



بررسی رفتار مکانیکی بتن پلاستیک تحت شرایط سه محوری و تک محوری

جعفر بلوری بزاز^۱، علیرضا عدالتی^۲

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

bolouri@ferdowsi.um.ac.ir

خلاصه

جهت انجام هر گونه تحلیل بر روی مجموعه‌ی سد، پی و دیوار آب‌بند، توجه به رفتار مکانیکی مصالح بکار رفته در دیوار آب‌بند که در آن به اثرپذیری از فشار همه جانبه توجه شده باشد، یک ضرورت است. شرایط طبیعی بتن پلاستیک در دیوار آب‌بند، شرایط سه محوری خاک بوده و به همین دلیل انجام آزمایشات سه محوری بر روی بتن پلاستیک ضروری است. تحقیقات فعلی عمدتاً با توجه به رفتار تک محوری بوده است. در این پژوهش ارتباط بین مقاومت و مدول الاستیسیته بتن پلاستیک که از آزمایش سه محوری بدست آمده است و رفتار تک محوری آن مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته و رابطه بین آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش سه محوری به روش تحکیم یافته زهکشی نشده، در سن ۴۲ روزه انجام گرفته و نمونه‌ها تحت تنش‌های همه جانبه متفاوت ۱/۵، ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع قرار گرفته‌اند. نتایج مشخص کننده تغییر رفتار بتن پلاستیک از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر در سطوح پایین فشار همه جانبه می‌باشد. مشخصات مکانیکی بتن پلاستیک از جمله مقاومت و مدول الاستیسیته تک محوری و سه محوری و تأثیر فشار جانبی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سه محوری بتن پلاستیک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. با استفاده از نتایج آزمایش سه محوری، رابطه مقاومت فشاری تک محوری و تنش‌های اصلی در بتن پلاستیک تعیین شده است.

کلمات کلیدی: بتن پلاستیک، آزمایش تک محوری، آزمایش سه محوری، مقاومت فشاری، ضریب تغییر شکل

۱. مقدمه

مهار و کنترل نشت آب در سازه‌های آبی مختلف از جمله پی سدها و سدهای زیرزمینی، از اهمیت بالایی برخوردار است. از مؤثرترین روش‌های آب‌بندی پی، می‌توان به احداث جدارهای آب‌بند انعطاف‌پذیر از جنس بتن پلاستیک اشاره نمود که با رشد تکنولوژی ساخت این دیوارها استفاده از آن‌ها روز افزون شده است.

در بتن پلاستیک علاوه بر مصالح مورد استفاده در بتن معمولی یعنی شن، ماسه، سیمان و آب، از نوعی رس به نام بنتونیت برای کاهش ضریب ارتجاعی و افزایش شکل‌پذیری آن به منظور تشابه با رفتار توده خاک یا سنگ ضعیف واقع در پی سدها، استفاده می‌گردد. طبق بررسی‌های انجام شده، در خصوص طرح اختلاط و خصوصیات مکانیکی بتن پلاستیک اطلاعات محدودی وجود دارد. اکثر این اطلاعات برگرفته از آزمایشات تک محوری بر روی بتن پلاستیک بوده و شامل مقاومت، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری آن می‌باشد. از طرفی رفتار مکانیکی اکثر مصالح خاکی، تابعی از فشار همه جانبه بوده و تحت فشارهای جانبی مختلف مقاومت‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. شرایط متغیر بودن فشار همه جانبه در اکثر مثال‌های عملی وجود دارد بنابراین جهت انجام هر گونه تحلیل بر روی مجموعه سد، پی و دیوار آب‌بند توجه به رفتار مکانیکی مصالح بکار رفته در دیوار آب‌بند که در آن به اثرپذیری از فشار همه جانبه توجه شده باشد یک ضرورت است.

در این پژوهش سعی گردیده با شبیه‌سازی واقعی دیوار آب‌بند در آزمایشگاه و با انجام آزمایش‌های سه محوری به روش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) ضمن اندازه‌گیری مقاومت برشی بتن پلاستیک، رابطه بین مقاومت تک محوری و سه محوری مورد ارزیابی قرار گیرد.

