

## تأثیرات طرح اختلاط و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری و کششی بتن پلاستیک بتونیتی

حکیمه عباسلو\*

استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

امیر توانا املشی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

علیرضا غنی‌زاده

استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

سهراب عازمی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

### چکیده

معمولاً جهت ساخت موانع غیرقابل نفوذ (دیوار آب‌بند)، مکان‌های آلوده به آلاینده‌ها، یا کنترل نشت در پی‌های با نفوذ بالا در سدها از بتن پلاستیک استفاده می‌گردد. در این تحقیق اثر مقدار رس، سنگ‌دانه و سیمان بر مقاومت فشاری و کششی بتن پلاستیک بتونیتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش مقاومت فشاری و کششی با توجه به افزایش نسبت آب به ریزدانه، کاهش سیمان و کاهش سنگ‌دانه بود. علاوه بر این، بتن پلاستیک رفتار وابسته به زمان از خود نشان داد و تغییرات خواص مکانیکی بتن بتونیتی با افزودن لای و رس جاذب بهبود یافت. بررسی عمق نفوذ آب در نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه نیز نشان‌دهنده‌ی کاهش نفوذ با افزایش عیار رس و افزایش زمان عمل آوری بود. همین‌طور نتایج مربوط به بررسی جذب آلاینده کادمیوم توسط رس بتونیتی به خوبی نشان داد که می‌تواند در شرایط نشت آب با آلودگی بالا، مؤثر واقع شود. مناسب‌ترین درصد رس با توجه به مقاومت فشاری و کششی و در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، رس با عیار ۲۰ درصد و طرح اختلاط با حضور لای و سیمان ۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد. همچنین در این تحقیق روابطی به‌منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه بتن پلاستیک با استفاده از نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه و مقاومت کششی ۹۰ روزه با استفاده از نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه توسعه داده شده است. مقدار ضریب رگرسیون بیش‌تر از ۰/۹۵ نشان‌دهنده‌ی دقت بالای این روابط در فرآیند پیش‌بینی است.

واژه‌های کلیدی: بتن پلاستیک، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عمق نفوذ آب، جذب آلاینده.

## ۱- مقدمه

سدهای خاکی دارد [۹]. بتن پلاستیک شامل سنگ‌دانه، سیمان، آب و مخلوط رس با یک نسبت آب به سیمان بالا برای تولید یک ماده شکل‌پذیر است. عاملی که باعث بروز ویژگی‌های متفاوت از بتن معمول در بتن پلاستیک می‌شود، حضور رس بنتونیت در این بتن است [۱۰]. بنتونیت موجود در بتن باعث می‌شود که بتن پلاستیک شکل‌پذیری بیش‌تری از خود نشان دهد. همچنین وجود بنتونیت، کاهش نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن پلاستیک را نیز در پی خواهد داشت [۵]. عوامل مختلفی مانند مقاومت فشاری، نفوذپذیری، تغییرشکل‌پذیری، مقاومت سایش و دوام بر خواص بتن پلاستیک تأثیرگذار هستند [۱۱]؛ به طوری که مقاومت فشاری آن باید به اندازه‌ای باشد که بتن قابلیت تحمل تنش‌های جانبی خاک چه در دوران اجرا و چه در دوران بهره‌برداری را داشته باشد. از طرف دیگر برای به دست آوردن مصالح با شکل‌پذیری مناسب لازم است که بتن حداقل مقاومت را دارا باشد (۳۰-۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع). با رعایت اصول شکل‌پذیری مناسب، مقاومت فشاری بتن پلاستیک را تا ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌توان افزایش داد. نسبت سیمان به آب، نوع سیمان، دانه‌بندی و جنس سنگ‌دانه در مقاومت بتن تأثیر عمده‌ای دارند [۱۱]. همچنین نفوذپذیری بتن پلاستیک به ویژگی‌های ذاتی مصالح تشکیل‌دهنده آن و ناپیوستگی‌ها وابسته است. افزایش نسبت سیمان به آب، افزایش عامل کلونیدی و استفاده از مصالح افزودنی مناسب، باعث کاهش میزان نفوذپذیری می‌شوند. مقدار ضریب نفوذپذیری در محدوده  $10^{-8}$  متر بر ثانیه برای این نوع بتن مناسب است [۱۱]. علاوه بر این، امروزه استفاده از کانی‌های رسی جهت حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی افزایش یافته است. کارایی زیاد، فراوانی، سهولت دسترسی و قیمت ارزان از مهم‌ترین دلایل استفاده از کانی‌های رسی جهت حذف فلزات سنگین از محیط‌های آلوده مانند پساب‌ها و خاک می‌باشند [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. بنابراین رس موجود در بتن پلاستیک، کارایی جذب عناصر سنگین را نیز خواهد داشت.

کارونارانه و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی امکان استفاده از مخلوط‌های بنتونیت و کائولینیت به جای بنتونیت خالص در ساخت پوشش‌های رسی نفوذناپذیر با هدف کمبود بنتونیت خالص در جنوب آسیا و در مقابل فراوانی کانی کائولینایت در منطقه پرداختند. آزمایش‌های نفوذپذیری نشان دادند که نفوذپذیری

ایران به‌عنوان یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، با توزیع نامتوازن آب‌های سطحی مواجه بوده که همین امر باعث محدودیت در مصرف بهینه آب گردیده است [۱]. آب یک نیاز حیاتی در بخش‌های صنعتی، شهری، روستایی و کشاورزی بوده و حفاظت از آب و جلوگیری از هدرروی آن به‌عنوان یکی از موضوعات بنیادین در نظر گرفته شده است و فعالیت‌ها و پروژه‌های آبی بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. از جمله بناهای آبی مهم، سدهای خاکی و بتنی می‌باشند. از آنجایی که سدها به‌ندرت در زمین‌های کاملاً غیرقابل نفوذ ساخته می‌شوند؛ ممکن است مقداری آب از زیر سد جریان یابد [۲]. یکی از بزرگ‌ترین خطرات سدها پس از آبگیری، تراوش از زیر پی سد و افزایش گرادیان هیدرولیکی است که باعث بروز خطراتی نظیر فرسایش پی می‌شود [۳]. به‌منظور کنترل تراوش و مهار زهاب در زیر سدها، روش‌هایی مانند قطع شبکه جریان زهاب و یا کاهش دادن آن با استفاده از دیوار آب‌بند کامل و یا کاهش مقدار زهاب با ایجاد یک پرده آب‌بند نیمه نفوذی قائم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. یک دیوار آب‌بند بتنی می‌تواند به‌عنوان یک اقدام ترمیمی در جهت بهبود و کنترل نشست سد خاکی در اکثر شرایط استفاده شود [۵ و ۶]. استفاده از بتن معمولی با مدول الاستیسیته بالا در مقایسه با مواد دیگر که در مجاورت طرح یافت می‌شوند، ممکن است سبب مشکلاتی مانند شکندگی دیوار آب‌بند به دلیل تنش دینامیکی گردد. برای حل این مشکل، اضافه نمودن یک درصد مشخص از رس به مواد بتن پلاستیک می‌تواند علاوه بر کاهش سختی و ضریب الاستیسیته، سبب شکل‌پذیری بهتر این نوع بتن شود [۷]. بنابراین باید مصالحی در ساخت این المان مورد استفاده قرار گیرند که بتوانند تغییرشکل‌هایی متناسب با تغییرشکل‌های ایجادشده داشته باشند. در انتخاب چنین مصالحی باید توجه داشت که محصول حاصله علاوه بر نفوذناپذیری و مقاومت مناسب، باید سختی متناسب با محل ساخت را نیز تأمین کند. قابل‌قبول بودن سازش‌پذیری کرنش دیوار و خاک اطراف باعث می‌گردد که تنش اضافه‌ای بر روی دیوار به وجود نیاید و همچنین اجازه می‌دهد که بتن و خاک اطراف با هم و بدون انفصال با یکدیگر عمل نمایند [۸]. در پاسخ به این معضل، محققین بتن پلاستیک را پیشنهاد داده‌اند که برای دیوار آب‌بند ویژگی‌های تغییرشکلی مشابه با

به صورت مقادیر ۱۵۵۰، ۱۶۰۰، ۱۶۲۰ و ۱۷۵۰ کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته شده است. در ضمن مقدار سنگ‌دانه در تمام نمونه‌های بتن در تیمارها ثابت بوده، تا اثر پارامترهای دیگری از قبیل مقدار رس بررسی گردد. آزمایش دانه‌بندی سنگ‌دانه بر اساس استاندارد شماره ASTM D 421-87 انجام شد. مشخصات دانه‌بندی در جدول ۱ نشان داده شده است.

#### ۲-۱-۲- سیمان

در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان کرمان در کلیه آزمایش‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. تحلیل شیمیایی سیمان (جدول ۲) نشان‌دهنده مطابقت آن با معیارهای ASTM C 150 است. لازم‌به‌ذکر است که به‌منظور بررسی اثر سیمان، در تحقیق حاضر از مقادیر متفاوت فاکتور سیمان در قالب طرح‌های اختلاط مختلف استفاده شده است.

