

الله
الرحمن الرحيم
الحق المبرور
الحق المبرور



دانشکده: معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: استخراج معدن

طراحی و فرمولاسیون سیمان حفاری با مقاومت انعطافی بالا در سازندهای
پر فشار میادین نفتی

دانشجو: حمید سلطانیان

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالوکاکائی

استاد مشاور

دکتر عزت ا.. کاظم زاده

رساله دکتری برای اخذ درجه دکتری

ماه و سال انتشار

زمستان ۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه : استخراج معدن

رساله دکتری آقای حمید سلطانیان

تحت عنوان: طراحی و فرمولاسیون سیمان حفاری با مقاومت انعطافی بالا در سازندهای

پر فشار میادین نفتی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک رساله دکتری

ارزیابی گردید و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	عزت ا.. کاظم زاده		محمد عطایی
			رضا خالوکاکائی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	محمد کارآموزیان		سید رحمان ترابی
		علی کیهانی	
		علی نخعی	

تقدیم به مهربان فرشتگانی که لحظات ناب شاد بودن، لذت و غرور دانستن، حسارت
خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز
آنهاست.

تقدیم به خانواده عزیزم؛

تقدیم به مادرم، سراسر، مستی ام، فرشته عزیزتر از جانم.

تقدیم به همسرم، امید بودم. او که سایه مهربانش سایه ساز زندگیم و وجودش شادی

من است.

تقدیر و تشکر

سرسبزترین و لطیف‌ترین سپاس، ستایش و بندگی به درگاه خداوند مهربان، که فرصت زدودن جهالت و رسیدن به سپیده‌دم معرفت و روشنایی را بر بنده عطا فرمود و تقدیر و تشکر از جناب آقای دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالوکاکائی که با راهنمایی‌های ارزنده خود، پژوهش حاضر را پر بار ساختند.

همچنین تشکر صمیمانه از استاد مشاور عزیز، دکتر عزت‌الله کاظم‌زاده که نکات کلیدی را در پژوهش حاضر یادآور شدند و تمامی اساتیدی که در محضر آنها علم و ادب و اخلاق آموختم.

و نیز از مهندس سید علیرضا مرتضوی رئیس گروه پژوهش حفاری و تکمیل چاه و مهندس یاسر پورمظاهری که در انجام دادن آزمایش‌ها همکاری نمودند و از دوستانی که در آماده‌سازی پروژه از اطلاعات و کمک‌هایشان استفاده کردم، کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب حمید سلطانیان دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله دکتری در خصوص طراحی و فرمولاسیون سیمان با مقاومت انعطافی بالا در سازندهای پر فشار میادین ایران با راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالوکاکائی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « University Shahrood of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۴/۱۰/۲۳

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

جهت جلوگیری از تخریب مکانیکی غلاف سیمانی، مشخص گردیده که سیمان‌های با مقادیر بالای نسبت مقاومت کششی به مدول یانگ و مقادیر پایین مدول یانگ در مقایسه با سنگ، بهترین سیستم سیمان‌ها در زمینه دوام مکانیکی می‌باشند. تخریب مکانیکی در نوار سیمان به سبب افزایش قابل توجه در فشار و دمای چاه و یا اعمال بارگذاری از جانب سازند به وقوع می‌پیوندد. افزایش مقاومت فشاری سنگ سیمان نمی‌تواند به عنوان یک عامل اصلی جهت افزایش مقاومت سیمان در جلوگیری از تخریب پوشش سیمانی و در شرایط حادثه دوپهن‌شدگی رشته جداره (نیروی بیرونی مورد نیاز جهت له شدن لوله در غیاب فشار داخلی) و نیز بالا بردن دوام سیمان در ایجاد اتصال بین لایه‌ها در طول عمر چاه محسوب گردد. از آنجا که سیستم‌های رایج سیمان، اگر چه با مقاومت فشاری بالا بودند ولی فاقد خصوصیات لازم و دارای دانسیته‌های متوسط تا کم می‌باشند. لذا بررسی و تحقیق برای دستیابی به سیمان با مقاومت انعطافی بالا (مدول یانگ پایین و نسبت پواسون بالا)، قابلیت انبساط و دانسیته بالا جهت جلوگیری از دوپهن‌شدگی لوله‌های جداره میدان نفتی مارون ضروری می‌باشد. در این راستا، افزودنی‌های مختلفی نظیر هایدنس، گلیسونايت، نانو اکسید آهن، نانو سیلیس و الاستومر ارزیابی شده و بهترین افزودنی که در شرایط واقعی چاه می‌تواند پاسخگوی نیاز صنعت باشد الاستومر با مش ۷۰ می‌باشد. با توجه به فرمولاسیون‌های مختلف انجام شده، دوغاب سیمان شماره دو با افزودنی الاستومر به عنوان بهترین فرمولاسیون برای آزمایش میدانی چاه‌های میدان مارون پیشنهاد شد، بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، دوغاب سیمان دارای وزن مخصوص ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب، خواص رئولوژیکی مناسب، افت‌صافی ۵۵ سی‌سی، انبساط طولی ۰/۲۷٪، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته ۱۷۵۰ پوند بر اینچ مربع، مدول یانگ ۱/۷ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۹، زمان بندش ۱۸۴ دقیقه، مقاومت ژله‌ای ۱۲۵ تا ۲۵۰ پاسکال کمتر از ۲۵ دقیقه و مقاوم در برابر نفوذ گاز می‌باشد.

کلمات کلیدی

سیمان، دانسیته، مدول یانگ، ضریب پواسون، انعطاف‌پذیری، الاستیک، نانو افزودنی، دوپهن‌شدگی

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات پژوهشی

- سلطانیان ح. عطایی م. کاکائی ر. و کاظمزاده ع، (۱۳۹۳) "بررسی کارایی و اثر افزایش کنترل کننده نفوذ گاز بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان حفاری در شرایط واقعی چاه" **مجله**

پژوهش نفت، پذیرش

-Soltanian H. Khalokakaie R. Ataei M. and Kazemzadeh E. (2015) "Fe₂O₃ Nanoparticles Improve the Physical Properties of Heavy-Weight Wellbore Cements: A Laboratory Study" **J. of. Natural Gas Science and Engineering.**, 26, PP 695-701.

-Soltanian H. Khalokakaie R. Ataei M. and Kazemzadeh E. (2015) "Elastomer Additive Improves Heavy Weight Oil Well Cement Stone,s Elastic Propertes: A Laboratory Study" **J. of. Petroleum Science and Technology.**, Accepted

-Soltanian H. Ataei M. Khalokakaie R. and Kazemzadeh E. (2015) "Using an Elastic, Expandable Sealant System for Zonal Isolation Maroon Wells: A Laboratory Study" **J. of. Petroleum Science and Technology.**, Accepted

مقالات کنفرانسی

- سلطانیان ح، عطایی م، خالوکاکائی ر و کاظمزاده ع، (۱۳۹۳)، "بررسی آزمایشگاهی پیدا کردن افزودنی جدید جایگزین کلریدکلسیم برای سیمان کاری چاههای نفت و گاز"، اولین کنفرانس

ژئومکانیک، تهران

- سلطانیان ح، عطایی م و خالوکاکائی ر، (۱۳۹۴)، "اثر زمان انتقال دوغاب سیمان در جلوگیری از

نفوذ گاز به درون ستون دوغاب سیمان"، چهارمین کنگره مهندسی نفت، تهران

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- سیمان کاری چاه	۳
۳-۱- ضرورت تحقیق	۶
۴-۱- تعریف مسأله	۸
۵-۱- اهداف رساله	۱۴
۶-۱- سازماندهی رساله	۱۵
فصل دوم: مشخصات میدان مورد مطالعه و دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری آن	۱۷
۱-۲- مقدمه	۱۸
۲-۲- بررسی لیتولوژی چاه‌های میدان مارون	۱۸
۳-۲- حفاری در میدان مارون	۲۰
۴-۲- تغییرات فشار سازندی در میدان مارون	۲۲
۵-۲- عوامل و دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری	۲۴
۱-۵-۲- طراحی نادرست لوله‌های جداری	۲۵
۲-۵-۲- حرکت لایه‌های نمکی	۲۶
۳-۵-۲- سیمان کاری ضعیف	۲۸
۴-۵-۲- متراکم شدن سنگ مخزن	۳۱
۵-۵-۲- حرکت لایه‌های زمین	۳۳
۶-۵-۲- تمرکز تنش در پی انجام عملیات مشبک کاری	۳۳
۷-۵-۲- هیدرات‌های گاز طبیعی	۳۴
۸-۵-۲- افزایش درجه حرارت و فشار سیال تکمیل چاه	۳۴

۳۵.....	۹-۵-۲ فرسودگی لوله‌ها.....
۳۵.....	۱۰-۵-۲ کاهش ضخامت دیواره آنها.....
۳۵.....	۱۱-۵-۲ خوردگی لوله‌های جداری توسط سولفید هیدروژن.....
۳۶.....	۱۲-۵-۲ ایجاد تنش‌های باقی مانده در لوله‌های جداری.....
۳۶.....	۱۳-۵-۲ خوردگی لوله‌های جداری به‌واسطه استفاده از تثبیت‌کننده‌ها.....
۳۷.....	۱۴-۵-۲ خوردگی مکانیکی لوله‌جداری در حین مانده‌یابی.....
۳۷.....	۱۵-۵-۲ خوردگی داخل لوله‌های جداری به‌واسطه تولید ماسه.....
۳۷.....	۶-۲ جمع‌بندی.....
۳۹.....	فصل سوم: مطالعات انجام شده در خصوص سیمان‌های انعطاف‌پذیر.....
۴۰.....	۱-۳ مقدمه.....
۴۰.....	۲-۳ مطالعات انجام شده توسط هاسکنی.....
۴۱.....	۳-۳ مطالعات انجام شده توسط گودوین و کروک.....
۴۳.....	۴-۳ مطالعات انجام شده توسط ثرکلین.....
۴۴.....	۵-۳ مطالعات انجام شده توسط مارتین بوسما.....
۴۵.....	۶-۳ مطالعات انجام شده توسط والتر موریس.....
۵۰.....	۷-۳ مطالعات انجام شده توسط لیری دلاگی.....
۵۳.....	۸-۳ مطالعات انجام شده توسط رد ریگز.....
۵۴.....	۹-۳ مطالعات انجام شده توسط بوخلیفه.....
۵۴.....	۱۰-۳ مطالعات انجام شده توسط ال سوویدی.....
۵۵.....	۱۱-۳ مطالعات انجام شده توسط سونال.....
۵۶.....	۱۲-۳ مطالعات انجام شده توسط بری وری.....
۵۸.....	۱۳-۳ جمع‌بندی.....

فصل چهارم: طراحی و ساخت قالبها، آماده‌سازی نمونه‌ها و تجهیز دستگاه به ابزارهای اندازه‌گیری	۶۱
۱-۴- مقدمه	۶۲
۲-۴- تهیه نمونه	۶۲
۳-۴- تهیه قالبهای استوانه‌ای مناسب	۶۳
۱-۳-۴- عمل‌آوری نمونه‌ها	۶۵
۲-۳-۴- آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای	۶۶
۳-۳-۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشی	۶۷
۴-۳-۴- تعیین صافی سطح جانبی و انتهایی نمونه	۶۸
۵-۳-۴- اندازه‌گیری طول و قطر مغزه	۶۹
۶-۳-۴- پرداخت کردن سطوح انتهایی مغزه‌ها	۶۹
۷-۳-۴- شرایط رطوبت نمونه	۶۹
۴-۴- تهیه نمونه‌های مستطیلی شکل	۶۹
۵-۴- تجهیز دستگاه مقاومت فشاری به ابزار اندازه‌گیری کرنش‌ها	۷۱
۶-۴- جمع‌بندی	۷۵
فصل پنجم: خصوصیات دوغاب سیمان و روش‌های اندازه‌گیری و عوامل مؤثر بر آن	۷۶
۱-۵- مقدمه	۷۷
۲-۵- گرانروی و آب محتوای دوغاب‌های سیمانی	۷۷
۳-۵- زمان بندش	۷۹
۴-۵- مکانیزم هیدراتاسیون سیمان	۸۲
۵-۵- مقاومت فشاری سیمان	۸۳
۶-۵- دانسیته دوغاب سیمان	۸۵
۷-۵- خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان	۸۵

۸۸	۸-۵- کنترل فیلتراسیون
۹۰	۹-۵- انقباض سیمان
۹۲	۱۰-۵- پایداری دوغاب سیمان
۹۲	۱۱-۵- نفوذ گاز
۹۷	۱-۱۱-۵- پارامترهای مؤثر در جلوگیری از نفوذ گاز
۹۸	۲-۱۱-۵- اندازه‌گیری میزان نفوذ گاز در ستون سیمان
۱۰۰	۱۲-۵- مقاومت انعطافی سیمان
۱۰۵	۱۳-۵- جمع‌بندی
۱۰۶	فصل ششم: انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن
۱۰۷	۱-۶- مقدمه
۱۰۸	۲-۶- روش طراحی آزمایش‌ها
۱۰۹	۳-۶- روش برنامه آزمایش
۱۱۰	۴-۶- هدف آزمایش
۱۱۱	۵-۶- خطاهای آزمایش
۱۱۱	۱-۵-۶- ترازوی دیجیتال
۱۱۱	۲-۵-۶- لوله‌های مدرج
۱۱۱	۳-۵-۶- دما و فشار
۱۱۲	۴-۵-۶- سنسورهای جابجایی
۱۱۲	۵-۵-۶- فرستنده و گیرنده‌های امواج فراصوت
۱۱۲	۶-۵-۶- ویسکومتر
۱۱۲	۶-۶- تجهیزات، مواد مورد نیاز و روش طراحی دوغاب
۱۱۹	۷-۶- ارزیابی دوغاب‌های سیمان

۱۱۹.....	۶-۷-۱- دوغاب سیمان چاه ۲۶۳.....
۱۲۱.....	۶-۷-۲- دوغاب سیمان چاه ۲۶۵.....
۱۲۲.....	۶-۷-۳- دوغاب سیمان چاه ۲۶۶.....
۱۲۴.....	۶-۷-۴- دوغاب سیمان چاه ۱۷۳.....
۱۲۶.....	۶-۷-۵- دوغاب سیمان چاه ۱۷۴.....
۱۲۸.....	۶-۷-۶- دوغاب سیمان چاه ۱۷۹.....
۱۳۰.....	۶-۸- بحث پیرامون کیفیت دوغاب‌های سیمان چاه‌های نفت جنوب
۱۳۱.....	۶-۹- اصلاح فرمولاسیون دوغاب سیمان چاه ۱۷۹.....
۱۳۵.....	۶-۱۰- سنگ سیمان چاه ۱۷۹.....
۱۳۷.....	۶-۱۱- الاستیسیته سنگ سیمان چاه ۱۷۹ و سیستم اصلاح شده
۱۴۴.....	۶-۱۲- طراحی دوغاب سیمان انعطاف‌پذیر با افزودنی‌های الاستیک مختلف
۱۴۵.....	۶-۱۲-۱- بررسی عملکرد هایدنس در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان
۱۵۰.....	۶-۱۲-۲- بررسی عملکرد گیلسونایت در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان
۱۵۵.....	۶-۱۲-۳- بررسی عملکرد نانو ذرات در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان
۱۶۷.....	۶-۱۲-۴- بررسی عملکرد افزودنی الاستومر در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان
۱۹۲.....	۶-۱۳- طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مطلوب
۲۰۹.....	۶-۱۴- جمع‌بندی
۲۱۲.....	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۲۱۳.....	۷-۱- تفسیر و نتیجه‌گیری
۲۱۸.....	۷-۲- نتیجه‌گیری نهایی
۲۲۰.....	۷-۳- پیشنهادات
۲۲۱.....	۷-۴- منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- گسیختگی مکانیکی سیمان، الف- گسیختگی کششی ب- گسیختگی برشی ۱۲
- شکل ۲-۱- جدا شدن سیمان، الف- فضای ریز داخلی ب- فضای ریز خارجی ۱۳
- شکل ۱-۲- نمونه شکل چاه در میدان مارون ۲۱
- شکل ۲-۲- تغییرات فشار سازند در میدان مارون ۲۲
- شکل ۳-۲- دوپهن‌شدگی ناشی از عملیات تزریق سیمان ۳۱
- شکل ۴-۲- فرونشینی سنگ‌های روباره به سبب تولید از مخزن ۳۲
- شکل ۱-۳- منحنی تغییرات مقاومت فشاری در برابر کرنش ۴۷
- شکل ۲-۳- منحنی تغییرات مقاومت کششی در برابر کرنش ۴۸
- شکل ۳-۳- تحلیل تنش در یک سیمان استاندارد ۵۷
- شکل ۴-۳- تحلیل تنش در یک سیمان انعطاف‌پذیر ۵۸
- شکل ۱-۴- قالب‌های استوانه‌ای لاستیکی دما و فشار بالا با متعلقات آن ۶۵
- شکل ۲-۴- دستگاه عمل‌آوری دوغاب سیمان در شرایط دما و فشار بالا ۶۶
- شکل ۳-۴- دستگاه‌های آماده‌سازی نمونه‌ها، الف- چرخ‌های ساینده ب- اره فولادی ۶۸
- شکل ۴-۴- قالب‌های مستطیلی شکل انبساط سیمان ۷۰
- شکل ۵-۴- دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی سیمان ۷۰
- شکل ۶-۴- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری ۷۱
- شکل ۷-۴- استفاده از سنسور جابجایی برای تعیین مدول یانگ نمونه‌های تحت تراکم ۷۲
- شکل ۸-۴- سنسورهای جابجایی برای محاسبه نسبت پواسون ۷۳
- شکل ۹-۴- دستگاه اندازه‌گیری مدول یانگ و نسبت پواسون ۷۴
- شکل ۱-۵- دستگاه نیم‌پندش با قابلیت اعمال دما و فشار ۸۰
- شکل ۲-۵- نمایی از دستگاه کانسیستومتر اتمسفریک ۸۱
- شکل ۳-۵- پروفیل گیرش نمونه دوغاب سیمان ایده‌آل ۸۱
- شکل ۴-۵- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری با استفاده از امواج صوت (UCA) ۸۴

- شکل ۵-۵- منحنی توسعه مقاومت دوغاب سیمان بوسیله دستگاه UCA..... ۸۴
- شکل ۵-۶- ترازوی استاندارد گل..... ۸۵
- شکل ۵-۷- گرانروی سنج دوار فن ۳۵..... ۸۷
- شکل ۵-۸- دستگاه اندازه‌گیری افت‌صافی، الف- استاتیکی ب- دینامیکی..... ۸۹
- شکل ۵-۹- فرآیند هیدراته‌شدن دوغاب سیمان..... ۹۵
- شکل ۵-۱۰- دستگاه اندازه‌گیری نفوذ گاز در سیمان مدل ۷۱۵۰..... ۹۸
- شکل ۵-۱۱- طرح شماتیک دستگاه اندازه‌گیری نفوذ سیالات..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۲- منحنی تنش - کرنش مصالح مختلف..... ۱۰۴
- شکل ۶-۱- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۲۶۶..... ۱۲۳
- شکل ۶-۲- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۱۷۳..... ۱۲۶
- شکل ۶-۳- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۱۷۴..... ۱۲۸
- شکل ۶-۴- آب آزاد دوغاب سیمان چاه ۱۷۹ میدان مارون..... ۱۳۰
- شکل ۶-۵- روند توسعه مقاومت فشاری سیمان چاه ۱۷۹..... ۱۳۳
- شکل ۶-۶- روند توسعه مقاومت فشاری سیمان اصلاح شده..... ۱۳۴
- شکل ۶-۷- نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از سنگ سیمان چاه مارون ۱۷۹..... ۱۳۶
- شکل ۶-۸- مغزه‌های سیمانی گرفته شده از نمونه سیمان چاه شماره ۱۷۹..... ۱۳۷
- شکل ۶-۹- نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه سیمان چاه مارون ۱۷۹..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱۰- نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان چاه مارون ۱۷۹ به کمک دستگاه کنترل خودکار..... ۱۴۱
- شکل ۶-۱۱- نمونه سنگ سیمان تهیه شده از دوغاب سیمان اصلاح شده مارون ۱۷۹..... ۱۴۲
- شکل ۶-۱۲- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه تهیه شده از دوغاب سیمان اصلاح شده..... ۱۴۳
- شکل ۶-۱۳- نمودار توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان با درصد هایدنس افزایش یافته..... ۱۴۷
- شکل ۶-۱۴- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیستم دوغاب سیمان با درصد هایدنس افزایش یافته..... ۱۴۹
- شکل ۶-۱۵- نمودار توسعه مقاومت فشاری سیمان حاوی ۹ درصد گیلسونایت..... ۱۵۲
- شکل ۶-۱۶- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیستم دوغاب سیمان حاوی ۹ درصد گیلسونایت..... ۱۵۴
- شکل ۶-۱۷- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی نانو سیلیس..... ۱۵۹
- شکل ۶-۱۸- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن .. ۱۶۱

- شکل ۶-۱۹- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۶ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن .. ۱۶۳
- شکل ۶-۲۰- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۹ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن .. ۱۶۵
- شکل ۶-۲۱- توقف رشد ترک و اتلاف تنش توسط ذره الاستومر ۱۶۸
- شکل ۶-۲۲- ساختار شماتیک یک الاستومر ۱۶۹
- شکل ۶-۲۳- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۷۲
- شکل ۶-۲۴- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۷۳
- شکل ۶-۲۵- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۷۵
- شکل ۶-۲۶- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۶ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۷۷
- شکل ۶-۲۷- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۷۹
- شکل ۶-۲۸- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۹ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۸۱
- شکل ۶-۲۹- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۸۳
- شکل ۶-۳۰- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر ۱۸۴
- شکل ۶-۳۱- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر با مش ۷۰.. ۱۸۶
- شکل ۶-۳۲- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر با مش ۷۰.. ۱۸۸
- شکل ۶-۳۳- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۳ درصد وزنی الاستومر ۱۸۹
- شکل ۶-۳۴- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۶ درصد وزنی الاستومر ۱۸۹
- شکل ۶-۳۵- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۹ درصد وزنی الاستومر ۱۹۰
- شکل ۶-۳۶- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی الاستومر ۱۹۰
- شکل ۶-۳۷- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی الاستومر با مش ۷۰..... ۱۹۱
- شکل ۶-۳۸- برنامه تهیه دوغاب سیمان مطلوب ۱۹۴
- شکل ۶-۳۹- منحنی تغییرات زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان بر حسب زمان ۱۹۷
- شکل ۶-۴۰- پروفیل پایداری سنگ سیمان سنگین وزن شماره دو ۱۹۹
- شکل ۶-۴۱- نمونه‌های مغزه سیمان سنگین وزن برای اندازه‌گیری میزان پایداری سنگ سیمان ۱۹۹
- شکل ۶-۴۲- منحنی تغییرات مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان شماره دو ۲۰۰
- شکل ۶-۴۳- شرایط و مشخصات فرضی چاه مورد مطالعه ۲۰۱
- شکل ۶-۴۴- منحنی تغییرات فشار منفذی سیمان الاستیک شماره دو در بخش افتصافی آزمایش مهاجرت گاز .. ۲۰۴

شکل ۶-۴۵- منحنی تغییرات فشار منفذی پس از تزریق گاز به داخل دوغاب سیمان الاستیک شماره ۲ ۲۰۶

شکل ۶-۴۶- منحنی تغییرات میزان نفوذ گاز در دوغاب سیمان الاستیک شماره ۲ (منحنی قرمز رنگ) ۲۰۶

شکل ۶-۴۷- تصویر تهیه شده سنگ سیمان حاوی الاستومر با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی ۲۰۷

شکل ۶-۴۸- تصویر تهیه شده سنگ سیمان حاوی نانو اکسید آهن با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی ۲۰۸

فهرست جداول

- جدول ۳-۱- خصوصیات مکانیکی سیمان به دست آمده از کشش ۴۱
- جدول ۳-۲- ویژگی‌های سیستم‌های سیمانی مختلف ۴۳
- جدول ۳-۳- فرمولاسیون دوغاب سیمان و مشخصات نمونه‌های سیمانی ۴۶
- جدول ۳-۴- خواص مکانیکی انواع نمونه‌های سیمانی ۴۸
- جدول ۳-۵- نتایج آزمایش مشبک‌کننده ۴۹
- جدول ۳-۶- فرمولاسیون دوغاب‌های طراحی شده ۵۰
- جدول ۳-۷- خواص رئولوژی دوغاب‌های طراحی شده ۵۱
- جدول ۳-۸- خصوصیات مکانیکی سیمان‌ها با افزودنی منعطف و منبسط‌کننده ۵۲
- جدول ۳-۹- خواص مکانیکی دوغاب‌ها با وزن ۱۶ پوند بر گالن ۵۲
- جدول ۳-۱۰- اثر افزودنی‌های منعطف‌کننده روی نسبت پواسون ۵۳
- جدول ۳-۱۱- مشخصات سیستم‌های مختلف سیمان الاستیک ارائه شده توسط محققین ۵۹
- جدول ۴-۱- انواع مغزه‌گیرها و قطر استاندارد مغزه‌ها ۶۷
- جدول ۶-۱- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۳ میدان مارون ۱۲۰
- جدول ۶-۲- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۵ میدان مارون ۱۲۱
- جدول ۶-۳- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۶ میدان مارون ۱۲۲
- جدول ۶-۴- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۳ میدان مارون ۱۲۴
- جدول ۶-۵- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۴ میدان مارون ۱۲۶
- جدول ۶-۶- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۹ میدان مارون ۱۲۸
- جدول ۶-۷- فرمولاسیون دوغاب سیمان اصلاح شده لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۹ میدان مارون ۱۳۲
- جدول ۶-۸- نتایج رفتار مکانیکی مقاطع تهیه شده از سنگ سیمان چاه ۱۷۹ ۱۳۶
- جدول ۶-۹- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با درصد هایدننس افزایش یافته ۱۴۵
- جدول ۶-۱۰- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد گلیسونایت ۱۵۱
- جدول ۶-۱۱- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد نانو سیلیس ۱۵۷
- جدول ۶-۱۲- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد نانو ذرات اکسید آهن ۱۶۰

- جدول ۶-۱۳- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد نانو ذرات اکسید آهن ۱۶۲
- جدول ۶-۱۴- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد نانو ذرات اکسید آهن ۱۶۴
- جدول ۶-۱۵- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد الاستومر ۱۷۰
- جدول ۶-۱۶- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد الاستومر ۱۷۴
- جدول ۶-۱۷- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد وزنی الاستومر ۱۷۸
- جدول ۶-۱۸- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی الاستومر ۱۸۲
- جدول ۶-۱۹- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی الاستومر با مش ۷۰ ۱۸۵
- جدول ۶-۲۰- انبساط سنگ سیمان با مقادیر مختلف از الاستومر و نانو ذرات اکسید آهن ۱۹۲
- جدول ۶-۲۱- ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان شماره یک برای سیمان کاری لوله‌گذاری "۵/۸" ۱۹۵
- جدول ۶-۲۲- ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان شماره دو برای سیمان کاری لوله‌گذاری "۵/۸" ۱۹۶
- جدول ۶-۲۳- محاسبات مربوط به آزمایش مهاجرت گاز در سیمان الاستیک شماره دو ۲۰۳
- جدول ۶-۲۴- رفتار مکانیکی سیستم‌های مختلف سیمان الاستیک طراحی شده با افزودنی‌های مختلف ۲۱۱

فهرست علائم و اختصارات

افت صافی	:	FL
گرانروی ظاهری	:	A_v
گرانروی پلاستیکی	:	P_v
نقطه تسلیم	:	Y_p
سنتی پواز	:	C_p
تحلیل گر سیمان به کمک امواج فراصوت	:	UCA
دمای ایستای ته چاهی	:	BHST
دمای گردشی ته چاهی	:	BCST
نسبت آب به سیمان	:	WCR
تغییر قطر	:	Δd
تغییر طول	:	Δl
عدد خوانده شده در دور ۶۰۰	:	0600
عدد خوانده شده در دور ۳۰۰	:	0300
عدد خوانده شده در دور ۲۰۰	:	0200
عدد خوانده شده در دور ۱۰۰	:	0100
عدد خوانده شده در دور ۶	:	06
عدد خوانده شده در دور ۳	:	03
کرنش	:	ε
تنش	:	σ
نسبت پواسون	:	ν
مدول یانگ	:	E

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

در عملیات سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز، انواع مختلف سیستم‌های سیمان در فضای حلقوی^۱ بین رشته‌های جداری و سازند قرار می‌گیرند. نگهداری وزن رشته جداری، ممانعت از خوردگی رشته و ایجاد یک اتصال مناسب برای تفکیک ماندگار لایه‌ها در طی عمر چاه مهمترین اهداف این عملیات می‌باشد. در طراحی دوغاب سیمان مورد استفاده بایستی معیارهای متعددی را رعایت کرد. برخی معیارها طولانی مدت بوده و پس از سفت شدن سیمان از اهمیت برخوردار می‌باشند که از جمله می‌توان به مقاومت سیمان سفت شده در برابر حمله شیمیایی آب‌های سازند، پایداری حرارتی و رفتار مکانیکی پوشش سیمانی اشاره کرد. تغییرات ایجاد شده در تنش‌های درون و برون چاهی می‌توانند بر روی سلامت و یکپارچگی مکانیکی پوشش سیمانی تأثیرگذار باشند. عوامل به‌وجود آورنده تغییرات یاد شده شامل تغییر در نرخ تولید، تراکم شدن مخزن، عملیات تعمیر چاه، تحریک چاه برای افزایش تولید، تغییرات حرارتی و فشاری و افزایش فشارهای بیرونی ناشی از خزش سازندهای نمکی می‌باشد. برای جلوگیری از تخریب مکانیکی غلاف سیمانی، مشخص شده که سیمان‌های با مقادیر بالای نسبت مقاومت کششی به مدول یانگ و مقادیر پایین مدول یانگ در مقایسه با سنگ، بهترین سیستم سیمان‌ها در زمینه دوام مکانیکی می‌باشند. مقادیر یاد شده توابعی از شرایط ویژه ته‌چاهی مانند هندسه چاه، خصوصیات لوله‌های جداری، خواص مکانیکی سنگ و تاریخچه بارگذاری می‌باشند. تخریب مکانیکی در نوار سیمان به سبب افزایش قابل توجه در فشار چاه (ناشی از آزمایش تعیین فشار، افزایش وزن گل حفاری، مشبک کاری لوله‌های جداری، انجام عملیات تحریک چاه، تولید گاز)، و نیز افزایش شدید دمای چاه (ناشی از عملیات تولید حرارتی، عملیات تزریق بخار، چاه‌های فشار بالا/دما بالا) و یا اعمال بارگذاری از جانب سازند (ناشی از پدیده خزش، گسل خوردگی، تراکم سازند) به وقوع می‌پیوندد (Ford et al, 1982).

¹ Annulus

افزایش مقاومت فشاری سنگ سیمان نمی‌تواند به عنوان یک عامل اصلی برای افزایش مقاومت سیمان در جلوگیری از تخریب پوشش سیمانی و در شرایط حادثه دوپهن‌شدگی رشته‌جداری و نیز بالا بردن دوام سیمان در ایجاد اتصال بین لایه‌ها در طول عمر چاه محسوب گردد. از آنجا که سیستم‌های رایج سیمان مورد استفاده، اگر چه با مقاومت فشاری بالا بودند ولی فاقد خصوصیات لازم برای برطرف کردن چنین مشکلی بوده‌اند. همچنین در اکثر موارد چنین سیستم‌های جدید سیمانی، برای کاهش مدول یانگ سیمان و در پی آن کاهش تنش القایی، دارای وزن مخصوص بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب می‌باشند. با وجود آنکه چنین راه‌کارهایی می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد اما بسیاری از مناطق نفتی سراسر دنیا خصوصاً در ایران سازند گچساران میدان مارون، به دلیل تأمین فشار برای کنترل چاه و یا پایداری دیواره چاه، نیازمند سیستم‌های سیمانی با دانسیته بالا در محدوده وزنی بین ۱۴۰ تا ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب و با قابلیت انبساط طولی ۳ درصد می‌باشند. لذا بررسی و تحقیق برای دستیابی به سیمان با دانسیته بالا، قابلیت انبساط بالا و مقاومت انعطافی بالا (یعنی سیمان‌هایی با مدول یانگ پایین و ضریب پواسون بالا و یا به عبارت دیگر سیمان‌هایی که بر اثر اعمال تنش، کرنش بیشتری از خود نشان دهند، البته این تغییر شکل باید برگشت‌پذیر باشد یعنی در محدوده رفتار الاستیک سیمان رخ دهد) برای جلوگیری از دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری میدان نفتی مارون ضروری می‌باشد.

۱-۲- سیمان کاری چاه

در طی حفاری چاه، یک حفره در درون زمین به وسیله مته ایجاد می‌شود. پس از این مرحله، لوله‌جداری^۱ برای فراهم کردن انسجام ساختاری چاه و ایزوله کردن نواحی مختلف برای جدا کردن نواحی پرفشار از یکدیگر به درون حفره ایجاد شده، رانده می‌شود. در طی عملیات سیمان‌کاری^۲، فضای حلقوی بین لوله‌جداری و سازند توسط یک دوغاب سیمان که دارای ترکیب مشخصی است،

¹ Casing

² Cementing

برای جلوگیری از نفوذ سیال سازند پر می‌شود. دوغاب سیمان قرار گرفته در فضای موجود بین لوله جداری و سنگ سازند، با گذشت زمان از حالت سیال خارج شده و وارد مرحله بندش می‌شود. در طی بندش و سخت شدن سیمان، سیمان با سازند و لوله‌جداری پیوند داده می‌شود. سنگ سیمان وظایف متعددی را انجام می‌دهد که می‌توان همه آن‌ها را در دو کلمه "محافظت" و "ممانعت" خلاصه کرد. سنگ سیمان برای لوله‌جداری نگهداری فراهم می‌کند و از این لوله‌ها در مقابل نیروهای خارجی ناشی از طبقات زمین که ممکن است حتی باعث خرد شدن لوله‌ها شود و نیز در مقابل الکترولیز خوردگی ناشی از آب‌های خورنده^۱ زیرزمینی و هیدروکربن‌های ترش محافظت می‌کند. علاوه بر این سنگ سیمانی که دارای تراوایی^۲ پایینی است و به خوبی با لوله‌جداری و سنگ سازند پیوند داده شده است، از نفوذ سیال یک سازند به سازند دیگر و آلوده شدن ناخواسته هیدروکربورهای ارزشمند نفت و گاز ممانعت به عمل می‌آورد. امروزه تنها بکارگیری روش‌های بهینه برای راندن دوغاب به چاه‌های نفت کافی نبوده و برای جداسازی منطقه‌ای طبقات زمین در دراز مدت که در طول عمر چاه تأثیر زیادی دارد می‌بایست از تکنولوژی جدید بهینه‌سازی ساخت و راندن دوغاب به‌طور هم‌زمان و هماهنگ استفاده کرد. از آنجا که چاه سیمان شده بدون نشتی می‌تواند هدایت درست سیال از مخزن به سطح را تأمین کند لذا عملیات سیمان‌کاری، تعیین کننده طول عمر چاه بوده و نشان می‌دهد که چاه تا چه مدت می‌تواند مولد و بدون نیاز به تعمیر باقی بماند. علاوه بر مسأله ایمنی و کاهش هزینه، مسأله زیست محیطی مربوط به مواد شیمیایی نیز با سیمان‌کاری مرتبط است که حفاظت سفره آب‌ها در حین و پس از حفاری از آن جمله است (Hackney, 1985).

مهمترین هدف عملیات سیمان‌کاری اولیه فراهم کردن یک پوشش ناحیه‌ای^۳ از نواحی تولیدی تا سطح می‌باشد. این پوشش ناحیه‌ای باید در تمام طول عمر چاه وجود داشته باشد. در فضایی که سیمان وجود دارد، نباید حرکت سیال اعم از گاز و مایع صورت گیرد. به هر حال حتی در مواردی که

¹ Corrosive Water

² Permeability

³ Zonal Isolation

سیمان به صورت مناسب در این فضای حلقوی قرار داده شده است و در ابتدا انسداد هیدرولیکی^۱ خوبی را به وجود آورده است، اغلب ناپدید شدن این پوشش ناحیه‌ای با زمان دیده شده است. از دست دادن پوشش ناحیه‌ای، به وسیله نفوذ گاز و یا شکافدار کردن یک ناحیه اشتباه در طی عملیات تحریک چاه، مشخص می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تنش‌های القاء شده در سیمان، عوامل این آسیب هستند. این تنش‌ها بر اثر تغییر در شرایط ته چاهی به وجود می‌آیند. فرایندهای مختلفی می‌تواند منجر به تغییر شرایط ته چاهی در قسمت لوله‌گذاری شده گردد. این فرایندها عبارتند از (Dan, 2003):

- هیدراتاسیون سیمان^۲
- حفاری چاه
- مشبک کاری^۳
- تحریک و تولید از مخزن^۴
- تزریق سیال
- تغییر سیال درون چاه و استفاده از سیال تکمیل چاه
- اعمال بار بر روی لوله‌گذاری بر اثر خزش سازند^۵

افزایش فشار چاه در طی شکست هیدرولیکی چاه، به دلیل اینکه تزریق سیال از چندین دقیقه تا چندین ساعت ادامه می‌یابد، باعث آسیب شدیدی به غلاف سیمان می‌گردد. افزایش دما و فشار در طی عملیات تولید، مربوط به قسمت‌های نزدیک لوله‌گذاری سطحی می‌شود. در این قسمت فشار سطح از فشار اتمسفریک به فشار تولید و دمای سطح نیز در برخی موارد تا دمای چاه افزایش می‌یابد. یکی از فرایندهای مهمی که می‌تواند باعث گسیختگی غلاف سیمانی و در شرایط حادثه‌تر موجب دو پهن شدگی رشته‌گذاری گردد، خزش لایه‌ها و بارگذاری نقطه‌ای آن‌ها بر روی سیمان و لوله‌گذاری می‌باشد.

¹ Hydraulic Seal

² Cement Hydration

³ Perforation

⁴ Reservoir Stimulation & Production

⁵ Formation Creep

۱-۳- ضرورت تحقیق

سال‌هاست که دوپهن شدگی لوله‌های جداری در میدان مارون سازند گچساران به سبب حرکت لایه‌های نمکی به صنعت نفت گزارش می‌شود. شدت دوپهن شدگی‌های گزارش شده متفاوت بوده و می‌تواند بلافاصله پس از نصب لوله‌جداری اتفاق بیافتد. در برخی موارد لوله‌جداری کاملاً خم شده و یا تغییر شکل اندکی یافته است و در موارد دیگر در قطر لوله به واسطه نیروهای خارجی به قدری جمع شدگی ایجاد شده که دیگر امکان فرستادن رشته مغزی^۱ بداخل چاه امکان پذیر نبوده است. در شرایط بحرانی‌تر، که کم تعداد نیز نمی‌باشند، دوپهن شدگی کامل اتفاق افتاده است. یکی از فرایندهای مهمی که می‌تواند باعث گسیختگی غلاف سیمانی و در شرایط حادثه‌تر موجب دوپهن شدگی رشته جداری شود، خزش لایه‌ها و بارگذاری آن‌ها بر روی سیمان و لوله‌جداری می‌باشد. لایه‌های نمکی دارای چنین خصوصیتی هستند. سنگ‌های نمکی در مقایسه با دیگر سنگ‌های رسوبی متداول، ویژگی‌های مکانیکی پایینی دارند. مقاومت نمک تحت تأثیر افزایش دما کم می‌شود. در عمق‌های بیشتر از ۳۰۰۰ فوت، خزش نمک بسیار مهم می‌شود و برای بسته شدن چاههایی که هنوز لوله گذاری نشده‌اند، کافی است. در غیاب فعالیت‌های تکتونیک^۲ و انتقال ناحیه‌ای نمک^۳، تنش‌های برجا^۴ در چاه‌های عمیق، ایزوتروپیک^۵ است. این تنش برجا برابر تنش روباره^۶ در سازند می‌باشد. خزش شعاعی نمک برای برگرداندن تعادل اولیه‌ای که قبل از حفاری سازند موجود بود، می‌تواند منجر به تنوعی از بارگذاری‌ها مانند بارهای نقطه‌ای، غیریکنواخت و خمشی شود. بارگذاری‌های غیر یکنواخت به وسیله فاکتورهای دیگری مانند تغییر در انحنای چاه، سرعت خزش نمک، هندسه لوله، سختی و کشش لوله تقویت می‌شود. اعمال چنین بارهایی بر روی سیمان می‌تواند

¹ Tubing

² Tectonic Activities

³ Regional Salt Shifting

⁴ In Situ Stress

⁵ Isotropic

⁶ Overburden Stress

باعث گسیختگی^۱ سیمان و در شرایط حادثه موجب دوپهن شدگی لوله‌جداری شود (Morris and Ramsey, 1989).

آسیب رسیدن لوله‌جداری و یا اعمال فشار به درون فضای حلقوی که از گسیختگی غلاف سیمان حاصل می‌شوند، می‌تواند منجر به بسته شدن چاه و یا انجام عملیات درمانی پر هزینه شود. وقایع دیگر مانند از دست دادن تولید هیدروکربورها، تولید سیال ناخواسته (آب) و رشد ابزار سرچاهی، اثر منفی بر روی ایمنی و اقتصاد چاه‌های نفت و گاز می‌گذارد. زیرا عملیات درمانی بسیار پر هزینه هستند و حتی در برخی موارد این عملیات امکان پذیر نمی‌باشند (Sheffield et al, 1983).

مطالعات انجام شده در میدان مارون نشان داده است که سیمان‌های متداول^۲ استفاده شده در صنعت که اصولاً دوغاب‌هایی با وزن مخصوص بالاتر از ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب می‌باشند، سیمان‌هایی با مقاومت فشاری^۳ و خاصیت شکنندگی بالا هستند. چنین سیمان‌هایی در برابر تنش‌های اعمال شده، تغییر شکل کمی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه بر اثر تغییر دما و فشار، تنش‌های به وجود آمده در این سیمان‌ها شدید خواهد بود و ممکن است برای گسیختگی سنگ سیمان کافی باشد. سیمان‌های شکننده^۴ دارای مدول یانگ بالا و نسبت پواسون پایینی هستند. برای رفع این مشکل بایستی سیمان‌هایی طراحی شوند که بر اثر اعمال تنش، کرنش بیشتری از خود نشان دهند، البته این تغییر شکل باید برگشت پذیر باشد یعنی در محدوده رفتار الاستیک سیمان رخ دهد. چنین سیستم‌های سیمانی دارای مدول یانگ پایین و نسبت پواسون بالایی هستند. همچنین سیستم‌های رایج سیمان مورد استفاده، اگر چه با مقاومت فشاری بالا بودند ولی فاقد خصوصیات لازم شامل افت صافی کم، آب آزاد در حد صفر، خواص رئولوژیکی بسیار خوب، عدم کاهش حجم، مقاومت ژله‌ای مناسب، زمان نیم بندش قائمه، دوغاب سیمان پایدار و مقاوم در برابر نفوذ و مهاجرت گاز می‌باشند. اکثر کشورهای صنعتی صاحب تکنولوژی، برای کاهش مدول یانگ سیمان و در پی آن کاهش تنش القایی،

¹ Failure

² Conventional

³ Compressive Strength

⁴ Brittle

سیستم‌های جدید سیمانی طراحی کرده‌اند که دارای وزن مخصوص بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب می‌باشند. با وجود آنکه چنین راه‌کارهایی می‌تواند موفقیت آمیز باشد اما بسیاری از مناطق نفتی سراسر دنیا خصوصاً در ایران سازند گچساران میدان مارون، به دلیل تأمین فشار برای کنترل چاه و یا پایداری دیواره چاه، نیازمند سیستم‌های سیمانی با دانسیته بالا در محدوده وزنی بین ۱۴۰ تا ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب و با قابلیت انبساط حجمی ۳ درصد (حداکثر کاهش حجم دوغاب سیمان در اثر هیدراتاسیون ذرات سیمان ۳ درصد می‌باشد) می‌باشند. لذا بررسی و تحقیق برای دستیابی به سیمان انعطاف‌پذیر با قابلیت انبساط بالا، مدول یانگ پایین، نسبت پواسون و دانسیته بالا برای جلوگیری از دوپهن شدگی لوله‌های جداری میدان نفتی مارون با استفاده از افزودنی‌های ساخت داخل و بومی سازی این تکنولوژی در صنعت نفت ایران ضروری به نظر می‌رسد.

۴-۱- تعریف مسأله

میدان مارون مربوط به دوران ترشیاری می‌باشد و از مخازن کربناته می‌باشد که توسط سازند گچساران پوشیده شده است. تولید از مخزن آسماری در میدان مارون از سال ۱۹۵۰ شروع شد و مشکل دو پهن شدگی لوله‌های جداری از سال ۱۹۷۰ آغاز و تا کنون ادامه داشته است. چاههایی که مشکل دو پهن شدگی دارند اکثر به صورت عمودی حفر شده‌اند، و این مشکلات تنها برای چاههایی که در کناره‌ها و لبه‌های میدان حفاری شده‌اند تأثیر دارد و اطلاعاتی در رابطه با چاههایی که در قسمت های میانی و یا وسط میدان حفاری شده‌اند گزارش نشده است. بررسی‌های دقیق نیز آشکار ساخت که مشکلات لوله‌های جداری در نواحی مارل قرمز و خاکستری اتفاق افتاده است و فقط محدود به فواصل نمکی گچساران نبوده است. فروپاشی چاه‌ها در نواحی کناری و حاشیه‌ای میدان در اثر جابجایی روباره‌ها نشانی از تأثیرهای ژئومکانیکی در مورد میادین تهی شده می‌باشد. دلیل این اتفاق لغزش برشی و جابجایی در روباره در اثر تغییرات تنش اعمال شده می‌باشد و لذا این تهی‌شدگی

مخزن منجر به جابجایی عمودی و فشرده‌سازی می‌شود. این مشکلات در میدان مارون در اثر تهی‌شدگی چشم‌گیر، از زمان آغاز تولید تا کنون به وقوع پیوسته است. در سازند گچساران فواصلی هستند که شامل آب نمک با شوری و فشار بالا هستند و به نظر می‌رسد که هرگونه ارتباط آن با لایه‌های دیگر منجر به خوردگی، ضعیف‌سازی لوله‌های جداری و همچنین فروپاشی شود. با این که این فاکتور امری تأثیر گذار می‌باشد ولی واضح است که نمی‌تواند دلیل عمده بر دو پهن‌شدگی لوله‌های جداری در میدان مارون باشد. در حالی که چاه‌هایی که در وسط هستند با اینکه در همان سازند قرار گرفته‌اند با این مشکل مواجه نیستند. با در نظر گرفتن الگوی فروپاشی چاه‌ها، به نظر می‌رسد که طرح زمان خاصی برای فروپاشی وجود ندارد، در صورتی که با گذر زمان چاه‌های بیشتری با شکست مواجه می‌شوند. تأثیر عواملی از قبیل کیفیت سیمان، تهی‌شدگی مخزن، جابجایی‌های القا شده به حواشی مخزن به شدت بیشتر و جدی‌تر از مسائلی از قبیل خوردگی و جریان داشتن فشار می‌باشد و انتظار می‌رود که این جابجایی‌ها به طور دوره‌ای اتفاق بیافتد و بیشتر در اثر تهی‌شدگی مخزن باشد. از جمله عوامل دیگر، مسائل تکتونیکی می‌باشد که پس از افزایش یافتن تنش‌های زمین و رسیدن به محدوده‌ی تعادلی، این تنش‌ها به اشکال زلزله یا گسل خوردگی در محل خود آزاد می‌شوند که با جابجایی سنگ همراه است. همچنین محتمل است که راه‌یابی فشارهای بالا به اعماق کم باعث مشاهده و وجود فشار زیاد در خارج از لوله‌جداری شود که بعدها منجر به دو پهن‌شدگی مکانیکی لوله‌های جداری شود. هدف اصلی عملیات سیمان‌کاری اولیه، فراهم کردن پوشش ناحیه‌ای مؤثر در طول عمر چاه می‌باشد. برای دست یافتن به این هدف، گل حفاری باید از هر دو فضای حلقوی باریک و عریض جابجا شود و کل فضای حلقوی با یک سیمان مناسب پر شود. مسدودکننده¹ باید نیازمندی‌های کوتاه مدت و دراز مدت چاه را برآورده کند. به طور رایج صنعت حفاری بیشتر بر روی ویژگی‌های کوتاه مدت سیمان تمرکز کرده است. تا زمانی که سیمان به صورت سیال می‌باشد، این ویژگی‌ها قابل کاربرد است. این تلاش برای مخلوط کردن مؤثر دوغاب سیمان و قرار دادن مناسب

¹ Sealant

آن در فضای موجود بین سازند حفاری شده و لوله‌جداری لازم می‌باشد. در گذشته این صنعت تنها بر روی مقاومت فشاری به عنوان یک فاکتور تعیین کننده انسجام دراز مدت سیمان تمرکز کرده بود. ویژگی‌های دراز مدت سیمان مانند مقاومت در برابر تهاجم شیمیایی^۱ در ته چاه، تنها در پاره‌ای از اوقات در نظر گرفته شده بود. در کل توجهی به ویژگی‌های مکانیکی دیگر از قبیل مقاومت کششی سنگ سیمان، مدول یانگ و نسبت پواسون سیمان نشده بود. البته در مواقعی که مسدودکننده در معرض تغییرات زیاد در سطح تنش قرار نگیرد، در نظر گرفتن مقاومت فشاری به عنوان یک فاکتور تعیین کننده انسجام دراز مدت سیمان، مناسب خواهد بود. اما اگر غلاف سیمان در معرض تغییرات زیاد در سطح تنش قرار گیرد، در نظر گرفتن ویژگی‌های ذکر شده سیمان برای انسجام دراز مدت آن مهم و حیاتی خواهد بود. از بین رفتن پوشش ناحیه‌ای در غیاب آسیب شیمیایی سیمان، می‌تواند به دلیل تراوایی بالای سنگ سیمان، گسیختگی مکانیکی و یا جدا شدن سیمان از لوله‌جداری و نیز سازند باشد. سیمان با تراوایی بالا تنها به دلیل طراحی ضعیف دوغاب سیمان ایجاد می‌گردد. سیمان با تخلخل بالا از این نوع سیمان‌ها می‌باشد. افت حجمی داخل^۲ سیمان بلافاصله بعد از مخلوط کردن سیمان شروع شده و تا زمان تکمیل سخت شدن سیمان ادامه می‌یابد. سرعت کاهش حجم شیمیایی سیمان در طی بازه زمانی هیدراسیون سیمان کم است. این سرعت در طی گیرش و سخت شدن اولیه سیمان بسیار بالا و در طی سخت شدن نهایی سیمان خیلی کم است. بنابراین در کوتاه مدت و در طی گیرش سیمان، سیالات با پویایی^۳ بالا مانند گاز می‌توانند وارد ماتریکس سیمان^۴ شوند و به درون چاه نفوذ کنند. این سیالات درون سیمان کانال‌هایی را به وجود می‌آورند که به شدت بر روی امواج صوتی و همچنین پوشش ناحیه‌ای اثر می‌گذارند. دوغاب‌های سیمان با آب آزاد و هرزروی سیال کم و نیز زمان گذار^۵ کوتاه بین جامد و مایع می‌توانند این مشکل را حل نمایند. علاوه بر این افزودن

¹ Chemical Attack

² Internal Shrinkage

³ Mobility

⁴ Cement Matrix

⁵ Transition Time

فیبرهای انعطاف پذیر^۱ به کنترل جابجایی سیال درون ماتریکس سیمان کمک خواهد کرد. گسیختگی مکانیکی سیمان باعث ایجاد ترک در سیمان می‌گردد در حالی که جدا شدن سیمان از سازند و یا لوله‌جداری موجب ایجاد فضاهای ریز در سطح مشترک^۲ لوله‌جداری- سیمان و سیمان- سازند می‌شود. هر دو مکانیزم یک مسیر با هدایت پذیری^۳ بالا برای هر سیالی به وجود می‌آورند. آسیب مکانیکی سیمان بر اثر موارد زیر اتفاق می‌افتد (Le Roy-Delage et al, 2000):

- افزایش قابل توجه فشار درون لوله‌جداری
- افزایش قابل توجه دمای چاه
- بارگذاری سازند بر روی غلاف سیمان

افزایش فشار در طی عملیاتی مانند آزمایش انسجام لوله‌جداری، افزایش وزن گل، مشبک‌کاری لوله‌جداری، تحریک چاه و تولید گاز ظاهر می‌شود. در طی تولید ژئوترمال، تزریق بخار و نیز در چاه‌های دما و فشار بالا افزایش دمای چاه را خواهیم داشت. بارگذاری سازند بر روی سیمان از طریق جریان پلاستیک سازند (خزش و تراکم سازند^۴) صورت می‌گیرد. هر چه سازند ضعیف‌تر باشد شرایط بدتر خواهد بود. زیرا سازند ضعیف نمی‌تواند تغییر شکل سیمان را به صورت مکانیکی تحمل کند. در حالت کلی بر اثر تغییر شرایط دما و فشار چاه، در فضای استوانه‌ای دو بعدی در هر شعاعی از غلاف سیمان دو تنش اصلی^۵ ایجاد خواهد شد. این دو تنش، تنش‌های مماسی و شعاعی خواهند بود. نوع گسیختگی به وجود آمده در غلاف سیمان به وسیله این دو تنش مشخص می‌شود. گسیختگی مکانیکی سیمان به دو صورت زیر می‌باشد (Ravi and Bosma, 2002):

- گسیختگی کششی که باعث ترک خوردگی^۶ سیمان می‌شود (شکل ۱-۱، الف)
- گسیختگی برشی^۷ که باعث تغییر شکل پلاستیک سیمان می‌شود (شکل ۱-۱، ب)

¹ Flexible Fiber

² Interface

³ Conductivity

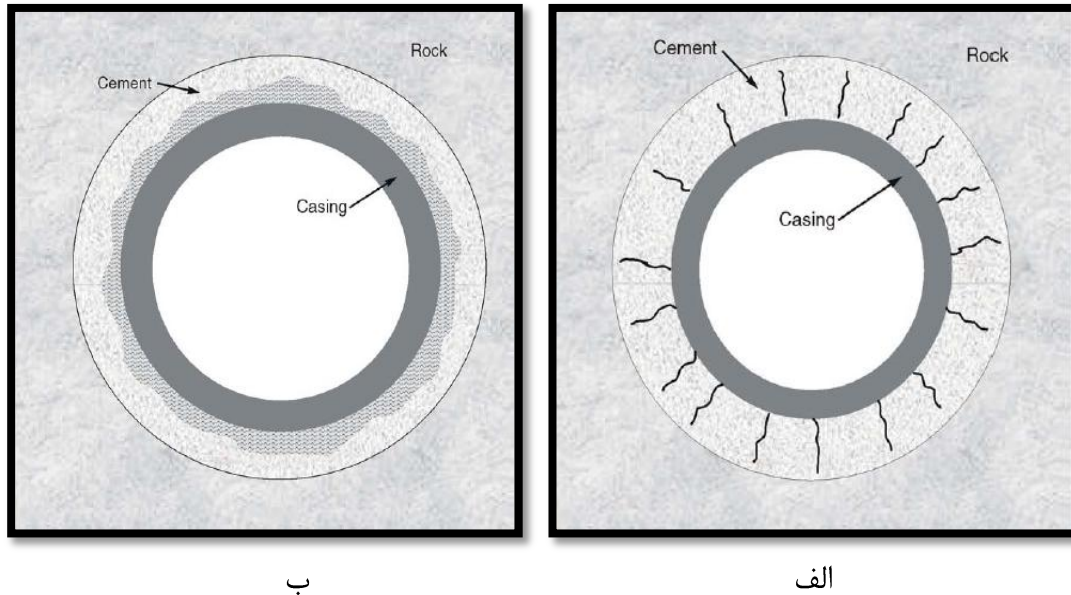
⁴ Formation Compaction

⁵ Principal Stress

⁶ Cracking

⁷ Shear Failure

گسیختگی کششی در سیمان زمانی به وجود می‌آید که تنش‌های کششی ایجاد شده در آن از مقاومت کششی سیمان بیشتر شود.

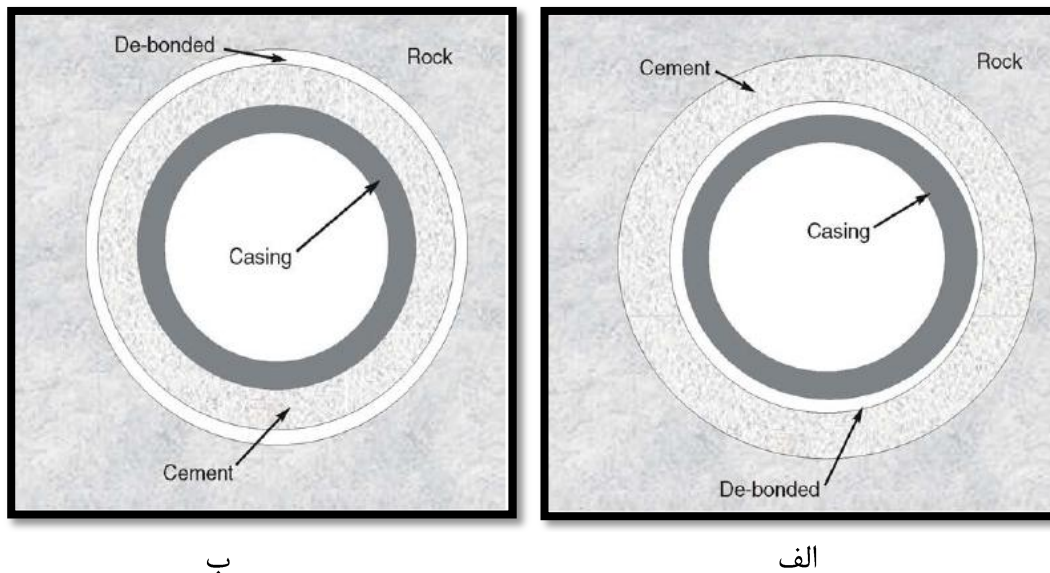


شکل ۱-۱- گسیختگی مکانیکی سیمان، الف- گسیختگی کششی ب- گسیختگی برشی
(Ravi and Bosma, 2002)

به عنوان مثال کل غلاف سیمان ممکن است به دلیل افت حجمی سیمان ترک‌دار شود. علاوه بر این ممکن است بر اثر انبساط لوله‌جداری که از افزایش دما و یا فشار داخل آن به وجود می‌آید قسمتی از غلاف سیمان ترک‌دار شود. در این حالت ترک‌های ایجاد شده در غلاف سیمان از سطح مشترک سیمان- لوله‌جداری انتشار می‌یابد.

گسیختگی برشی سیمان بر اثر اختلاف زیاد بین تنش‌های اصلی در سیمان به وجود می‌آید. این گسیختگی می‌تواند به دلیل کاهش در تنش فشاری مماسی در طی افت حجمی سیمان و یا به دلیل افزایش تنش فشاری شعاعی در طی انبساط لوله‌جداری ظاهر شود. عامل مهم دیگر از بین رفتن پوشش ناحیه‌ای، ایجاد فضاهای ریز خواهد بود. این فضاهای ریز می‌توانند بین لوله‌جداری و سیمان (شکل ۱-۲، الف) و یا بین سیمان و سازند (شکل ۱-۲، ب) تشکیل شوند. نوع اول را فضای ریز داخلی

و نوع دوم را فضای ریز خارجی گویند. فضاهای ریز داخلی می‌توانند از طریق عدم عکس العمل لاگ پیوند سیمان^۱ شناسایی شوند. این فضاها به وسیله جابجایی شعاعی لوله‌گذاری ایجاد می‌شوند.



شکل ۱-۲- جدا شدن سیمان، الف- فضای ریز داخلی ب- فضای ریز خارجی (Ravi and Bosma, 2002)

در بیشتر موارد جابجایی شعاعی به وجود آمده از کاهش دما و یا فشار چاه، باعث تشکیل این نوع فضاهای ریز می‌شود. کاهش وزن گل حفاری، قرار گرفتن سیال تکمیل چاه درون چاه و یا تزریق آب سرد می‌تواند چنین فضاهایی را به وجود آورد. فضاهای ریز خارجی می‌توانند به وسیله افت حجمی کل سیمان ایجاد شوند (Le Roy-Delage et al, 2000).

گسیختگی مکانیکی غلاف سیمان باعث ایجاد یک مسیر برای سیالات سازند برای ورود به فضای حلقوی می‌شود. ورود سیالات به درون غلاف سیمان باعث فشاردار شدن چاه می‌شود و ممکن است منجر به تولید آب زود رس شود. از بین رفتن انسجام غلاف سیمان موجب حوادث زیر می‌شود:

- از دست دادن مخازن گازی
- عملیات غیر ایمن
- تولید آب و یا گاز زودرس

¹ Cement Bond Log

- هزینه‌های اضافی به دلیل عملیات درمانی پیش بینی نشده
- بستن چاه برای موافقت با مقررات دولتی

برای ایجاد چاهی که بتواند به صورت ایمن و اقتصادی، هیدروکربن تولید کند باید یک روش سه مرحله‌ای توسط مهندس طراح دنبال شود. این سه مرحله عبارتند از:

- تحلیل مهندسی
- طراحی و تست سیمان
- قرار دادن مؤثر سیمان درون چاه

از تحلیل مهندسی می‌توان ویژگی‌های بهینه و مورد نیاز غلاف سیمانی را برای ایستادگی در برابر عملیات صورت گرفته بر روی چاه، فراهم کرد. در مرحله دوم این روش، برای دستیابی به یک سیستم سیمانی که دارای ویژگی ارزیابی شده مرحله یک و یا حتی دارای ویژگی‌های بهتری هستند، طراحی و آزمایش دوغاب سیمان انجام می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی‌های غلاف سیمانی که باید در طی مرحله دوم آزمایش شوند عبارتند از (Kris Ravi et al, 2004):

- مقاومت کششی
- مدول یانگ
- نسبت پواسون

برای ارزیابی انسجام غلاف سیمان، مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی قسمتی از متغیرهای ورودی مرحله یک این روش می‌شود. مرحله ۱ و ۲ این روش برای دستیابی به یک پوشش ناحیه‌ای مؤثر، توسط مرحله سوم دنبال می‌شود.

۱-۵- اهداف رساله

هدف اصلی رساله، طراحی و فرمولاسیون سیمان حفاری با مقاومت انعطافی بالا در سازندهای پر فشار میدین نفتی می‌باشد. برای این منظور با بکارگیری و انتخاب بهترین افزودنی‌های انعطاف‌پذیر و منبسط‌کننده ساخت داخل و موجود در کشور، طراحی و فرمولاسیون

دوگاب‌های سیمان سنگین وزن در محدوده وزنی بین ۱۴۰ تا ۱۵۰ پوند بر فوت مکعب مطابق با شرایط واقعی چاه‌های میدان مارون انجام می‌شود.

به‌طور خلاصه دوگاب سیمان طراحی شده بایستی دارای خصوصیات ذیل باشد:

- دوگاب سیمان با وزن مخصوص بسیار بالا
- خواص رئولوژیکی قبل و بعد از حرارت مناسب
- افت صافی استاتیکی پایین
- تخلخل و نفوذپذیری کم
- آب آزاد تقریباً صفر
- مقاوم در برابر نفوذ گاز
- مقاومت ژله‌ای مناسب
- زمان نیم بندش و مقاومت فشاری مناسب
- مدول یانگ پایین و ضریب پواسون بالا
- انبساط حجمی مناسب با شرایط واقعی چاه

۱-۶- سازماندهی رساله

این رساله شامل هفت فصل می‌باشد که در فصل اول این رساله ابتدا مقدمه‌ای در مورد عملیات سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز، وظایف سیمان، اهداف سیمان‌کاری و همچنین جداسازی ناحیه‌ای آورده شده است و سپس به موضوع ضرورت تحقیق، تعریف مساله و اهداف رساله پرداخته شده است. در فصل دوم به مشخصات میدان مورد مطالعه و همچنین دلایل دوپهن‌شدن لوله‌های جداری موجود در آن میدان بحث شده است. در فصل سوم نیز تمامی مطالعات صورت گرفته تا حال حاضر در خصوص سیمان‌های انعطاف‌پذیر و همچنین نقاط ضعف و قوت هر کدام از سیستم‌های سیمان طراحی شده که در راستای اهداف رساله می‌باشد نیز آورده شده است. در فصل چهارم روش آماده‌سازی نمونه‌ها، ساخت قالب‌ها و تجهیز دستگاه‌هایی که در راستای این رساله انجام شده، شرح داده شده است. در فصل پنجم خصوصیات دوگاب سیمان شامل چگالی، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی،

زمان نیم‌بندش، مقاومت فشاری، نفوذ و مهاجرت گاز، پایداری، نفوذپذیری، تخلخل، انقباض، خواص رئولوژیکی قبل و بعد از حرارت، تهنشینی و روش‌های اندازه‌گیری آن بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا آورده شده است و همچنین در این فصل به عوامل بسیار مهم و مؤثر بر طراحی دوغاب سیمان شامل گرانروی، آب محتوا، حساسیت به گل حفاری، مکانیزم هیدراتاسیون و اثر نمک‌ها پرداخته شده است. در فصل ششم ابتدا ترکیبات و فرمولاسیون دوغاب سیمان بکارگرفته شده در چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون که پدیده دوپهن‌شدگی و نشت آب نمک از پاشنه لوله‌جداری مشاهده شده، آورده شده است و سپس معایب دوغاب سیمان مرسوم اصلاح شده و تحت عنوان سیستم اصلاح شده معرفی گردیده و در ادامه فصل، در خصوص تمامی افزودنی‌هایی که تحت عنوان افزودنی انعطاف‌پذیر و منبسط‌کننده در سیستم سیمان اصلاح شده اضافه شده، و خصوصیات آن مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان فصل ضمن تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها، بهترین افزودنی انعطاف‌پذیر و منبسط‌کننده، در شرایط واقعی چاه انتخاب شده است. با استفاده از افزودنی منتخب، بهترین فرمولاسیون دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون طراحی شده و تمامی آزمایش‌های مورد نیاز بر روی آن صورت گرفته است. در فصل هفتم که فصل پایانی می‌باشد، ضمن تجزیه و تحلیل و بیان نقاط ضعف دوغاب‌های سیمان سنتی و مرسوم، مقایسه‌ای بین سیستم جدید و سیستم‌های دوغاب سیمان خارجی و داخلی صورت گرفته است. در پایان فصل پیشنهادات مورد نظر برای ادامه و بهبود کار ارائه شده است.

فصل دوم: مشخصات میدان مورد مطالعه و دلایل
دوپهن شدگی لوله‌های جداری آن

۲-۱- مقدمه

میدان مارون در نزدیکی شهر اهواز در استان خوزستان و در گوشه جنوب غربی ایران و نزدیک بخش شمالی شرقی خلیج فارس واقع شده است. میدان مارون بخشی از حوضه زاگرس می‌باشد و مخزن آن تاقدیسی است که به طول ۷۰ کیلومتر جنوب شرقی تا شمال غربی و عرض ۷ کیلومتر گسترش دارد. عملیات حفاری در میدان مارون کم و بیش از وقتی که اولین چاه در نوامبر ۱۹۶۳ حفاری شد تا زمانی که چاه شماره ۱۵۷ مارون در آگوست ۱۹۷۹ تکمیل شد، به طور پیوسته ادامه داشته است. عملیات حفاری در نوامبر ۱۹۸۶ با حفر چاه شماره ۱۵۸ مارون دوباره آغاز شد و اکنون بالغ بر ۳۲۰ چاه در میدان حفر و تکمیل شده است. از این تعداد چاه حفر شده، ۳۰۰ حلقه چاه داخل مخزن آسماری یا سازند آسماری و ۲۰ حلقه چاه در سازند بنگستان حفر شده است و بالغ بر ۴۲ حلقه چاه از کل تعداد چاه‌های حفاری شده دارای مشکل دوپهن‌شدگی و نشت آب نمک از پاشنه لوله‌جداری می‌باشند. لوله‌های جداری به دلایل گوناگون دچار دوپهن‌شدگی می‌شوند. برخی عوامل ناشی از اشتباهات فردی مانند اشتباه در طراحی لوله‌های جداری و یا در نظر گرفتن معیارهای غلط در تفسیر نیروهای وارده بر لوله در چاه و یا عوامل طبیعی و محیطی مانند حرکت لایه‌های زمین می‌باشد که در ادامه دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری و راهکارهای کاهش وقوع آن به طور اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲ - بررسی لیتولوژی چاه‌های میدان مارون

در چاه‌های میدان مارون، سازندهای آجاجاری، میشان و گچساران از جمله سازندهای بالای مخزن بوده و هر کدام از این سازندها متشکل از یک سری لایه‌هایی به شرح ذیل می‌باشند (شیمی اداره حفاری مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۸۹):

- سازند آغاچاری

بیشتر چاه‌ها در ایران در سازند آغاچاری شروع می‌شوند. این سازند نرم و شامل مارل‌های قهوه‌ای تا قرمز همراه تناوب مارل‌های خاکستری و تا حدودی لایه‌های ماسه سنگ می‌باشد.

- سازند میشان

سازند میشان شامل مارل‌های خاکستری، آهکی همراه سیلت و سنگ آهک می‌باشد. در هنگام حفاری چاه در این سازند، ممکن است با پدیده افت صافی برخورد شود.

- سازند گچساران

سازند گچساران شامل انیدریت، مارل خاکستری و قرمز، نمک و لایه‌های نازک سنگ آهک می‌باشد. هنگام حفاری از میان این سازند می‌توان انتظار مشکلات جدی را داشت. لایه‌های فشار بالا و فشار پائین باعث بروز مشکلات جدی برای چاه می‌شوند و پیش بینی برخورد با این لایه‌ها مشکل می‌باشد. اثرات و نشانه‌های آب ابتدا در لایه‌های سنگ آهک نمایان می‌شوند و ممکن است دارای فشار و حجم بالایی باشند. اثرات آب‌های پرفشار و توزیع غیر یکنواخت آنها را می‌توان به شرایط اولیه رسوب‌گذاری سازند گچساران و تکتونیک بعد از آن نسبت داد. سازند گچساران به ترتیب حفر، به ۷ عضو تقسیم بندی می‌شود (لازم به ذکر است بر اساس دستورالعمل سازمان زمین‌شناسی، شماره‌گذاری عضوهای سازندها از پایین به بالا می‌باشد).

عضو هفتم: این بخش شامل مارل خاکستری، انیدریت و مقادیر جزئی مارل قرمز و سنگ آهک نازک لایه می‌باشد.

عضو ششم: این بخش غالباً از انیدریت با مقادیر متفاوت از مارل قرمز، نمک، مارل خاکستری و سنگ آهک نازک لایه تشکیل شده است.

عضو پنجم: این بخش به طور کلی شامل انیدریت، مارل‌های خاکستری و نمک می‌باشد.

عضو چهارم: این بخش بیشتر شامل نمک، مارل‌های خاکستری، و گاهی قرمز و انیدریت می‌باشد.

عضو سوم: بیشتر شامل مارل‌های خاکستری، انیدریت و نمک است و گاهی نیز حاوی لایه‌های نازکی از آهک می‌باشد.

عضو دوم: این بخش کلاً شامل نمک است ولی در آن انیدریت و مارل نیز یافت می‌شود.

عضو اول: این بخش که به سنگ پوشش معروف می‌باشد، شامل تناوب چرخه‌ای از انیدریت، مارل و آهک است.