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ کارشناس ارشد عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. طرح اختلاط

در این پژوهش بتن پلاستیک با مقدار سنگدانه ثابت ساخته شده، که به منظور طرح اختلاط اولیه آن از گراف‌های ترابی استفاده گردیده است [۱]. در هنگام ساخت بتن پلاستیک این طرح‌ها اندکی تغییر یافته است. طرح‌های اختلاط نهایی در جدول شماره ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به موضوع تحقیق سعی گردیده پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر رفتار مکانیکی بتن پلاستیک (منحنی تنش - کرنش) دارند، مورد بررسی قرار گیرند. از این رو ۲۰ طرح مختلف شامل پنج مقدار سیمان متفاوت (۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰) کیلوگرم بر متر مکعب، سه نسبت وزنی بنتونیت به سیمان (۰/۲۵، ۰/۴/۵۵ و ۰/۷) برای تحقیق انتخاب گردید. پارامترهایی نیز ثابت در نظر گرفته شدند که سعی شد مقادیر آنها کاربردی باشند به همین دلیل در انتخاب آنها کارهای عملی انجام شده و مسائل اجرایی مدنظر قرار گرفت. این پارامترها عبارتند از، جنس مصالح مصرفی و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها. از هر طرح اختلاط نمونه‌های استوانه‌ای لازم تهیه شده و بر روی آنها آزمایش تک محوری و سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) انجام شد... همچنین اسلامپ‌های ارائه شده در جدول در محدوده ۰/۵ ± سانتیمتر اندازه‌گیری شده‌اند.

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	آزمایش	سیمان (kg)	B/C	بنتونیت (kg)	آب (kg)	سنگدانه (kg)	اسلامپ (cm)	چگالی (kg/m ³)
1	E100-0.25	100	0.25	25	250	1500	16	1.875
2	E100-0.4	100	0.4	40	260	1500	15	1.9
3	E100-0.55	100	0.55	55	270	1500	15	1.925
4	E100-0.7	100	0.7	70	280	1500	14	1.95
5	E125-0.25	125	0.25	31.25	270	1500	16	1.925
6	E125-0.4	125	0.4	50	280	1500	16	1.955
7	E125-0.55	125	0.55	68.75	290	1500	17	1.98
8	E125-0.7	125	0.7	87.5	300	1500	17	2.01
9	E150-0.25	150	0.25	37.5	290	1500	16	1.97
10	E150-0.4	150	0.4	60	300	1500	16	2.01
11	E150-0.55	150	0.55	82.5	310	1500	17	2.04
12	E150-0.7	150	0.7	105	320	1500	17	2.07
13	E175-0.25	175	0.25	43.75	310	1500	17	2.02
14	E175-0.4	175	0.4	70	320	1500	18	2.06
15	E175-0.55	175	0.55	96.25	330	1500	18	2.1
16	E175-0.7	175	0.7	122.5	340	1500	17	2.13
17	E200-0.25	200	0.25	50	330	1500	17	2.08
18	E200-0.4	200	0.4	80	340	1500	18	2.12
19	E200-0.55	200	0.55	110	350	1500	18	2.16
20	E200-0.7	200	0.7	140	360	1500	17	2.2

۳. ساخت و نگهداری نمونه‌ها

برای ساخت هر طرح اختلاط ابتدا آب طرح را با بنتونیت مخلوط کرده و با تیغه‌ای که قبلاً طراحی و ساخته شده بود، با دور بالا ۲۴ ساعت قبل از ساخت نمونه‌های بتن پلاستیک مخلوط گردید. در هنگام ساخت نمونه‌ها گل روان بنتونیت به داخل میکسر ریخته شده و در حدود ۱ دقیقه بهم زده شد و پس از آن سیمان به این گل روان اضافه شده و پس از ۱ دقیقه مخلوط شدن، شن و ماسه اضافه شد و عمل اختلاط ۷ الی ۱۰ دقیقه صورت گرفته است. برای ساخت نمونه‌های بتنی مورد نیاز در آزمایش تک محوری از قالب‌های استوانه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-C192 [۲] به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر استفاده شده است. با توجه به اینکه دستگاه مورد استفاده برای آزمایش سه محوری همان دستگاه آزمایش سه محوری خاک بوده، لذا تصمیم گرفته شد نمونه‌های بزرگ استوانه‌ای با ابعاد ۱۰ در ۲۰ سانتی متر برای آزمایش سه محوری تهیه شود. قالب‌های مورد نیاز با ابعاد ذکر شده در آزمایشگاه موجود نبود و اقدام به ساخت آنها گردید. برای این منظور و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف از جمله هزینه ساخت قالب‌ها، قالب‌های مورد نیاز از فولاد ساخته شد.