#### ۲-۱-۳- رس

در تحقیق حاضر، از خاک بنتونیت کلسیمی سرخون هرمزگان در تمامی طرح‌های اختلاط استفاده شده است. جهت بررسی ترکیب کانی‌شناسی خاک رسی، پراش‌نگاشت‌های (Diffractograms) تفرق اشعه ایکس تهیه شد (شکل ۱). بر اساس الگوی پراش پرتو ایکس، مشخص شد که نمونه بنتونیت عمدتاً از مونت‌موریلونیت (حدود ۸۰ درصد)، کوآرتز و کریستوبالیت تشکیل شده است. خواص مهم خاک رس بنتونیت مانند حدود اتربرگ، چگالی، تراکم، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه و رنگ در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس نتایج مذکور، خاک بنتونیت نشانه خمیری و سطح ویژه بالایی دارد که این نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بالای جذب آب و شکل‌پذیری این رس است. برای هر تیمار سنگ‌دانه و هر زمان عمل‌آوری از چهار حالت جای‌گزینی رس به صورت صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد جرمی از فاکتور سیمان استفاده شد.

#### ۲-۲- روش ساخت بتن

##### ۲-۱-۲- طرح اختلاط

از آنجایی که در این پژوهش بررسی تأثیر درصد ریزدانه و سنگ‌دانه بر خواص بتن پلاستیک موردنظر بوده است، لذا در کلیه

مخلوط بنتونیت با کائولینایت به نسبت ۱:۱، ۳/۷۵ برابر بیش‌تر از مقدار نفوذپذیری بنتونیت خالص است. آنان نتیجه‌گیری نمودند که مخلوط بنتونیت و کائولینایت به نسبت ۱:۱ می‌تواند جایگزین مناسبی برای بنتونیت خالص باشد [۱۵]. استاوریداکیس (۲۰۰۵) چگونگی تأثیرگذاری سیمان بر خاک‌های مشکل از کائولینیت، بنتونیت و ماسه را بررسی کرد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن می‌باشد که افزودن سیمان به چنین خاک‌هایی می‌تواند موجب بهبود مشخصات دوام و مقاومت فشاری خاک شود [۱۶]. به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اثر رس بنتونیت بخش عمده‌ای از مطالعات در زمینه‌ی بتن پلاستیک را تشکیل داده [۲۰-۱۷] و در برخی مطالعات اثر کائولینایت و ایلیت [۲۱]. جهت بهبود مقاومت آن مطالعه شده است. با توجه به اهمیت بنتونیت در تهیه بتن پلاستیک و اهمیت دیوار آب‌بند بتن پلاستیکی در سدهای خاکی، یک تحقیق کامل در ارتباط با اثر اختلاط‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن پلاستیک می‌تواند کمک مناسبی به مهندسين در انتخاب طرح اختلاط مناسب دیوار آب‌بند بتن پلاستیک نماید. از این‌رو، این تحقیق برای (۱) بررسی مقاومت فشاری و کششی بتن پلاستیک، و یافتن داده‌های طرح برای به‌کارگیری بتن پلاستیک در یک دیافراگم و پرده دیوار آب‌بند سد خاکی، (۲) ارائه و تعیین طرح مخلوط دیوار آب‌بند پلاستیک بر اساس مقاومت فشاری، کششی و (۳) بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر بتن پلاستیک، صورت گرفته است.

#### ۲- مواد و روش تحقیق

##### ۲-۱-۲- مصالح مورداستفاده

##### ۲-۱-۱-۲- سنگ‌دانه

بیش از ۵۰ درصد حجم بتن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند و هرچه این سنگ‌دانه‌ها درشت‌تر و سختی آن‌ها بیشتر باشد، مقاومت بتن پلاستیک بیش‌تر خواهد شد. به علاوه منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نیز باید پیوسته باشد. در این تحقیق، مصالح سنگی شامل شن و ماسه گرد گوشه خوب (مصالح رودخانه‌ای)، از معدن شن و ماسه واقع در ۴۰ کیلومتری شهرستان سیرجان (بلورد-جاده پلنگی) تهیه شدند. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی، مطابق با مشخصات ASTM C 33 می‌باشد. لازم‌به‌ذکر است که در این تحقیق، مقدار و دانه‌بندی مصالح سنگی به‌کاررفته در ساخت بتن پلاستیک

مراحل طراحی و ساخت نمونه‌ها نسبت رس به ماسه (عیار رس) عیار رس بر خواص بتن پلاستیک را ارزیابی کرد. با این دیدگاه، تغییر داده شد. لیکن سایر اجزاء طرح اختلاط ثابت نگه داشته شد. در جدول زیر نسبت اختلاط‌های پیشنهادی (جدول ۴) بر اساس تا با حذف اثرات آن‌ها در معیارهای ارزیابی، بتوان نتیجه تغییرات مطالعات پیشین [۲۲ و ۲۳] آورده شده است.

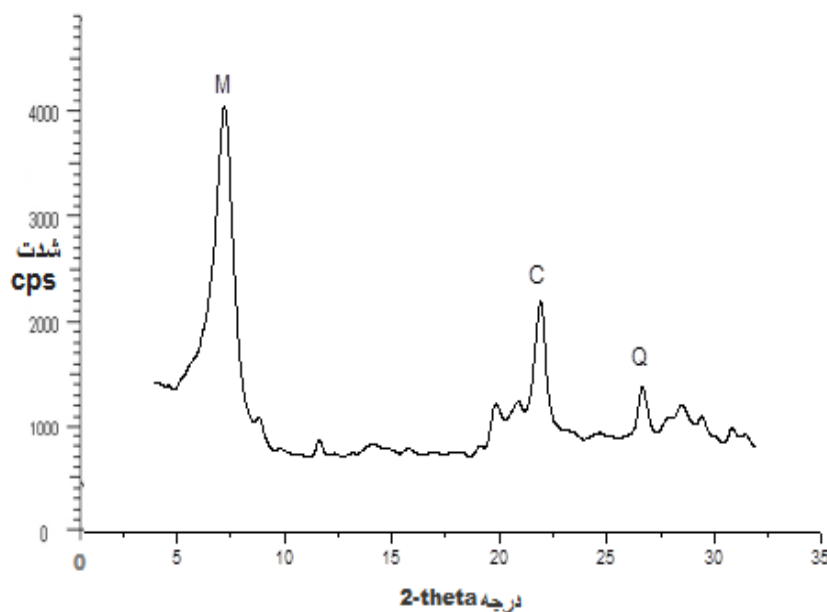
جدول ۱- دانه‌بندی چهار تیمار سنگ‌دانه مختلف در طرح اختلاط بتن پلاستیک

درصد عبوری سنگ‌دانه در تیمارهای مختلف				
قطر (mm)	۱۵۵۰ kg m <sup>-3</sup>	۱۶۰۰ kg m <sup>-3</sup>	۱۶۲۰ kg m <sup>-3</sup>	۱۷۵۰ kg m <sup>-3</sup>
۱۹/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵۱	۸۶/۷۴	۸۹/۸۶	۸۹/۲۸	۸۵/۳۹
۴/۷۶	۵۲/۸۵	۸۱/۵۳	۸۰/۶۷	۵۲/۰۲
۲/۳۸	۳۶/۵۹	۶۶/۷۱	۶۵/۱۱	۳۶/۰۲
۱/۱۹	۲۱/۱۹	۴۵/۸۹	۴۶/۴۴	۲۰/۸۵
۰/۵۹۵	۱۱/۸۷	۲۸/۴۷	۲۹/۳۳	۱۱/۶۸
۰/۲۹۷	۳/۸۶	۱۵/۶۴	۱۶/۲۲	۳/۷۹
۰/۱۴۹	۱/۳۳	۶/۸۲	۷/۱۱	۱/۲۲

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سیمان تپ ۲ کرمان

نوع سیمان	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI <sup>a</sup>	Total
سیمان تپ ۲	۲۱/۹۰	۵/۰۹	۳/۹۰	۶۲/۴۰	۱/۹۰	۱/۸۳	۱/۴۰	۹۸/۴۲

a : Loss On Ignition



شکل ۱- پراش انگاشت پرتو ایکس نمونه پودری بنتونیت که در شرایط متعارف آزمایشگاهی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد گرفته شده است (M: مونت موریلونیت، Q: کوآرتز، C: کریستوبالیت).

