



مقاله یادداشت فنی

طراحی دستگاه اندازه گیری فشار موپینگی و شاخص مقاومت برای یک سنگ مخزن

ارغوان سلیمانزاده^{۱*}؛ مهدی شعبانی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2025.394021.1219

چکیده

فشار موپینگی نقشی کلیدی در استخراج نفت از منابع زیرزمینی دارد. اندازه گیری همزمان فشار موپینگی و شاخص الکتریکی سنگ منجر به تعیین اشباع آب همزاد می‌شود که نقش مهمی در محاسبه میزان نفت درجا دارد. مطالعه مغزه در آزمایشگاه تنها روش مستقیم دستیابی به پارامترهای مخزن است؛ بنابراین، برای کالیبره کردن لاگ مقاومت الکتریکی از نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری مقاومت الکتریکی استفاده می‌شود. از دیگر نتایج اندازه گیری فشار موپینگی و شاخص مقاومت ویژه، دستیابی به ارتفاع ناحیه گذار است. مدل سازی جابه جایی نفت نیز در پرتو اندازه گیری فشار موپینگی بر حسب درجات مختلف اشباع آب حاصل می‌شود که در تعیین میزان بهره وری روش های ازدیاد برداشت به کمک تزریق غیر امتزاجی، کاربرد دارد. هدف از انجام این پژوهش طراحی دستگاهی برای اندازه گیری فشار موپینگی و شاخص مقاومت الکتریکی بر حسب درجه‌ی اشباع است. طراحی چنین دستگاهی که گستره‌ی وسیعی از عملیات آزمایشگاهی را پوشش میدهد، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه هزینه ها شود؛ زیرا واردات مشابه خارجی این دستگاه بسیار هزینه بر است. در این پژوهش با به کارگیری دانش تخصصی مهندسی نفت و اصول طراحی مکانیکی و الکتریکی، دستگاه اندازه گیری همزمان فشار موپینگی و شاخص مقاومت سنگ طراحی می‌شود و به کمک طراحی کامل اجزاء دستگاه CAPRI نقشه‌ی راهی برای ساخت این دستگاه ارائه شده است. در این پژوهش با رویکرد نزدیک کردن شرایط آزمایش به شرایط حاکم بر نمونه‌ی مغزه در مخزن، طراحی دستگاه CAPRI با حداکثر قابلیت و دقت ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی

فشار موپینگی، شاخص مقاومت الکتریکی، درجه‌ی اشباع، رابطه آرچی، دستگاه CAPRI

۱. پیش‌گفتار

ها، تنها روش مستقیم اندازه گیری پارامترهای یک مخزن است. لذا هدف این پژوهش، طراحی دستگاهی برای اندازه گیری همزمان فشار موپینگی و شاخص مقاومت ویژه در یک نمونه سنگ مخزن با استفاده از روشی کارآمد با هزینه‌ی کمتر و دقت بیشتر است. به دست آوردن همزمان فشار موپینگی و شاخص مقاومت ویژه بر حسب درجه‌ی اشباع علاوه بر صرفه جویی در هزینه و زمان، منجر به دستیابی همزمان به گروهی از پارامترها می‌شود که منجر به شناخت هر چه بهتر خصوصیات یک مخزن می‌شود.

شرایط آزمایشگاهی مورد نیاز برای اندازه گیری فشار موپینگی و ویژگی های الکتریکی سنگ مخزن تا حدودی مشابه یکدیگر

گام مهم در توسعه و بهره برداری یک مخزن تعیین ویژگی های مربوط به آن است. در میان این ویژگی ها فشار موپینگی از نقشی اساسی برخوردار است. این پارامتر از مهمترین اطلاعات ورودی به شبیه ساز های مخزن جهت مدل سازی، پیش بینی عملکرد و ارائه روشهای بهینه در بازیافت مخازن نفتی است. استفاده از خصوصیات الکتریکی یک سنگ مخزن نیز به منظور پی بردن به میزان اشباع آب موجود در آن، راه حلی کلیدی برای تخمین میزان نفت در جای یک مخزن بوده است. استفاده از روش مغزه گیری برای اندازه گیری پارامترهای یک مخزن با وجود تمامی محدودیت ها و هزینه