۴. آزمایش تک محوری

برای انجام آزمایش تک محوری، ابتدا سطح نمونه‌ها کلاهیک گذاری شد تا از تمرکز تنش و یا توزیع غیریکنواخت تنش بر روی نمونه‌ها جلوگیری شود. به دلیل این که مقاومت بتن پلاستیک کم است لذا برای کلاهیک گذاری از گچ ساختمانی، رد شده از الک ۶۰۰ استفاده شد. با توجه به توصیه کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) [۳]، که مدول الاستیسیته بتن پلاستیک را ۴ الی ۵ برابر مدول خاک اطراف اطراف توصیه می‌کند لذا در هنگام آزمایش، سرعت بارگذاری در حد خاک‌های ترد نتایج بهتری از نظر مقاومت و مدول الاستیسیته در مقایسه با بتن معمولی به دست می‌دهد. همچنین با در نظر گرفتن توصیه‌های ASTM - D2166 [۴]، سرعت ۰/۰۵ درصد در دقیقه انتخاب شده که برای نمونه‌های با ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر سرعت بارگذاری برابر ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه بدست آمد.

انجام آزمایش به این صورت است که نمونه کلاهیک گذاری شده را زیر جک دستگاه قرار داده و پس از قرار دادن نمونه در راستای قائم و تماس با صفحات بارگذاری، دستگاه را روشن کرده و اطلاعات مربوط به نیرو و تغییر مکان در هر لحظه توسط دستگاه ثبت اتوماتیک ذخیره می‌شود و بدین ترتیب نمودار تنش- کرنش برای نمونه مورد نظر رسم می‌شود.

۵. آزمایش سه محوری

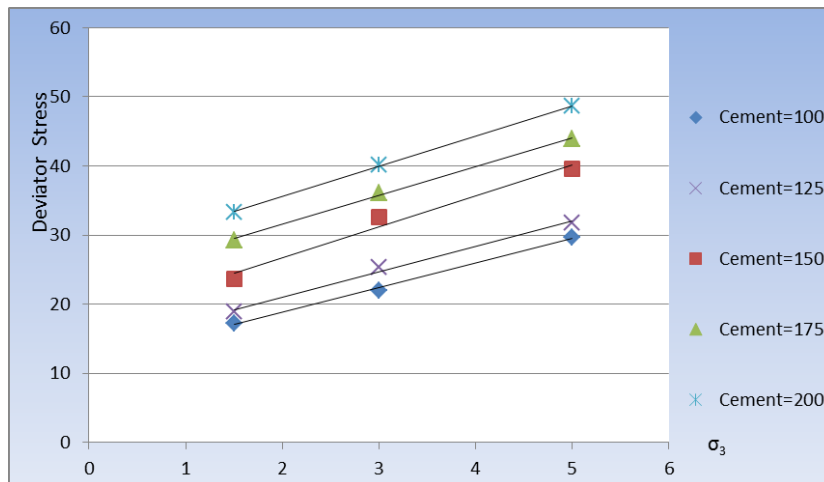
روش انجام آزمایش مطابق روش استاندارد ASTM-D4767 [۵] می‌باشد. پس از خروج نمونه مورد آزمایش از مخزن نگهداری، اقدامات لازم برای جلوگیری از توزیع غیریکنواخت تنش بر روی نمونه و ایجاد یک سطح صاف و عمود بر طول نمونه انجام گردید. بدلیل نرمی و کوچکی نمونه‌های بتن پلاستیک، نمی‌توان از دستگاه برش سنگ برای بریدن نمونه‌ها استفاده کرد. به همین دلیل هنگام ساخت نمونه‌ها، کمال دقت برای ایجاد یک سطح صاف به کار برده شد.