جدول ۳- خواص مهندسی خاک رس بنتونیت

۳۲۰	حد روانی (%)
۱۲۰	حد خمیری (%)
۲۰۰	نشانه خمیری
۲/۷۸	چگالی ویژه
۲۵	رطوبت بهینه (%)
۱/۵۱	دانسیته خشک حداکثر ( $\text{g cm}^{-3}$ )
۲۴	ظرفیت تبادل کاتیونی ( $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ )
۴۲۰	سطح ویژه ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )
	رنگ
	خاکستری تا سبز ملایم

جدول ۴- نسبت های اختلاط بتن برای چهار تیمار مختلف سنگ دانه و زمان های عمل آوری متعدد

آب مصرفی تقریبی $\text{L m}^{-3}$	سیلت $\text{kg m}^{-3}$	سنگ دانه $\text{kg m}^{-3}$	فاکتور سیمان* $\text{kg m}^{-3}$	شناسه*
۴۲۰	۲۲۵	۱۶۲۰	۲۰۰	M1-0-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۲۵	۱۶۲۰	۲۰۰	M1-20-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۲۵	۱۶۲۰	۲۰۰	M1-40-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۲۵	۱۶۲۰	۲۰۰	M1-60-T <sub>7,28,90</sub>
۴۵۰	۲۰۰	۱۶۰۰	۲۸۰	M2-0-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۰۰	۱۶۰۰	۲۸۰	M2-20-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۰۰	۱۶۰۰	۲۸۰	M2-40-T <sub>7,28,90</sub>
	۲۰۰	۱۶۰۰	۲۸۰	M2-60-T <sub>7,28,90</sub>
۳۹۰	-	۱۷۵۰	۱۸۰	M3-0-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۷۵۰	۱۸۰	M3-20-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۷۵۰	۱۸۰	M3-40-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۷۵۰	۱۸۰	M3-60-T <sub>7,28,90</sub>
۴۰۰	-	۱۵۵۰	۲۸۰	M4-0-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۵۵۰	۲۸۰	M4-20-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۵۵۰	۲۸۰	M4-40-T <sub>7,28,90</sub>
	-	۱۵۵۰	۲۸۰	M4-60-T <sub>7,28,90</sub>

\* شناسه از چپ به راست به ترتیب نشان دهنده نوع طرح اختلاط (چهار طرح اختلاط به ترتیب M4, M3, M2, M1)، درصد ریزدانه (۰، ۲۰،

۴۰ و ۶۰ درصد) و تاریخ عمل آوری بر حسب روز (۷، ۲۸ و ۹۰ روز). \* فاکتور سیمان: مجموع مقدار رس و سیمان در هر مترمکعب.

## ۲-۲-۲- روش ساخت

پلاستیکی در قالب های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر ساخته شود.

به منظور نیل به اهداف این تحقیق و انجام آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری، لازم بود تا تعدادی از نمونه های بتن همچنین جهت بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم و بررسی عمق نفوذ آب از قالب های استوانه ای  $10 \times 10$  سانتی متر استفاده شد.

### ۲-۳-۳- آزمایش‌ها

#### ۲-۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌های مکعبی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، توسط دستگاه جک بتن شکن و طبق استاندارد ASTM C 109 با سرعت بارگذاری ۰/۳ مگا پاسگال بر ثانیه انجام شد.

#### ۲-۳-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد ASTM C 496، به روش دو نیمه شدن (برزین)، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن پلاستیک ساخته شده با سنگ‌دانه ۱۶۰۰، ۱۶۲۰ و ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه صورت گرفت. در این آزمایش، نمونه به صورت افقی در زیر دستگاه قرار داده شده و نیروی P بر آن وارد می‌شود تا نمونه دچار گسیختگی گردد. مقاومت کششی بتن از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$F = \frac{2.P}{\pi.D.L} \quad (1)$$

به طوری که، F: مقاومت شکاف خوردگی بتن، D: قطر نمونه استوانه‌ای، L: ارتفاع نمونه استوانه‌ای و P: نیرویی که باعث شکاف نمونه می‌گردد.

#### ۲-۳-۳- نفوذ آب

عمق نفوذ آب در بتن پلاستیک به خصوصیات ذاتی مصالح تشکیل‌دهنده آن و ناپیوستگی‌ها وابسته است. افزایش عامل کلوئیدی، افزایش نسبت سیمان به آب و استفاده از مصالح افزودنی مناسب، سبب کاهش میزان نفوذپذیری در بتن می‌شود [۱۱]. در این آزمایش، میزان عمق نفوذ در نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده بتن پلاستیک، زیر بار آبی ۱۰ سانتی‌متر بررسی شد. این آزمایش، بروی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با سنگ‌دانه ۱۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب (طرح اختلاط ۴) با رس‌های مختلف و برای عیارهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری انجام شد. جهت انجام آزمایش، ابتدا سطحی از نمونه که آب بر آن اثر می‌کند، با برس سیمی کمی زبر گردیده و سپس زیر یک بار آبی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر به مدت سه شبانه‌روز (۷۲ ساعت) قرار گرفت. پس از گذشت زمان تعیین شده، نمونه‌ها از طول به دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب در آن‌ها اندازه‌گیری شد.

جهت تولید یک مخلوط مشخص از بتن پلاستیک، ابتدا مواد کلوئیدی مورد استفاده در آن مخلوط به مدت ۴۸ ساعت در مقداری از آب طرح اختلاط در درون ظرف‌های بسته (برای جلوگیری از تبخیر)، خیس‌انده شدند. این مرحله از عملیات اختلاط در کارهای ساخت بتن پلاستیک در کارگاه‌های سده‌سازی نیز رعایت می‌شود و هدف از انجام آن، عمل‌آوری کانی‌های رس در محیط آبی و رسیدن آن‌ها به تعادل شیمیایی در سطح بلورها است [۱۶]. سپس برای تولید مخلوط و ساخت نمونه‌ها، خمیر به دست آمده از خیس‌اندن رس به همراه باقیمانده آب طرح به صورت گل درآمده و به سنگ‌دانه‌ها و سیمان اضافه شد. پس از آماده شدن مخلوط و رسیدن آن به یکنواختی لازم، اسلالمپ بتن پلاستیک اندازه‌گیری شد. شایان‌ذکر است که جهت ساخت نمونه‌ها در قالب‌های مکعبی، بتن‌ریزی در دو لایه و برای قالب‌های استوانه‌ای در سه لایه انجام شد. پس از ریختن هر لایه عملیات فشرده‌سازی و تراکم با میله فلزی صورت گرفت. قالب‌ها پس از ۲۴ ساعت باز شده و کل نمونه‌ها تا زمان آزمایش در داخل حوضچه آب قرار داده شده و با شرایط یکسان دمایی با دو تکرار عمل‌آوری گردیدند. بنابراین در این تحقیق، ۹۶ نمونه مکعبی برای تعیین مقاومت فشاری، ۴۸ نمونه استوانه‌ای به منظور تعیین مقاومت کششی دو نیم شدگی، ۱۶ نمونه استوانه‌ای به منظور تعیین عمق نفوذ آب و ۶ نمونه برای تعیین میزان جذب آلاینده بتن بنتونیتی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

### ۲-۳-۲- روش عمل‌آوری

اصولاً عمل‌آوری نمونه‌ها به دو منظور انجام می‌شود: (۱) برای فراهم آوردن رطوبت کافی برای انجام واکنش‌های شیمیایی سیمان که نیاز به رطوبت دارد تا از ایجاد ترک‌های پلاستیک روی سطح بتن جلوگیری شود و (۲) برای ایجاد دمای مناسب و مقابله با مسائل حرارتی بتن [۲۴]. با توجه به اینکه در این تحقیق هدف از انجام آزمایش‌ها، مقایسه بین رفتار مکانیکی بتن‌های پلاستیک ساخته شده از رس با عیارهای متفاوت آن بوده است، لذا برنامه آزمایش‌ها چنان تعیین شد که تمامی نمونه‌های ساخته شده در شرایط یکسان و در محلی معین در آزمایشگاه بدون در نظر گرفتن روشی خاص، فقط در داخل حوضچه آبی و با دمای ثابت برای عمل‌آوری نگهداری شوند.

### ۲-۳-۴- اسلامپ

در بتن پلاستیک، اسلامپ و یاروانی بتن تازه می‌تواند نقش زیادی در ایجاد مشکلات اجرایی و یا جلوگیری از بروز آن‌ها داشته باشد. آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C 143-90، روی نمونه‌های بتن صورت پذیرفت. اسلامپ بتن در این آزمایش با استفاده از فرمول (۲) تعیین و به نزدیک‌ترین مضرب ۵ میلی‌متر گرد می‌شود:

$$H_m - H_s = \text{اسلامپ} \quad (۲)$$

$H_m$  و  $H_s$  به ترتیب عبارت‌اند از ارتفاع قالب و ارتفاع بتن پس از برداشتن قالب بر حسب میلی‌متر.