هستند. از طرفی زمان به تعادل رسیدن نمونه مغزه در آزمایش فشار مویبگی، می‌تواند به کمک ثابت شدن مقاومت الکتریکی نمونه مغزه به طور دقیق تعیین شود. از این رو اندازه گیری همزمان این دو پارامتر منجر به کاهش قابل توجه هزینه های انجام و زمان آزمایش و افزایش دقت آزمایش می‌شود. اندازه گیری همزمان فشار مویبگی و شاخص الکتریکی سنگ، اطلاعات اساسی برای توصیف مخزن در اختیار قرار میدهد. فلری ولانگرون در سال ۱۹۹۸ روش غشاء ریز حفره را پیشنهاد دادند. آن‌ها این روش را که در ابتدا برای اندازه گیری فشار مویبگی بود با آزمایش اندازه گیری مقاومت به روش ۴ الکتروود ترکیب کردند و از این طریق توانستند به طور همزمان مقاومت سنگ را در هر مرحله از محاسبه فشار مویبگی، بدست آورند. آن‌ها در پژوهش خود، نحوه چینش الکتروودها و تأثیر تعداد آن‌ها را بررسی کردند و بهترین الگو را برای قرار گرفتن آن‌ها برگزیدند. آن‌ها تأثیر اندازه‌ی مغزه در دقت آزمایش را نیز مورد بررسی قرار دادند. [۱]

درنیکا در سال ۲۰۱۰ در مقاله خود چنین بیان کرد که از میان روش‌های اندازه گیری فشار مویبگی، سه روش تزریق جیوه، سانتیفریوژ و صفحه متخلخل برای اندازه گیری ترکیبی فشار مویبگی و شاخص مقاومت سنگ به کار می‌آیند و تنها نکته کلیدی این است که هر یک از این روش‌ها برای اندازه گیری فشار مویبگی در مرحله‌ی خاصی از عمر مخزن مناسب هستند. برای مثال روش تزریق جیوه به خوبی میتواند نمایانگر جابه جایی نفت به هنگام تخلیه اولیه باشد و منحنی فشار مویبگی این مرحله را بدست آورد. وی در مقاله خود هر یک از این روش‌ها را توضیح داده و مزایا و معایب هر کدام را ذکر کرده است. همچنین روش واجذب بخار را معرفی کرده است. [۲]

روش صفحه متخلخل در تمامی منابع به عنوان روش کاربردی و دقیق معرفی شده است. اساس روش دیسک متخلخل یک صفحه متخلخل با اندازه حفرات بسیار ریز است که از سرامیک ساخته شده است. یک فشار مشخص به سیال پیش رونده اعمال می‌شود و در طول اندازه گیری به هنگام تولید سیال و اندازه گیری شاخص مقاومت، فشار ثابت نگه داشته می‌شود تا مقدار سیال تولیدی و شاخص مقاومت به مقداری ثابت برسند. پس از ثبت مقادیر فشار، مقاومت الکتریکی و میزان سیال تولیدی، در مرحله بعدی فشار افزایش می‌یابد. [۳]

شریفی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در پژوهش خود دستگاه *CAPRI* را دستگاهی معرفی کردند که براساس روش صفحه‌ی متخلخل کار می‌کند و قادر به اندازه گیری چرخه کاملی از منحنی‌های فشار مویبگی و شاخص مقاومت بر اساس اشباع بود. تغییرات اشباع در نمونه به وسیله‌ی دو پمپ مقاوم در دما و فشار بالا و مقاوم در برابر خوردگی با دقتی بهتر از ۰.۰۱ سی سی که به یک نگهدارنده مغزه متصل هستند، اندازه گیری میشوند. بر خلاف روش سانتیفریوژ به وسیله‌ی این دستگاه می‌توان فشار مویبگی واقعی را در شرایط مخزن بدون استفاده از هیچ یک از الگوریتم‌های همگرایی داده، به دست آورد. برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی دو روش وجود دارد. در روش اول دو الکتروود جریان و پتانسیل مشترک هستند و اختلاف پتانسیل از طریق الکتروودهای اعمال کننده جریان، اندازه گیری می‌شود. در روش دیگر الکتروودهای جریان و پتانسیل مجزا هستند که اصطلاحاً به آن روش چهار الکتروود پایانه ای گفته می‌شود. هر یک از این دو روش مزایای خاص خود را دارند لذا در طراحی دستگاه‌ها معمولاً هر دو روش در نظر گرفته می‌شوند. در طراحی‌های معمول دستگاه *CAPRI* صفحات متخلخل باید قادر به تحمل فشار 150psi باشند. خصوصیات مغزه مورد مطالعه و نحوه عملیات اشباع زدایی در نتایج آزمایش تأثیر می‌گذارند. [۴]