پس از وزن کردن نمونه، بلافاصله آن را داخل غشاء لاستیکی قرار داده و سپس بر روی صفحات تکیه‌گاهی سلول سه محوری بسته می‌شود و با استفاده از حلقه‌های لاستیکی در قسمت جداره صفحات تکیه‌گاهی کاملاً آب‌بندی می‌گردد. قبل از آزمایش تمام سیستم از جمله لوله‌های ارتباطی، پمپ آب و روغن و دستگاه اعمال پس‌فشار و سلول آزمایش هواگیری شده و تمامی گنج‌های اندازه‌گیری روی صفر تنظیم می‌شوند. پس از آماده کردن سلول و پر کردن آب درون محفظه در اطراف نمونه و اطمینان از اشباع بودن نیروی محوری اعمال گردید.

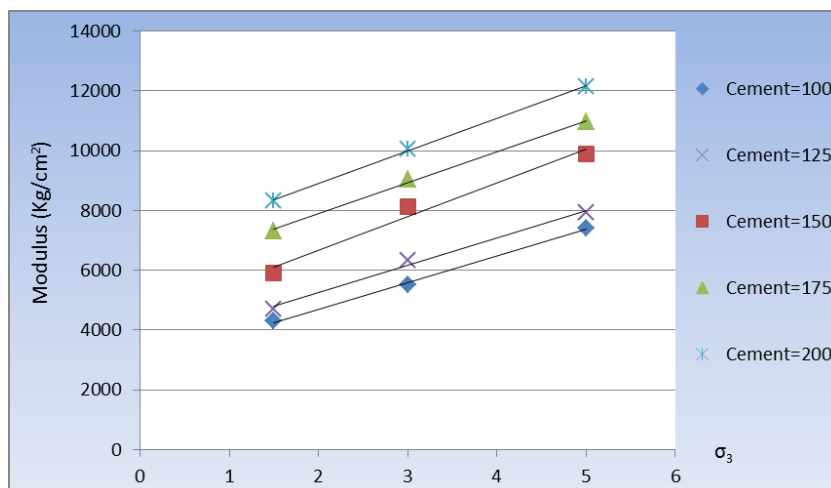
در مرحله اعمال نیروی محوری دقت شد که میله اعمال بار محوری، حلقه اندازه‌گیری بار محوری و محفظه (سلول) نمونه در یک راستا باشند. سپس با تنظیم کردن حلقه اندازه‌گیری تغییر مکان محوری و صفر کردن آن و بستن شیرهای زهکشی، دستگاه روشن شده و بار محوری با ثابت نگاه داشتن فشار سلولی و با کرنش ثابت ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه به نمونه اعمال گردید. در این آزمایش با توجه به بسته بودن شیرهای زهکشی، اضافه فشار منفذی در طول مدت بارگذاری ثبت شد. با اعمال نیرو به نمونه و ثبت کرنش محوری و نیروی اعمالی، می‌توان نمودار تنش - کرنش نمونه را رسم کرد. اعمال بار تا جایی ادامه می‌یابد که کرنش به ۵ الی ۱۰ درصد برسد و یا حداکثر تنش انحرافی به دست آمده و کاهش آن مشاهده گردد.

۶. اثر تنش همه‌جانبه

انتظار می‌رود که در صورت وجود تنش همه‌جانبه بر روی یک جسم ایزوتروپیک تغییر شکل‌ها محدود شده و می‌توان انتظار داشت که مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته جسم بالاتر رود. همانطور که از اشکال ۱ و ۲ مشخص است با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت و مدول الاستیسیته نمونه افزایش می‌یابد به طوری‌که افزایش تنش همه‌جانبه از $1/5 \text{ kg/cm}^2$ به ۳ باعث افزایش تنش اصلی حداکثر به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد و افزایش مدول الاستیسیته به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد می‌گردد. روند افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته با افزایش تنش همه‌جانبه کاهش می‌یابد به طوری‌که افزایش فشار جانبی از 3 kg/cm^2 به ۵ باعث افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مقاومت در سن ۴۲ روز می‌شود.