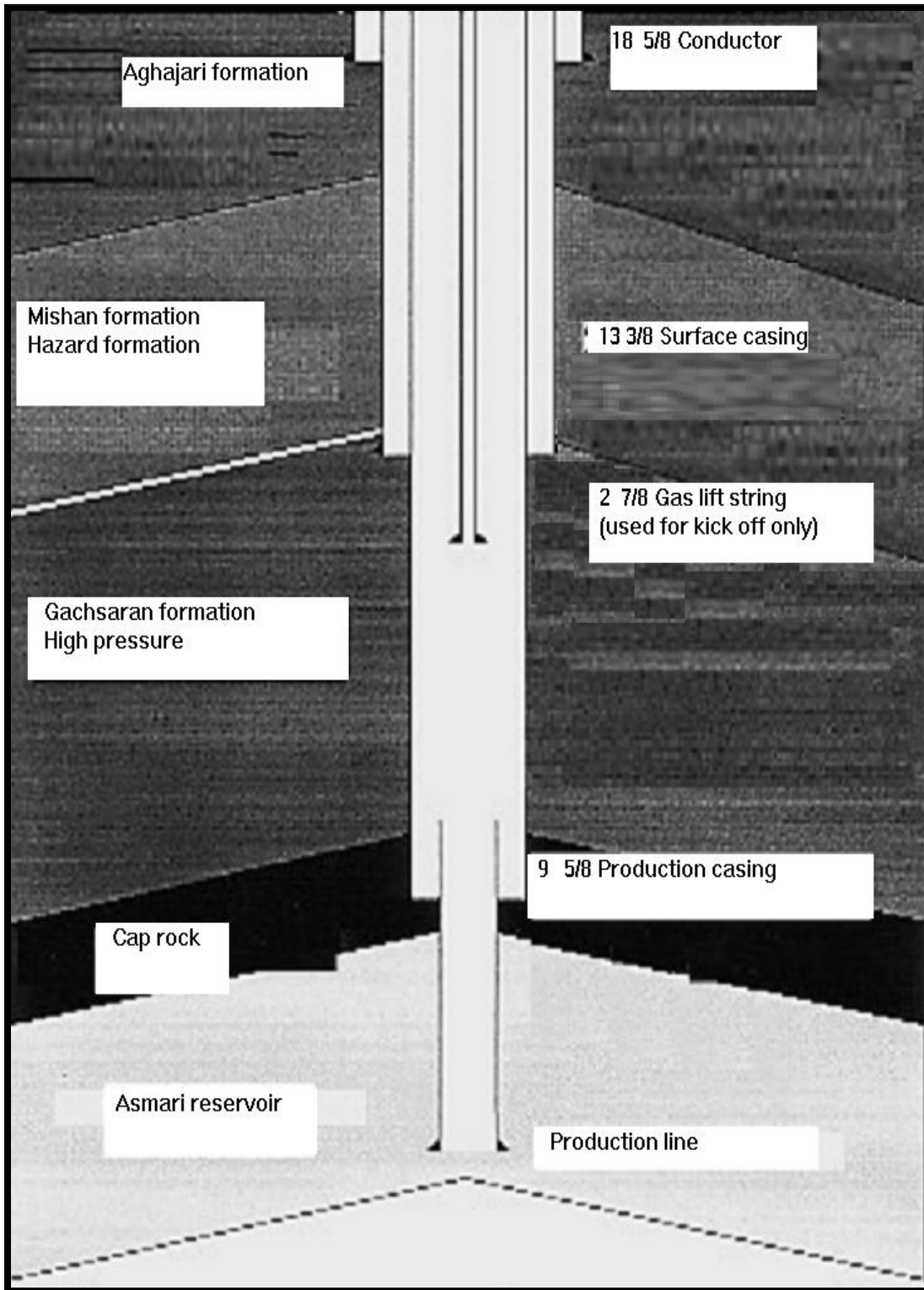
- سازند آسماری

سازند آسماری لایه مخزن اصلی تولید کننده نفت در ایران می‌باشد. جنس آسماری به‌طور غالب سنگ آهک با لایه‌های فرعی دولومیت و ماسه سنگ می‌باشد. در سازند آسماری به دلیل شکافدار بودن آن، هرزروی گل در این سازند را همیشه می‌توان انتظار داشت.

۲-۳- حفاری در میدان مارون

طراحی‌های چاه در میدان مارون بسیار ساده و هم مانند شکل ۲-۱ می‌باشند. در این میدان بیشتر چاه‌ها عمودی می‌باشند و فقط تعداد کمی در حد چند درجه انحراف دارند. بیشتر چاه‌های حفر شده تا سنگ مخزن عمودی می‌باشد و سپس تا مقدار ± 45 درجه انحراف یافته^۱ و با برای مستقیم تا عمق مورد نظر ادامه می‌یابند (شیمی اداره حفاری مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹).

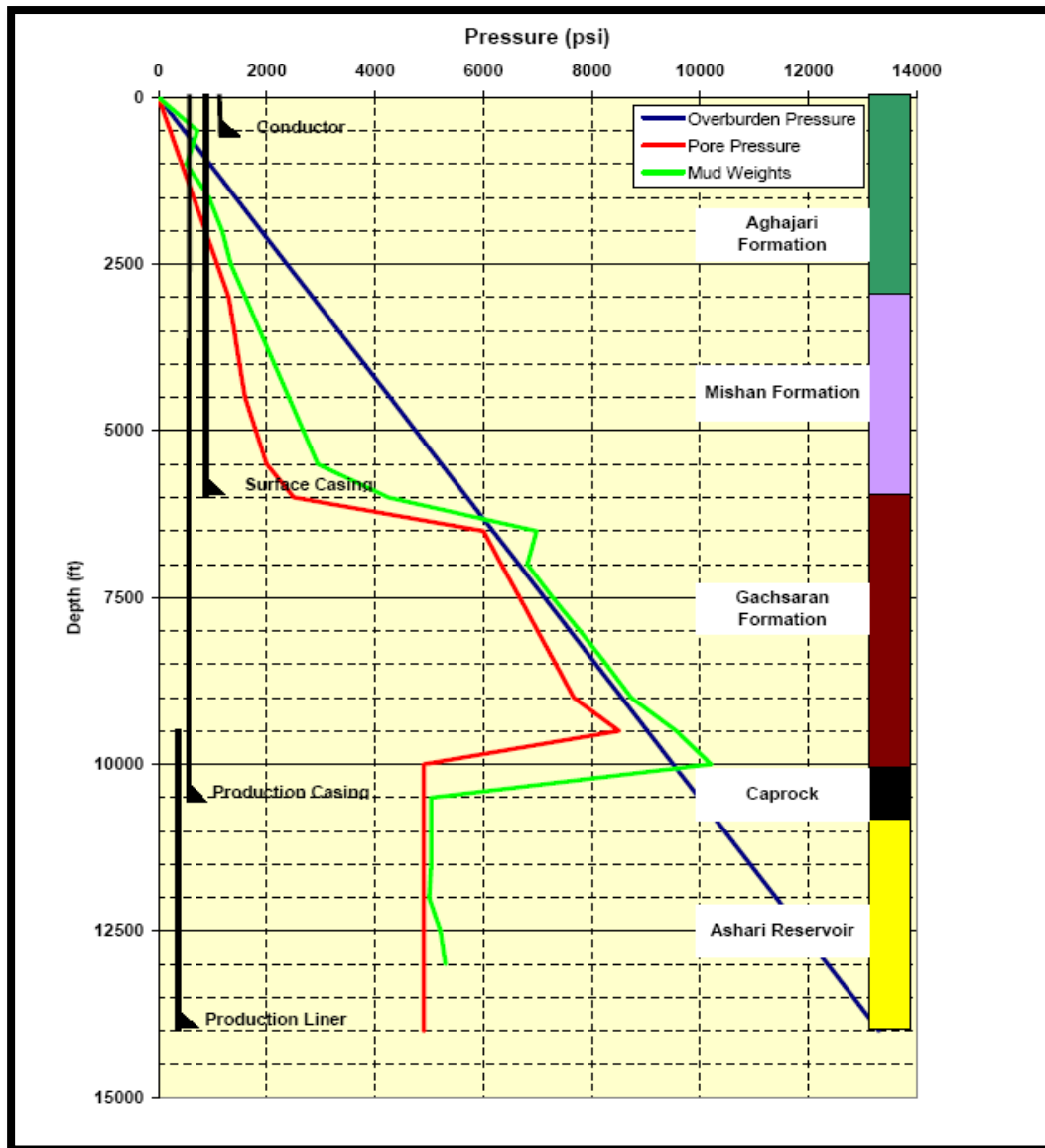
¹ kick off



شکل ۱-۲- نمونه شکل چاه در میدان مارون (شیمی اداره حفاری مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)

۲-۴- تغییرات فشار سازندی در میدان مارون

نمودار تغییرات فشار سازندی در میدان مارون هم مانند شکل ۲-۲ می‌باشد.



شکل ۲-۲ - تغییرات فشار سازند در میدان مارون (شیمی اداره حفاری مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹)

همان طوری که در شکل مذکور مشاهده می‌شود سازند گچساران پر فشارترین سازند میدان مارون می‌باشد. آنچه به اهمیت سازند مورد بحث افزوده وجود آب‌های شور تحت فشار است به طوری که سازند گچساران به عنوان سازند پرفشار و مسأله‌ساز در بین کارشناسان نفتی معروف شده و مقالاتی با

اهداف متعدد نوشته شده که عمده‌ترین دلایل پر فشار بودن آن عبارتند از (شیمی اداره حفاری مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۸۹):

-آب‌های همزاد و آب‌های ناشی از تغییر حالت سولفات‌ها

در کلیه رسوباتی که در محیط‌های آبی مانند دریا، دریاچه، رودخانه و کولاب و ... نهشته می‌شوند مقداری آب میان بافتی و ذره‌ای در حین و ضمن رسوب‌گذاری در بین دانه‌ها تحت عنوان آب همزاد وجود دارد. از آنجایی که محیط رسوب‌گذاری سازند فوق در این چرخه پسروری و به تبع از آن کولابی بوده و سولفات‌ها ابتدا به صورت ژئوپس رسوب می‌کنند که هنگام دفن در حوضه رسوبی با زیاد شدن عمق و در واقع افزایش بار رسوبی که با افزایش درجه حرارت نیز همراه است، مولکول‌های آب را از دست داده و به‌صورت انیدریت باقی مانده و ظاهر می‌شود، بنابراین در سازند گچساران علاوه بر وجود آب‌های همزاد، آب حاصل از تغییر حالت سولفات‌ها به محیط اضافه می‌شود. چون نمک‌ها و انیدریت‌ها به‌خصوص در اعماق زیاد، به‌واسطه تراکم، تقریباً فاقد هرگونه تخلخل و تراوایی هستند، آب‌های حاصله عمدتاً بین لایه‌های کربناته و مارلی در سیکل رسوبی محبوس می‌شوند.

- وجود چین‌هایی کوچک (چین خوردگی داخل سازند گچساران)

با توجه به مکانیسم ایجاد چین و به وجود آمدن درزه‌های باز و بسته در لایه‌های بیرونی و درونی چین، آب‌های تحت فشار از نقاط پرفشار به نقاط کم فشار نفوذ می‌کنند. با مراجعه به پیشینه حفاری در میدان‌های نفتی هرچه طبقات غیر سولفات (کربناته و مارل) در بین لایه‌های سولفات نازک‌تر باشد با طبقات پرفشارتری روبرو خواهیم بود به‌همین دلیل در بخش‌های ۵ و ۶ سازند گچساران که به‌طور نسبی ضخامت انیدریت بیشتر است طبقات کربناته پرفشارتر هستند. یکی از دلایل حفاری این بخش‌ها با گل بسیار سنگین با وزن مخصوص بین ۱۳۰ تا ۱۴۵ پوند بر فوت مکعب همین امر می‌باشد.

۲-۵- عوامل و دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری

لوله‌های جداری، در حین سیمان‌کاری و یا پس از آن در طی عمر یک چاه، در معرض نیروهای هیدرواستاتیکی ناشی از سیالات مختلف، مانند سیالات حفاری و یا سیالات سازند، و نیروهای القاء شده از محیط اطراف چاه مانند نیروهای غیر یکنواخت ناشی از حرکت لایه‌های نمکی قرار دارند. چنانچه نیروهای وارده بر دیواره خارجی لوله‌های جداری از مقاومت آنها بیشتر شود، لوله‌های جداری تحت دوپهن‌شدگی قرار می‌گیرند. عوامل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری به دو گروه اصلی طبیعی و غیر طبیعی تقسیم می‌شوند. عوامل طبیعی خود بر دو نوعند (Khalaf and Cairo, 1985):

- عواملی که رویداد آنها خارج از دست انسان است مانند حرکت لایه‌های زمین بر اثر زلزله و گسل خوردگی

- عواملی که بالقوه وجود داشته و به وسیله تغییراتی که بوسیله انسان‌ها و به واسطه حفاری چاه و یا تولید از مخزن ایجاد و یا سرعت بخشیده می‌شوند مانند حرکت خزشی لایه‌های نمکی در اثر حفاری این لایه‌ها و یا فرونشینی لایه‌های زمین بر اثر تولید از مخزن.

عوامل غیرطبیعی را نیز می‌توان به دو گروه تقسیم کرد (Khalaf and Cairo, 1985):

- عواملی که به دلیل انجام عملیات نادرست مانند عملیات ناقص سیمان‌کاری و یا طراحی‌های ناصحیح به علت عدم درک صحیح نیروهای وارده به چاه به وجود می‌آیند.

- عوامل غیرطبیعی ناخواسته مانند خوردگی دیواره لوله‌های جداری بر اثر گردش مته و رشته‌های حفاری و یا تثبیت‌کننده‌ها درون رشته جداری که اجتناب از آنها بسیار مشکل است.

از آنجا که پدیده دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری عواقب بسیار وخیمی را به دنبال داشته و هزینه‌های هنگفتی را بر صنعت نفت تحمیل می‌کند، لذا شناسایی آن حائز اهمیت می‌باشد. برخی دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری عبارتند از (Khalaf and Cairo, 1985):

- طراحی نادرست لوله‌های جداری
- حرکت لایه‌های نمکی
- سیمان کاری ضعیف
- متراکم شدن سنگ مخزن و فرونشینی سنگ روباره بر اثر تولید از مخزن
- فعال بودن منطقه حفاری شده از نظر تکتونیکی و حرکت لایه‌های زمین
- تمرکز تنش بالا در لوله‌جداری در پی عملیات مشبک‌کاری در چاه‌های مایل
- هیدرات‌های گازی تجمع یافته در محیط‌های آبی مصنوعی مانند سیال حفاری و طبیعی مانند دریا
- فشار ناشی از افزایش حجم سیال محصور شده در فضای حلقوی لوله‌های جداری بر اثر انتقال گرما از سیال تولیدی به سیال محصور و افزایش فشار فضای حلقوی در چاه‌های عمیق دریایی
- فرسودگی لوله‌جداری
- کاهش ضخامت دیواره لوله بر اثر گردش لوله حفاری و یا مته درون آن
- خوردگی لوله‌جداری ناشی از سولفید هیدروژن
- ایجاد تنش‌های کششی باقی مانده در لوله‌های جداری بر اثر گرم و سرد شدن مداوم به واسطه تزریق بخار آب به مخزن
- خوردگی داخل لوله به سبب استفاده از تثبیت کننده‌ها در چاه‌های دارای لوله‌جداری
- خوردگی مکانیکی لوله‌جداری در حین عملیات مانده‌یابی به خصوص آسیاب کردن¹
- خوردگی داخل لوله به سبب تولید ماسه

در ادامه دلایل دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری به طور اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵-۱- طراحی نادرست لوله‌های جداری

برخی اوقات اشتباه ناشی از درک ناصحیح طراحان لوله‌های جداری از شرایط بارهای وارده بر چاه و لوله‌های جداری، که عامل دوپهن‌کنندگی می‌باشند، باعث می‌شود تا مقاومت لوله‌های طراحی شده از فشار دوپهن‌کننده آنها کمتر شود. به طور مثال، چنانچه برآیند نیروهای هیدرواستاتیکی ناشی از وزن

¹ Milling

دوغاب سیمان قرار گرفته در پشت لوله‌جداری و گل درون لوله، قبل از گیرش کامل سیمان، به درستی محاسبه نشده باشد، نیروهای وارده می‌توانند باعث دوپهن شدن رشته جداری شوند. همچنین تفسیر نادرست تنش‌های برجای جهت‌دار ناشی از شیب‌دار بودن لایه‌های سنگی و یا مایل بودن چاه‌های حفاری شده، که تمرکز تنش بالایی را در یک جهت به دیواره لوله‌ی جداری القاء می‌کنند، می‌تواند باعث شود تا مقاومت لوله‌های انتخابی از مقدار تنش‌های وارده بر دیواره لوله کمتر شده و دوپهن‌شدگی در لوله‌های جداری اتفاق بیافتد (Khalaf and Cairo, 1985).

۲-۵-۲- حرکت لایه‌های نمکی^۱

تغییر شکل لوله‌های جداری در سازندهای نمکی در بسیاری از میدان‌های نفتی منطقه خاورمیانه یک مشکل جدی است. خسارات وارد بر رشته‌های جداری چه در طی عملیات حفاری زیر کفشک لوله‌جداری^۲ و یا طی عملیات تعمیرات^۳ مشاهده شده است. صدمه وارده بر لوله‌های جداری ممکن است در تمامی موارد چندان شدید نبوده و باعث توقف عملیات حفاری نشود. با این وجود، در بسیاری موارد امکان دسترسی مجدد به چاه، زیر ناحیه دوپهن شده وجود نداشته و متعاقباً چاه از دست می‌رود. گسیختگی لوله‌های جداری که در لایه‌های نمکی نصب می‌شوند معمولاً به سبب خزش^۴ لایه‌های نمکی رخ می‌دهد. خزش لایه‌های نمکی معمولاً در سه مرحله انجام می‌گیرد (Khalaf and Cairo, 1985):

خزش مرحله اول

این مرحله بلافاصله پس از حفر چاه در سازند نمکی و با میزان نسبتاً بالایی از تغییر شکل آغاز می‌شود.

¹ Salt flow

² Casing shoe

³ Work over

⁴ Creep

خزش مرحله دوم

پس از طی زمان مشخصی، این مرحله از خزش با تغییر شکل اندک شروع می‌شود.

خزش مرحله سوم

این مرحله که خطرناکترین مرحله از خزش می‌باشد همراه با تغییر شکل بسیار بالایی از سنگ نمک همراه می‌باشد که بایستی به هر طریق از رسیدن به آن اجتناب کرد و یا آن را به تأخیر انداخت.

هنگام حفر سازندهای ضخیم نمکی، در نتیجه خزش، فشار غیر نرمال با گرادسانی در حدود (psi/ft) ۱ معادل (Map/m) ۰/۰۲ تا (psi/ft) ۱/۴۸ معادل (Map/m) ۰/۰۳ بر رشته جداری وارد می‌آید که می‌توان باعث دوپهن‌شدگی لوله شود. در برخی موارد نیروهای تکتونیکی نیز می‌توانند باعث سرعت بخشیدن به حرکت خزشی لایه‌های نمک پلاستیکی به سمت چاه شده و با وارد آوردن فشار باعث دوپهن‌شدگی لوله‌جداری شوند. به عنوان مثال می‌توان به حرکت سازند نمکی هارلی^۱، که یک لایه حجیم نمک پلاستیک با ضخامت حدود ۷۰۰ فوت واقع در بخش‌های بالایی لایه تولیدی میشن کانیون^۲ می‌باشد، اشاره کرد. بر مبنای مطالعات صورت گرفته در منطقه کوه‌های راکی^۳ پیرامون طراحی رشته‌های جداری در مقابل دوپهن‌شدگی و با در نظر گرفتن مقادیر (psi/ft) ۰/۰۳ تا (psi/ft) ۱/۵ به سبب فشار اعمالی از لایه‌های نمکی بر لوله‌ها مشاهده شد که در چاه‌هایی که در طراحی لوله جداری آنها، فشار لایه نمکی کمتر از (psi/ft) ۱ در نظر گرفته شده بود دچار دوپهن‌شدگی رشته‌های جداری شده‌اند (Sheffield et al, 1983).

طراحان لوله‌های جداری با بارگذاری‌های غیر یکنواخت در سطح مقطع لوله‌ها به سبب برخورد با لایه‌های متحرک نمکی مواجه می‌باشند. حرکت لایه‌های نمکی ممکن است به علت طبیعت سنگ نمک بوده و یا منشاء تکتونیکی داشته باشد. طراحی لوله‌های جداری در این حالت با هدف مقابله با

¹ Harle

² Mission Canyon

³ Rocky Mountain

چنین بارگذاری غیر یکنواختی صورت می‌گیرد. چنانچه بارگذاری به آرامی صورت گیرد، تغییرات مورد نیاز در طراحی رشته جداری به حداقل کاهش می‌یابد. در اثر بارهای غیریکنواخت وارده ناشی از لایه‌های نمکی سطح مقطع چاه و لوله‌جداری آن تغییر شکل بیضوی خواهند داشت و این امر مقاومت لوله‌جداری در برابر دوپهن‌شدگی را کاهش می‌دهد تا حدی که نیروهای معمول موجود در شرایط چاه (فشار هیدرواستاتیک سیالات بیرون و درون لوله‌جداری) می‌توانند لوله‌جداری را دوپهن نمایند. از طرف دیگر، لایه‌های نمکی که تحت درجه حرارت‌های سازند قرار می‌گیرند اغلب عملکردی مانند جریان سیال از خود نشان می‌دهند که می‌تواند لوله را بریده و یا آن را دوپهن کند. در این حالت لایه نمکی تنش روباره لایه‌های رسوبی بالادست خود را دارا می‌باشد (Pattillo et al, 2003).

ضمناً گرمای القاء شده به لایه‌های نمکی که ناشی از دمای بالای هیدروکربن تولیدی می‌باشد نیز ممکن است اندازه و میزان بارهای وارد شده از جانب این لایه‌ها بر لوله‌جداری را افزایش دهد. در مخازنی که زیر لایه‌های نمکی قرار گرفته‌اند و گسترش جانبی نمک به‌حدی است که از جوانب نیز تقریباً به طور عمودی مخزن را در بر گرفته است در اثر تولید انجام شده از مخزن، لایه نمکی تمایل به حرکت جانبی به سمت مخزن می‌یابد. چنین حرکتی از جانب لایه‌های نمکی می‌تواند رشته‌های جداری را که در لایه نمکی از نقطه نظر زمین شناسی به‌خوبی توصیف و شناسایی شده است، اما دانش و آگاهی ما در رابطه با تاثیر تغییر شکل لایه‌های نمکی در مقیاس چاه و مخزن هنوز کافی نمی‌باشد (Willson et al, 2002).

۲-۵-۳- سیمان کاری ضعیف

پدیده دوپهن‌شدگی به طور گسترده‌ای در صنعت نفت در سراسر جهان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است اما دست آوردهای این موضوع بسیار اندک بوده و تغییرات چندانی در شرایط ایجاد نشده است. از اوایل سال‌های دهه ۱۹۶۰ میلادی انستیتو نفت آمریکا روش پیشنهادی RP5C3 را در مورد معادلات مورد نیاز در طراحی لوله‌های جداری در برابر بارهای عامل ترکیدگی، دوپهن‌شدگی و

کشیدگی، ارائه کرد که این معادلات تا به امروز بدون تغییر مانده است. معادلات یاد شده از تأثیرات سیمان پشت لوله‌جداری بر روی مقاومت لوله‌جداری در برابر دوپهن‌شدگی چشم‌پوشی کرده و بارهای وارده را یکنواخت فرض می‌کند. با در نظر گرفتن تأثیرات مثبت یک عملیات سیمان‌کاری خوب و موفقیت‌آمیز می‌توان طراحی لوله‌های جداری در مقابل دوپهن‌شدگی را بهبود بخشید. چاه‌های نفت و گاز حفر شده در سازندهای مختلف که حاوی سیال نیز می‌باشند، می‌توانند مسیری ارتباطی بین سازندها و در نتیجه سیال‌های موجود در آنها بوجود آورند، لذا بلافاصله پس از حفر چاه اقدام به لوله‌گذاری و سیمان کردن پشت لوله‌جداری می‌کنند که یکی از اهداف اصلی عملیات سیمان‌کاری قطع ارتباط طولانی مدت چنین سازندهایی می‌باشد. جداسازی لایه‌های حفاری شده در تمامی دوران عمر چاه و نیز پس از بستن آن ضروری می‌باشد. در اغلب موارد و به دلایل گوناگون، از جمله عدم جایگزینی کامل دوغاب سیمان مصرفی به جای سیال حفاری موجود در فضای بین دیواره سازند و رشته‌جداری عملیات سیمان‌کاری این فضا به درستی انجام نمی‌گیرد. حتی چنانچه دوغاب سیمان کاملاً و بخوبی در طی عملیات سیمان‌کاری در این فضا قرار گیرد و نقش جداسازی سازندهای حفاری شده را بخوبی انجام دهد، تغییرات بوجود آمده در شرایط چاه می‌تواند تنش‌ها و یا تغییرات شیمیایی مورد نیاز برای برهم زدن یکنواختی سیمان (ایجاد شکاف در نوار سیمانی، جداسازی سیمان از دیواره لوله‌جداری و یا سیمان از سازند) و متعاقباً در اثر به وجود آمدن ارتباط بین سیالات موجود در سازند و نفوذ سیال به فضاهای پشت لوله‌های جداری، ایجاد تنش و یا خوردگی در لوله‌های جداری ایجاد شده و آنها را مستعد دوپهن‌شدگی نماید. از جمله شرایط به وجود آمده در چاه، که باعث برهم زدن یکنواختی سیمان می‌شود، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Rodriguez et al, 2003):

- پس از نصب و سیمان‌کاری رشته‌جداری، این رشته معمولاً تحت آزمایش فشار قرار می‌گیرد. در اثر فشار اعمالی لوله‌جداری قدری منبسط می‌شود، پس از برداشته شدن فشار لوله‌جداری به حالت اولیه برمی‌گردد. از آنجا که سیمان‌های مصرفی خاصیت

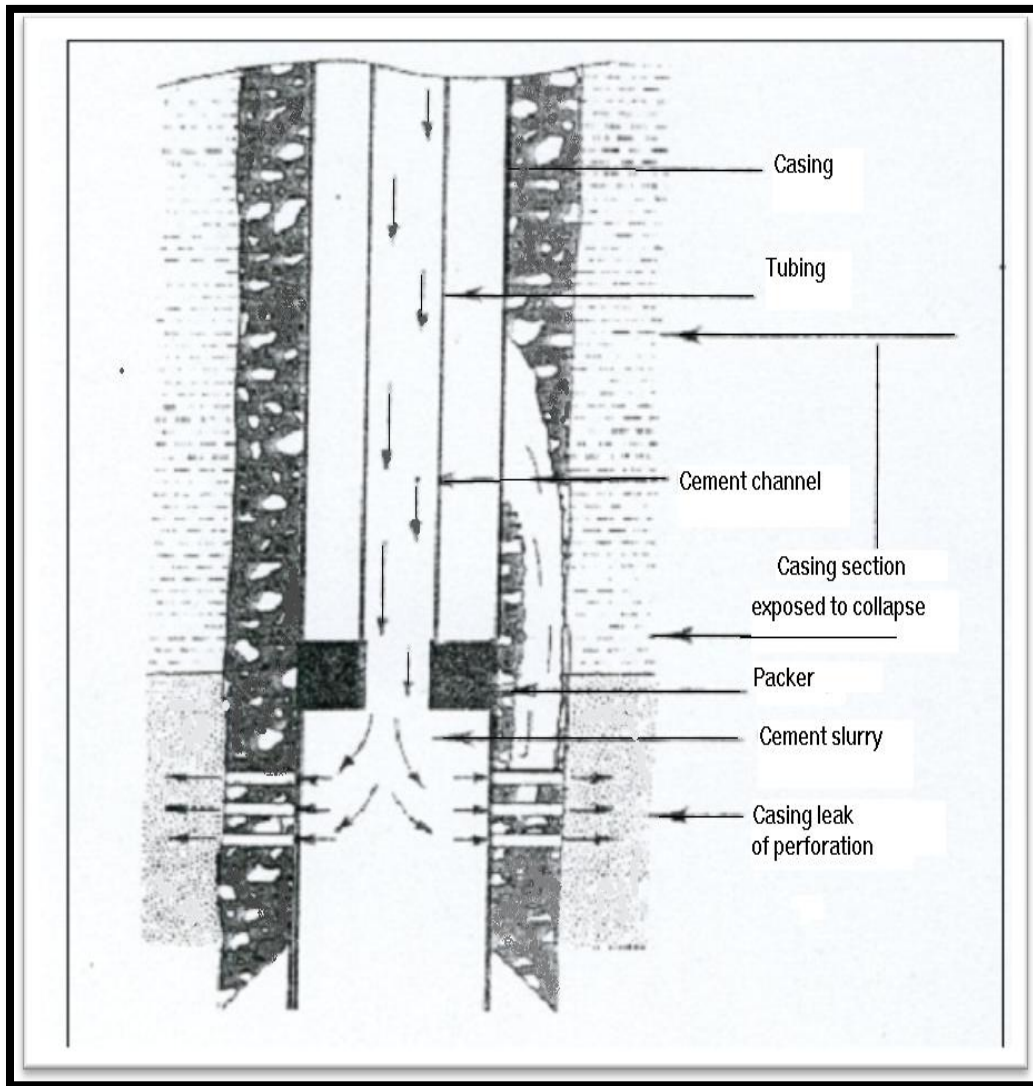
الاستیک ندارند، امکان ایجاد شکست در نوار سیمانی پشت دیواره لوله‌جداری وجود داشته و این امر باعث بوجود آمدن یک فضای باریک بین رشته جداری و سیمان پشت آن تحت عنوان میکروآنالوس^۱ می‌شود.

■ از دیگر عوامل تغییر دهنده شرایط چاه می‌توان به افزایش و یا کاهش فشار داخل چاه بر اثر افزایش و یا کاهش وزن سیال حفاری، عملیات مشبک‌کاری لوله‌جداری، عملیات تحریک چاه، تولید گاز و غیره و یا افزایش در درجه حرارت درون چاه بر اثر تزریق بخار آب، چاه‌های با شرایط فشار و درجه حرارت بالا و نیز کاهش درجه حرارت چاه بر اثر تزریق آب سرد اشاره نمود.

■ برخی عوامل شیمیایی مانند جایگزینی یون سدیم به جای یون کلسیم در سیمان نیز باعث تخریب شیمیایی سیمان شده که در نتیجه آن دیواره لوله‌های جداری در معرض سیالات موجود در سازند قرار می‌گیرند.

■ برخی اوقات در طی عملیات تزریق دوغاب سیمان برای درزبندی محل‌هایی از چاه که نشت دارد و یا هجوم آب و یا گاز وجود دارد، بر اثر انتقال فشار هیدرولیکی دوغاب سیمان به پشت لوله‌جداری، از طریق مجراهای به وجود آمده در نوار سیمان پشت لوله، ممکن است دوپهن‌شدگی لوله‌جداری اتفاق بیافتد. شکل ۲-۳ به روشنی گویای این موضوع می‌باشد (Shore, 1995).

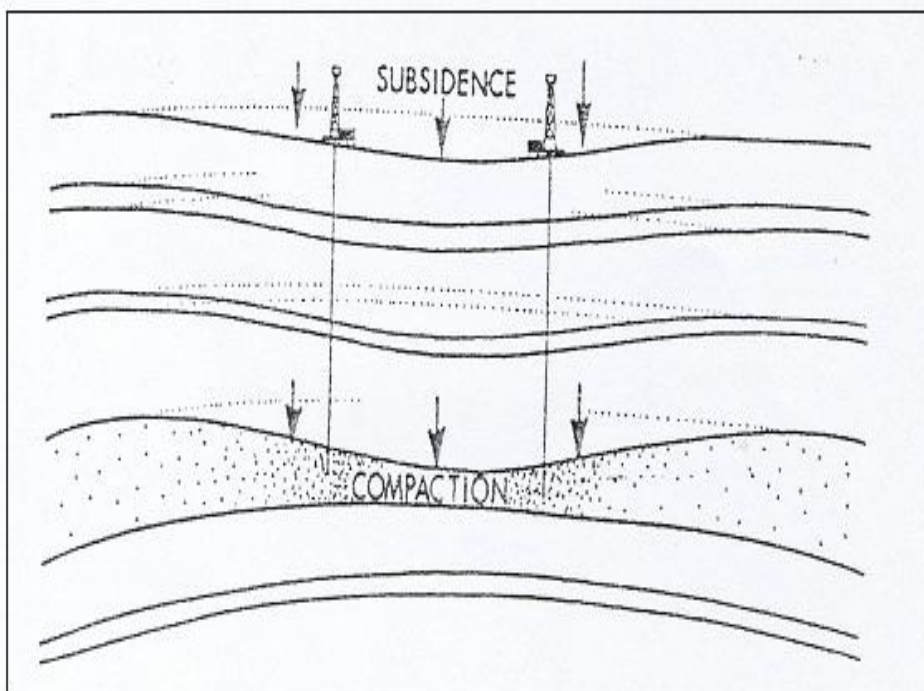
¹ Micro Annalus



شکل ۲-۳ - دوپهن شدگی ناشی از عملیات تزریق سیمان (Shore, 1995)

۲-۵-۴ - متراکم شدن سنگ مخزن

کاهش فشار ناشی از تولید، باعث تراکم سنگ مخزن با تخلخل بالا و نیز فرونشینی سنگ‌های روباره می‌شود شکل (۲-۴). در اثر چنین پدیده‌ای بارهای محوری و شعاعی وارد بر چاه افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۴ - فرونشینی سنگ‌های روباره به سبب تولید از مخزن (Da Silva et al, 1990)

پدیده تراکم سنگ مخزن در چاه‌های مایل تأثیر به‌مراتب بیشتری نسبت به چاه‌های مستقیم بر لوله‌های جداری وارد می‌آورد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Da Silva et al, 1990):

- تراکم مخزن باعث کوتاه شدن طول لوله‌جداری شده و تنش شعاعی افزایش یافته بر مقاومت تسلیم لوله‌جداری بیشتر می‌شود.
- تراکم مخزن باعث افزایش تنش خمیدگی در اطراف سطح مشترک بین سنگ پوش و سنگ مخزن شده که خود تنش فشاری بسیار بالایی را به لوله‌های جداری القاء می‌کند.
- تراکم مخزن شدیداً تنش جانبی در چاهی که نسبت به لایه‌های مخزن بسیار مایل شده را در یک جهت افزایش می‌دهد که منتهی به ایجاد تمرکز تنش بالای در لوله‌جداری می‌شود.

به‌عنوان مثال می‌توان به میدان‌های نفتی چالک^۱ واقع در دریای شمال اشاره کرد که تراکم مخزن عامل اصلی تعداد ۹۰ گسیختگی در لوله‌های جداری بوده است. چنین گسیختگی‌هایی به‌دلیل متراکم شدن سنگ‌های گچی موجود با تخلخل بالا در طی تخلیه مخزن، همراه با فرونشینی سنگ‌های روباره

¹ Chalk

اتفاق افتاده است. در میدان اکوفیش^۱ بالغ بر ۵۸ مورد گسیختگی لوله‌های جداری گزارش شده که ۳۸ مورد در سنگ مخزن و ۲۰ مورد در سنگ‌های روباره اتفاق افتاده است (Da Silva et al, 1990).

۲-۵-۵- حرکت لایه‌های زمین

لوله‌های جداری نصب شده در چاه‌های موجود در مناطقی که از نظر تکتونیکی فعال می‌باشند در معرض دوپهن‌شدگی و یا بریدگی کامل قرار دارند. هنگامی که لایه‌های زمین در اثر فعالیت‌های درونی دچار جابجایی‌های کوچک و یا بزرگ مقیاس مانند گسل‌خوردگی می‌شوند، نیروهای بسیار شدیدی به چاه و لوله‌های نصب شده در آن وارد می‌آید که باعث گسیختگی لوله‌ها و از دست رفتن چاه می‌شود (Da Silva et al, 1990).

۲-۵-۶- تمرکز تنش در پی انجام عملیات مشبک‌کاری

به طور کلی فشار روباره مؤثر، بزرگ‌ترین تنش اصلی درجا بوده و همراه با تولید هیدروکربن مقدار آن شدیداً افزایش می‌یابد. از آنجا که جهت تنش وارده در چاه‌های مایل، مخصوصاً "چاه‌های افقی، عمود بر محور چاه می‌باشد، معیارهای گسیختگی لوله‌های جداری با آنچه که در مورد چاه‌های عمودی مشاهده می‌شود متفاوت می‌باشد. در چاه مایل، اختلاف تنش‌های افقی و عمودی نیز افزایش می‌یابد و این امر باعث بوجود آمدن دو ناحیه برشی^۲ در اطراف یک چاه مایل در حین عملیات حفاری می‌شود. حال چنانچه پس از سیمان‌کاری لوله‌جداری اقدام به انجام عملیات مشبک‌کاری به روش استاندارد یا معمول شود، در لایه برشی ایجاد شده بر اثر تولید ماسه حفرات و شکاف‌هایی تشکیل می‌شود. به دلیل جهت‌دار بودن تنش و حفرات به وجود آمده، تمرکز تنش در لوله‌های جداری در جهت تنش بر جای حداقل، افزایش می‌یابد. در نتیجه تمرکز تنش بالای به وجود آمده در لوله‌های جداری دوپهن‌شدگی اتفاق می‌افتد (Morita et al, 1994).

¹ Ekofish

² Sheared Zone

۲-۵-۷- هیدرات‌های گاز طبیعی

هیدرات‌های گازی ترکیبات کریستالی هستند و هنگامی شکل می‌گیرند که مولکول‌های آب ساختار محصور شده و قفس ماندی را به دور مولکول‌های کوچکتر، مرسوم به مولکول‌های میهمان^۱ می‌سازند. هیدرات‌های گازی که بیشتر مورد توجه صنعت هیدروکربن گاز طبیعی می‌باشند متشکل از هیدروکربن‌های گاز طبیعی هستند. چنین هیدرات‌هایی متشکل از مولکول‌های آب و هر یک از هشت مولکول دیگر شامل: متان، اتان، پروپان، ایزوبوتان، بوتان نرمال، نیتروژن، دی‌اکسیدکربن، سولفید هیدروژن می‌باشند. تشکیل هیدرات‌ها در هر محیطی که آب به همراه مولکول‌های فوق‌الذکر، چه در محیط‌های طبیعی، مانند اعماق دریاها و یا محیط‌های مصنوعی مانند سیالات حفاری با پایه نفتی، در درجه حرارت‌های پایین ۳۲ درجه فارنهایت هنگام افزایش فشار امکان‌پذیر می‌باشد. از آنجایی که تشکیل هیدرات‌ها در محیط‌های پرفشار صورت می‌گیرد، بنابراین چنین فشارهایی همراه با هیدرات‌ها حفظ می‌شوند. هیدرات‌ها عموماً به‌عنوان عوامل دردسرزا محسوب می‌شوند. چرا که نه تنها باعث مسدود شدن خطوط انتقال هیدروکربن می‌شوند، بلکه با تجمع در دیواره لوله‌های جداری و مغزی، با کاهش فشار محیط شکسته شده و با آزاد کردن فشار تمرکز تنش، عاملی در جهت گسیختگی و یا دوپهن‌شدگی لوله‌ها محسوب می‌شود (Sloan and Dendy, 1991).

۲-۵-۸- افزایش درجه حرارت و فشار سیال تکمیل چاه

هنگام تکمیل چاه‌های دریایی و نصب وسایل سرچاهی فضای حلقوی بین رشته مغزی و رشته‌جداری پشت آن با سیال تکمیل چاه پر می‌شود. چنین سیالی در فضای حلقوی محصور می‌شود و از طرفی فضای حلقوی بین این رشته‌جداری و رشته‌جداری قبلی آن سیمان‌کاری می‌شود. هنگامی که چاه در شرایط تولیدی قرار می‌گیرد و درجه حرارت وسایل سرچاهی افزایش می‌یابد، سیال محصور شده که معمولاً گل حفاری و سیال حائل^۲ می‌باشد انبساط می‌یابد. چنین افزایش حجم حرارتی، شدیداً فشار

¹ Guest

² Spacer

فضای حلقوی را افزایش می‌دهد. بسته به شرایط اولیه وسایل سرچاهی، درجه حرارت سیال محصور شده می‌تواند تا بیش از ۸۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. آزمایش‌های آزمایشگاهی دلالت بر آن دارند که فشار آب یا سیال حفاری محصور با پایه نفتی می‌تواند تا بیش از ۶۹ مگا پاسکال یا ۱۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع افزایش یابد و این مقدار بالاتر از مقاومت رشته‌جداری در مقابل دوپهن‌شدگی می‌باشد، به این افزایش فشار در فضای حلقوی^۱ APB گویند (Loder et al, 2003).

۲-۵-۹- فرسودگی لوله‌ها

در نتیجه فرسودگی لوله‌های جداری، مقاومت بدنه لوله‌ها کاهش یافته و از تحمل آنها در برابر فشارهای وارده بر دیواره خارجی‌شان کاسته می‌شود. در نتیجه، نیروهای وارده از مقاومت دوپهن‌شدگی لوله‌ها بیشتر شده و لوله‌ها دوپهن می‌شوند (Placido et al, 1997).

۲-۵-۱۰- کاهش ضخامت دیواره آنها

بر اثر گردش رشته حفاری^۲ و مته دیواره داخلی لوله‌های جداری دائماً تحت عمل سایش قرار گرفته و از ضخامت دیواره آنها کاسته می‌شود که در پی آن مقاومت بدنه لوله‌ها در مقابل نیروهای وارده، مانند نیروهای خارجی دوپهن‌کننده، کاهش می‌یابد و لوله‌ها در معرض دوپهن‌شدگی قرار می‌گیرند (Placido et al, 1997).

۲-۵-۱۱- خوردگی لوله‌های جداری توسط سولفید هیدروژن

سولفید هیدروژن باعث خوردگی لوله‌های جداری شده و مقاومت آنها را در مقابل نیروهای وارده کاهش می‌دهد (Placido et al, 1997).

¹ Annular pressure buildup

² Drilling string

۲-۵-۱۲- ایجاد تنش‌های باقی مانده در لوله‌های جداری

تنش‌های کششی باقی مانده در لوله‌های جداری ناشی از عوامل متعددی از جمله سرد و گرم شدن لوله‌های جداری، تحت تأثیر عوامل مختلف مانند تزریق بخار آب، و یا کشش ناشی از نیروی وارده بر لوله‌جداری گیر کرده، ناشی از عدم یکنواختی چاه و غیره می‌باشند. چنانچه چاه‌های نفت در معرض تزریق متناوب بخار آب قرار گیرد، در بخش‌هایی از چاه که عملیات سیمان‌کاری نامطلوب بوده و یا نوار سیمانی از سازند و یا دیواره لوله‌جداری جدا شده و یا تحت گسیختگی قرار گرفته، برخی مشکلات جدی بروز می‌کند. فرایند گرم و سرد شدن امکان ایجاد تنش‌های کششی باقیمانده، برای جبران افزایش طول ناشی از افزایش درجه حرارت، در چنین بخش‌هایی از رشته جداری را میسر می‌سازد. چنین تنش‌های باقی مانده‌ای ظرفیت تحمل رشته جداری در مقابل نیروهای دوپهن‌کننده را کاهش می‌دهد. از طرفی در صورت وجود سیال محصور در پشت لوله‌های جداری، که می‌تواند سیال حفاری که به‌خوبی توسط سیمان جایگزین نشده و یا آب آزاد سیمان باشد، و افزایش حجم ناشی از فرایند گرم شدن چنین سیالی، نیروهایی به لوله‌های جداری وارد می‌آید که می‌تواند موجب دوپهن شدن لوله‌های جداری شود (Placido et al, 1997).

۲-۵-۱۳- خوردگی لوله‌های جداری به‌واسطه استفاده از تثبیت‌کننده‌ها

تثبیت‌کننده‌ها قطعات فولادی با زائده‌هایی از جنس کربور تنگستن هستند که بین لوله‌های طوق مته قرار گرفته و با تثبیت آن‌ها از انحراف چاه جلوگیری می‌کند. در ادامه عملیات حفاری در چاه لوله‌گذاری شده، در اثر سایش ناشی از تثبیت‌کننده‌ها، دیواره درونی لوله‌های جداری دچار خوردگی شده که در طی آن از ضخامت دیوار لوله‌ها کاسته می‌شود. کاهش ضخامت دیواره باعث کاهش مقاومت لوله‌ها در برابر نیروهای دوپهن‌کننده می‌باشد (Placido et al, 1997).

۲-۵-۱۴- خوردگی مکانیکی لوله‌جداری در حین مانده‌یابی^۱

ریزکننده‌ها قطعاتی هستند با دانه‌های ریز از جنس مواد بسیار سخت مانند کربور تنگستن که برای خرد کردن مانده‌های موجود در چاه به کار می‌روند. ریزکننده‌ها ضمن انجام عمل چرخش، مانده‌ها را خرد کرده و خارج کردن آنها از چاه را امکان‌پذیر می‌سازند. در مقاطعی از چاه که مانده‌ها در بخش‌های لوله‌گذاری شده چاه قرار گرفته و توسط ریزکننده‌ها حفاری می‌شوند، لوله‌های جداری نیز در معرض صدمه و آسیب ناشی از چرخ ریزکننده‌ها قرار می‌گیرند به طوری که امکان تراشیده شدن بخشی از لوله‌جداری وجود دارد. بر همین اساس در چنین مقاطعی مقاومت لوله‌ها کاهش یافته و در مقابل نیروهای وارده تسلیم و یا دوپهن می‌شوند (Placido et al, 1997).

۲-۵-۱۵- خوردگی داخل لوله‌های جداری به‌واسطه تولید ماسه

هنگامی که تولید هیدروکربن از فضای حلقوی بین رشته مغزی و رشته جداری انجام می‌گیرد و همراه با هیدروکربن تولیدی ذرات ماسه با سرعت زیاد نیز وارد این فضا می‌شوند، در اثر برخورد این ذرات با رشته‌جداری در دیواره داخلی لوله‌های جداری ساییدگی ایجاد شده و از ضخامت آنها کاسته می‌شود. در نتیجه مقاومت لوله‌ها در برابر دوپهن‌شدگی از مقدار نیروهای وارده کمتر شده و لوله‌ها تحت دوپهن‌شدگی قرار می‌گیرند (Placido et al, 1997).

۲-۶- جمع‌بندی

با بررسی‌های به عمل آمده مشخص شد که برخی از عوامل دوپهن‌کننده لوله‌های جداری قابل پیش‌بینی بوده و به کمک طراحی درست و انتخاب صحیح لوله‌های جداری قابل پیشگیری می‌باشند. به طور مثال با لحاظ کردن مقدار صحیح فشار غیریکنواخت ناشی از حرکت لایه‌های نمکی در طراحی‌های انجام گرفته و یا با انجام یک عملیات سیمان‌کاری صحیح نظیر سیمان‌های انعطاف‌پذیر، که یکی از اهداف این رساله بوده و در فصل بعدی به صورت کامل‌تر در این زمینه و در خصوص

¹ Fishing

مطالعات پیشین انجام شده مورد بحث قرار خواهد گرفت، مشکل دوپهن‌شدگی رشته‌جداری را به

حداقل کاهش داد.

فصل سوم: مطالعات انجام شده در خصوص سیمان‌های
انعطاف‌پذیر

۳-۱- مقدمه

برای جلوگیری از تخریب مکانیکی غلاف سیمانی، مشخص شده که سیمان‌های با مقادیر بالای نسبت مقاومت کششی به مدول یانگ و مقادیر پایین مدول یانگ در مقایسه با سنگ، بهترین سیمان‌ها در زمینه دوام مکانیکی می‌باشند. مقادیر یاد شده توابعی از شرایط ویژه ته‌چاهی مانند هندسه چاه، خصوصیات لوله‌های جداری، خواص مکانیکی سنگ و تاریخچه بارگذاری می‌باشند. از آنجایی که شرایط چاه‌های حفاری شده در کشورهای مختلف با توجه با افزودنی‌ها و تکنولوژی‌های در دسترس متفاوت می‌باشد، لذا موضوع به کارگیری سیستم‌های سیمانی انعطاف‌پذیر در مناطق مختلف با توجه به شرایط حاکم بر چاه‌ها متفاوت از یکدیگر می‌باشند، در ادامه مهمترین کارهای انجام شده در خصوص سیمان‌های انعطاف‌پذیر و منبسط‌شونده، شرح داده شده است. لازم به ذکر است در کشور ما ایران، تا به حال مطالعاتی در خصوص سیمان‌های انعطاف‌پذیر و منبسط‌شونده که قابل کاربرد در چاه‌های مشکل‌دار میادین مختلف باشند صورت نگرفته است.

۳-۲- مطالعات انجام شده توسط هاسکنی

هاسکنی^۱ در سال ۱۹۸۵ از افزودنی‌های لیتکس^۲ و آرد سیلیکا^۳ به منظور بهبود رفتار انعطاف‌پذیر سیمان استفاده کرد و برای تعیین تأثیر تغییر فشار و افزایش دمای چاه بر روی رفتار پوشش سیمانی قرار گرفته در فضای حلقوی، خواص مکانیکی سیمان و سنگ سازند را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داد. خواص کششی سیمان شامل مدول یانگ و مقاومت خمشی به کمک انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد $3 \times 3 \times 12$ سانتی‌متر و بارگذاری 0.1 سانتی‌متر در دقیقه محاسبه شد. نتایج نشان دادند که میزان مقاومت کششی در حدود 30 تا 50 درصد مقدار مقاومت خمشی می‌باشد. سپس آزمایش مقاومت فشاری بر روی مکعب‌های سیمانی به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ اینچ

¹ Hackney

² Latex

³ Silica fume

انجام گرفت. میزان مقاومت نمونه تابعی از نرخ بارگذاری حین انجام آزمایش می‌باشد به عبارت دیگر با کاهش میزان بارگذاری مقدار مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد. نرخ بارگذاری که در شرایط ته‌چاه بر سیمان اعمال می‌شود، با نرخ بارگذاری اعمال شده بر روی نمونه‌های سیمان در آزمایشگاه متفاوت می‌باشد. لذا بایستی ضریب ایمنی، برای کاهش میزان مقاومت خمشی به منظور دستیابی به مقادیری از مقاومت کششی در محاسبات منظور شود و در این تحقیق مقدار آن ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول شماره ۳-۱ آمده است (Hackney, 1985).

جدول ۳-۱- خصوصیات مکانیکی سیمان به دست آمده از کشش (Hackney, 1985)

مقاومت خمشی (پوند بر اینچ مربع)	مدول یانگ در خمش (گیگا پاسکال)	غلظت لیتکس (گالن بر کیسه سیمان)	آرد سیلیکا (درصد وزن سیمان)	فرمولاسیون
۱۰۵۰	۴/۰۷	۲	۰	۱
۱۱۴۱	۴/۷۷	۰	۱۰	۲
۱۴۳۴	۶/۴۱	۰	۳۵	۳
۱۴۴۴	۷/۴۵	۰	۵۰	۴
۱۶۱۸	۸/۴۵	۴	۳۵	۵

با توجه به نتایج جدول ۳-۱ می‌توان گفت سیمانی که با آرد سیلیکا و لیتکس ساخته شده است دارای مقاومت خمشی بالا است و آرد سیلیکا بازدهی سفتی سیمان را بهبود می‌دهد.

۳-۳- مطالعات انجام شده توسط گودوین و کروک

در سال ۱۹۹۲ میلادی گودوین^۱ و کروک^۲ با استفاده از یک دستگاه، عملیات تست فشار لوله‌جداری و نیز تولید از یک مخزن را شبیه‌سازی کرده و اثر تغییرات دما و فشار در طی این عملیات را بر روی چهار نمونه سیمان با ویژگی‌های مکانیکی متفاوت بررسی کردند. در این آزمایش از دو لوله‌جداری که

^۱ Goodwin

^۲ Crook

بین این دو غلاف سیمانی قرار می‌گیرد استفاده شده بود. درون لوله‌جداری داخلی تغییرات دما و فشار صورت گرفته و از طریق یک خط لوله مخصوص، تراوایی کل فضای حلقوی و نیز ماتریکس^۱ سیمان به وسیله آب و هم چنین تراوایی سیستم برای تعیین گسیختگی غلاف سیمان اندازه‌گیری شد. سیستم‌های سیمانی مورد استفاده در این کار عبارت بودند از (Goodwin and Crook, 1992):

- سیستم سیمانی ۱ شامل مخلوط سیمان/ مواد سیلیسئوس^۲، ۳۰ درصد لیتکس (درصد وزنی آب)، ۱/۲۵ درصد افزودنی کنترل کننده هرزروی سیال دوغاب و ۰/۵ درصد مواد ژل کننده^۳ و به ازاء هر کیسه سیمان ۱۰/۸۱ گالن آب استفاده شده بود.
- سیستم سیمانی ۲ حاوی مخلوط سیمان/ پوزولان^۴، ۱۰ پوند آرد سیلیکا به ازاء هر کیسه سیمان، ۳۰ درصد وزنی آب از لیتکس، ۲ گالن مواد کنترل کننده هرزروی سیال به ازاء هر کیسه سیمان، ۰/۲۵ درصد ماده ژل کننده و ۶/۴۸ گالن آب به ازاء هر کیسه سیمان بود.
- ترکیب سیمان ۳ شبیه سیستم سیمانی ۲ بوده با این تفاوت که در آن لیتکس وجود ندارد.
- سیستم سیمان ۴ شامل سیمان پایه کلاس H و ۳۵ درصد آرد سیلیکا بود.

وزن مخصوص دوغاب و ویژگی‌های این سیستم‌های سیمانی در جدول ۳-۲ آمده است و نتایج آزمایش دما و فشار به صورت زیر بود (Goodwin and Crook, 1992):

- از آزمایش‌های صورت گرفته می‌توان دریافت که سیمان‌های با مقاومت فشاری بالاتر، سیمان شکننده‌تر و نگهداری بهتری را برای لوله‌جداری فراهم می‌کنند. اما چنین سیمان‌هایی در مقایسه با سیمان‌های دیگر انسجام خود را در فشارهای اعمال شده کمتر از دست می‌دهند.

- ترک‌های ایجاد شده بر اثر تغییر دما بسیار شدیدتر از ترک‌هایی است که بر اثر تغییر فشار در غلاف سیمان به وجود آمده است. این ترک‌های تنشی، از گسیختگی سیمان در کشش به وجود می‌آید. تغییر دما در نزدیکی نواحی تولیدی ایجاد نمی‌شود بلکه نزدیک سطح زمین اتفاق می‌افتد.

¹ Matrix

² Siliceous

³ Gelling Agent

⁴ Pozzolan

تا زمانی که بر اثر انبساط لوله‌جداری ترک‌ها به سازند نرسند وجود این ترک‌ها در غلاف سیمان مشکلی را به وجود نمی‌آورد. وقتی لوله‌جداری بر اثر سرد شدن به حالت اولیه بر می‌گردد، این ترک‌ها به اندازه کافی برای جریان سیال درون غلاف سیمان باز می‌شوند.

جدول ۳-۲- ویژگی‌های سیستم‌های سیمانی مختلف (Goodwin and Crook, 1992)

وزن مخصوص دوغاب (پوند بر گالن)	مقاومت فشاری (پوند بر اینچ مربع)	مدول یانگ (پوند بر اینچ مربع)	نسبت پواسون	نوع سیمان
۱۲/۱	۱۰۰۰	$۱۰^۶ \times ۰/۶۹$	۰/۴۲	سیمان ۱
۱۳/۱	۲۵۰۰	$۱۰^۶ \times ۰/۸$	۰/۳۲	سیمان ۲
۱۳/۱	۲۰۰۰	$۱۰^۶ \times ۰/۹$	۰/۳	سیمان ۳
۱۸	۹۶۰۰	$۱۰^۶ \times ۲/۴$	۰/۱۱	سیمان ۴

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت:

در حالت کلی سیمان‌هایی که مقاومت فشاری کمی دارند نرم‌تر از سیمان‌های دیگر هستند و می‌توانند در برابر تنش‌های تناوبی ایستادگی کنند. استفاده از سیمان با وزن کم در سیمان‌کاری تمام چاه، یک پیشنهاد برای جلوگیری از ایجاد ترک در غلاف سیمان خواهد بود.

۳-۴- مطالعات انجام شده توسط ثرکلین

ثرکلین^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۸ میلادی یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی حالت تنش ایجاد شده در غلاف سیمانی ارائه داده بودند که این تنش‌ها بر اثر تغییر دما و فشار چاه به وجود آمده بودند.

فرضیات مدل ارائه شده عبارتند از (Thiercelin et al, 1998):

- سنگ سازند، سیمان و لوله‌جداری همگن^۲ و ایزوتروپیک هستند.
- این مواد دارای رفتار الاستیک خطی تا قبل از شکست هستند.

¹ Thiercelin

² Homogeneous

▪ بعد از عمل‌آوری سیمان تنش درجایی در آن وجود ندارد و فقط تنش‌های ایجاد شده بر اثر تغییر در دما و فشار چاه در نظر گرفته می‌شود.

▪ تنها دو مولفه تنش در این مطالعه بررسی شده است. به عبارت دیگر تنش‌ها در فضای استوانه‌ای دو بعدی و در راستای شعاعی و جانبی سیمان محاسبه شده است. این دو مولفه، تنش شعاعی و تنش مماسی نام دارند. در این مدل ۳ معیار برای مشخص کردن نوع گسیختگی ایجاد شده درون سیمان در نظر گرفته شده است:

▪ گسیختگی کششی^۱

▪ گسیختگی برشی (معیار مر-کلمب^۲)

▪ جدا شدن سیمان از لوله‌جداری و یا سازند

این مدل نشان می‌دهد که بر اثر تغییرات دما و فشار چاه، درسیستم‌های سیمان‌های انعطاف‌پذیر با مدول یانگ پایین تنش‌های کمتری در مقایسه با سیمان‌های سخت که دارای مدول یانگ بالایی می‌باشند، به وجود می‌آید. این ویژگی سیمان‌های انعطاف‌پذیر باعث می‌شود چنین سیمان‌هایی بر اثر اعمال تنش بدون آسیب باقی بمانند (Thiercelin et al, 1998).

۳-۵- مطالعات انجام شده توسط مارتین بوسما

مارتین بوسما^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۹ میلادی یک مدل ریاضی بر اساس تحلیل المان محدود^۴ برای پیش بینی حالت تنش در غلاف سیمان ارائه کردند. این مدل دربرگیرنده قوانین الاستو-پلاستیک^۵ برای سنگ سیمان می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به صورت ذیل می‌باشد (Martin et al, 1999):

¹ Traction

² Mohr-Coulomb Criteria

³ Bosma

⁴ Finite Element Analysis

⁵ Elasto-Plastic

- در سیمان‌های با افت حجمی، گسیختگی کششی غالب‌ترین گسیختگی خواهد بود. در این حالت نسبت مدول یانگ سازند به مدول یانگ سیمان فاکتور تعیین کننده گسیختگی مسدود کننده می‌باشد.
- گسیختگی برشی در مسدودکننده‌های فاقد تغییر حجمی و دارای مدول یانگ کمتر نسبت به سازند ظاهر می‌شود.
- مسدودکننده‌های انبساطی که مدول یانگ بیشتری از سازند دارند شدیداً دچار گسیختگی می‌شوند. اگر انبساط سیمان محدود شده باشد و مسدودکننده انعطاف‌پذیرتر از سازند باشد گسیختگی برشی ریز ممکن است بر اثر اعمال تنش در سیمان رخ دهد.
- در یک‌پناه ناپایدار، گسیختگی کششی مسدودکننده حتی قبل از بارگذاری نیز رخ داد. این گسیختگی کششی زمانی اتفاق افتاد که سختی مسدود کننده بیشتر و یا نزدیک سختی سنگ سازند بود. در حالتی که سختی مسدود کننده از سختی سازند کمتر باشد، قبل از بارگذاری حاصل از تغییر دما و فشار گسیختگی کششی ظاهر نشده بودند. به هر حال در طی بارگذاری، گسیختگی برشی در سیمان در صورت اعمال بارگذاری بیش از حد به وجود می‌آید.

۳-۶- مطالعات انجام شده توسط والتر موریس

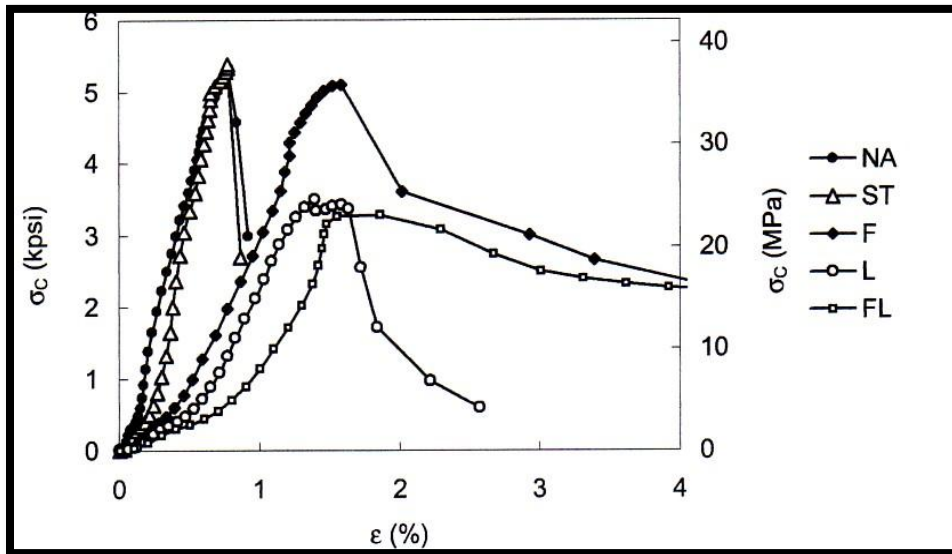
در بررسی‌های انجام شده توسط والتر^۱ در سال ۲۰۰۳ تأثیر لیتکس بر رفتار انعطاف‌پذیر سیمان و پلیمرهای فیبری بر سختی و رفتار انعطاف‌پذیر سیمان مورد آزمایش قرار گرفت. در این بررسی برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد دوغاب در شرایط چاه از روش پیشنهادی انجمن نفت آمریکا استفاده شد. تعداد ۵ نمونه دوغاب سیمان با فرمولاسیون متفاوت تهیه و خواص مکانیکی سیمان‌ها تعیین شد. در جدول شماره ۳-۳ فرمولاسیون دوغاب سیمان، خواص فیزیکی آن و مشخصات نمونه‌های سیمانی آمده است (Walter et al, 2003).

¹ Walter

جدول ۳-۳- فرمولاسیون دوغاب سیمان و مشخصات نمونه‌های سیمانی (Walter et al, 2003)

مشخصات دوغاب	نسبت آب به سیمان (درصد)	افت صافی (٪ سیمان)	پراکنده ساز (٪ سیمان)	فیبر (٪ سیمان)	لیتکس (٪ سیمان)
بدون افزودنی	۴۴	-	-	-	-
دوغاب استاندارد	۴۴	۱/۲	۰/۶	-	-
حاوی فیبر	۴۴	۱/۲	۰/۶	۰/۴	-
حاوی لیتکس	۳۴	۰/۳	۰/۴	-	۱۰
حاوی فیبر و لیتکس	۳۴	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۱۰

عمل‌آوری نمونه‌های سیمانی در درجه حرارت $18.3/2$ درجه فارنهایت و فشار 3000 پوند بر اینچ مربع انجام شد. برای ارزیابی مقاومت فشاری، چهار نمونه مکعبی با اضلاع 2 اینچی برای هر نمونه دوغاب و برای ارزیابی مقاومت کششی سیمان مطابق با استاندارد ASTM C-496 دو نمونه استوانه‌ای به قطر $1/5$ اینچ و طول 3 اینچ تهیه شد. نمونه‌های ساخته شده در یک حمام ترمواستاتیک در درجه حرارتی مشابه نمونه‌های مکعبی عمل‌آوری شدند. مطابق با روش پیشنهادی انجمن نفت آمریکا، نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در شرایط شبیه سازی چاه قرار داده شد و پس از عمل‌آوری برای تعیین مقاومت فشاری، به کمک دستگاه پرس با ظرفیت بارگذاری حداکثر 15 تن، مورد آزمایش قرار گرفتند. به کمک دو ترانس دیوسر جابجایی الکترونیکی، مقادیر تغییر شکل عمودی و افقی نمونه‌های مورد آزمایش تعیین شد. با استفاده از تغییر شکل‌های به دست آمده، میزان مدول یانگ و ضریب پواسون نمونه‌ها به دست آمد. شکل $3-1$ منحنی مقاومت فشاری در برابر تغییر شکل کرنشی برای سیمان‌های مختلف تحت مطالعه، پس از 48 ساعت عمل‌آوری، را نشان می‌دهد. در این شکل NA, FL, L, F, ST, به ترتیب دوغاب‌های حاوی فیبر و لیتکس، لیتکس، فیبر، دوغاب استاندارد و دوغاب بدون افزودنی می‌باشند.



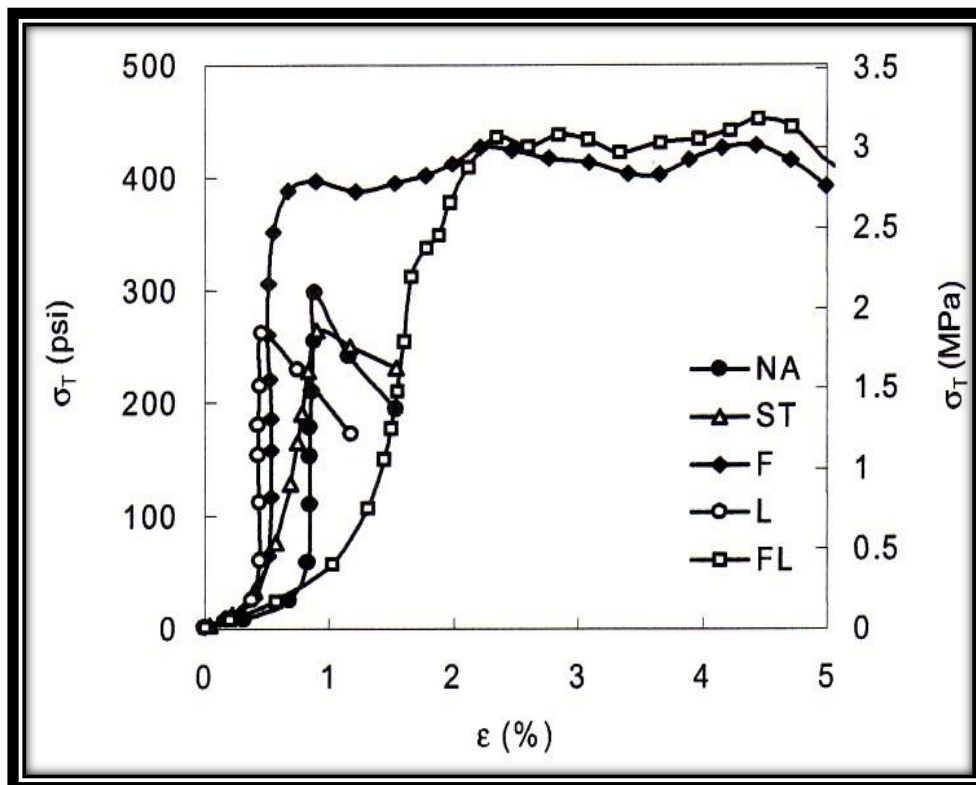
شکل ۳-۱- منحنی تغییرات مقاومت فشاری در برابر کرنش (Walter et al, 2003)

همان‌گونه که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود، منحنی تنش-کرنش در بخش‌های آغازین و پایانی آزمایش مسیری غیرخطی را به نمایش می‌گذارند. بنابراین مقادیر مدول یانگ به کمک رگرسیون خطی در بخش میانی منحنی، و ضریب پواسون به کمک رابطه $\frac{Eh}{\epsilon_V}$ محاسبه می‌شود، که در آن Eh ، ϵ_V به ترتیب کرنش‌های افقی و عمودی می‌باشند. در جدول ۳-۴ مقادیر میانگین مقاومت فشاری، مدول یانگ و ضریب پواسون نشان داده شده است. شکل ۳-۲ منحنی مقاومت کششی در برابر کرنش، نمونه‌های استوانه‌ای که از آزمایش تراکم قطری و مطابق با استاندارد ASTM C-496 انجام شده است را برای هر کدام از سیمان‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مذکور پیدا است، هر دو نمونه حاوی فیبر، پس از رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری، ظرفیت تحمل بار مشخصی را نشان می‌دهند. در این مرحله، نمونه‌های سیمانی شروع به ترک خوردن کرده اما تکه‌های ترک خورده از یکدیگر جدا نشده‌اند. به تعداد ۴ نمونه حاوی ترکیب فیبری مقداری بیش از ۱۰ درصد تغییر شکل مشاهده گردید، و در این آزمایش سختی سیمان با محاسبه مساحت زیر منحنی تنش کششی-کرنش محاسبه شد.

جدول ۳-۴- خواص مکانیکی انواع نمونه‌های سیمانی (Walter et al, 2003)

نوع سیمان	مقاومت فشاری		مقاومت کششی		مدول یانگ	نسبت پواسون	سختی
	Kpsi	MPa	psi	MPa			
بدون افزودنی	۵/۲۴	۳۶/۹	۲۷۰/۶	۱/۹	۵/۴۸	۰/۰۱۵	۷۵/۸
دوغاب استاندارد	۵/۰۵	۳۵/۶	۲۶۴/۱	۱/۸۶	۶/۲۸	۰/۰۳۶	۱۰۰/۴
حاوی فیبر	۵/۰۷	۳۵/۷	۴۴۷/۳	۳۱/۵	۲/۵۶	۰/۰۸	۸۱۰/۹
حاوی لیتکس	۳/۵۳	۲۴/۹	۲۵۸/۵	۱۸/۲	۲/۶۲	۰/۱۶	۷۴/۵
حاوی فیبر و لیتکس	۳/۴۸	۲۴/۵	۴۸۷/۱	۳۴/۳	۲/۵۴	۰/۱۹	۷۹۰/۱

همان‌گونه که از شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود دوغاب‌های سیمانی حاوی افزودنی‌های فیبر و لیتکس در مقایسه با سایر سیستم‌ها از مقاومت کششی بالاتری برخوردار بوده و سیستم در جهت انعطاف‌پذیری بیشتر پیش می‌رود.



شکل ۳-۲- منحنی تغییرات مقاومت کششی در برابر کرنش (Walter et al, 2003)

علاوه بر این برای تعیین عملکرد سیمان‌های استاندارد و فیبری تحت شرایط مشبک‌کاری، آزمایش مشبک‌کننده انجام گرفته است. سیمان‌های فیبری استفاده شده در این آزمایش دارای درصد‌های متفاوتی از فیبر بودند. نتایج حاصل از آزمایش مشبک‌کننده در جدول ۳-۵ ذکر شده است. مقادیر داده شده در این جدول درصد فیبر به کار رفته در سیمان را نشان می‌دهد (Walter et al, 2003).

جدول ۳-۵- نتایج آزمایش مشبک‌کننده (Walter et al, 2003)

موارد ارزیابی شده	سیمان استاندارد	سیمان فیبری (۰/۲)	سیمان فیبری (۰/۴)	سیمان فیبری (۰/۶)
خرابی سیمان اطراف چاه	بله	مقداری	نه	نه
ترک خوردگی قابل توجه	بله	مقداری	نه	نه
جدا شدن سیمان ازسازند	بله	بله	نه	نه
مشکل مخلوط نمایی دوغاب	ندارد	ندارد	ندارد	کمی دارد

با توجه به این جداول می‌توان گفت (Walter et al, 2003):

- سیمان‌های استاندارد و سیمان‌های فاقد افزودنی دارای رفتار شکننده و مقاومت فشاری بسیار بالایی می‌باشند. رفتار شکننده این سیمان‌ها با مقاومت کششی و سفتی سیمان کم مشخص می‌شود. از طرف دیگر مدول یانگ بالا و نسبت پواسون پایین این سیمان‌ها، ظرفیت تغییر شکل آن‌ها را کاهش می‌دهد.
- با افزودن لیتکس به سیمان رفتار انعطاف‌پذیر آن از طریق کاهش مدول یانگ و افزایش نسبت پواسون بهبود می‌یابد. اما لیتکس باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود. علاوه بر این لیتکس نمی‌تواند سفتی سیمان^۱ را بهبود دهد.
- سیمانی که با فیبر و لیتکس ساخته شده است دارای مقاومت کششی بالا است و فیبر بازدهی سفتی سیمان را بهبود می‌دهد.

¹ Cement Toughness

- سیمان‌های فیبری برای مشبک‌کاری دارای بهترین ویژگی‌های مکانیکی می‌باشند. چون این نوع سیمان‌ها مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سفتی بالایی دارند. علاوه بر این سیمان‌های فیبری دارای رفتار انعطاف‌پذیر مناسب می‌باشند.

- آزمایش مشبک‌کننده نشان می‌دهد که فیبر پیوند سیمان با سازند را افزایش می‌دهد.

۷-۳- مطالعات انجام شده توسط لی‌ری دلاگی

لی‌روی دلاگی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ در طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مطلوب به منظور جداسازی دراز مدت لایه‌ها از افزودنی‌های انعطاف‌پذیر و منبسط‌کننده و سایر افزودنی رایج استفاده کردند. فرمولاسیون دوغاب‌های مورد آزمایش در جدول ۳-۶ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶- فرمولاسیون دوغاب‌های طراحی شده (Le Roy-Delage et al, 2003)

فرمولاسیون	افزودنی انعطاف‌پذیر	افزودنی منبسط‌کننده (برحسب وزن سیمان)	دانسیتته دوغاب (پوند بر گالن)	دما (فارنهایت)
A	ندارد	۰	۱۵/۸	۱۷۰
B	ندارد	۰	۱۴	۱۷۰
C	ندارد	۰	۱۲	۱۷۰
D	دارد	۰	۱۴	۱۷۰
E	دارد	۳/۵	۱۴	۱۷۰
F	دارد	۰	۱۲	۱۷۰
G	ندارد	۰	۱۶	۲۳۸
H	دارد	۰	۱۶	۲۳۸
I	دارد	۰	۱۶	۲۳۸
J	دارد	۰	۱۶	۲۳۸

¹ Le Roy-Delage

در این تحقیق برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان شامل مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، خواص انعطاف‌پذیر سیمان شامل مدول یانگ و نسبت پواسون، نمونه‌های سیمانی به مدت ۳ روز در دستگاه عمل‌آوری قرار گرفته و سپس در آب نگهداری شدند. آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای بر روی منشورهای $30 \times 30 \times 120$ میلی‌متری انجام پذیرفته و مدول گسیختگی در خمش، مدول یانگ در خمش، و نسبت بین مدول گسیختگی در خمش و مقاومت خمشی تعیین شدند. مقاومت فشاری سیمان به کمک آزمایش شکست بر روی نمونه‌های $2 \times 2 \times 2$ اینچی انجام شده و مدول یانگ و نسبت پواسون نمونه‌ها محاسبه شدند. برای تعیین مقاومت کششی سیمان از مدول گسیختگی خمشی با فرض ضریب ایمنی ۵۰ درصد استفاده شده، به عبارت دیگر فرض شده که مقاومت کششی نصف مدول گسیختگی خمش می‌باشد. در جدول ۳-۷ خواص رئولوژی دوغاب‌های سیمان طراحی شده در شرایط محیط و دما نشان داده شده است (Le Roy-Delage et al, 2003).

