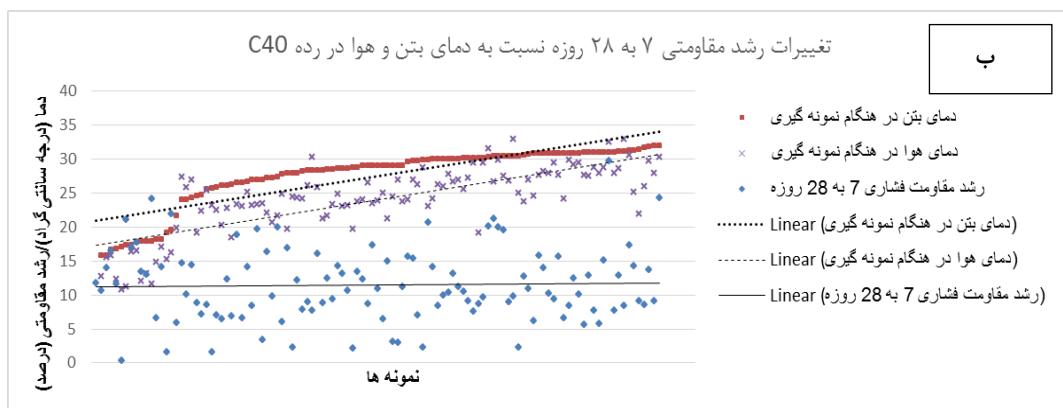
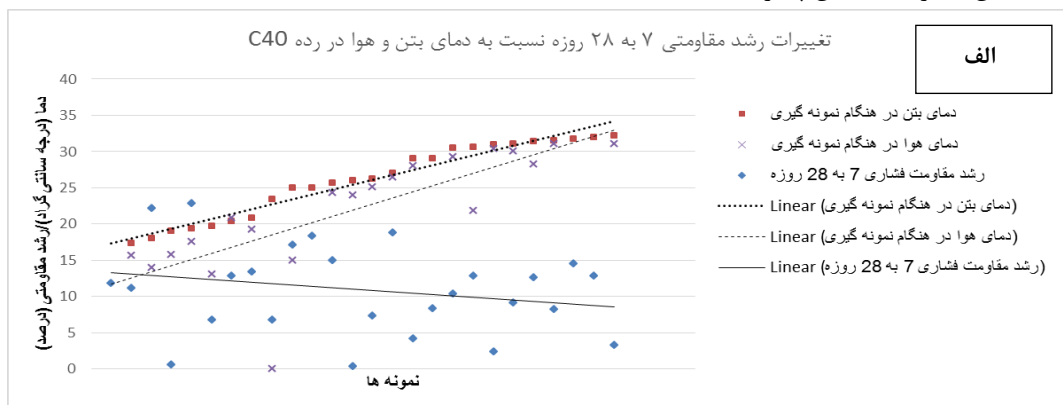


شکل ۹- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمایی

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، دمای بتن به تبع افزایش دمای هوا افزایش داشته و درصد رشد مقاومتی با این افزایش، دچار کاهش شده است. این روند در رده های C30 و C35 نیز به همین شکل مشاهده شده است. در رده های C40 و C45 مورد جالب توجهی مشاهده شد، از این قرار که در مورد روان کننده با نام تجاری مخفف C از نوع پلی کربکسیلات این کاهش رشد با افزایش دمای بتن مشاهده نشده و میزان رشد مقاومت در یک رده و با یک نوع سیمان با افزایش دما بطور متوسط تقریباً ثابت مانده است. این در حالی هست که روند کاهش درصد رشد مقاومتی با افزایش دمای بتن برای روان کننده با نام تجاری مخفف L از نوع پلی کربکسیلات اثر همانند رده های پایین تر مشاهده شده است. روند توضیح داده شده برای رده های C40 و C45 در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