### ۲-۳-۵- جذب عنصری

به منظور بررسی قابلیت جذب عنصری خاک رس مورد استفاده در تهیه بتن، از نمک‌های  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{CdCl}_2$  خریداری شده از شرکت مرک به ترتیب به عنوان ماده جذب‌شونده و الکترولیت استفاده گردید. جاذب مورد نظر (خاک رسی بتونیت) به منظور یکنواختی در اندازه ذرات، پس از آسیاب شدن، از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شد. سپس ۰/۱ گرم از خاک رسی را پس از توزین به ظرف سانتریفیوژ انتقال داده و برای هر کدام از حالت‌های مختلف غلظت محلول، ۱۰ سی‌سی از جذب‌شونده کادمیوم به آن اضافه شد. پس از تهیه سوسپانسیون ۱ درصد از جاذب و جذب‌شونده (محلول ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  حاوی غلظت‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم) به میزان سه تکرار برای هر غلظت، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد لرزانده شدند و پس از سانتریفیوژ شدن، محلول رویی جهت اندازه‌گیری کادمیوم باقیمانده در محلول با استفاده از دستگاه اتمیک، جمع‌آوری شد. مقدار کادمیوم جذب‌شده از تفاوت مقدار کادمیوم اولیه و کادمیوم باقیمانده در محلول محاسبه شد. مقدار عنصر سنگین در حالت تعادل به کمک معادله  $Q = (C_0 - C_v/m)V$  محاسبه گردید [۲۵]. در این معادله  $Q$  میلی‌گرم عنصر جذب‌شده بر گرم رس،  $C_0$  و  $C_v$  به ترتیب غلظت اولیه و ثانویه فلز،  $m$  وزن رس بر حسب گرم و  $V$  حجم مخلوط واکنش می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خصوصیات اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن‌ها بر اساس چهار تیمار متفاوت سنگ‌دانه، چهار مقدار رس (صفر، ۲۰، ۴۰، و ۶۰ درصد) و سه زمان عمل آوری

تنظیم شدند. دانه‌بندی تیمار سنگ‌دانه‌ها تقریباً شبیه هم بوده و تنها مقدار مصرفی آن‌ها متفاوت می‌باشد. بر اساس نتایج دانه‌بندی مقدار ماسه بیش‌تر از شن و مقدار لای و رس در تیمار سوم و چهارم صفر در نظر گرفته شد. مقدار لای در تیمار اول و دوم به ترتیب ۲۲۵ و ۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و مقدار رس سنگ‌دانه‌ها نیز برابر با صفر بود. حداکثر اندازه درشت‌دانه نیز کمتر از ۲۰ میلی‌متر بوده است. ضمناً حجم شن در دامنه ۵۰ تا ۶۰ درصد حجم کل بتن لحاظ شده است. به علاوه بتن باید قادر به تحمل انبساطی و تجمع هیدرولیکی، انبساطی گرمایی و انبساطی ایجادشده توسط از دست دادن آب در فرایند شکل‌دهی باشد که بتونیت با حفظ کردن ذرات سیمان و ماسه‌های معلق و ارتقا قابلیت کشش و کاهش نفوذپذیری، منجر به بهبود پایداری مخلوط بتنی خواهد شد. پاشازاده و چکانی زر (۲۰۱۱) پیشنهاد دادند تا برای تهیه بتن پلاستیک بتونیتی، از یک نرخ مصرف ۲۰ درصدی برای گل بتونیت استفاده شود. همین‌طور بیان نمودند که بهتر است حجم ماسه مصرفی در حدود ۵۰ درصد از بتن پلاستیک و اندازه حداکثر درشت‌دانه‌ها محدود به ۲۰ میلی‌متر باشد. از دیگر پیشنهادها آن‌ها این بود که ۵۰ درصد از مصالح سنگی محدود به ۵-۰ میلی‌متر، ۲۰٪ از آن‌ها محدود به ۹/۵-۵ میلی‌متر (شن) و باقی مصالح محدود به ۲۰-۹/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شوند. علاوه بر مصالح فوق، گاهی از مواد افزودنی برای بهبود کارایی و از کربنات برای تسهیل نرخ رسوب‌دهی آن‌ها استفاده می‌گردد [۳ و ۷]. نتایج فاکتورهای مختلف اختلاط بتن مانند اسلامپ و نسبت آب به ریزدانه در جدول ۵ آورده شده است.

در همه نمونه‌ها با افزایش عیار رس، نسبت آب به سیمان و ریزدانه در مقایسه با نمونه شاهد (صفر درصد رس) افزایش یافت؛ بیش‌ترین نسبت آب به ریزدانه مربوط به تیمار اول (سنگ‌دانه ۱۶۲۰ و سیمان ۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) می‌باشد. چنانچه میزان سنگ‌دانه به ۱۵۵۰ کیلوگرم در مترمکعب کاهش و فاکتور سیمان به ۲۸۰ کیلوگرم در مترمکعب افزایش یابد (جدول ۴)، مجدداً با افزایش عیار رس، نسبت آب به سیمان و ریزدانه در مقایسه با نمونه شاهد افزایش می‌یابد، با این وجود این افزایش نسبت به طرح‌های اختلاط قبلی کمتر (از ۰/۷۶ به ۱/۰۸) است؛ که این موضوع می‌تواند منجر به نتایج مقاومت فشاری با مقادیر بالاتری در نمونه‌های طرح گردد. به‌طور کلی دامنه تغییرات نسبت آب به

عملی و کاربردهایی که بتن پلاستیک مقاومت فشاری، کششی و برشی مناسب دارد، می‌توان استفاده نمود [۱۸].

یکی از مشخصه‌های اولیه برای بتن‌ریزی ترمی (Tremie) بتن پلاستیک در یک ترانسه دوغابی (بتن‌ریزی با ناودان یا لوله ترمی)، قابلیت جریان و روانی است. بر طبق تعریف انستیتو بتن آمریکا (ACI)، روانی بتن یعنی قابلیت بتن یا ملات تازه مخلوط شده برای جریان یافتن، که این خاصیت بتن توسط آزمایش اسلامپ به دست می‌آید. اندازه‌گیری روانی یا اسلامپ بتن در زمان به کارگیری آن در لحظات اولیه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و روانی بتن به عنوان یک شاخص ساده و مهم در تکنولوژی بتن تلقی می‌شود. اما اسلامپ نامناسب آن در حالت خمیری موجب بروز مشکلات اجرایی عمده گردیده و استفاده از آن را غیرممکن می‌سازد. شرط اصلی برای این که بتن خواص خود را در اجرا حفظ کند، ریختن صحیح بتن در محل مربوطه است و این امر زمانی میسر می‌شود که بتن، اسلامپ و کارایی مناسبی داشته باشد. برای هر نوع بتن و هر کاربردی مقدار اسلامپ خاصی توصیه شده است. مثلاً در بتن‌های معمولی که با جام ریخته می‌شوند، این مقدار کمتر از ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد و برای بتن پلاستیک در هسته سدها که به صورت ترمی ریخته می‌شوند، معمولاً زیادتر است [۲۶]. با توجه به جدول ۵، اسلامپ مخلوط‌های بتن پلاستیک ساخته شده در این تحقیق در محدوده ۱۹ تا ۲۲ سانتی‌متر است که این اسلامپ در محدوده تعیین شده برای بتن‌های پلاستیک (۲۲ تا ۱۰ سانتی‌متر) قرار دارد [۱۱].

### ۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه بتن، می‌تواند نمایانگر روند فعالیت‌های هیدراتاسیون، پوزولانی و کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن با سنگ‌دانه‌ها باشد. با وجود اینکه بتن پلاستیک دیوارهای آب‌بند نیاز به مقاومت بالا ندارد، ولی مقاومت فشاری آن بایستی به اندازه‌ای باشد که بتن قابلیت تحمل تنش‌های جانبی خاک که در دوران اجرا و چه در دوران بهره‌برداری را داشته باشد. بنابراین، بتن پلاستیک از جمله مصالح با مقاومت پایین (کمتر از بتن معمولی) و دارای شکل‌پذیری بیشتر از بتن معمولی است. معمولاً در بتن پلاستیک از نسبت‌های سیمان به آب پایین استفاده می‌شود. بتن پلاستیک علاوه بر تغییر شکل‌پذیری بالا و نفوذپذیری کم، از

سیمان و ریزدانه، در هر چهار طرح، با افزایش عیار رس آن‌ها، افزایش یافته است که این دامنه در طرح اختلاط با سنگ‌دانه ۱۶۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب در محدوده‌ی ۱/۶۳ تا ۲/۰۷، در طرح اختلاط سنگ‌دانه ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در محدوده‌ی ۱/۱۷ تا ۱/۷۲، در طرح اختلاط با سنگ‌دانه ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در محدوده‌ی ۰/۹ تا ۱/۴ و در طرح اختلاط با سنگ‌دانه ۱۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در محدوده‌ی ۰/۷۶ تا ۱/۰۷ می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر نسبت آب به ریزدانه و اسلامپ طرح‌های

#### اختلاط مختلف

شناسه	اسلامپ (cm)	نسبت آب به ریزدانه*
M1-0-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰	۱/۶۳
M1-20-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰	۱/۷۸
M1-40-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰/۸	۱/۹۸
M1-60-T <sub>7,28,90</sub>	۲۱	۲/۰۷
M2-0-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰	۱/۱۷
M2-20-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰	۱/۲۹
M2-40-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰	۱/۴۷
M2-60-T <sub>7,28,90</sub>	۲۰/۳	۱/۷۲
M3-0-T <sub>7,28,90</sub>	۲۱/۴	۰/۹
M3-20-T <sub>7,28,90</sub>	۲۲	۰/۹۵
M3-40-T <sub>7,28,90</sub>	۲۱/۷	۱/۰۶
M3-60-T <sub>7,28,90</sub>	۲۲	۱/۴
M4-0-T <sub>7,28,90</sub>	۱۹	۰/۷۶
M4-20-T <sub>7,28,90</sub>	۲۱/۶	۰/۸۶
M4-40-T <sub>7,28,90</sub>	۲۱/۶	۰/۹
M4-60-T <sub>7,28,90</sub>	۲۲	۱/۰۸