جدول ۳-۷- خواص رئولوژی دوغاب‌های طراحی شده (Le Roy-Delage et al, 2003)

نقطه واروی در دما (پوند بر ۱۰۰ فوت مربع)	ویسکوزیته پلاستیک در دما (سنٹی پواز)	دما (فارنهایت)	نقطه واروی (پوند بر ۱۰۰ فوت مربع)	ویسکوزیته پلاستیک (سنٹی پواز)	فرمولاسیون
۱۳/۱	۲۲۸	۱۷۰	۶/۱	۱۷۵	D
۱۷/۲	۷۲	۱۷۰	۱۲	۱۱۶	E
۱۳/۶	۱۶۴	۱۷۰	۷/۶	۲۲۴	F
۹/۴	۸۶	۱۸۵	۹/۴	۲۲۶	H
۶/۸	۴۳	۱۸۵	۶/۲	۱۱۷	I
۹/۱	۶۸	۱۸۵	۸/۵	۱۳۱	J

مقاومت خمشی و مقاومت فشاری سیمان‌ها در اثر افزودن مواد منعطف‌کننده سیمان در دمای ۷۷ درجه سانتی‌گراد در جدول شماره ۳-۸ آمده است.

جدول ۳-۸- خصوصیات مکانیکی سیمان‌ها با افزودنی منعطف و منبسط‌کننده (Le Roy-Delage et al, 2003)

فرمولاسیون	افزودنی منعطف‌کننده	دانسیته دوغاب (پوند بر گالن)	مدول گسیختگی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
A	ندارد	۱۵/۸	۸/۴۶	۶/۶	۳۶/۶
B	ندارد	۱۴	۶/۶۹	۳/۷۵۹	۲۲/۹
C	ندارد	۱۲	۱/۱۹	۰/۵۰۴	۳/۲۱
D	دارد	۱۴	۴/۵۳	۲/۹۴۱	۲۱/۶
E	دارد+ افزودنی منبسط‌کننده	۱۴	۳/۵۲	۱/۹۸۵	۲۱
F	دارد	۱۲	۲/۷۱	۱/۲۲	۱۴/۷

در جدول شماره ۳-۹ مدول گسیختگی، مدول یانگ و مقاومت فشاری دوغاب‌های با وزن ۱۶ پوند بر گالن که در دمای ۱۱۴ درجه سانتی‌گراد تهیه شده‌اند، نشان داده شده است. همان طوری که از جدول مذکور مشاهده می‌شود. در دوغاب‌هایی که از افزودنی منعطف‌کننده استفاده شده است مدول یانگ، مدول گسیختگی و مقاومت فشاری کاهش یافته و سیستم در جهت انعطاف‌پذیر شدن پیش رفته است.

جدول ۳-۹- خواص مکانیکی دوغاب‌ها با وزن ۱۶ پوند بر گالن (Le Roy-Delage et al, 2003)

فرمولاسیون	افزودنی منعطف‌کننده	مدول گسیختگی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
G	ندارد	۹/۰۶	۹/۰۴۱	۳۹/۲
H	دارد	۸/۲	۶/۲۴۲	۳۵/۵
I	دارد	۴/۳۸	۲/۵۹۴	۲۱/۱
J	دارد	۲/۲	۱/۰۲۳	۱۰/۹

جدول شماره ۳-۱۰ نشان دهنده نتایج حاصل از تغییرات نسبت پواسون به ازای افزودن مواد منعطف‌کننده سیمان می‌باشد.

جدول ۳-۱۰- اثر افزودنی‌های منعطف‌کننده روی نسبت پواسون (Le Roy-Delage et al, 2003)

نسبت پواسون	افزودنی‌های منعطف‌کننده	فرمولاسیون
۰/۱۵	ندارد	A
۰/۱۷	ندارد	B
۰/۲۲	دارد	H
۰/۲۴	دارد	I
۰/۲۴	دارد	J

همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، دوغاب‌هایی که حاوی افزودنی منعطف‌کننده می‌باشد، نسبت پواسون افزایش یافته و سیستم در جهت انعطاف‌پذیر شدن پیش رفته است.

۳-۸- مطالعات انجام شده توسط ردیگز

در سال ۲۰۰۳ میلادی ردیگز^۱ و همکارانش با استفاده از روش المان محدود، بارهای دوپهن‌شدگی بر روی لوله‌جداری سیمان‌کاری شده را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در طی این شبیه‌سازی به این نتیجه دست یافتند که از نقطه نظر طراحی لوله‌جداری، دانستن تنش‌های درجا و ویژگی‌های مکانیکی سازند بسیار مهم هستند. این اطلاعات می‌تواند یک ضریب بارگذاری جدید مربوط به تنش درجا برای لوله‌جداری معرفی کند. با توجه به مطلب گفته شده اگر مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سازند از کمترین مقدار خود در این شبیه‌سازی (۲×۱۰۶ پام و ۰/۱) به بیشترین مقدار خود (۸×۱۰۶ پام و ۰/۴۹) برسند، ۶۲ درصد کاهش در تنش‌های حاصل از بارگذاری‌های دوپهن‌شدگی بدست می‌آید. بر این اساس نوع دوغاب سیمان به کار رفته تأثیر چندانی بر روی کاهش بارگذاری دوپهن‌شدگی صورت گرفته از سازند بر روی لوله‌جداری ندارد. در مواردی که از دوغاب سیمان انعطاف‌پذیر استفاده شود تنها ۵ درصد بهبود در این شبیه‌سازی حاصل خواهد شد (Rodriguez et al, 2003).

¹ Rodriguez

۳-۹- مطالعات انجام شده توسط بوخلیفه

بوخلیفه^۱ در سال ۲۰۰۴ میلادی با استفاده از یک آزمایش آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ، تغییر در شرایط چاه را شبیه‌سازی کرد. در این آزمایش‌ها، تنش محصورکنندگی سازند و یا لوله‌جداری ارزیابی شد. چنین آزمایشی اجازه ارزیابی عکس‌العمل مکانیکی مسدودکننده را تحت شرایط ته چاه می‌دهد. در واقع ماهیت تنش‌های فشاری یا کششی ایجاد شده در سیمان شبیه تنش‌هایی است که مسدودکننده باید در یک چاه واقعی در برابر آن‌ها مقاومت کند. در این آزمایش چندین سیستم سیمانی با رفتارهای مکانیکی متفاوت، آزمایش شد. این سیستم‌های سیمانی عبارتند از (Boukhelifa et al, 2004):

- سیمان استاندارد
- سیمان انعطاف‌پذیر
- سیمان انعطاف‌پذیر و حاوی افزودنی‌های انبساطی

نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی بیانگر این است که، سیستم‌های سیمانی انعطاف‌پذیر و قابل انبساط بهترین سیستم‌های سیمانی برای ایجاد پوشش ناحیه‌ای توسط سیمان می‌باشد (بالاترین وزن مخصوص دوغاب سیمانی که طراحی شده است ۱۲ پوند بر گالن و با مدول یانگ یک گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ می‌باشد).

۳-۱۰- مطالعات انجام شده توسط ال سوویدی

ال سوویدی^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ میلادی یک سیستم جدید سیمان‌کاری آب‌بندکننده با استفاده از افزودنی منبسط‌کننده برای آب‌بندی ناحیه‌ای دراز مدت چاه‌های گازی خوف^۳ در ابوظبی را پیشنهاد دادند. فشار فضای حلقوی در سیمان‌کاری چاه‌های گازی در مخزن خوف در بسیاری از

¹ Boukhelifa

² AL-Suwaidi

³ Khuff

چاه‌های این مخزن گزارش شده است و یک چالش بزرگ در فلات قاره در میدان ام‌شیف^۱ در ابوظبی به وجود آورده است. چالش‌های اصلی عبارتند از جلوگیری از مهاجرت گاز و رسیدن به آب‌بندی ناحیه‌ای دراز مدت با استفاده از یک سیستم سیمان مناسب آب‌بندی کننده که قادر به تحمل تنش‌های درون چاهی و دماهای بالا در طول چرخه‌های تولید باشد. یک مطالعه گسترده بر روی دو چاه که قبلاً سیمان‌کاری شده بودند انجام شده و یک تحلیل عمیق بر سیستم‌های سیمان‌کاری که در این میدان پمپاژ شده‌اند به عمل آمده است. آنها با تحلیل تنش و شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که تنش‌های ته‌چاهی حاصل از آزمایش فشار اضافی و تغییرات دما در حین ساخت چاه و تولید گاز می‌توانند به آسانی غلاف سیمان سیستم‌های سیمانی متداول را نابود کنند، لذا پارامترهای مکانیکی مهندسی شده سنگ سیمان، اثبات کردند که کلید پایداری غلاف سیمان هستند. آنها موفق شدند دوغاب سیمانی با وزن مخصوص ۱۱۸ پوند بر فوت مکعب با قابلیت انبساط ۰/۱۵ در مدت زمان ۲۴ ساعته را طراحی کنند (AL-Suwaidi and Abu soliman, 2008).

۳-۱۱- مطالعات انجام شده توسط سونال

سونال^۲ در سال ۲۰۰۸ تغییر شکل لوله‌جداری به وجود آمده از جریان پلاستیک سازندها را بررسی کرد. در این مطالعه یک مدل با استفاده از کد کامپیوتری FLAC3D ساخته شد. این مدل که بر پایه روش تفاضل محدود^۳ می‌باشد. برای شبیه‌سازی توزیع تنش در همسایگی یک چاه لوله‌گذاری شده استفاده شد. برای بررسی آسیب لوله‌جداری که از جریان پلاستیک سازندها به وجود آمده بودند، شبیه‌سازی توزیع تنش صورت گرفت. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عبارتند از (Sunal et al, 2008):

- نمک‌ها و شیل‌ها علاوه بر تفاوت‌های عمده، شباهت‌هایی نیز دارند. این سازندها، سنگ‌های تراکم‌ناپذیر هستند و بر اثر اعمال تنش، گسیختگی موضعی از خود نشان می‌دهند. به

¹ Umm Sheif

² Sunal

³ Finite Difference

هرحال تغییر شکل پلاستیک در نمک‌ها سریع‌تر از شیل‌ها اتفاق می‌افتد و موجب گسیختگی سریع‌تر لوله‌جداری می‌شوند.

▪ هر چه ضخامت غلاف سیمان بیشتر باشد، ایستادگی لوله‌جداری در برابر بارهای دوپهن‌شدگی بیشتر خواهد بود.

▪ تغییر شکل پلاستیک لوله‌جداری تحت شرایط تنش آنیزوتروپیک^۱ بسیار سریع‌تر از حالتی رخ خواهد داد که تنش‌های موجود در سازند به صورت ایزوتروپیک می‌باشد. این نشان می‌دهد که علاوه بر تنش افقی، تنش عمودی سازند نیز بر روی گسیختگی لوله‌جداری اثر می‌گذارد.

۳-۱۲- مطالعات انجام شده توسط بری وری

در سال ۲۰۰۹ میلادی بری وری^۲ و همکارانش دو سیستم سیمانی متفاوت از هم را از طریق تحلیل تنش در چاه‌های دما و فشار بالا ارزیابی کردند. این دو سیستم سیمانی عبارت بودند از (Barry and David, 2009):

- سیمان استاندارد

- سیمان انعطاف‌پذیر

سیمان انعطاف‌پذیر حاوی الاستومر^۳ به عنوان یک ماده انعطاف‌پذیر کننده و فیبر برای افزایش مقاومت کششی سنگ سیمان می‌باشد. شکل ۳-۳ نتایج تحلیل تنش را بر روی سیمان استاندارد در یک چاه با دما و فشار بالا نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر جدا شدن سیمان از لوله‌جداری در طی عملیات تکمیل و شکاف‌دار کردن^۴ چاه می‌باشد. برای جلوگیری از این مشکلات یک سیستم سیمانی

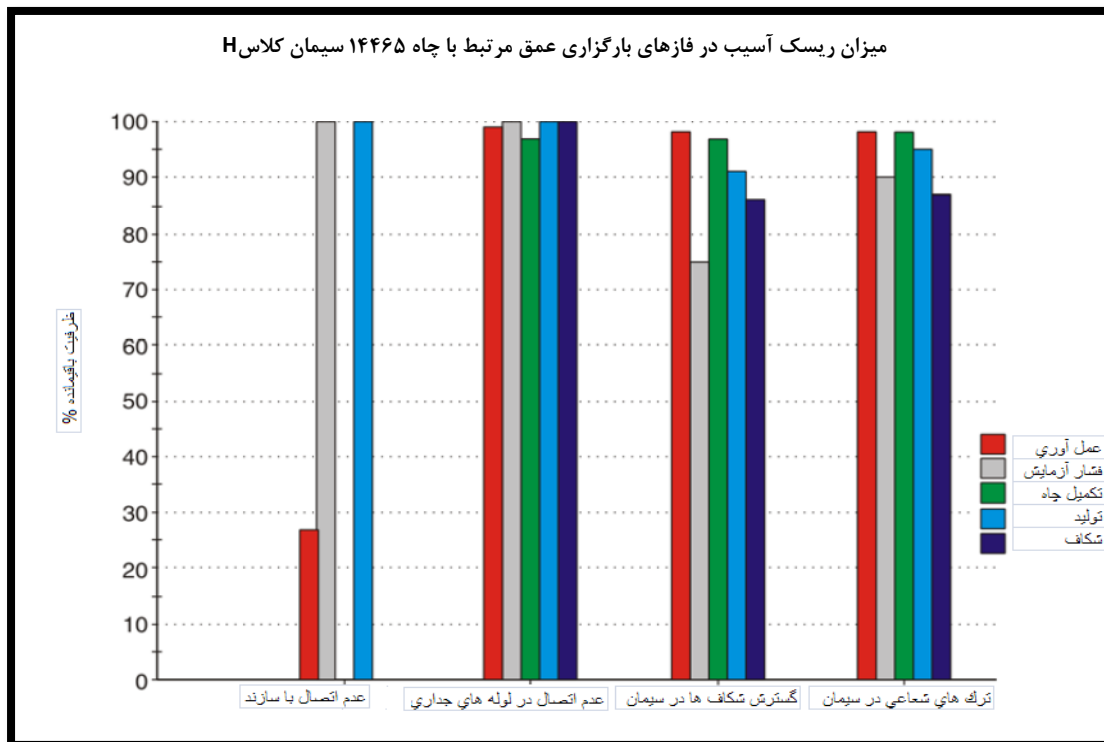
¹ Anisotropic

² Barry Wray

³ Elastomer

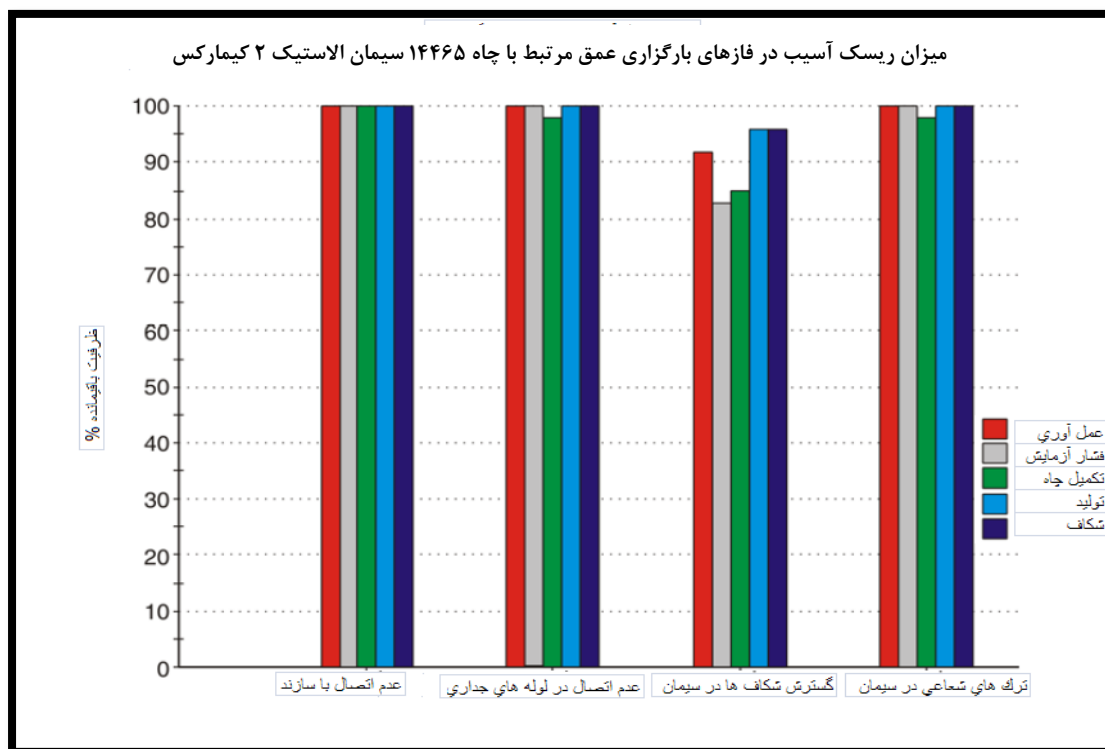
⁴ Fracturing

جدید توسط بری‌وری طراحی شد که دارای مدول یانگ و زاویه اصطکاک کمتر و نیز چسبندگی، مقاومت کششی و نسبت پواسون بیشتری در مقایسه با سیمان‌های استاندارد بود.



شکل ۳-۳- تحلیل تنش در یک سیمان استاندارد (Barry and David, 2009)

شکل ۳-۴ نتایج تحلیل تنش را بر روی سیمان انعطاف‌پذیر که حاوی الاستومر می‌باشد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور می‌توان گفت که تغییرات کلی ویژگی‌های مکانیکی سیمان باعث تهیه غلاف سیمانی می‌شود که بیشتر از ۸۰ درصد ظرفیت خود را در طول عمر چاه حفظ خواهد کرد. در نتیجه این سیستم سیمانی برای ایجاد پوشش ناحیه‌ای با دوام بسیار بهتر از سیستم‌های سیمانی متداول خواهد بود (Barry and David, 2009).



شکل ۳-۴- تحلیل تنش در یک سیمان انعطاف پذیر (Barry and David, 2009)

۳-۱۳- جمع بندی

محققین در گذشته با استفاده از افزودنی‌های مختلف نظیر فیبر، لتکس، آرد سیلیکا و غیره سیستم‌های سیمانی انعطاف‌پذیر طراحی کردند که اکثر آنها دارای وزن مخصوص متوسط تا کم بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب و با ضریب پواسون بسیار کم و فاقد انبساط لازم می‌باشند. همچنین در بیشتر این سیستم‌ها اثر مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان در نفوذ گاز و انبساط سیمان در جلوگیری از مهاجرت گاز بررسی نشده است (جدول ۳-۱۱). با وجود آنکه چنین راه‌کارهایی می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد اما بسیاری از مناطق نفتی سراسر دنیا خصوصاً در ایران نیازمند به سیستم‌های سیمانی مخصوص می‌باشند. در میدان مارون- سازند گچساران به دلیل تأمین فشار برای کنترل چاه و یا پایداری دیواره چاه، نیازمند به سیستم‌های سیمانی با دانسیته بالا در محدوده وزنی بین ۱۴۰ تا ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب می‌باشند. این سیمان‌ها بایستی با قابلیت انبساط حجمی ۳ درصد (حداکثر کاهش حجم دوغاب سیمان در اثر هیدراتاسیون ذرات سیمان ۳ درصد می‌باشد) و مدول یانگ پایین

و ضریب پواسون بالا (۰/۲۲) باشند، تا بتوانند خصوصیات لازم برای ممانعت از ایجاد بارهای نقطه‌ای ناشی از خزش لایه‌ها و گسترش آنها در طول پوشش سیمانی قبل از ایجاد هرگونه شکستگی در غلاف سیمانی را فراهم نمایند و همچنین در برابر نفوذ و مهاجرت گاز (به دلیل وجود لایه‌های گازی) کاملاً مقاوم باشند.

جدول ۳-۱۱- مشخصات سیستم‌های مختلف سیمان الاستیک ارائه شده توسط محققین

طراح دوغاب سیمان	وزن مخصوص دوغاب (پوند بر فوت مکعب)	افزایه الاستیک کننده مورد استفاده	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	نسبت پواسون	درصد انبساط سنگ سیمان
هاسکنی در سال ۱۹۸۵	۸۲	آرد سیلیکا	۷/۴۵	اندازه‌گیری نشده	-
		لیتکس	۴/۰۷		-
		لیتکس + آرد سیلیکا	۸/۴۵		-
گودوین ۱۹۹۲	۹۰	لیتکس	۴/۷	۰/۴۲	-
	۹۸	لیتکس + آرد سیلیکا	۵/۵۱	۰/۳۲	-
	۹۸	آرد سیلیکا	۶/۲	۰/۳	-
	۱۳۴	آرد سیلیکا	۱۶/۵	۰/۱۱	-
والتر موریس ۲۰۰۳	۱۱۸	فیبر	۲/۵۶	۰/۰۸	-
		لیتکس	۲/۶۲	۰/۱۶	-
		لیتکس + فیبر	۲/۵۴	۰/۱۹	-
لی‌ری ۲۰۰۳	۱۰۵	منعطف‌کننده+ منبسط‌کننده	۱/۹۸	اندازه‌گیری نشده	-
	۱۲۰	منعطف‌کننده	۶/۲۴۲	۰/۲۲	-
			۲/۵۹۴	۰/۲۴	-
			۱/۰۲۳	۰/۲۴	-
بوخلیفه ۲۰۰۴	۹۰	منعطف‌کننده+ منبسط‌کننده	۱	۰/۲	-
ال‌سویدی ۲۰۰۸	۱۱۸	منعطف‌کننده+ منبسط‌کننده	-	-	۰/۱۵

لذا بررسی و تحقیق برای دستیابی به سیمان انعطاف‌پذیر با قابلیت انبساط بالا، مدول یانگ پایین، نسبت پواسون و دانسیته بالا برای جلوگیری از دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری چاه‌های مشکل‌دار میدان نفتی مارون ضروری می‌باشد.

فصل چهارم: طراحی و ساخت قالبها، آماده‌سازی
نمونه‌ها و تجهیز دستگاه به ابزارهای اندازه‌گیری

۴-۱- مقدمه

برای تعیین رفتار مکانیکی سنگ سیمان اولاً نمونه‌ها بایستی مطابق با استانداردهای رایج موجود تهیه شوند و ثانیاً از دستگاه‌ها و ابزارهای خاصی که بتواند در شرایط واقعی چاه نمونه‌ها را عمل‌آوری و آزمایش کند استفاده کرد. از آنجایی که تهیه و آماده‌سازی نمونه سیمان با نمونه سنگ کاملاً متفاوت و بسیار سخت می‌باشد، لذا در ابتدا ایده بکارگیری نمونه‌های به دست آمده از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری دوغاب سیمان با استفاده از امواج صوت مطرح شد، اما با توجه به یکسان بودن اندازه طول و قطر این نمونه‌ها و عدم انطباق آن با استانداردهای رایج موجود در دنیا، بکارگیری این نمونه‌ها منتفی شد و لذا نیاز به تهیه قالب‌هایی بود که بتوان نمونه‌هایی مطابق با استانداردهای رایج تهیه کرد. این فصل شرح کاملی همراه با جزئیات، از روش‌های کلیدی عمل‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز و همچنین تجهیز و ساخت دستگاه‌های مورد نیاز برای تعیین رفتار مکانیکی سنگ سیمان را فراهم می‌کند.

۴-۲- تهیه نمونه

بسیار حائز اهمیت است نمونه‌هایی که تهیه می‌شوند نماینده سیستم‌هایی از دوغاب سیمان باشند که به درون چاه پمپ خواهند شد، این نمونه‌ها بایستی فاقد آب آزاد، ته‌نشینی قبل و بعد از حرارت و حباب‌های هوا باشند. برای شبیه‌سازی شرایط چاه، نمونه‌های مورد مطالعه بایستی در شرایط فشار و دمای بالا عمل‌آوری شوند. در این مورد به خصوص، با توجه به شرایط دما و فشار چاه مورد مطالعه و بر طبق روش آزمایش پیشنهادی انجمن نفت امریکا نمونه‌ها بایستی در شرایط اختلاف فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای استاتیک ته‌چاهی عمل‌آوری شوند. برای تعیین خواص انعطاف‌پذیری سنگ سیمان از استانداردهای مکانیک سنگ ASTM و ISRM استفاده شد. لذا بدین منظور به قالب‌هایی نیاز است که به کمک آنها نمونه‌های استوانه‌ای را در شرایط فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری شود (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

۴-۳- تهیه قالب‌های استوانه‌ای مناسب

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری غیرمحصور، مقاومت کششی، مدول یانگ و ضریب پواسون سنگ سیمان نیاز به نمونه‌های استوانه‌ای عمل‌آوری شده در شرایط واقعی چاه نیاز است، لذا در ابتدا استفاده از قالب‌های استوانه‌ای فلزی مطرح شد، اما با بررسی‌های انجام شده و مشاوره با اساتید راهنما و مشاور استفاده از چنین قالب‌هایی به دلایل ذیل منتفی شد:

- در حالتی که قالب‌ها به صورت استوانه‌های فلزی باشند پس از عمل‌آوری دوغاب سیمان و در زمان بیرون کشیدن نمونه از داخل استوانه فلزی، حتی در صورت استفاده از گریس‌های دما بالا، بسیار مشکل می‌باشد. چرا که چون طول نمونه بلند می‌باشد (در این رساله ارتفاع مورد نیاز نمونه‌ها حداقل ۱۸۰ میلی‌متر می‌باشد). لذا تنها روش بیرون آوردن نمونه از داخل استوانه فلزی با استفاده از استوانه فلزی توپر (شبیه بالاسری و یا پایین سری بوده، که در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد و قطر آن کسری کوچک‌تر از قطر استوانه فلزی می‌باشد) و با کمک ضربه به آن می‌باشد و در چنین حالتی به دلیل تنش وارده، نمونه دچار شکست و یا ایجاد ترک و شکاف در ساختار آن خواهد شد و دیگر قابل استفاده نخواهد بود.

- ساخت استوانه‌های فلزی که به صورت چند قطعه مجزا که با پیچ و مهره با هم متصل می‌شوند مطرح گردید، ولی این روش هم به دلیل عدم آب‌بندی مناسب چنین استوانه فلزی با ارتفاع بلند منتفی گردید.

- ساختن استوانه‌های فلزی که در برابر حرارت و فشار بالا و خوردگی مقاوم باشند و همچنین هیچ گونه تغییر شکلی در ساختار آن ایجاد نشود بسیار دشوار بود.

پس از تحقیق و بررسی همه جانبه و انجام آزمایش‌های متعدد اولیه، استفاده از قالب‌های مخصوص لاستیکی (این استوانه‌های لاستیکی، مخصوص مطالعه مغزه‌های مخزن و برای سیستم‌های اسیدکاری و در دستگاه‌های اسیدکاری به کار می‌روند و در برابر هرگونه فشار، حرارت و خوردگی مقاوم بوده و

بسیار گران قیمت می‌باشند) با قطر داخلی ۶۷ میلی‌متر و طول تقریبی ۲۰ سانتی‌متر که دارای مقاومت بالا در برابر فشار، حرارت و خوردگی می‌باشند، نتایج موفقیت‌آمیزی در رابطه با تهیه نمونه‌های استوانه‌ای سیمانی به دست داد. مزیت استفاده از چنین قالب‌هایی را می‌توان به شرح ذیل بیان کرد:

- توانایی استوانه‌های لاستیکی در انتقال مستقیم فشار به دوغاب سیمان
- مقاومت در برابر حرارت‌های بالا، بدون از دست دادن کیفیت و ایجاد تغییر شکل در آنها
- مقاومت بالا در برابر خوردگی سیالات خورنده و اسید
- استوانه‌های لاستیکی در مقایسه با استوانه‌های فلزی، به دلیل یکپارچه بودن نیازی به آب بندی شدن ندارند.

- مقاومت بالا در برابر فشار عمل‌آوری دوغاب سیمان
- در هنگام بیرون کشیدن نمونه از داخل استوانه‌های لاستیکی دیگر نیاز به ضربه زدن نیست و به دلیل انعطاف‌پذیری که استوانه‌های لاستیکی دارند، تنها کافیست، زمانی که دمای نمونه نزدیک به دمای محیط می‌رسد، نمونه را از داخل آن خارج کرد، لذا از این نظر که هیچ تنشی به نمونه وارد نمی‌شود بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

نمونه‌های استوانه‌ای به دست آمده از چنین قالب‌هایی در محدوده استاندارد انجام آزمایش می‌باشد. قالب‌ها از قسمت انتهایی به کمک قرص‌هایی از جنس تفلون و با قطری برابر با قطر داخلی قالب، به وسیله بست مناسبی محکم شده و قالب از دوغاب پر می‌شود. قرص دیگری از جنس تفلون و با قطری در حد کسری از میلی‌متر کوچکتر از قطر داخلی قالب بر روی آن و در تماس با سطح دوغاب سیمان قرار می‌گیرد که به واسطه آن، دوغاب سیمان از سمت بالا نیز در طی عمل‌آوری در معرض فشار آب قرار می‌گیرد (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- قالب‌های استوانه‌ای لاستیکی دما و فشار بالا با متعلقات آن

۴-۳-۱- عمل‌آوری نمونه‌ها

در ابتدا قالب‌های استوانه‌ای از قسمت انتهایی به کمک قرص‌های تفلونی آماده شده، توسط بست مخصوص آن محکم شد و سپس قالب‌ها از دوغاب سیمان آماده شده پر شد و در خلال پر کردن قالب‌ها از دوغاب سیمان هرچند وقت یک بار توسط پیچ گوشتی بلند ۲۰ تا ۳۰ ضربه به داخل دوغاب سیمان وارد شد تا وجود هرگونه حباب هوا در درون آن به صفر برسد و سپس قرص دیگری از جنس تفلون به عنوان درپوش و با قطری در حد کسری از میلی‌متر کوچکتر از قطر داخلی قالب بر روی آن و در تماس با سطح دوغاب سیمان قرار گرفت و توسط بست محکمی سفت شد که به واسطه سوراخ تعبیه شده روی آن، دوغاب سیمان از سمت بالا نیز در طی عمل‌آوری در معرض فشار آب قرار می‌گیرد. نمونه‌های دوغاب سیمان آماده شده در دستگاه عمل‌آوری دوغاب سیمان (شکل ۴-۲) قرار گرفته و توسط این دستگاه و مطابق با روش استاندارد انجمن نفت آمریکا، دما با نرخ معینی و مطابق با شرایط واقعی چاه به آب احاطه کننده قالب‌های لاستیکی حاوی دوغاب سیمان اعمال می‌شود، تا

زمانی که به دمای مورد نظر برسد و سپس در آن دما ثابت نگاه داشته می‌شود. به علت بسته بودن سیستم عمل‌آوری دوغاب سیمان، فشار نیز متعاقب با افزایش دما زیاد می‌شود. پس از ثابت شدن دما و فشار دستگاه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در این شرایط فشار و دما باقی می‌مانند تا کاملاً ببندند و تبدیل به سنگ سیمان شوند. پس از خارج کردن نمونه‌ها، می‌توان از آن‌ها برای تعیین رفتار مکانیکی سنگ سیمان استفاده کرد.



شکل ۴-۲- دستگاه عمل‌آوری دوغاب سیمان در شرایط دما و فشار بالا

۴-۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای

این روش برای تعیین طول و قطر نمونه‌های استوانه‌ای سنگ سیمان و مطابقت آن‌ها با استانداردهای مورد نظر به کار می‌رود. گرفتن نمونه استوانه‌ای معرف، از یک دوغاب سیمان با رعایت کلیه نکات

استاندارد انجمن نفت آمریکا همیشه امکان پذیر نیست، به خصوص در مورد دوغاب‌های سیمانی که دارای آب آزاد، ته‌نشینی و حباب هوای زیاد هستند. در مورد این گونه دوغاب‌ها باید حداکثر دقت انجام گیرد تا نمونه، مطابق با استاندارد تهیه شود. در صورتی که با وجود دقت زیاد، گرفتن نمونه مطابق با استاندارد غیرممکن باشد، موارد قابل اجرای استاندارد به طور کامل اجرا شده و عدم اجرای سایر موارد یادداشت شد.

نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش‌های زیر باید با مشخصات این استاندارد مطابقت داشته باشد (با این شرط که آزمایش‌ها طبق استانداردهای ASTM D4543 انجام گیرد).

- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری
- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته نمونه‌های استوانه‌ای
- آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم

جدول (۱-۴) انواع مغزه‌گیرهای استاندارد و قطر نمونه مغزه‌گیری را نشان می‌دهد.

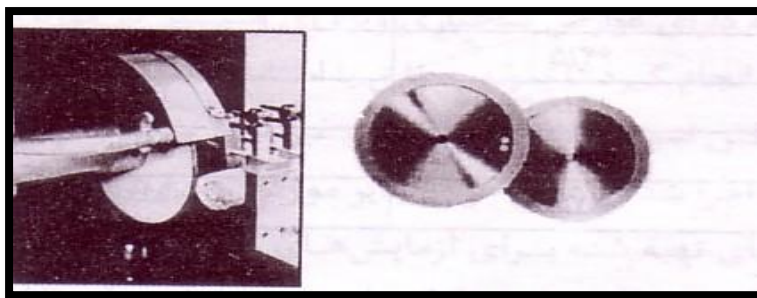
جدول ۱-۴- انواع مغزه‌گیرها و قطر استاندارد مغزه‌ها (فهمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰)

نوع مغزه‌گیر	قطر نمونه (میلی‌متر)
AX	۳۰/۱
BY	۴۲/۰
NX	۵۴/۷
NQ	۴۷/۶
HQ	۶۳/۵
PQ	۸۵/۰
BMLC	۳۵/۲

۴-۳-۳- مشخصات نمونه‌های آزمایشی

نمونه‌های آزمایشی، استوانه‌هایی با مقطع دایره بوده که سر و ته آنها توسط اره فولادی یا الماسه بریده شده و ناصافی سطوح آنها بایستی حداکثر به میزانی باشد که در این استاندارد پیشنهاد شده است.

نسبت طول به قطر نمونه‌ها مطابق با پیشنهاد استاندارد مورد استفاده برای آزمایش می‌باشد. قابل ذکر است که حداقل قطر مغزه‌های مورد آزمایش ۴۷ میلی‌متر می‌باشد. سطوح جانبی نمونه باید صاف و عاری از هر گونه ناهمواری شدید بوده و حداکثر ناهمواری در طول نمونه ۰/۵ میلی‌متر باشد. سطوح انتهایی مغزه‌های استوانه‌ای باید کاملاً با یکدیگر موازی و عمود بر محور مرکزی مغزه باشند. این سطوح نباید ناصافی بیش از ۲۵ میکرون داشته باشند. در شکل (۴-۳-ب) نمونه‌ای از اره‌های مخصوص برش سطوح انتهایی نشان داده شده است. قابل ذکر است که بهترین روش برای صاف نمودن سطوح انتهایی نمونه، سایش آنها می‌باشد. نمونه‌ای از چرخ ساینده که برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل ۴-۳-الف نشان داده شده است (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).



(ب)

(الف)

شکل ۴-۳- دستگاه‌های آماده‌سازی نمونه‌ها، الف- چرخ‌های ساینده ب- اره فولادی (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰)

۴-۳-۴- تعیین صافی سطح جانبی و انتهایی نمونه

نمونه استوانه‌ای روی یک سطح صاف که دارای زبری بیش از ۱۳ میکرون نمی‌باشد دوران داده می‌شود و حداکثر فاصله بین نمونه و سطح صاف توسط یک گیج حساس اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده کمتر از ۰/۵ میلی‌متر باشد، نمونه از نظر صافی سطح جانبی و انتهایی مناسب است.

۴-۳-۵- اندازه‌گیری طول و قطر مغزه

طول مغزه توسط کولیس و با دقت ۰/۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. این طول عبارت است از فاصله مراکز سطوح انتهایی، که دهانه کولیس باید روی آنها مماس باشد. قطر مغزه نیز توسط کولیس و با همان دقت تعیین می‌شود. بدین ترتیب که دو قطر عمود بر هم در وسط ارتفاع نمونه، اندازه‌گیری شده و از آنها میانگین گرفته می‌شود.

۴-۳-۶- پرداخت کردن سطوح انتهایی مغزه‌ها

بهترین روش برای پرداخت کردن سطوح انتهایی نمونه، استفاده از یک صفحه ساینده مناسب می‌باشد. در این حالت از آب برای خنک کردن سطح سایش کمک گرفته می‌شود. علاوه بر روش فوق می‌توان برای پرداخت سطوح، از پودرهای ساینده موجود در بازار و ریختن آنها بین سطح نمونه و یک صفحه گردان استفاده کرد. بسته به اینکه نمونه‌ها در چه مرحله‌ای از سایش قرار دارند از پودری با دانه‌بندی مناسب استفاده می‌شود. به طور کلی تجربه اپراتور در به دست آوردن سطح پرداخت مناسب اهمیت بسیاری دارد.

۴-۳-۷- شرایط رطوبت نمونه

درصد رطوبت نمونه تأثیر زیادی روی مقاومت و تغییر شکل پذیری سنگ دارد، بنابراین شرایط رطوبت نمونه باید مطابق با شرایط واقعی چاه باشد. بر اساس روش‌های موجود در بین شرکت‌های بزرگ دنیا نمونه پس از عمل‌آوری به مدت ۸ ساعت در آب مورد استفاده در ترکیبات دوغاب سیمان که در این تحقیق آب نمک اشباع می‌باشد قرار گرفته شد.

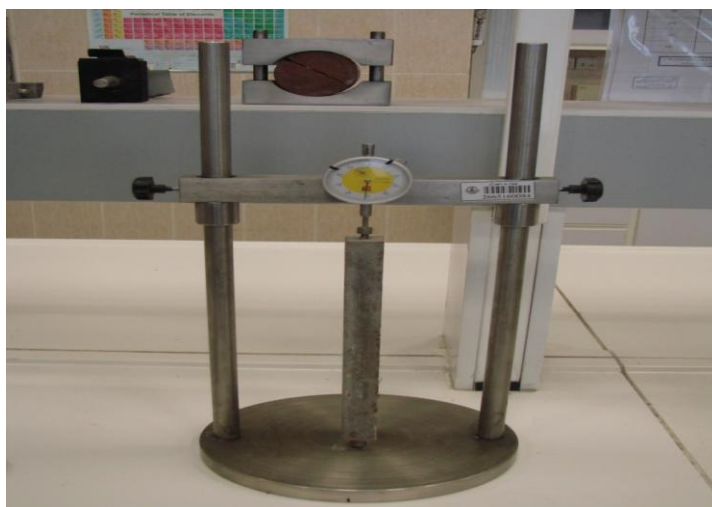
۴-۴- تهیه نمونه‌های مستطیلی شکل

برای اندازه‌گیری درصد انبساط طولی سنگ سیمان، به نمونه‌های مستطیلی شکل عمل‌آوری شده در شرایط واقعی چاه نیاز است، لذا استفاده از قالب‌های فلزی مستطیل شکل فلزی، که اصولاً از این

قالب‌ها برای کارهای عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد مطرح شد (شکل ۴-۴). اما به دلیل آن که چنین قالب‌هایی مانع از اعمال فشار مورد نیاز به دوغاب سیمان می‌شد، پس از تحقیق و بررسی همه جانبه و انجام آزمایش‌های متعدد اولیه تصمیم گرفته شد، نمونه دوغاب سیمان پس از بندش اولیه در حمام آب (تحت درجه حرارت ۲۰۰ درجه فارنهایت) از قالب‌ها بیرون آورده شود و طول اولیه آن با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری انبساط طولی سنگ سیمان (شکل ۴-۵) قرائت و بلافاصله در دستگاه عمل‌آوری سیمان (شکل ۴-۲) تحت شرایط چاه قرار گیرد و پس از مدت زمان تعیین شده قرائت‌های ثانویه انجام شود.



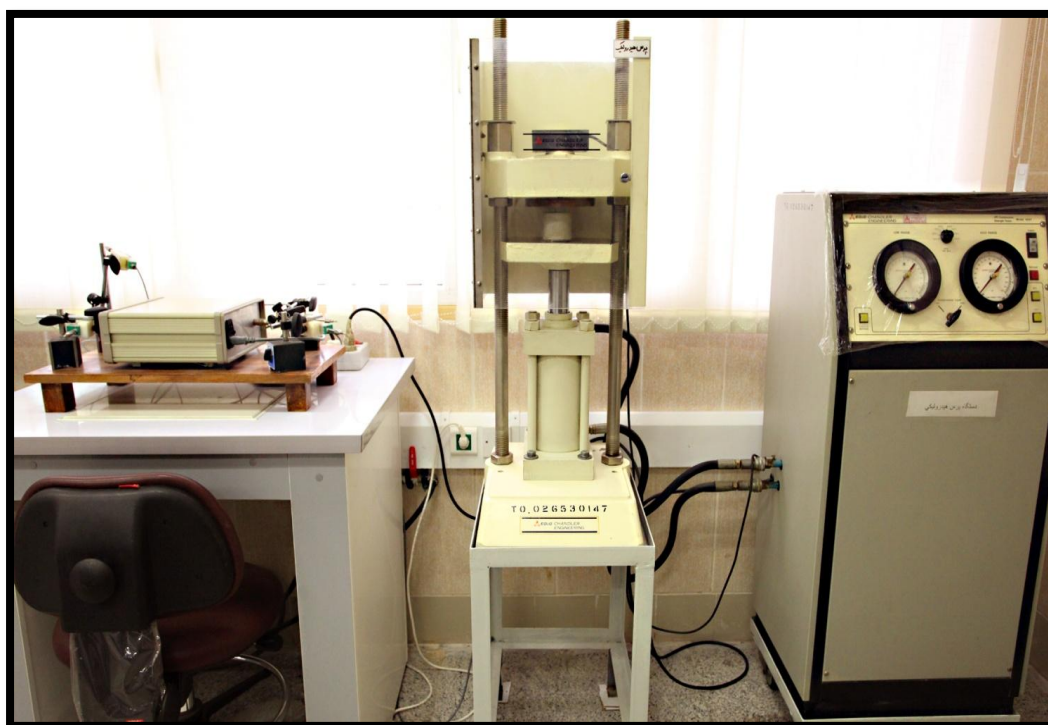
شکل ۴-۴- قالب‌های مستطیلی شکل انبساط سیمان



شکل ۴-۵- دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی سیمان

۴-۵- تجهیز دستگاه مقاومت فشاری به ابزار اندازه‌گیری کرنش‌ها

دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری مدل ۴۲۰۷ ساخت شرکت چندلر^۱، پرس هیدرولیکی برقی اتوماتیک است (شکل ۴-۶). این دستگاه برای انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی مکعبی شکل دقیقاً مطابق با نیازهای شرح آزمایش شماره ۱۰ انجمن نفت امریکا، می‌باشد. از آنجایی که به کمک دستگاه پرس هیدرولیکی تنها می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌ها را تعیین کرد، لذا برای اندازه‌گیری مدول یانگ ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$) و نسبت پواسون ($\nu = \frac{\Delta d}{\Delta l}$) نیاز است تغییرات محوری و جانبی نمونه تحت تراکم به ازای بار یا تنش وارده در طی انجام آزمایش تعیین شود، برای این منظور دستگاه پرس هیدرولیکی به چهار سنسور جابجایی^۲، سنسور فشار، سیستم تحلیل‌گر داده‌ها^۳ و نرم‌افزار محاسبه مدول یانگ و ضریب پواسون مجهز شد که در ادامه به شرح کار آن پرداخته می‌شود.



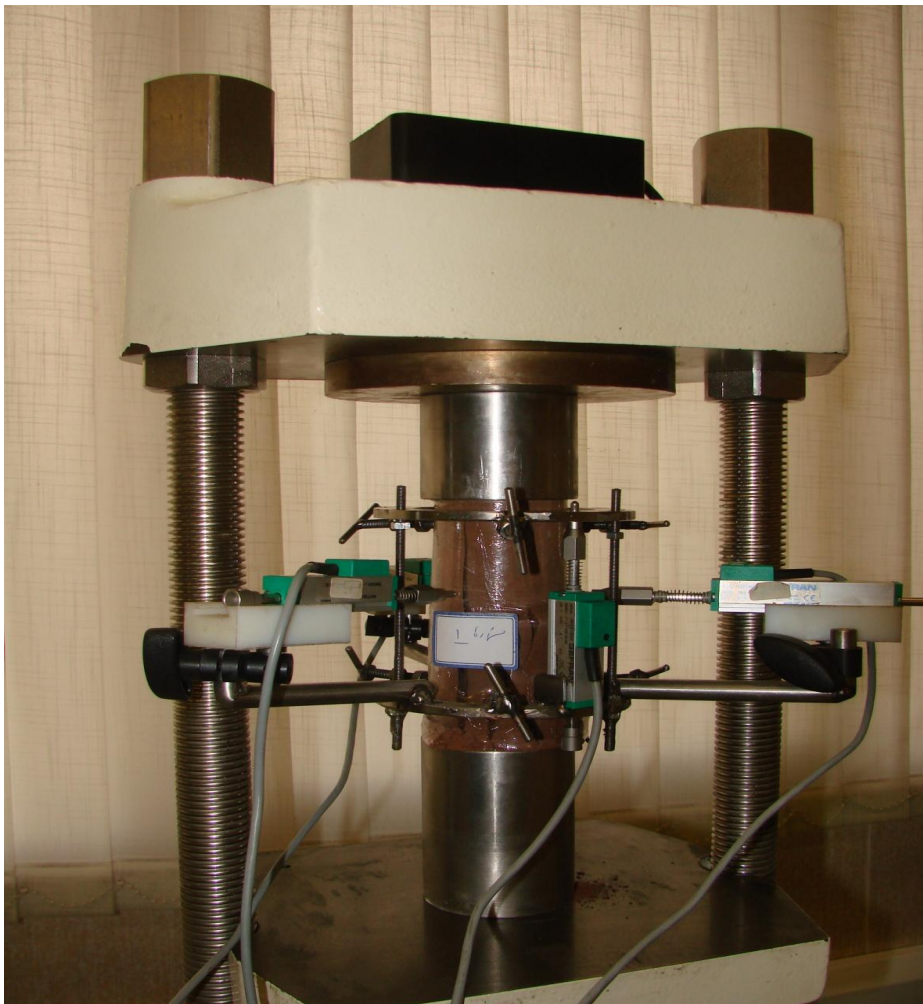
شکل ۴-۶- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری

¹ Chandler

² Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

³ Data logger

برای محاسبه کرنش طولی یا محوری نمونه تحت تراکم، و یا به عبارتی میزان کاهش طول نسبت به طول اولیه بایستی در هر لحظه فاصله بین دو رینگ نگهدارنده نمونه، که کرنش سنج طولی بین آنها قرار گرفته، محاسبه شود. با نصب یک سنسور جابجایی، می‌توان میزان جابجایی فک متحرک دستگاه را از لحظه شروع آزمایش تا لحظه شکست نمونه اندازه‌گیری کرد. سنسور مورد استفاده با کورس جابجایی برابر با ۵۰ میلی‌متر و با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ درصد، ساخت کشور ایتالیا می‌باشد که توسط یک پایه مغناطیسی نگهداری می‌شود (شکل ۴-۷).



شکل ۴-۷- استفاده از سنسور جابجایی برای تعیین مدول یانگ نمونه‌های تحت تراکم

برای محاسبه کرنش جانبی نمونه تحت تراکم بایستی تغییر قطر نمونه در هر لحظه از آزمایش به ازای بار وارده اندازه‌گیری شود. با قرار دادن ۳ سنسور جابجایی در اطراف نمونه استوانه‌ای سیمان و

محاسبه میانگین جابجایی ۳ سنسور، تغییر قطر نمونه به ازای بار وارده در هر لحظه در طی انجام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- سنسورهای جابجایی برای محاسبه نسبت بواسون

برای محاسبه میزان بار یا نیروی وارده از جانب فک‌ها به نمونه مورد آزمایش از یک سنسور فشار با حداکثر ظرفیت ۲۵۰ بار و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ درصد و با خروجی جریان ضد خوردگی در مقابل اسید و باز، ساخت کشور آلمان استفاده شد که در مسیر خروجی روغن دستگاه، که تأمین کننده فشار واره به فک است، قرار گرفته و فشار روغن را اندازه‌گیری می‌کند. از حاصل ضرب فشار روغن در سطح مقطع پیستون جک هیدرولیکی دستگاه میزان نیروی وارده از فک به نمونه محاسبه می‌شود. اطلاعات دریافتی از ۴ سنسور جابجایی و یک سنسور فشار، به وسیله ۵ کانال و یا کابل به یک سیستم تحلیل گر داده‌ها وارد می‌شود. سیستم تحلیل گر مورد استفاده قابلیت دریافت ۸ کانال ورودی آنالوگ

را دارد، لذا در صورت دلخواه می‌توان ۳ سنسور جابجایی دیگر را نیز به سیستم اضافه کرد. شکل (۹-۴) شمایی از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری مجهز به سنسورهای جابجایی را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۴- دستگاه اندازه‌گیری مدول یانگ و نسبت پواسون

سیستم تحلیل‌گر قابلیت انطباق با انواع سنسورهای غیر القایی را داشته و دقت نمونه‌گیری آن ۱۶ بیت واقعی می‌باشد. این سیستم، قابلیت دریافت ۱۰ داده در هر ثانیه از تمام کانال‌ها را داشته و از لحاظ ایمنی، کلیه ورودی‌ها در مقابل افزایش ولتاژ تا ۴۰ ولت محافظت می‌شوند. پس از دریافت داده‌ها از طریق کانال‌های ورودی به تحلیل‌گر، سیستم داده‌ها را تجزیه و تحلیل کرده و بر روی صفحه رایانه، که بوسیله کابل انتقال داده‌ها بدان متصل می‌شود، به شکل ۴ کانال تغییر اندازه با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و دو کانال یکی فشار بر حسب بار و دیگری نیرو بر حسب کیلو نیوتن با دقت ۰/۱ به نمایش در می‌آید. با اجرای برنامه از طریق رایانه و تعیین تعداد داده‌های ثبت شونده در ثانیه، تمامی

اطلاعات در یک پوشه با پسوند txt. از هر زمان تا پایان آزمایش ذخیره می‌شود. داده‌های ذخیره شده را می‌توان به کمک نرم افزارهای گوناگون مانند Excel یا Origin به شکل نمودار تنش- کرنش درآورده و ضریب یانگ و نسبت پواسون نمونه‌ها را محاسبه کرد.

۴-۶- جمع‌بندی

بسیار پر اهمیت است، نمونه‌هایی از دوغاب سیمان که تهیه می‌شوند تا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها مورد بررسی قرار گیرند، بایستی نه تنها نماینده سیستم‌هایی از دوغاب سیمان باشند که به درون چاه پمپ خواهند شد، بلکه در شرایط واقعی چاه عمل‌آوری و مورد آزمایش قرار گیرند. لذا در این رساله پس از تحقیق و بررسی همه جانبه و انجام آزمایش‌های متعدد اولیه، استفاده از قالب‌های استوانه‌ای لاستیکی مقاوم در برابر فشار، حرارت و خوردگی برای بررسی رفتار مکانیکی سنگ سیمان، در دستور کار قرار گرفت، و نتایج موفقیت‌آمیزی در رابطه با تهیه نمونه‌های استوانه‌ای سیمانی به دست داد. مزیت چنین قالب‌هایی توانایی آنها در انتقال مستقیم فشار به دوغاب سیمان و مقاومت بالا در برابر حرارت‌های بالا، بدون از دست دادن کیفیت و ایجاد تغییر شکل در آنها می‌باشد، و همچنین با ساخت دستگاه اندازه‌گیری انبساط سیمان و تجهیز دستگاه پرس‌هیدرولیکی به سیستم کرنش‌سنج می‌توان حجم زیادی از آزمایش‌ها را با حداقل هزینه، زمان، دقت بالا و با نتایج بسیار مثبت به اتمام رساند.

فصل پنجم: خصوصیات دوغاب سیمان و روش‌های
اندازه‌گیری و عوامل مؤثر بر آن

۵-۱- مقدمه

سیستم‌های سیمانی در صنعت حفاری بر اساس شرایط ته‌چاه اعم از فشار، دما و وزن گل طراحی می‌شوند. از آنجا که ویژگی‌های این سیستم‌های سیمانی تحت شرایط ته‌چاهی مختلف، متفاوت خواهد بود، لذا دانستن یکسری از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دوغاب سیمان گامی مؤثر در طراحی سیستم‌های سیمانی مناسب خواهد بود. مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در سیمان حفاری که در طراحی دوغاب سیمان باید در نظر گرفت در این فصل به آن اشاره شده است. همچنین در این فصل به مهم‌ترین و کاربردی‌ترین دستگاه‌هایی که برای اندازه‌گیری خصوصیات دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه مورد نیاز بوده و استفاده گردیده، اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است کلیه دستگاه‌های مورد استفاده در این رساله متعلق به پژوهشگاه صنعت نفت بوده و تمامی عکس‌های تهیه شده با کسب مجوز از مسئولین مربوطه انجام گرفته است.

۵-۲- گرانروی^۱ و آب محتوای^۲ دوغاب‌های سیمانی

در سیمان‌کاری اولیه، دوغاب سیمان بایستی دارای گرانروی یا قوام^۳ لازم برای فراهم کردن مؤثرترین عملیات جابجایی گل توسط دوغاب را فراهم کرده و نیز درزبندی مطلوبی را بین سازند و لوله‌های جداری ایجاد کند. برای دستیابی به چنین امری، اکثر دوغاب‌های سیمانی با حجمی از آب مخلوط می‌شوند که در پی آن حجم دوغاب پس از ایجاد بندش برابر با حجم دوغاب بدون جدایش آب آزاد باشد. در یک دوغاب سیمانی، اندازه ذرات، مساحت ذرات و افزودنی‌های بکار رفته تماماً در میزان آب مورد نیاز برای حصول گرانروی تعیین شده مؤثر می‌باشند. محدوده‌های معینی برای گرانروی دوغاب سیمان وجود دارند و چنین محدوده‌هایی از میزان گرانروی، تعیین کننده میزان غلظت و نیز قابلیت

¹ Viscosity

² Water content

³ Consistency

پمپ پذیری دوغاب سیمان، تحت شرایط چاه می‌باشند. میزان آب مصرفی در هر یک از موارد به صورت ذیل قابل تعریف می‌باشند (سلطانیان و همکاران، ۱۳۹۱):

آب حداکثر

آب حداکثر به آن میزان آب مخلوط برای هرگونه ترکیب دوغاب سیمان اطلاق می‌گردد که در پی آن حجم دوغاب سیمان پس از ایجاد بندش برابر با حجم دوغاب اولیه سیمان بدون آنکه میزان جدایش آب آزاد از ۱/۵ درصد فزونی یابد، باشد. این امر توسط آزمایش ته‌نشینی^۱ در یک لوله مدرج ۲۵۰ میلی‌لیتری پس از آنکه دوغاب سیمان در دستگاه اندازه‌گیری زمان بندش اتمسفری به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شد، تعیین می‌شود.

آب نرمال

آب نرمال میزان آب مخلوطی می‌باشد که گرانروی برابر ۱۱ سنتی‌پواز، پس از اختلاط دوغاب سیمان به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه آزمایش اندازه‌گیری زمان بندش اتمسفری را بدست دهد. از آنجایی که مقادیر بدست آمده، مقادیر گرانروی واقعی نمی‌باشند، لذا انجمن نفت امریکا برای دوغاب‌های سیمانی از واحدهای گرانروی استفاده می‌کند. واحد گرانروی بر مبنای جدایش آب نبوده بلکه بر مبنای نیروهای گشتاور^۲ استوار می‌باشد. از آنجایی که میزان آب نرمال موجب ساخت دوغابی با قابلیت پمپاژ مطلوب می‌شود، لذا گاهی بدان آب بهینه نیز گفته می‌شود.

آب حداقل

آب حداقل میزان آب مخلوطی می‌باشد که به دوغاب سیمان، پس از آن که مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه اندازه‌گیری زمان بندش اتمسفری مخلوط گردید، گرانروی برابر ۳۰ سنتی‌پواز را بدهد. دوغاب

¹ Settling test

² Torque

ساخته شده با آب حداقل نسبتاً غلیظ بوده و از آن می‌توان، به طور مثال در کنترل هرزروی بهره جست. عواملی نظیر نسبت آب به سیمان، حجم دوغاب، و حجم دوغاب پس از بندش رابطه تنگاتنگی با اندازه ذرات یا مساحت ذرات سیمان دارند. برای اکثر سیمان‌های API اندازه ذرات و مقادیر آب مورد نیاز برای دستیابی به مقادیر مشخصی از مقاومت، کندبندی، قابلیت پمپاژ و غیره توسط انجمن نفت آمریکا تعیین شده است. در استانداردهای انجمن نفت آمریکا فهرستی برای ریزی و نرمی سیمان‌های کلاس G و H تهیه نشده بلکه میزان آب مخلوط و آب آزاد مجاز، که توسط ریزی ذرات سیمان قابل کنترل می‌باشند، مشخص شده است.

۵-۳- زمان بندش

زمان بندش مدت زمانی است که دوغاب سیمان تحت شرایط شبیه‌سازی ته‌چاهی بدون وقفه در حالت سیال باقی می‌ماند. برای اندازه‌گیری این خاصیت از دوغاب سیمان از "دستگاه زمان بندش فشار بالا/دمای بالا" استفاده می‌شود که شامل یک محفظه استوانه‌ای دوار برای دوغاب سیمان همراه با یک قطعه ثابت که حاوی تیغه‌های پارو شکل، که تماماً درون یک اتاقک فشار قرار می‌گیرند، می‌باشد (شکل ۵-۱). تجهیزات اندازه‌گیری زمان بندش هرگونه دوغاب سیمانی تحت شرایط آزمایشگاهی در روش‌های آزمایش انجمن نفت آمریکا مشخص شده است. دستگاه آزمایش زمان بندش، شرایط چاه را تا دمای ایستای ته‌چاهی^۱ ۵۰۰ درجه فارنهایت و فشارهای بالای ۲۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع شبیه‌سازی می‌نماید. همزمان با اعمال دما و فشار بر روی دوغاب سیمان توسط دستگاه آزمایش، گرانش دوغاب سیمان به طور پیوسته اندازه‌گیری و بر روی نوار مدرج ثبت می‌شود. حد بالای قابلیت پمپ‌پذیری دوغاب سیمان زمانی است که گرانش دوغاب سیمان به حدود ۷۰ تا ۱۰۰ سنتی‌پواز برسد. میزان زمان بندش به طور وسیعی به نوع کار، شرایط چاه و حجم دوغاب سیمان مورد پمپاژ

¹ Bottom Hole Static Temperature

بستگی دارد. هنگامی که قرار است لوله‌های جداری در اعماق ۶۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ فوتی سیمان‌کاری شوند، عموماً در طراحی دوغاب زمان پمپاژ را برابر ۳ تا ۳/۵ ساعت محاسبه می‌کنند.



شکل ۵-۱- دستگاه نیم‌بندش با قابلیت اعمال دما و فشار

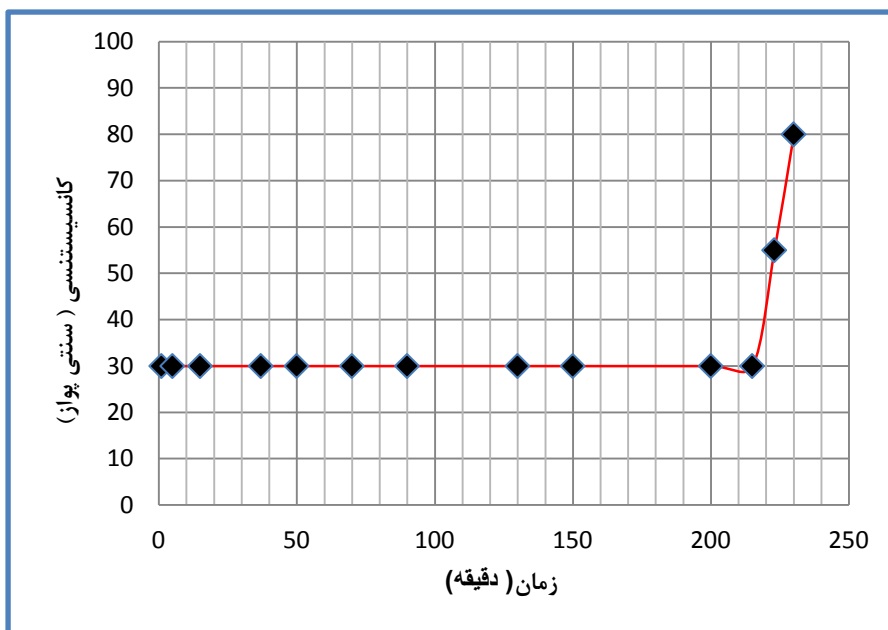
چنین طول زمانی ضریب ایمنی مناسبی را ایجاد می‌کند، چرا که تعداد بسیار کمی از عملیات سیمان‌کاری، حتی در وسعت زیاد، بیش از ۹۰ دقیقه برای قرار دادن دوغاب سیمان در فضای حلقوی مربوطه نیاز دارند. در انجام عملیات سیمان‌کاری لوله‌های مغزی عمیق، جایی که با دماهای نسبتاً بالا مواجه هستیم، مدت زمان ۳ تا ۳/۵ ساعت مدت زمان مناسبی برای پمپاژ سیمان می‌باشد. شکل ۵-۲ کانسیستومتر اتمسفریک^۱ را نشان می‌دهد که از این دستگاه برای عمل‌آوری دوغاب سیمان در شرایط فقط دما به کار می‌رود، و همچنین از این دستگاه برای عمل‌آوری دوغاب سیمان برای اندازه‌گیری افت‌صافی استاتیکی و اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان پس از اعمال حرارت می‌توان استفاده کرد. پروفیل گیرش سیمان نیز در ارزیابی عملکرد دوغاب سیمان در برابر نفوذ گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیمانی که توسعه گیرش آن با سرعت بیشتری انجام گیرد عملکرد بهتری را خواهد داشت. به این معنی که گیرش آن تدریجی نباشد و افزایش گرانش دوغاب سیمان در دوره

^۱ Atmospheric Consistometer

زمانی کوتاه انجام پذیرد. شکل ۳-۵ نشان دهنده این نوع رفتار در دوغاب‌های سیمان ایده‌آل است (سلطانیان و همکاران, ۱۳۹۱).



شکل ۳-۵-۲- نمایش از دستگاه کانسیستومتر اتمسفریک



شکل ۳-۵-۳- پروفیل گیرش نمونه دوغاب سیمان ایده‌آل (سلطانیان و همکاران, ۱۳۹۱)

۵-۴- مکانیزم هیدراتاسیون سیمان

عوامل مؤثر در مکانیزم هیدراتاسیون سیمان شامل آب محتوا، مواد مورد اختلاط، زمان اختلاط، درجه حرارت و فشار می‌باشند. فشار و درجه حرارت ته چاه عواملی هستند که در طراحی نمی‌توانند مورد تغییر یا اصلاح قرار گیرند، که در این میان دما بحرانی‌ترین عامل می‌باشد. حین اندازه‌گیری زمان بندش، دمای گردش ته‌چاهی^۱ و فشار گردش ته‌چاهی^۲ بر روی دوغاب سیمان اعمال می‌شود. زمان بندش دوغاب سیمان بایستی به میزان کافی، برای قرارگیری مطمئن دوغاب سیمان در فضای حلقوی و نیز با توجه به بروز هرگونه مشکل غیر منتظره عملیاتی، طولانی باشد. ضریب ایمنی مطلوب برای هر عملیات سیمان‌کاری، متفاوت می‌باشد. برای رشته‌های مغزی و تولیدی، تکمیل عملیات کامل سیمان‌کاری به ندرت بیش از ۶۰ تا ۹۰ دقیقه به طول می‌انجامد. هرگونه زمانی که به ۶۰ دقیقه اضافه می‌شود لزوماً یک ضریب ایمنی خواهد بود. در محاسبه زمان بندش دوغاب سیمان، ضریب ایمنی دیگری نیز وجود دارد. حین انجام آزمایش دمای دوغاب سیمان تا حد دمای گردش ته‌چاهی بالا برده شده و تا انجام واکنش هیدراتاسیون در این دما باقی می‌ماند. در حالی که در شرایط واقعی، اکثر دوغاب‌های سیمانی همزمان با پمپ شدن به درون فضای حلقوی با عواملی که سبب کاهش دمای آنها می‌شود مواجه می‌شوند. تحت شرایط واقعی چاه، چنین پدیده‌ای فاکتور ایمنی بیشتری را در قابلیت پمپ‌پذیری دوغاب سیمان ایجاد می‌کند. تغییرات حاصله در خصوصیات فیزیکی دوغاب سیمان پس از قرارگیری در فضای حلقوی بر روی زمان انتظار سیمان، درزبندی سیمان، تحمل و نگهداری لوله‌های جداری و موفقیت نهایی در انجام عملیات سیمان‌کاری مؤثر می‌باشند. از آنجایی که دما بر روی ویژگی‌های یاد شده سیمان تأثیرگذار است، رابطه بین دما و فشار گردش ته‌چاهی بر روی هیدراتاسیون سیمان حائز اهمیت است. تحت شرایط ایستا، مقاومت ژله‌ای به سرعت درون دوغاب سیمان توسعه می‌یابد. توسعه مقاومت ژله‌ای محصول جانبی فرآیند هیدراتاسیون سیمان است و نشانگر

¹ Bottom hole circulating temperature

² Bottom hole circulating pressure

نقطه‌ای است که در آن دوغاب سیمان تغییر خود از شکل یک سیال هیدرولیکی واقعی که می‌تواند فشار هیدرواستاتیکی کاملی را انتقال دهد به یک ماده جامد که دارای مقاومت فشاری قابل اندازه‌گیری می‌باشد، آغاز می‌کند. چنین بازه تغییری بنام فاز گذرا^۱ نامیده می‌شود. در طی این فاز، دوغاب سیمان به طور مداوم مقاومت ژله‌ای می‌یابد که در پی آن در فضای حلقوی مملو از سیمان در میزان فشار بالقوه دوغاب محدودیت ایجاد می‌شود. تغییر دیگری که اتفاق می‌افتد، زمان گیرش سیمان می‌باشد و آن نقطه آغاز توسعه مقاومت فشاری سیمان می‌باشد. چنین نقطه‌ای پایان توسعه مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان و آغاز توسعه مقاومت فشاری بوده و مشخص کننده زمان انتظار دوغاب سیمان می‌باشد (سلطانیان و همکاران، ۱۳۹۱).

۵-۵- مقاومت فشاری سیمان

مقاومت فشاری سیمان سفت شده توسط اندازه‌گیری نیروی مورد نیاز برای خرد کردن یک مکعب ۲ اینچی تحت بار فشاری غیر محصور مورد آزمایش قرار می‌گیرد. روش جدیدتر و عمومی‌تر برای پیش‌بینی مقاومت و زمان‌های انتظار برای شروع مجدد عملیات حفاری، ابزاری است که از امواج شنوایی و مافوق صوت استفاده می‌کند. دستگاه تخلیگر مافوق صوت سیمان^۲ به طور مداوم و پیوسته توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمانی را به نمایش در می‌آورد (شکل ۵-۴). در این دستگاه دوغاب سیمان در داخل سلول مربوطه تحت شرایطی که فشار و دمای ته‌چاهی را شبیه‌سازی می‌کند قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری سرعت مافوق صوت در داخل سیمان از حالت سیال دوغاب آغاز شده پس از بندش اولیه تا هر نقطه دلخواه از مقاومت جزیی تا نهایی سیمان ادامه می‌یابد. مقادیر مقاومت فشاری سیمان به‌طور پیوسته تا زمان پایان آزمایش محاسبه شده و به نمایش در می‌آید. نتیجه آزمایش روند دقیق و کاملی از بندش اولیه و توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان است که مقدار آن در هر نقطه دلخواه در برابر زمان به شکل نمودار قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۵-۵). به جز هنگام شروع و خاتمه

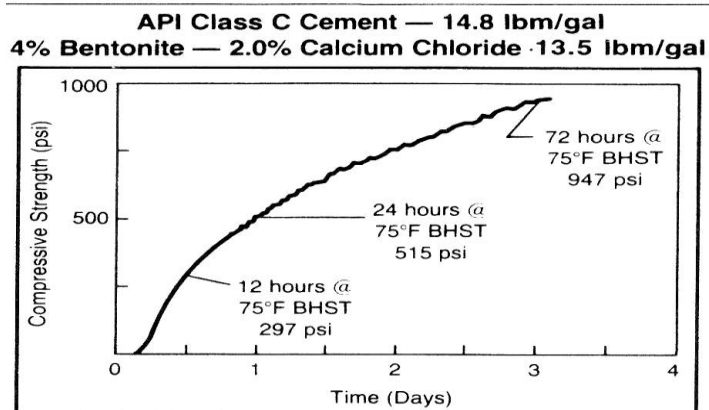
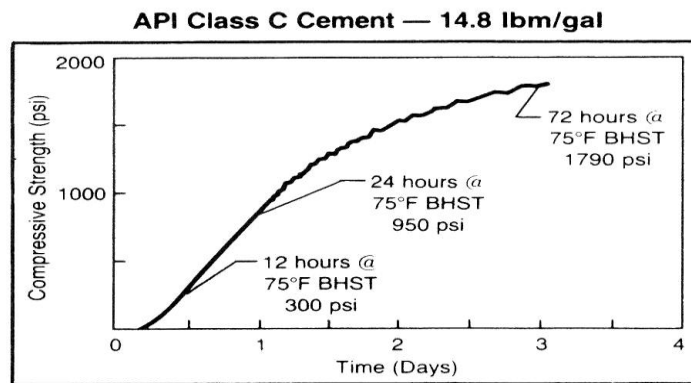
¹ Transition phase

² Ultra sonic cement analyzer (UCA)

آزمایش، عملکرد دستگاه UCA نیاز چندانی به اپراتور ندارد (سلطانیان و همکاران, ۱۳۹۱).



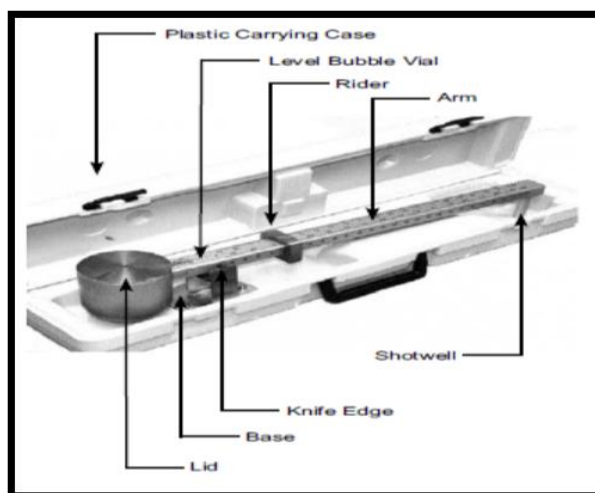
شکل ۴-۵- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری با استفاده از امواج صوت (UCA)



شکل ۵-۵- منحنی توسعه مقاومت دوغاب سیمان بوسیله دستگاه UCA (سلطانیان و همکاران, ۱۳۹۱)

۵-۶- دانسیته دوغاب سیمان

به جز در عملیات سیمان کاری تزریقی، دانسیته دوغاب سیمانی بایستی برای کنترل چاه همیشه به اندازه کافی بالا باشد. برای کنترل دانسیته دوغاب روش‌های مختلفی موجود می‌باشد. برای پایین آوردن دانسیته دوغاب سیمان معمولاً از موادی که نیازمند حجم‌های زیادی از آب مخلوط هستند استفاده می‌شود و همچنین برای بالا بردن دانسیته دوغاب سیمان عموماً از مواد وزن افزا به همراه مواد پخش‌گر مانند همتایت استفاده می‌شود. به طور معمول برای تعیین دانسیته دوغاب سیمان از ترازوهای استاندارد گل^۱ استفاده می‌شود (شکل ۵-۶). در هنگام تعیین دانسیته دوغاب سیمان حباب‌های احتمالی حتی امکان بایستی از سیمان خارج شوند.