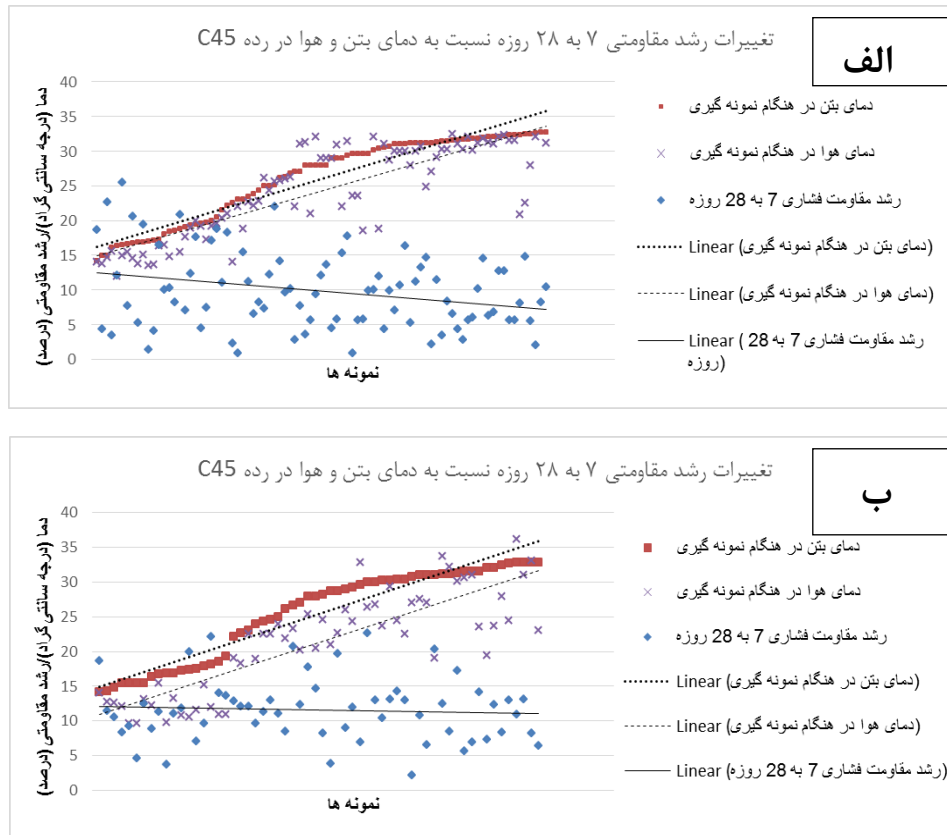
با توجه به شکل های ۱۰ و ۱۱ می توان نتیجه گرفت که نه تنها رده بتن و دمای آن در رشد مقاومتی اثر گذار هستند بلکه نوع روان کننده نیز می تواند در این پارامتر موثر باشد.

با توجه به بررسی های انجام شده در این تحقیق به نظر می رسد عوامل مختلفی بر میزان رشد مقاومت از سنین زودهنگام به سن مقاومت مشخصه در بتن اثر گذار هستند. از جمله این عوامل می توان به رده مقاومتی و نسبت آب به سیمان، دمای بتن و هوا، روان کننده مصرفی در بتن اشاره نمود. همچنین به نظر می رسد با وجود اینکه سیمان های پرتلند تولید شده با ترکیبات و ریزی متفاوت حتی اگر در یک نوع از انواع سیمان به لحاظ مشخصات فیزیکی و شیمیایی طبقه بندی شوند، با توجه به مشخصات مربوط به خود روندهای کسب مقاومتی متفاوتی داشته باشند. لذا با توجه به تاثیر عوامل مختلف از جمله موارد مذکور در این مقاله، ارائه یک رابطه برای پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با توجه به مقاومت ۷ روزه یا پیش بینی مقاومت سنین دیگر فعلاً امکان پذیر نباشد.



شکل ۱۰- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمایی برای رده C40 (الف-با استفاده از روان کننده L و ب-با استفاده از روان کننده C)

همین روند در بتن با رده C45 نیز مشاهده شده است. داده های مربوط به این رده در شکل ۱۱ نمایش داده شده اند.



شکل ۱۱- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمایی برای رده C45 (الف- با استفاده از روان کننده L و ب- با استفاده از روان کننده C)

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

- در این تحقیق اطلاعات ۶۲۷ داده از نمونه برداری بتن با رده های مختلف مقاومتی و نیز شرایط دمایی و روان کننده های مختلف که توسط آزمایشگاه مستقر در یک پروژه در ایران برداشت شده است جهت بررسی رشد مقاومتی بتن از سن ۷ به ۲۸ روزه و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی حاصل از این تحقیق از این قرار می باشد:
- رشد مقاومت بتن از سن ۷ به ۲۸ روزه خود تابعی از مقاومت سن ۷ روزه بوده و در حالت کلی با افزایش رده مقاومتی، میزان این رشد کاهش داشته است.
 - استفاده از یک ضریب ثابت (مثلا ضرایب مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان) بدون توجه به سایر شرایط ساخت بتن و بتن ریزی خطاهای زیادی دارد که این میزان خطا با افزایش رده مقاومتی افزایش داشته است.
 - دمای بتن که خود می تواند تابعی از دمای هوا باشد بر میزان رشد مقاومتی از سن ۷ به ۲۸ روز موثر بوده و در یک رده مشخص با افزایش دمای بتن درصد رشد مقاومت بتن کاهش پیدا کرده است.
 - در مورد روند کاهش درصد رشد با افزایش دمای هوا و بتن استثنای نیز می تواند وجود داشته باشد به عبارتی عامل دیگر می تواند بر این میزان رشد مقاومتی موثر باشد که در این تحقیق استفاده از یک نوع روان کننده (با نام مختصر C) این روند را برهم زده است و نتایج حاصل از آن نشان می دهد با افزایش دما روند رشد مقاومتی تغییر چندانی نداشته است.