ریزدانه: سیمان + خاک رس

ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) بیان داشتند که به نظر می‌رسد آب بیش‌تر برای زمان گیرش و مقدار رس، برای بهبود پایداری تغییرشکل دیوارهای آب‌بند ساخته شده با بتن پلاستیک مفید باشد. اما، از طرفی بیش‌تر شدن آب اثر معکوس روی مقاومت بتن پلاستیک دارد. بنابراین آب را بیش‌تر برای چسبندگی مخلوط بتنی و رس را به منظور کاهش مدول الاستیک بتن پلاستیک در طرح



مقاومت برشی متناسب با فشار اعمالی برخوردار می‌باشد و مهم‌ترین تفاوت آن با بتن معمولی وجود رس با خاصیت خمیرایی بالا است [۸]. در شکل ۲، تغییرات مقاومت فشاری بتن با تغییر درصد رس و زمان عمل‌آوری در چهار اختلاط متفاوت بر حسب مگا پاسکال نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده، برای هر چهار نوع طرح اختلاط، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. در همه طرح اختلاط‌ها، عیار رس ۲۰ درصد نسبت به سایر عیارها (به جز صفر درصد)، بیش‌ترین مقاومت فشاری را داراست. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت با درصد رس نسبت عکس و با زمان عمل‌آوری نسبت مستقیم دارد. رس اثر برجسته‌ای روی خواص مکانیکی بتن پلیاستیک خواهد گذاشت؛ به طوری که ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خواص مکانیکی بتن پلیاستیک بتونیتی اظهار داشتند که با افزایش رس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت برشی، و مدول الاستیک بتن پلیاستیک به صورت تدریجی کاهش می‌یابد، اما زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های برشی با افزایش رس، افزایش خواهد یافت [۱۸]. پاشازاده و همکاران (۱۳۸۷) نیز گزارش نمودند که بتن پلیاستیک ساخته‌شده در سد کرخه (۱۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب سنگ‌دانه و ۱۹۵ کیلوگرم در مترمکعب سیمان) و سد اسطور (۱۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب سنگ‌دانه و ۱۵۰ کیلوگرم در مترمکعب سیمان) با درصد رس بتونیت حدود ۳۶ درصد و اسلامپ ۲۰، به ترتیب مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ای برابر با ۳/۰۴ و ۱/۸۶ مگا پاسکال داشتند [۱۱]. از طرفی یک استحکام حداقلی برابر با ۱۰ تا ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (۲/۹۴۲-۰/۹۸۱ مگا پاسکال) برای به‌دست آوردن ماده‌ای با قابلیت کشش و انعطاف‌پذیری مناسب، لازم می‌باشد و بعضاً به دلیل رعایت اصول انعطاف‌پذیری، مقاومت فشاری بتن پلیاستیک می‌تواند حتی تا ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (۳/۹۲۳ مگا پاسکال) افزایش یابد. نسبت آب به سیمان، سنگ‌دانه، نوع سیمان و کیفیت ماسه نیز اثر مهمی روی مقاومت بتن می‌گذارند [۲ و ۳]. مغربی و همکاران (۲۰۱۱) و موسوی و همکاران (۱۳۹۰) مقایسه‌ای بین طرح‌های مختلف اختلاط بتن پلیاستیک ساخته‌شده توسط رس بتونیت از دیدگاه مقاومت فشاری داشتند که نتایج کلی آن‌ها بیانگر افزایش مقاومت فشاری با کاهش درصد رس و افزایش سیمان و سنگ‌دانه می‌باشد [۲۶ و ۲۷]. طاهر شمسی و همکاران (۱۳۸۸) نیز با مقایسه‌ای بین

درصدهای مختلف رس و مقاومت فشاری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری با افزایش درصد بتونیت از ۱۶ درصد به ۳۲ درصد، کاهش بیش‌تری نسبت به افزایش رس از ۳۲ به ۴۸ درصد، از خود نشان خواهد داد [۲۴]. با مقایسه نتایج مقاومت فشاری به‌دست آمده از نمونه‌های بتن پلیاستیک ساخته‌شده با اختلاط‌های مختلف در این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عیار رس از ۲۰ درصد به ۶۰ درصد، از مقاومت فشاری نمونه‌ها کاسته شده است.

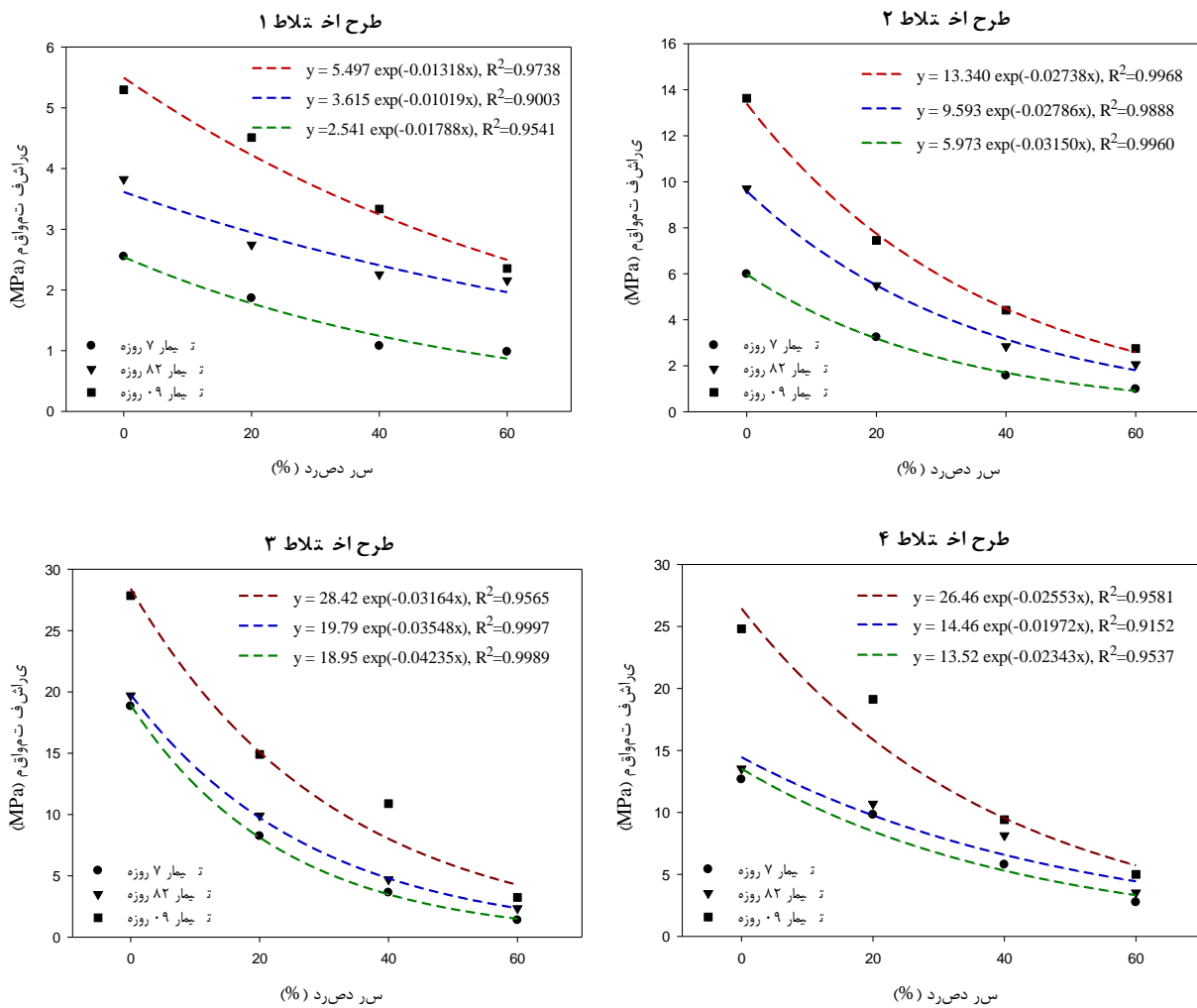
همچنین ترتیب مقاومت فشاری در اختلاط‌های مختلف به صورت  $M4 > M3 > M2 > M1$  می‌باشد. اگر ملاک مقاومت فشاری ایده‌آل را ۱۰ تا ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (۳/۹۲۳-۰/۹۸۱ مگا پاسکال) قرار دهیم، عیار رس ۲۰ درصد و طرح اختلاط ۱ و ۲ مناسب می‌باشند. بنابراین حضور لای سبب کاهش مقاومت و بهبود آن با توجه به محدوده ایده‌آل مقاومت فشاری گردیده است. همان‌گونه که در شکل ۲ قابل مشاهده است، با برآزش توابع نمایی بر نقاط رسم شده می‌توان به روابطی تجربی با دقت بالا برای محاسبه مقادیر مقاومت فشاری با توجه به درصد رس مصرفی دست یافت.