شکل ۵-۶- ترازوی استاندارد گل

۵-۷- خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان

دوغاب‌های سیمان دارای رفتار غیر نیوتنی بوده و ویژگی‌های خواص رئولوژیکی آنها توسط یکی از دو مدل ریاضی مدل پلاستیک بینگهام^۲ یا مدل پاورلا^۳ توصیف می‌شود. دستگاه گرانروی سنج^۴ مدل فن

^۱ Mud balance

^۲ Bingham plastic model

^۳ Power – low model

^۴ Viscometer

۳۵. داده‌های نرخ برش / تنش برشی که در مدل خواص رئولوژیکی وارد می‌شوند را اندازه‌گیری می‌نماید. مطابق با مدل پلاستیک بینگهام، اعداد خوانده شده در دوره های ۶۰۰ و ۳۰۰ در دقیقه از دستگاه بر روی نمودار خط مستقیم قرار دارند. اختلاف بین اعداد خوانده شده در دوره های ۶۰۰ و ۳۰۰ بیان کننده گرانروی پلاستیک می‌باشد. اختلاف بین مقدار خوانده شده در دور ۳۰۰ و گرانروی پلاستیک به عنوان نقطه‌واروی شناخته می‌شود. در مدل پاورلا برای ترسیم نمودار نرخ برش در برابر تنش برشی و محاسبه مقادیر n (شیب منحنی) و k (عرض از مبدا) به ترتیب اعداد مربوط به دوره‌های ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ خوانده می‌شود. با مقادیر بدست آمده از دوره‌های مختلف، محاسبه رابطه بین سرعت و عدد رینولدز امکان پذیر می‌شود. برای اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی دوغاب سیمان، معمولاً از دستگاه گرانروی‌سنج دوار استفاده می‌شود. نیروی محرکه این دستگاه دارای موتور سه دنده دو سرعت برای محاسبه سرعت‌های گردش ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۶ و ۳ دور در دقیقه می‌باشد (شکل ۵-۷). ابزار اندازه‌گیری شامل دو قسمت می‌باشد (API 10B-2, 2005):

- قسمت اسلیو^۱ بیرونی
- قسمت باب^۲ درونی

حین انجام آزمایش، اسلیو بیرونی با سرعت دور بر دقیقه معین می‌شود. گردش اسلیو بیرونی گشتاوری را بر روی باب داخلی که به کمک شاخص فنی پیچشی اندازه‌گیری می‌شود، اعمال می‌کند. برای خواندن مقادیر، پس از آن که دستگاه به طور پیوسته مدت ۶۰ ثانیه با سرعت در دور ۶۰۰ کارکرد، اولین عدد قرائت می‌شود. در تناوب‌های زمانی ۲۰ ثانیه‌ای سرعت دستگاه به مقادیر پایین‌تر تغییر می‌یابد و در هر مرحله اندازه‌گیری‌ها درست قبل از تغییر سرعت به دوره‌های پایین‌تر انجام می‌گیرد.

¹ Sleeve

² Bob



شکل ۵-۷- گرانروی سنج دوار فن ۳۵

برای ترسیم نمودار نرخ برش بر حسب تنش برشی مشاهده شاخص‌ها تا ۶ دور در دقیقه ادامه می‌یابد. با توجه به روش انجام آزمایش‌های خواص رئولوژیکی، می‌توان نسبت قرائت‌ها را در هر سرعت ویسکومتر برای حالت افزایشی^۱ و حالت کاهش^۲ محاسبه کرد $\left(\frac{R.U \text{ Reading}}{R.D \text{ Reading}}\right)$. این نسبت می‌تواند در تعیین ویژگی‌های یک دوغاب سیمان خاص مطابق زیر مفید باشد:

- زمانی که این نسبت در تمام سرعت‌ها نزدیک به ۱ باشد، بدان معنا است که دوغاب سیمان در دمای متوسط آزمایش ته‌نشینی ندارد و خواص رئولوژیکی آن به زمان وابسته نیست.

- نسبت‌هایی که اغلب بیشتر از ۱ هستند بیانگر ته‌نشینی در دوغاب سیمان در دمای متوسط آزمایش می‌باشند. علاوه بر این، اگر برخی از قرائت‌ها که در یک سرعت چرخشی یکسان اندازه‌گیری شده‌اند، کاهش^۲ بیشتر از ۵ درجه را نشان دهند، این نیز بیانگر نشانه‌ای دیگر از ته‌نشینی احتمالی است.

¹ Run Up (RU)

² Run Down (RD)

- نسبت‌هایی با مقادیر کمتر از ۱ بیانگر ژل‌شدگی دوغاب سیمان با گذشت زمان است. وجود اختلاف زیاد در قرائت‌ها بیانگر ناپایداری دوغاب سیمان است، یعنی دوغاب سیمان تمایل به ته‌نشینی یا ژل‌شدگی بیش از حد دارد که در این شرایط می‌بایست برای تغییر ترکیب دوغاب سیمان اقدام کرد.

۵-۸- کنترل فیلتراسیون^۱

در انجام عملیات سیمان‌کاری تزریقی و سیمان‌کاری لوله‌های مغزی عمیق کنترل فیلتراسیون دوغاب سیمان حائز اهمیت بسیار می‌باشد. از دست رفتن آب فیلتره سیمان در یک محیط با قابلیت تراوایی متوسط باعث افزایش گرانروی دوغاب و رسوب سریع کیک فیلتره می‌شود، اگر چه جریان سیال را محدود می‌کند. فاکتورهای زمان، فشار، دما و قابلیت تراوایی بر افت صافی دوغاب‌های سیمان تأثیرگذار می‌باشند. انجمن نفت امریکا برای اندازه‌گیری خصوصیات فیلتراسیون دوغاب‌های سیمان، زمان ۳۰ دقیقه و فشار ۱۰۰ یا ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع را برای انجام آزمایش تعیین و استاندارد کرده است. دستگاه فیلترپرس که توسط انجمن نفت امریکا در آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۵-۸) شامل یک قاب، یک سیلندر و یک صفحه با مش ۳۲۵ که بر روی یک صفحه با مش ۶۰ به عنوان یک فیلتر متوسط قرار گرفته، می‌باشد. یک پوشش گرم‌کننده دماهای سازند را بر روی نمونه شبیه‌سازی می‌کند. برای شبیه‌سازی جایگیری دوغاب سیمان در شرایط ته‌چاه و قبل از آنکه دوغاب‌ها خارج و درون سلول فیلترپرس بریزند، دوغاب‌ها در یک زمان مشخص بر روی دستگاه آزمایش زمان بندش با فشار و یا بدون فشار عمل‌آوری می‌شوند. میزان افت صافی API تمامی دوغاب‌های سیمانی بدون افزودنی بالای ۱۰۰۰ میلی‌لیتر می‌باشند. هنگامی که تمامی سیالات عبور کرده از صافی در مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه در سلول آزمایش جمع‌آوری شدند، معادله ۵-۱ برای محاسبه میزان فرضی افت صافی ۳۰ دقیقه‌ای بکار می‌رود.

¹ Filtration control

$$F_{30} = 2F_t \frac{5.477}{t^{0.5}} \quad (1-5)$$

F_{30} مقدار سیال فیلتره پس از ۳۰ دقیقه

F_t مقدار سیال فیلتره پس از t دقیقه

نوع جدیدتری از دستگاه افت صافی استاندارد انجمن نفت آمریکا، دستگاه افت صافی دینامیکی می‌باشد که توسط آن اندازه‌گیری افت‌صافی دوغاب سیمان تحت شرایط ته‌چاهی، پس از زمان شبیه‌سازی شده جایگیری دوغاب، امکان‌پذیر می‌باشد. پس از آنکه دوغاب سیمان در محفظه ریخته شد، فشار اعمال شده و دوغاب تا رسیدن به دمای چرخشی ته‌چاهی به طور همزمان و در مدت زمان لازم برای جایگیری دوغاب، به‌هم‌زده و گرم می‌شود. حداکثر دمای اعمالی ۴۰۰ درجه فارنهایت و فشار به طور معمول ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. پس از گذشت زمان شبیه‌سازی شده برای پمپاژ، محفظه وارونه شده و آزمایش افت صافی از ابتدا آغاز می‌شود. اختلاف فشار بر روی صافی اعمال شده و سیال عبور کرده از صافی جمع‌آوری می‌شود.



ب



الف

شکل ۵-۸- دستگاه اندازه‌گیری افت‌صافی، الف- استاتیکی ب- دینامیکی

چنانچه دمای آزمایش بیش از ۲۰۰ درجه فارنهایت شود، سیال عبور کرده از صافی بایستی به یکی از دو روش ذیل جمع‌آوری شود.

- تحت فشار (به طور معمول ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع)
 - به کمک اتصال حلقه خنک کن که بخار را قبل از جمع‌آوری به آب تبدیل می‌کند.
- پس از آن که سیال عبوری از صافی جمع‌آوری شد، مقدار افت صافی API به کمک روش مشابهی که در آزمایش افت‌صافی استاتیکی بکار گرفته می‌شد، تعیین می‌شود. دوغاب‌های سیمانی که دارای مقادیر افت‌صافی آزمایشگاهی برابر با ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌لیتر در مدت ۳۰ دقیقه می‌باشند عموماً در انجام سیمان‌کاری تزریقی استفاده می‌شوند. در سیمان‌کاری لوله‌های مغزی عمیق مقدار افت صافی API ممکن است به ۳۰۰ میلی‌لیتر برسد (API 10B-2, 2005).

۵-۹- انقباض سیمان

انقباض سیمان عامل بسیار مهمی در ایجاد پدیده نفوذ گاز به دلیل کاهش اولیه فشار منفذی و کاهش پیوندهای سطوح مشترک سیمان می‌باشد. انقباض شیمیایی سیمان در اثر کاهش حجم به دلیل ترکیب ذرات سیمان و آب و تشکیل هیدرات‌ها به وجود می‌آید. کاهش حجم سیمان از زمان مخلوط شدن سیمان تا هنگام سخت شدن نهایی سیمان بعد از هفته‌ها و یا ماه‌ها گرچه با نرخ‌های متفاوت ولی به طور پیوسته ادامه دارد. مراحل مختلف ایجاد انقباض در سیمان از زمان مخلوط شدن تا سخت شدن نهایی به شرح ذیل می‌باشد.

- انقباض درست پس از مخلوط شدن، با نرخ پائین، به دلیل حل شدن کانی‌ها
- انقباض در هنگام بندش، با نرخ بسیار بالا و به دلیل هیدراتاسیون $C_3S (3 CaO. SiO_2)$
- انقباض در مرحله سفت شدن، با نرخ کاهشی و ادامه آن تا مدت‌های طولانی با نرخ پائین، به دلیل هیدراتاسیون فازهای $C_2S (۲CaO. SiO_2)$, $C_3A (3CaO. Al_2O_3)$

در نتیجه بایستی انقباض سیمان نه تنها به عنوان تابعی از زمان بلکه به عنوان تابعی از هیدراتاسیون سیمان کنترل شود. برای این کار دمای سیمان در مقابل زمان ثبت می‌شود، لحظه‌ای که دمای سیمان نسبت به دمای آزمایش شروع به افزایش کند، لحظه بندش سیمان یا زمان بندش اولیه می‌باشد. زمانی که سیمان به دمای حداکثری خود رسید آن وقت سیمان در وضعیت بندش نهایی خود می‌باشد (ظاهر سیمان در این موقع به شکل یک ساختمان چسبنده است). دوره زمانی بعدی از لحظه سخت شدن اولیه سیمان شروع می‌شود، در طول این دوره دمای سیمان دوباره تا حد دمای اولیه تست کاهش می‌یابد.

انقباض سیمان به دو حالت می باشد

▪ انقباض بیرونی که بنا به تعریف، ایجاد فاصله در خارج از توده منقبض است.

▪ انقباض داخلی که به آن انقباض توده ماتریکس هم می‌گویند.

اهمیت نسبی این دو نوع انقباض به تعادل بین تنش‌های بین دانه‌ای و تنش‌های کششی محلی که به وسیله انقباض ایجاد می‌شوند وابسته است. انقباض درونی در زمان بندش سیمان و ایجاد تخلخل ثانویه و اضافی که عمدتاً از منافذ آزاد و یا به هم متصل درونی می‌باشند پدیدار می‌شود. این نوع انقباض باعث افزایش نفوذپذیری و بنابراین تسهیل پدیده نفوذ گاز می‌شود. در شرایط محیطی هر یک از فازها تأثیر خاص خودش را بر روی انقباض دارد. مثلاً C_2S دارای حداقل اثر انقباض و C_3A دارای حداکثر اثر انقباض است. بیشترین میزان انقباض در شرایط محیطی بین ۴ تا ۶ درصد حجمی می باشد. از این میزان انقباض ۱ تا ۱/۵ درصد مربوط به بخش توده می‌باشد که البته تا حد زیادی به شرایط مخلوط شدن، نسبت آب به سیمان و فاصله زمانی که مخلوط به عنوان بندش اولیه به حساب می‌آید وابستگی دارد (API 10B-2, 2005).

۵-۱۰- پایداری دوغاب سیمان

مقوله پایداری دوغاب سیمان دارای دو بخش مجزا از هم به لحاظ آزمایشی و مفهومی ولی یکپارچه از نقطه نظر نتیجه‌گیری نهایی در مورد پایداری دوغاب سیمان است. یکی از این دو بخش، بحث آب آزاد دوغاب و دیگری میزان تهنشست ذرات جامد است. تهنشست ذرات جامد می‌تواند باعث ایجاد یک سیمان پر تخلخل با مقاومت کم در بخش بالائی چاه شود و در نتیجه جداسازی بخشی و کنترل مناسب مخزن از دست می‌رود. اگر چه این دو اتفاق می‌توانند با هم رخ دهند ولی ارتباطی با هم ندارند و یکی می‌تواند بدون وجود دیگری به وجود بیاید. بنابراین وجود هر یک به صورت جداگانه می‌بایست آزمایش شود. در طراحی دوغاب سیمان چاه‌های افقی آب آزاد می‌بایست صفر باشد. طراحی دوغاب‌هایی بدون آب آزاد بسیار مهم است زیرا به وجود آمدن این پدیده در موقعیت‌های افقی منتج به شکل‌گیری آب آزاد در طول بخش بالائی فضای حلقوی می‌شود. این فضای خالی باعث از بین رفتن کامل جداسازی ناحیه‌ای مورد انتظار از سیمان کاری می‌شود. در واقع این تجمع آب به سمت بالای فضای حلقوی حرکت می‌کند (API 10B-2, 2005).

۵-۱۱- نفوذ گاز

نفوذ گاز از داخل دوغاب سیمان به صورت ایجاد کانال بیشتر در هنگام مرحله تبدیل دوغاب سیمان از حالت مایع به جامد رخ می‌دهد. در هنگام عملیات سیمان کاری و در زمانی که دوغاب سیمان به صورت مایع است، مهمترین عاملی که از ورود گاز به داخل دوغاب سیمان جلوگیری می‌کند، فشار هیدرواستاتیکی دوغاب سیمان و گل حفاری بالای آن است. تا زمانی که این فشار بیشتر از فشار روزنه‌ای^۱ سازند حاوی گاز باشد، گاز وارد ستون دوغاب سیمان نخواهد شد. علاوه بر چگالی، پارامتر دیگری که می‌تواند بر فشار هیدرواستاتیکی ستون دوغاب سیمان اثر گذارد، حالت مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان است. به این دلیل که توانایی دوغاب سیمان برای انتقال فشار هیدرواستاتیکی‌اش به

^۱ Pore Pressure

مقاومت ژلهای آن بستگی دارد. در نتیجه، هر چه مقاومت ژلهای کمتر باشد، توانایی انتقال فشار هیدرواستاتیکی در فضای حلقوی بیشتر است، به همین دلیل در هنگام طراحی و مخلوط کردن دوغاب سیمان و همچنین سیالات جداساز، لازم است بررسی‌های دقیقی صورت گیرد تا آنها قابلیت حفظ و انتقال فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از فشار روزنه‌ای سازند را دارا باشند. به هر حال برای پیشگیری از هرزروی دوغاب سیمان و وقوع احتمالی فوران گاز یا مایع، فشار هیدرواستاتیکی در فضای حلقوی چاه در هر عمقی نباید از گرادیان فشار شکست¹ سازند بیشتر باشد. زمانی که دوغاب سیمان شروع به هیدراته شدن می‌کند، از حالت یک سیال واقعی که تمام فشار هیدرواستاتیکی‌اش را منتقل می‌کند به یک ماده ژل مانند نیم بند تبدیل می‌شود. در این حالت ذرات سیمان، حالت یک توده خمیری شکل به خود می‌گیرند که دیگر فشار هیدرواستاتیکی را منتقل نمی‌کند و در عوض، فشار هیدرواستاتیکی اولیه دوغاب سیمان در داخل خلل و فرج ماتریکس سیمان محصور می‌شود. در نتیجه، اقدامات لازم برای جلوگیری از ورود گاز به سیمان در این مرحله متفاوت است و مهمترین عامل، فشار روزنه‌ای داخل سیمان است. تا زمانی که این فشار از فشار سازند گازدار بیشتر است، گاز قادر به ورود به داخل ستون دوغاب سیمان نخواهد بود و فشار روزنه‌ای دوغاب سیمان تابع حجم آب موجود در ماتریکس دوغاب سیمان است و هر نوع کاهشی در این حجم موجب کاهش متقابل فشار روزنه‌ای دوغاب سیمان می‌شود و بنابراین به گاز اجازه می‌دهد که وارد دوغاب سیمان شود (API 10B-2, 2005).

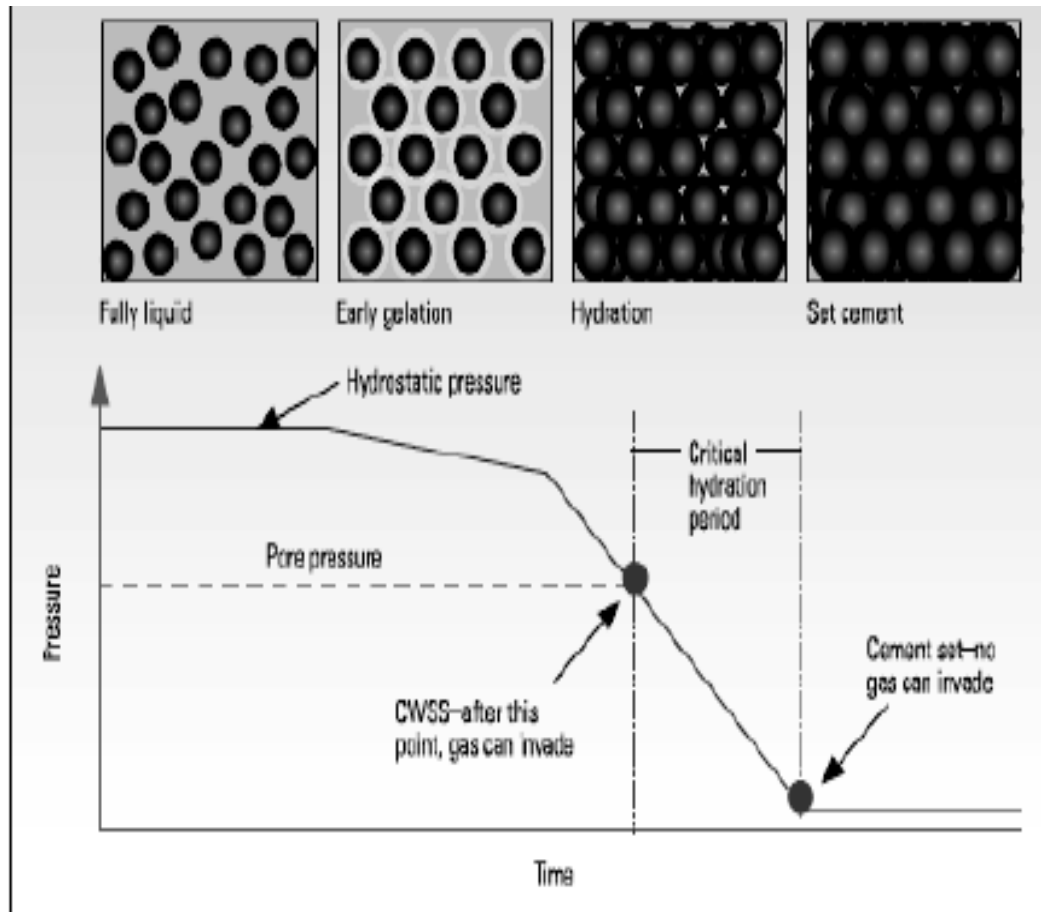
در طول فرآیند انتقال دوغاب سیمان از حالت یک سیال واقعی به یک ماده ژل نیم بند، دو پدیده در کاهش حجم آن موثر می‌باشند که عبارتند از:

- هیدراته شدن سیمان
- افت صافی دوغاب سیمان

¹ Formation Fracture Gradient

واضح است که کنترل پدیده اول مشکل می‌باشد اما امکان اینکه بتوان مقدار افت صافی دوغاب سیمان را با استفاده از مواد کنترل کننده افت صافی کاهش داد وجود دارد. کنترل افت صافی دوغاب سیمان باعث به حداقل رسیدن افت فشار روزنه‌ای دوغاب سیمان می‌شود و به همین دلیل دوغابی با حداقل افت صافی، بهترین گزینه برای جلوگیری از نفوذ گاز است. بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا مناسبترین دوغاب سیمان از نظر مقابله با نفوذ گاز دوغابی با افت صافی حداکثر ۵۰ میلی‌لیتر در مدت زمان ۳۰ دقیقه برای سیمان سبک و کمتر از ۱۰۰ میلی‌لیتر برای سیمان با وزن سنگین است و در مقادیر بیش از این نه تنها نفوذپذیری سیمان افزایش می‌یابد بلکه ساختار سیمان نیز تضعیف می‌شود. توانایی گاز برای ورود به داخل دوغاب سیمان، تابعی از مقاومت برشی دوغاب سیمان است. هر چه دوغاب سیمان سریع‌تر بتواند مقاومت برشی خود را افزایش دهد، احتمال مقابله با نفوذ گاز در داخل دوغاب سیمان بیشتر است. بر همین اساس زمانی که مقدار مقاومت برشی به ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع برسد احتمال ورود حباب‌های گاز به داخل ستون دوغاب سیمان صفر خواهد بود. زمانی که هیدراته شدن دوغاب سیمان تمام می‌شود، سیمان به یک ماده صلب نفوذناپذیر تبدیل می‌شود. در این مرحله، نفوذ گاز تنها از طریق کانال‌هایی واقع در سطح تماس سیمان با سازند و سیمان با لوله‌جداری امکان پذیر است. وجود چنین کانال‌هایی تابع کیفیت اتصال سیمان با سازند، سیمان با لوله‌جداری و همچنین وجود هر نوع شکست مکانیکی در سیمان است. با در نظر گرفتن این پدیده‌ها، راه‌حل‌های متفاوتی برای مقابله با نفوذ گاز به درون دوغاب سیمان به کار گرفته شده است. اگر چه، نفوذ گاز در عمق زیاد موضوعی پیچیده است، لیکن نفوذ گاز در عمق کم حتی موضوعی بحث انگیزتر است، چرا که این عامل (عمق کم) باعث می‌شود که تأمین فشار هیدرواستاتیکی لازم برای مقابله با لایه گازدار مشکل باشد، به علاوه وجود لایه‌های ضعیف و کم مقاومت مشکل دیگری به نام شکست سازند را به وجود می‌آورد. بنابراین از دوغاب‌های سنگین وزن برای اعمال فشار هیدرواستاتیکی بیشتر به خاطر ترس از هرزروی پرهیز می‌شود. علاوه بر این، دمای کم باعث تأخیر در دوره انتقالی سیمان از حالت سیال به حالت دوفازی و در نهایت به حالت ماده جامد صلب می‌شود. از

آنجائی که دوغاب سیمان در حین این مراحل انتقالی بیشترین قابلیت انتقال گاز را دارد، لذا بایستی دوغاب سیمان را طوری طراحی کرد که در مقابل نفوذ گاز کاملاً مقاوم باشد. شکل ۵-۹ فرایند هیدراته شدن دوغاب سیمان را در مراحل مختلف نشان می‌دهد (API 10B-2, 2005).



شکل ۵-۹- فرآیند هیدراته شدن دوغاب سیمان (API 10B-2, 2005)

هنگامی که هیدراته شدن سیمان آغاز می‌شود ذرات سیمان آب درون ساختار را به تدریج مصرف کرده و یک ساختار توده‌ای خمیری را به وجود می‌آورند، که انتقال فشار کامل توسط ستون دوغاب سیمان را محدود می‌کند. تا زمانی که این فشار از فشار گاز سازند بالاتر باشد گاز نمی‌تواند به درون دوغاب سیمان وارد شود ولی به هر حال هر چه عمل هیدراته شدن سریعتر می‌شود آب بیشتر مصرف شده و در نهایت به نقطه‌ای می‌رسیم که فشار هیدرواستاتیک ستون دوغاب سیمان از فشار سازندی

کمتر می‌شود. در این نقطه حساس اگر مقاومت برشی سیمان بیشتر از نیروی برشی ایجاد شده توسط گاز باشد، فشار گاز نمی‌تواند بر ساختار ایجاد شده در سیمان غلبه کند و مهاجرتی صورت نمی‌پذیرد. فرایند هیدراته شدن سیمان، سه مرحله قبل از بندش سیمان را طی می‌کند که عبارتند از (API 10B-2, 2005):

مرحله دوغاب سیمان

در این مرحله، سیمان در حال حرکت با فاز پیوسته واکنش می‌دهد. این بدین معنی است که دوغاب سیمان در نقاط مختلف در داخل چاه خواص رئولوژیکی متفاوتی خواهد داشت. در این مرحله دوغاب سیمان در طول دوره زمانی هیدراته شدن، برای مدت زمان معینی از مدل پاورلا پیروی می‌کند.

مرحله ژلگی

این مرحله بحرانی‌ترین مرحله‌ای است که بندش دوغاب سیمان طی می‌کند. در این مرحله دوغاب سیمان بیشتر فاز پیوسته خود را به شکل تراویده در سازند از دست داده و دیگر جریان نمی‌یابد و دارای یک شکل سه بعدی تیکسوتروپیک^۱ است که ذرات سیمان را به هم متصل می‌کند و این اتصال‌ها به اندازه کافی قوی نیستند که دوغاب بالای خود را تحمل کنند. در طول این مرحله، سیمان چرخه نخست انبساط (از طریق واکنش آب و سیمان) و انقباض (واکنش کامل و اتصالات ملکولی) را طی می‌کند. در این مرحله حفظ فشار فضای حلقوی بین چاه و لوله‌گذاری ممکن است به حذف خلل و فرج موضعی که در طول این مرحله تشکیل می‌شود کمک کند. در طول این مرحله گرانش دوغاب سیمان به اندازه ۱۵۰ بار بیشتر از مقدار اولیه در حین مخلوط شدن می‌رسد و تمام ذرات اتصال‌های سه بعدی قویتری در این مرحله تشکیل می‌دهند و در نتیجه دوچرخه پدیدار می‌گردد که طی آنها سیمان منبسط و منقبض می‌شود.

^۱ Thixotropic

مرحله بندش سیمان

این مرحله دنباله مرحله ژلگی می‌باشد که برای آن آخرین انقباض و جمع‌شدگی سیمان بعد از واکنش نهایی با آب باقی مانده رخ می‌دهد. در آغاز این مرحله، سیمانی که با منطقه متخلخل مواجه می‌شود نیاز به آب بیشتری برای تکمیل واکنش خود دارد، زیرا بیشتر آب خود را به صورت تراویده از دست می‌دهد و دیگر آبی در دسترس نیست. برخی از ذرات سیمان اتصال نزدیکی خواهند داشت و بر عکس آن، ذرات دیگری با واکنش تکمیل نشده و مقداری خلل و فرج در ساختمان سیمان ایجاد خواهند کرد و اگر گازی در سازند موجود باشد، این گاز جریان پیدا کرده و این خلل و فرج داخل ساختمان سیمان را پر خواهد کرد. بعد از مدت زمان مشخصی، گاز تحت فشار می‌تواند مهاجرت کرده و این خلل و فرج را به هم متصل کند و شبکه‌های محلی را به وجود آورد و این شبکه‌های محلی می‌تواند منشاء پیدایش ترک‌های میکروسکوپی در ساختمان سیمان باشد.

۵-۱۱-۱- پارامترهای مؤثر در جلوگیری از نفوذ گاز

بدون تردید طراحی دوغاب سیمان مناسب و بهینه، موثرترین راه در جلوگیری از رخ دادن نفوذ گاز است. لذا خصوصیات دوغاب سیمان طراحی شده بایستی مطابق با استانداردهای API به قرار ذیل باشد (API 10B-2, 2005):

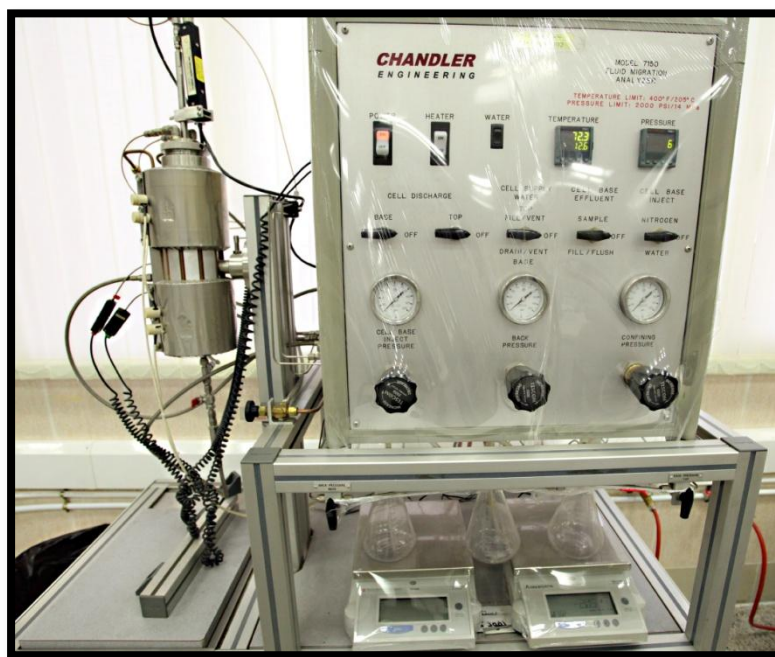
- آب آزاد در حد صفر
- افت صافی استاتیکی کمتر از ۵۰ میلی‌لیتر برای دوغاب سیمان سبک وزن و کمتر از ۱۰۰ میلی‌لیتر در ۳۰ دقیقه برای سیمان سنگین وزن
- خواص رئولوژیکی مناسب
- کوتاه بودن مدت زمان رسیدن به مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع
- زمان انتقالی بسیار کوتاه^۱

^۱ Transition time

- رشد سریع مقاومت ژله‌ای ۱۲۵ تا ۲۵۰ پاسکال (حداکثر ۲۰ دقیقه)
- کوتاه بودن زمان نیم‌بندش بین ۳۰ تا ۷۰ سنتی‌پواز (حداکثر ۲۵ دقیقه)

۵-۱۱-۲- اندازه‌گیری میزان نفوذ گاز در ستون سیمان

برای اندازه‌گیری میزان نفوذ گاز در ماتریکس سیمان از دستگاه تحلیل مهاجرت سیالات^۱ به داخل ستون دوغاب سیمان استفاده می‌شود (شکل ۵-۱۰). مدل این دستگاه ۷۱۵۰ و ساخت شرکت چندلر^۲ است و در کل دنیا در دو کشور، یکی در مالزی و در آزمایشگاه شرکت شلمبرژه و دیگری در آزمایشگاه پژوهشگاه صنعت نفت در حال استفاده است.



شکل ۵-۱۰- دستگاه اندازه‌گیری نفوذ گاز در سیمان مدل ۷۱۵۰

شکل ۵-۱۱ طرح شماتیک دستگاه اندازه‌گیری نفوذ سیالات را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است در داخل سلول این دستگاه دو عدد توری با مش ۳۲۵ نصب شده است. در مرحله اول آزمایش، نمونه سیمان تحت آزمایش افت صافی قرار می‌گیرد تا شرایط حاکم بر دوغاب

¹ Fluid Migration Analyzer (FMA)

² Chandler

سیمان در شرایط ته‌چاهی شبیه‌سازی شود. همزمان با وقوع افت صافی در دوغاب سیمان، پیستون نصب شده بر روی محفظه دوغاب، جابجا شده و به سمت پایین حرکت می‌کند. میزان جابجایی پیستون توسط ثبت کننده مخصوص ثبت می‌شود. صافاب حاصله از طریق توری پایینی از محفظه دستگاه خارج شده و به فلاسک موجود بر روی وزنه (شکل ۵-۱۰) منتقل می‌شود.

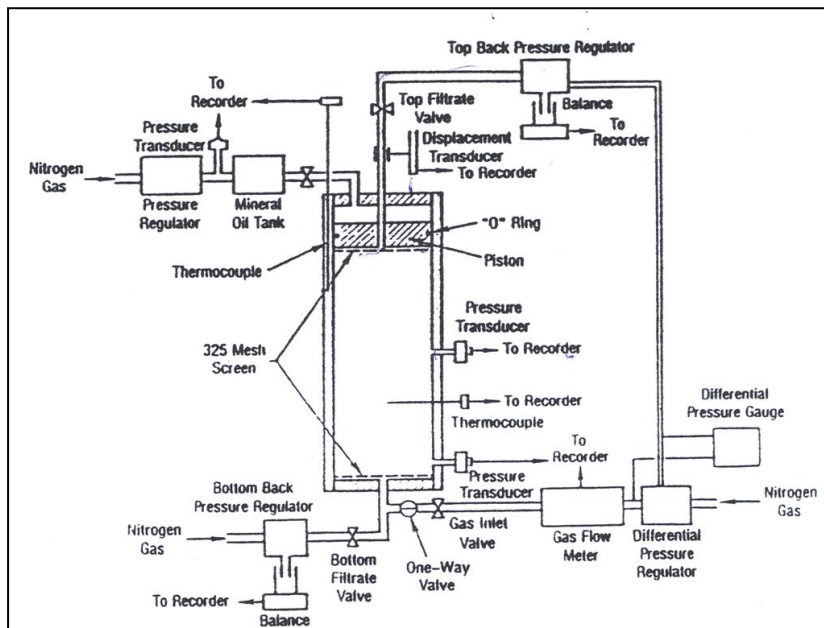
طی مرحله افت صافی، فشار منفذی دوغاب سیمان کاهش یافته و توسط دستگاه ثبت می‌شود. برای شبیه‌سازی فشار سازند، فشاری در حدود ۶۰۰-۵۰۰ psi به عنوان فشار زمینه^۱ اعمال می‌شود. پس از این مرحله، سیال مورد نظر (گاز یا آب) به داخل ماتریکس سیمان تزریق شده و میزان گاز نفوذی از طریق دبی‌سنج^۲ اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه مجهز به ثبت کننده فشار، دما و میزان افت صافی و چندین شیر کنترل کننده برای عبور سیالات و تنظیم فشارهای ورودی، همه جانبه و فشار زمینه می‌باشد. همچنین برای تزریق گاز، از گاز نیتروژن استفاده می‌شود. بر اساس مطالعات و بررسی‌های به عمل آمده چنانچه فشار منفذی دوغاب سیمان در شرایط درون چاهی در طی فرآیند هیدراتاسیون و افت صافی برابر با فشار سازند شود شرایط برای شروع مهاجرت گاز (سیال) به داخل ستون سیمان فراهم می‌شود. طبق نظریه بیروت^۳ و چونگ^۴ بیشترین احتمال نفوذ سیال به داخل ستون سیمان در زمان ژل شدن دوغاب سیمان می‌باشد. بنابراین هرچه زمان گذار سیمان از حالت سیالیت به حالت جامد شدن کوتاهتر باشد امکان نفوذ کمتر خواهد بود. در این صورت اگر رشد مقاومت ژله‌ای در درون دوغاب سیمان به حدی رسیده باشد که بتواند در برابر نفوذ گاز مقاومت نماید میزان نفوذ سیالات سازندی اعم از گاز و یا آب شور به داخل ماتریکس سیمان محدود و یا غیر ممکن خواهد شد. در غیر این صورت (عدم رشد کافی مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان)، میزان قابل توجهی از سیالات سازندی به داخل ستون سیمان نفوذ خواهد داشت.

¹ Back-Pressure

² Flow Meter

³ Beirut

⁴ Cheung



شکل ۵-۱۱- طرح شماتیک دستگاه اندازه‌گیری نفوذ سیالات

۵-۱۲- مقاومت انعطافی سیمان

در پی ایجاد بندش در دوغاب سیمان قرار گرفته در فضای پشت لوله‌های جداری در چاه‌های نفت و گاز و تبدیل آن به یک غلاف سیمانی جامد، در طول عمر چاه، پوشش سیمانی تحت نیروهای خارجی وارده از طرف سازند، به مانند نیروهای ناشی از حرکت لایه‌های نمکی به سمت چاه و یا نیروهای تکتونیکی وارده بر اثر نشست و یا جابجایی لایه‌ها دارد، لذا بررسی مقاومت فشاری تک محوره و تغییر شکل غلاف سیمانی تحت اثر بارهای خارجی یکی از مسائل مهم و اصلی در مبحث مقاومت انعطافی می‌باشد. این امر مستلزم مطالعه ماهیت نیروهایی است که در اثر اعمال نیروهای خارجی در داخل غلاف سیمانی به وجود می‌آیند. در بیشتر مطالعات صورت گرفته برای بررسی مقاومت انعطافی غلاف سیمان، بیشتر به بررسی مدول یانگ و ضریب پواسون پرداخته‌اند که با کاهش مدول یانگ و افزایش ضریب پواسون، سیستم در جهت انعطاف‌پذیری پیش خواهد رفت و در بعضی موارد مقاومت کششی و خمشی اندازه‌گیری شده‌اند و ارتباط آنها با مدول یانگ و ضریب پواسون

مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. لذا با اطمینان می‌توان گفت که با بررسی این پارامترها می‌توان در مورد انعطاف‌پذیر بودن و یا نبودن سنگ سیمان قضاوت نمود. سیمان قرار گرفته شده در پشت لوله جداری بایستی خصوصیات لازم جهت ممانعت از ایجاد بارهای نقطه‌ای ناشی از خزش لایه‌ها و گسترش آنها در طول پوشش سیمانی و در ضمن قبول تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر، ناشی از بارهای وارده، در محدوده رفتار الاستیک سیمان قبل از ایجاد هرگونه شکستگی در غلاف سیمانی را داشته باشد. در این بخش آنچه که بایستی در خصوص رفتار و خصوصیات مکانیکی سنگ سیمان بدانیم و اندازه‌گیری نماییم به صورت خلاصه شده به آن پرداخته شده است.

شکست^۱

تشکیل صفحات جداشدگی یا انفصال در سنگ را شکست می‌گویند. بر اثر این فرآیند مرز بین دانه‌های سنگ شکسته شده و سطوح جدیدی به شکل ترک ایجاد می‌گردد و یا اینکه ترک‌های موجود اولیه توسعه بیشتری پیدا می‌کنند. آغاز شکست در سنگ لزوماً مترادف با گسیختگی یا رسیدن به مقاومت نهایی نمی‌باشد.

خرابی یا گسیختگی^۲

به فرآیندی اطلاق می‌شود که در نقطه حداکثر مقاومت سنگ اتفاق افتاده و یا آغاز می‌گردد. گسیختگی در لحظه‌ای آغاز می‌شود که سنگ تحمل بارهای بیشتر را نداشته و یا افزایش تغییر شکل، ظرفیت باربری آن کاهش می‌یابد.

مقاومت نهایی^۳

حداکثر تنشی است که سنگ می‌تواند قبل از گسیختگی تحمل نماید.

¹Fracture

² Failure

³ Peak strength

شکست شکننده^۱

فرآیندی است که طی آن تنش به طور ناگهانی کاهش یافته و سنگ در امتداد یک صفحه گسیخته می‌شود. این فرآیند پس از گسیختگی معمولاً با رفتار نرم کرنشی^۲ همراه است.

تغییر شکل خمیری

چنانچه سنگ بتواند تغییر شکل دائمی زیادی را بدون از دست دادن ظرفیت باربری از خود نشان دهد، گفته می‌شود که تغییر شکل خمیری در آن ایجاد شده است. به عبارتی چنانچه در اثر افزایش تغییر شکل در سنگ مقاومت آن نیز افزایش یابد، سنگ رفتاری خمیری دارد. به این پدیده رفتار سخت کرنشی^۳ نیز گفته می‌شود.

نقطه تسلیم^۴

به نقطه‌ای از منحنی تنش-کرنش گفته می‌شود که در آن رفتار سنگ از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تغییر می‌یابد. نقطه تسلیم در واقع نقطه آغاز تغییر شکل دائمی و برگشت ناپذیر در سنگ می‌باشد.

مقاومت فشاری تک محوری

بالاترین مقدار تنشی است که یک نمونه استوانه‌ای سنگ می‌تواند تحت بار تک محوری تحمل نماید. این مقاومت با علائم UCS، σ_c یا q_u نشان داده می‌شود.

مدول الاستیسیته یا مدول یانگ

نسبت تنش محوری به کرنش محوری در حالت تک محوری و در سطح تنشی مشخص را مدول الاستیسیته گویند. در عمل شیب قسمت کمابیش خطی منحنی تنش محوری-کرنشی محوری سنگ سیمان اندازه‌گیری شده و به عنوان مدول یانگ سنگ سیمان اعلام می‌شود. اما از آنجایی که منحنی تنش-کرنش سنگ‌ها به ندرت حالت خطی دارد. برای محاسبه مدول یانگ معمولاً شیب خط مماس

¹ Brittle fracture

² Strain - softening

³ Strain - hardening

⁴ Yield point

بر این منحنی در تنش معادل ۵۰ درصد مقاومت نهایی اندازه‌گیری می‌شود که به آن مدول مماسی می‌گویند. رابطه ریاضی مدول یانگ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{یا} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2-5)$$

مفهوم ساده آن این است که تنش مستقیماً با کرنش متناسب است و ضریب تناسب آن برابر E می‌باشد. این ضریب ثابت، ضریب ارتجاعی یا ضریب یانگ نامیده می‌شود. چون کرنش (ε) بدون بعد است، بعد E از جنس تنش می‌باشد.

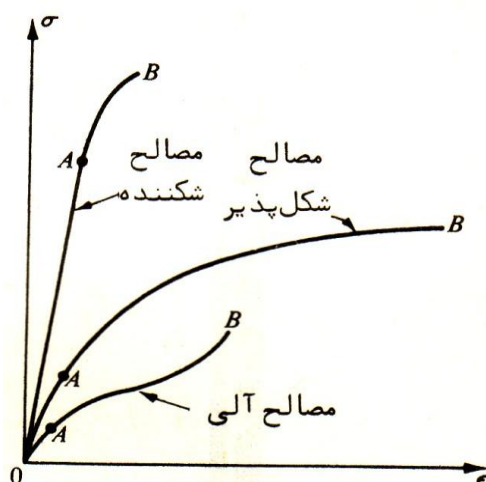
ضریب پواسون (ν)

قدر مطلق نسبت بین کرنش جانبی و کرنش محوری نمونه در سطح تنش مشخص، تحت فشار تک محوری را ضریب پواسون می‌گویند.

$$\nu = \left| \frac{\text{کرنش محوری}}{\text{کرنش جانبی}} \right| = - \quad (3-5)$$

ترسیم تنش - کرنش

با رسم تنش (σ) در مقابل کرنش (ε) یک منحنی به دست می‌آید که نشان دهنده طبیعت مصالح می‌باشد و بستگی به ابعاد نمونه مورد آزمایش ندارد. این منحنی ترسیم تنش - کرنش نامیده می‌شود و از مشخصات مهم مصالح است. منحنی‌های تنش - کرنش مصالح مختلف، که توسط آزمایشات به دست می‌آیند، اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. حتی برای یک نوع مصالح مشخص، شکل این منحنی‌ها با توجه به درجه حرارت محیط آزمایش، سرعت آزمایش و چند متغیر دیگر، با یکدیگر متفاوت است. شکل ۵-۱۲ منحنی تنش - کرنش مصالح مختلف را نشان می‌دهد. حداکثر کرنشی که این مصالح می‌توانند قبل از گسیختگی تحمل کنند، با یکدیگر متفاوت است.



شکل ۵-۱۲- منحنی تنش - کرنش مصالح مختلف

شیب این منحنی‌ها نیز به طور قابل ملاحظه‌ای تفاوت می‌کند. به تعبیر کلی، هر مصالح، منحنی مربوط به خود را دارا می‌باشد. نقطه پایانی^۱ در منحنی تنش- کرنش نشان دهنده شکست (یا گسیختگی) نمونه می‌باشد. مصالحی که تا هنگام گسیختگی بتوانند کرنش‌های بزرگی را تحمل بکنند، به مصالح شکل‌پذیر^۲ معروف هستند. مصالحی را که دارای این خاصیت نباشند، مصالح شکننده^۳ نامند. تنش‌ها معمولاً بر پایه سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شوند. چنین تنش‌هایی اغلب، تنش‌های قراردادی^۴ و یا مهندسی نامیده می‌شوند. از طرفی در نمونه‌های که تحت تأثیر نیروی محوری قرار دارند، همیشه مقداری انبساط یا انقباض جانبی رخ می‌دهد. از تقسیم نیروی موثر بر سطح مقطع واقعی نمونه که در یک لحظه متناظر با آن نیرو می‌باشد، تنش واقعی^۵ به دست می‌آید. رسم تنش‌های واقعی در مقابل کرنش، منحنی تنش- کرنش واقعی نامیده می‌شود.

¹ Terminal Point

² Ductile Material

³ Brittle Material

⁴ Conventional

⁵ True Stress

۵-۱۳- جمع‌بندی

برای انجام یک عملیات سیمان‌کاری موفق و در پی آن ایجاد یک تفکیک ناحیه‌ای مناسب و دراز مدت، عوامل بسیار زیادی در طراحی و اجرای عملیات سیمان‌کاری دخیل می‌باشند. در این فصل فقط به آن دسته از عوامل بسیار مهم و مؤثر، که در طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان، تأثیرگذار می‌باشند اشاره شد، که یک مهندس طراح قبل از انجام هر چیزی، بایستی تمامی تأثیرات این عوامل را در طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مد نظر قرار دهد. همچنین در این فصل آن دسته از خصوصیات دوغاب سیمان که در طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان بایستی آزمایش شود آورده شده است. برای هر کدام از این پارامترها یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری آن موجود است و همچنین مقادیر بدست آمده از هر کدام پارامترها بایستی در یک محدوده معینی باشد و یا از یک الگوی خاصی تبعیت کند، چرا که در غیر این صورت مشکلی در هنگام آماده‌سازی دوغاب سیمان و یا در طول فرایند بندش دوغاب سیمان در چاه ایجاد خواهد کرد.

فصل ششم: انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن

۶-۱- مقدمه

مطالعه و بررسی ناپایداری سازه‌های سنگی، قبل از بوجود آمدن مهندسی نفت به دلیل نیاز در معدن کاری، تونل‌سازی و راه‌سازی توسعه زیادی یافته بود. محققین این رشته‌ها برای بررسی سیستم نگهداری و ارزیابی عوامل ناپایداری سازه‌های زیر زمینی ایجاد شده، مفاهیم تنش، میدان تنش، مقاومت سنگ، معیار شکست و غیره را تعریف کرده و رشته مکانیک سنگ را بنیان نهادند. در کشورهای توسعه یافته مطالعات مکانیک سنگی در زمان توسعه میدان به کمک مهندسی نفت آمده تا از مشکلات احتمالی آتی جلوگیری کند. همچنین در صورت بروز مشکلاتی در حین توسعه یا عملیات می‌توان به قسمتی از مطالعات مکانیک سنگی بهره جست تا آسیب‌ها حداقل و از مشکلات آتی پیش‌رو حتی‌الامکان جلوگیری شود. در پروژه‌های نفتی به ویژه در رابطه با موضوع سیمان‌های انعطاف‌پذیر مقالاتی در برخی از دانشگاه‌ها چاپ شده که در آن محققین با استفاده از روش خاص اقدام به پیشنهاد رفع مشکل کرده و مدعی حل مسئله شده‌اند. اما نکته مغفول در رابطه با مساله سیمان‌های انعطاف‌پذیر و دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری آن است که تقریباً تمامی گزارش‌ها موضوع را از یک دیدگاه خاص مثلاً در دوغاب‌های سیمان با وزن مخصوص پایین بررسی قرار داده‌اند و کمتر بحث جامعی در خصوص سایر خصوصیات دوغاب سیمان نظیر خواص رئولوژیکی، انقباض و انبساط، مقاومت فشاری، زمان نیم بندش، آب آزاد، تخلخل، نفوذ پذیری، نفوذ گاز، افت صافی و مقاومت ژله‌ای شکل گرفته است. با توجه به پیشینه‌های تحقیق موجود، مسلم است که به دلیل عدم جامع‌نگری در این تحقیقات نباید انتظار راه حلی قاطع برای رفع این مشکل را در ذهن پروراند. لذا امید است با کمک تکنولوژی‌های جدید با در نظر گرفتن تمامی جوانب بتوان به اهداف مورد نظر رسید. در این فصل ابتدا فرمولاسیون‌های دوغاب سیمان بکار گرفته شده در چندین چاه مشکل‌دار میدان مارون مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد و سپس اصلاحات مورد نیاز بر روی دوغاب سیمان مرسوم و سنتی انجام می‌شود و در ادامه با اضافه کردن درصدی مختلف از افزودنی‌های متفاوت منعطف و منبسط‌کننده پیشنهادی و مورد نظر در دوغاب سیمان اصلاح شده، ابتدا رفتار مکانیکی سنگ سیمان

مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت بهترین افزودنی منعطف و منبسط‌کننده انتخاب شده و سپس با استفاده از این افزودنی تمامی خصوصیات دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد و با دیگر سیستم‌های دوغاب سیمان مقایسه خواهد شد.

۶-۲- روش طراحی آزمایش‌ها

محققان برای شناخت پدیده‌ها، آزمایش‌هایی را انجام می‌دهند تا حقیقتی را در مورد سیستم یا فرایندی کشف کنند. انجام آزمایش همواره مستلزم صرف هزینه و زمان است. از این رو تلاش می‌شود تا با انجام حداقل تعداد آزمایش‌های مؤثر به بیشترین اطلاعات دست یافت. روش طراحی آزمایش‌ها به مجموعه‌ی روش‌های علمی اطلاق می‌شود که این هدف را محقق سازند.

در هر آزمایش تعدادی از متغیرها در اختیار تحلیل‌گر بوده و آنها را با توجه به نیاز آزمایشی که انجام می‌دهد تغییر می‌دهد. به همین دلیل به این متغیرها متغیرهای قابل کنترل نیز می‌گویند. متغیرهای غیر قابل کنترل موجب ایجاد پارازیت در فرآیند شده و امکان شناسایی متغیرهای قابل کنترل را کاهش می‌دهند. لذا شناسایی این متغیرها نیز از اهمیت خاصی برخوردار بوده و باید نسبت به جمع‌آوری اطلاعات در مورد آنها اقدام شود. یکی از مهمترین عواملی که باعث شکست در روش طراحی آزمایش‌ها می‌شود، عدم شناسایی و جمع‌آوری اطلاعات در ارتباط با این گونه متغیرها می‌باشد. در این روش ممکن است تعداد زیادی عوامل یا متغیر ورودی شناسایی شوند. استفاده از تمامی آنها به علت تعداد زیاد آزمایش‌ها و همچنین هزینه‌های مربوط به اندازه‌گیری برای هر کدام از آنها بسیار مشکل و حتی ممکن است غیر ممکن باشد. لذا باید تعداد متغیرها را با انتخاب مهمترین آنها کاهش داد. این تحلیل‌ها اغلب به وسیله نرم افزارهای تحلیل آماری انجام می‌شود که معروفترین آنها Minitab و Design Expert می‌باشد. در ابتدای رساله با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر نتایج، به منظور طراحی طرح‌های اختلاط دوغاب سیمان و تعیین مقادیر مختلف افزودنی‌ها اقدام به طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Minitab و همچنین محاسبه‌ی دستی شد.

با این وجود در ادامه، به دلیل محدودیت تعداد آزمایش‌های قابل انجام و همچنین به دلیل اینکه هر کدام از افزودنی‌ها از یک روند ثابتی پیروی نمی‌کنند لذا به ناچار از فرمولاسیون‌هایی که به این روش طراحی شده بود استفاده نشد و به جای آن از روش برنامه آزمایش که به شرح ذیل می‌باشد استفاده شده است.

۶-۳- روش برنامه آزمایش

برنامه آزمایش الگویی است که به منظور اجرای آزمایش‌ها و مقایسه آنها با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این برنامه موجب کاهش انحراف از معیار شده و ضمن کاهش هزینه‌ها از اتلاف زمان نیز جلوگیری خواهد کرد. هر آزمایش علمی برحسب ماهیت آن شامل سه مرحله طرح آزمایش، اجرای آزمایش و تحلیل نتایج مربوطه می‌باشد. در هر یک از این مراحل سعی شده که دقت کافی به عمل آمده، تا نتایج دقیق حاصل شود ولی نتایج دقیق در یک آزمایش بستگی کامل به این مسأله دارد که آزمایش صحیح طرح و با دقت کامل اجرا شود. وجه تمایز آزمایش مقایسه‌ای که در اینجا مدنظر ماست با آزمایش مطلق، در آن است که در آزمایش مقایسه‌ای خواص ماده یا صفت بخصوصی از ماده مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد، درحالی که در آزمایش مطلق تجسس روی عنصر یا ماده شیمیایی خاص انجام می‌شود. با وجود همه تلاشی که در کنترل عوامل و اجرای دقیق طرح می‌شود، بخشی از خطاها غیر قابل کنترل بوده که به عنوان اشتباهات یا خطای آزمایش یا خطای باقیمانده خوانده می‌شود و برحسب تصادف در آزمایش ظاهر می‌شوند. هر اندازه مقدار خطا در آزمایش کمتر باشد به همان نسبت دقت آزمایش بیشتر بوده و امکان دسترسی به نتایج صحیح زیاده‌تر خواهد بود. در این رساله در طی آزمایش‌ها برای کاهش و حذف خطاهای باقیمانده سعی شده است صحت آزمایش از طریق تکرار در مقاطع مختلف زمانی، کنترل شود تا به نوعی خطای قرائت، ثبت و توزین نیز کنترل شوند.

۶-۴- هدف آزمایش

خواسته و هدف یک مجری طرح تحقیقاتی این است که خواص ماده مورد استفاده در یک آزمایش ویژه و آثار آن را روی محیط مورد مطالعه قرار دهد. در این صورت قبل از شروع طرح آزمایش باید جزئیات و هدف آزمایش کاملاً مشخص باشند. هر مقوله مورد آزمایش شامل سه نکته است که محقق باید آنها را مورد سوال قرار دهد.

- چه مطلبی را می‌خواهد بداند؟
- با چه دقتی می‌خواهد بداند؟
- اصولاً هدف مطالعه چیست؟

سوال اول در این رساله را می‌توان بدین ترتیب طرح کرد که آیا مصرف ماده انعطاف‌پذیر کننده موجب بهبود خواص مورد نظر در عملیات سیمان‌کاری می‌شود یا خیر؟ پاسخ به این پرسش نیاز به انجام آزمایش و مقایسه آن با حضور و بدون حضور ماده فوق دارد. ضمن اینکه می‌توان اثر ماده را با کلاس‌های مختلف سیمان سنجید تا نتیجه آن منحصر به یک کلاس و با یک ترکیب شیمیایی خاص نباشد، درجه دقت این گونه آزمایش‌ها بیشتر از آزمایش‌های جدا از هم می‌باشد. همچنین برای تعیین مناسب‌ترین مقدار مصرف ماده برای رسیدن به یک هدف مشخص مثلاً وزن مخصوص دوغاب دلخواه در آزمایشگاه، آزمایش مربوطه را می‌توان در دو یا چند حالت با مقادیر مختلف افزودنی انجام داد، یعنی اثر درصدهای وزنی مختلف ماده، با آزمایش بررسی شوند. برای مقایسه کیفیت تأثیر مقادیر متفاوت ماده، سعی بر آن شده است تا برای معرفی شرایط واقعی، نمونه دوغاب سیمان رانده شده در چاه به عنوان شاهد در نظر گرفته شود و وضعیت دوغاب سیمان جدید با مصرف ماده مورد نظر نسبت به نمونه شاهد از نظر مقایسه یک یا چند پارامتر اندازه‌گیری مورد مقایسه و تعیین برتری قرار گیرد. مسأله دوم در آزمایش درجه دقت آزمایش می‌باشد که ارتباط مستقیم با وسعت آزمایش یا تعداد تکرار آن دارد. نهایتاً هدف و آنچه را که از انجام آزمایش می‌خواهیم، جستجوی مقدار مناسب مصرف ماده و یا تعیین برتری ماده نسبت به مواد مصرفی قبلی و یا تعیین رفتار ماده به صورت عام می‌باشد.

۶-۵- خطاهای آزمایش

با توجه به اهمیت خطا در آزمایش‌ها، در این بخش سعی شده است، چند مورد بسیار مهم که در ارتباط با دقت تجهیزات مورد مصرف و کالیبراسیون دستگاه‌ها می‌باشد مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۵-۱- ترازوی دیجیتال

در انجام این رساله به منظور سنجش مقدار مواد و افزودنی‌های جامد پودری که بر حسب گرم مشخص می‌شوند از یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 گرم استفاده شده است.

۶-۵-۲- لوله‌های مدرج

به منظور سنجش مقدار مواد و افزودنی‌های مایع که بر حسب سی‌سی مشخص می‌شوند از لوله‌های آزمایشگاهی مدرجی که دقت آن‌ها یک سی‌سی می‌باشد استفاده شد. در این مرحله علاوه بر خطای چشمی که به خاطر خاصیت موینگی به وجود می‌آید، چسبندگی مایعات به ویژه مایعات غلیظ‌تر به سطح داخلی لوله‌ی مدرج سبب می‌شود که مقداری از افزودنی‌های مایع در داخل لوله باقی بماند. بنابراین برای جلوگیری از چنین خطایی، در این رساله برای مایعات بسیار غلیظ نظیر افزودنی لاتکس مواد به صورت وزنی استفاده شده است.

۶-۵-۳- دما و فشار

همانطور که در تشریح دستگاه‌های مختلف مورد استفاده در این رساله شرح داده شد، دما و فشار دو عامل تأثیرگذار بر نتایج حاصل می‌باشند که هر گونه خطا در اعمال دما و فشار به نمونه‌ها و همچنین اندازه‌گیری دما و فشار اعمال شده توسط فشارسنج‌ها و ترموکوپل‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. دقت ترموکوپل‌های به کار گرفته شده برابر با یک درجه فارنهایت و دقت فشارسنج‌ها برابر با یک پوند بر اینچ مربع می‌باشد که البته این ترموکوپل‌ها و فشارسنج‌ها به طور دوره‌ای و مطابق با استانداردهای مربوط به آن‌ها کالیبره و ضریب کالیبراسیون در آنها اعمال می‌شود.

۴-۵-۶- سنسورهای جابجایی

هنگام استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی، در ابعاد و اندازه نمونه‌های سیمانی تغییر ایجاد می‌شود، که این تغییرات توسط سنسورهای جابجایی اندازه گرفته می‌شود. دقت این سنسورها دو میکرون می‌باشد و خطای آن‌ها دو درصد طول جابجا شده بر اثر اعمال بار، بر نمونه خواهد بود.

۵-۵-۶- فرستنده و گیرنده‌های امواج فراصوت

همانطور که در شرح دستگاه UCA بیان شد، از فرستنده و گیرنده‌های امواج فراصوت استفاده می‌شود. این فرستنده‌ها و گیرنده‌ها بنا بر استاندارد دستگاه و به صورت دوره‌ای کالیبره می‌شوند و ضریب کالیبراسیون در آن‌ها اعمال می‌شود.

۶-۵-۶- ویسکومتر

قرائت خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان در نرخ‌های برشی مختلف به صورت چشمی صورت می‌پذیرد که این شیوه قرائت اصولاً دارای خطا می‌باشد. همچنین ته‌نشینی مواد وزن افزا در طی آزمایش نیز بر نتایج خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان تأثیرگذار است.

۶-۶- تجهیزات، مواد مورد نیاز و روش طراحی دوغاب

در این رساله برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه از روش پیشنهادی انجمن نفت آمریکا^۱ و تمامی تست‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و با تجهیزات و دستگاه‌های معرفی شده در فصل پنجم انجام شد. برای طراحی دوغاب سیمان از سیمان کلاس E کارخانه تهران و در کیسه‌های ۱۱۰ پوندی (۵۰ کیلوگرمی) و آب مصرفی به دلیل تعدد بسیار زیاد آزمایش‌ها از آب معمولی استفاده شد و فقط فرمولاسیون نهایی دوغاب سیمان بهینه و چاه‌های مورد مطالعه با آب منطقه میدان مارون آزمایش گردید و همچنین برای رسیدن به خصوصیات دوغاب سیمان مورد نظر

¹ American Petroleum Industry

مطابق با شرایط واقعی چاه از افزودنی‌های مختلفی که حداقل در هفت گروه و به شرح خلاصه ذیل تقسیم می‌شوند استفاده گردید (API, 2005):

افزودنی‌های شتاب‌دهنده^۱

مواد شیمیایی هستند که زمان بندش یک سیستم دوغاب سیمان را کاهش می‌دهند و سرعت توسعه مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند. این افزودنی‌ها اثر تأخیر در بندش به وجود آمده از افزودنی‌هایی همچون پراکنده‌سازها و کنترل‌کننده‌های افت‌صافی، را خنثی می‌نمایند.

افزودنی‌های کندگر^۲

مواد شیمیایی می‌باشند که زمان بندش یک سیستم دوغاب سیمان را افزایش می‌دهند. این افزودنی‌ها هیدراسیون دوغاب سیمان را کند می‌کنند و در نتیجه گیرش سیمان را به تأخیر می‌اندازند. بدین وسیله، زمان کافی برای قرار دادن دوغاب سیمان در چاه‌های گرم و عمیق فراهم می‌شود.

مواد وزن افزا^۳

در چاه‌های گازی پر فشار و یا در چاه‌هایی که به صورت فیزیکی ناپایدار هستند، سیالات با دانسیته بالا برای حفظ کنترل چاه مورد نیاز هستند. یکی از راه‌های افزایش دانسیته دوغاب سیمان، کاهش میزان آب موجود در دوغاب می‌باشد. اما این روش، پمپاژ دوغاب سیمان را با مشکل مواجه می‌کند. لذا برای افزایش دانسیته دوغاب سیمان در این شرایط، از این افزودنی‌ها استفاده می‌شود.

پراکنده‌سازها^۴

پراکنده‌سازها مواد شیمیایی هستند که ویسکوزیته دوغاب سیمان را کاهش می‌دهند. سیمان‌کاری موفق نیازمند انتقال و پاک‌سازی مناسب گل حفاری از فضای حلقوی می‌باشد. برای پاک‌سازی گل از

¹ Accelerator

² Retarder

³ Weighting Agent

⁴ Dispersant

این فضا، پمپاژ دوغاب سیمان باید به گونه‌ای صورت گیرد که در این فضای حلقوی جریان درهم^۱ ایجاد گردد. پراکنده‌سازها رئولوژی دوغاب سیمان را کنترل می‌کنند و باعث ایجاد جریان درهم در سرعت‌های پایین پمپاژ می‌گردد. علاوه بر این، با استفاده از این افزودنی‌ها می‌توان آب مورد نیاز دوغاب سیمان را بدون این که مشکلی برای پمپ کردن دوغاب سیمان به وجود آید، کاهش داد.

کنترل‌کننده افت‌صافی^۲

وقتی دوغاب سیمان در امتداد یک سازند نفوذپذیر^۳ قرار می‌گیرد تحت فشار، فرایند فیلتراسیون ظاهر می‌شود. آب موجود در دوغاب سیمان به درون سازند نفوذ کرده و ذرات جامد در درون فضای حلقوی باقی می‌مانند. اگر این هرزروی فاز آبی دوغاب سیمان کنترل نشود رئولوژی، زمان نیم بندش و دانسیته دوغاب سیمان تغییر خواهد کرد و در این شرایط عملیات سیمان‌کاری با شکست روبرو خواهد شد. برای جلوگیری از هرزروی فاز آبی و حفظ ویژگی‌های دوغاب سیمان، افزودنی‌های کنترل‌کننده افت‌صافی به سیمان اضافه می‌شود. این افزودنی‌ها تراوایی کیک سیمان^۴ حاصله از فیلتراسیون را کاهش داده و از این طریق باعث کاهش هرزروی فاز آبی دوغاب سیمان به درون سازند می‌شود. برخی دیگر از این افزودنی‌ها نیز با افزایش گرانروی فاز آبی دوغاب سیمان، سرعت فیلتراسیون را کاهش می‌دهند.

ضد کف

ضد کف موادی هستند که مانع از ایجاد کف در سیستم دوغاب سیمان می‌شوند و این مواد می‌توانند سیلیکونی یا پایه الکلی باشند.

¹ Turbulent Flow

² Fluid-Loss Control Agent

³ Permeable

⁴ Permeability of Cement Filtercake

کنترل‌کننده نفوذ و مهاجرت گاز

کنترل‌کننده نفوذ و مهاجرت گاز، افزودنی شیمیایی هستند که اصولاً به صورت مایع سفید رنگ بوده و این افزودنی ضمن کاهش افتصافی، زمان نیم بندش مانع از کاهش حجم دوغاب سیمان می‌شوند.

روش طراحی دوغاب سیمان

برای طراحی دوغاب سیمان بایستی عوامل بسیار زیادی در نظر گرفته شوند. در بسیاری موارد، انتخاب دانسیته‌های دوغاب سیمان به وسیله عواملی به غیر از فشار منفذی و شکست تحت تاثیر قرار می‌گیرند. سیمان‌ها اغلب برای دستیابی به مقادیر مقاومت فشاری معین در یک فاصله زمانی کوتاه، در دانسیته‌های بالا ساخته می‌شوند. در مقابل، سیمان‌های سبک وزن که حجم دوغاب بیشتری در واحد کیسه سیمان تولید می‌کنند، دارای مقاومت فشاری کمتر ولی اقتصادی‌تر می‌باشند. دمای چاه یک عامل کلیدی در فرآیند انتخاب دوغاب سیمان است. همانطور که در استاندارد انجمن نفت آمریکا آمده است، اگر دمای استاتیک بالاتر از ۲۳۰ درجه فارنهایت باشد، پیش‌بینی شده است که برای حداقل کردن تنزل استحکام، سیلیکافلور در ترکیبات دوغاب سیمان‌های متداول به کار گرفته شود. افزایش‌های کنترل‌کننده افتصافی معمولاً در دوغاب‌هایی که در مخزن استفاده می‌شوند یا در جاهایی که فضای آنالوس کوچک است استفاده می‌شوند. این افزودنی نرخ هرزروی فاز آبی از دوغاب سیمان را کاهش می‌دهند. از دست رفتن آب زیاد از دوغاب سیمان می‌تواند کارایی آن و مخصوصاً ویسکوزیته آن را به طور جدی تحت تاثیر قرار دهد، و همچنین می‌تواند باعث آسیب به فواصل تولیدی شود. استفاده از افزایش‌های کنترل‌کننده افتصافی از نظر طراحی و کارایی دوغاب به دلایل مختلف حائز اهمیت است. اول اینکه، بسیاری از افزایش‌های کنترل‌کننده افتصافی ویسکوزیفایر هستند و در نتیجه، پراکنده‌سازها برای حفظ خاصیت اختلاط‌پذیری باید اضافه شوند. دوم اینکه، این افزایش‌ها اغلب خاصیت جانبی کندکنندگی دارند که باید در محاسبات ملاحظه شود. سرانجام، کارایی آنها می‌تواند به وسیله افزایش‌های دیگر مانند بعضی از ریتاردرها تحت تاثیر قرار گیرد.

حتی در غیاب افزایش افت‌صافی، پراکنده‌سازها معمولاً در دوغاب‌های سیمان استفاده می‌شوند. این مواد برای کاهش ویسکوزیته عمل می‌کنند، در نتیجه نرخ پمپاژ جریان آشفته را کم می‌کنند و فشارهای جابه‌جایی را به حداقل می‌رسانند. بنابراین، به بهبود بازدهی جابه‌جایی کمک می‌کنند و در وضعیت‌هایی که فضای آنالوس کوچک است و فشارهای اصطکاکی بالا ممکن است برای سازندهای ضعیف‌تر ریسک داشته باشند، ارزش خاصی دارند. هنگام استفاده از پراکنده‌سازها، توجه دقیق به دیگر جنبه‌های کارایی دوغاب سیمان مهم است، زیرا این مواد می‌توانند همراه با ریتاردرها عمل کنند و افزایش ناخواسته‌ای را در زمان بندش دوغاب سیمان ایجاد کنند. همچنین، میزان مصرف زیاد از حد پراکنده‌سازها می‌تواند موجب ناپایداری دوغاب شود که در پی آن می‌تواند باعث آب آزاد زیاد و ته‌نشینی شود. از گروه‌های مختلف افزایش‌دهنده‌های استفاده شده در دوغاب‌های سیمان، ریتاردرها به مراتب متعددتر هستند. انتخاب اینکه دقیقاً کدام ریتاردر باید به کار برده شود بر مبنای دمای گردشی چاه، نوع سیمان (یا حتی شرکت تولیدکننده آن) و ترکیب دقیق دوغاب سیمان است. روی هم رفته، مقاومت فشاری حاصل شده توسط یک سیستم سیمان معین، هنگامی که با خصوصیات دوغاب مایع مقایسه شوند دارای درجه دوم اهمیت است، زیرا بیشتر سیستم‌های سیمان بیش از آنچه که تحت شرایط واقعی چاه مورد نیاز است، توسعه مقاومت فشاری پیدا می‌کنند. انجمن نفت آمریکا و صنایع مختلف، راهنماها و دستورالعمل‌های منتشر شده‌ای برای مقاومت‌های فشاری قابل قبول سیمان‌ها دارند که برای کاربردهای معین استفاده شده‌اند. بسیاری از این مقادیر مخصوصاً برای عمق‌های کم است. با این وجود، برای مقاومت‌های مطلوب قبل از حفاری سیمان (۵۰۰ پوند بر اینچ مربع) و مشبک کاری (۲۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) راهنمایی‌هایی وجود دارد و انتخاب یک طراحی که بتواند این معیارها را رعایت کند مهم است. هنگام سیمان‌کاری در مقابل بعضی لایه‌ها مانند نمک پلاستیک، یا ناحیه‌های مخزنی که در آینده نیازمند تحریک هستند، مقاومت می‌تواند یک اهمیت ویژه داشته باشد. طراحی دوغاب سیمان، به ناچار، یک فرآیند تکراری است. فرمولاسیون دوغاب سیمان "حدس اولیه"، که برای رعایت محدودیت‌های کارایی مورد نیاز پذیرفته شده است، معمولاً بر پایه تجربه است و اخیراً

بر پایه بانک داده‌ها و سیستم هوشمند می‌باشد. با این وجود، تغییر پذیری سیمان‌ها مطالبه می‌کند که آزمایش‌های آزمایشگاهی واقعی برای شناسایی نتایج پیش‌بینی شده و اصلاح طراحی، انجام شود. مهندسان و پرسنل آزمایشگاهی با تجربه می‌توانند به طور محسوسی ساعت‌های آزمایش مورد نیاز برای رسیدن به فرمولاسیون منتخب برای یک شرایط چاه معین را کاهش دهند.

برای طراحی دوغاب سیمان با یک وزن مخصوص مشخص در ابتدا بایستی نسبت آب به مخلوط خشک که متشکل از سیمان و افزودنی‌های آن می‌باشد مشخص شود و در پایان بایستی حجم حاصل از این ترکیب را محاسبه نمود. برای این کار فرض می‌کنیم چند جسم پودر شکل به وزن‌های W_1 ، W_2 ، W_3 و ... (برحسب پوند) به نسبت‌های لازم به یکدیگر مخلوط شده‌اند. وزن مخصوص این اجسام، D_1 ، D_2 ، D_3 و ... (برحسب پوند بر فوت مکعب) نیز مشخص هستند. در چنین حالتی اولاً بایستی مشخص کنیم که چه مقدار آب برحسب فوت مکعب نیاز است که با این مخلوط خشک ترکیب نمایم تا دوغابی با وزن مخصوص مورد نظر بدست آید تانیاً حجم دوغاب حاصل برحسب فوت مکعب چقدر خواهد شد؟

فرمول وزن مخصوص عبارت است از:

D : وزن مخصوص (PCF)

W : وزن (LBS)

$$D = \frac{W}{V} \quad (1-6)$$

V : حجم (FT^3)

برای مثال اگر مقدار آب مورد نیاز برابر X فوت مکعب باشد و با توجه به اینکه وزن یک فوت مکعب از آب $62/4$ پوند است بنابراین وزن X فوت مکعب از آب $62/4X$ خواهد شد و وزن کل دوغاب برابر است با مجموع مواد تشکیل دهنده آن، در چنین حالتی اگر همه وزن‌ها را برحسب پوند در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\text{وزن کل دوغاب} = 62/4X + W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

چنانچه $W_1 + W_2 + W_3 + \dots$ را با $\sum W$ نشان دهیم آنگاه خواهیم داشت.

$$\text{وزن کل دوغاب (پوند)} = 62/4X + \sum W \quad (2-6)$$

حجم کل دوغاب نیز برابر است با مجموع حجم‌های مواد تشکیل دهنده آن و اگر همه حجم‌ها را برحسب فوت مکعب در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\text{حجم کل دوغاب} = X + \frac{W_1}{D_1} + \frac{W_2}{D_2} + \frac{W_3}{D_3} + \dots$$

چنانچه $\sum \frac{W}{D} \rightarrow \frac{W_1}{D_1} + \frac{W_2}{D_2} + \frac{W_3}{D_3} + \dots$ نشان دهیم آنگاه خواهیم داشت:

$$\text{حجم کل دوغاب (FT}^3\text{)} = X + \sum \frac{W}{D} \quad (3-6)$$

اگر وزن مخصوص دوغاب سیمان را با SW نشان دهیم آنگاه از فرمول ۲-۶ و ۳-۶ خواهیم داشت:

$$SW = \frac{62.4X + \sum W}{X + \sum \frac{W}{D}} \quad (4-6)$$

مقدار آب لازم برحسب فوت مکعب برابر است با:

$$X = \frac{\sum W - SW \cdot \sum \frac{W}{D}}{SW - 62.4} \quad (5-6)$$

با قرار دادن مقدار X در فرمول شماره ۳-۶ می‌توان حجم کل دوغاب سیمان را محاسبه نمود. پس از محاسبات مربوط به وزن دوغاب سیمان و مشخص شدن مقادیر مصرفی افزودنی‌ها بر اساس شرایط واقعی چاه، دوغاب سیمان مطابق با دستورالعمل استاندارد انجمن نفت آمریکا تهیه و خصوصیات آن اندازه‌گیری خواهد شد، و در صورتی که خصوصیات اندازه‌گیری شده منطبق با شرایط واقعی چاه و یا استاندارد انجمن نفت آمریکا نباشد مهندس طراح با دانش و تجربه‌ای که از طراحی دوغاب سیمان‌های مختلف دارد با اعمال تغییرات مورد نیاز فرمولاسیون جدیدی را طراحی خواهد نمود تا به نتایج مورد نظر برسد.