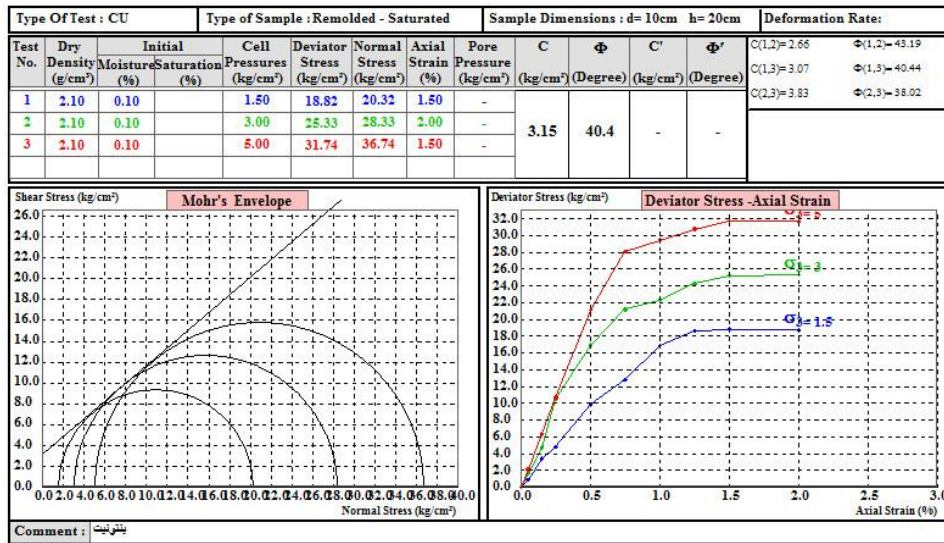
شکل ۱- اثر افزایش فشار همه جانبه بر مقاومت فشاری بتن پلاستیک



شکل ۲- اثر افزایش فشار همه جانبه بر مدول الاستیسیته بتن پلاستیک

۷. روابط

شکل ۳ مقاومت فشاری بدست آمده از آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌های طرح اختلاط E125-0.25 را در سن ۴۲ روزه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تحت شرایط سه محوری پس از رسیدن به حداکثر مقاومت و با ادامه روند بارگذاری با افزایش کرنش، تغییر زیادی در مقاومت فشاری نمونه رخ نمی‌دهد. این مطلب معرف شکل پذیر بودن بتن پلاستیک تحت شرایط سه محوری است و شکل پذیری بتن پلاستیک تحت فشارهای جانبی بالاتر بیشتر است. در صورت وجود تنش همه جانبه بر روی یک جسم ایزوتروپیک تغییر شکل‌ها محدود شده و می‌توان انتظار داشت که مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته جسم بالاتر رود. از شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش تنش همه جانبه، تنش انحرافی نهایی و مدول الاستیسیته متوسط بتن پلاستیک افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته متوسط به شیب خط تقریباً مستقیمی از منحنی تنش - کرنش گفته می‌شود که پس از کرنش نسبتاً قابل توجه اولیه در بعضی نمودارها حاصل می‌گردد.



شکل ۳- نتایج آزمایش سه محوری برای نمونه اختلاط مورد بررسی: E125-0.25

تنش های نهایی بر اساس بارگذاری سه محوری و تک محوری به هم ارتباط داده شده اند. در استاندارد ASTM - C801 [۶] رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و تنش های اصلی آزمایش سه محوری به صورت رابطه زیر بیان شده است.

$$\sigma_1 = f'_c + K(\sigma_3)^a \quad (1)$$

که در آن ضرایب K و a ثابت بوده و از آزمایش بدست می آیند. در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایش، ضرایب K و a برابر 0.49 و 9.07 بدست آمده و رابطه ۲ به صورت زیر بیان می گردد.