- نتایج مورد بررسی در این مقاله همگی با استفاده از یک نوع سیمان از یک کارخانه بوده است لذا ممکن است با تغییر جنس سیمان این روند ها تغییر پیدا کند.
- با توجه به تاثیر جنس سیمان (عمدتا ترکیبات اصلی و ریزی سیمان) و دمای بتن و هوا و رده های مقاومتی، نسبت آب به سیمان و همچنین عیار سیمان، ارائه یک رابطه برای پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با توجه به مقاومت ۷ روزه یا پیش بینی مقاومت سنین دیگر فعلا امکان پذیر نمی باشد.

۶. قدردانی

نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس ابراهیمی مدیر عامل محترم شرکت سابیربین الملل جهت فراهم آوردن بستر آزمایشگاهی مناسب در پروژه و همچنین از تکنسین های آزمایشگاه جهت انجام آزمایش ها قدردانی می نمایند.

۷. مراجع

- [۱] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان
- [2] ACI Committee 209. (1997). "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure". American Concrete Institute.
- [3] ASTM C150
- [4] ASTM C 192-00. (2000). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". American Society for Testing and Materials, USA.
- [5] ASTM C 39-99. (1999). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". American Society for Testing and Materials, USA.
- [6] CEB-FIP Model Code. (1990). Comité Euro-International du Béton (CEB), Bulletin D'Information No. 203/205, Lausanne, 437 p.
- [7] Slater, W.A., (1926). "Relation of 7-day to 28-day compressive strength of mortar and concrete". In Journal Proceedings, 22(2), 437-449.
- [8] Neville A.M., (1996). "Properties of Concrete". John Wiley & sons, New York.
- [9] Zain, M.F.M., Suhad M. Abd, Sopian, K., Jamil, M., Che-Ani, A.I., (2008). "Mathematical regression model for the prediction of concrete strength". In Proceedings of the WSEAS International Conference. Mathematics and Computers in Science and Engineering.
- [10] Rafi, M.M., Nasir, M.M., (2015). "Models for prediction of 28-day concrete compressive strength". Journal of Testing and Evaluation, 44(3).
- [11] Lai, S., Serra, M., (1997). "Concrete strength prediction by means of neural network". Construction and Building Materials, 11(2), 93-98.
- [12] Ni, H.G., Wang, J.Z., (2000). "Prediction of compressive strength of concrete by neural networks". Cement and Concrete Research, 30(8), 1245-1250.
- [13] Hamid-Zadeh, N., Jamali, A., Nariman-Zadeh, N., Akbarzadeh, H., (2007). "Prediction of concrete compressive strength using evolved polynomial neural networks". WSEAS Transaction on systems, 4(4), 802-807.
- [14] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). Concrete technology.
- [15] Neville, A. M. (1995). Properties of concrete (Vol. 4). London: Longman.
- [16] Burg, R. G. (1996). The influence of casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete (No. R&D Bulletin RD113T,). Portland Cement Association.

[۱۷] ISIRI 3201-1، استاندارد ملی ایران، بتن تازه، قسمت ۱: نمونه برداری، چاپ اول

[۱۸] INSO 1608-2، استاندارد ملی ایران، بتن سخت شده، قسمت ۲: ساخت و عمل آوری آزمون ها برای آزمون مقاومت، چاپ اول

سال ۱۳۹۳

[۱۹] ISIRI 3203-2، استاندارد ملی ایران، بتن تازه، قسمت دوم: تعیین روانی به روش اسلامپ -روش آزمون، تجدید نظر دوم

[۲۰] INSO 1608-3، استاندارد ملی ایران، بتن سخت شده، قسمت ۳: تعیین مقاومت فشاری آزمون ها-روش آزمون، چاپ اول سال

۱۳۹۳