۶-۷- ارزیابی دوغاب‌های سیمان

برای بررسی و مطالعه پدیده دوپهن‌شدگی و نشت آب نمک از پاشنه لوله‌جداری چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون، ابتدا بایستی دوغاب سیمان به کار گرفته شده در این چاه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تا مشخص شود که آیا فرمولاسیون دوغاب سیمان طراحی شده جوابگوی نیاز شرایط چاه بوده و یا نبوده است. در این رساله برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش و تکمیل آزمایش‌های مورد نظر که قبلاً انجام نشده است، سعی شده است که فقط به نتایج آزمایش‌های موجود در آرشیو مناطق نفت‌خیز جنوب برای هر کدام از فرمولاسیون دوغاب‌های سیمان بکار رفته اکتفا نشود، لذا برای بررسی دقیق فرمولاسیون‌ها، تمامی افزودنی‌های به کار رفته در ترکیبات دوغاب سیمان از انبارهای مناطق عملیاتی جمع‌آوری شده است و سپس هر کدام از این دوغاب‌ها در شرایط واقعی چاه با همان فرمولاسیون‌های طراحی شده توسط کارشناسان مناطق نفت‌خیز جنوب و با استفاده از دستگاه‌های موجود شبیه‌سازی شده است. شش حلقه از چاه‌های مورد مطالعه در این رساله که سه حلقه از آنها به نام‌های ۲۶۳، ۲۶۵ و ۲۶۶ که مشکل نشت آب نمک از پاشنه لوله‌جداری و سه حلقه دیگر آن به نام‌های ۱۷۳، ۱۷۴ و ۱۷۹ که مشکل دوپهن‌شدگی دارند، به قرار ذیل می‌باشد:

۶-۷-۱- دوغاب سیمان چاه ۲۶۳

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ ۹ اینچ چاه ۲۶۳ میدان مارون که دارای مشکل نشت آب نمک از پاشنه لوله‌جداری و دوپهن‌شدگی لوله‌جداری دارد، در جدول ۶-۱ درج شده است. دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۲۲ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. با انجام آزمایش دانسیته، وزن مخصوص دوغاب سیمان با استفاده از ترازوی گل برابر ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۶۵ پوند بر گالن تعیین شده است. همچنین با آزمایش‌های آب آزاد و افتصافی استاتیکی به ترتیب میزان آب آزاد دوغاب سیمان پس از عمل‌آوری ۲۰ دقیقه در

کانسیستومتر اتمسفریک و در مدت زمان ۲ ساعت برابر ۲۰ سی سی، افت صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه غیر قابل کنترل شد.

جدول ۶-۱- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۳ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۹/۳	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۸۵/۳	پوند بر کیسه سیمان
۴	اسید بوریک	۰/۲۲	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۹۰۲۸	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب			

زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان مطابق با شرایط چاه (فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۲۱۰ درجه فارنهایت) با دستگاه نیم‌بندش برابر با ۳۶۰ دقیقه تعیین شده است. لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌ها از روش پیشنهادی انجمن نفت آمریکا API-RP-10B تبعیت و آب مورد استفاده در فرمولاسیون دوغاب‌های سیمان مورد استفاده در چاه‌ها همان آب مصرفی در منطقه عملیاتی می‌باشد. همان‌طور که از نتایج آزمایش‌های فوق پیداست به دلیل بالا بودن آب آزاد و افت صافی استاتیکی دوغاب سیمان، بعد از مدت زمان کوتاهی دوغاب سیمان کاملاً دو فاز شده به طوری که در هنگام اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان در شرایط آزمایشگاهی (دما محیط و فشار اتمسفر) مقدار بسیار زیادی از ماده وزن افزا ته‌نشین شده است و همین عامل باعث جلوگیری از قرائت خواص رئولوژیکی شد، لذا از ادامه آزمایش‌ها صرف نظر شد.

۶-۷-۲- دوغاب سیمان چاه ۲۶۵

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۵ در جدول ۶-۲ درج شده است. دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۱۵ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۲۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد.

جدول ۶-۲- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌جداری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۵ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۸	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۷۱/۹۲	پوند بر کیسه سیمان
۴	اسید بوریک	۰/۱۱	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۸۱۳۸	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب			

با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی و زمان نیم‌بندش به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۶۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱۸ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۴۸۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش مطابق با شرایط چاه (فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۲۱۰ درجه فارنهایت) با دستگاه نیم‌بندش برابر با ۳۴۰ دقیقه تعیین شده است. همان طور که از نتایج آزمایش‌های فوق پیداست به دلیل بالا بودن آب آزاد و عدم کنترل افت‌صافی استاتیکی دوغاب سیمان، بعد از مدت زمان اندکی دوغاب سیمان کاملاً دو فاز شده است به طوری که در هنگام اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان در شرایط آزمایشگاهی (دما محیط و فشار اتمسفر) مقدار بسیار زیادی از ماده وزن افزا ته‌نشین شده است و همین عامل باعث جلوگیری از قرائت خواص رئولوژیکی شد، لذا از ادامه انجام آزمایش‌ها صرف نظر شد.

۶-۷-۳- دوغاب سیمان چاه ۲۶۶

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۶ در جدول ۶-۳ درج شده است. دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۱۰ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد.

جدول ۶-۳- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۲۶۶ میدان مارون

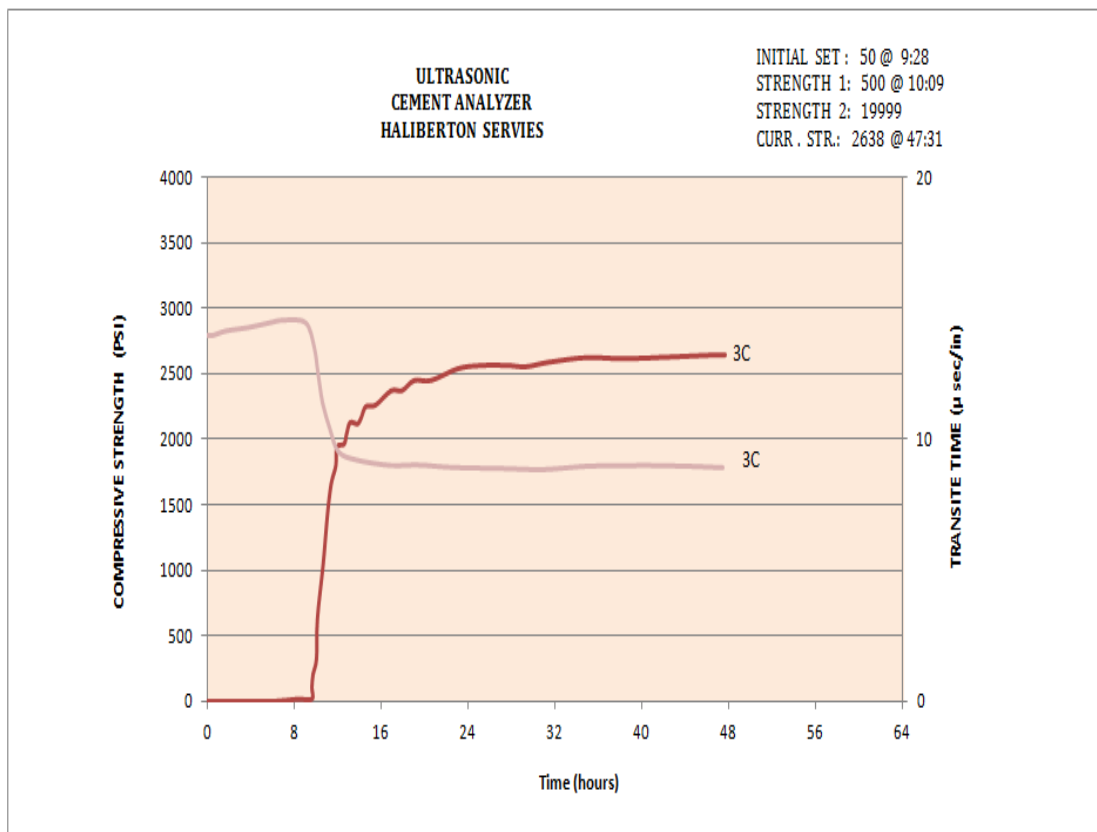
ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۹/۶۲	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۹۴/۸۲	پوند بر کیسه سیمان
۴	اسید بوریک	۰/۱۱	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۸۹۷۰	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۵۰ پوند بر فوت مکعب			

با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی و زمان نیم‌بندش به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۵۰ پوند بر فوت مکعب معادل ۲۰/۰۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱۵ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۴۰۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش مطابق با شرایط چاه (فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۲۱۰ درجه فارنهایت) با دستگاه نیم‌بندش برابر با ۳۷۰ دقیقه تعیین شده است. همان طور که از نتایج آزمایش‌های فوق پیداست به دلیل بالا بودن آب آزاد و عدم کنترل افت‌صافی استاتیکی دوغاب سیمان، بعد از مدت زمان اندکی دوغاب سیمان دو فاز شده است.

به کمک دستگاه گرانروی‌سنج Chan ۳۵ و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک (PV)، نقطه واروی (YP) و گرانروی ظاهری (AV) دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= 143 & \text{ویسکوزیته ظاهری (AV)} &= (\theta_{600}) / 2 = 71.5 \text{ (cp)} \\
 \theta_{300} &= 45 & \text{ویسکوزیته پلاستیک (PV)} &= (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1/5 \\
 \theta_{200} &= 26 & &= (45 - 13) \times 1/5 = 48 \text{ (cp)} \\
 \theta_{100} &= 13 & \text{نقطه واروی (YP)} &= (\theta_{300} - PV) \\
 \theta_6 &= 2 & \text{YP} &= 45 - 48 = -3 \text{ (lb/100ft}^2\text{)} \\
 \theta_3 &= 1 & &
 \end{aligned}$$

به کمک دستگاه UCA نمودار روند توسعه مقاومت فشاری سیمان، سیستم مارون شماره ۲۶۶ تعیین شده است، که نمودار آن در شکل ۱-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۶- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۲۶۶

همان طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود دوغاب سیمان پس از گذشت ۹ ساعت و ۲۸ دقیقه به بندش اولیه (Initial set) خود که مقاومتی برابر با ۵۰ پوند بر اینچ مربع است رسیده و مقاومت

فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع پس از گذشت ۱۰ ساعت ۹ دقیقه حاصل شده است. مقاومت فشاری سیمان پس از طی ۲۴ ساعت در حدود ۲۶۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد، اگر چه مقدار قابل قبولی است ولی باید توجه داشت که این میزان مقاومت فشاری حاصل شده از آزمایش، نماینده کل سنگ سیمان نبوده و می‌تواند مربوط به آن قسمت از سنگ سیمان که در اثر تهنشینی مواد وزن افزا از وزن مخصوص بالاتری برخوردار است و اصولاً بخش پایین سنگ سیمان را تشکیل می‌دهد باشد. لذا با توجه به خواص رئولوژیکی بسیار نامناسب، که موجب تهنشینی مواد وزن افزا در سیستم دوغاب سیمان می‌شود از ارزش چندانی در جلوگیری از ایجاد شکست در پوشش سیمانی برخوردار نمی‌باشد.

۶-۷-۴- دوغاب سیمان چاه ۱۷۳

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۳ در جدول ۴-۶ درج شده است. دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۲۰ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۱۶۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد.

جدول ۴-۶- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۳ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۲۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۹۴	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۲۷۵	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۹۸۴۹	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۶ پوند بر فوت مکعب			

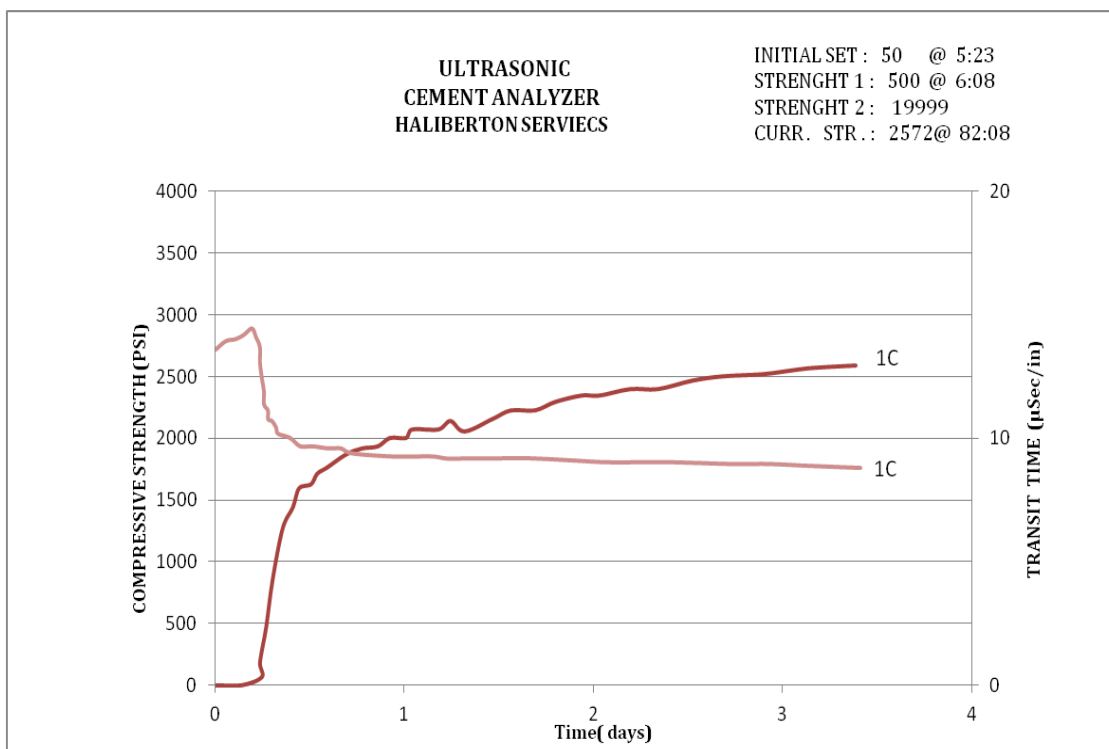
با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افتصافی استاتیکی و زمان نیم‌بندش به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۳ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۱۱ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۸ سی‌سی، افتصافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۴۸۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش

دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم‌بندش با فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۲۳۴ دقیقه تعیین شده است.

به کمک دستگاه گرانروی‌سنج ۳۵ Chan و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک، نقطه‌واروی و گرانروی ظاهری دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned} 600 \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_{600}) &= 153 & \text{ ویسکوزیته ظاهری (AV) } &= (\theta_{600}) / 2 = 76.5 \text{ (cp)} \\ 300 \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_{300}) &= 50 & \text{ ویسکوزیته پلاستیک (PV) } &= (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1/5 \\ 200 \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_{200}) &= 31 & &= (50 - 18) \times 1/5 = 48 \text{ (cp)} \\ 100 \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_{100}) &= 18 & \text{ نقطه واروی (YP) } &= (\theta_{300} - PV) \\ \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_6) &= 2 & \text{ YP} &= 50 - 48 = 2 \text{ (lb/100ft}^2\text{)} \\ \text{ عدد خوانده شده در دور } (\theta_3) &= 1 & & \end{aligned}$$

به کمک دستگاه UCA نمودار روند توسعه مقاومت فشاری سیمان، سیستم مارون شماره ۱۷۳ تعیین شد، که نمودار آن در شکل ۶-۲ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود دوغاب سیمان پس از گذشت ۵ ساعت و ۲۳ دقیقه به بندش اولیه خود که مقاومتی برابر با ۵۰ پوند بر اینچ مربع است رسیده و مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع پس از گذشت ۶ ساعت ۸ دقیقه حاصل شده است. مقاومت فشاری سیمان پس از طی ۲۴ ساعت در حدود ۲۰۵۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که این میزان مقاومت فشاری اگر چه مقدار قابل قبولی است ولی با توجه به خواص رئولوژیکی بسیار نامناسب، سیستم دوغاب سیمان از ارزش چندانی در جلوگیری از ایجاد شکست در پوشش سیمانی برخوردار نمی‌باشد.



شکل ۶-۲- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۱۷۳

۶-۷-۵- دوغاب سیمان چاه ۱۷۴

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۴ در جدول ۶-۵ درج شده است.

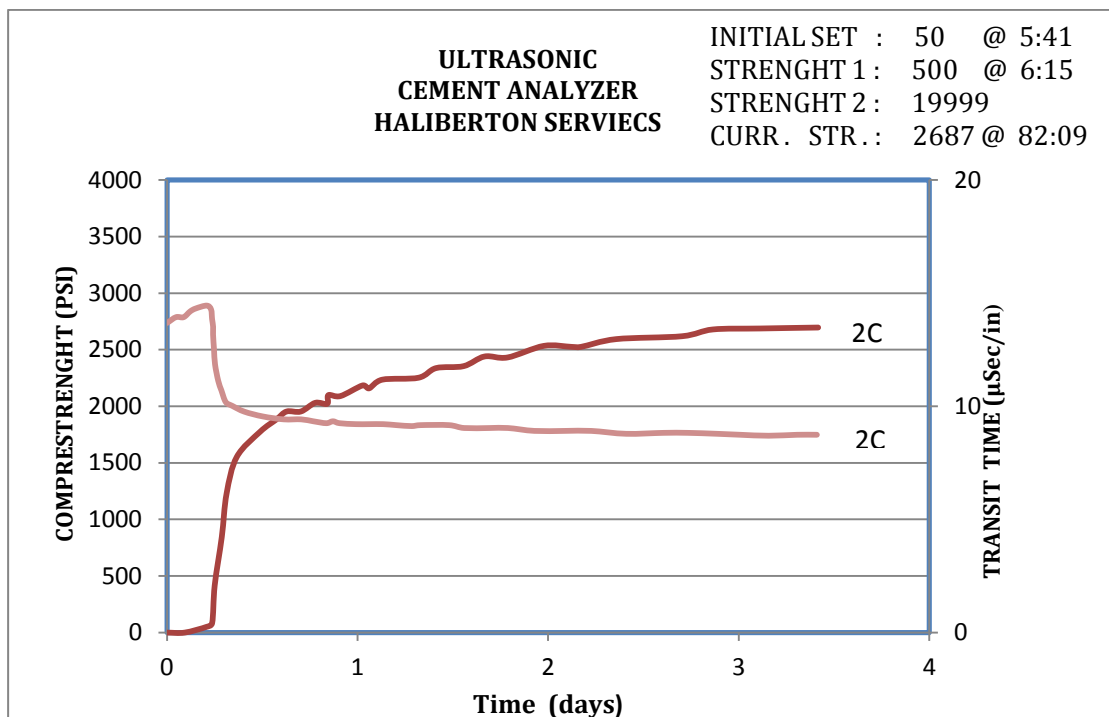
جدول ۶-۵- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۴ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۲۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۹۰	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضدکف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۹۵۸۱	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۶ پوند بر فوت مکعب			

دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۱۰ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۰۷۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی و زمان نیم‌بندش به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۶ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۲۰ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۵۰۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش مطابق با شرایط چاه به کمک دستگاه نیم بندش برابر با ۳۲۶ دقیقه تعیین شده است. با کمک دستگاه گرانروی سنج ۳۵ Chan و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک، نقطه‌واروی و گرانروی ظاهری دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{array}{ll}
 AV = (\theta_{600}) / 2 = 64/5 \text{ (cp)} & \theta_{600} \text{ عدد خوانده شده در دور } 600 = 129 \\
 PV = (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1/5 & \theta_{300} \text{ عدد خوانده شده در دور } 300 = 54 \\
 = (54 - 20) \times 1/5 = 51 \text{ (cp)} & \theta_{200} \text{ عدد خوانده شده در دور } 200 = 35 \\
 YP = (\theta_{300} - PV) & \theta_{100} \text{ عدد خوانده شده در دور } 100 = 20 \\
 YP = 54 - 51 = 3 \text{ (lb/100ft}^2\text{)} & \theta_6 \text{ عدد خوانده شده در دور } 6 = 4 \\
 & \theta_3 \text{ عدد خوانده شده در دور } 3 = 4
 \end{array}$$

به کمک دستگاه UCA نمودار روند توسعه مقاومت فشاری سیمان، سیستم مارون شماره ۱۷۴ تعیین شد، که نمودار آن در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود دوغاب سیمان پس از گذشت ۵ ساعت و ۴۱ دقیقه به بندش اولیه خود که مقاومتی برابر با ۵۰ پوند بر اینچ مربع است رسیده و مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع پس از گذشت ۶ ساعت ۱۵ دقیقه حاصل شده است. مقاومت فشاری دوغاب سیمان پس از طی ۲۴ ساعت در حدود ۲۲۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد، اگر چه مقدار قابل قبولی است ولی با توجه به خواص رئولوژیکی بسیار نامناسب، سیستم دوغاب سیمان از ارزش چندانی در جلوگیری از ایجاد شکست در پوشش سیمانی برخوردار نمی‌باشد.



شکل ۶-۳- روند توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان چاه مارون ۱۷۴

۶-۷-۶- دوغاب سیمان چاه ۱۷۹

ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۹ ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۹ در جدول ۶-۶ درج شده است.

جدول ۶-۶- فرمولاسیون دوغاب سیمان لوله‌گذاری ۹ ۵/۸ اینچ چاه ۱۷۹ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۲۰/۴	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۱۰۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضدکف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۹۶۲۲	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب			

دمای ایستای ته‌چاهی برابر ۲۱۰ درجه فارنهایت و فشار ایستای ته‌چاهی برابر ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افتصافی استاتیکی و زمان نیم‌بندش به

ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۹۲ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱۵ سی سی، افت صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۹۰ سی سی و زمان نیم بندش مطابق با شرایط چاه به کمک دستگاه نیم بندش برابر با ۱۵۱ دقیقه تعیین شد. با دستگاه گرانروی سنج ۳۵ Chan و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک، نقطه واروی و گرانروی ظاهری دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 AV &= (\theta_{600}) / 2 = 82 \text{ (cp)} & \theta_{600} &= 164 \text{ عدد خوانده شده در دور 600} \\
 PV &= (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1/5 & \theta_{300} &= 71 \text{ عدد خوانده شده در دور 300} \\
 &= (71 - 30) \times 1/5 = 61/5 \text{ (cp)} & \theta_{200} &= 50 \text{ عدد خوانده شده در دور 200} \\
 YP &= (\theta_{300} - PV) & \theta_{100} &= 30 \text{ عدد خوانده شده در دور 100} \\
 YP &= 71 - 61/5 = 9/5 \text{ (lb/100ft}^2\text{)} & \theta_6 &= 7 \text{ عدد خوانده شده در دور 6} \\
 & & \theta_3 &= 5 \text{ عدد خوانده شده در دور 3}
 \end{aligned}$$

برای تعیین آب آزاد، مطابق با روش پیشنهادی انجمن نفت آمریکا API-RP-10B پس از تهیه دوغاب سیمان، به مدت ۲۰ دقیقه آن را در دستگاه کانسیستومتر اتمسفری به گردش درآورده و مقدار ۲۵۰ سی سی از دوغاب سیمان را در استوانه مدرج ریخته و پس از گذشت ۲ ساعت میزان آب آزاد آن اندازه گیری شد. شکل ۴-۶ شمایی از آب آزاد دوغاب سیمان مصرفی در چاه ۱۷۹ میدان مارون را پس از گذشت ۲ ساعت نشان می دهد. همانطور که از شکل مذکور کاملاً مشهود است دوغاب سیمان دو فاز گردیده است به نحوی که بخش زیادی آب، از ترکیبات دوغاب سیمان جدا شده و بر روی سطح آن جمع گردیده و بخشی از مواد وزن افزا آن ته نشین شده است.



شکل ۶-۴- آب آزاد دوغاب سیمان چاه ۱۷۹ میدان مارون

۶-۸- بحث پیرامون کیفیت دوغاب‌های سیمان چاه‌های نفت جنوب

همانطور که از ارزیابی سیستم‌های مختلف دوغاب سیمان مصرفی در چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون مشاهده شد، سیستم‌های دوغاب سیمان مصرفی از خواص رئولوژیکی مناسبی برخوردار نمی‌باشند. میزان آب آزاد در هر شش سیستم بالا بوده و در ضمن میزان ته‌نشست بسیار زیادی از افزودنی وزن افزا مشاهده شد. به نظر می‌رسد که پس از جایگیری دوغاب‌ها در فضای حلقوی پشت رشته‌های جداری و آستری، آب آزاد بسیار زیادی از سیستم جدا شده و همراه با میزان بالای ته‌نشینی افزودنی هایدنس، باعث آن می‌شوند که سیمانی با کیفیت‌های متفاوت در طول ستون فضای حلقوی ایجاد شود. به طوری که در پایین، دوغاب سیمان سنگین وزن و نسبتاً کم مقاومتی که حاوی مقادیر زیادی افزودنی وزن افزا هایدنس است و در بالای ستون، دوغاب سیمان سبک و روانی که آب زیادی داشته بوجود آید که اصطلاحاً به آن دو فاز شدن دوغاب سیمان می‌گویند. در پی آن سیمان سفت شده در پشت لوله‌ها نیز دارای کیفیت‌ها و مقاومت‌های متفاوتی بوده و پوشش سیمان قرار گرفته از یکپارچگی لازم برخوردار نمی‌باشد. این مسأله می‌تواند خود عاملی برای عدم توانایی سیمان قرار گرفته در پشت

رشته‌جداری در انجام وظایف آن شود. ایجاد ترک و شکاف در قسمت‌های کم مقاومت پوشش سیمانی نیز می‌تواند موجب هجوم آب‌های سازند شده و خود عاملی در برای تسریع پدیده دوپهن‌شدگی رشته‌جداری باشد.

۶-۹- اصلاح فرمولاسیون دوغاب سیمان چاه ۱۷۹

در راستای انجام آزمایش‌ها و ساخت سیستم جدید سیمان انعطاف‌پذیر در ابتدا بایستی فرمولاسیون دوغاب سیمان مصرفی در شرایط واقعی چاه‌ها اصلاح شود تا بتوان آن فرمولاسیون دوغاب سیمان را به عنوان دوغاب سیمان پایه برای مقایسه با سایر سیستم‌های طراحی شده به کار گرفت و همچنین تمامی تغییراتی را که می‌خواهیم در سیستم جدید اعمال نمائیم بایستی بر روی فرمولاسیون اصلاح شده که قابل کاربرد در عملیات سیمان‌کاری می‌باشد انجام پذیرد. لذا نیل به این اهداف، سیستم دوغاب سیمان چاه شماره ۱۷۹ به عنوان نمونه انتخاب و ادامه آزمایش‌ها در پی اصلاح فرمولاسیون این سیستم انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است به دلیل تعدد آزمایش‌ها در ساخت سیمان از آب معمولی استفاده شده است. همانطور که در بخش قبلی به تفصیل بیان شد فرمولاسیون دوغاب سیمان چاه ۱۷۹ میدان مارون به دلیل آب آزاد بیش از حد استاندارد دو فاز گردید، لذا برای اصلاح فرمولاسیون مورد نظر با حفظ وزن مخصوص دوغاب سیمان، بایستی مقدار مواد وزن‌افزا و آب مصرفی را به نحوی کاهش داد که دوغاب سیمان در مدت زمان ۵۰ ثانیه قابل مخلوط باشد. در ابتدا مقدار مصرف ماده وزن‌افزا به ۸۰ پوند بر کیسه و آب مصرفی به ۰/۸۳۲۲ فوت مکعب کاهش داده شد و با انجام آزمایش‌های دانسیته، آب آزاد و افت‌صافی استاتیکی به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان ۱۴۸ پوند بر فوت مکعب، و آب آزاد ۱۲ سی‌سی و افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه ۳۵۰ سی‌سی تعیین شد که بدلیل بالا بودن آب آزاد و افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه پدیده دو فاز شدگی مشاهده گردید، لذا تصمیم گرفته شد بازنگری در فرمولاسیون قبلی انجام گیرد تا ضمن بالا بردن وزن مخصوص دوغاب سیمان به ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب، پدیده دو فازشدگی دوغاب سیمان مرتفع گردد که در

ادامه اصلاحات با کاهش مقدار نمک، هایدنس و آب مصرفی ترکیبات دوغاب سیمان جدید مطابق با جدول ۶-۷ طراحی گردید.

جدول ۶-۷- فرمولاسیون دوغاب سیمان اصلاح شده لوله‌جداری ۵/۸ ۹ اینچ چاه ۱۷۹ میدان مارون

ردیف	نوع افزودنی/کلاس	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	ضدکف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۶	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب			

با انجام آزمایش‌های مختلف مدت زمان مخلوط نمایی، دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی، زمان نیم‌بندش و انبساط طولی به ترتیب زمان مخلوط نمایی ۴۵ ثانیه، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۹۲ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱/۵ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۰۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک دستگاه نیم بندش با فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۴۵ دقیقه و همچنین میزان انبساط طولی نمونه به کمک دستگاه اندازه‌گیری انبساط طولی نمونه و پس از عمل‌آوری سیمان به مدت زمان ۳ روز در دستگاه عمل‌آوری سیمان به میزان صفر تعیین شد.

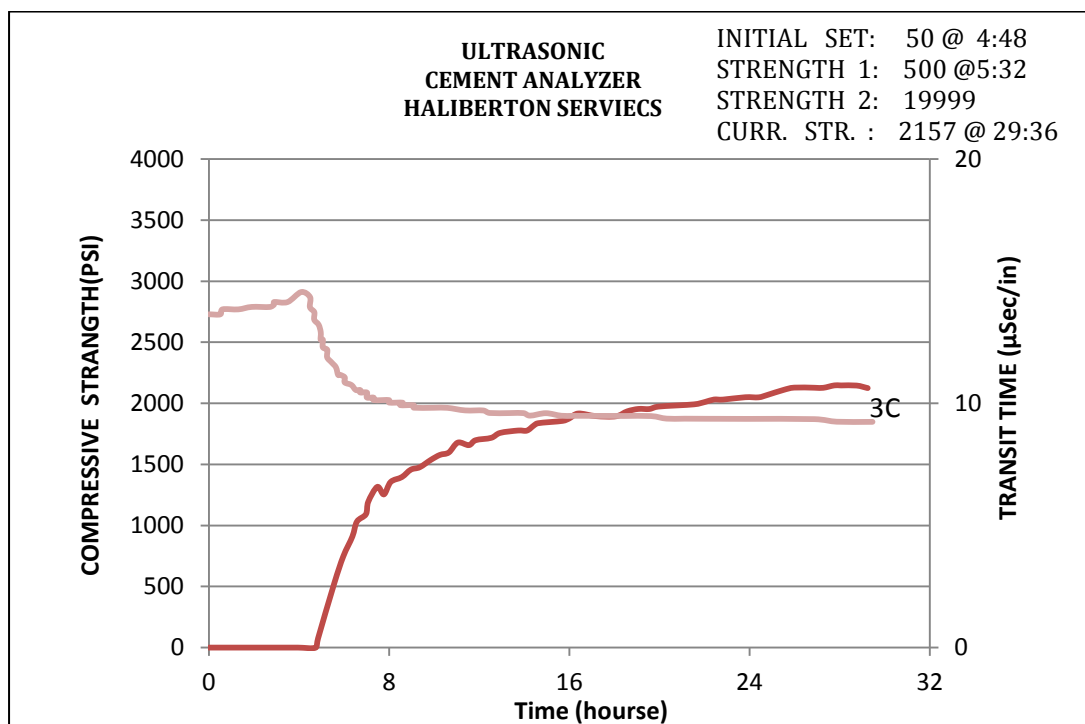
با دستگاه گرانی‌سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد. از آنجا که حداکثر مقدار قابل قرائت توسط دستگاه برابر ۳۰۰ می‌باشد، لذا قرائت عدد مربوط به دور ۶۰۰ مقدور نبود. سیستم فوق فاقد ته‌نشینی افزودنی وزن افزا هایدنس بوده و خواص رئولوژیکی مناسبی را دارا می‌باشد به نحوی که مقدار نقطه واروی آن از ۹/۵ به ۲۴ پوند بر ۱۰۰ فوت مربع افزایش یافته است و این خود موید عدم ته‌نشینی و همگن بودن

دو غاب سیمان طراحی شده را نشان می‌دهد. در ادامه، از این سیستم تحت عنوان سیستم اصلاح شده یاد خواهد شد.

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور 600} \\
 \theta_{300} &= 273 & \text{عدد خوانده شده در دور 300} \\
 \theta_{200} &= 190 & \text{عدد خوانده شده در دور 200} \\
 \theta_{100} &= 107 & \text{عدد خوانده شده در دور 100} \\
 \theta_6 &= 15 & \text{عدد خوانده شده در دور 6} \\
 \theta_3 &= 13 & \text{عدد خوانده شده در دور 3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= (\theta_{300} - \theta_{100}) \times 1/5 \\
 &= (273 - 107) \times 1/5 = 249 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300} - PV) \\
 YP &= 273 - 249 = 24 \text{ (lb/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

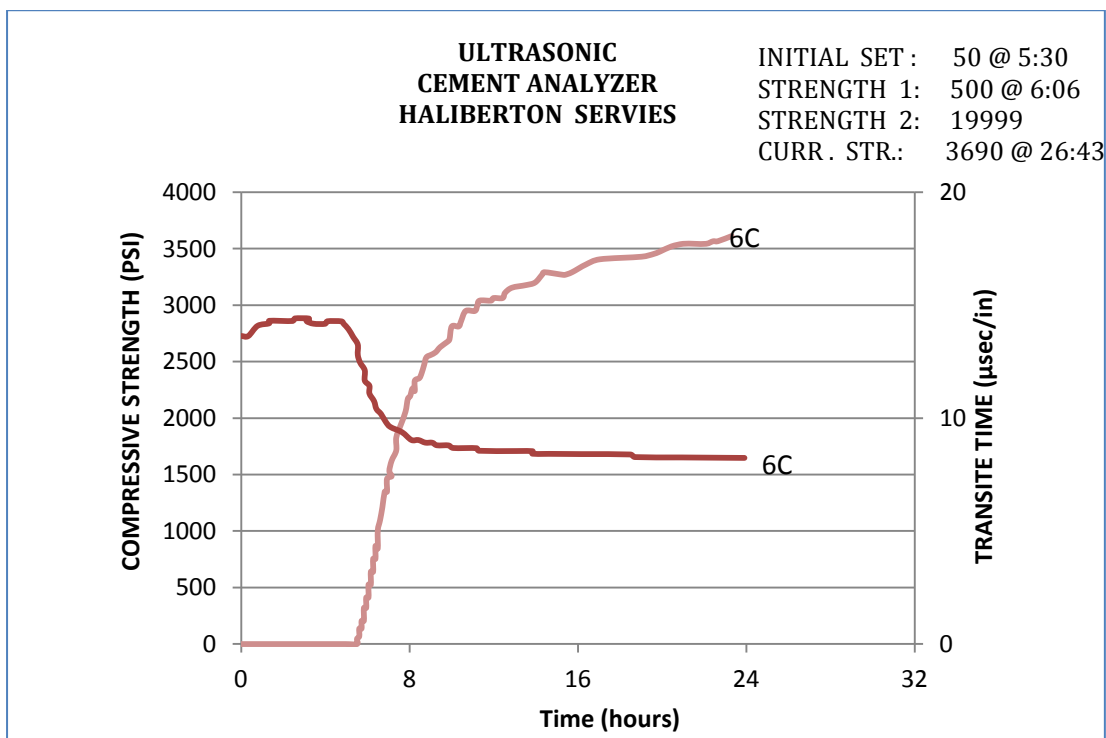
به کمک دستگاه UCA نمودار روند توسعه مقاومت فشاری سیمان سیستم چاه شماره ۱۷۹ و دو غاب سیمان اصلاح شده تعیین شد، که نمودار آن‌ها را به ترتیب در شکل‌های ۵-۶ و ۶-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۶- روند توسعه مقاومت فشاری سیمان چاه ۱۷۹

همانطور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود دو غاب سیمان پس از گذشت ۴ ساعت و ۴۸ دقیقه به بندش اولیه خود که مقاومتی برابر با ۵۰ پوند بر اینچ مربع است رسیده و مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند

بر اینچ مربع پس از گذشت ۵ ساعت ۳۲ دقیقه حاصل شده است. مقاومت فشاری سیمان پس از طی ۲۴ ساعت در حدود ۲۱۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد، اگر چه مقدار قابل قبولی است ولی مقاومت فشاری نمایش داده شده نماینده کل سیستم دوغاب سیمان نبوده و فقط مربوط به آن بخش از دوغاب سیمان که تهنشینی اتفاق افتاده است خواهد بود و همچنین با توجه به خواص رئولوژیکی بسیار نامناسب، سیستم دوغاب سیمان از ارزش چندانی در جلوگیری از ایجاد شکست در پوشش سیمانی برخوردار نمی‌باشد.



شکل ۶-۶- روند توسعه مقاومت فشاری سیمان اصلاح شده

همانطور که در شکل ۶-۶ مشاهده می‌شود، دوغاب سیمان پس از طی ۵ ساعت و ۳۰ دقیقه مقاومت فشاری اولیه ۵۰ و پس از طی ۶ ساعت و ۵ دقیقه مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع یافته است. روند مقاومت فشاری در این دوغاب سیمان مناسب بوده و طی زمان کوتاهی افزایش یافته است. مقاومت فشاری ۲۴ ساعته سیمان در حدود ۳۶۵۰ پوند بر اینچ مربع بوده و با روند افزایشی موجود همچنان افزایش خواهد یافت. با توجه به اصلاحات انجام شده در دوغاب سیمان بهینه و نتایج حاصل

از خصوصیات اندازه‌گیری شده آن چنین می‌توان نتیجه گرفت که، هر چند که بعضی از خصوصیات اندازه‌گیری شده آن نظیر افت‌صافی استاتیکی که از حد مقدار استاندارد انجمن نفت آمریکا بالاست و در شرایط سخت چاه جوابگوی مقاومت در برابر نفوذ و مهاجرت گاز را نخواهد داشت ولی از نقطه نظر مقایسه این سیستم با دوغاب سیمان استفاده شده در چاه ۱۷۹ و همچنین برای بررسی اثر افزودنی‌های منعطف و منبسط‌کننده بر روی آن مناسب خواهد بود، لذا برای مقایسه این سیستم با سایر سیستم‌ها در ادامه به بررسی مدول یانگ و ضریب پواسون آن می‌پردازیم.

۱۰-۶- سنگ سیمان چاه ۱۷۹

برای ارزیابی کیفیت سنگ سیمان چاه شماره ۱۷۹ میدان مارون مغزه‌هایی از دوغاب سیمان پمپ شده به درون چاه، در شرایط واقعی چاه شبیه‌سازی و آماده شد. برای این منظور پس از ساخت دوغاب سیمان توسط مخلوط‌کن برقی، نمونه در داخل استوانه لاستیکی به طول ۲۰۰ و قطر ۵۴ میلی‌متر ریخته و با ضربه زدن به داخل آن هواگیری شد و سپس به مدت ۴۸ ساعت تحت شرایط واقعی چاه در دستگاه عمل‌آوری دوغاب سیمان قرار گرفت. پس از اتمام عمل‌آوری و در زمان خارج نمودن نمونه از داخل استوانه لاستیکی مشاهده گردید که آب زیادی بر روی نمونه انباشته شده است و نشان از ته‌نشینی بسیار زیاد مواد وزن‌افزا در دوغاب سیمان می‌باشد، لذا از این نمونه نمی‌توان برای ارزیابی کیفیت سنگ سیمان استفاده نمود اما به جهت این که این سیمان در چاه ۱۷۹ بکارگرفته شده است و خصوصیات آن بایستی با سایر سیستم‌های طراحی شده مورد مقایسه قرار گیرد به ناچار از نمونه باقی مانده که نماینده کل سیستم دوغاب سیمان نبوده نمونه‌هایی از قسمت‌های مختلف آن تهیه گردید. شکل ۶-۷ نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از دوغاب سیمانی چاه مارون شماره ۱۷۹ را نشان می‌دهد. عدم یکنواختی دوغاب سیمان، پس از سخت شدن سیمان بر روی دیواره نمونه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. از آنجا که دوغاب سیمان همگن نبوده و در پی آن نمونه‌های تهیه شده دارای خواص مکانیکی متفاوتی در راستای طول نمونه، به دلیل ته‌نشست افزودنی وزن‌افزا، می‌باشند

لذا ارایه اعداد ثابتی به عنوان پارامترهای انعطاف‌پذیری سنگ سیمان بسیار دشوار است. برای بررسی چگونگی تغییرات در راستای طولی نمونه تهیه شده، نمونه از جانب طولی در سه قسمت مساوی برش داده شده و از هر قسمت مغزه‌ای به قطر یک اینچ و طول ۲/۵ اینچ تهیه شده است.

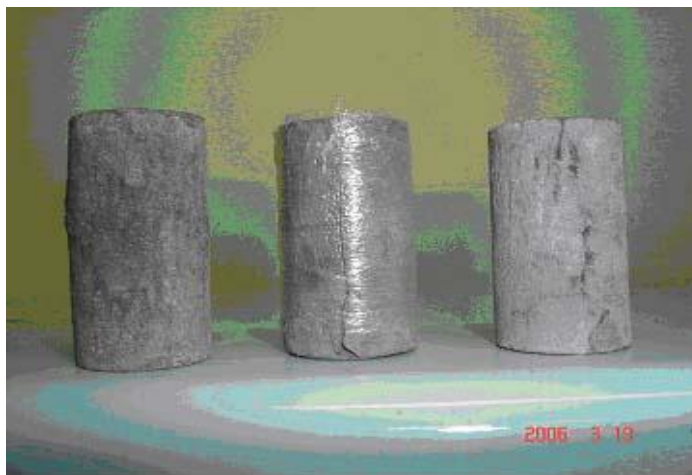


شکل ۶-۷- نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده از سنگ سیمان چاه مارون ۱۷۹

اختلاف در ترکیب و وزن نمونه‌های حاصل حاکی از ناهمگن بودن دوغاب سیمان و عدم یکنواختی سیمان سفت شده در راستای طولی نمونه می‌باشد. پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی سه نمونه، مشخص شد، نمونه‌ای که از قسمت میانی، مغزه‌گیری شده بود دارای مقاومت نهایی بالاتری نسبت به نمونه فوقانی می‌باشد. مغزه تهیه شده از قسمت تحتانی نمونه دارای مقاومت نهایی پایین‌تری می‌باشد. این مسأله حاکی از اختلاف در جنس مغزه‌ها و درصد بالای افزودنی وزن افزا در مغزه پایینی می‌باشد. مقادیر مدول یانگ نمونه‌های فوقانی، میانی و تحتانی به ترتیب کاهش یافتند (جدول ۶-۸). شمایی از نمونه‌های شکسته شده در شکل (۶-۸) دیده می‌شود.

جدول ۶-۸- نتایج رفتار مکانیکی مقاطع تهیه شده از سنگ سیمان چاه ۱۷۹

مدول یانگ (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری (پوند بر اینچ مربع)	وزن مخصوص (پوند بر فوت مکعب)	مقاطع نمونه سنگ سیمان
۲/۳۵	۱۵۵۰	۱۴۵	بخش فوقانی
۲/۲	۱۷۰۰	۱۴۷	بخش میانی
۲/۱	۱۴۵۰	۱۴۹	بخش تحتانی



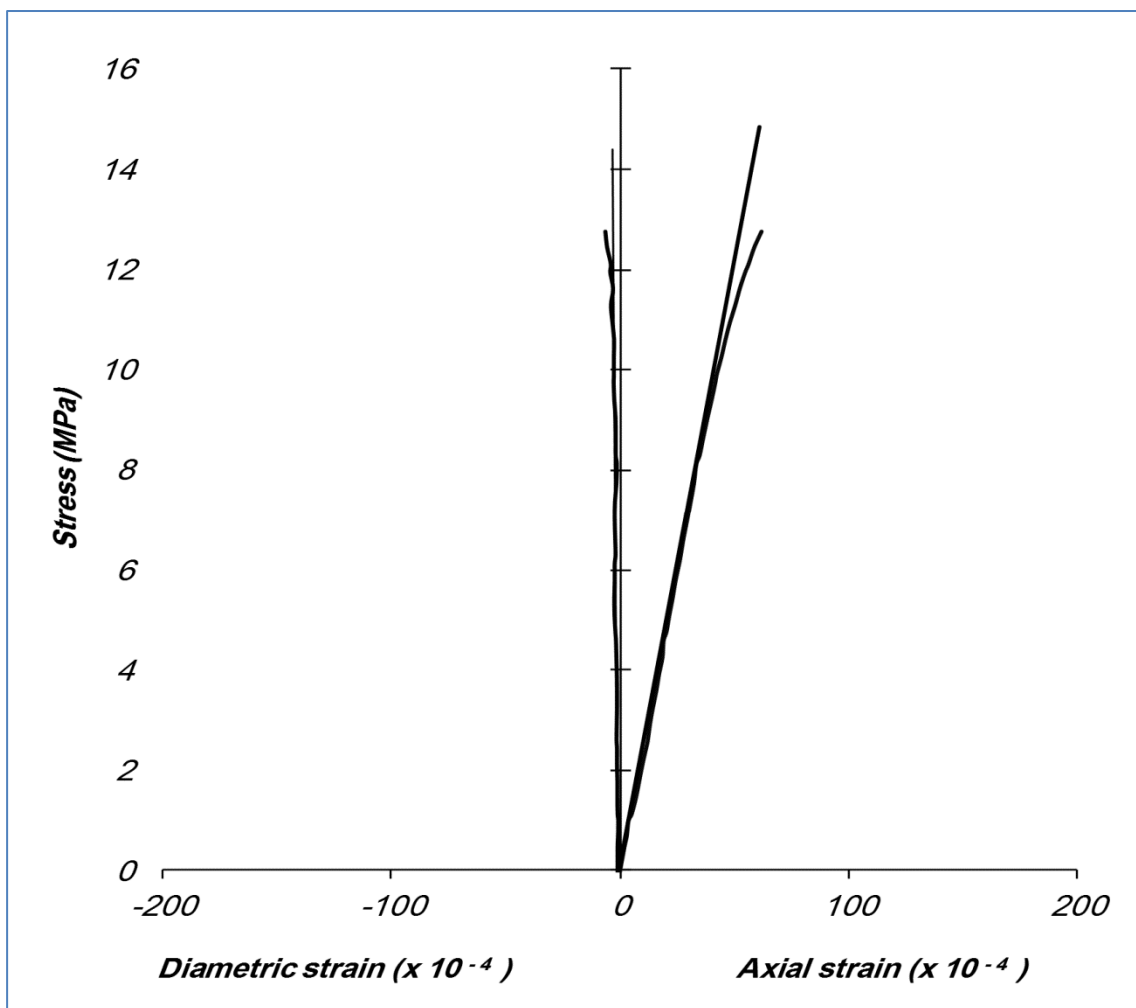
شکل ۶-۸- مغزه‌های سیمانی گرفته شده از نمونه سیمان چاه شماره ۱۷۹

۶-۱۱- الاستیسیته سنگ سیمان چاه ۱۷۹ و سیستم اصلاح شده

برای اندازه‌گیری مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان چاه ۱۷۹ میدان مارون تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۶۶/۴ و قطر ۶۶/۸ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت مطابق با دستورالعمل ارائه شده در فصل پنجم عمل‌آوری و آماده گردید. سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش‌سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه (در فصل پنجم نحوه کار با آن به طور کامل بیان گردیده است) مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید و به دلیل نزدیک بودن نتایج هر ۳ نمونه با یکدیگر و برای حصول اطمینان، نتایج مربوط به نمونه‌ای که کمترین مقدار را نشان می‌دهد گزارش گردید (در تمامی آزمایش‌ها در صورت مشاهده اختلاف، آزمایش مجدداً تکرار گردید). لازم به ذکر است با توجه به اینکه نمونه سنگ سیمان به صورت مصنوعی و به صورت کاملاً همگن تهیه می‌گردد نتایج آن با نمونه سنگ طبیعی که در هر نمونه احتمال وجود درزه و شکاف می‌باشد و بایستی به تعداد و از طریق برونیابی مشخص گردد متفاوت می‌باشد. شکل ۶-۹ نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده از چاه مارون ۱۷۹ را نشان

می‌دهد، بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با $2/43$ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برابر با $0/03$ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با 1849 پوند بر اینچ مربع بدست آمد. همانگونه که از شکل منحنی تنش- کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. رفتار سیمان در این ناحیه شکل‌پذیر است بدان معنی که در نمونه، تغییر شکل دائمی اتفاق افتاده است و با باربرداری، نمونه به ابعاد اولیه خود باز نمی‌گردد. این رفتار به معنی افزایش چگالی و دانسیته نمونه است که به تبعیت از آن مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه کشسان یا الاستیک گویند. در این ناحیه تغییر شکل ایجاد شده، در ازای بارگذاری دائمی نبوده و با انجام باربرداری، نمونه شکل خود را که در ابتدای ناحیه الاستیک داشت باز خواهد یافت. رفتار سیمان در این ناحیه از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد چرا که در این بخش هیچگونه شکستی در نمونه اتفاق نیفتاده و سیمان در برابر بارهای وارده تغییر شکل برگشت‌پذیری از خود نشان می‌دهد. حال هر چه شیب این بخش از منحنی کمتر باشد، تغییر شکل برگشت‌پذیر سنگ سیمان در ازای یک مقدار مشخص از تنش، بیشتر می‌باشد. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه اتفاق می‌افتد. شروع این بخش از منحنی منطبق با آغاز کاهش شیب ثابت بخش کشسان منحنی و پایان آن، نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان‌دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده و بدان استحکام یا مقاومت فشاری تک محوره می‌گویند. نقطه آغاز این بخش از منحنی، نقطه پایان بخش الاستیک می‌باشد و بدان نقطه تسلیم الاستیک گفته می‌شود. این نقطه، نقطه‌ای است که هیچگاه نایستی تنش‌های وارده بر پوشش سیمانی پشت لوله‌های جداری به آن برسد. اگر در این بخش از منحنی، باربرداری شود مشاهده می‌شود که یک دگر شکلی پایدار در نمونه ایجاد می‌شود. در صورتی که بارگذاری مجدد انجام شود، منحنی مربوطه در نقطه‌ای بالاتر از منحنی باربرداری، به منحنی اصلی می‌پیوندند. این پدیده به این معنی است که علی‌رغم ایجاد تغییر شکل

پایدار در نمونه، هنوز مقاومت نمونه به طور کامل در هم شکسته نشده است. در این ناحیه، نمونه دارای رفتار شکل پذیر است. البته رفتار نمونه در این ناحیه مورد نظر نمی باشد بدان معنی که مایل به رسیدن رفتار سیمان به این بخش نیستیم. پس از نقطه اوج منحنی که نقطه مقاومت نهایی نمونه است، نمونه شکسته و ظرفیت باربری خود را از دست می دهد. رفتار نمونه در این بخش از منحنی رفتار شکننده است.

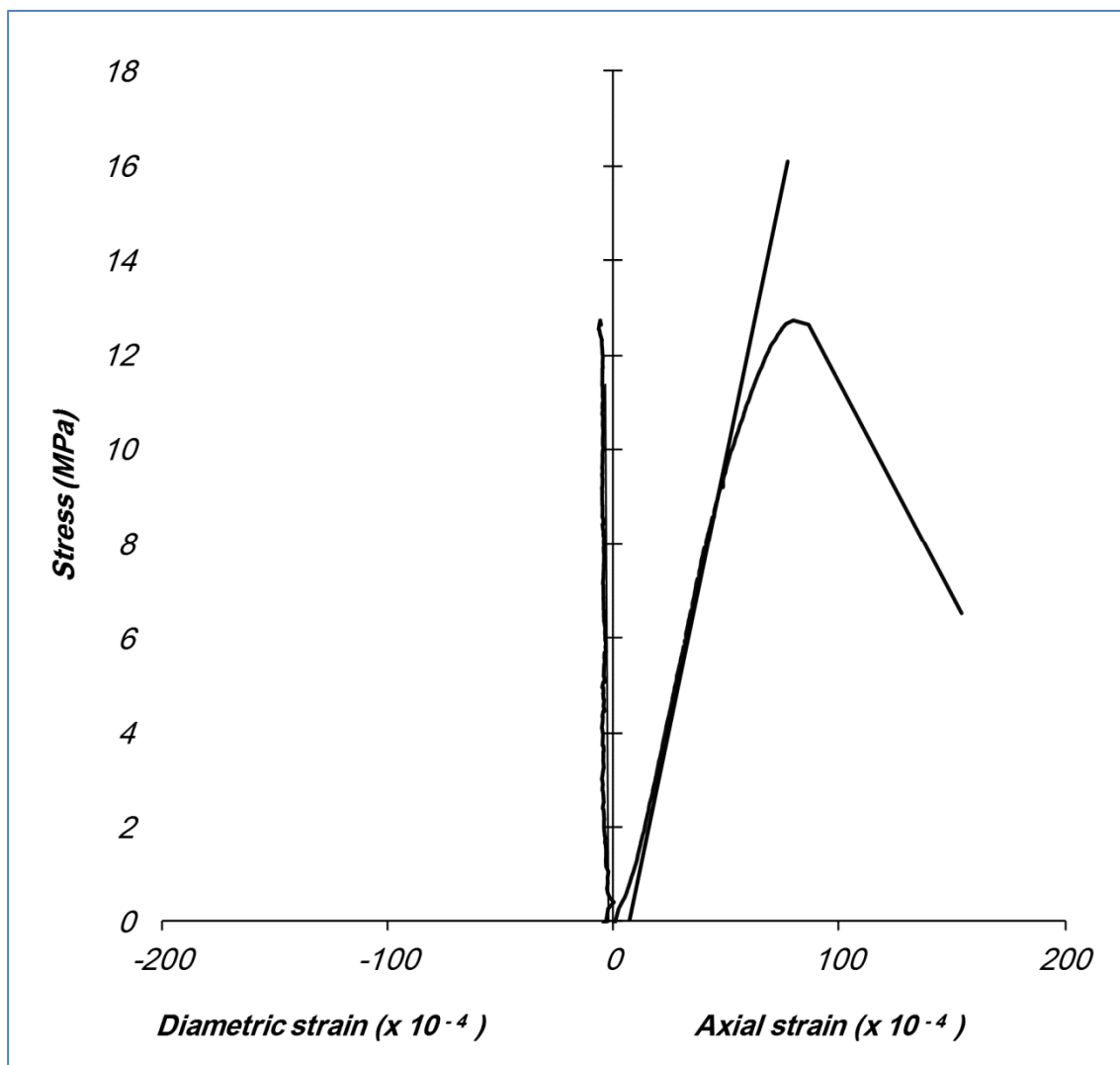


شکل ۶-۹- نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه سیمان چاه مارون ۱۷۹

در بخش سمت چپ شکل ۶-۹ منحنی تنش محوری- کرنش جانبی مشاهده می شود. نسبت شیب بخش سمت راست (مدول یانگ) به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان دهنده نسبت پواسون

می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر $0/03$ است. حال هر چه میزان مدول الاستیسیته یا شیب منحنی تنش- کرنش محوری کمتر بوده و مقدار نسبت پواسون بیشتر باشد نشان دهنده انعطاف‌پذیر بودن نمونه است و هدف از طراحی سیستم جدید سیمان انعطاف‌پذیر دستیابی به آن می‌باشد.

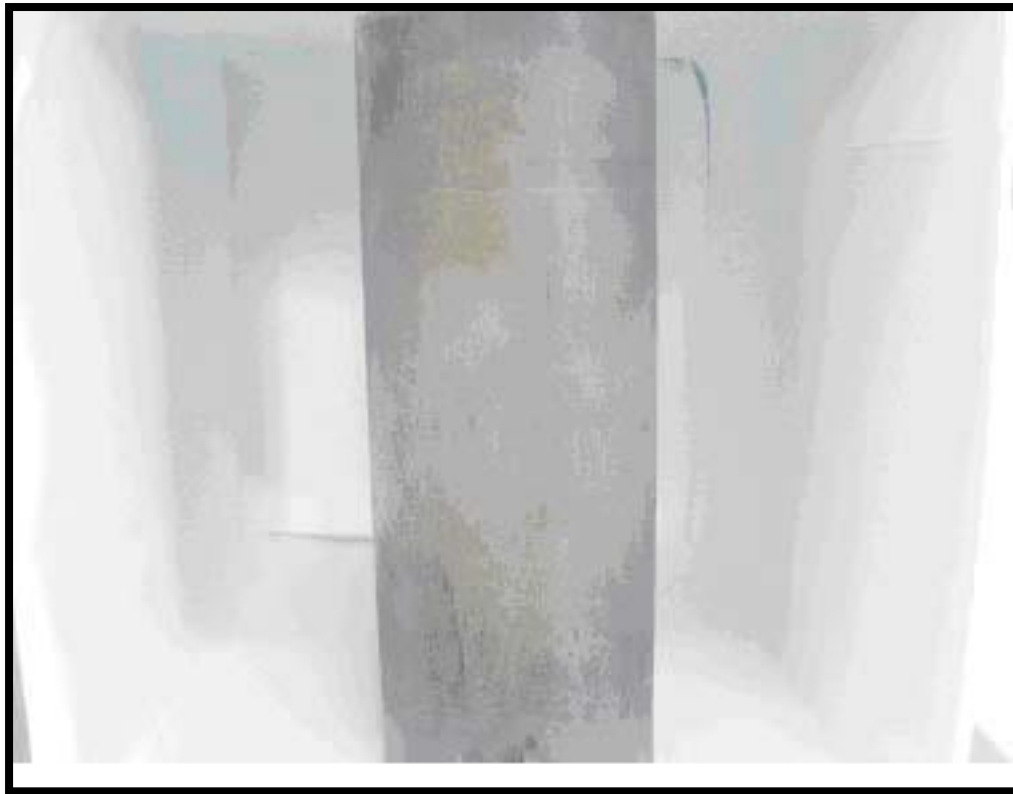
نسبت پواسون سیمان نقش قابل توجهی را در یکپارچگی پوشش سیمانی بازی می‌کند. هر چه میزان نسبت پواسون بیشتر باشد، شرایط مطلوب‌تر است. در ضمن افزایش نسبت پواسون موجب کاهش میزان قابلیت تراکم‌پذیری می‌شود. با استفاده از دستگاه کنترل خودکار می‌توان رفتار نمونه پس از نقطه مقاومت نهایی را مشاهده کرد. برای حصول اطمینان از نتایج اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره مجهز به سیستم کرنش‌سنج، نمونه‌ای از سنگ سیمان چاه مارون ۱۷۹ به طول ۱۴۹ و قطر $66/9$ میلی‌متر مشابه با همان روش قبلی آماده و سپس در شرکت خاک و سنگ که یکی از مهمترین مراکز مجهز به دستگاه کنترل خودکار می‌باشد آزمایش و مقادیر مدول یانگ برابر با $2/3$ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر با $0/03$ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با ۱۸۸۵ پوند بر اینچ بدست آمد. شکل ۶-۱۰ نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده از چاه مارون ۱۷۹ با استفاده از دستگاه کنترل خودکار را نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مدول یانگ و ضریب پواسون کاملاً مشهود است، مقادیر مدول یانگ از $2/43$ به $2/3$ گیگاپاسکال کاهش یافته و در عوض ضریب پواسون $0/03$ بدون تغییر مانده است لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر هر دو پارامتر بسیار نزدیک با نتایج بدست آمده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره مجهز به سیستم کرنش‌سنج می‌باشد. از آنجا که رفتار سیمان پس از نقطه شکست هیچ گونه اهمیتی در راستای انجام رساله ندارد لذا دلیلی برای بکارگیری چنین دستگاهی (هزینه انجام هر آزمایش آن بسیار بالا می‌باشد) برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها در میان نمی‌باشد. لازم به ذکر است در ترسیم تنش محوری- کرنش جانبی بعضی از نمونه‌ها، جهت وضوح منحنی و عدم تداخل آن با تنش محوری از تمامی اطلاعات مقداری کم گردیده و برای سهولت در رسم منحنی، مقدار کرنش جانبی منفی فرض گردیده است.



شکل ۶-۱۰- نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان چاه مارون ۱۷۹ به کمک دستگاه کنترل خودکار

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان اصلاح شده چاه ۱۷۹ میدان مارون، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۶۸/۴ و قطر ۶۵/۸ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید، سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید (لازم به ذکر است در تمامی آزمایش‌های انجام شده در این رساله از میان نتایج

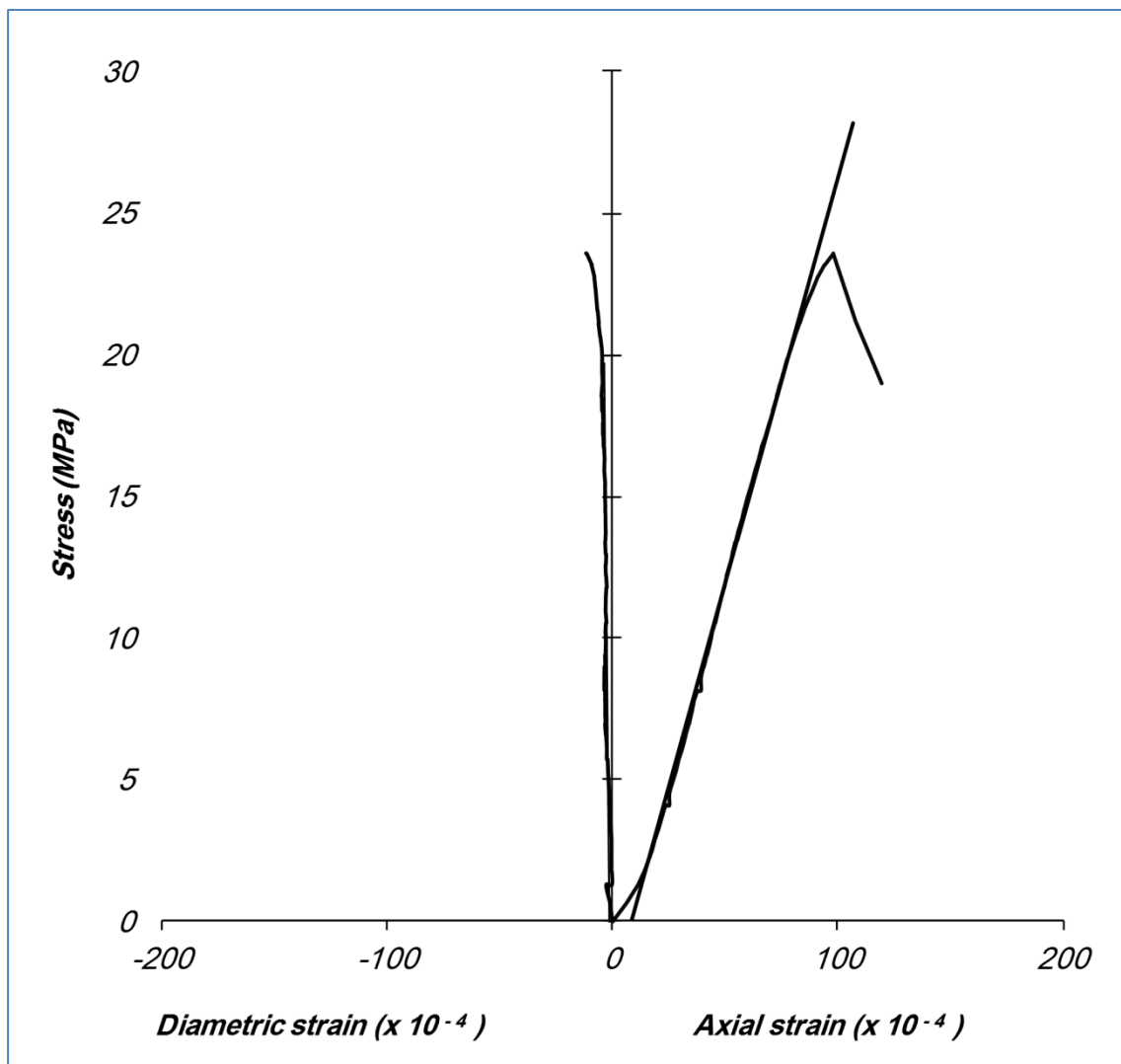
بدست آمده از هر سه نمونه، برای حصول اطمینان نتایج نمونه‌ای که کمترین مقدار را نشان می‌دهد گزارش شده است و در صورت اختلاف زیاد آزمایش مجدداً تکرار گردیده است). شکل ۶-۱۱ نمونه سنگ سیمان تهیه شده با استفاده از فرمولاسیون جدید دوغاب سیمان اصلاح شده، را نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً اشاره گردید هیچگونه ته‌نشستی از ماده وزن افزا در دوغاب سیمان مشاهده نشد، و نمونه عمل‌آوری شده کاملاً همگن و یکپارچه می‌باشد. این مطلب با توجه به شکل ظاهری نمونه به خوبی نمایان می‌باشد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با $2/86$ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برابر با $0/04$ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با 3420 پوند بر اینچ مربع بدست آمد.



شکل ۶-۱۱- نمونه سنگ سیمان تهیه شده از دوغاب سیمان اصلاح شده مارون ۱۷۹

شکل ۶-۱۲ نشان دهنده منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه تهیه شده از دوغاب اصلاح شده می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری 24 ساعته نمونه نسبت به نمونه تهیه شده از دوغاب سیمان سیستم مارون ۱۷۹ بالاتر می‌باشد. با توجه به نمودار به دست آمده از دستگاه

UCA، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته سیمان اصلاح شده در حدود ۳۶۵۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که روند افزایشی دارد. مقاومت به دست آمده به کمک انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری برابر با ۳۴۲۰ پوند بر اینچ مربع معادل ۲۳/۵۸ مگاپاسکال می‌باشد که (این مقدار صحت مقادیر بدست آمده با استفاده از دستگاه UCA را تایید می‌نماید) در مقایسه با مقاومت دوغاب سیستم مارون ۱۷۹ مقاومت بالاتری را از خود به نمایش می‌گذارد. لازم به ذکر است در هر آزمایش تعیین مقاومت فشاری، تعداد سه نمونه از هر سیستم سیمان مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۶-۱۲- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه تهیه شده از دوغاب سیمان اصلاح شده

میزان مدول یانگ نمونه سیمان برابر $2/86$ گیگاپاسکال است که نسبت به نمونه سیمانی سیستم مارون ۱۷۹، که مقداری برابر با $2/3$ می‌باشد، مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. دلیل آن را می‌توان افزایش مقاومت و صلبیت بیشتر نمونه دانست. این مسأله با توجه به منحنی شکست نمونه نمایان می‌باشد. پس از رفتار الاستیک، نمونه شکسته و هیچگونه رفتار شکل‌پذیری از سنگ سیمان مشاهده نمی‌شود. مقدار ضریب پواسون تغییر محسوسی نکرده است. بالا بودن مقاومت فشاری به تنهایی به عنوان یک فاکتور کیفی در خواص مکانیکی نمی‌تواند کافی باشد و نیازمند پارامترهای مکانیکی بهبود یافته (مدول یانگ پایین و نسبت پواسون بالا) می‌باشیم. در ادامه با افزودن افزودنی‌های دیگر سعی در دستیابی به پارامترهای الاستیکی که نشان دهنده خاصیت الاستیسیته بالا باشد، می‌باشد.

۶-۱۲- طراحی دوغاب سیمان انعطاف‌پذیر با افزودنی‌های الاستیک

مختلف

افزودنی‌های سیمان‌های الاستیک موادی هستند که در شرایط دما و فشار چاه بدون برهم زدن خواص اساسی دوغاب سیمان نظیر زمان نیم‌بندش، مقاومت فشاری، آب آزاد، خواص رئولوژیکی و افت‌صافی استاتیکی بتواند خواص مکانیک سنگی سنگ جداره سیمان را بهبود ببخشند. با بهینه شدن خواص مکانیک سنگی سنگ سیمان مقاومت آن در برابر فشارهای جانبی وارده از طرف سازند مجاور افزایش می‌یابد. این گونه افزودنی‌ها نه تنها باعث بهبود مقاومت کششی و الاستیسیته سنگ سیمان بلکه موجب بهبود پیوند سیمان و کنترل ورود سیالات سازند می‌شوند. انواع مختلف افزودنی‌ها برای رفع نیازهای فوق استفاده می‌شوند که پایه اصلی اغلب آنها مواد پلیمری می‌باشند. در این بخش برای الاستیسیته کردن سیستم سیمان اصلاح شده افزودنی‌های گوناگونی مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفتند که برخی از آنها در همان آزمایش‌های اولیه به دلیل عدم سازگاری با سایر افزودنی‌های موجود در ترکیبات دوغاب سیمان حذف شدند و برخی از آنها تأثیر چندانی در انعطاف‌پذیر شدن نمونه سنگ

سیمان را نداشته و برخی باعث افزایش الاستیسیته نمونه سنگ سیمان شده‌اند که به صورت مختصر در ذیل به آن اشاره می‌شود.

۶-۱۲-۱- بررسی عملکرد هایدنس در انعطاف پذیری سنگ سیمان

هایدنس نام تجاری برای وزن افزا سیمان است که توسط شرکت نفتی هالیبرتون نام گذاری شده است، و از خانواده هماتیت می‌باشد. هماتیت جزء کانی‌های اکسیدها می‌باشد و اکسید آهن آن سه ظرفیتی است. ایده بکارگیری هایدنس از مشاهده رفتار نمونه مغزه گرفته شده از دوغاب سیمان چاه مارون ۱۷۹ گرفته شد. همانگونه که اشاره شد، این نمونه دارای مدول یانگ پایین و با توجه به شکل نمونه پس از شکست، نسبت پواسون بالایی داشت. برای بررسی عملکرد هایدنس و تأثیر آن بر روی رفتار سیمان میزان هایدنس از مقدار ۵۵ درصد وزنی سیمان خشک در سیمان اصلاح شده به ۷۰ درصد وزنی افزایش یافت، چون در مقادیر کمتر از ۵۵ درصد وزنی، مقدار وزن مخصوص دوغاب سیمان از ۱۴۹ پوند بر فوت مکعب کاهش یافته و از اهداف رساله دور می‌شدیم. در جدول ۶-۹ ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با مقدار مصرف هر کدام از افزودنی‌های مورد نیاز آمده است.

جدول ۶-۹- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با درصد هایدنس افزایش یافته

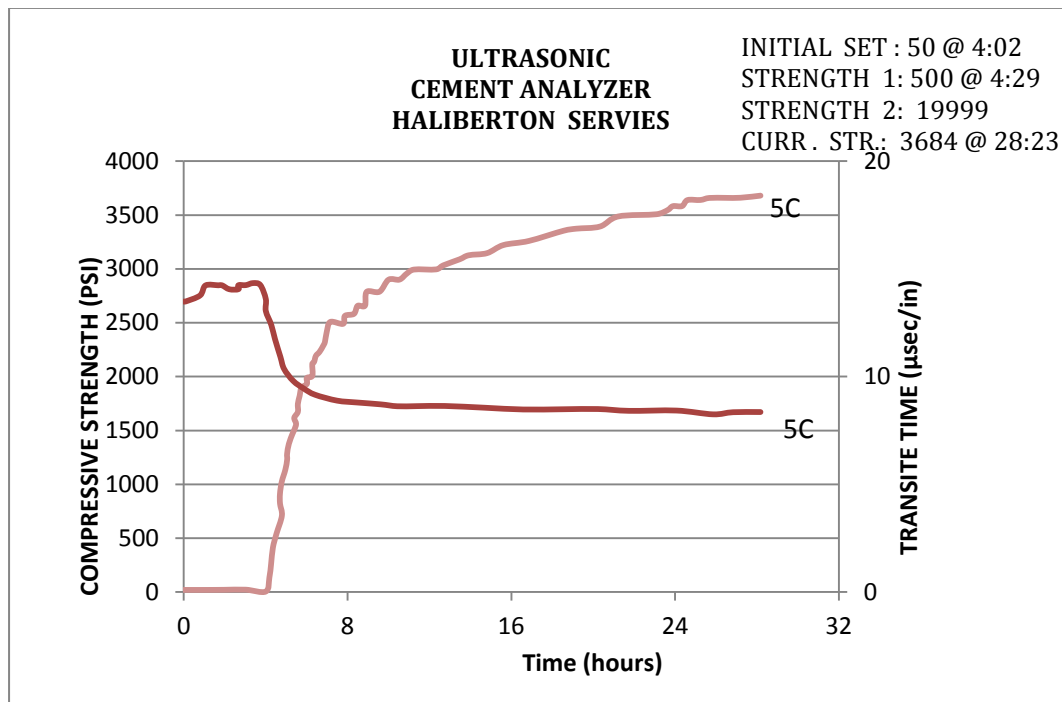
ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۷۷	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی کنترل‌کننده افتصافی	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی پراکنده‌ساز	۰/۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۷	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۸	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب			

در این فرمولاسیون نسبت به فرمولاسیون اصلاح شده که فاقد افزودنی پراکنده‌ساز می‌باشد برای کاهش اصطکاک بین ذرات در دوغاب سیمان، بر اثر افزایش ماده وزن افزا و برای کنترل ویسکوزیته پلاستیک از افزودنی کاهنده اصطکاک در تهیه سیستم استفاده شده است. برای کاهش افت‌صافی استاتیکی دوغاب سیمان، به میزان ۰/۳۳ پوند بر کیسه سیمان از افزودنی کنترل‌کننده افت‌صافی استفاده گردیده است تا ضمن کاهش افت‌صافی دوغاب سیمان مانع از ایجاد آب آزاد و افت فشار منفذی دوغاب سیمان گردد.