$$\sigma_1 = f'_c + 9.07(\sigma_3)^{0.49} \quad (2)$$

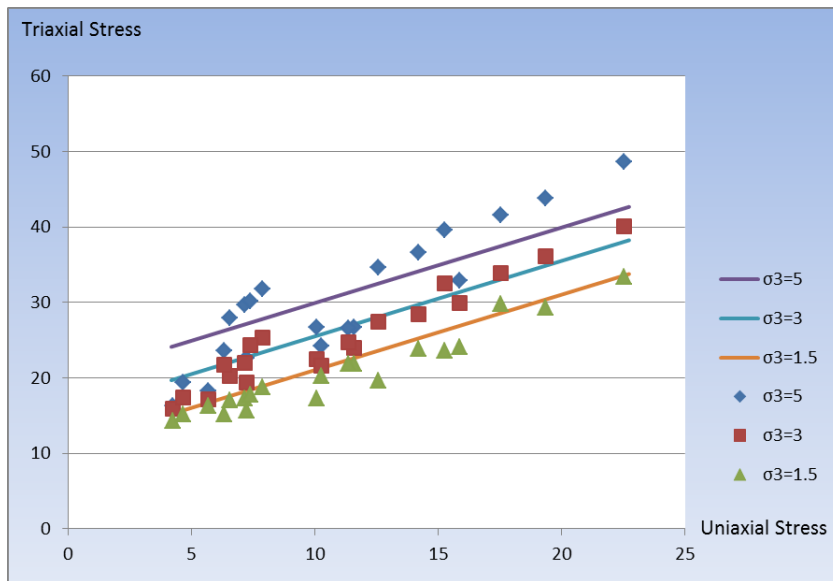
در شکل ۴ رابطه بین مقاومت محدود نشده و تنش های اصلی حداکثر در آزمایش سه محوری برای سن ۴۲ روز در فشارهای جانبی مختلف ارائه شده است. این مطلب از شکل ۴ نیز استنتاج می گردد و ملاحظه می شود که هرچه فشار جانبی افزایش یابد، تنش انحرافی نهایی نیز افزایش می یابد همچنین بتن پلاستیک تحت شرایط سه محوری دارای شکل پذیری و کرنش شکست بالاتری نسبت به حالت تک محوری می باشد. در این شکل نقاط نتایج بدست آمده از آزمایش و خطوط رسم شده نیز، معادله ۲ برای فشارهای جانبی مختلف می باشند. نتیجه اینکه نتایج آزمایش با معادله بدست آمده هم پوشانی قابل قبولی دارند.

همچنین از مقادیر میانگین بدست آمده از ضرایب K'_m و a'_m در مجموع نمونه های بتن پلاستیک در سن ۴۲ روز با استفاده از رابطه ۳ و با داشتن مقاومت فشاری محدود نشده ۴۲ روزه، می توان تنش اصلی حداکثر بتن پلاستیک را با در نظر گرفتن هر مقدار تنش جانبی بدست آورد.

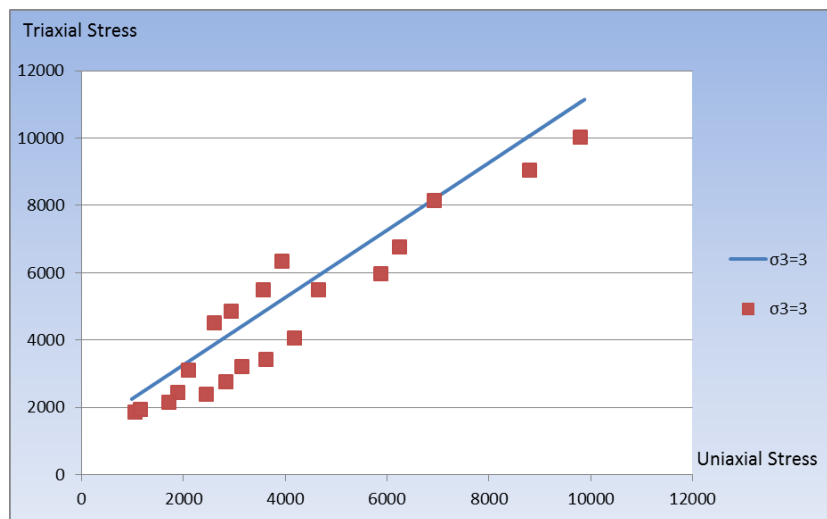
$$a'_{m,42} = 0/98 \quad K'_{m,42} = 432 \quad (3)$$

$$E_1 = E_{42} + 432(\sigma_3)^{0/98}$$

همچنین در شکل ۵ ارتباط بین مدول الاستیسیته تک محوری و سه محوری در سن ۴۲ روز برای تنش همه جانبه ۳ کیلوگرم بر سانتی متر مربع نشان داده شده است. به طوریکه مشاهده می شود با افزایش مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و تنش های اصلی سه محوری نیز افزایش می یابد.