در سال ۲۰۱۶، درنیکا و همکارانش برای بهبود روش صفحه متخلخل و افزایش سرعت آزمایش استفاده از روش صفحه متخلخل انتظار کوتاه را پیشنهاد دادند که تفاوت آن با روش صفحه متخلخل معمولی، در عدم برقراری تعادل، در هر گام بدست آوردن فشار مویبگی بود. [۵]

در این پژوهش با بررسی روش‌های مختلف اندازه گیری دو پارامتر فشار مویبگی و مقاومت الکتریکی نمونه سنگ مخزن، فرآیند مناسب اندازه گیری، طراحی می‌شود. سپس تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش ذکر می‌شوند و در نهایت هر یک از تجهیزات به کار گرفته شده به صورت جزء به جزء طراحی می‌شوند.

۲. روش انجام کار

پس از بررسی مبانی نظری پارامترهای فشار مویبگی و پارامترهای الکتریکی سنگ، یافتن روش مناسب برای اندازه گیری همزمان فشار مویبگی و شاخص مقاومت ویژه، گام بعدی پژوهش است. پس از طراحی فرآیند مناسب برای اندازه

گیری پارامترهای ذکر شده، اجزاء مورد نیاز تعیین می‌شود. سپس هر یک از اجزاء به طور مفصل طراحی شده و تمامی خصوصیات آن‌ها از قبیل نوع، ابعاد و محدوده عملیاتی به کمک نرم افزار کتیا که یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای طراحی اجزاء است، تعیین می‌شود. در نهایت پارامترهای خروجی از دستگاه اندازه گیری به وسیله نرم افزار اکسل تجزیه و تحلیل می‌شوند.

۱.۲. اندازه گیری فشار موینگی

روش صفحه متخلخل یک روش دقیق برای بدست آوردن منحنی فشار موینگی در چرخه های مختلف است. اساس روش دیسک متخلخل یک صفحه متخلخل با اندازه حفرات بسیار ریز است که از سرامیک ساخته شده است. دیسک متخلخل ترشوندگی خاصی دارد و نسبت به سیال جابه جاشونده ترشونده است. متناظر با اندازه حفرات صفحه متخلخل یک فشار موینگی وجود دارد که به این فشار، فشار آستانه تحمل صفحه متخلخل می‌گویند. مادامی که اختلاف فشار فازی که دیسک متخلخل نسبت به آن غیرترشونده است و فشار فاز ترشونده کمتر از فشار آستانه تحمل باشد، فاز غیرترشونده از حفرات دیسک متخلخل عبور نمی‌کند و دیسک متخلخل همانند یک غشاء با عبوردهی انتخابی از عبور فاز غیر ترشونده جلوگیری می‌کند و این امر منجر به برقراری شرایط مناسب اندازه گیری فشار موینگی می‌شود. برای اندازه گیری فشار موینگی با روش دیسک متخلخل در فرآیند تخلیه به عنوان نمونه، ابتدا یک نمونه مغزه استوانه ای شکل با سیال ترشونده اشباع می‌شود. سپس یک مقطع مسطح نمونه در تماس با یک صفحه متخلخل مسطح در یک محفظه پر شده از فاز غیرترشونده قرار داده می‌شود. صفحه متخلخل نیز با فاز ترشونده اشباع شده است. اغلب یک دستمال مرطوب میان نمونه و صفحه متخلخل به منظور ایجاد تماس موینگی بهتر قرار می‌گیرد. سپس فشار مشخصی به فاز غیرترشونده اعمال می‌شود که منجر به جابه جایی فاز ترشونده به وسیله فاز غیرترشونده از طریق صفحه متخلخل می‌شود. زمانی که جابه جایی متوقف می‌شود، اختلاف فشار میان فاز ترشونده و غیر ترشونده فشار موینگی است که تابعی از اشباع سیال باقی مانده در نمونه مغزه است. پس از ثبت فشار موینگی و میزان سیال ترشونده تولید شده، فشار فاز غیر ترشونده مجدداً افزایش می‌یابد و فاز غیرترشونده بیشتری وارد نمونه