**۳-۲-۱- ارائه روابط تبدیل مقاومت فشاری بتن پلیاستیک**  
همان‌گونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، با استفاده از برآزش تابع خطی بر نقاط رسم شده در نمودارها، روابطی تجربی به‌منظور تبدیل مقاومت فشاری ۷ روزه به مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه به دست آمد. مقادیر  $R^2$  بیش‌تر از ۰/۹۵ نشان‌دهنده دقت روابط ارائه‌شده است.

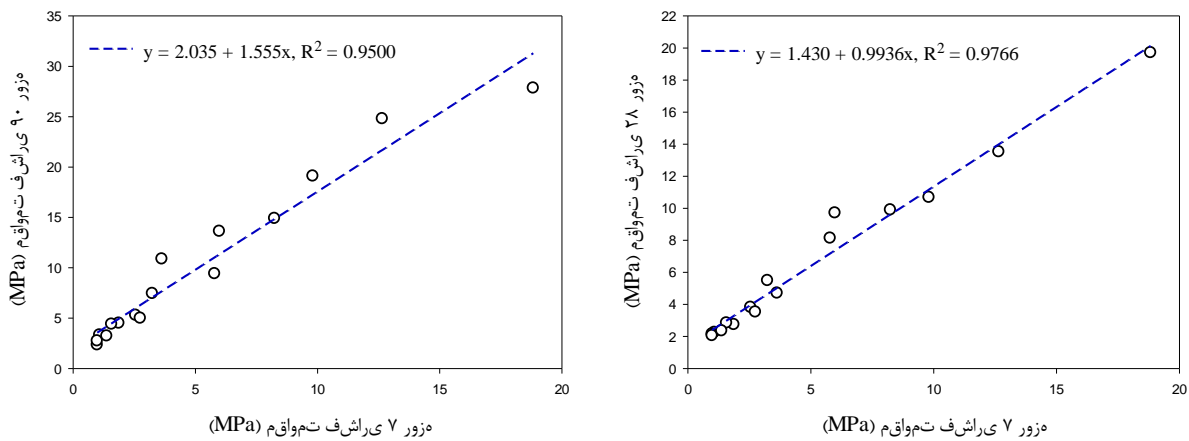
### ۳-۳- مقاومت کششی

همان‌طور که ذکر شد، در این تحقیق برای طرح اختلاط ۱، ۲ و ۳، نمونه‌های استوانه‌ای  $10 \times 20$  سانتی‌متری با زمان عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روز و با روش دو نیمه شدن (برزلین) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتن پلیاستیک در شکل ۴ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل می‌توان دید، با افزایش درصد رس از صفر به ۶۰ درصد، از مقاومت کششی نمونه‌های بتن پلیاستیکی کاسته می‌شود که این روند کاهش در مورد طرح اختلاط ۳ (۲/۲۳ مگا پاسکال کاهش در تیمار ۲۸ روزه و ۲/۶ مگا پاسکال

کاهش در تیمار ۹۰ روزه) نسبت به اختلاط ۲ (۰/۶۳) مگا پاسکال و اختلاط ۱ (۰/۱۹) مگا پاسکال کاهش در تیمار ۲۸ روزه و کاهش در تیمار ۲۸ روزه و ۰/۵۹ مگا پاسکال کاهش در تیمار ۹۰ روزه) بیش تر است.



شکل ۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن با تغییر درصد رس و زمان عمل آوری در چهار اختلاط متفاوت

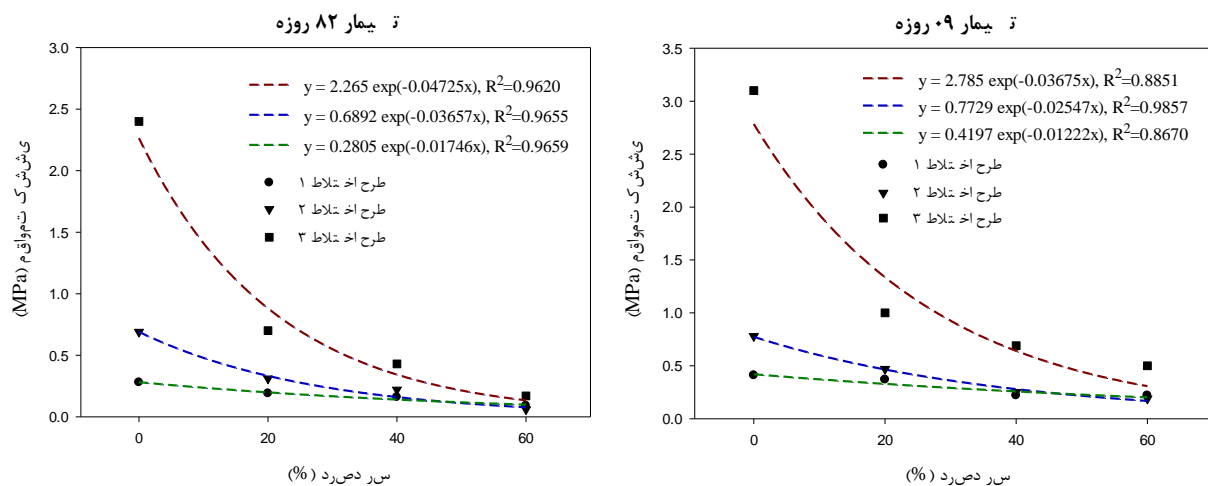


شکل ۳- روابط تبدیل مقاومت فشاری ۷ روزه بتن پلاستیک به مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه

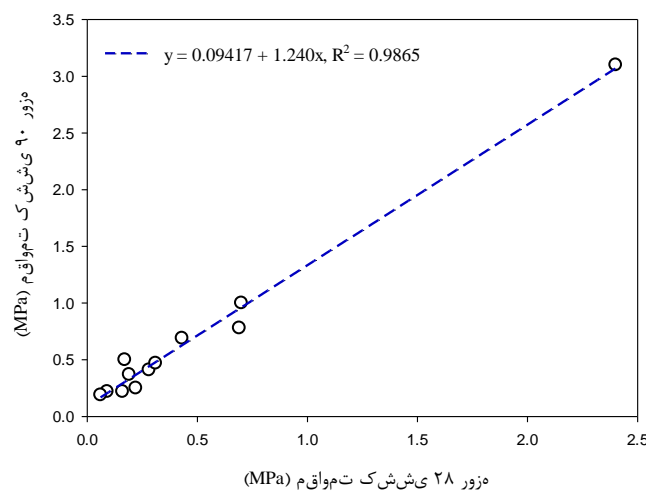
آمده است. همان گونه که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است، با برآزش توابع نمایی بر نقاط رسم شده می توان به روابطی تجربی با دقت بالا برای محاسبه مقادیر مقاومت کششی با توجه به درصد رس مصرفی دست یافت.

**۳-۳-۱- ارائه رابطه تبدیل مقاومت کششی بتن پلاستیک**  
همان گونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است، در مورد مقاومت کششی با استفاده از برآزش تابع خطی بر نقاط رسم شده در نمودار، می توان به رابطه ای تجربی به منظور تبدیل مقاومت کششی ۲۸ روزه به مقاومت کششی ۹۰ روزه دست یافت که مقدار  $R^2$  بیش تر از ۰/۹۸، نشان دهنده ی دقت بالای این رابطه است.

در این آزمایش، نمونه های ساخته شده بتن پلاستیکی با طرح اختلاط ۳، بیش ترین و طرح اختلاط ۱ کمترین مقاومت را داشته اند. اما اختلاف مقادیر مقاومت کششی نمونه های طرح اختلاط ۱، با طرح اختلاط ۲ کم بوده و به ویژه در مورد نمونه های ۴۰ و ۶۰ درصد با عمل آوری ۲۸ روزه، این اختلاف بسیار ناچیز (۰/۱ مگا پاسگال) است. همچنین کاهش مقاومت کششی از نمونه شاهد (صفر درصد رس) به عیار رس ۲۰ درصد شیب بیشتری نسبت به عیار ۲۰ به ۴۰ و عیار ۴۰ به ۶۰ نشان داده است (شکل ۴). به علاوه مقاومت کششی نمونه های با عیار رس ۲۰ درصد در هر کدام از طرح های اختلاط ۱، ۲ و ۳ و در زمان های عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روز، بین ۵/۶ الی ۸/۲ درصد مقاومت فشاری آن ها به دست



شکل ۴- تغییرات مقاومت کششی برزیلین با تغییر درصد رس، در اختلاط های مختلف در زمان عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روز



شکل ۵- رابطه تبدیل مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن پلاستیک به مقاومت کششی ۹۰ روزه