با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی، زمان نیم‌بندش و خواص رئولوژیکی به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب معادل ۲۰/۷ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۰/۵ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۲۸۰ سی‌سی و مدت زمان‌بندش دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم‌بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۲۴۵ دقیقه تعیین شد. به کمک دستگاه گرانیروی‌سنج Chan ۳۵ و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد و با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها سیستم فوق نه تنها که فاقد ته‌نشینی ماده وزن افزا هایدنس می‌باشد بلکه مقدار آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی و خواص رئولوژیکی آن در محدوده استاندارد انجمن نفت آمریکا قرار دارد.

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} \text{ عدد خوانده شده در دور } 600 &= > 300 \\
 \theta_{300} \text{ عدد خوانده شده در دور } 300 &= 140 & PV = 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 \theta_{200} \text{ عدد خوانده شده در دور } 200 &= 102 & = 1/5(140 - 60) = 120 \text{ (cp)} \\
 \theta_{100} \text{ عدد خوانده شده در دور } 100 &= 60 & YP = (\theta_{300}) - PV = 140 - 120 \\
 \theta_6 \text{ عدد خوانده شده در دور } 6 &= 15 & = 20 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)} \\
 \theta_3 \text{ عدد خوانده شده در دور } 3 &= 13
 \end{aligned}$$

شکل ۶-۱۳ نشانگر چگونگی توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان تهیه شده می‌باشد که به کمک دستگاه UCA به دست آمده است.



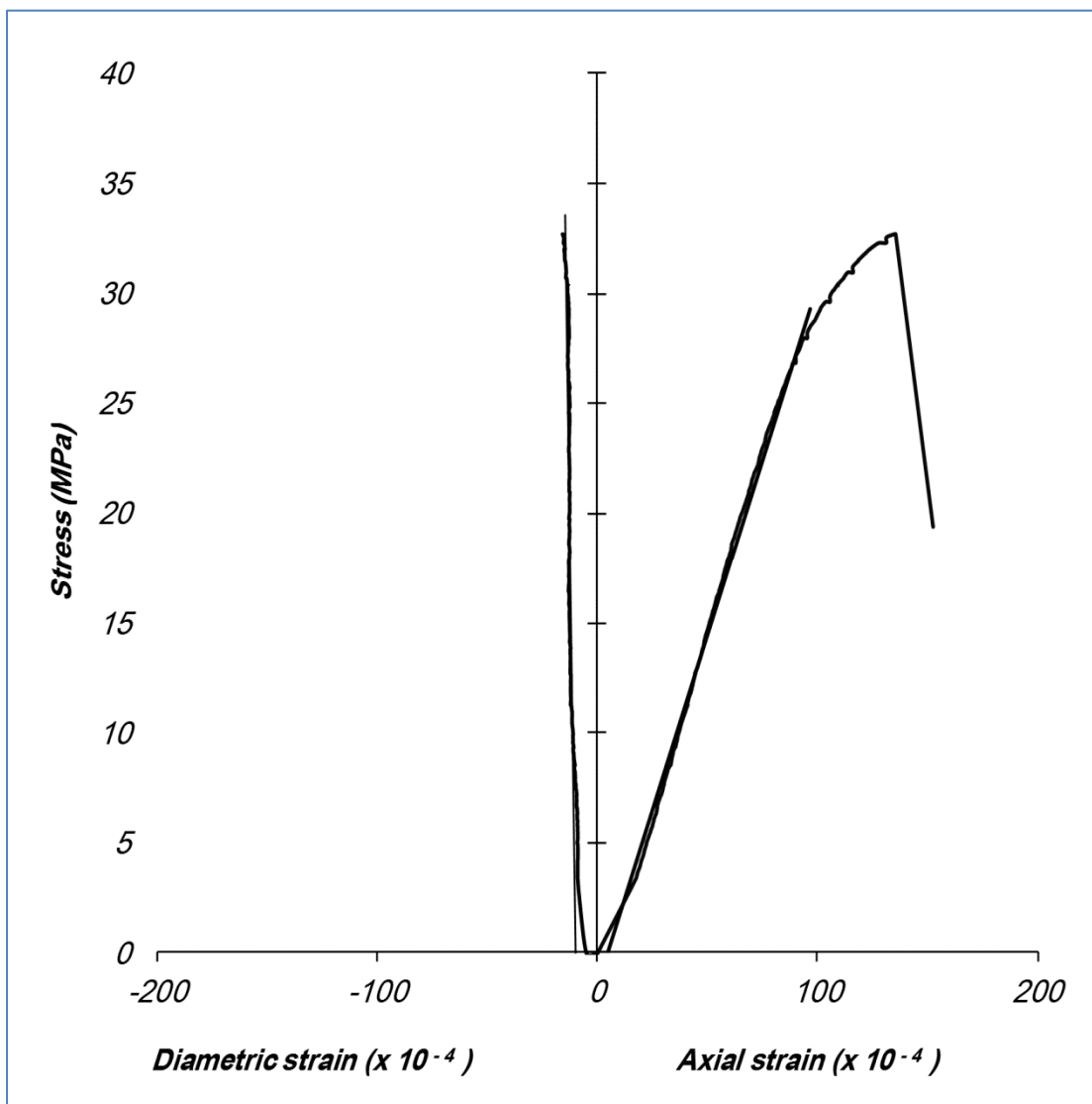
شکل ۶-۱۳- نمودار توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان با درصد هایدنس افزایش یافته

همچنان که از نمودار مشاهده می‌شود، پس از گذشت مدت زمان چهار ساعت، مقاومت سیمان به ۵۰ پوند بر اینچ مربع و بلافاصله پس از آن در مدت زمان کمتر از نیم ساعت، مقاومت ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع حاصل شده است. چنین توسعه‌ای در افزایش مقاومت بسیار مناسب بوده و حاکی از کیفیت بالای دوغاب می‌باشد. مقاومت ۲۴ ساعته سیمان در حدود ۳۵۷۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که مقدار بالایی بوده و روند افزایشی آن دال بر دستیابی به مقاومت‌های بالاتر نیز می‌باشد.

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با درصد هایدنس افزایش یافته، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۶۰ و قطر ۶۶/۶ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید، سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵

مگا پاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با $3/18$ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برابر با $0/04$ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با 4739 پوند بر اینچ مربع بدست آمد. شکل ۶-۱۴ نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده با افزودنی هایدننس را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل منحنی تنش- کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. رفتار سیمان در این ناحیه شکل‌پذیر است بدان معنی که در نمونه، تغییر شکل دائمی اتفاق افتاده است و با باربرداری، نمونه به ابعاد اولیه خود باز نمی‌گردد. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه کشسان یا الاستیک گویند. در این ناحیه تغییر شکل ایجاد شده، در ازای بارگذاری دائمی نبوده و با انجام باربرداری، نمونه شکل خود را که در ابتدای ناحیه الاستیک داشت باز خواهد یافت. حال هر چه شیب این بخش از منحنی کمتر باشد، تغییر شکل برگشت‌پذیر سنگ سیمان در ازای یک مقدار مشخص از تنش، بیشتر می‌باشد. ضریب زاویه این بخش از منحنی را مدول یانگ می‌گویند که در این آزمایش مقدار مدول یانگ برابر $3/18$ گیگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با سیستم قبلی، افزایش یافته است. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه اتفاق می‌افتد. شروع این بخش از منحنی منطبق با آغاز کاهش شیب ثابت بخش کشسان منحنی و پایان آن، نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان‌دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده و بدان استحکام یا مقاومت فشاری تک محوره می‌گویند که در این آزمایش برابر با 4739 پوند بر اینچ مربع شده است و نشان از صلبیت بیشتر سیمان دارد. نقطه آغاز این بخش از منحنی، نقطه پایان بخش الاستیک می‌باشد و بدان نقطه تسلیم الاستیک گفته می‌شود. این نقطه، نقطه‌ای است که هیچگاه نایستی تنش‌های وارده بر پوشش سیمانی پشت لوله‌های جداری به آن برسد. اگر در این بخش از منحنی، باربرداری شود مشاهده می‌شود که یک دگر شکلی پایدار در نمونه

ایجاد می‌شود. در بخش سمت چپ شکل ۶-۱۴ منحنی تنش محوری- کرنش جانبی مشاهده می‌شود. نسبت شیب بخش سمت راست (مدول یانگ) به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان دهنده نسبت پواسون می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر ۰/۰۴ است و تقریباً بدون تغییر و در حد صفر می‌باشد.



شکل ۶-۱۴- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیستم دوغاب سیمان با درصد هایدنس افزایش یافته

لذا به نظر می‌رسد که افزایش مقدار هایدنس راهکار مناسبی برای افزایش پارامترهای انعطاف‌پذیری سنگ سیمان نمی‌باشد. لذا ادامه کار با این افزودنی از دستور کار خارج و بایستی به دنبال افزودنی منعطف و منبسط‌کننده بهتری باشیم.

۶-۱۲-۲- بررسی عملکرد گیلسونایت در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان

افزودنی بعدی مورد استفاده، گیلسونایت می‌باشد. این ماده یک هیدروکربور جامد است و در دسته آسفالتیت‌ها جا دارد. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده که گیلسونایت مقاومت فشاری و مقاومت سنگ سیمان در برابر لرزش‌های ناشی از انفجار در حین مشبک‌کاری را نیز افزایش می‌دهد (سلطانیان و همکاران، ۱۳۹۱).

از آنجا که با کاهش وزن مخصوص دوغاب، مدول یانگ سیمان کاهش و نسبت پواسون افزایش می‌یابد و از طرفی به دلیل تأثیر گیلسونایت در افزایش مقاومت، مطالعه خواص مکانیکی سنگ سیمان در اثر افزودن گیلسونایت مطلب قابل توجهی می‌باشد. بر اساس گزارش‌های مختلف موجود و مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته شده در گذشته، مقدار مصرف گیلسونایت در بیشتر جاها بیش از ۹ درصد وزنی توصیه شده است، لذا برای بررسی اثر این افزودنی در سیمان چاه نفت، در ابتدا با حداقل مصرف این افزودنی، آزمایش‌ها صورت گرفته شد. در گام اول مقدار ۹/۹ پوند بر کیسه معادل ۹ درصد وزنی سیمان خشک از افزودنی گیلسونایت به ترکیبات دوغاب سیمان اصلاح شده اضافه گردید. با توجه به آن که میزان آب مصرفی بدون تغییر ماند لذا افزودنی کاهنده اصطکاک به میزان ۰/۱۵۴ پوند بر کیسه برای کنترل خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان به ترکیبات دوغاب سیمان اضافه گردید. فرمولاسیون دوغاب سیمان ساخته شده به شرح جدول ۶-۱۰ می‌باشد. با انجام آزمایش‌های مختلف دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی استاتیکی، زمان نیم‌بندش و خواص رئولوژیکی به ترتیب وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۲ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر صفر، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۷۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک

دستگاه نیم بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۲۱۰ دقیقه تعیین شد.

جدول ۶-۱۰- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد گلیسونايت

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	گلیسونايت	۹/۹	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی پراکنده‌ساز	۰/۱۵۴	پوند بر کیسه سیمان
۷	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۸	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۲ پوند بر فوت مکعب			

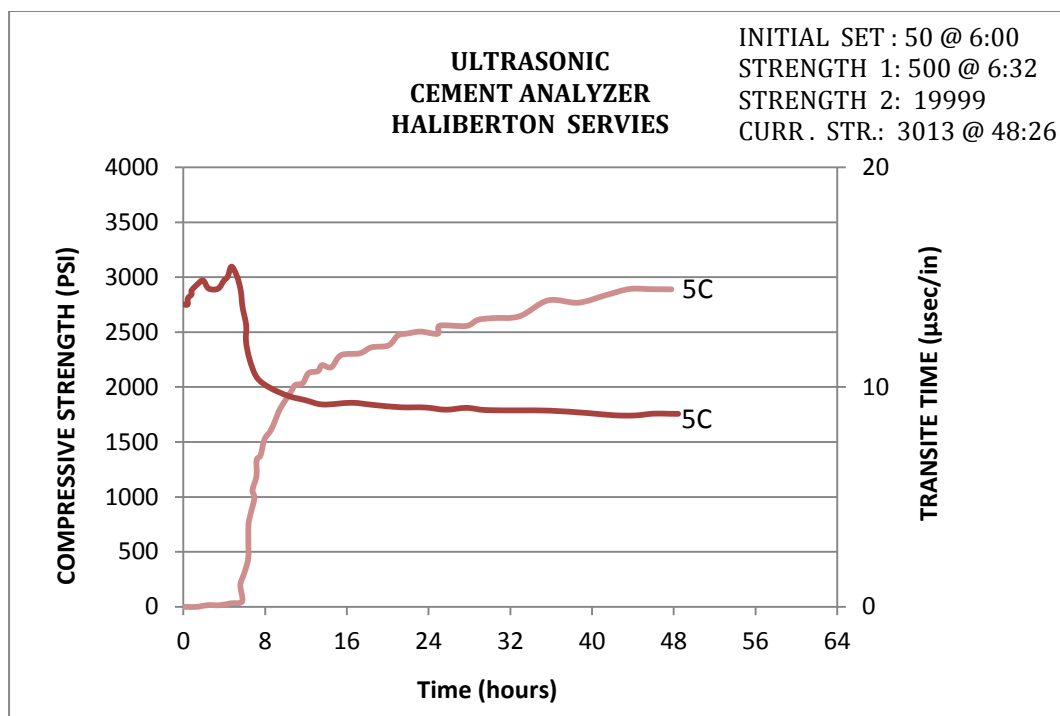
به کمک دستگاه گرانروی سنج Chan ۳۵ و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور } 600 \\
 \theta_{300} &= 270 & \text{عدد خوانده شده در دور } 300 \\
 \theta_{200} &= 192 & \text{عدد خوانده شده در دور } 200 \\
 \theta_{100} &= 105 & \text{عدد خوانده شده در دور } 100 \\
 \theta_6 &= 27 & \text{عدد خوانده شده در دور } 6 \\
 \theta_3 &= 20 & \text{عدد خوانده شده در دور } 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(270 - 105) = 247/5 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 270 - 247/5 \\
 &= 22/5 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

نمودار توسعه مقاومت فشاری سیمان حاوی گلیسونايت در شکل ۶-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود افزایش گلیسونايت موجب توسعه مقاومت فشاری از

اولین ساعات تهیه دوغاب سیمان شده و توسعه مقاومت بسیار مناسبی را ایجاد نموده است با توجه به کاهش وزن مخصوص دوغاب سیمان ناشی از افزایش گیلسونایت از ۱۴۹ به ۱۴۲ پوند بر فوت مکعب، مقاومت فشاری سیمان پس از ۲۴ ساعت به حدود ۲۵۵۰ پوند بر اینچ مربع رسیده و از طرفی با عنایت به روند افزایشی آن پس از ۴۸ ساعت افزون بر ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع شده که مقدار قابل قبولی می باشد.

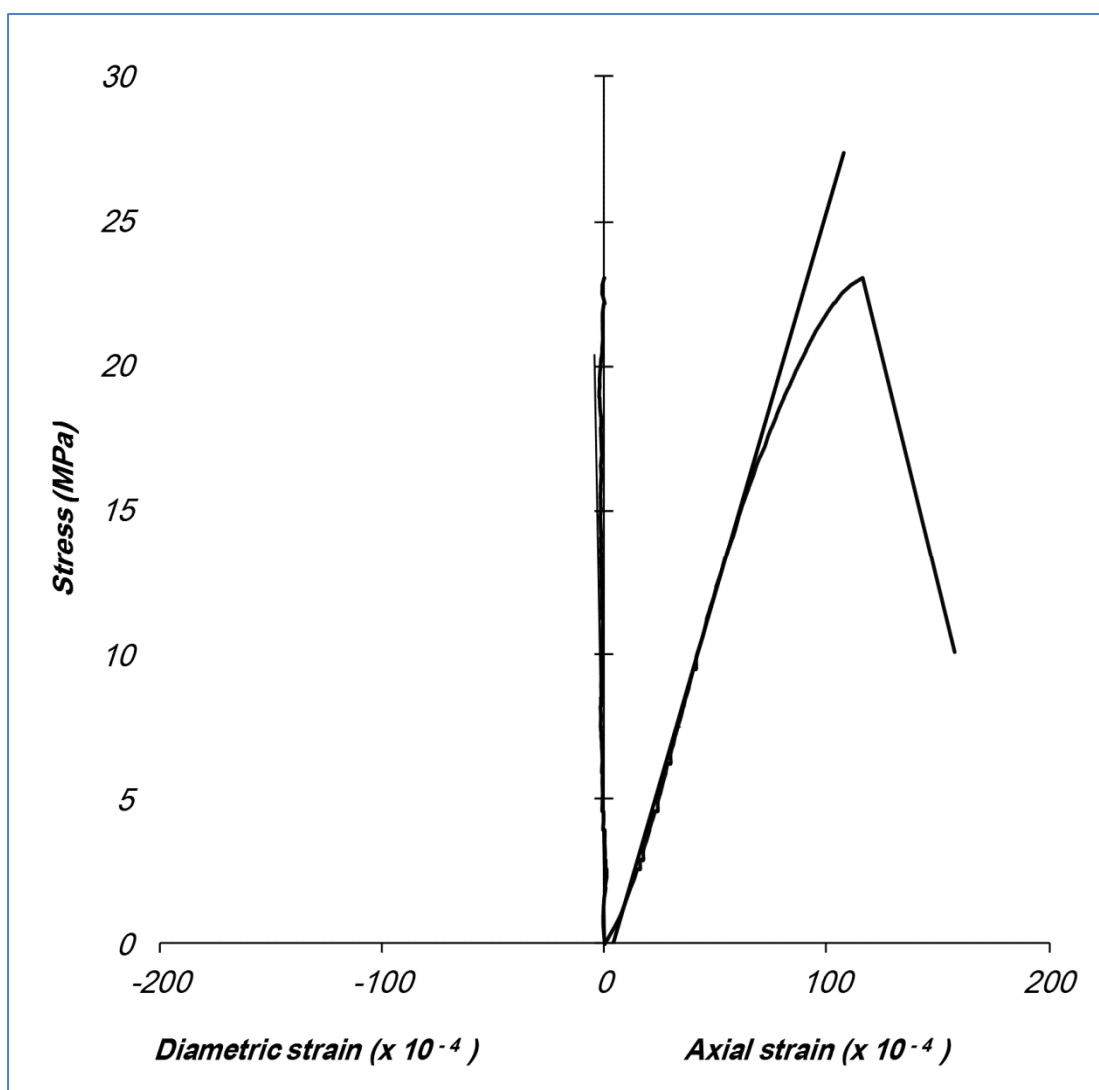


شکل ۶-۱۵- نمودار توسعه مقاومت فشاری سیمان حاوی ۹ درصد گیلسونایت

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۹ درصد وزنی گیلسونایت، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۷۴/۲ و قطر ۶۵/۶ میلی متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل آوری و آماده گردید. سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. بر اساس آزمایش های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با ۲/۶۵ گیگاپاسکال، نسبت

پواسون برابر با $0/06$ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با 3342 پوند بر اینچ مربع بدست آمد. شکل ۶-۱۶ نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده با ۹ درصد وزنی افزودنی گیلیسونایت را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل منحنی تنش- کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. رفتار سیمان در این ناحیه شکل‌پذیر است بدان معنی که در نمونه، تغییر شکل دائمی اتفاق افتاده است و با باربرداری، نمونه به ابعاد اولیه خود باز نمی‌گردد. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه کشسان یا الاستیک گویند. در این ناحیه تغییر شکل ایجاد شده، در ازای بارگذاری دائمی نبوده و با انجام باربرداری، نمونه شکل خود را که در ابتدای ناحیه الاستیک داشت باز خواهد یافت. حال هر چه شیب این بخش از منحنی کمتر باشد، تغییر شکل برگشت‌پذیر سنگ سیمان در ازای یک مقدار مشخص از تنش، بیشتر می‌باشد. ضریب زاویه این بخش از منحنی را مدول یانگ می‌گویند که در این آزمایش مقدار مدول یانگ برابر $2/65$ گیگاپاسکال می‌باشد که در مقایسه با سیستم قبلی، افزایش یافته است. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه اتفاق می‌افتد. شروع این بخش از منحنی منطبق با آغاز کاهش شیب ثابت بخش کشسان منحنی و پایان آن، نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده و بدان استحکام یا مقاومت فشاری تک محوره می‌گویند که در این آزمایش برابر با 3342 پوند بر اینچ مربع شده است. نقطه آغاز این بخش از منحنی، نقطه پایان بخش الاستیک می‌باشد و بدان نقطه تسلیم الاستیک گفته می‌شود. این نقطه، نقطه‌ای است که هیچگاه نبایستی تنش‌های وارده بر پوشش سیمانی پشت لوله‌های جداری به آن برسد. اگر در این بخش از منحنی، باربرداری شود مشاهده می‌شود که یک دگر شکلی پایدار در نمونه ایجاد می‌شود. در بخش سمت چپ شکل ۶-۱۶ منحنی تنش محوری- کرنش جانبی مشاهده می‌شود. نسبت شیب بخش سمت راست (مدول یانگ) به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان دهنده نسبت پواسون

می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر ۰/۰۶ است و تقریباً بدون تغییر و در حد صفر می‌باشد. با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مشخص شد که این افزودنی با وجود کاهش نسبی مدول یانگ، نسبت به نمونه سیمان فاقد گیلسونایت، تأثیر بسیار جزئی بر روی نسبت پواسون گذاشته است. با آنکه نمودار در بازه وسیعی از بارگذاری رفتار الاستیک از خود به نمایش می‌گذارد، ولی چنین سیمانی نیازهای یک سیستم الاستیک با پارامترهای الاستیکی بهبود یافته را برآورده نمی‌نماید. رفتار نمونه قبل از ایجاد شکست در آن تا حد شکل‌پذیر می‌باشد که نشان از کاهش صلیبت سیستم در ازای افزودن گیلسونایت دارند.



شکل ۶-۱۶- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیستم دوغاب سیمان حاوی ۹ درصد گیلسونایت

در گام دوم مقدار افزودنی گلیسونایت به ۱۲ درصد وزنی سیمان خشک افزایش یافت و با انجام آزمایش دانسیته مقدار وزن مخصوص دوغاب سیمان از ۱۴۲ به ۱۳۶ پوند بر فوت مکعب کاهش یافت، اما از آنجایی که یکی از اهداف مهم این رساله دستیابی به سیمان‌های سنگین وزن با خاصیت الاستیک می‌باشد لذا از ادامه آزمایش‌ها با این افزودنی صرف نظر گردید و لذا بایستی به دنبال افزودنی جدیدتری باشیم.

۳-۱۲-۶- بررسی عملکرد نانو ذرات در انعطاف پذیری سنگ سیمان

با توجه به نتایج بدست آمده از افزودنی‌های مختلف در بخش قبل، مشاهده شد که این افزودنی‌ها چندان در تغییر رفتار مکانیکی و سایر خصوصیات دوغاب سیمان مؤثر نیستند، لذا تصمیم گرفته شد از نانو افزودنی‌ها در این رساله استفاده شود. نانو مواد خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای دارند که می‌تواند منجر به توسعه مواد جدیدی از مواد موجود شود. اندازه بسیار ریز نانو ذرات منجر به ایجاد خواص مطلوبی می‌شود. برای مثال مواد پایه کربنی مانند نانو لوله‌های کربنی به دلیل سطح ویژه و هدایت الکتریکی بسیار زیاد در صنعت الکترونیک جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. استفاده از نانو ذرات می‌تواند عملکرد و خواص بسیاری از انواع مواد را بهتر کند. پلاستیک‌های مقاوم، مواد نسوز، فیلم‌ها و البسه محافظ و پوشش‌های با کیفیت از جمله بسیاری از کاربردهای نانو کامپوزیت‌ها می‌باشند. کاربرد نانو مواد در تولید سیمان و بتن می‌تواند منجر به بهبود زیر ساخت صنعت عمران شود زیرا مقاومت مکانیکی و عمر بتن به ساختار میکرووی آن و انتقال جرم در ابعاد نانو بستگی دارد. نانو ذرات بدلیل اندازه‌شان رفتار سیمان را متأثر می‌سازند، کاهش اندازه ذرات می‌تواند منجر به بندش سریعتر و مقاومت بیشتر سیمان شود که این امر به دلیل نیروهای جاذبه الکترواستاتیک قویتر و سطح ویژه بیشتر می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مقاومت‌های فشاری و کششی بتن بهبود یافته با نانوذرات SiO_2 و Fe_2O_3 بیش از بتن معمولی است (Khoshakhlagh et al, 2012).

با توجه به سابقه مصرف نانو ذرات اکسید آهن و سیلیس (مقادیر مصرف بین ۳ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان) در کارهای عمرانی و تاثیر مثبت آن بر خواص مکانیکی بتن، تصمیم گرفته شد که از نانو مواد در ترکیبات سیمان‌های حفاری با حداقل مصرف ۳ درصد وزنی سیمان خشک و در شرایط دما و فشار واقعی چاه آزمایش شود. لازم به ذکر است بر اساس بررسی‌های صورت گرفته بیشتر افزودنی‌های منعطف و منبسط‌کننده از لحاظ عملکرد با سایر افزودنی‌های مورد مصرف در سیمان چاه نفت متفاوت بوده و لذا می‌توان گفت چنانچه این افزودنی‌ها در مقادیر مصرف بیشتر در ترکیبات دوغاب سیمان موثر نباشند هیچگاه در مقادیر کمتر مفید و موثر نخواهند بود اما در عوض سایر افزودنی‌های مورد مصرف در سیمان چاه نفت نظیر کنترل‌کننده زمان نیم‌بندش و یا کنترل‌کننده افت‌صافی و غیره یک مقدار مصرف بهینه داشته و در مقادیر کمتر و یا بیشتر از آن حد مجاز، نتایج متفاوتی را خواهند داشت، لذا در این رساله ملاک مقدار مصرف افزودنی‌ها بر اساس کارهای گذشته و همچنین عملکرد این افزودنی‌ها در رفتار مکانیکی سنگ سیمان خواهد بود. برای این منظور در گام اول برای تعیین تأثیر افزودنی نانو سیلیس بر روی پارامترهای الاستیکی سنگ سیمان، مقدار ۳ درصد وزنی سیمان مصرفی، نانو سیلیس به سیستم اصلاح شده اضافه شد و با انجام آزمایش مخلوط‌نمایی مشاهده گردید که، به دلیل بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات سیلیس، دوغاب سیمان غیر قابل مخلوط می‌باشد و برای کاهش مدت زمان مخلوط، میزان آب مصرفی از ۰/۶۶۹۶ به ۰/۷۰۷۲ فوت مکعب و همچنین میزان افزودنی کندگر که علاوه بر افزایش زمان نیم بندش، خاصیت پراکنده‌سازی هم دارد، از ۰/۳۳ به ۰/۴۴ پوند بر کیسه افزایش داده شد. جدول ۶-۱۱ ترکیبات دوغاب سیمان با نانو سیلیس را نشان می‌دهد.

پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۶۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۳ سی‌سی و مدت زمان مخلوط‌نمایی ۹۰ ثانیه تعیین شد. با وجود بالا بودن مدت زمان مخلوط‌نمایی دوغاب سیمان، تصمیم گرفته شد رفتار مکانیکی سنگ سیمان مورد بررسی قرار گیرد و در صورت مثبت بودن نتایج بعداً بتوان با تغییر در فرمولاسیون رفع مشکل کرد.

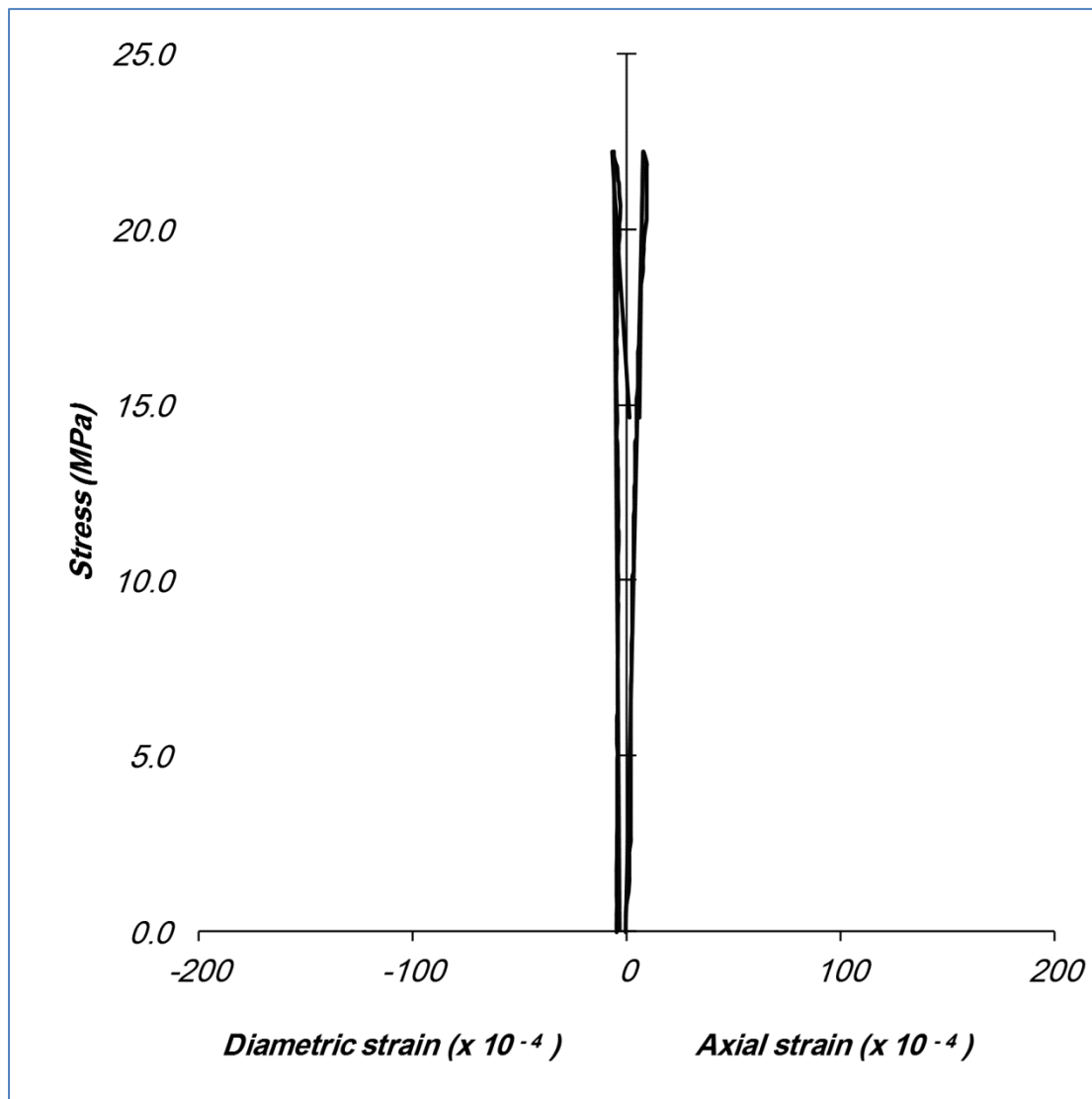
جدول ۶-۱۱- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد نانو سیلیس

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۴	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۴۴	پوند بر کیسه سیمان
۵	نانو سیلیس	۳/۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۷	آب	۰/۷۰۷۲	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب			

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۳ درصد نانو سیلیس، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۵۳ و قطر ۶۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید، سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با ۴/۹ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برابر با ۰/۰۵ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با ۳۲۲۲ پوند بر اینچ مربع بدست آمد. شکل ۶-۱۷ نمودار تنش-کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده با ۳ درصد وزنی افزودنی نانو سیلیس را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل منحنی تنش-کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. رفتار سیمان در این ناحیه شکل‌پذیر است بدان معنی که در نمونه، تغییر شکل دائمی اتفاق افتاده است و با باربرداری، نمونه به ابعاد اولیه خود باز نمی‌گردد. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه کشسان یا الاستیک گویند. در این ناحیه تغییر شکل ایجاد شده، در ازای بارگذاری دائمی نبوده و با انجام باربرداری، نمونه شکل خود را که در ابتدای

ناحیه الاستیک داشت باز خواهد یافت. حال هر چه شیب این بخش از منحنی کمتر باشد، تغییر شکل برگشت‌پذیر سنگ سیمان در ازای یک مقدار مشخص از تنش، بیشتر می‌باشد. ضریب زاویه این بخش از منحنی را مدول یانگ می‌گویند که در این آزمایش مقدار مدول یانگ برابر $4/9$ گیگاپاسکال می‌باشد. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه اتفاق می‌افتد. شروع این بخش از منحنی منطبق با آغاز کاهش شیب ثابت بخش کشسان منحنی و پایان آن، نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده و بدان استحکام یا مقاومت فشاری تک محوره می‌گویند که در این آزمایش برابر با 3222 پوند بر اینچ مربع شده است. نقطه آغاز این بخش از منحنی، نقطه پایان بخش الاستیک می‌باشد و بدان نقطه تسلیم الاستیک گفته می‌شود. این نقطه، نقطه‌ای است که هیچگاه نبایستی تنش‌های وارده بر پوشش سیمانی پشت لوله‌های جداری به آن برسد. اگر در این بخش از منحنی، باربرداری شود مشاهده می‌شود که یک دگر شکلی پایدار در نمونه ایجاد می‌شود. در بخش سمت چپ شکل $6-17$ منحنی تنش محوری- کرنش جانبی مشاهده می‌شود. نسبت شیب بخش سمت راست (مدول یانگ) به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان دهنده نسبت پواسون می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر $0/05$ است و تقریباً بدون تغییر و در حد صفر می‌باشد. با مقایسه این سیستم با سیستم اصلاح شده می‌توان دریافت که به واسطه افزایش مدول یانگ از $2/86$ به $4/9$ گیگاپاسکال و نسبت پواسون از $0/04$ به $0/05$ سیستم در جهت افزایش جزئی الاستیسیته پیش رفته است و تغییرات در حد چشمگیری نبوده و تقریباً می‌توان گفت بدون تأثیر بوده است، لذا از ادامه آزمایش‌ها با مقادیر بالاتر از نانو سیلیس، به دلیل بالا بودن مدت زمان مخلوط‌نمایی و همچنین عدم تأثیر در خواص الاستیسیته سنگ سیمان، صرف نظر شد، چرا که در مقادیر مصرف بالاتر از 3 درصد، به دلیل بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات سیلیس، حتی با افزایش آب و یا افزودن پراکنده‌ساز در ترکیبات دوغاب سیمان نمی‌توان مدت زمان مخلوط‌نمایی دوغاب سیمان را

تا سطح استاندارد کاهش داد. لازم بذکر است بر اساس استاندارد API، حداکثر زمان مخلوط‌نمایی، برای سیمان سنگین وزن ۴۵ تا ۵۵ ثانیه می‌باشد.



شکل ۶-۱۷- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی نانو سیلیس

در گام بعدی برای تعیین تأثیر افزودنی نانو ذرات اکسید آهن بر روی پارامترهای الاستیکی سنگ سیمان، همانند نانو ذرات سیلیس مقدار ۳ درصد وزنی سیمان مصرفی، از نانو ذرات اکسید آهن به سیستم اصلاح شده اضافه شد. با انجام آزمایش مخلوط‌نمایی مشاهده گردید، به دلیل بالا بودن سطح

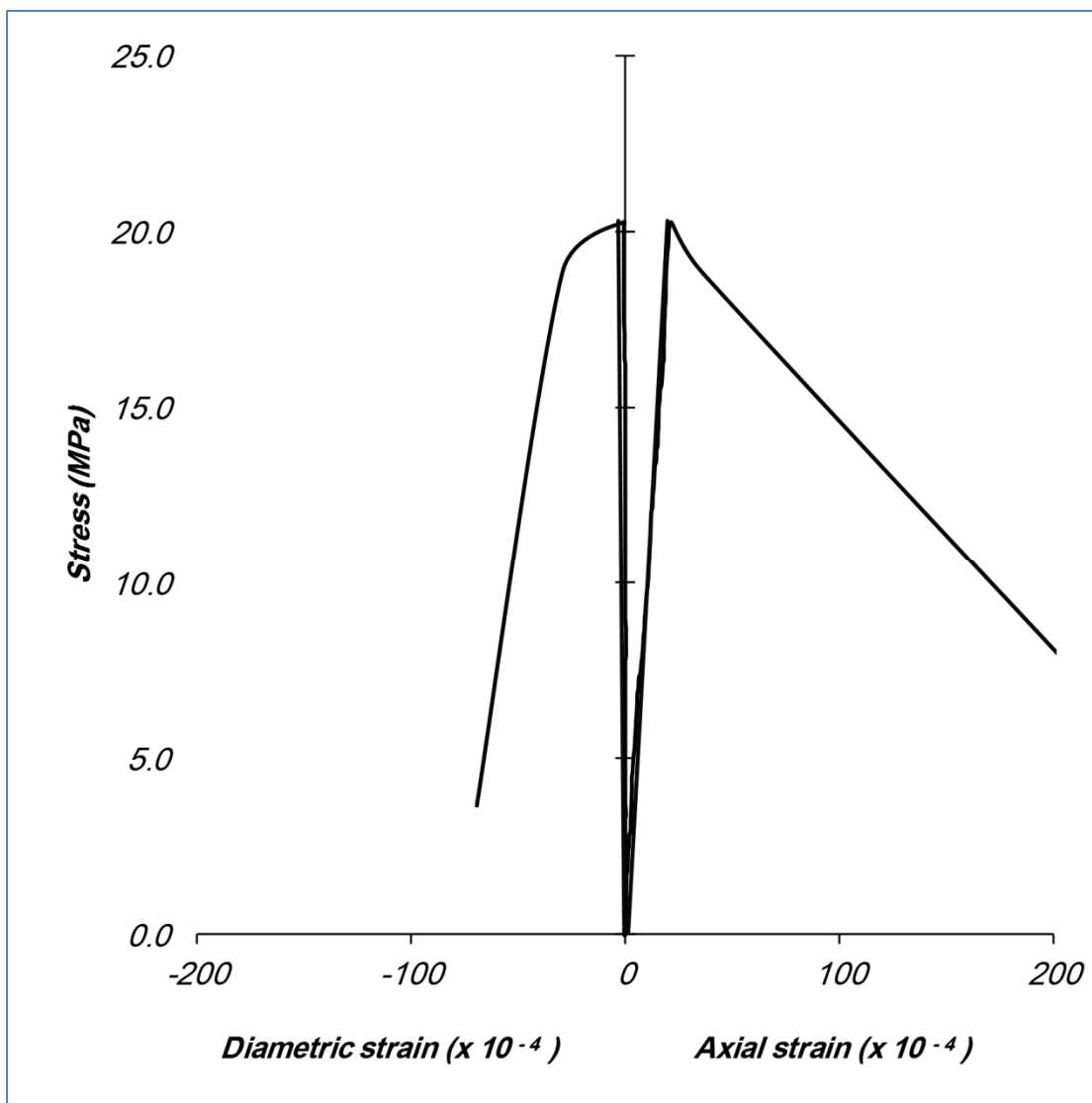
ویژه نانو ذرات اکسید آهن، دوغاب سیمان غیر قابل مخلوط می‌باشد و برای کاهش مدت زمان مخلوط‌نمایی، میزان آب مصرفی از ۰/۶۶۹۶ به ۰/۷۰۷۲ فوت مکعب و همچنین میزان افزودنی کندگر که خاصیت پراکنده‌سازی هم دارد، از ۰/۳۳ به ۰/۴۴ پوند بر کیسه افزایش داده شد. فرمولاسیون و خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان حاصله در جدول ۶-۱۲ درج شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۶۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۵ سی‌سی و مدت زمان مخلوط‌نمایی ۸۰ ثانیه تعیین شد.

جدول ۶-۱۲- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد نانو ذرات اکسید آهن

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۴	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۴۴	پوند بر کیسه سیمان
۵	نانو ذرات اکسید آهن	۳/۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۷	آب	۰/۷۰۷۲	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب			

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۳ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آهن، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۵۲ و قطر ۶۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید، سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. بر اساس آزمایش‌های انجام شده مقدار مدول یانگ برابر با ۲/۴ گیگاپاسکال، نسبت پواسون برابر با ۰/۰۶ و مقاومت فشاری تک محوره برابر با ۲۹۴۵ پوند بر اینچ مربع بدست آمد. شکل ۶-۱۸ نمودار تنش-کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده با ۳ درصد وزنی

افزودنی نانو اکسید آهن را نشان می‌دهد. با مقایسه این سیستم با سیستم اصلاح شده می‌توان دریافت که به واسطه کاهش مدول یانگ از ۲/۸۶ به ۲/۴ گیگاپاسکال و افزایش نسبت پواسون از ۰/۰۴ به ۰/۰۶ سیستم در جهت افزایش الاستیسیته اندکی پیش رفته است اما تغییرات در حد چشمگیری نمی‌باشد. به نظر می‌رسد که مقدار افزودنی نانو ذرات اکسید آهن نتوانسته ماتریکس صلب سیمان را تحت تأثیر قرار داده و الاستیسیته لازم را ایجاد کند.



شکل ۶-۱۸- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن

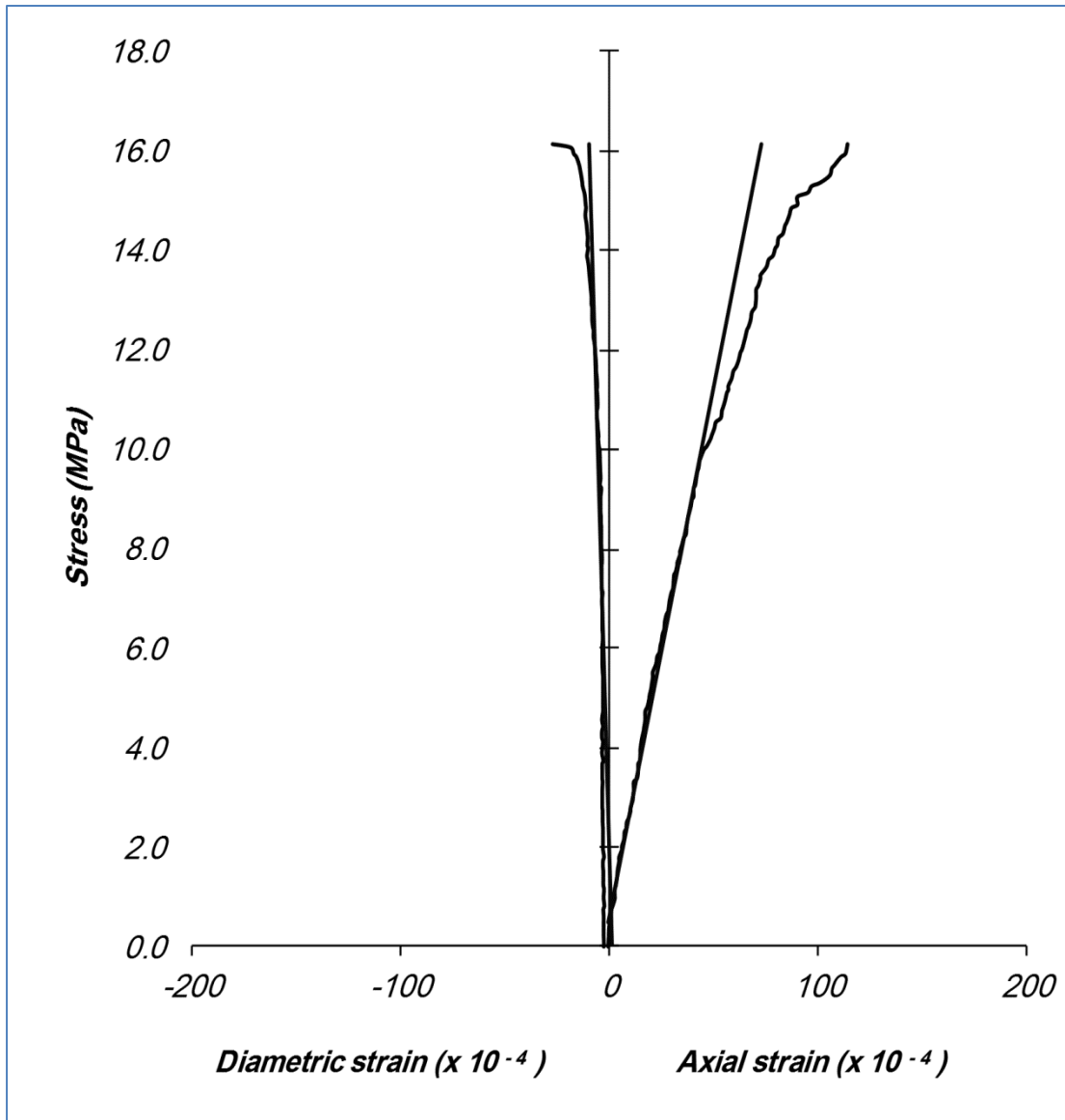
در گام بعدی با افزایش میزان افزودنی نانو ذرات اکسید آهن به ۶ درصد وزنی سیمان مصرفی، برای حفظ وزن مخصوص دوغاب سیمان، خواص رئولوژیکی، مدت زمان اختلاط و سایر خصوصیات دوغاب سیمان میزان آب مصرفی از ۰/۶۶۹۶ به ۰/۷۱۳۴ فوت مکعب و همچنین میزان افزودنی کندگر که خاصیت پراکنده‌سازی هم دارد از ۰/۳۳ به ۰/۵۵ پوند بر کیسه افزایش داده شد. فرمولاسیون سیستم دوغاب سیمان در جدول ۶-۱۳ درج شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۶ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۵۱ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۶ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر ۲۹۰ سی‌سی، مدت زمان نیم بندش دوغاب سیمان تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۳۴۰ دقیقه و زمان اختلاط دوغاب سیمان با محلول ۴۰ ثانیه تعیین شد.

جدول ۶-۱۳- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد نانو ذرات اکسید آهن

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۴	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۵	نانو ذرات اکسید آهن	۶/۶	پوند بر کیسه سیمان
۶	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۷	آب	۰/۷۱۳۴	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۶ پوند بر فوت مکعب			

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۶ درصد نانو ذرات اکسید آهن، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۵۳ و قطر ۶۳ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت مطابق با دستورالعمل ارائه شده در فصل پنجم عمل‌آوری و آماده گردید. شکل ۶-۱۹ نمودار تنش- کرنش محوری به دست آمده از انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. میزان مقاومت فشاری تک محوری برابر ۲۳۴۱ پوند

بر اینچ مربع می‌باشد. مقدار مدول یانگ و نسبت پواسون حاصله به ترتیب برابر ۲/۱۵ گیگاپاسکال و ۰/۱۴ می‌باشد که نشان از بهبود پارامترهای الاستیک سیمان به واسطه افزایش افزودنی نانو ذرات اکسید آهن می‌باشد.



شکل ۶-۱۹- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۶ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن

در راستای دستیابی به مقادیر بهتری از پارامترهای الاستیک سیمان، میزان افزودنی نانو ذرات اکسید آهن به ۹ درصد وزنی سیمان مصرفی افزایش یافت. با انجام آزمایش مخلوط‌نمایی مشاهده گردید، به

دلیل بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات اکسید آهن، دوغاب سیمان غیر قابل مخلوط می‌باشد. برای کنترل خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان و جلوگیری از افزایش غلظت ناشی از افزودن افزودنی نانو ذرات اکسید آهن، میزان آب مصرفی از ۰/۷۱۳۴ به ۰/۷۲۳۳ فوت مکعب و همچنین افزودنی کاهنده اصطحکاک به میزان ۰/۵۵ به ترکیبات دوغاب سیمان اضافه شد. فرمولاسیون دوغاب سیمان در جدول ۶-۱۴ درج شده است. همانطور که از ترکیبات دوغاب سیمان جدول ذیل پیداست با افزایش مقدار آب، وزن مخصوص دوغاب سیمان کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۶-۱۴- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد نانو ذرات اکسید آهن

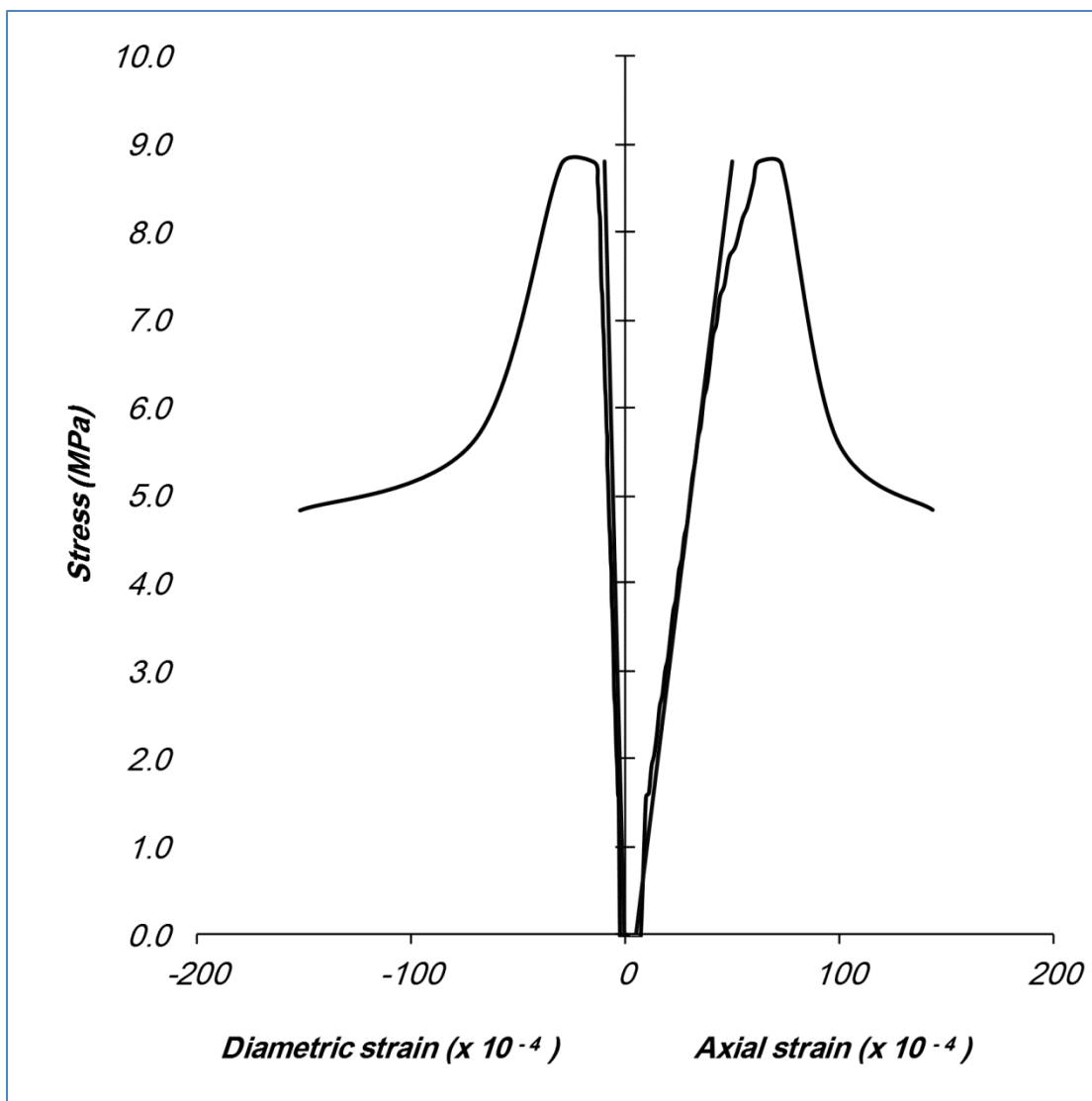
ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۷	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۴	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی کاهنده اصطحکاک	۰/۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۶	نانو ذرات اکسید آهن	۹/۹	پوند بر کیسه سیمان
۷	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۸	آب	۰/۷۲۳۳	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۴ پوند بر فوت مکعب			

پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۴ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۲۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۴ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۱۰ سی‌سی، زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم‌بندش دوغاب سیمان تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۳۷۵ دقیقه و زمان اختلاط دوغاب سیمان با محلول ۴۵ ثانیه تعیین شد. به کمک دستگاه گرانروی‌سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶۰۰} \\
 \theta_{300} &= 194 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳۰۰} \\
 \theta_{200} &= 129 & \text{عدد خوانده شده در دور ۲۰۰} \\
 \theta_{100} &= 67 & \text{عدد خوانده شده در دور ۱۰۰} \\
 \theta_6 &= 10 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶} \\
 \theta_3 &= 7 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(194 - 67) = 190/5 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 194 - 190/5 \\
 &= 3/5 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

بر اساس نتایج بدست آمده از ویسکومتر، دوغاب سیمان از خواص رئولوژی مناسبی برخوردار می‌باشد.



شکل ۶-۲۰- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۹ درصد وزنی افزودنی نانو ذرات اکسید آهن

به منظور بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۹ درصد نانو وزنی نانو اکسید آهن، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۵۰/۲۲ و قطر ۶۱/۱۲ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت مطابق با دستورالعمل ارائه شده در فصل پنجم عمل‌آوری و آماده گردید.

شکل ۶-۲۰ نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. مطابق نمودار حداکثر مقاومت نهایی نمونه برابر ۱۲۷۶ پوند بر اینچ مربع و مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۲ گیگاپاسکال و ۰/۲۲ می‌باشد. که بهبود مناسبی نسبت به سیستم قبلی یافته است. مقدار مدول یانگ این سیستم نسبت به سیستم حاوی ۶ درصد افزودنی الاستیک‌کننده، بیش از ۰/۱۵ مگاپاسکال کاهش را نشان می‌دهد که حاکی از افزایش تأثیر افزودنی الاستیک‌کننده در ماتریکس سیمان می‌باشد. نسبت پواسون نیز افزایشی در حدود ۰/۰۸ دارد. هر چه میزان نسبت پواسون افزایش یابد، قابلیت تراکم پذیری سیمان کاهش می‌یابد. این سیستم خواص الاستیکی مطلوبی را به نمایش می‌گذارد که نشان از تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر توسط فاز الاستیک به ازای تنش‌های وارده دارد. از طرفی با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها هر چند که میزان ضریب پواسون بدست آمده مطلوب می‌باشد اما مقاومت فشاری دوغاب سیمان پس از طی ۴۸ ساعت در حدود ۱۲۷۶ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که این مقدار در مقایسه با وزن مخصوص دوغاب سیمان کم است، زیرا بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای دوغاب سیمان سنگین وزن ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. لذا از ادامه آزمایش‌ها با مقادیر بالاتر افزودنی الاستیک‌کننده (۱۲ درصد) بدلیل کاهش مقاومت فشاری و وزن مخصوص دوغاب سیمان مورد نیاز صرف نظر شد و بایستی به دنبال افزودنی جدیدتری که معایب فوق را ندارند باشیم.

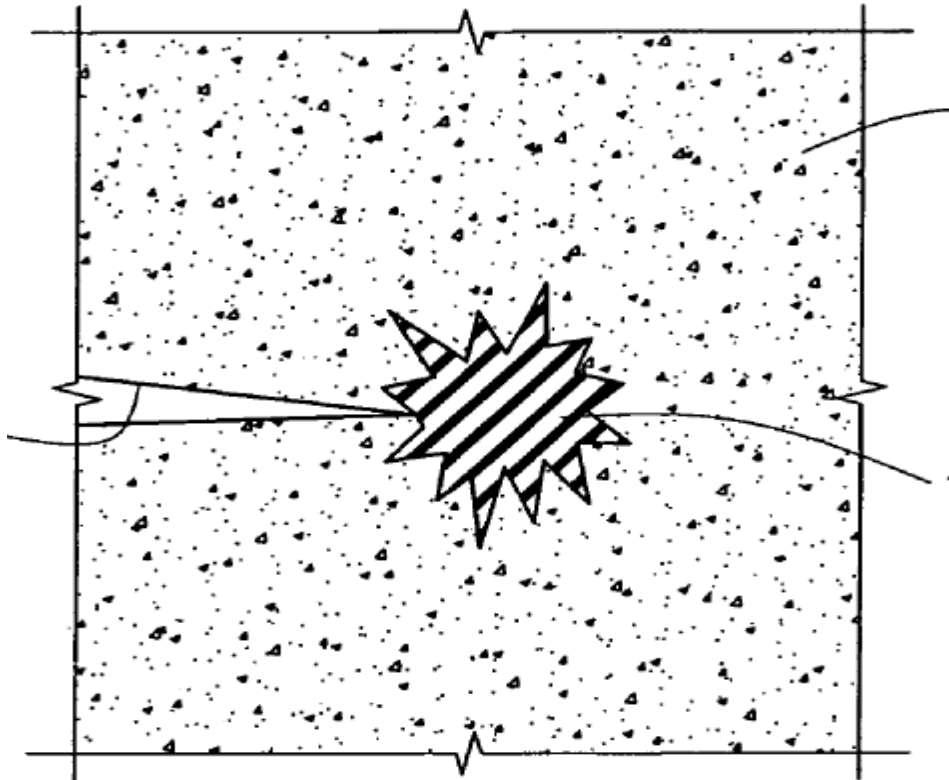
۶-۱۲-۴- بررسی عملکرد افزودنی الاستومر در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان

به دلیل محدودیت در مقدار مصرف افزودنی نانو ذرات اکسید آهن در ترکیبات دوغاب سیمان و برای رسیدن به انعطاف‌پذیری بیشتر سنگ سیمان، تصمیم گرفته شد از افزودنی الاستومر استفاده شود. طبق تعریف، الاستومر به ذرات جامدی گفته می‌شود که شکل فیزیکی مشخصی ندارند و شکل هندسی آنها بی‌نظم است. این ذرات به صورت صفحه‌ای، تراشه، الیاف، ریبون، نواری، کروی، دانه‌های توخالی، چنبره‌ای، حبه‌ای یا قرص مانند و یا هر شکل فیزیکی دیگر می‌باشند. الاستومرها، ایجاد ترک بر اثر انقباض سیمان را در مراحل اولیه فرآیند بندش دوغاب سیمان کنترل می‌نمایند و سبب ایجاد ویژگی انعطاف‌پذیری در سیمان سنگ شده می‌شوند و از ایجاد ترک و شکاف در آن جلوگیری می‌کنند. اگر ترک یا شکافی در سیمان سنگ شده ایجاد شود، الاستومرها ساختار سیمان را یکپارچه نگه می‌دارند و از تغییر موضع^۱ لایه سیمان جلوگیری می‌کنند. الاستومرها تنش‌های ماتریس سیمان را به طور مؤثرتری تلف می‌کنند و به این ترتیب لایه سیمان را در برابر نقص و ایجاد ترک و شکاف حفاظت می‌کنند. الاستومرهایی که معمولاً به کار می‌روند حاوی منومرهای استایرن، بوتادین، اتیلن یا پروپیلن هستند که هیدروکربن‌هایی شدیداً غیر قطبی ایجاد می‌کنند. لذا الاستومرها معمولاً غیر قطبی و آب‌گریزند. الاستومرهای معمول عموماً به ماتریس سیمان نچسبیده و پیوند خوبی ایجاد نمی‌کنند بلکه تولید یک ماتریس قطبی آب‌دوست و یک فاز پراکنده آب‌گریز می‌نمایند. افزودن الاستومرهای آب‌گریز با دانسیته نزدیک آب به دوغاب سیمان سبب می‌شود ذرات الاستومر در دوغاب سیمان شناور مانده یا از سیمان جدا شوند. لذا اضافه کردن الاستومرهای آب دوست به مخلوط خشک سیمان پیش از افزودن آب می‌تواند سبب شناوری ذرات الاستومر و توزیع یکنواخت در دوغاب سیمان شود (Gino and Dilullo, 2004).

الاستومرها که طبیعت ذره‌ای خود را در شرایط چاه حفظ می‌کنند، حتی زمانی که نرم یا ذوب می‌شوند به صورت ذرات لاستیک نرم یا قطرات مایع در ماتریس باقی می‌مانند و بدون تشکیل فیلم

¹ Fall back

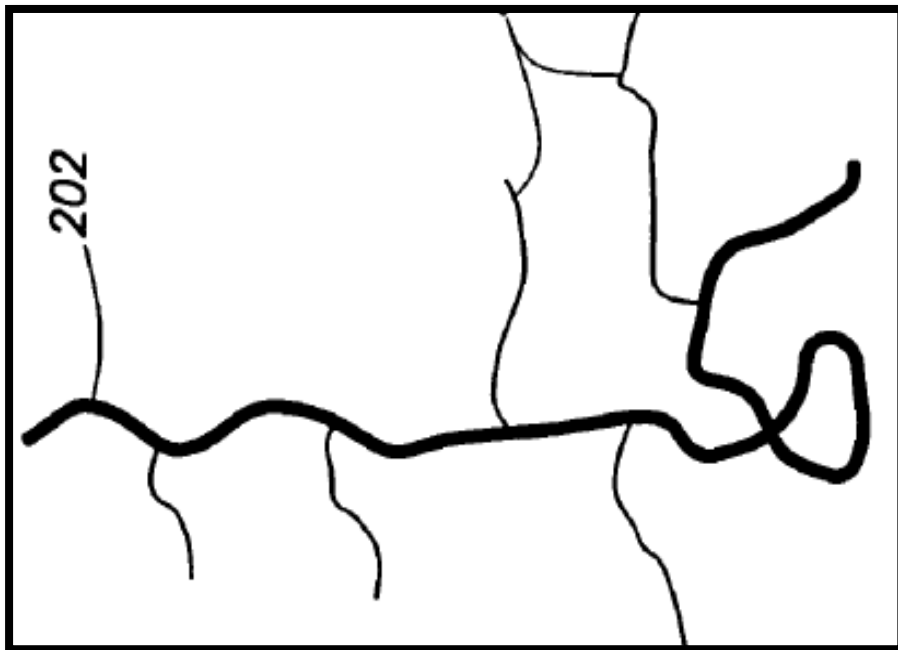
روی ذرات سیمان هیدراته، به عنوان محل‌های آزادکننده تنش عمل می‌نمایند. شکل ۶-۲۱ توقف رشد ترک و اتلاف تنش توسط الاستومرها را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۱- توقف رشد ترک و اتلاف تنش توسط ذره الاستومر (Gino and Dilullo, 2004)

این ذرات در فرمولاسیون دوغاب سیمان کفی یا غیرکفی به همراه آب تازه، آب نمک، آب نمک اشباع تولیدی از سازندهای زیرزمینی، آب دریا و یا ترکیب آنها قابل کاربرد هستند. این الاستومرها ترموپلاستیک می‌باشند و می‌توانند با گرم شدن ذوب و با سرد شدن مجدداً جامد شوند. با تغییرات دما فرایندهای ذوب و انجماد تکرار می‌شوند. ذرات الاستومرها با دریافت تنش و اتلاف آن از رشد ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. الاستومرهای ذره‌ای حاوی گروه‌های کربوکسی به دلیل ویژگی قطبی‌شان، به خوبی به ماتریس سیمان می‌چسبند و به علت برقراری پیوند یونی بین یون‌های فلزی سطح اکسید شده لوله چون Fe^{+3} و گروه‌های کربوکسی چسبندگی خوبی به سطوح فلزی لوله‌های جداری دارند. الاستومرها خواص مکانیکی را بهبود داده، مقاومت کششی را بالا برده و مدول یانگ را کاهش

می‌دهند. این ذرات همچنین به دلیل تشکیل سوسپانسیون‌های پایدار در آب یکنواختی دوغاب سیمان را بهبود می‌بخشند. میزان گروه‌های قطبی الاستومرها در محدوده ۰/۵ تا ۱۰ درصد وزنی است. شکل ۶-۲۲ ساختار یک الاستومر را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۲- ساختار شماتیک یک الاستومر (Gino and Dilullo, 2004)

مقدار مصرف الاستومرها ۳ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان خشک و اندازه متوسط آن ۲۵۰-۲۰ میکرومتر است. در برخی کاربردها اندازه‌های دیگر می‌توانند به کار روند. برای تعیین تأثیر این افزودنی بر روی پارامترهای الاستیکی سنگ سیمان در ابتدا مقدار ۳ درصد وزنی سیمان مصرفی، ماده الاستومر به سیستم اصلاح شده اضافه شد. با انجام آزمایش مخلوط‌نمایی مشاهده گردید، دوغاب سیمان غیر قابل مخلوط می‌باشد. برای کاهش مدت زمان مخلوط‌نمایی و افت‌صافی استاتیکی دوغاب سیمان، افزودنی‌های پراکنده‌ساز به میزان ۰/۵۵ و کنترل‌کننده افت‌صافی استاتیکی ۰/۳۳ پوند بر کیسه به دوغاب سیمان اصلاح شده اضافه شد. فرمولاسیون و خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان حاصله در جدول ۶-۱۵ درج شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۶۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر یک سی‌سی، افت‌صافی

استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۲۷۰ سی سی و مدت زمان نیم بندش دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۶۰ دقیقه تعیین شد.

جدول ۶-۱۵- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد الاستومر

ردیف	نوع افزودنی / کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی کنترل کننده افت صافی	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی پراکنده ساز	۰/۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۷	افزودنی الاستومر	۳/۳	پوند بر کیسه سیمان
۸	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۹	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۷ پوند بر فوت مکعب			

به کمک دستگاه گرانروی سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور } 600 \\
 \theta_{300} &= 250 & \text{عدد خوانده شده در دور } 300 \\
 \theta_{200} &= 177 & \text{عدد خوانده شده در دور } 200 \\
 \theta_{100} &= 98 & \text{عدد خوانده شده در دور } 100 \\
 \theta_6 &= 20 & \text{عدد خوانده شده در دور } 6 \\
 \theta_3 &= 16 & \text{عدد خوانده شده در دور } 3
 \end{aligned}$$

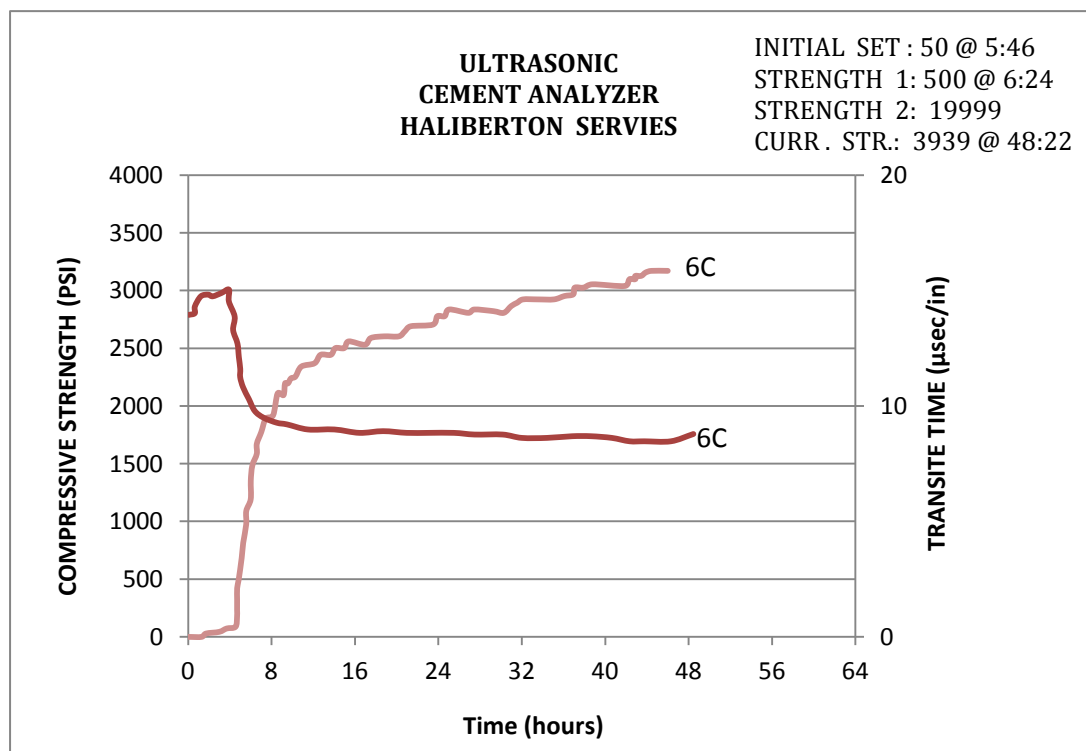
$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(250 - 98) = 228 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 250 - 228 \\
 &= 22 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

همانگونه که از خواص رئولوژیکی بدست آمده مشاهده می شود با افزودن ماده کاهنده اصطحاکاک و کاهش میزان افزودنی کنترل کننده افت صافی می توان مانع از افزایش غلظت دوغاب سیمان شده و آب

آزاد را نیز در حد پایینی نگه داشت و در پی آن دوغابی با نقطه‌واروی مناسب تهیه کرد. با استفاده از دستگاه UCA مقاومت فشاری دوغاب سیمان اندازه‌گیری شد. همانطور که از شکل ۶-۲۳ مشاهده می‌شود، سیمان در مدت ۵ ساعت و ۴۵ دقیقه استحکام ۵۰ پوند بر اینچ مربع و با سرعت مناسبی و بعد از حدود ۴۰ دقیقه مقاومت فشاری ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع توسعه یافته است. مقاومت فشاری سیمان پس از ۲۴ ساعت حدود ۳۱۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که روند افزایشی آن، مقاومت بیش از ۳۵۰۰ پوند بر اینچ مربع را در مدت ۴۵ ساعت حاصل می‌کند. مقایسه این سیستم با سیستم بدون افزودنی الاستومر نشان از آن دارد که افزایش افزودنی فوق باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۴ ساعته سیمان به مقدار ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع شده است و همین عامل نشان از روند مثبت در جهت افزایش الاستیسیته سنگ سیمان می‌باشد. برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۳ درصد وزنی از افزودنی الاستومر با مش ۵۰، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۷۳/۵۰ و قطر ۶۴/۷۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید. با انجام آزمایش مقاومت تک محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده، که نمودار تنش- کرنش محوری و جانبی آن را در شکل ۶-۲۴ مشاهده می‌شود. همانگونه که از شکل منحنی تنش- کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه کشسان یا الاستیک گویند. در این ناحیه تغییر شکل ایجاد شده، در ازای بارگذاری دائمی نبوده و با انجام باربرداری، نمونه شکل خود را که در ابتدای ناحیه الاستیک داشت باز خواهد یافت. حال هر چه شیب این بخش از منحنی کمتر باشد، تغییر شکل برگشت‌پذیر سنگ سیمان در ازای یک مقدار مشخص از تنش، بیشتر می‌باشد. ضریب زاویه این بخش از منحنی را مدول یانگ می‌گویند که در این آزمایش مقدار مدول یانگ برابر ۲/۷۶ گیگاپاسکال می‌باشد. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه

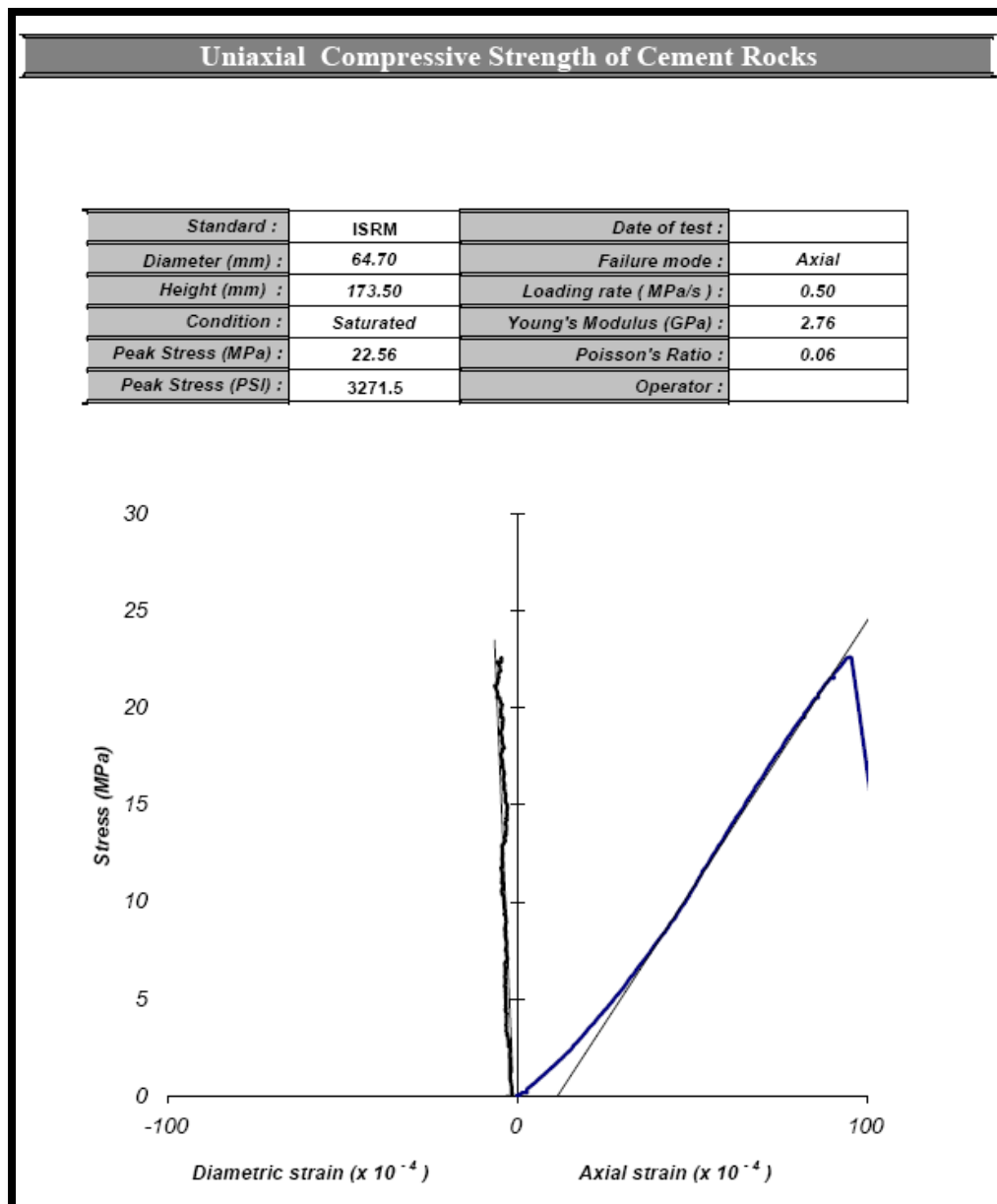
اتفاق می‌افتد. شروع این بخش از منحنی منطبق با آغاز کاهش شیب ثابت بخش کشسان منحنی و پایان آن، نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده و بدان استحکام یا مقاومت فشاری تک محوره می‌گویند که در این آزمایش برابر با ۳۲۷۱ پوند بر اینچ مربع شده است. در بخش سمت چپ شکل ۶-۲۴ منحنی تنش محوری- کرنش جانبی مشاهده می‌شود. نسبت شیب بخش سمت راست (مدول یانگ) به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان دهنده نسبت پواسون می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر ۰/۰۶ است و تقریباً بدون تغییر و در حد صفر می‌باشد.