شکل ۴ - رابطه بین مقاومت تک محوری و سه محوری در سن ۴۲ روزه



شکل ۵ - رابطه بین مدول الاستیسیته تک محوری و سه محوری در سن ۴۲ روزه برای $\sigma_3=3$

۸. نتیجه گیری

- منحنی تنش - کرنش بتن پلاستیک با بتن های معمولی متفاوت است. این نوع بتن، در ابتدای بارگذاری دارای رفتار غیرخطی بوده و مانند بتن معمولی دارای شکست ناگهانی نمی باشد.
- افزایش سیمان در طرح اختلاط بتن پلاستیک، بدلیل بالا بردن درجه سیمانناسیون نمونه، باعث افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در حالت تک محوری و سه محوری می شود. هرچه نسبت بنتونیت به سیمان افزایش می یابد از روند افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته به ازاء افزایش سیمان، کاهش می یابد به طوریکه شیب خط افزایش مقاومت در برابر افزایش سیمان، برای مقادیر B/C بیشتر، کمتر است. روند افزایش مقاومت فشاری در برابر افزایش سیمان، برای هر دو حالت تک محوری و سه محوری شبیه به هم می باشد.

- افزایش مقدار بنتونیت باعث کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته می شود. شیب خط کاهش مقاومت در برابر افزایش نسبت B/C برای میزان سیمان برابر ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب تقریباً یکسان است. اما برای مقادیر بالاتر سیمان، اثر کاهش مدول الاستیسیته در حالت تک محوری و سه محوری با افزایش B/C بیشتر است.
- افزایش فشار همه جانبه باعث بسته شدن ترک های ریز نمونه شده و در نتیجه شکست نمونه را به تأخیر می اندازد. افزایش تنش همه جانبه باعث افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و شکل پذیری بتن پلاستیک می شود. روند افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته با افزایش تنش همه جانبه و افزایش سن نمونه کاهش می یابد به طوری که افزایش فشار همه جانبه از 3 kg/cm^2 به 5 kg/cm^2 باعث افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مقاومت در سن ۴۲ روزه می شود.
- پس از بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش، ضرایب a و K برابر با مقادیر زیر بدست آمد.

$$a = 0.49 \quad K = 9.07$$

از مقادیر میانگین بدست آمده از ضرایب a و K در مجموع نمونه های بتن پلاستیک در سن ۴۲ روز با استفاده از رابطه ۴ و با داشتن مقاومت فشاری محدود نشده ۴۲ روزه، می توان تنش اصلی حداکثر بتن پلاستیک را با در نظر گرفتن هر مقدار تنش جانبی بدست آورد.

$$\sigma_1 = f' + 9.07 (\sigma_3)^{0.49} \quad (4)$$

f' برابر مقاومت فشاری محدود نشده ۴۲ روزه می باشد.

همچنین ضرایب a'_m و K'_m برابر مقادیر زیر بدست آمد.

$$a'_{m,42} = 0/98 \quad K'_{m,42} = 432$$

از مقادیر میانگین بدست آمده از ضرایب a'_m و K'_m در مجموع نمونه های بتن پلاستیک در سن ۴۲ روز با استفاده از رابطه ۵ و با داشتن مدول الاستیسیته محدود نشده ۴۲ روزه، می توان مدول الاستیسیته اصلی حداکثر بتن پلاستیک را با در نظر گرفتن هر مقدار تنش جانبی بدست آورد.

$$E_1 = E_{42} + 432 (\sigma_3)^{0/98} \quad (5)$$

۹. مراجع

۱. ترابی، غ، "روش طرح اختلاط بتن پلاستیک با اسلامپ ثابت"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۰.
2. ASTM-C192/C192M-95, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens," Vol. 04.02, pp. 111-117, 1997.
3. ICOLD, "Filing Materials for Watertight Cut-Off Walls," Bulletin No.51, 1985.
4. ASTM D2166 - 06 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil"
5. ASTM D4767 - 11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils
6. ASTM C801-98 Standard Test Method for Determining the Mechanical Properties of Hardened Concrete Under Triaxial Loads