### ۴-۳- ارائه روابط تبدیل مقاومت فشاری به کششی

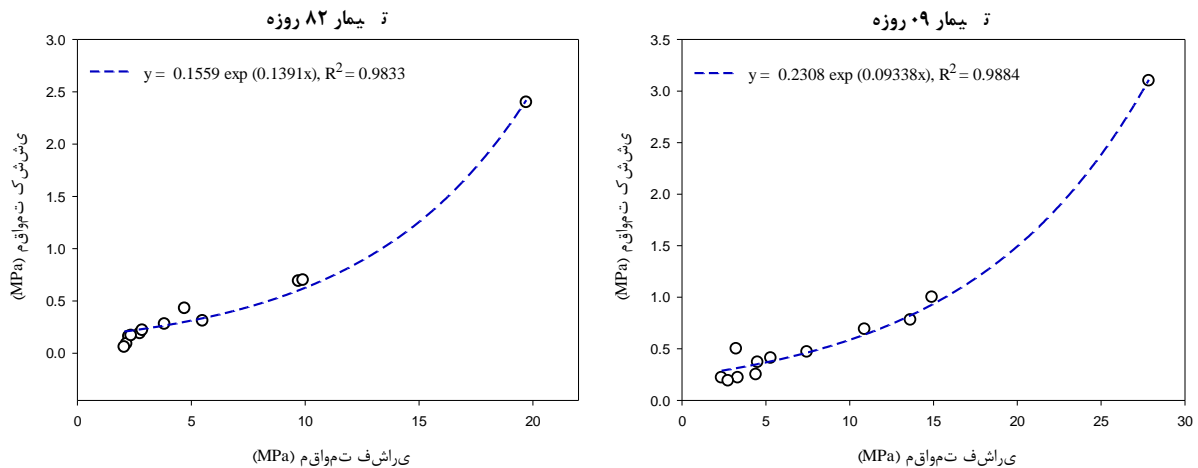
باتوجه به نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری و کششی طرح‌های اختلاط ۱ تا ۳ در دو زمان عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روز، پس از برازش تابع نمایی بر نقاط رسم شده در شکل ۶ روابط تجربی برای تبدیل این مقادیر به یکدیگر به دست آمد. مقادیر  $R^2$  بالای روابط به دست آمده، نشان دهنده دقت بالای آن‌هاست.

### ۵-۳- نفوذ آب

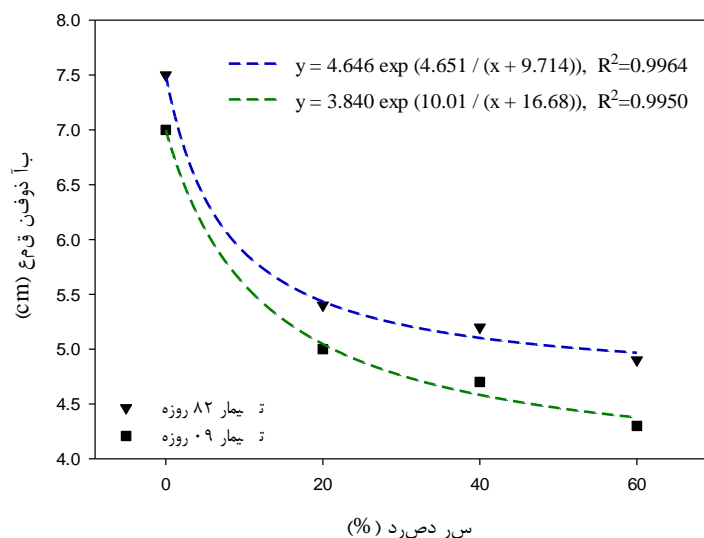
آزمایش نفوذ آب با بار آبی ۱۰ سانتی متر روی نمونه‌های استوانه‌ای و تیمار ۱۵۵۰ کیلوگرم در مترمکعب (طرح اختلاط ۴) صورت گرفت. در شکل ۷، میزان عمق نفوذ آب با توجه به درصد‌های مختلف رس قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که با زیاد شدن

### ۶-۳- جذب سطحی آلاینده توسط رس بنتونیت

آلودگی منابع آب به فلزات سنگین یکی از معضلات زیست محیطی در سطح جهانی است. وجود فلزات سنگین سمی در آب‌های سطحی و زیرزمینی موجب به خطر افتادن زندگی موجودات زنده شده است [۲۹].



شکل ۶- رابطه تبدیل مقاومت فشاری بتن پلاستیک بنتونیتی به مقاومت کششی دو نیم شدگی.



شکل ۷- تغییرات عمق نفوذ آب با تغییر درصد رس، در زمان عمل آوری ۲۸ و ۹۰ روز.

طرح اختلاط ۱ < طرح اختلاط ۲ < طرح اختلاط ۳ < طرح اختلاط ۴ می‌باشد.

۲- نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه ۱۵۵۰ کیلوگرم در مترمکعب نسبت به سنگ‌دانه ۱۷۵۰ کیلوگرم در مترمکعب مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان دادند که این امر می‌تواند به دلیل کمتر بودن نسبت آب به سیمان و ریزدانه و همین‌طور سیمان بیشتر در طرح اختلاط باشد. همچنین نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه ۱۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب نسبت به سنگ‌دانه ۱۶۲۰ کیلوگرم در مترمکعب مقاومت فشاری کمتری نشان دادند که این امر نیز می‌تواند به دلیل بیشتر بودن نسبت آب به سیمان و ریزدانه، لای بیشتر و سیمان کمتر در طرح اختلاط باشد. همین‌طور نتیجه گرفته شد که حضور لای سبب کاهش مقاومت و بهبود آن با توجه به محدوده ایده‌آل مقاومت فشاری گردیده است.

۳- نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود روابط خطی میان مقاومت فشاری ۷ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه با توجه به مقادیر  $R^2$  بیش‌تر از ۰/۹۵ است.

۴- با افزایش درصد رس، از مقاومت کششی نمونه‌های بتن پلاستیکی کاسته می‌شود. زمان عمل‌آوری نسبت مستقیمی با مقاومت کششی دارد که بیش‌ترین هر تیمار مربوط به زمان عمل‌آوری ۹۰ روز می‌باشد. به‌طور کلی مقاومت کششی ۹۰ روزه نمونه‌ها از دیدگاه نوع طرح اختلاط به صورت طرح اختلاط ۳ < طرح اختلاط ۲ < طرح اختلاط ۱ می‌باشد.

۵- نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود روابط خطی میان مقاومت کششی ۲۸ روزه و ۹۰ روزه با توجه به مقادیر  $R^2$  بیش‌تر از ۰/۹۸ است.

۶- با استفاده از تابع نمایی میتوان به رابطه‌ی ای با مقادیر  $R^2$  بیشتر از ۰/۹۸ برای تبدیل مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه به مقادیر مقاومت کششی معادل آنها دست یافت.

۷- با زیاد شدن عیار رس در بتن پلاستیک، از صفر درصد به ۶۰ درصد، عمق نفوذ کاهش پیدا کرده است. این کاهش با توجه به وابستگی نفوذپذیری به خواص ذاتی اجزاء و گسستگی آنها و با توجه به افزایش فاکتور کلونیدی، منطقی است.

۸- خاک بنتونیت، توانایی جذب ۴۰ تا ۶۰ درصد کادمیم را دارد؛ با افزایش غلظت، توانایی جذب به دلیل اشباع شدن

بررسی‌ها نشان می‌دهد که آب‌های سطحی یا زیرزمینی در بعضی از مناطق اطراف منابع آلاینده، در حدود مقادیر ۰/۱ تا ۱ میلی‌گرم بر لیتر به کادمیوم آلوده می‌باشند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای حذف کادمیوم از محلول‌های آبی وجود دارد [۳۰]. امروزه فرآیند جذب سطحی به‌عنوان راهکاری ساده و مفید در تصفیه آب و فاضلاب در بسیاری از موارد عملی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به استفاده از جاذب‌های ارزان‌قیمتی مانند کانی‌های رسی معطوف شده است و مطالعات مختلف قابلیت بالای این جاذب‌های طبیعی را در حذف عناصر سنگین از آب نشان داده‌اند. در این تحقیق نیز توانایی خاک بنتونیت در حذف عنصر سمی کادمیوم از محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفت. جدول ۶، نشان‌دهنده جذب کادمیوم توسط این نوع خاک رس در غلظت‌های اولیه مختلف کادمیوم از محلول‌های آبی است. همان‌طور که از جدول مشخص است، در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم، بنتونیت توانسته ۲۸/۶ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم را جذب کند. در مقایسه جذب کادمیوم از محلول‌های با غلظت ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از کادمیوم مشخص گردید که با افزایش غلظت اولیه کادمیوم، درصد جذب کادمیوم توسط بنتونیت کاهش می‌یابد که این امر ناشی از اشباع شدن سایت‌های جذبی سطح رس‌هاست.

جدول ۶- مقدار جذب سطحی کادمیوم (mg/L) توسط رس بنتونیت

غلظت اولیه (mg/L)	۱۰	۵۰	۱۰۰
جذب سطحی کادمیوم (mg/L)	۴/۹۳	۱۹/۳۹	۲۸/۶

#### ۴- نتیجه‌گیری

اهداف اصلی تحقیق حاضر شامل ارائه و تعیین طرح مخلوط دیوار آب‌بند پلاستیک بر اساس مقاومت فشاری، کششی، عمق نفوذ آب و جذب سطحی آلاینده و بررسی کارایی مصالح رسی برای به‌کارگیری در بتن پلاستیک پرده آب‌بند بودند.