لازم به ذکر است در ترسیم تنش محوری- کرنش جانبی، جهت وضوح منحنی و عدم تداخل آن با تنش محوری از تمامی اطلاعات مقداری کم گردیده و برای سهولت در رسم منحنی، مقدار کرنش جانبی منفی فرض گردیده است.



شکل ۶-۲۳- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۳ درصد وزنی افزودنی الاستومر

با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره برای تعیین پارامترهای الاستیک، مقاومت فشاری نمونه برابر با ۲۲/۵۶ مگاپاسکال برابر با ۳۲۷۱ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که با مقاومت به دست آمده از دستگاه UCA تطابق مناسبی دارد و نشان از صحت آزمایش در هر دو حالت می‌باشد.



شکل ۶-۲۴- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۳ درصد وزنی افزودنی الاستومر

با مقایسه این سیستم با سیستم اصلاح شده (دوغاب سیمان فاقد افزودنی الاستومر) می‌توان دریافت که به واسطه کاهش مدول یانگ از ۲/۸۶ به ۲/۷۶ گیگاپاسکال و افزایش نسبت پواسون از ۰/۰۴ به ۰/۰۶ سیستم در جهت افزایش الاستیسیته اندکی پیش رفته است اما تغییرات در حد چشمگیری نمی‌باشد. به نظر می‌رسد که مقدار افزودنی الاستومر نتوانسته ماتریکس صلب سیمان را تحت تأثیر قرار داده و الاستیسیته لازم را ایجاد کند. از طرفی کاهش وزن مخصوص دوغاب سیمان نیز خود می‌تواند بر تغییر پارامترهای الاستیک تأثیرگذار باشد. در گام بعدی با افزایش میزان افزودنی الاستومر به ۶ درصد وزنی سیمان مصرفی، خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان نیز در حد مناسبی حفظ شد. فرمولاسیون دوغاب سیمان در جدول ۶-۱۶ درج شده است.

جدول ۶-۱۶- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد الاستومر

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی کنترل کننده افتصافی	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی پراکنده‌ساز	۰/۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۷	افزودنی الاستومر	۶/۶	پوند بر کیسه سیمان
۸	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۹	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۵ پوند بر فوت مکعب			

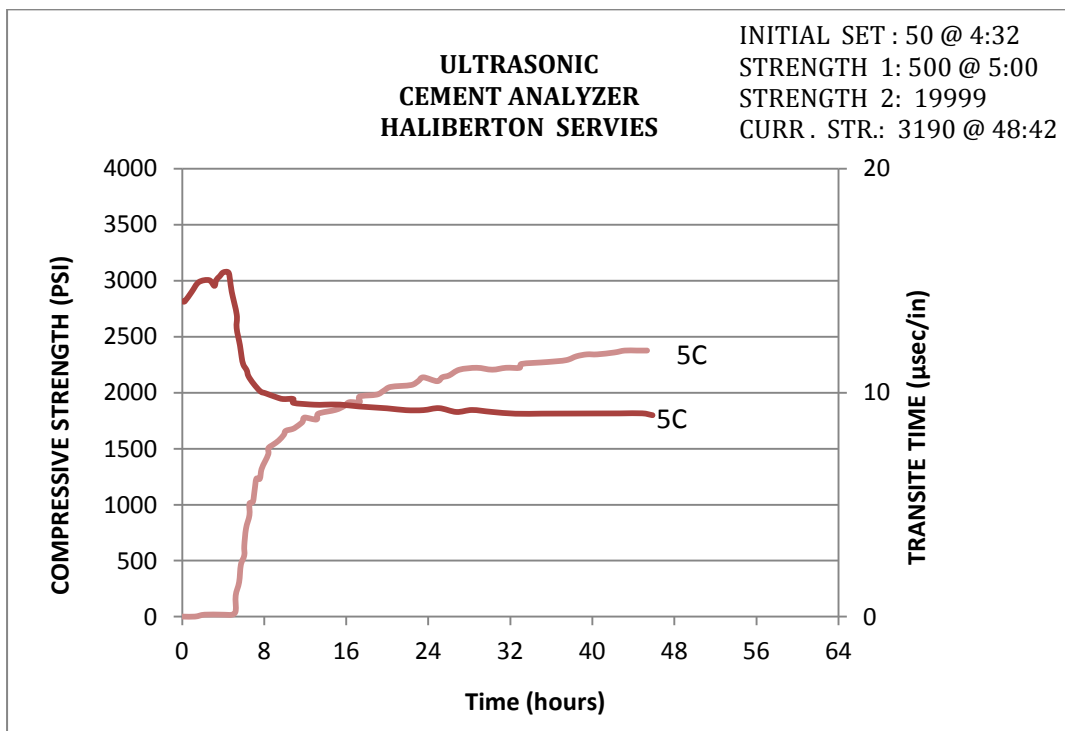
پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۵ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۴ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر یک سی‌سی، افتصافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۰۰ سی‌سی و مدت زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک دستگاه نیم بندش با فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۸۰ دقیقه تعیین شد.

به کمک دستگاه گرانی سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور 600} \\
 \theta_{300} &= 266 & \text{عدد خوانده شده در دور 300} \\
 \theta_{200} &= 181 & \text{عدد خوانده شده در دور 200} \\
 \theta_{100} &= 100 & \text{عدد خوانده شده در دور 100} \\
 \theta_6 &= 19 & \text{عدد خوانده شده در دور 6} \\
 \theta_3 &= 15 & \text{عدد خوانده شده در دور 3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(266 - 100) = 249 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 266 - 249 \\
 &= 17 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

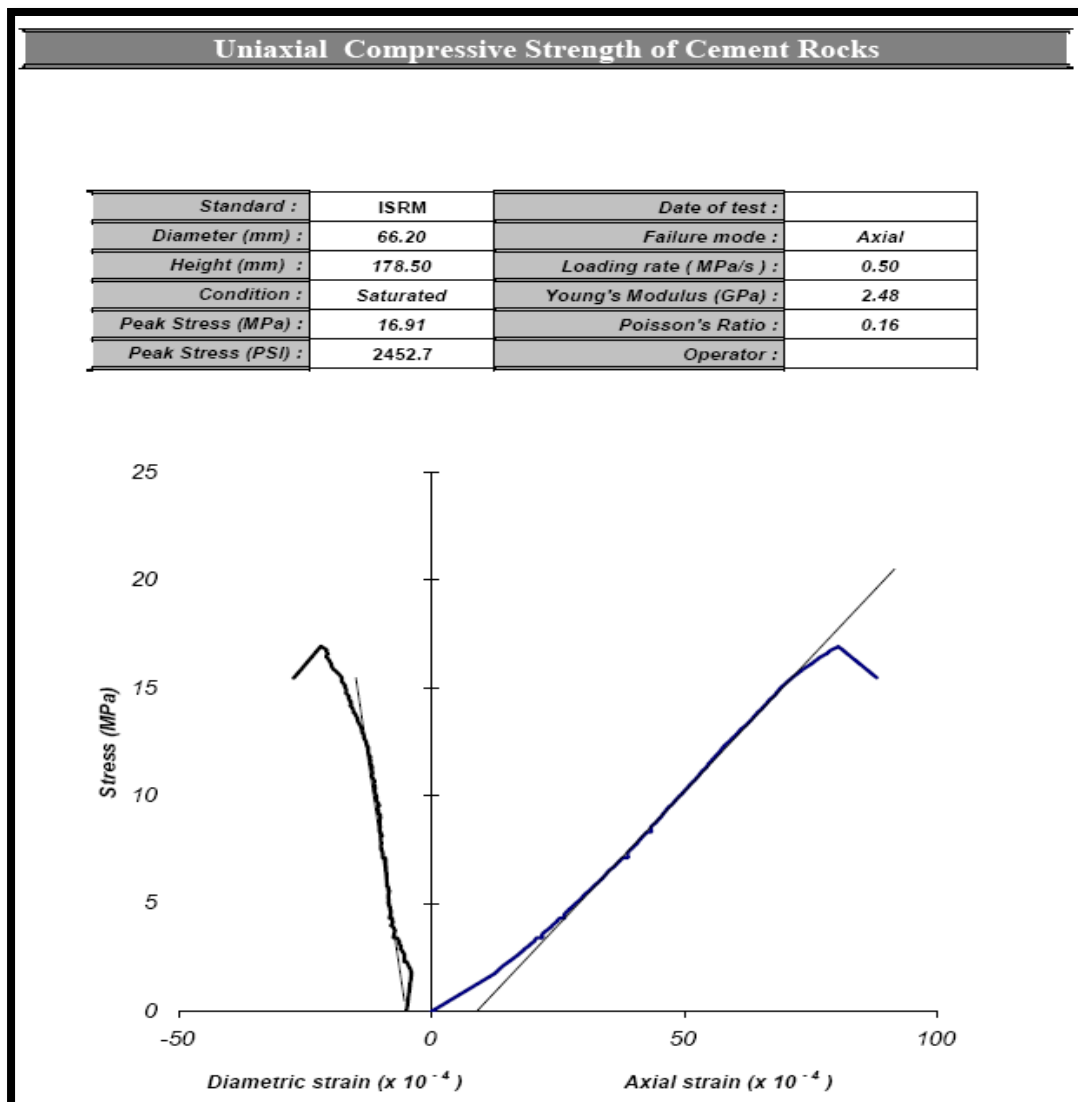
با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، دوغاب سیمان فاقد تهنشینی ذرات بوده و از خواص رئولوژیکی خوبی برخوردار می‌باشد. شکل ۶-۲۵ نمودار توسعه مقاومت فشاری سیمان با استفاده از دستگاه UCA را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۵- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۶ درصد وزنی افزودنی الاستومر

همانطور که از شکل ۶-۲۵ مشاهده می‌شود با وجود افزایش میزان افزودنی الاستومر توسعه مقاومت فشاری به‌طور مناسبی ادامه دارد. مقاومت فشاری ۲۴ ساعته سیمان در حدود ۲۷۷۰ پوند بر اینچ مربع است که در مقایسه با سیستم قبلی کاهش نسبی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۶ درصد وزنی از افزودنی الاستومر با مش ۵۰، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۷۸/۵۰ و قطر ۶۶/۲۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت مطابق با دستورالعمل ارائه شده در فصل پنجم عمل‌آوری و آماده گردید. شکل ۶-۲۶ نمودار تنش- کرنش محوری به دست آمده از انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. میزان مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته نمونه برابر ۲۴۵۳ پوند بر اینچ مربع می‌باشد که با مقاومت به دست آمده از دستگاه UCA تطابق مناسبی دارد. در ترسیم تنش محوری- کرنش جانبی نمونه، جهت وضوح منحنی و عدم تداخل آن با تنش محوری از تمامی اطلاعات مقداری کم گردیده و برای سهولت در رسم منحنی، مقدار کرنش جانبی منفی فرض گردیده است. مقدار مدول یانگ و نسبت پواسون حاصله به ترتیب برابر ۲/۱۵ گیگاپاسکال و ۰/۱۶ می‌باشد که نشان از بهبود پارامترهای الاستیک سیمان به واسطه افزایش افزودنی الاستومر می‌باشد. همانگونه که در شکل ۶-۲۶ مشاهده می‌شود مدول یانگ این سیستم در مقایسه با سیستم قبلی که حاوی ۳ درصد افزودنی الاستومر بود، کاهش در حدود ۰/۲۸ گیگاپاسکال و نسبت پواسون مقدار قابل ملاحظه‌ای در حدود ۰/۱ افزایش یافت. به نظر می‌رسد بخش اندکی از بهبود حاصله در خواص الاستیکی سیمان به سبب کاهش وزن و بخش اعظمی به واسطه افزودنی الاستیک‌کننده باشد. لازم به ذکر است ماتریکس سیمان متشکل از دو فاز، صلب و الاستیک می‌باشد. تنش‌های وارده دو رفتار متفاوت را در مقابل این دو فاز ایجاد می‌کنند. فاز صلب تغییر شکل یا کرنش اندکی از خود نشان داده و در مقابل تنش مقاومت می‌کند ولی تنش وارد بر فاز الاستیک همراه با کرنش و تغییر شکل قابل توجهی می‌باشد. در سطح تماس دو فاز، تمرکز تنش ایجاد شده، توسط ذرات الاستیک با کرنش همراه می‌باشند. حال هر چه میزان فاز الاستیک در ماتریکس بیشتر باشد، تنش‌های وارده

تمایل به ایجاد کرنش در ذرات الاستیک را دارند. به عبارت دیگر با افزایش فاز الاستیک، کل سیستم در برای افزایش الاستیسیته پیش رفته و رفتار ذرات الاستیک در ماتریکس تعیین کننده رفتار مجموعه می باشد. از جمله نقاط قوت این سیستم در تحمل تغییر شکل الاستیک در مقابل بارهای وارده تا مقادیر نزدیک به مقاومت نهایی خود می باشد.



شکل ۶-۲۶- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۶ درصد وزنی افزودنی الاستومر

در راستای دستیابی به مقادیر بهتری از پارامترهای الاستیک سیمان، میزان افزودنی الاستومر به ۹ درصد وزنی سیمان مصرفی افزایش یافت. با انجام آزمایش مخلوطنمایی مشاهده گردید، دوغاب

سیمان غیر قابل مخلوط می‌باشد. برای رفع مشکل و کاهش مدت زمان مخلوط نمایی و کنترل خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان و همچنین جلوگیری از افزایش غلظت ناشی از افزودن افزودنی الاستومر، ماده کنترل‌کننده افت‌صافی حذف شده و میزان افزودنی کاهنده پراکنده‌ساز تا میزان ۱/۱۱ پوند بر کیسه افزایش یافت. دوغاب سیمان حاصله دارای آب آزاد اندکی می‌باشد. ترکیبات دوغاب سیمان در جدول ۶-۱۷ درج شده است.

جدول ۶-۱۷- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد وزنی الاستومر

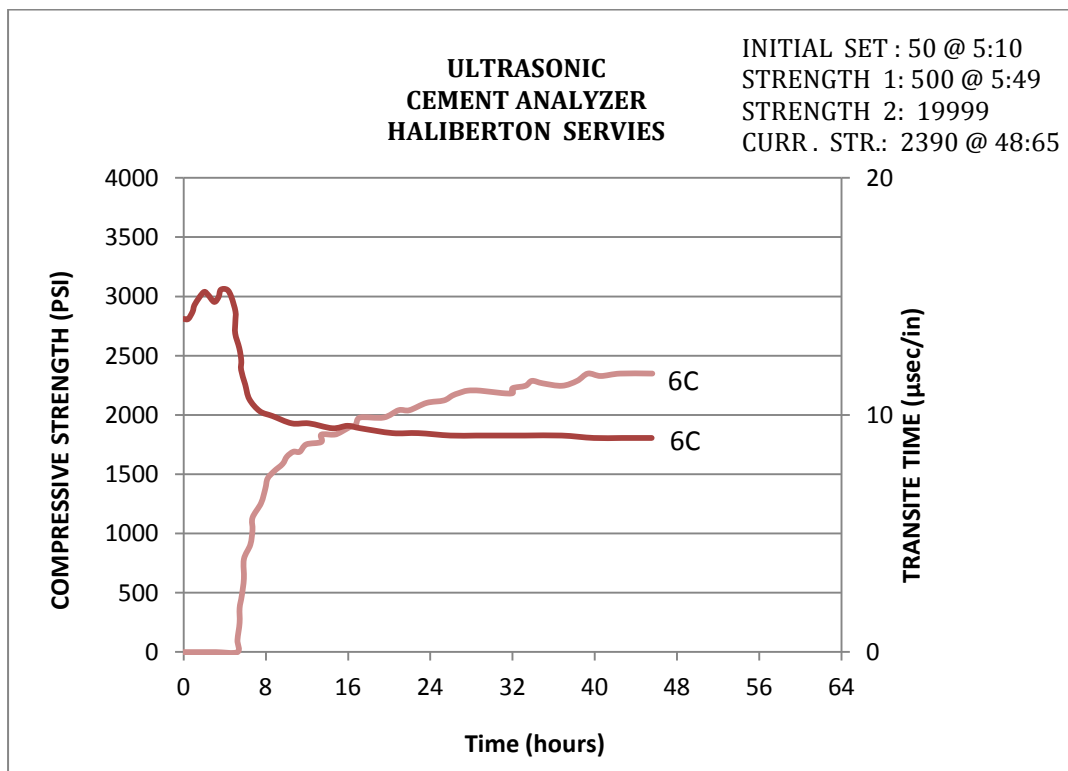
ردیف	نوع افزودنی / کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی پراکنده‌ساز	۱/۱۱	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی الاستومر	۹/۹	پوند بر کیسه سیمان
۷	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۸	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۳ پوند بر فوت مکعب			

پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۳ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۹/۱ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۰/۵ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۱۰/۵ سی‌سی و زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک دستگاه نیم بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۹۳ دقیقه تعیین شد. به کمک دستگاه گرانروی‌سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
\theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶۰۰} \\
\theta_{300} &= 276 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳۰۰} \\
\theta_{200} &= 195 & \text{عدد خوانده شده در دور ۲۰۰} \\
\theta_{100} &= 107 & \text{عدد خوانده شده در دور ۱۰۰} \\
\theta_6 &= 17 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶} \\
\theta_3 &= 13 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
&= 1/5(276 - 107) = 253/5 \text{ (cp)} \\
YP &= (\theta_{300}) - PV = 276 - 253/5 \\
&= 22/5 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
\end{aligned}$$

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، دوغاب سیمان فاقد ته‌نشینی مواد وزن افزا بوده و از خواص رئولوژیکی خوبی برخوردار می‌باشد. شکل ۶-۲۷ چگونگی توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان با استفاده از دستگاه UCA را نشان می‌دهد.



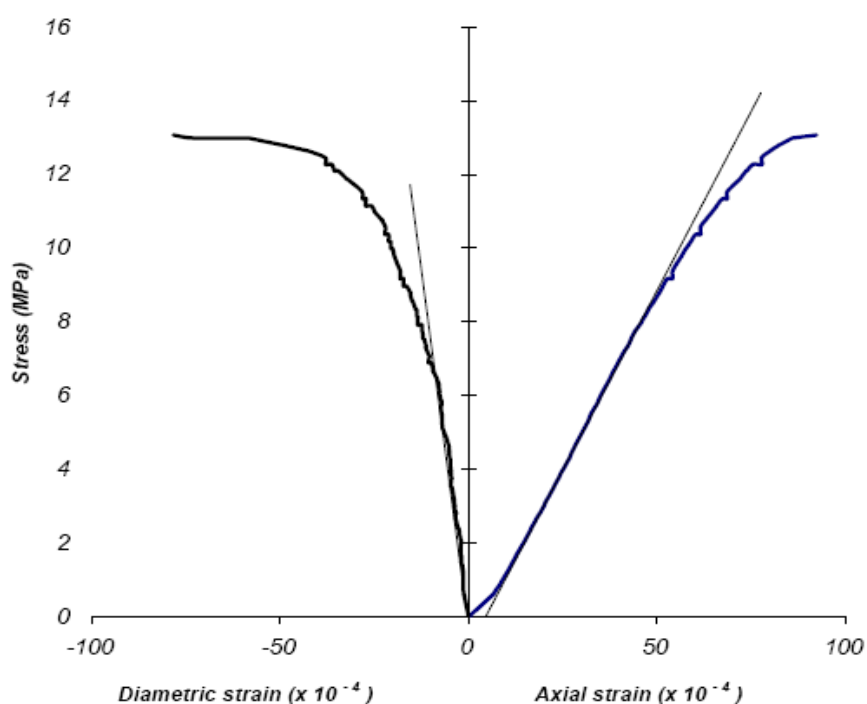
شکل ۶-۲۷- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۹ درصد وزنی افزودنی الاستومر

همانطور که از منحنی مقاومت فشاری مشاهده می‌شود، توسعه مقاومت فشاری سنگ سیمان روند مناسبی را طی کرده و پس از طی ۲۴ ساعت حدود ۲۱۵۰ پوند بر اینچ مربع رسیده است و در ادامه با همان روند افزایشی، مقدار آن پس از ۴۶ ساعت به حدود ۲۴۰۰ پوند بر اینچ مربع رسیده است.

در ادامه آزمایش‌ها، برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۹ درصد وزنی از افزودنی الاستومر با مش ۵۰، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۶۸ و قطر ۶۵/۵۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید، سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر سه نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. شکل ۶-۲۸ نمودار تنش-کرنش محوری و جانبی حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره را نشان می‌دهد. مطابق نمودار حداکثر مقاومت نهایی نمونه برابر ۱۹۰۰ پوند بر اینچ مربع و مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۱/۹۴ گیگاپاسکال و ۰/۲۵ می‌باشد. که بهبود مناسبی نسبت به سیستم قبلی یافته است. مقدار مدول یانگ این سیستم نسبت به سیستم حاوی ۶ درصد افزودنی الاستیک‌کننده، بیش از نیم مگاپاسکال کاهش را نشان می‌دهد که حاکی از افزایش تأثیر افزودنی الاستیک‌کننده در ماتریکس سیمان می‌باشد. نسبت پواسون نیز افزایشی در حدود ۰/۱ دارد. هر چه میزان نسبت پواسون افزایش یابد، قابلیت تراکم‌پذیری سیمان کاهش می‌یابد. این سیستم خواص الاستیکی مطلوبی را به نمایش می‌گذارد که نشان از تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر توسط فاز الاستیک به ازای تنش‌های وارده دارد.

Uniaxial Compressive Strength of Cement Rocks

Standard :	ISRM	Date of test :	
Diameter (mm) :	65.50	Failure mode :	Axial
Height (mm) :	168.00	Loading rate (MPa/s) :	0.50
Condition :	Saturated	Young's Modulus (GPa) :	1.94
Peak Stress (MPa) :	13.07	Poisson's Ratio :	0.25
Peak Stress (PSI) :	1895.4	Operator :	



شکل ۶-۲۸- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۹ درصد وزنی افزودنی الاستومر

برای مشاهده تأثیر میزان ۱۲ درصد وزنی سیمان مصرفی از افزودنی الاستومر بر روی مقاومت فشاری و پارامترهای الاستیک سیمان، به دوغاب سیمان اصلاح شده مقدار ۱۳/۲ پوند بر کیسه افزودنی الاستومر با مش ۵۰ اضافه گردید. با انجام آزمایش مخلوط‌نمایی مشاهده گردید، دوغاب سیمان به دلیل افزایش ذرات الاستومر غیر قابل مخلوط می‌باشد. برای رفع مشکل و کاهش مدت زمان مخلوط‌نمایی و کنترل خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان و همچنین جلوگیری از افزایش غلظت ناشی از افزودن افزودنی الاستومر، میزان ماده کاهنده اصطکاک تا میزان ۱/۳۲ پوند بر کیسه افزایش یافت،

و در نهایت فرمولاسیون مندرج در جدول ۶-۱۸ طراحی شد. با افزایش میزان افزودنی کاهنده اصطکاک، خواص رئولوژیکی بسیار مناسبی از دوغاب سیمان حاصل شد.

جدول ۶-۱۸- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی الاستومر

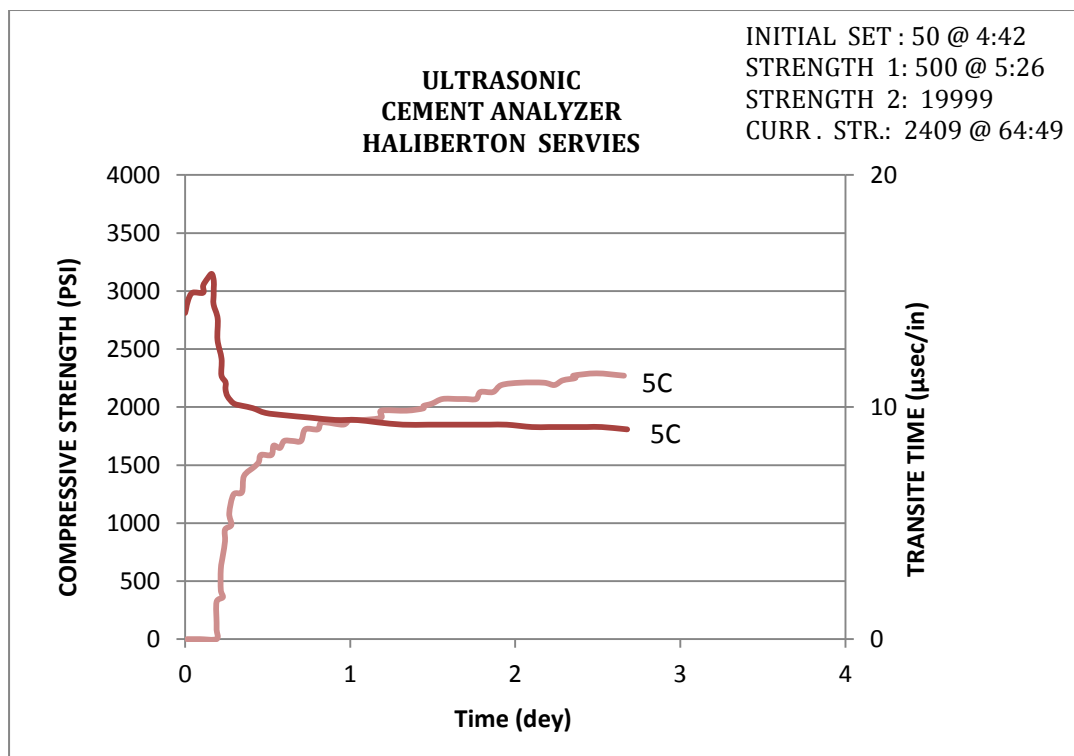
ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۵/۵۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی پراکنده‌ساز	۱/۳۲	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی الاستومر	۱۳/۲	پوند بر کیسه سیمان
۷	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۸	آب	۰/۶۶۹۶	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۴۱ پوند بر فوت مکعب			

پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۴۱ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۸/۸۵ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر صفر، افتصافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۳۳۰ سی‌سی و مدت زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک دستگاه نیم‌بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۲۰۳ دقیقه تعیین شد. به کمک دستگاه گرانی‌سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور } 600 \\
 \theta_{300} &= 248 & \text{عدد خوانده شده در دور } 300 \\
 \theta_{200} &= 177 & \text{عدد خوانده شده در دور } 200 \\
 \theta_{100} &= 98 & \text{عدد خوانده شده در دور } 100 \\
 \theta_6 &= 29 & \text{عدد خوانده شده در دور } 6 \\
 \theta_3 &= 19 & \text{عدد خوانده شده در دور } 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(248 - 98) = 225 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 248 - 225 \\
 &= 23 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

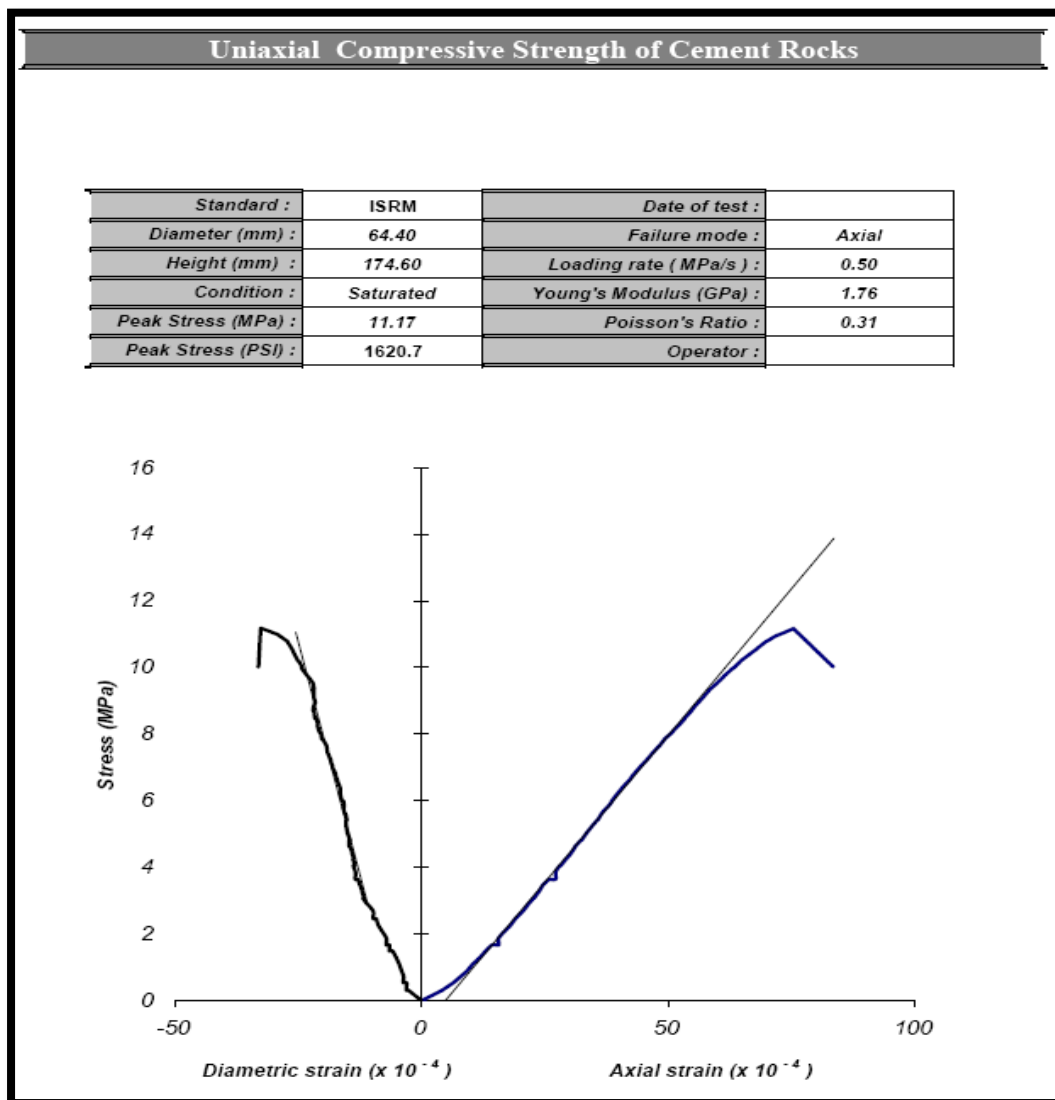
با استفاده از دستگاه UCA مقاومت فشاری دوغاب سیمان تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت اندازه‌گیری گردید. نمودار ۶-۲۹ روند افزایشی مقاومت فشاری سیمان ساخته شده را نشان می‌دهد. روند مقاومت فشاری تقریباً با همان سرعت توسعه یافته ولی میزان مقاومت فشاری ۲۴ ساعته نسبت به سیستم قبلی به حدود ۱۹۰۰ پوند بر اینچ مربع کاهش یافته و با توجه به روند افزایشی پس از گذشت ۶۵ ساعت به ۲۴۰۰ پوند بر اینچ مربع رسیده که میزان قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۶-۲۹- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر

برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۱۲ درصد وزنی از افزودنی الاستومر با مش ۵۰، تعداد ۳ نمونه از سنگ سیمان به طول ۱۷۴/۶ و قطر ۶۴/۴۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید. شکل ۶-۳۰ نشان دهنده منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی نمونه سیمان ساخته شده

می‌باشد. همانطور که در شکل ۶-۳۰ مشاهده می‌شود، مقدار مدول یانگ نسبت به سیستم قبلی با کاهش در حدود یک درصد به مقدار $1/76$ گیگاپاسکال و میزان نسبت پواسون نیز با حدود ۲۴ درصد افزایش به $0/31$ رسیده است. حال که مقادیر مناسبی از پارامترهای الاستیکی سیمان به دست آمده است، برای توزیع یکنواخت‌تر افزودنی الاستیک‌کننده در درون دوغاب سیمان و نیز نزدیک کردن دانه‌بندی افزودنی به دانه‌بندی سیمان و بهبود احتمالی پارامترهای الاستیک، اقدام به ریزتر کردن دانه‌بندی با عبور افزودنی از الک با مش ۷۰ شد.



شکل ۶-۳۰- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر

به این ترتیب عمل اختلاط خشک افزودنی با سیمان بهبود بخشیده و مخلوط خشک یکنواختی حاصل شد. دوغاب سیمان ساخته شده با مخلوط حاصل بسیار غلیظ بوده و به ناچار به آن آب اضافه شد تا موجب کاهش وزن مخصوص دوغاب سیمان شود. با این حال دوغاب سیمان هنوز هم از خواص رئولوژیکی مناسبی برخوردار نبوده و اندکی نیز ته‌نشینی ذرات مشاهده شد. برای حل مشکل از افزودنی کنترل‌کننده ته‌نشینی ذرات در دوغاب سیمان استفاده شد. در نهایت خواص رئولوژیکی بسیار مناسبی از دوغاب سیمان حاصل شد که فرمولاسیون آن در جدول ۶-۱۹ درج شده است.

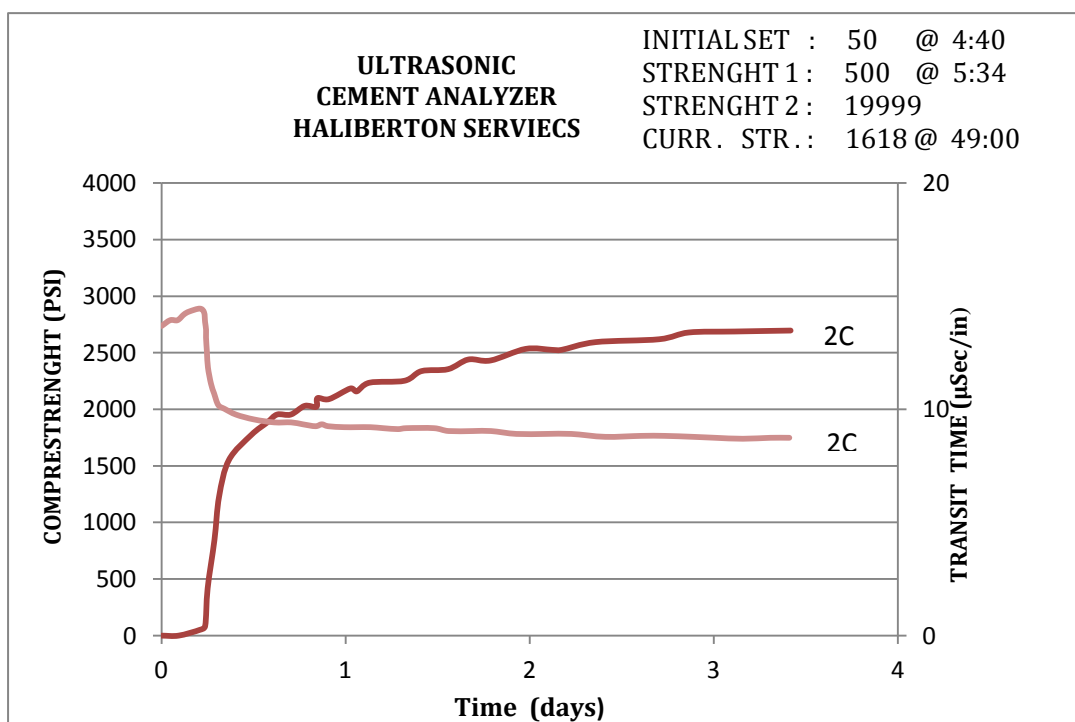
جدول ۶-۱۹- ترکیبات دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی الاستومر با مش ۷۰

ردیف	نوع افزودنی / کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۸/۰۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۶۰/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	افزودنی کندگر	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۵	افزودنی پراکنده‌ساز	۱/۳۲	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی الاستومر	۱۳/۲	پوند بر کیسه سیمان
۷	جلوگیری‌کننده ته‌نشینی ذرات	۰/۲۷۵	پوند بر کیسه سیمان
۸	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۹	آب	۰/۷۷۵۳	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۳۶ پوند بر فوت مکعب			

پس از انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۳۶ پوند بر فوت مکعب معادل ۱۸/۲ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۲ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۲۶۰ سی‌سی و زمان نیم‌بندش تعیین شده به کمک دستگاه نیم بندش تحت فشار ۱۰۶۸۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت برابر با ۱۹۶ دقیقه تعیین شد. به کمک دستگاه گرانروی‌سنج Chan ۳۵ و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= >300 \\
 \theta_{300} &= 260 & PV = 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 \theta_{200} &= 185 & = 1/5(260 - 102) = 237 \text{ (cp)} \\
 \theta_{100} &= 102 & YP = (\theta_{300}) - PV = 260 - 237 \\
 \theta_6 &= 15 & = 23 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)} \\
 \theta_3 &= 11
 \end{aligned}$$

با استفاده از دستگاه UCA مقاومت فشاری دوغاب سیمان تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت اندازه‌گیری گردید. شکل ۶-۳۱ روند افزایشی مقاومت فشاری دوغاب سیمان تهیه شده را نشان می‌دهد.



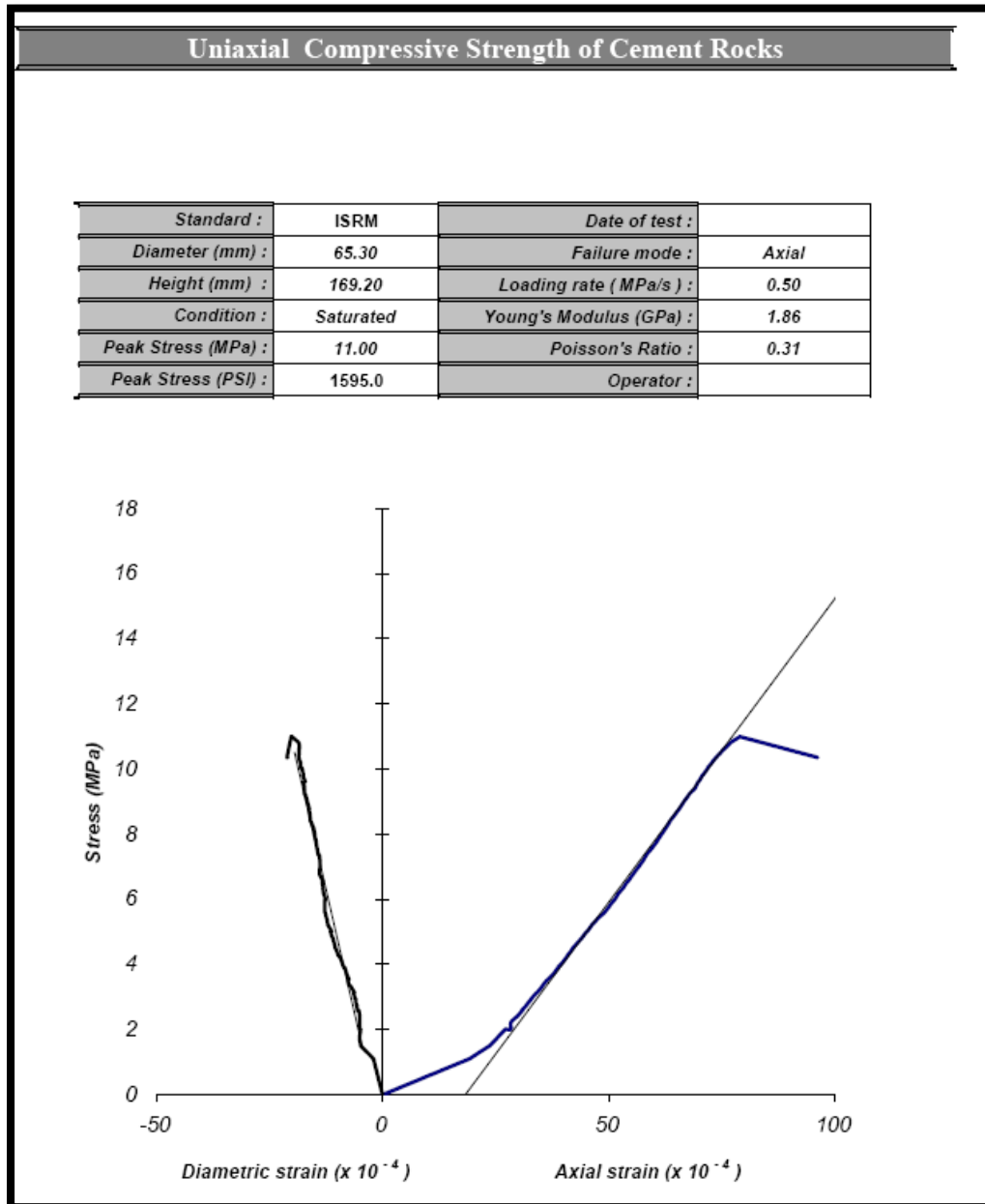
شکل ۶-۳۱- توسعه مقاومت فشاری دوغاب سیمان طراحی شده با ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر با مش ۷۰

روند رسیدن به مقاومت‌های ۵۰ و ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع همچنان بدون تغییر مانده است که نشان دهنده آن است که روند شروع مقاومت با ریزتر کردن ذرات الاستیک‌کننده تغییری نکرده اما به دلیل

سبک‌تر شدن دوغاب سیمان، به واسطه افزایش آب مصرفی، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته سیمان به حدود ۱۵۵۰ پوند بر اینچ مربع کاهش یافته است و پس از ۴۹ ساعت مقاومت فشاری سیمان به ۱۶۱۸ پوند بر اینچ مربع رسیده که حکایت از روند نسبتاً آرام افزایش مقاومت فشاری را دارد.

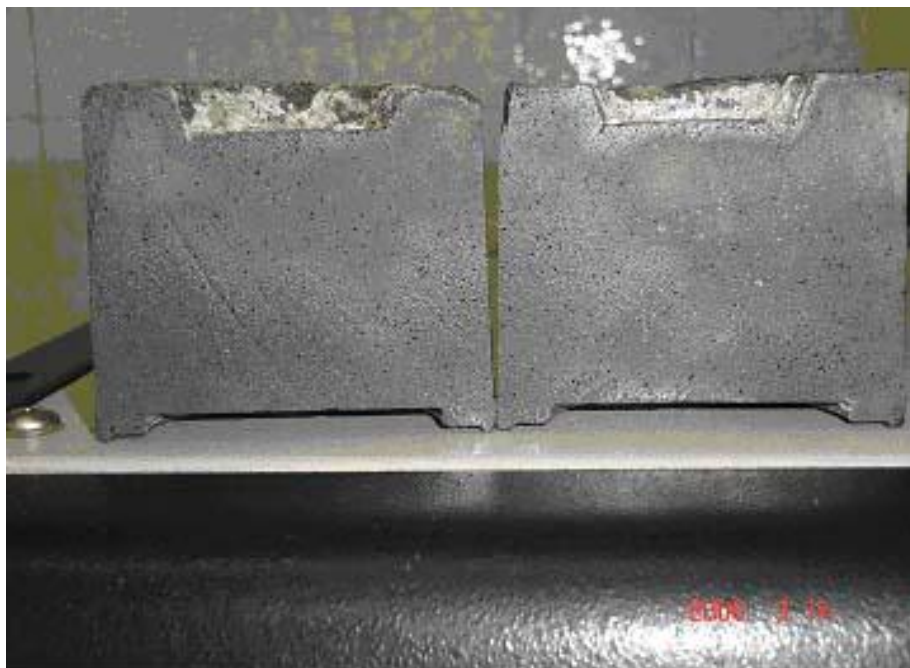
در ادامه آزمایش‌ها و برای بررسی مدول یانگ و نسبت پواسون سنگ سیمان حاصل از فرمولاسیون دوغاب سیمان با ۱۲ درصد وزنی از افزودنی الاستومر با مش ۷۰، تعداد ۵ نمونه (برای حصول اطمینان تعداد نمونه‌ها در مقایسه با آزمایش‌های قبلی افزایش داده شد) از سنگ سیمان به طول ۱۶۹/۲۰ و قطر ۶۵/۳۰ میلی‌متر تحت فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۲۱۰ درجه فارنهایت عمل‌آوری و آماده گردید. سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوره که مجهز به سیستم کرنش سنج می‌باشد با نرخ بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون هر پنج نمونه از سنگ سیمان محاسبه گردید. شکل ۶-۳۲ نمودار تنش-کرنش محوری و جانبی مربوط به نمونه سنگ سیمان تهیه شده با ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر با مش ۷۰ را که دارای کمترین مقدار مدول یانگ و ضریب پواسون از بین پنج نمونه را داده است، نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل منحنی تنش-کرنش محوری پیدا است، منحنی در ابتدا دارای شیب افزایشی مثبتی می‌باشد که نشان‌دهنده بسته شدن حفرات ریز موجود در توده سنگ سیمان است. در پی این ناحیه، بخشی آغاز می‌شود که دارای شیب ثابتی می‌باشد که بدان ناحیه الاستیک گویند. ضریب زاویه این بخش از منحنی را مدول یانگ می‌گویند که در این آزمایش مقدار مدول یانگ برابر ۱/۸۶ گیگاپاسکال می‌باشد. در پی این بخش از منحنی، ناحیه‌ای آغاز می‌شود که شیب منحنی روندی کاهشی داشته و در ازای تغییر کوچکی در سطح تنش، تغییر شکل زیادی در نمونه اتفاق می‌افتد. نقطه‌ای که شیب منحنی، صفر می‌شود، نشان‌دهنده مقاومت نهایی سنگ سیمان بوده که در این آزمایش برابر با ۱۵۹۵ پوند بر اینچ مربع شده است. در بخش سمت چپ شکل ۶-۳۲ منحنی تنش محوری-کرنش جانبی مشاهده می‌شود. نسبت شیب بخش سمت راست به شیب بخش سمت چپ منحنی نشان‌دهنده نسبت پواسون می‌باشد. در این مورد این نسبت برابر ۰/۳۱ است. چنانچه مشاهده می‌شود مدول یانگ

سیمان در مقایسه با سیستم سیمان قبلی افزایش نسبی داشته ولی نسبت پواسون کماکان بدون تغییر مانده است.

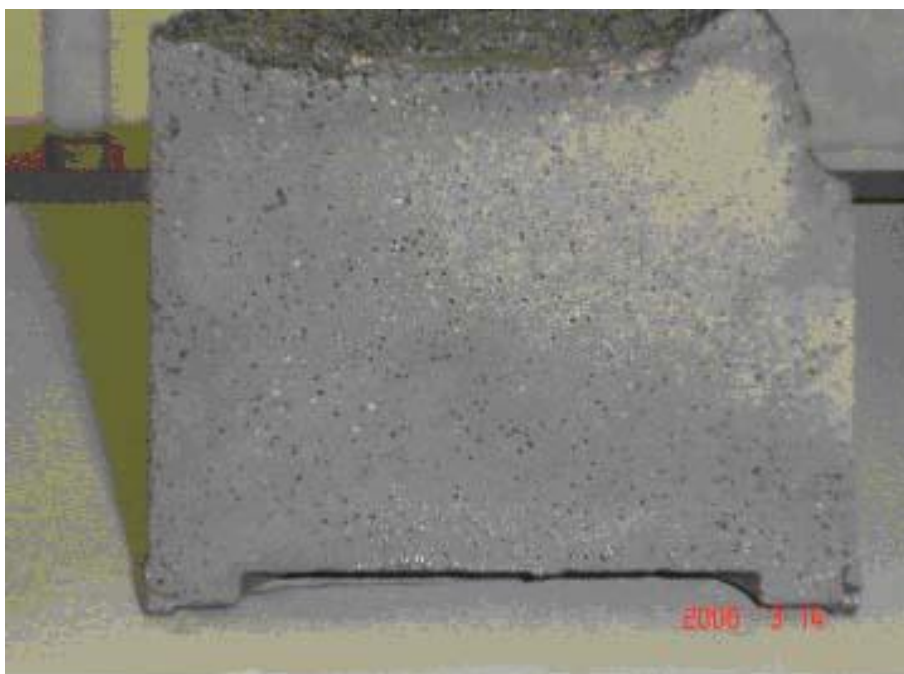


شکل ۶-۳۲- منحنی تنش- کرنش محوری و جانبی سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی افزودنی الاستومر با مش ۷۰

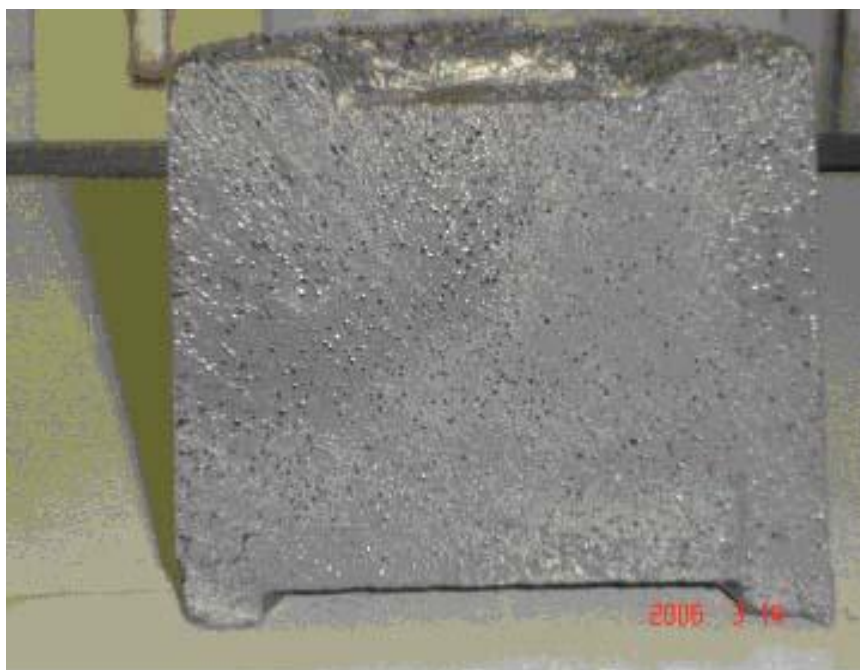
شکل‌های ۶-۳۳ تا ۶-۳۷ نشان دهنده چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در درون سنگ سیمان است.



شکل ۶-۳۳- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۳ درصد وزنی الاستومر



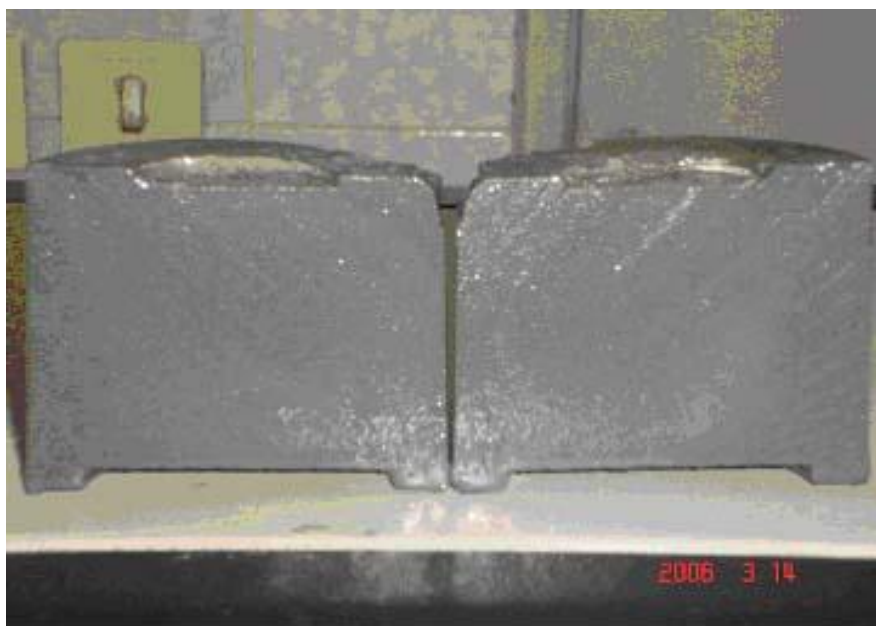
شکل ۶-۳۴- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۶ درصد وزنی الاستومر



شکل ۶-۳۵- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۹ درصد وزنی الاستومر



شکل ۶-۳۶- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی الاستومر



شکل ۶-۳۷- چگونگی توزیع افزودنی الاستیک‌کننده در سیمان حاوی ۱۲ درصد وزنی الاستومر با مش ۷۰

حال که مقادیر مناسب پارامترهای الاستیکی سیمان (مدول یانگ و نسبت پواسون) با استفاده از افزودنی الاستومر با مش ۷۰ و نانو ذرات اکسید آهن به دست آمد، باید اثر این افزودنی در افزایش انبساط سنگ سیمان بررسی شود. در اثر هیدراتاسیون سیمان، انقباض حجمی پیش خواهد آمد که بر اساس بررسی‌های به عمل آمده توسط شرکت‌های معتبر نفتی دنیا و مقالات منتشر شده در این رابطه، میزان این انقباض حجمی بین ۱/۵ تا ۳ درصد حجمی خواهد بود و این انقباض، موجب ایجاد میکروآنالوس بین سیمان با سازند و یا سیمان با لوله‌جداری خواهد شد. همین میکروآنالوس‌ها موجب مهاجرت گاز به سطح زمین و آتش گرفتن چاه مثل حادثه نفت شهر خواهد شد که این معضل در بسیاری از چاه‌های ایران به خصوص در چاه‌های مورد مطالعه در این رساله (میدان مارون- سازند گچساران) متداول می‌باشد. همچنین در اثر انقباض سیمان، پدیده نشت آب نمک از پاشنه لوله‌های جداری در بیشتر چاه‌های ایران مشاهده می‌شود. لذا برای بررسی این موضوع، نیاز به ساخت قالب‌های اندازه‌گیری انبساط طولی سنگ سیمان و دستگاه اندازه‌گیری آن در شرایط واقعی چاه می‌باشد، که در فصل چهارم به صورت کامل نحوه ساخت و کار با دستگاه آورده شده است. در این قسمت ابتدا نمونه دوغاب‌های سیمان با درصدهای مختلف افزودنی الاستیک‌کننده که در قسمت قبلی به نتایج قابل

قبولی از پارامترهای الاستیکی رسیده‌ایم را آماده کرده و در دمای ۲۲۰ درجه فارنهایت و فشار ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع در مدت زمان ۳ روز عمل‌آوری شد، سپس با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی سیمان افزایش طول آن قرائت شد، که نتایج آن در جدول ۶-۲۰ آمده است.

جدول ۶-۲۰- انبساط سنگ سیمان با مقادیر مختلف از الاستومر و نانو ذرات اکسید آهن

درصد انبساط %		دوغاب سیمان
بعد از ۷۲ ساعت	بعد از ۲۴ ساعت	
۰	۰	بدون افزودنی
۰/۹	۰/۴	۳ درصد الاستومر
۱/۹	۱	۶ درصد الاستومر
۲/۵	۱/۵	۹ درصد الاستومر
۳	۱/۶	۱۲ درصد الاستومر
۲/۹	۱/۷	۱۲ درصد الاستومر مش ۷۰
۰	۰	۳ درصد نانو ذرات اکسید آهن
۰/۲	۰/۲	۶ درصد نانو ذرات اکسید آهن
۰/۵	۰/۵	۹ درصد نانو ذرات اکسید آهن

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، از بین دو افزودنی الاستیک‌کننده فوق الذکر، افزودنی الاستومر از نتایج بهتری برخوردار می‌باشد، چرا که با افزایش مقدار مصرف الاستومر، میزان انبساط سنگ سیمان افزایش پیدا می‌کند، لذا با کمک این افزودنی حداکثر کاهش حجمی دوغاب سیمان که ۳ درصد می‌باشد از طریق این افزودنی تامین شده است.

۶-۱۳- طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مطلوب

از بین افزودنی‌های مختلف و تاثیرگذار بر رفتار مکانیکی و سایر خصوصیات دوغاب سیمان، بهترین افزودنی که می‌تواند ضمن سازگاری با سایر افزودنی‌های موجود در ترکیبات دوغاب سیمان، بر روی پارامترهای الاستیک‌کننده و انبساط‌دهنده سنگ سیمان مؤثر باشد، افزودنی الاستومر با مش ۷۰ است. لذا برای انجام آزمایش میدانی در شرایط واقعی چاه‌های میدان مارون لازم است ضمن بالا بردن

وزن مخصوص دوغاب سیمان تا وزن ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب، دوغاب سیمان مطلوب که مناسب چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون باشند طراحی شود. برای این منظور ضمن انجام آزمایش‌های اولیه که در بخش قبلی برای تمامی دوغاب‌های سیمان مختلف انجام شد، بایستی یکسری آزمایش‌های تکمیلی که شامل بررسی پایداری، مقاومت زلزله‌ای، نفوذ گاز در ستون دوغاب سیمان است انجام شود. به منظور بهینه‌سازی فرمولاسیون دوغاب سیمان مناسب برای چاه‌های میدان مارون، برنامه‌ای مطابق با الگوی شکل ۶-۳۸ تدوین شده است. این برنامه در واقع، روندی آزمایشگاهی است، که مطابق با آن دوغاب سیمان اصلاح می‌شود، تا هر کدام از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در طراحی دوغاب سیمان مطلوب به استانداردهای مورد نظر نزدیک شود، لذا اولویت‌بندی یکی از خصوصیت‌های این دستورالعمل می‌باشد. همانطور که در شکل ۶-۳۸ مشاهده می‌شود در هر بخش ویژگی‌هایی از دوغاب سیمان ذکر شده است که الزاماً دوغاب سیمان باید نیاز این مشخصه‌ها را برآورد کند. مرحله به مرحله و گام به گام این دستورالعمل می‌بایست اجرا شود. اگر دوغاب سیمان طراحی شده در یک بخش خاص نتواند نیازهای ذکر شده را برآورد کند می‌بایست تصحیحات اساسی روی آن بخش صورت پذیرد. در واقع این برنامه قابلیت دارد تا نقاط ضعف دوغاب سیمان را مشخص نماید و بیان کند تصحیحات مورد نیاز در چه مرحله و به چه صورت باید انجام گیرند. برای این منظور، فرمولاسیون‌های بسیار زیادی با مقادیر مختلفی از افزودنی‌های وزن افزا، کندکننده، نمک‌ها، کنترل‌کننده افت‌صافی، کنترل‌کننده نفوذ گاز و ضدکف طراحی شده است که بعضی از آنها بدلیل ضعف در عملکرد آنها، نظیر مدت زمان مخلوط، دانسیته، آب آزاد، افت‌صافی، خواص رئولوژیکی و ... که ارائه همه آنها در این بخش از حوصله خارج است. ماحصل تحقیقات و آزمایش‌های مذکور منجر به ارائه طراحی و فرمولاسیون جدول ۶-۲۱ برای سیمان‌کاری لوله‌جداری "۵/۸ ۹ میدان مارون گردید.

مرحله اول	<ul style="list-style-type: none"> انتخاب افزودنی های مناسب با شرایط چاه در این بخش افزودنی الاستومر با مش ۷۰ انتخاب شد
مرحله دوم	<ul style="list-style-type: none"> تعیین وزن مخصوص سیمان وزن مخصوص دوغاب سیمان بایستی حداقل دو پوند بر فوت مکعب بیشتر از وزن گل انتخاب شود.
مرحله سوم	<ul style="list-style-type: none"> زمان مخلوط نمایی مدت زمان مخلوط نمایی نبایستی بیشتر از ۵۰ ثانیه باشد
مرحله چهارم	<ul style="list-style-type: none"> آب آزاد مقدار آب آزاد سیستم نبایستی بیشتر از ۵ سی سی باشد.
مرحله پنجم	<ul style="list-style-type: none"> خواص رئولوژیکی خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان بایستی قبل و بعد از حرارت اندازه گیری شده و سیستم بایستی فاقد ته نشینی باشد.
مرحله ششم	<ul style="list-style-type: none"> افت صافی استاتیکی مقدار افت صافی استاتیکی دوغاب سیمان سنگین وزن بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا نبایستی بیشتر از ۱۰۰ سی سی باشد.
مرحله هفتم	<ul style="list-style-type: none"> زمان نیم بندش دوغاب سیمان مدت زمان رسیدن کانسیستنسی ۳۰ تا ۷۰ سنتی پواز دوغاب سیمان نبایستی بیشتر از ۲۵ دقیقه باشد.
مرحله هشتم	<ul style="list-style-type: none"> خواص مکانیکی سنگ سیمان در این مرحله مقاومت فشاری ، مدول یانگ، ضریب پواسون و ضریب انبساط حجمی بایستی در حد نیاز باشد.
مرحله نهم	<ul style="list-style-type: none"> مقاومت زله ای دوغاب سیمان مدت زمان رسیدن مقاومت زله ای ۱۲۵ تا ۲۵۰ پاسکال دوغاب سیمان بایستی بیشتر از ۲۵ دقیقه نباشد.
مرحله دهم	<ul style="list-style-type: none"> تست نفوذ گاز میزان نفوذ گاز در طول بندش دوغاب سیمان تا زمان تبدیل شدن آن به یک جسم صلب بایستی به نحوی باشد که هیچ کانالی در درون آن ایجاد نکند و این مقدار هر چقدر به سمت صفر میل کند ایده آل می باشد.

شکل ۶-۳۸- برنامه تهیه دوغاب سیمان مطلوب

در این فرمولاسیون برای جلوگیری از ته نشینی ذرات وزن افزا، بهینه سازی خواص رئولوژیکی و افزایش وزن مخصوص دوغاب سیمان ضمن کاهش مصرف آب از افزودنی وزن افزا میکرومکس استفاده شد و

همچنین برای کنترل افتصافی استاتیکی دوغاب سیمان از افزودنی کنترل کننده افتصافی مخصوص آب نمک اشباع استفاده شد، که در ترکیبات قبلی این افزودنی مشاهده نمی شود.

برای تنظیم زمان نیم بندش دوغاب سیمان و کاهش اصطکاک بین ذرات از افزودنی اسیدبوریک که مختص سیمان های سنگین وزن می باشد و همچنین از افزودنی مهار مهاجرت گاز که قبل از بکارگیری مورد کنترل کیفی قرار گرفت استفاده شده است. پس از انجام آزمایش ها، مدت زمان مخلوط نمایی ۵۵ ثانیه، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب معادل ۲۰/۳۲ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱/۵ سی سی، افتصافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۸۲ سی سی تعیین شد. زمان نیم بندش دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم بندش با فشار ۱۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و تحت دمای گردشی ۱۸۰ درجه فارنهایت تا مدت زمان ۴۵۰ دقیقه حاصل نشد.

جدول ۶-۲۱- ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان شماره یک برای سیمان کاری لوله جداري "۹ ۵/۸"

ردیف	نوع افزودنی/کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۲/۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۴۹/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	میکرومکس	۳۸/۵	پوند بر کیسه سیمان
۵	اسید بوریک	۰/۳۳	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی الاستومر با مش ۷۰	۱۰/۴۵	پوند بر کیسه سیمان
۷	افزودنی کنترل کننده افتصافی	۰/۸۸	پوند بر کیسه سیمان
۸	افزودنی ضد مهاجرت گاز (PK)	۰/۶	گالن بر کیسه سیمان
۹	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۱۰	آب	۰/۶۷۰۳	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب			

به کمک دستگاه گرانیوی سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه واروی دوغاب اطلاعات ذیل حاصل شد.

$$\begin{aligned}
\theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور 600} \\
\theta_{300} &= 201 & \text{عدد خوانده شده در دور 300} \\
\theta_{200} &= 152 & \text{عدد خوانده شده در دور 200} \\
\theta_{100} &= 86 & \text{عدد خوانده شده در دور 100} \\
\theta_6 &= 8 & \text{عدد خوانده شده در دور 6} \\
\theta_3 &= 3/5 & \text{عدد خوانده شده در دور 3}
\end{aligned}$$

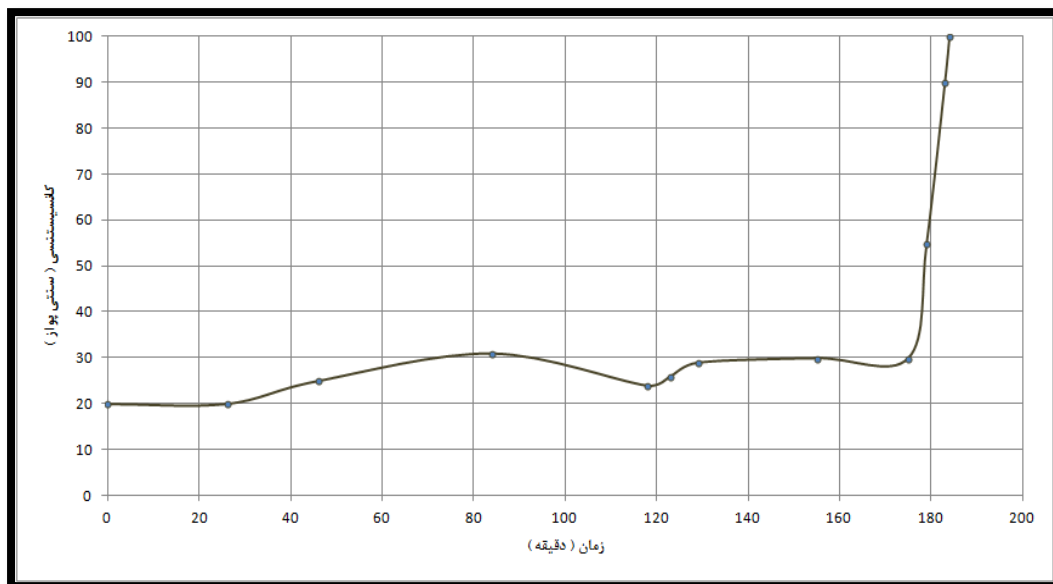
$$\begin{aligned}
PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
&= 1/5(201 - 86) = 172/5 \text{ (cp)} \\
YP &= (\theta_{300}) - PV = 201 - 172/5 \\
&= 28/5 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
\end{aligned}$$

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها به دلیل طولانی بودن مدت زمان نیم‌پندش دوغاب سیمان (در شرایط واقعی چاه‌های میدان مارون مدت زمانی بین ۳ تا ۴ ساعت نیاز می‌باشد) از ادامه آزمایش‌ها صرف نظر شد. برای اصلاح فرمولاسیون در ترکیبات دوغاب سیمان مقدار اسیدبوریک که به عنوان افزودنی کندکننده و پراکنده‌ساز است به میزان ۰/۰۵۵ پوند بر کیسه کاهش داده شد تا بتوان به یک مدت زمان نیم‌پندش مناسب، که در این طراحی با توجه به شرایط واقعی چاه مارون در حدود ۲۰۰ دقیقه مد نظر هست رسید. لذا ترکیبات جدید دوغاب سیمان شماره دو به صورت جدول ۶-۲۲ تغییر یافت.

جدول ۶-۲۲- ترکیبات فرمولاسیون دوغاب سیمان شماره دو برای سیمان کاری لوله‌گذاری ۹ ۵/۸"

ردیف	نوع افزودنی / کلاس سیمان	مقدار مصرف	واحد
۱	سیمان کلاس E تهران	۱۱۰	پوند
۲	نمک کلرید سدیم	۱۲/۱	پوند بر کیسه سیمان
۳	هایدنس	۴۹/۵	پوند بر کیسه سیمان
۴	میکرومکس	۳۸/۵	پوند بر کیسه سیمان
۵	اسیدبوریک	۰/۰۵۵	پوند بر کیسه سیمان
۶	افزودنی الاستومر با مش ۷۰	۱۰/۴۵	پوند بر کیسه سیمان
۷	افزودنی کنترل‌کننده افت‌صافی	۰/۸۸	پوند بر کیسه سیمان
۸	افزودنی ضد مهاجرت گاز (PK)	۰/۶	گالن بر کیسه سیمان
۹	ضد کف	۰/۰۲	گالن بر کیسه سیمان
۱۰	آب	۰/۶۷۰۳	فوت مکعب
وزن مخصوص دوغاب سیمان = ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب			

پس از انجام آزمایش‌ها، مدت زمان مخلوط‌نمایی ۴۵ ثانیه، وزن مخصوص دوغاب سیمان برابر ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب معادل ۲۰/۳۲ پوند بر گالن، میزان آب آزاد دوغاب سیمان برابر ۱ سی‌سی، افت‌صافی استاتیکی ۳۰ دقیقه برابر با ۵۵ سی‌سی، انبساط حجمی ۲/۷ درصد، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته برابر ۱۷۵۰ پوند بر اینچ مربع، مدول یانگ ۱/۷ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۹ و زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان به کمک دستگاه نیم‌بندش با فشار ۱۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای گردشی ۱۸۰ درجه فارنهایت به مدت ۱۸۴ دقیقه تعیین شد. شکل ۶-۳۹ منحنی تغییرات زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همانطور که از منحنی تغییرات پیداست، گرانیروی دوغاب سیمان از زمان صفر تا ۱۷۵ دقیقه کمتر از ۳۰ سنتی پواز است و بیانگر حفظ سیالیت دوغاب سیمان با وجود اعمال دما و فشار بالا است و پس از آن مدت زمان رسیدن گرانیروی دوغاب سیمان از ۳۰ به ۷۰ سنتی‌پواز کمتر از ۱۰ دقیقه است که اصولاً به آن بندش قائمه گفته می‌شود و مانع از نفوذ گاز و سیال به درون ستون دوغاب سیمان می‌شود.



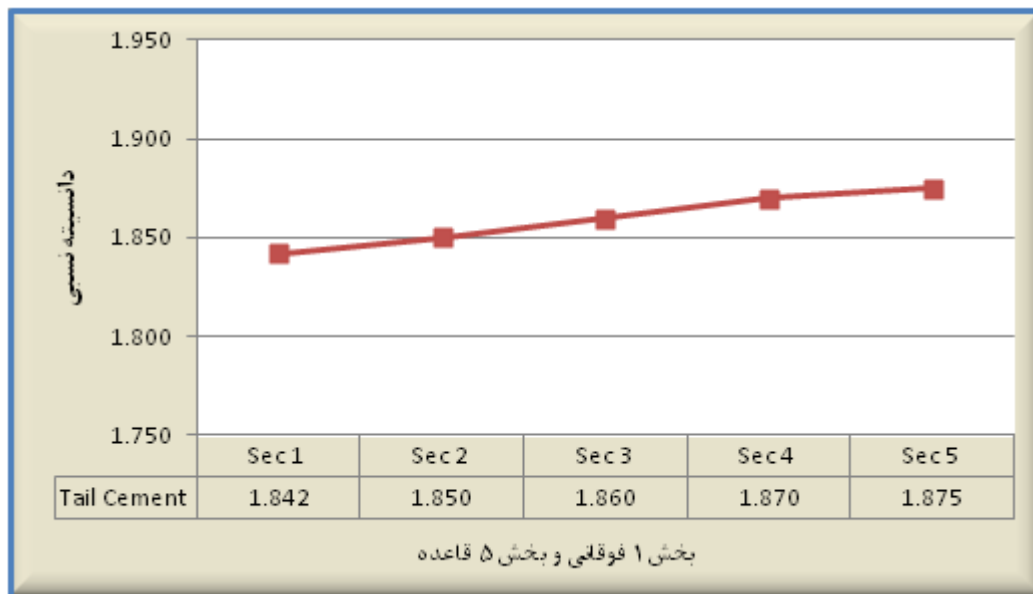
شکل ۶-۳۹- منحنی تغییرات زمان نیم‌بندش دوغاب سیمان بر حسب زمان

بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا، در یک دوغاب سیمان ایده آل برای عدم نفوذ گاز به درون ستون دوغاب سیمان این مدت زمان نبایستی بیشتر از ۲۰ دقیقه باشد، که خوشبختانه در این دوغاب سیمان این مقدار کمتر از حد استاندارد است. در ادامه آزمایش‌ها به کمک دستگاه گرانی‌سنج دوار و با پیروی از مدل بینگهام برای تعیین ویسکوزیته پلاستیک و نقطه‌واروی دوغاب سیمان اطلاعات ذیل حاصل شد:

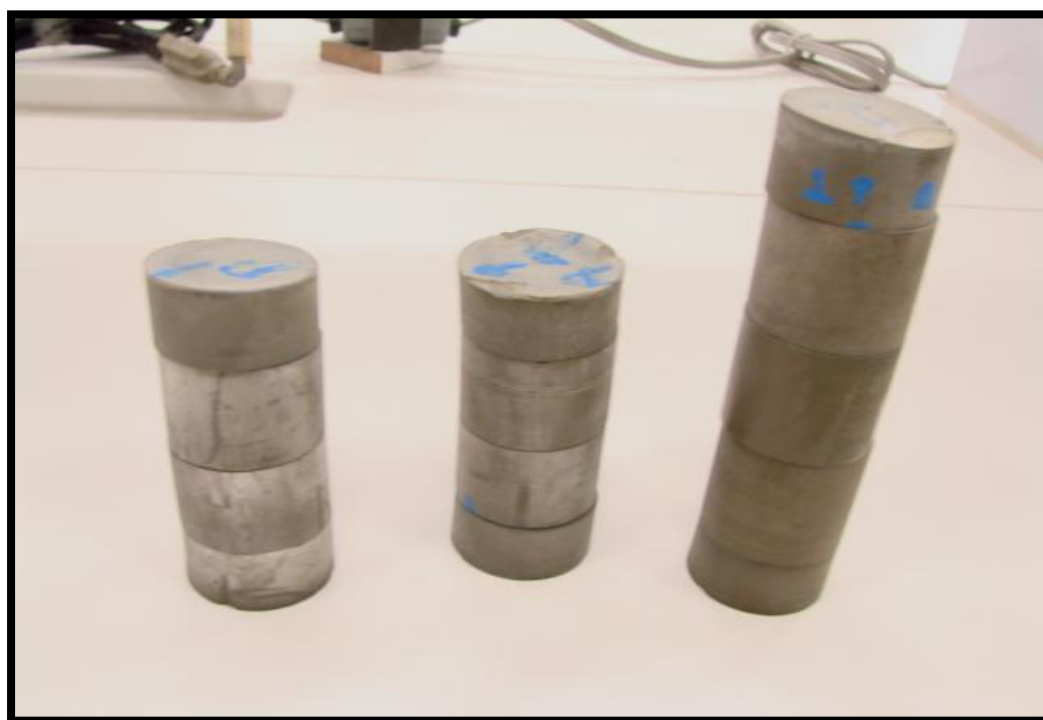
$$\begin{aligned}
 \theta_{600} &= > 300 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶۰۰} \\
 \theta_{300} &= 237 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳۰۰} \\
 \theta_{200} &= 160 & \text{عدد خوانده شده در دور ۲۰۰} \\
 \theta_{100} &= 95 & \text{عدد خوانده شده در دور ۱۰۰} \\
 \theta_6 &= 8 & \text{عدد خوانده شده در دور ۶} \\
 \theta_3 &= 4 & \text{عدد خوانده شده در دور ۳}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PV &= 1/5((\theta_{300}) - (\theta_{100})) \\
 &= 1/5(237 - 95) = 213 \text{ (cp)} \\
 YP &= (\theta_{300}) - PV = 237 - 213 \\
 &= 24 \text{ (lbf/100ft}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

همانطور که از نتایج آزمایش خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان پیداست، مقدار نقطه‌واروی برابر ۲۴ نشان‌دهنده عدم ته‌نشینی دوغاب سیمان است، چرا که در مقادیر کمتر از این مقدار با توجه به وزن بسیار بالای دوغاب سیمان ته‌نشست مواد افزا دوغاب سیمان قطعی است. برای حصول اطمینان از عدم ته‌نشینی دوغاب سیمان آزمایش پایداری انجام شد. لذا برای بررسی پایداری دوغاب سیمان می‌بایست به نتایج سه آزمایش شامل میزان آب آزاد، پروفیل پایداری و میزان افت‌صافی دوغاب سیمان رجوع کرد. همانگونه که در قسمت قبلی اشاره شد در دوغاب سنگین طراحی شده با وزن ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب میزان افت‌صافی برابر با ۵۵ سی‌سی در ۳۰ دقیقه و میزان آب آزاد برابر با ۱ سی‌سی است. با بررسی منحنی پایداری مغزه سیمانی شکل ۶-۴۰ معلوم می‌شود که اختلاف دانسیته بین بخش بالایی نمونه (بخش ۱) با بخش قاعده آن (بخش ۵) فقط در حدود ۲ پوند بر فوت مکعب می‌باشد (شکل ۶-۴۱)، که این مقدار مورد تایید بوده و پیش‌بینی انجام شده بر اساس نتایج، خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان را تایید می‌کند.



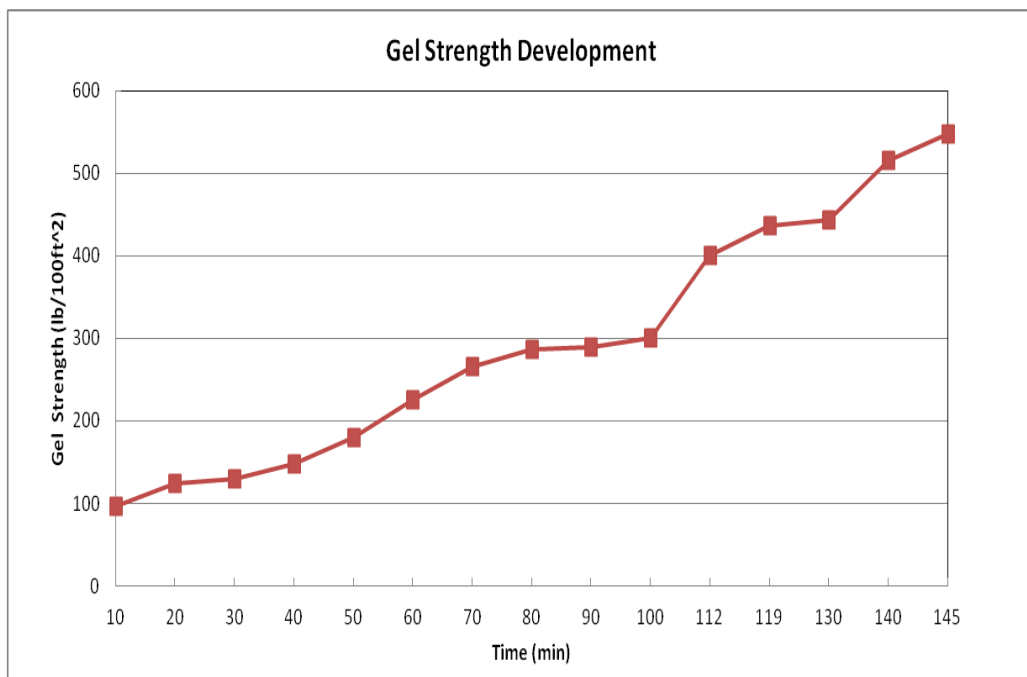
شکل ۶-۴۰- پروفیل پایداری سنگ سیمان سنگین وزن شماره دو



شکل ۶-۴۱- نمونه‌های مغزه سیمان سنگین وزن برای اندازه‌گیری میزان پایداری سنگ سیمان

برای بررسی میزان نفوذ گاز در ستون دوغاب در ابتدا بایستی مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان تعیین گردد. مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان به دو روش مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم دوغاب سیمان پس از رسیدن به دما و فشار انتهایی چاه و شبیه‌سازی شرایط پمپاژ و جابجایی

دوغاب سیمان در اطراف لوله‌جداری، دوغاب سیمان بصورت استاتیک در آمده و در بازه‌های زمانی مشخص تنش برشی به دوغاب سیمان اعمال شده و میزان ژل‌شدگی سیمان بر حسب $\frac{lbf}{100 ft^2}$ اندازه‌گیری می‌شود. میزان تنش برشی اعمال شده برابر با گردش ابزار اعمال کننده نیرو به مقدار $0/25$ دور در دقیقه می‌باشد. در روش غیرمستقیم از امواج ماوراء صوت با مکانیزی مشابه اندازه‌گیری مقاومت فشاری استفاده می‌شود. بدین ترتیب که سرعت عبور موج در داخل دوغاب سیمان اندازه‌گیری شده و سپس توسط روابط تجربی که در نرم افزار دستگاه موجود است بر حسب ژل بیان می‌شود. در آزمایشگاه پژوهشگاه صنعت نفت از روش مستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت ژلهای استفاده می‌شود. شکل شماره ۶-۴۲ منحنی تغییرات مقاومت ژلهای بر حسب زمان تحت دمای استاتیک انتهایی چاه برابر با 180 درجه فارنهایت را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۴۲- منحنی تغییرات مقاومت ژلهای دوغاب سیمان شماره دو

نتایج آزمایش مقاومت ژلهای به عنوان ورودی اطلاعات برای محاسبات آزمایش مهاجرت گاز استفاده می‌گردد. در حقیقت از داده‌های مقاومت ژلهای برای محاسبه تغییرات فشار منفذی سیمان طی

آزمایش مهاجرت گاز استفاده می‌شود. هرگاه فشار منفذی دوغاب سیمان برابر با فشار سازند دارای گاز گردد شرایط برای مهاجرت گاز فراهم شده و عملیات تزریق گاز به دوغاب سیمان داخل سلول دستگاه آغاز می‌شود.

برای انجام آزمایش مهاجرت گاز، شرایط فرضی چاه مورد مطالعه در میدان مارون- سازند گچساران که در شکل ۶-۴۳ نشان داده شده است را برای عملیات سیمان‌کاری با سیمان الاستیک شماره دو با اطلاعات ذیل در نظر گرفته شده است:

وزن گل حفاری: ۱۹/۸ پوند بر گالن

وزن مخصوص دوغاب سیمان: ۲۰/۳ پوند بر گالن

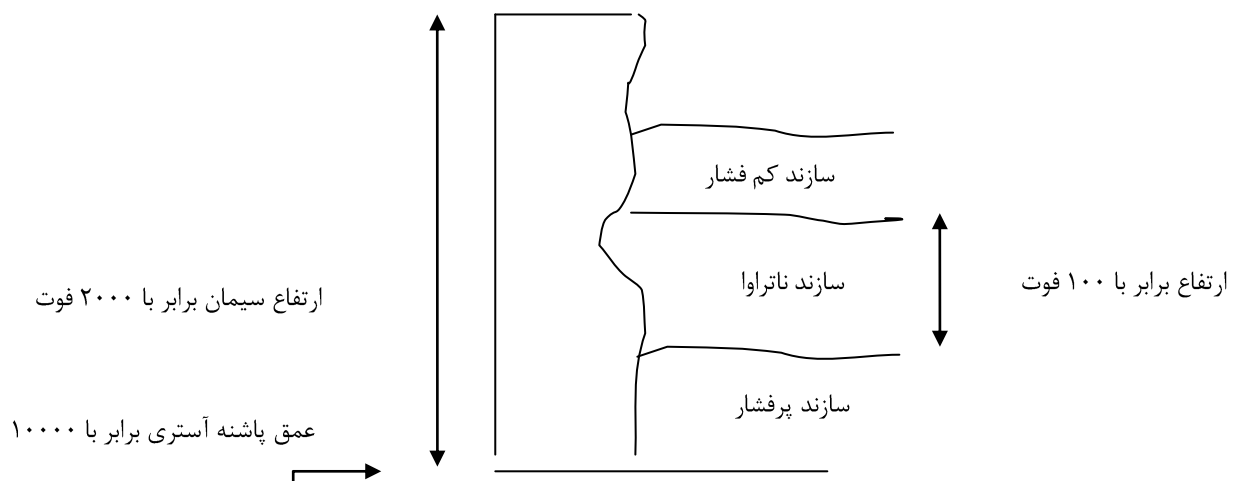
اندازه لوله آستری: ۷ اینچ

قطر چاه باز: ۸ ۱/۲ اینچ

عمق پاشنه آستری: ۱۰۰۰۰ فوت

ارتفاع سیمان از پاشنه آستری: ۲۰۰۰ فوت

فشار سازند پرفشار دارای گاز: ۹۵۰۰ psi



شکل ۶-۴۳- شرایط و مشخصات فرضی چاه مورد مطالعه

همانگونه که در شرایط ارائه شده فوق مشخص است هدف از سیمان کاری این مقطع ایجاد جداسازی منطقه‌ای بین دو سازند پرفشار و کم فشار گازی توسط سیمان الاستیک از طریق جلوگیری از مهاجرت گاز از منطقه پرفشار به کم فشار می‌باشد.

برای انجام آزمایش مهاجرت گاز ابتدا محاسبات لازم ذیل انجام خواهند شد:

فشار هیدرواستاتیک گل حفاری:

$$p_m = 8000 \times 19.8 \times 0.052 = 8236 \text{ psi} \quad (1-6)$$

فشار هیدرواستاتیک سیمان در برابر سازند پرفشار :

$$p_c = p_m + (2000 \times 20.3 \times 0.052) = 8236 + 2111 = 10347 \text{ psi} \quad (2-6)$$

افت فشار سیمان در هر لحظه از آزمایش به علت ژل شدن:

$$p_r = \frac{GS \times L}{300 \times D} \quad (3-6)$$

که در آن :

GS: مقاومت ژله‌ای در هر لحظه

L: طول ستون سیمان بر حسب فوت

D: ابعاد فضای حلقوی چاه بر حسب اینچ

سپس محاسبات مربوط به تغییرات فشار منفذی سیمان طی زمان آزمایش طبق جدول ۶-۲۳ انجام شده تا زمان مناسب برای شروع فرآیند تزریق گاز به سیمان مشخص شود. در جدول ۶-۲۳، ستون اول و دوم مربوط به آزمایش مقاومت ژله‌ای هستند. ستون سوم فشار هیدرواستاتیک سیمان در هر لحظه از زمان در برابر سازند دارای گاز بوده که از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$p_{ch(t)} = p_c - p_r \quad (4-6)$$

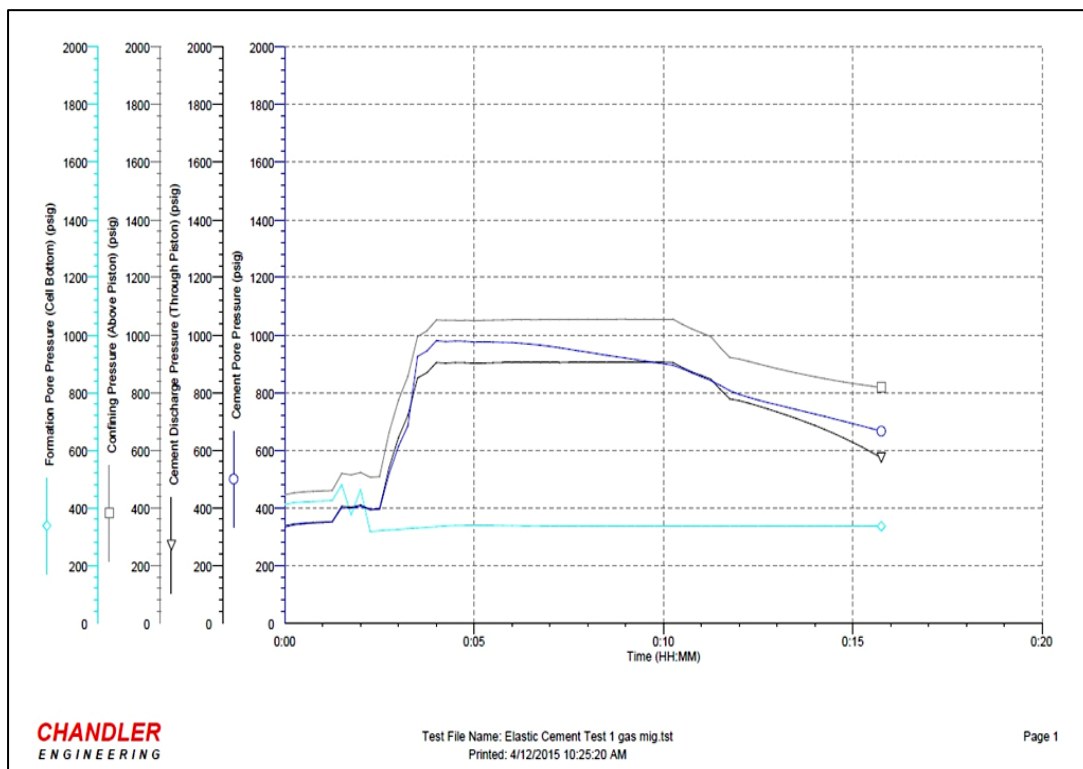
برای محاسبه فشار منفذی سیمان (ستون چهارم) کافی است اختلاف میان نتایج ستون سوم و فشار سازند گازی را (در اینجا ۹۵۰۰ پوند بر اینچ مربع) با فشار مندرج در ستون پنجم (فشار سازند در دستگاه) جمع شود. لازم به ذکر است به علت مسائل ایمنی و آسیب‌های وارده به دستگاه، فشار واقعی سازند که در اینجا برابر با ۹۵۰۰ psi می‌باشد برابر با ۳۰۰ psi در نظر گرفته می‌شود و بقیه محاسبات به همین نسبت انجام می‌گیرد.

جدول ۶-۲۳- محاسبات مربوط به آزمایش مهاجرت گاز در سیمان الاستیک شماره دو

Time (min)	Slurry G.S (Lbf/100ft ²)	P _{ch(t) across G.Z} (psi)	Cement Pore Pressure (psi)	Gas Zone Pressure (psi)
۰	۰	۱۰۳۴۴	۱۱۴۴	۳۰۰
۵	۵۰	۱۰۱۲۲	۹۲۲	۳۰۰
۱۰	۹۷	۹۹۱۳	۷۱۳	۳۰۰
۲۰	۱۲۴	۹۷۹۳	۵۹۳	۳۰۰
۳۰	۱۳۰	۹۷۶۶	۵۶۶	۳۰۰
۴۰	۱۴۸	۹۶۸۶	۴۸۶	۳۰۰
۵۰	۱۸۰	۹۵۴۴	۳۴۴	۳۰۰
۶۰	۲۲۶	۹۳۴۰	۱۴۰	۳۰۰
۷۰	۲۲۶	۹۱۶۲	-۳۸	۳۰۰
۸۰	۲۸۷	۹۰۶۸	-۱۳۲	۳۰۰
۹۰	۲۹۰	۹۰۵۵	-۱۴۵	۳۰۰
۱۰۰	۳۰۱	۹۰۰۶	-۱۹۴	۳۰۰
۱۱۲	۴۰۰	۸۵۶۶	-۶۳۴	۳۰۰
۱۱۹	۴۳۶	۸۴۰۶	-۷۹۴	۳۰۰
۱۳۰	۴۴۴	۸۳۷۱	-۸۲۹	۳۰۰
۱۴۰	۵۱۵	۸۰۵۵	-۱۱۴۵	۳۰۰

با توجه به جدول فوق الذکر پس از گذشت ۵۰ دقیقه، فشار منفذی سیمان به فشار سازند دارای گاز نزدیک شده و می‌توان فرآیند تزریق را آغاز کرد. تغییرات فشار منفذی سیمان پس از این لحظه صرفاً به صورت عددی محاسبه شده است ولی در عمل تغییرات آن بسته به میزان نفوذ گاز طی این مرحله

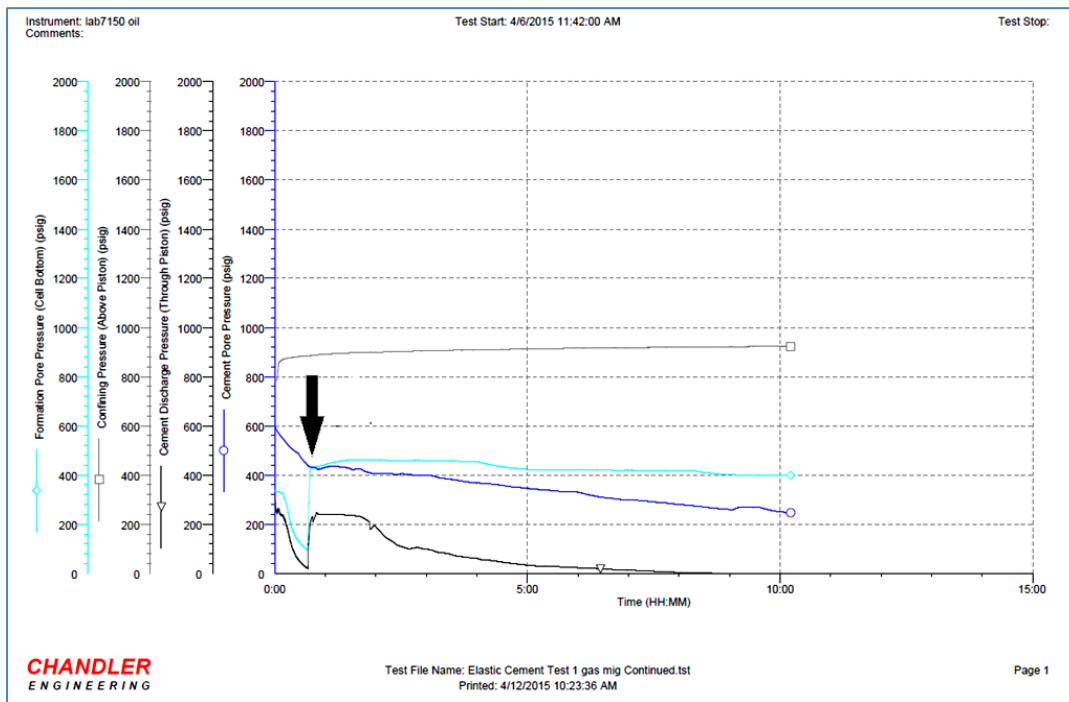
متفاوت خواهد بود. پس از انجام محاسبات لازم برای تعیین زمان نفوذ دادن گاز به داخل سیمان، آزمایش مهاجرت گاز انجام می‌شود. در بخش اول این آزمایش، پس از اعمال فشار هیدرواستاتیک ستون سیمان بر آن، آزمایش اقتصافی انجام می‌شود تا شرایط سیمان داخل چاه شبیه‌سازی شود. همراه با اقتصافی و توسعه ژل در دوغاب سیمان، فشار منفذی مطابق محاسبات انجام شده افت می‌کند. در شکل ۴۴-۶ منحنی تغییرات فشار منفذی سیمان طی آزمایش مهاجرت گاز در بخش اول را نشان می‌دهد.



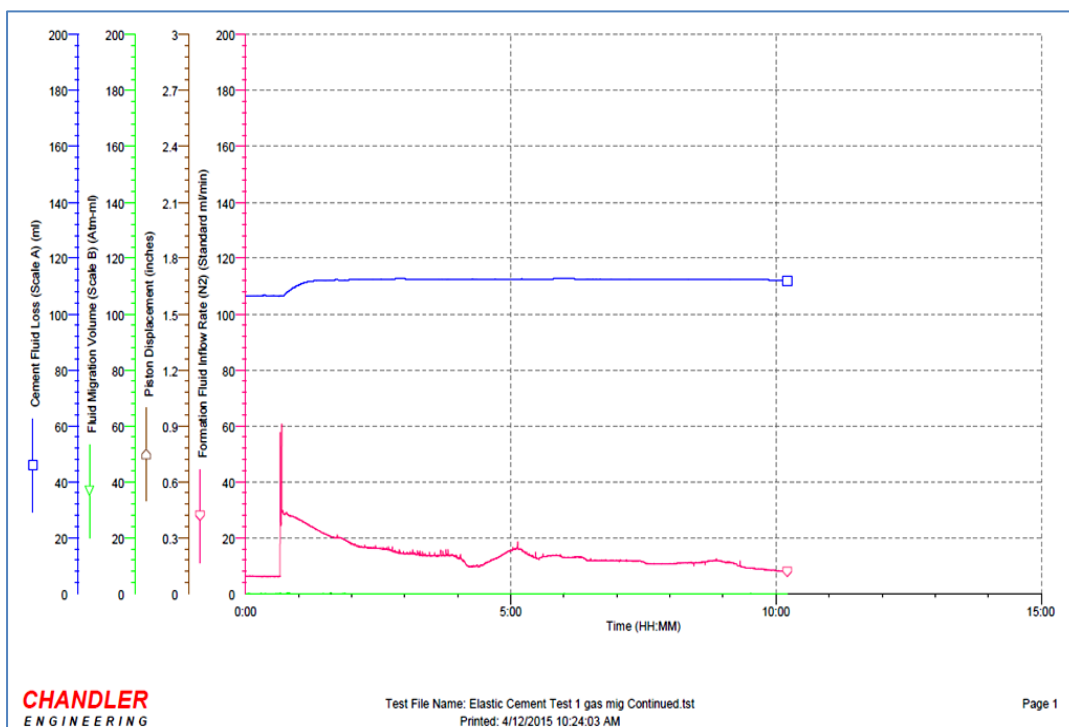
شکل ۴۴-۶- منحنی تغییرات فشار منفذی سیمان الاستیک شماره دو در بخش اقتصافی آزمایش مهاجرت گاز منحنی آبی رنگ، تغییرات فشار منفذی دوغاب سیمان را نشان می‌دهد. منحنی فیروزه‌ای رنگ فشار سازند پرفشار گازی را نشان می‌دهد. فشار سازند گازی برابر با ۳۰۰ psi در نظر گرفته شده است. در بخش دوم آزمایش مهاجرت گاز، پس از برابر شدن فشار منفذی سیمان با فشار سازند پرفشار گازی، عملیات تزریق گاز نیتروژن به داخل دوغاب سیمان انجام می‌شود.

شکل ۴۵-۶ منحنی تغییرات فشار منفذی سیمان پس از تزریق را نشان می‌دهد. در زمان شروع تزریق (محل فلش) فشار منفذی سیمان با فشار سازند پرفشار گازی (فشار تزریق) برابر است. به مرور زمان و با استحکام بیشتر ژل در داخل دوغاب سیمان فاصله منحنی فشار منفذی سیمان از منحنی تزریق بیشتر شده که این مسئله بیانگر عدم نفوذ گاز در داخل سیمان است زیرا در صورت نفوذ، فشار منفذی سیمان با فشار تزریق تقریباً برابر و یا بیشتر می‌شد.

شکل شماره ۴۶-۶ بیانگر میزان نفوذ گاز در داخل ستون دوغاب سیمان است. همانگونه که مشاهده می‌شود میزان نفوذ گاز در داخل دوغاب سیمان با گذشت زمان کاهش می‌یابد که این امر با تغییرات نمودار شکل ۴۵-۶ هم سازگاری دارد. پیک موجود در منحنی قرمز رنگ لحظه اول تزریق را نشان می‌دهد. ولی با گذشت زمان که مقاومت ژلهای رشد کرده است (شکل ۴۲-۶) فشار منفذی سیمان افت کرده (شکل ۴۵-۶) و میزان نفوذ گاز در سیمان روند کاهشی را طی ۱۰ ساعت داشته است (شکل ۴۶-۶). با توجه به نمودار مقاومت فشاری سیمان، طی این مدت سیمان به حالت سنگ درآمد و با توجه به روند کاهشی میزان نفوذ گاز در سیمان (شکل ۴۶-۶) احتمال وجود کانال و یا انقباض و جمع‌شدگی سیمان پشت لوله‌جداری (سلول دستگاه) منتفی می‌باشد.

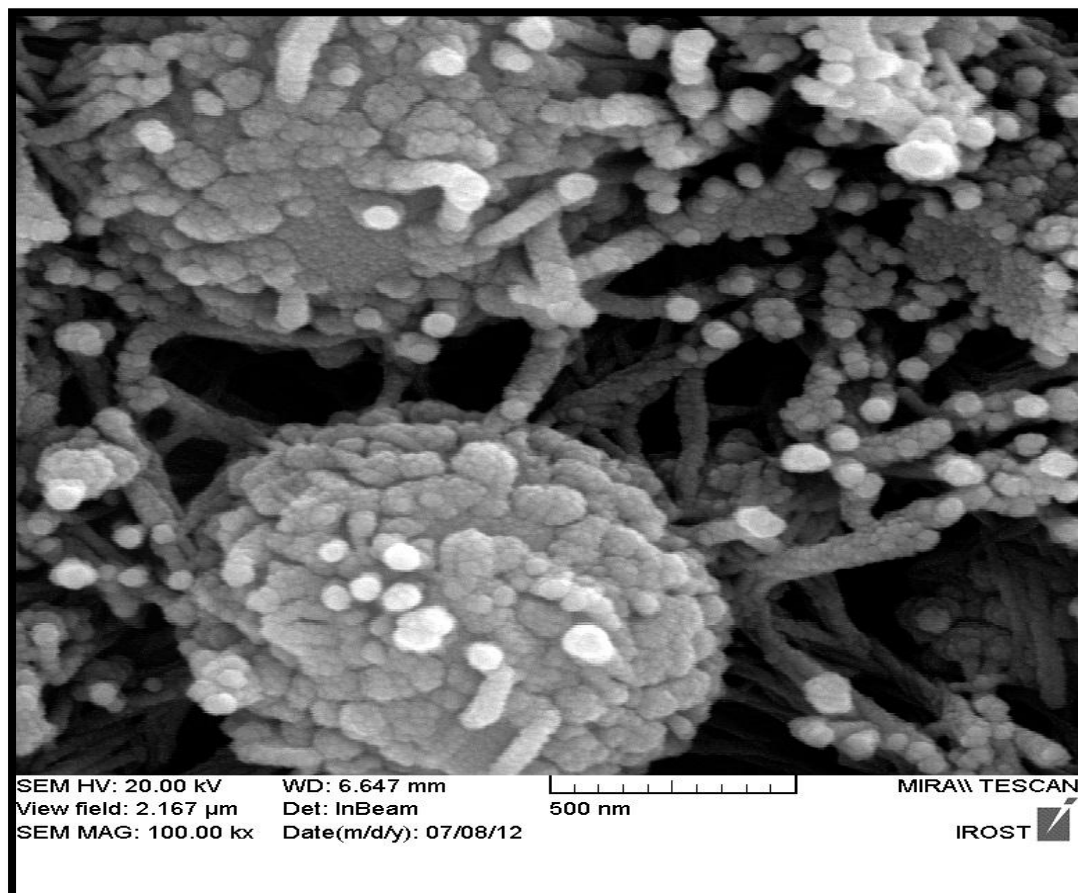


شکل ۴۵-۶- منحنی تغییرات فشار منفذی پس از تزریق گاز به داخل دوغاب سیمان الاستیک شماره ۲



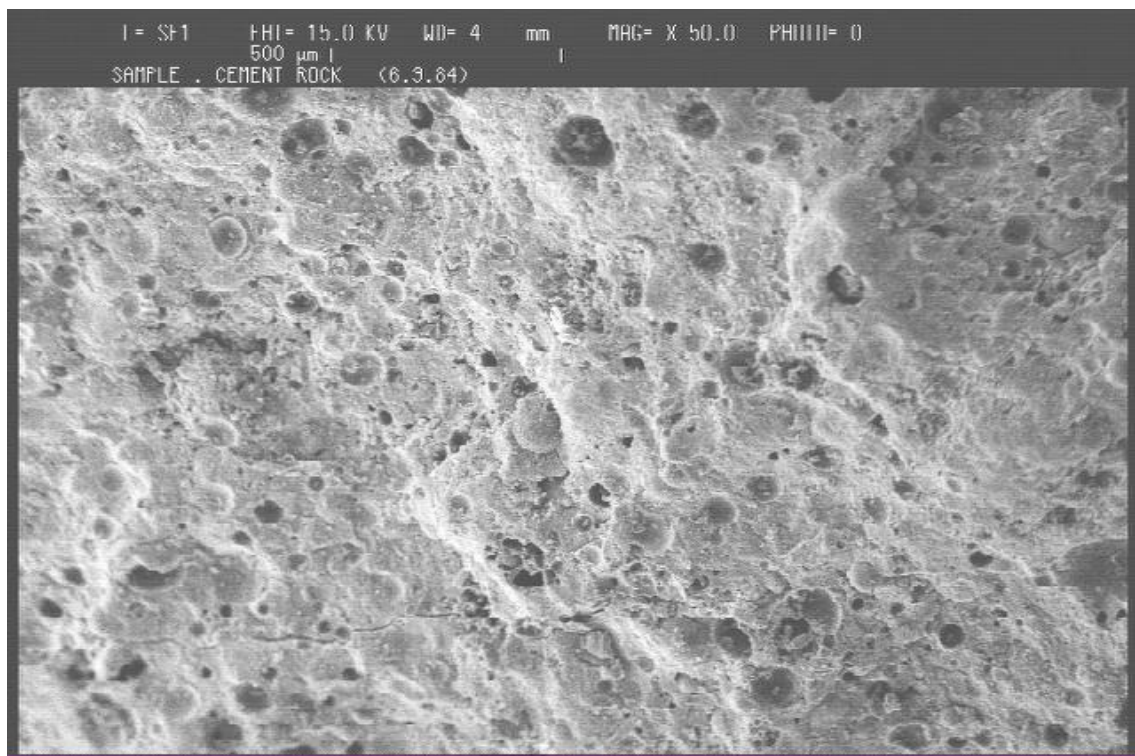
شکل ۴۶-۶- منحنی تغییرات میزان نفوذ گاز در دوغاب سیمان الاستیک شماره ۲ (منحنی قرمز رنگ)

به منظور بررسی دقیق ارتباط بین ذرات الاستومر و سیمان، با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی تصویری در مقیاس بالا از سنگ سیمان تهیه شد. شکل ۶-۴۷ تصویر الکترونیکی سنگ سیمان را نشان می‌دهد. در این شکل یک ساختار توده‌ای مشاهده می‌شود که البته ذرات کروی با ابعاد مختلف به طور نامنظم در اطراف آن پراکنده می‌باشند و هیچ پوشش سیمانی آن‌ها را فرا نگرفته است. علاوه بر این، ذرات الاستومر را می‌توان تشخیص داد که بین ذرات حالت پل زدگی ایجاد کرده‌اند. این پل زدگی‌ها که در شکل ۶-۴۷ قابل رؤیت است، می‌تواند قسمتی از بارهای وارد شده به نمونه‌ها را منتقل کرده و همچنین قسمتی از نیروهای کششی را تحمل کرده و در برابر ایجاد یا گسترش ریز ترک‌ها جلوگیری به عمل آورد. همانطور که در شکل ۶-۴۷ مشخص شده است، الاستومرها به عنوان پل‌هایی بر روی ترک‌ها و حفره‌ها عمل می‌کنند و بنابراین انتقال نیرو در حالت تنش را تضمین می‌کنند.



شکل ۶-۴۷- تصویر تهیه شده سنگ سیمان حاوی الاستومر با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی

به دلیل حضور گروه‌های اسید کربوکسیلیک بر روی سطوح الاستومرها، یک واکنش شیمیایی بین اسید کربوکسیلیک و هیدرات سیلیکات کلسیم یا Ca(OH)_2 اتفاق می‌افتد. این واکنش‌ها منجر می‌شود به یک نیروی کووالانسی قوی بین سطوح تقویت کننده و خمیره در ترکیب سیمانی و بنابراین کارایی انتقال نیرو از خمیره سیمان به ذرات الاستومر را افزایش می‌دهد که در نتیجه موجب کاهش مقاومت تراکمی سیمان، مدول یانگ و افزایش ضریب پواسون سنگ سیمان می‌شود. شکل ۶-۴۸ تصویر الکترونیکی سنگ سیمان حاوی نانو ذرات اکسید آهن را نشان می‌دهد. نانو ذرات اکسید آهن به علت سطح ویژه فوق العاده زیاد و اندازه ذرات بسیار کوچک سبب تغییر در واکنش هیدراتاسیون سیمان می‌گردد و علاوه بر آن با قرار گرفتن در بین فضاهای خالی موجود در بافت سیمان سبب پر کردن بخشی از آن شده و همچنین سبب تحمل یا انتقال بخشی از نیروهای وارد شده به سنگ سیمان می‌شود.



شکل ۶-۴۸- تصویر تهیه شده سنگ سیمان حاوی نانو اکسید آهن با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی

اما در استفاده از هر دو افزایه شاهد بهبود مقاومت انعطافی (کاهش مدول یانگ و افزایش ضریب پواسون) بوده‌ایم. بنابراین و با توجه به ریز ساختار نشان داده شده در تصاویر SEM می‌توان دریافت که این افزایش‌ها ناشی از دو مکانیزم کاملاً متفاوت می‌باشد. نانو ذرات اکسید آهن با تغییر در واکنش هیدراتاسیون سیمان توانسته است که به سیمان بافتی منسجم و مستحکم‌تر بدهد و لذا بدین صورت مقدار مقاومت انعطافی بهبود یافته است. اما افزایه الاستومر با مش ۷۰ موجب گشته است که ذرات در بین دانه‌های سیمان حالت پل‌زدگی پیدا کنند و بدین طریق سبب انتقال بخشی از نیروهای وارد شده بر سنگ سیمان گشته است. لازم به ذکر است از آنجایی که تعداد افزودنی‌های تشکیل‌دهنده ترکیبات دوغاب سیمان بسیار زیاد می‌باشد و از طرفی هر کدام از این افزودنی‌ها از چندین جزء تشکیل شده است و بیشتر آنها از خانواده پلیمرها می‌باشند، لذا از طریق SEM تهیه شده از سنگ سیمان، نمی‌توان به طور دقیق اثر آنها را روی خصوصیات سنگ سیمان به صورت مجزا بررسی کرد، چون این مواد با سایر افزودنی‌های موجود در ترکیبات دوغاب سیمان سبب واکنش جدید می‌شود که اصولاً در بررسی‌های کاربردی افزودنی‌ها، به راحتی می‌توانیم آن را مشاهده کنیم. به عنوان مثال با افزودن لاتکس به ترکیبات دوغاب سیمان اثر افزودنی ریتارد در فرمولاسیون دوغاب سیمان کم رنگ‌تر شده و موجب ایجاد مدت زمان بندش کوتاه‌تری می‌گردد. لذا به نظر می‌رسد فقط در حالتی که اثر افزودنی‌های مورد مطالعه از نظر فعل و انفعالات شیمیایی با سایر افزودنی‌ها خنثی باشند در چنین حالتی می‌توانیم اثر آن را از طریق SEM روی خصوصیات سنگ سیمان مطالعه نماییم.

۶-۱۴- جمع‌بندی

با بررسی‌های بعمل آمده بر روی دوغاب سیمان سنتی و مرسوم در چاه‌های مورد مطالعه، مشخص شده است که تمامی فرمولاسیون دوغاب سیمان بکارگرفته شده در چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون از کیفیت مطلوبی برخوردار نبوده، لذا برای طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مطلوب در ابتدا اصلاحات مورد نظر بر روی دوغاب سیمان سنتی و مرسوم انجام شد و سپس افزودنی‌های مختلف

الاستیک و منبسط‌کننده به دوغاب سیمان اصلاح شده اضافه شد، که نتایج آن در جدول ۶-۲۴ خلاصه گردیده است. همانطور که از جدول ذیل کاملاً مشهود است، از بین افزودنی‌های مختلف بکار گرفته شده در دوغاب سیمان اصلاح شده، افزودنی الاستومر با مش ۷۰ تاثیر بسیار خوبی بر روی رفتار مکانیکی و انبساط سنگ سیمان داشته است، لذا این افزودنی برای ادامه کار در طراحی و فرمولاسیون دوغاب سیمان مطلوب در شرایط واقعی چاه استفاده شده است. با استفاده از این افزودنی دوغاب سیمانی با وزن ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب در شرایط واقعی چاه فرمولاسیون و آزمایش گردید. پس از اندازه‌گیری مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان، برای انجام آزمایش مهاجرت گاز، شرایط فرضی چاه مورد مطالعه در میدان مارون- سازند گچساران که در شکل ۶-۴۳ نشان داده شده است را برای عملیات سیمان‌کاری در نظر گرفته شد و در نهایت مشخص گردید که دوغاب سیمان مطلوب شماره دو (که شامل افزودنی الاستومر با مش ۷۰ می‌باشد) می‌تواند در برابر نفوذ و مهاجرت گاز کاملاً مقاوم باشد.

جدول ۶-۲۴- رفتار مکانیکی سیستم‌های مختلف سیمان الاستیک طراحی شده با افزودنی‌های مختلف

سیستم دوغاب سیمان	وزن مخصوص دوغاب (پوند بر فوت مکعب)	افزایه الاستیک‌کننده (درصد وزنی سیمان)	مقاومت فشاری ۲۴ ساعته (پوند بر اینچ مربع)	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	نسبت پواسون	درصد انبساط طولی (۳ روز)
چاه ۱۷۹	۱۴۹	-	۲۱۵۷	۲/۴۳	۰/۰۳	-
اصلاح شده	۱۴۹	-	۳۶۹۰	۲/۸۶	۰/۰۴	صفر
هایدنس	۱۵۵	۷۰	۳۵۷۰	۳/۱۸	۰/۰۴	-
گیلسونایت	۱۴۲	۹	۲۵۵۰	۲/۶۵	۰/۰۶	-
نانو ذرات اکسید آهن	۱۴۷	۳	۲۹۴۵	۲/۴	۰/۰۶	۰
	۱۴۶	۶	۲۳۴۱	۲/۱۵	۰/۱۴	۰/۲
	۱۴۴	۹	۱۲۷۶	۲	۰/۲۲	۰/۵
نانو ذرات سیلیس	۱۴۷	۳	۳۲۲۲	۴/۹	۰/۰۵	-
الاستومر ساخت داخل با مش ۵۰	۱۴۷	۳	۳۱۰۰	۲/۷۶	۰/۰۶	۰/۹
	۱۴۵	۶	۲۷۷۰	۲/۴۸	۰/۱۶	۱/۹
	۱۴۳	۹	۲۱۵۰	۱/۹۴	۰/۲۵	۲/۵
	۱۴۱	۱۲	۱۹۰۰	۱/۷۶	۰/۳۱	۳
الاستومر ساخت داخل با مش ۷۰	۱۳۶	۱۲	۱۵۵۰	۱/۶۶	۰/۳۱	۲/۹
فرمولاسیون نهایی با الاستومر مش ۷۰	۱۵۲	۹/۵	۱۷۵۰	۱/۷	۰/۲۹	۲/۷

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- تفسیر و نتیجه‌گیری

لوله‌های جداری، در حین سیمان‌کاری و یا پس از آن در طی عمر یک چاه، در معرض نیروهای هیدرواستاتیکی ناشی از سیالات مختلف، مانند سیالات حفاری و یا سیالات سازند، و نیروهای القاء شده از محیط اطراف چاه مانند نیروهای غیر یکنواخت ناشی از حرکت لایه‌های نمکی قرار دارند. چنانچه نیروهای وارده بر دیواره خارجی لوله‌های جداری از مقاومت آنها بیشتر شود، لوله‌های جداری تحت دوپهن‌شدگی قرار می‌گیرند. از آنجا که پدیده دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری عواقب بسیار وخیمی را به دنبال داشته و هزینه‌های هنگفتی را بر صنعت نفت تحمیل می‌کند، لذا شناسایی آن حائز اهمیت می‌باشد. سال‌هاست که دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری در میدان مارون سازند گچساران به سبب حرکت لایه‌های نمکی به صنعت نفت گزارش می‌شود. شدت دوپهن‌شدگی‌های گزارش شده متفاوت بوده و می‌تواند بلافاصله پس از نصب لوله‌جداری اتفاق بیافتد. در برخی موارد لوله‌جداری کاملاً خم شده و یا تغییر شکل اندکی یافته است و در موارد دیگر در قطر لوله به‌واسطه نیروهای خارجی به‌قدری جمع‌شدگی ایجاد شده که دیگر امکان فرستادن رشته مغزی به داخل چاه امکان پذیر نبوده است. در شرایط بحرانی‌تر، که کم‌تعداد نیز نمی‌باشند، دوپهن‌شدگی کامل اتفاق افتاده است. یکی از فرایندهای مهمی که می‌تواند باعث گسیختگی غلاف سیمانی و در شرایط حادثه‌تر موجب دوپهن‌شدگی رشته جداری شود، خزش لایه‌ها و بارگذاری آنها بر روی سیمان و لوله‌جداری می‌باشد. لایه‌های نمکی دارای چنین خصوصیتی هستند. سنگ‌های نمکی در مقایسه با دیگر سنگ‌های رسوبی متداول، ویژگی‌های مکانیکی پایینی دارند. مقاومت نمک تحت تأثیر افزایش دما کم می‌شود. در عمق‌های بیشتر از ۳۰۰۰ فوت، خزش نمک بسیار مهم می‌شود و برای بسته شدن چاه‌هایی که هنوز لوله گذاری نشده‌اند، کافی است. در غیاب فعالیت‌های تکتونیکی و انتقال ناحیه‌ای نمک، تنش‌های برجا در چاه‌های عمیق، ایزوتروپیک است. این تنش برجا برابر تنش روباره در سازند می‌باشد. خزش شعاعی نمک برای برگرداندن تعادل اولیه‌ای که قبل از حفاری سازند موجود بود، می‌تواند منجر به تنوعی از بارگذاری‌ها مانند بارهای نقطه‌ای، غیریکنواخت و خمشی شود.

بارگذاری‌های غیر یکنواخت به وسیله فاکتورهای دیگری مانند تغییر در انحنای چاه، سرعت خزش نمک، هندسه لوله، سختی و کشش لوله تقویت می‌شود. اعمال چنین بارهایی بر روی سیمان می‌تواند باعث گسیختگی سیمان و در شرایط حادثه‌تر موجب دوپهن شدگی لوله‌جداری شود. آسیب رسیدن لوله‌جداری و یا اعمال فشار به درون فضای حلقوی که از گسیختگی غلاف سیمان حاصل می‌شوند، می‌تواند منجر به بسته شدن چاه و یا انجام عملیات درمانی پر هزینه شود. وقایع دیگر مانند از دست دادن تولید هیدروکربورها، تولید سیال ناخواسته (آب) و رشد ابزار سرچاهی، اثر منفی بر روی ایمنی و اقتصاد چاه‌های نفت و گاز می‌گذارد. زیرا عملیات درمانی بسیار پر هزینه هستند و حتی در برخی موارد این عملیات امکان پذیر نمی‌باشند.

مطالعات انجام شده در میدان مارون نشان داده است که سیمان‌های متداول استفاده شده در صنعت که اصولاً دوغاب‌هایی با وزن مخصوص بالاتر از ۱۴۰ پوند بر فوت مکعب می‌باشند، سیمان‌هایی با مقاومت فشاری و خاصیت شکنندگی بالا هستند. چنین سیمان‌هایی در برابر تنش‌های اعمال شده، تغییر شکل کمی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه بر اثر تغییر دما و فشار، تنش‌های به وجود آمده در این سیمان‌ها شدید خواهد بود و ممکن است برای گسیختگی سنگ سیمان کافی باشد. سیمان‌های شکننده دارای مدول یانگ بالا و نسبت پواسون پایینی هستند. برای رفع این مشکل بایستی سیمان‌هایی طراحی شوند که بر اثر اعمال تنش، کرنش بیشتری از خود نشان دهند، البته این تغییر شکل باید برگشت‌پذیر باشد یعنی در محدوده رفتار الاستیک سیمان رخ دهد. چنین سیستم‌های سیمانی دارای مدول یانگ پایین و نسبت پواسون بالایی هستند. همچنین سیستم‌های رایج سیمان مورد استفاده، اگر چه با مقاومت فشاری بالا بودند ولی فاقد خصوصیات لازم شامل افت‌صافی کم، آب آزاد در حد صفر، خواص رئولوژیکی بسیار خوب، عدم کاهش حجم، مقاومت ژله‌ای مناسب، زمان نیم بندش قائمه، دوغاب سیمان پایدار و مقاوم در برابر نفوذ و مهاجرت گاز می‌باشند. اکثر کشورهای صنعتی صاحب تکنولوژی، برای کاهش مدول یانگ سیمان و در پی آن کاهش تنش القایی، سیستم‌های جدید سیمانی طراحی کرده‌اند که دارای وزن مخصوص بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ پوند بر فوت

مکعب می‌باشند. با وجود آنکه چنین راه‌کارهایی می‌تواند موفقیت آمیز باشد اما بسیاری از مناطق نفتی سراسر دنیا خصوصاً در ایران سازند گچساران میدان مارون، به دلیل تأمین فشار برای کنترل چاه و یا پایداری دیواره چاه، نیازمند سیستم‌های سیمانی با دانسیته بالا در محدوده وزنی بین ۱۴۰ تا ۱۵۵ پوند بر فوت مکعب و با قابلیت انبساط حجمی ۳ درصد (حداکثر کاهش حجم دوغاب سیمان در اثر هیدراتاسیون ذرات سیمان ۳ درصد می‌باشد) می‌باشند. نتایج حاصل از ارزیابی خواص رئولوژیکی دوغاب‌های سیمان طراحی شده در چاه‌های شماره ۱۷۳، ۱۷۴ و ۱۷۹ که پدیده دوپهن‌شدگی لوله‌های جداری در آنها مشاهده شده و چاه‌های ۲۶۳، ۲۶۵ و ۲۶۶ سازند گچساران میدان مارون که مشکل نشت آب نمک از پاشنه لوله‌های جداری داشته‌اند موید نامناسب بودن کیفیت دوغاب‌های به کار گرفته شده می‌باشند. بر اساس نتایج به دست آمده پایین بودن نقطه‌واروی نمایانگر سیالیت بیش از حد دوغاب و در نتیجه احتمال دو فاز شدن آن و میزان بالای آب آزاد آن نشانگر مصرف بیش از اندازه آب در ساختار دوغاب سیمان می‌باشد. در کلیه دوغاب‌های طراحی شده، ته‌نشینی زیاد افزودنی وزن افزا هایدنس موجب دو فاز شدن دوغاب‌ها می‌شود. در پی تهیه نمونه استوانه‌ای عمل‌آوری شده در شرایط شبیه‌سازی چاه، از دوغاب مصرفی در چاه مارون شماره ۱۷۹ و انجام مغزه‌گیری از سه قسمت مساوی در طول نمونه مشخص شد که وزن مخصوص و رفتار مکانیکی مغزه‌ها متفاوت می‌باشند. مغزه گرفته شده از قسمت تحتانی دارای مقادیر بسیار بالایی از وزن افزا می‌باشد که خود موجب افزایش بیش از حد وزن مخصوص دوغاب و کاهش مقاومت فشاری سنگ سیمان قرار گرفته در بخش تحتانی فضای حلقوی می‌شود. به طوری که مقاومت شکست مغزه تحتانی کمتر از مقاومت شکست مغزه گرفته شده از قسمت میانی نمونه استوانه‌ای می‌باشد. چنین نتایجی فرضیه احتمال شکست غلاف سیمانی به سبب نیروهای وارده از جانب سازند نمکی و در پی آن احتمال دوپهن‌شدگی رشته‌جداری در بخش پایینی ناحیه سیمان شده را قوت می‌بخشد. با اصلاح سیستم دوغاب سیمان مورد استفاده در چاه مارون ۱۷۹ خواص رئولوژیکی مناسبی حاصل شد که علاوه بر کاهش آب آزاد، فاقد ته‌نشینی مواد وزن افزا می‌باشد. سیمان تهیه شده همگن بوده و از استحکام بالایی برخوردار می‌باشد.

آزمایش‌های مکانیکی نشان از صلبیت سیمان ساخته شده و پایین بودن الاستیسیته آن دارد. افزودن یک فاز الاستیک به فاز صلب سیمان می‌تواند مجموعه سیستم را به سمت بهبود خواص الاستیکی، یعنی کاهش مدول یانگ و افزایش نسبت پواسون هدایت کند. با کاهش مدول یانگ سیمان، می‌توان کرنش‌های برگشت‌پذیر بیشتری را در سیمان ایجاد کرد بدین معنی که سیمان در ازای تنش‌های وارده می‌تواند بدون آنکه دچار شکستگی شود تغییر شکل موقتی و برگشت‌پذیری را از خود نشان بدهد. افزایش میزان نسبت پواسون نیز می‌تواند علاوه بر کاهش قابلیت تراکم‌پذیری سیمان، الاستیسیته بیشتر آن را باعث شده و از تمرکز بارهای وارده از جانب سازند نمکی پلاستیک جلوگیری کند. با افزایش الاستیسیته می‌توان نیروها را در راستای طولی غلاف سیمانی به طور گسترده پخش کرد. در چنین حالتی، کل ستون سیمانی به‌طور یکپارچه و پیوسته از خود رفتار الاستیک نشان داده و با تغییر شکل برگشت‌پذیر مانع از گسیختگی ناگهانی سیمان می‌گردد. در این راستا و برای افزایش رفتار الاستیک سیمان اصلاح شده، فرضیات بسیار زیادی مطرح است، اولین نظریه در خصوص نقش وزن افزا هایدنس در ترکیبات دوغاب سیمان می‌باشد. افزودنی هایدنس به دلیل دارا بودن خاصیت مغناطیسی سبب جذب این افزودنی به لوله‌های جداری شده و مانع از ایجاد پدیده میکروآنالوس می‌شود، با افزایش این افزودنی در ترکیبات دوغاب سیمان و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها مشخص شد که این افزودنی نمی‌تواند بر روی پارامترهای الاستیکی سنگ سیمان تأثیرگذار باشد، لذا به نظر می‌رسد که افزایش مقدار هایدنس راهکار مناسبی برای افزایش پارامترهای انعطاف‌پذیری سنگ سیمان نمی‌باشد. نظریه دوم، به کارگیری افزودنی هیدروکربونی گیلیسونایت می‌باشد، این افزودنی هر چند که در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان در مقادیر کم مؤثر بود ولی به دلیل دانسیته بسیار پایین آن و کاهش بسیار زیاد در وزن مخصوص دوغاب سیمان مغایر با اهداف رساله بوده لذا به ناچار این افزودنی حذف شد. در فرضیه سوم از افزودنی نانو ذرات اکسید آهن و سیلیس تولید داخل استفاده شد، با توجه به نتایج به دست آمده، نانو ذرات اکسید آهن هر چند که در انعطاف‌پذیری سنگ سیمان مؤثر بود، و توانسته ضریب پواسون را تا ۰/۲۲ افزایش دهد، اما اولاً در مقادیر بالاتر از ۹ درصد بدلیل

عدم تامین حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز (که برای سیمان های سنگین وزن ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع می باشد و با استفاده از این افزودنی به میزان ۱۲۷۶ پوند بر اینچ مربع تقلیل یافت)، ثانیاً به دلیل تأثیر بسیار جزئی در انبساط حجمی سنگ سیمان، از ادامه آزمایش ها با مقادیر بالاتر صرف نظر شد. لازم بذکر است، این افزودنی برای سیمان هایی با وزن متوسط، در مقایسه با سایر کارهای انجام شده توسط دیگر محققین مناسب می باشد. برای رفع این مشکلات استفاده از نانو ذرات سیلیس مطرح شد که با انجام آزمایش ها و به دلیل افزایش زمان مخلوط نمایی و همچنین اثر معکوس در ضریب پواسون و مدول یانگ از ادامه آزمایش ها در مقادیر بالاتر از ۳ درصد صرف نظر شد. در فرضیه چهارم از افزودنی الاستومر ساخت پژوهشگاه صنعت نفت استفاده شد، مقادیر ۳ تا ۱۲ درصد وزنی سیمان خشک از افزودنی الاستیک کننده الاستومر در ترکیبات دوغاب سیمان اضافه شد. با توجه به اینکه این افزودنی موجب کاهش جزئی وزن مخصوص دوغاب سیمان و تغییر خواص رئولوژیکی آن می شود، برای کنترل خواص رئولوژیکی و امکان پمپاژ دوغاب سیمان همزمان از افزایه کاهنده اصطکاک استفاده شد. در این راستا مشاهده شد که با افزایش میزان افزودنی الاستیک کننده، پارامترهای پلاستیکی سنگ سیمان در برای افزایش الاستیسیته سیستم بهبود یافتند. با ریزتر کردن اندازه افزودنی الاستومر تا مش ۷۰، دوغاب سیمان همگن و یکنواخت شد، همچنین با توجه به نزدیک تر شدن اندازه ذرات افزودنی الاستومر به اندازه ذرات سیمان این ذرات جایگزین فضاهای خالی ماتریکس سیمان که قبلاً توسط آب یا هوا پر شده بودند شده، و موجب انتقال بهتر تنش در سنگ سیمان شدند. در ادامه برای بررسی میزان انبساط حجمی سنگ سیمان، پنج نمونه دوغاب سیمان با مقادیر ۳ تا ۱۲ درصد وزنی سیمان خشک از الاستومر ساخته شد و در این حالت با افزایش مصرف الاستومر میزان انبساط حجمی سنگ سیمان بالا رفته و کاهش حجمی دوغاب سیمان که در اثر هیدراتاسیون و افتصافی دوغاب سیمان اتفاق افتاده بود بین ۱/۵ تا ۳ درصد تامین شد. بعد از حصول اطمینان از تأثیر الاستومر در الاستیک کردن و انبساط سنگ سیمان، با استفاده از افزودنی الاستومر با مش ۷۰ بهترین فرمولاسیون دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه های میدان مارون طراحی شد. با توجه به فرمولاسیون های مختلف

انجام شده، دوغاب سیمان شماره دو (با الاستومر مش ۷۰) به عنوان بهترین فرمولاسیون برای عملیات سیمان کاری چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون- سازند گچساران پیشنهاد شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، دوغاب سیمان دارای مدت زمان مخلوط نمایی ۴۵ ثانیه، وزن مخصوص ۱۵۲ پوند بر فوت مکعب معادل ۲۰/۳۲ پوند بر گالن، خواص رئولوژیکی بسیار مناسب و فاقد ته‌نشینی، افت‌صافی استاتیکی ۵۵ سی‌سی، انبساط طولی ۲/۷ درصد، مقاومت فشاری ۲۴ ساعته برابر ۱۷۵۰ پوند بر اینچ مربع، مدول یانگ ۱/۷ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۹، زمان نیم‌بندش ۱۸۴ دقیقه با بندش قائمه، مدت زمان رسیدن مقاومت ژله‌ای ۱۲۵ تا ۲۵۰ پاسکال کمتر از ۲۵ دقیقه و مقاوم در برابر نفوذ گاز می‌باشد. همانطور که از منحنی نفوذ گاز شکل ۶-۴۵ کاملاً مشهود است الاستومرها به دلیل خاصیت انبساط‌پذیری و انعطاف‌پذیری که دارند مانع ایجاد میکروآنالوس در سیستم دوغاب سیمان شده و همچنین این افزودنی‌ها در برخورد با مواد هیدروکربونی و یا گرما انبساط پیدا می‌کنند و مانع از ایجاد هرگونه ترک یا شکاف در سیستم دوغاب سیمان می‌شوند و به عبارتی خود ترمیم می‌باشند. همچنین ذرات الاستومر بین ذرات تشکیل‌دهنده دوغاب سیمان یک حالت پل‌زدگی ایجاد کرده‌اند که می‌تواند قسمتی از بارهای وارد شده به نمونه‌ها را منتقل و همچنین بخشی از نیروهای کششی را تحمل کرده و ضمن انتقال نیرو در حالت تنش، در برابر ایجاد یا گسترش ریز ترک‌ها جلوگیری به عمل آورد، این عوامل مانع نفوذ گاز به درون ستون سیمان می‌شوند.

۲-۷- نتیجه‌گیری نهایی

با مقایسه ویژگی‌های مکانیکی و خواص سیستم‌های سیمان مورد استفاده در مناطق نفت خیز جنوب، سیمان اصلاح شده و سیمان حاوی افزودنی منعطف و منبسط‌کننده که در فصل ششم به آن پرداخته شد، می‌توان به موارد زیر به عنوان نتیجه‌گیری نهایی اشاره کرد:

- در سیمان‌های فاقد افزودنی منعطف و منبسط‌کننده هر چه مقاومت فشاری سیمان بیشتر باشد، مدول یانگ آن سیمان نیز بیشتر خواهد بود.

- سیمان‌های استاندارد و سیمان‌های فاقد افزودنی دارای رفتار شکننده و مقاومت فشاری بسیار بالایی می‌باشند.
- از بین افزودنی‌های مختلف منعطف و منبسط‌کننده بررسی شده، بهترین افزودنی که می‌تواند در مقاومت انعطافی سیمان‌های سنگین وزن موثر باشند، افزودنی الاستومر با مش ۷۰ می‌باشد.
- افزودنی الاستومر کاملاً بومی و توسط پژوهشگاه صنعت نفت ساخته شده است.
- از بین فرمولاسیون‌های مختلف طراحی شده با افزودنی الاستومر مش ۷۰، فرمولاسیون شماره دو بهترین فرمولاسیون دوغاب سیمان در شرایط واقعی چاه‌های میدان مارون می‌باشد.
- دوغاب سیمان طراحی شده دارای خواص رئولوژیکی مناسب، بندش قائمه، فاقد ته‌نشینی، آب آزاد در حد صفر، افت‌صافی بسیار پایین و مقاومت ژله‌ای مناسب می‌باشند.
- دوغاب سیمان مطلوب دارای مدول یانگ $1/7$ گیگاپاسکال، نسبت پواسون $0/29$ و انبساط طولی $2/7$ درصد می‌باشد.
- سیمان‌های انعطاف‌پذیر در برابر لرزش‌های ناشی از مشبک‌کاری دارای بهترین ویژگی‌های مکانیکی می‌باشند.
- استفاده از دوغاب‌های سیمان با افت‌صافی پایین و همچنین سیمان‌های منبسط شونده، می‌توانند نرخ نفوذ و مهاجرت گاز را به طور چشمگیری کاهش دهند.
- در سیستم‌های سیمان‌های انعطاف‌پذیر با مدول یانگ پایین، تنش‌های کمتری در مقایسه با سیمان‌های سخت که دارای مدول یانگ بالایی می‌باشند، به وجود می‌آید.
- سیستم‌های سیمانی انعطاف‌پذیر و قابل انبساط، بهترین سیستم‌های سیمانی، برای ایجاد پوشش ناحیه‌ای و نشت آب نمک از پاشنه لوله جداری می‌باشند.

۷-۳- پیشنهادات

با توجه به حساسیت عملیات سیمان‌کاری تمامی تلاش‌ها بر این بود که آزمایش‌های مورد نیاز بر اساس شرایط واقعی چاه انجام گیرد. خوشبختانه این امر با استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات منحصر بفرد موجود در پژوهشگاه صنعت نفت محقق گردید. در آخر پیشنهاد می‌شود موارد ذیل با استفاده از امکانات موجود و نیروی متخصص، در بهبود هر چه بهتر و صرفه‌جویی اقتصادی بیشتر پروژه‌های نفتی در عملیات سیمان‌کاری انجام گردد تا گام‌های درست و استوار برای پیشرفت ایران عزیز برداشته شود.

- ارائه مدل مناسب برای محاسبه تنش‌های القاء شده در سنگ سیمان در طول عمر چاه
- نیروهای وارد شده بر غلاف سیمان در شرایط واقعی چاه از نوع نیروهای سه محوره یا همه جانبه می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک تک محوره از نوع سه محوره و مجهز به سیستم حرارتی استفاده گردد.
- انجام آزمایش میدانی در یکی از چاه‌های مشکل‌دار میدان مارون - سازند گچساران و ارزیابی نمودار پیوند سیمان و فشار فضای حلقوی آن بعد از عملیات سیمان‌کاری.
- علاوه بر طرح‌های اختلاط بررسی شده، توصیه می‌گردد، ترکیبی از نانو ذرات بکارگرفته شده در این رساله، و همچنین نانو لوله‌های کربنی در ترکیبات دوغاب سیمان استفاده گردد و تاثیر این نانو ذرات در کنار یکدیگر مورد ارزیابی قرار گیرد.
- بررسی فنی و اقتصادی دوغاب سیمان جدید طراحی شده با سیستم‌های سنتی و مرسوم و همچنین مقایسه هزینه تعمیر چاه‌های دارای مشکل دوپهن‌شدگی با چاه‌های سیمان‌کاری شده با سیستم جدید.

- AL-Suwaidi A. S. and Abu soliman A., (2008) “A new cement sealant system for long-term zone isolation for Khuff gas wells in Abu-Dhabi”, Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference, Abu Dhabi, UAE
- API. (2005) “Recommended Practice for Testing Well Cements, ANSI/API 10B-2 (Formerly 10B)”, First Editio.
- Barry W. and David B., (2009) “The Application of High-Density Elastic Cements To Solve HP/HT Challenges in South Texas: The Success Story”, SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, Louisiana, USA
- Boukhelifa L. Moroni N. and James S. G., (2004) “Evaluation of Cement Systems for Oil and Gas Well Zonal Isolation in a Full-Scale Annular Geometry”, IADC/SPE drilling conference, Dallas, Texas, USA
- Dan T. Mueller., (2003) “Producing Stress-Resistant High-Temperature / High-Pressure Cement Formulations through Microstructural Optimization”, SPE annual technical conference and exhibition, Denver, Colorado, USA
- Da Silva F. V. Debande G. F. Pereira C. A. and Plischke B., (1990) “Casing Collapse Analysis Associated With Reservoir Compaction and Overburden Subsidence”, European petroleum conference, The Hague, Netherlands
- Ford E. Thomas A. Thiercelin M. Ramsey K. and Divan Daniel J., (1982) “Obtaining Quality Primary Cement Jobs in the Williston Basin”, SPE Rocky Mountain regional meeting, Billings, Montana, USA
- Goodwin K. J. and Crook R. J., (1992) “Cement Sheath Stress Failure”, **SPE Drill Eng.**, 7, 04
- Gino A. and Dilullo Philip J. R., (2004) “Temperature Flexible Cementing Compositions and Methods for Using Same”, Patent US 6729405B2
- Hackney R. M., (1985) “A new Approach to Design for Salt Formations”, SPE/IADC drilling conference, New Orleans, Louisiana, USA
- Khalaf F. and Cairo U., (1985) “Increasing Casing Collapse Resistance Against Salt-Induced Loads”, Middle East oil technical conference and exhibition, Bahrain
- Khoshakhlagh A. Nazari A. and Khalaj G., (2012) “ effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete” **Journal of material science and technology.**, 28, 1, pp 73:82

- Le Roy-Delage S. Baumgarte C. Thiercelin M. and Vidick B., (2000) “New Cement Systems for Durable Zonal Isolation”, IADC/SPE drilling conference, New orleans, Louisiana, USA
- Le Roy-Delage S. Baumgarte C. Pierson Ronald A. and Vidick B., (2003) “New Cement Systems for Durable Zonal Isolation” **J. Pet. Technol.**, 52, 08
- Loder T. Evans J. H. and Griffith J. E. (2003) “Prediction of and Effective Preventative Solution for Annular Fluid Pressure Buildup on Subsea Completed Wells-Case Study”, SPE annual technical conference and exhibition, Denver, Colorado, USA
- Martin B. Kris R. and Willem D., (1999) “Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well”, SPE annual technical conference and exhibition, Houston, Texas, USA
- Morita N. Waseda U. and McLeod H., (1994) “Oriented Perforation to Prevent Casing Collapse for Highly Inclined Wells” **SPE Drill Completion.**, 10, 03
- Morris B. V. and Ramsey L. K., (1989) “New Cement System Improves Bonding in the Stony Creek Field, Williston Basin, North Dakota”, Low permeability reservoirs symposium, Denver, Colorado, USA
- Pattillo P. D. Last N. C. and Asbill W. T., (2003) “Effect of Non-Uniform Loading on Conventional Casing Collapse Resistance” **SPE Drill Completion.**, 19, 03
- Placido J. C. R. Ademar P. Jr. Lutz P. Pasqualino I. P. and Segen E., (1997) “Stress-Analysis of Casing String Submitted to Cyclic Steam Injection”, Latin american and caribbean petroleum engineering conference, Rio de janeiro, Brazil
- Ravi K. and Bosma M., (2002) “Safe and Economic Gas Wells through Cement Design for Life of the Well”, SPE gas technology symposium, Calgary, Alberta, Canada
- Rodriguez W. J. Fleckenstein W. W. and Eustes A. W., (2003) “Simulation of Collapse Loads on Cemented Casing Using Finite Element Analysis” **J. Pet. Technol.**, 56, 08
- Sheffield J. S. Collins K. B. and Hackney R. M. (1983) “Salt Drilling in the Rocky Mountains”, IADC/SPE drilling conference, New orleans, Louisiana, USA
- Shore J. A., (1995) “**Prevention Fishing & Casing Repair**”, Tulsa: Penwell Books, USA
- Sloan Jr. and Dendy E., (1991) “Natural Gas Hydrates” **J. Pet. Technol.**, 43, 12

- Sunal O. Bilgesu H. I and Heasley K. A., (2008) "A Look into Casing Deformation Due to Plastic Behavior of Formations", SPE joint meeting, Pennsylvania, USA
- Thiercelin M. J. Dargaud J. F. and Rodriguez W. J., (1998) "Cement Design Based on Cement Mechanical Response" **SPE Drill Completion.**, 13, 04.
- Walter A. Criado R. Gustavo B. and San A., (2003) "Design of High Toughness Cement for Effective Long Lasting Well Isolations", Latin american and caribbean petroleum engineering conference, Trinidad and Tobago
- Willson S. M. Fossum A. f. and Fredrich J. T., (2002) "Assessment of Salt Loading on Well Casings", IADC/SPE drilling conference, Dallas, Texas, USA

منابع فارسی

- سلطانیان ح، مرتضوی ع و مجتهدی م، (۱۳۹۱) " مبانی مهندسی در سیمان کاری چاه های نفت و گاز " جلد اول ، چاپ دوم، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ص ۲۱۱.
- شیمی اداره حفاری مناطق نفت خیز جنوب، (۱۳۸۹) "اطلاعات و داده های میدانی چاه های میدان مارون از نظر سیمان کاری جداری تولید" جزوه آموزشی.
- فهیمی فر ا. و سروش ح، (۱۳۸۰) " آزمایش های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها " جلد اول، چاپ اول، شرکت سهامی آزمایشگاهی فنی و مکانیک خاک، تهران، ص ۲۱۹.

Abstract

Studies show that the cement rock compressive strength development cannot be accounted as a major factor in increasing cement strength in order to prevent the cement coat damage and in more critical conditions, casing collapse and also improving cement durability in the lifetime of the well for the establishment of proper bonding between layers. Conventional cements with high compressive strength were unable to solve the Aforementioned problems. In most cases, novel cement systems with density range of 120-140 Pcf with reduced Young's Modulus are used to withstand induced stresses. Such solutions can be run successfully, however, in many cases higher density cement systems in range of 140-155 Pcf with 3% volumetric expansion capacity are required due to the pressure deployment in high pressure formations like Gachsaran in Marun oilfield. This is also the case for many high pressure oilfields across the world. Therefore, research and investigation is essential for the design of a cement with flexibility, high volumetric expansion, low young's modulus, high poisson ratio and density to prevent casing collapse in Marun oilfield. To this end, many additives such as hidense, gilsonite, Fe_2O_3 and silica nanoparticles and elastomers have been examined and many tests carried out for increasing elasticity and volumetric expansion of special cement systems. According to the test results, with increased hidense concentration in cement slurry compositions, and keeping other parameters constant, it was found that this type of additive is ineffective on the cement elastic property, hence gilsonite was selected as the next candidate. Although this additive was effective on the cement rock flexibility in minus scales, but its very low density and severe reduction in slurry weight is opposed to the dissertation goals. Hence, we had no choice but to remove this additive. In the next stage, domestic manufactured silica and Fe_2O_3 nanoparticles were used. According to the investigations, with increasing concentration of Fe_2O_3 nanoparticles up to 9% bwoc, poisson ratio was increased up to 0.22 but in higher concentrations it has no significant effect on the cement rock volumetric expansion and also prevents the cement from reaching the least compressive strength required. Silica nanoparticles were proposed as the solution to this problem. Based on the long mixing times and the reverse effect on poisson ratio and young's modulus, the tests were terminated after 3% concentration of this additive. In the end, replacing with elastomer additive and increasing its concentration up to 12% bwoc, it was observed that the elastic properties of the cement were improved. In the next step, with decreasing the size of the elastomer particles to Mesh No 70, the optimum cement slurry formulation regarding to the real problematic conditions of the Marun oilfield was designed. With regard to the slurry designs carried out, slurry 2 was selected as the best formulation design for the cementing of the Marun oilfield wells. According to the test results; this slurry has 45 seconds mixing time, slurry density of 115 Pcf, very good rheological properties with no settling, 55 ml fluid loss, volumetric expansion of 2.7 %, compressive strength of 1750 Psi during 24 hours, 1.7 GPa young's modulus, 0.29 poisson ratio, 184 minutes right angle set thickening time, gel strength transition time of less than 25 minutes (125 to 250 Pa) and acceptable against gas migration.

Key words:

Cement, Compressive strength, young's modulus, Poisson ratio, Flexibility, Elastic, Nano additive, Collapse



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Designing and Formulation Cement With High Flexural Strength in High Pressures Zone Oil and Gas Well

Hamid Soltanian

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Khalokakaie

Advisor:

Dr. Ezzatolah Kazemzadeh

Date: January 2016