بر اساس هدف‌های موردنظر، روش تحقیق و نتایج بسط داده شد و در زیر نتایج اصلی به‌دست آمده از تحقیق به‌اختصار توضیح داده خواهد شد:

۱- با افزایش عیار رس، نسبت آب به سیمان و رس نیز افزایش می‌یابد؛ به‌طور کلی نسبت آب به سیمان و رس به صورت

Army Engineering Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss.

[10] International commission on large dams (ICOLD). 1985. Filling materials for watertight cut off walls"; International Committee of Large Dams, Paris, 1985, Bulletin No. 51.

[۱۱] پاشازاده، ا. کیا خسروی، م. گنجیان، ن. ۱۳۸۷. تخمین طرح اختلاط بتن پلاستیک مناسب جهت دیوار آب‌بند سدهای خاکی.

چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران، سمنان، ایران.

[12] Asci, Y. Nurbas, M. Acikel, Y.S. 2008. A comparative study for the sorption of Cd (II) by K-feldspar and sepiolite as soil components, and the recovery of Cd (II) using rhamnolipid biosurfactant. Journal of Environmental Management, 88: 383–392.

[13] Lee, S.H. Young, H. Yun, S.T. Lee, Y. 2010. Evaluation of factors affecting performance of a zeolitic rock barrier to remove zinc from water. Journal of Hazardous Materials, 175: 224–234.

[14] Barakat, M. 2011. New trend in removing heavy metals from industrial waste waters. Arabian Journal of Chemistry, 4: 361-377.

[15] Karunaratne, G. P. Chew, S. H. Lee, S. L. Sinha, A.N. 2001 Bentonite-Kaolinite Clay Liner. Geosynthetics International, Vol. 8, No 2.

[16] Stavridakis, E.I. 2005. Presentation and Assessment of Clay influence on Engineering Parameters of Cement-Treated Cldy Mixtures. J.EJGE-0508.

[17] Bagheri, A. R. Alibabaie, M. Babaie, M. 2008. Reduction in the permeability of plastic concrete for cut-off walls through utilization of silica fume. Construction and Building Materials, 22 (6): 1247-1252.

[18] Zhang, P. Guan, Q. Li, Q. 2013. Mechanical Properties of Plastic Concrete Containing Bentonite. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(4): 1317-1322.

[19] Garvin, S. L. Hayles, C. S. 1999. The chemical compatibility of cement bentonite cut-off wall material. Construction and Building Materials, 13 (6): 329-341.

[20] Koch, D. 2002. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. Applied Clay Science, 21(1-2): 1-11.

[21] Naderi, M. 2005. Effect of different constituent materials on the properties of plastic concrete. International Journal of Civil Engineering, 3(1): 10-19.

[22] Tahershamsi, A. Bakhtiary, A. Binazadeh, N. 2009. Effects of clay mineral type and content on compressive strength of plastic concrete. Iranian Journal of Mining Engineering, 4(7):35-42.

سایت‌های جذب، کاهش می‌یابد. علت جذب ظرفیت تبادل

کاتیونی و نیز ساختار ورقه‌ای و اندازه ریز رس می‌باشد.

۹- نتایج کلی بیانگر این نکته می‌باشند که اختلاط‌های با نسبت

سنگ‌دانه کمتر و سیمان بیش‌تر، مقاومت فشاری بیش‌تر و

جذب آب کمتری را برای آن نتیجه خواهند داد. بهترین

درصد رس با توجه به مقاومت فشاری و کششی و در نظر

گرفتن مسائل اقتصادی، رس با عیار ۲۰ درصد و طرح اختلاط

۱ و ۲ می‌باشد.

## ۵- مراجع

[1] Davan, M.L. Famouri, J. 1964. The soils of Iran. Iranian Ministry of Agriculture and FAO of the UN. 31p.

[2] Alvarz, J.M. Bernal, L. Alberto, C. Surescu, M. 1982. Gathering and translating by Ahmad Farhadi Langroudi, Moshaver Mahab Qods engineering supervising affair, Ordibehesht 74, plastic concrete properties of Convento Viejo dam flood wall, Chile.

[3] Pashazadeh, A. Kia Khosravi M. and Ganjian N. 2009. Estimating Plastic Concrete Mixing Plan Suitable for Flood Wall of Mud Dams, 14th Civil Students Conference and First International Civil Students Conference, Semnan. Iran.

[4] Ryan, C.R. 1985. Slurry Cutoff Walls: applications in the control of hazardous waste, Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874, A. I. Johnson, R.K. Frobel, N.J. Cavalli, C. B. Pettersson, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. Pp. 9-23.

[5] REMR. 1992. Design procedure for plastic concrete cut off walls. Technical Note GT-SR-1.3.

[6] Thomas, W. Kauschinger. J.L. Perry E. B. 1991. Plastic concrete cut off walls for earth dams. US Army Corps of Engineers, Technical Report No. REMR-GT-15, Waterways Experimental station, Vicksburg, MS, P71.

[7] Pashazadeh, A. Chekaniazar, M. 2011. Estimating an Appropriate Plastic Concrete Mixing Design for Cutoff Walls to Control Leakage under the Earth Dam. Journal of Basic and Applied Scientific Research, 1(9): 1295-1299.

[۸] سروش، م.، مجتهدی، ا.ف. ۱۳۸۱. کلیات طراحی و اجرای

دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک در پی سدها. مجموعه مقالات

کارگاه آموزشی و تخصصی مسائل خاص طراحی سدها و

تشکیلات وابسته به آن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

[9] Kahl, T. Kauschinger, J.L. and Perry, E.B. 1991. Plastic concrete cutoff walls for earth dams. U.S.

[23] International commission on large dams (ICOLD). 1995. Filling materials for watertight cut-off walls. Buletine 51.

[۲۴] طاهرشمسی، ا. بختیاری، آ. بینازاده، ن. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع و میزان کانی‌های رسی بر مقاومت فشاری بتن پلاستیک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره چهارم، شماره هفتم، سال ۱۳۸۸. صفحه ۳۵ تا ۴۳.

[25] Chatterjee, S, Bhattacharjee, I, Chandra, G. 2010. Biosorption of heavy metals from industrial waste water by *Geobacillus thermodenitrificans*. J Hazard Mater. 175: 1.

[۲۶] موسوی، ح. صبورکازران، ح. فغفور، م. ۱۳۹۰. موسوی، ح. صبورکازران، ح. فغفور، م. ۱۳۹۰. استفاده از بتن پلاستیک با دانه‌بندی مشخص مصالح سنگی در اجرای بتن لاینینگ. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، بهمن ماه

[27] Maghrebi, M.F. Azad, D. Mousavi, S. Kazeran, H.S. 2011. Using plastic concrete for canal lining. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 15-23 October, Tehran, Iran

[28] Xuan, Z. Wolfgang, H. Guichun, Y. 2002. Elimination of cadmium contamination from drinking water. Water Research, 36: 851-858.

[29] Rao, K.S. Mohapatra, M. Anand. S. Venkateswarlu, P. 2010. Review on cadmium removal from aqueous solutions, International Journal of Engineering, Science and Technology, 7: 81-103.

## Effects of Mix Design and Curing Time on Compressive and Tensile Strength of Bentonite Plastic Concrete

Hakime Abbaslou\*

Assistant professor in Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

Amir Tavana Amlashi

MSc. student of Hydraulic structures, Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

Alireza Ghanizadeh

Assistant professor in Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

Sohrab Azemi

MSc. student of Hydraulic structures, Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

### Abstract

Plastic concrete is usually used to build impermeable barriers (cut-off walls), contaminated sites, or leakage control of foundations with high penetration in dams. Effect of clay dosage, aggregate and cement were studied on compressive and tensile strength of bentonite plastic concrete. There was a tendency to reduce the compressive and tensile strength with increasing water to fine fraction and reducing cement and aggregate amounts. In addition, the plastic concrete showed a time-dependent behavior and changes in the mechanical properties of bentonite concrete will be improved by adding silt and clay adsorbents which could be used in water leakage with high contamination. The evaluation of water penetration depth in samples with ages of 28 and 90 days showed a decrease in penetration with increase in clay dosage and curing time. Also, the result of cadmium adsorption by bentonite clay showed that the clay can be effective in terms of water leakage with high pollution conditions. The most appropriate clay amount with respect to the economic issues, compressive and tensile strength would be 20% clay dosage and mix design containing silt and also  $200 \text{ kg/m}^3$  cement. Also, in this study some equations have been developed to predict the 28 and 90 days compressive strength of plastic concrete based on the 7 days compressive strength, and 90 days tensile strength based on the 28 days tensile strength. The  $R^2$  more than 0.95 for the developed equations confirms the accuracy of these relations.

**Keywords:** Plastic Concrete, Compressive Strength, Tensile Strength, Water Penetration Depth, Metal Adsorption.

---

\* Corresponding Author: Abbaslou@sirjantech.ac.ir