می‌شود. این فرآیند مجدداً تکرار می‌شود و در نهایت منحنی فشار موینگی بر حسب درجه اشباع سیال ترشونده به دست می‌آید. اگر فشار سیال ترشونده به مقدار زیادی افزایش پیدا کند، سیال غیر ترشونده به صفحه متخلخل نفوذ می‌کند. حتی امکان آسیب رسیدن به نمونه مغزه و شکستن آن نیز وجود دارد. در این صورت آزمایش خاتمه می‌یابد. در روش دیسک متخلخل فشار سیال پیش رونده که صفحه متخلخل نسبت به آن غیر ترشونده است، از فشار فاز ترشونده بیشتر است اما این اختلاف فشار از آستانه تحمل صفحه متخلخل کمتر است. همین امر منجر می‌شود که سیال پیش رونده سیال ترشونده را جابه جا کند و این سیال از انتهای مغزه و از طریق صفحه متخلخل خارج شود. بیشترین فشار موینگی قابل اندازه گیری برابر با فشار آستانه تحمل صفحه متخلخل یعنی فشاری که سیال پیش رونده به صفحه متخلخل نفوذ می‌کند، است. فشار آستانه تحمل صفحه متخلخل تابعی از اندازه حفرات صفحه و ویژگی های بین سطحی دو سیال ترشونده و غیرترشونده آزمایش است. در هر مرحله از اندازه گیری، هنگام تولید سیال، فشار ثابت نگه داشته می‌شود تا مقدار سیال تولیدی ثابت شود. پس از ثبت مقادیر فشار و میزان سیال تولیدی، در مرحله بعدی فشار افزایش می‌یابد و مجدداً عملیات تکرار می‌شود. روند تزریق فاز غیر ترشونده اغلب قبل از رسیدن فشار موینگی به فشار آستانه صفحه متخلخل معکوس می‌شود. با کاهش فشار فاز غیر ترشونده در مراحل کوچک، می‌توان رابطه فشار موینگی با افزایش اشباع آب را تعیین کرد [۶].

تنش روباره اعمال شده به سنگ مخزن بر مقدار فشار موینگی تاثیر می‌گذارد بنابراین برای مدلسازی تنش روباره در مخزن باید به نمونه محبوس فشار روباره اعمال گردد. با محدود کردن یک نمونه مغزه استوانه ای در یک روکش لاستیکی (یا به طور مشابه انعطاف پذیر)، می‌توان تقریباً تنش مورد نیاز را اعمال کرد. نقطه ضعف اعمال تنش با روکش، مسدود شدن بیشتر سطح نمونه است که سرعت آزمایش را کند می‌کند [۷].

از مزایای استفاده از روش صفحه متخلخل می‌توان به دقت بسیار، امکان استفاده از سیال مخزن، امکان انجام آزمایش در سیکل های مختلف (تخلیه و آشام)، ساده و ارزان بودن تجهیزات مورد استفاده در ترکیب با ادوات اندازه گیری

مقاومت و عدم وابستگی به مدل به کار رفته و فرضیات مدل در طول آزمایش اشاره کرد. طولانی بودن زمان مورد نیاز آزمایش (گاهی بیشتر از ۴۰ روز) و محدودیت فشار موینگی قابل اندازه گیری به فشار قابل تحمل برای دیسک متخلخل از عیوب این روش هستند. در نهایت روش صفحه متخلخل به عنوان بهترین روش برای ترکیب با روش های اندازه گیری مقاومت الکتریکی انتخاب شد.

۲.۲. انواع روش های اندازه گیری پارامتر های الکتریکی سنگ مغزه

اساس تمامی روش های اندازه گیری مقاومت الکتریکی سنگ بر پایه اعمال یکی از دو پارامتر جریان و یا ولتاژ و اندازه گیری دیگری است. با استفاده از یک منبع جریان ac و هم چنین یک مقاومت متغیر میزان جریان اعمال شده به نمونه مغزه تعیین می گردد و میزان آن توسط دستگاه آمپر متر به کار رفته در نمونه اندازه گرفته می شود. جریان الکتریکی توسط دو الکتروود قرار گرفته در دو انتهای نمونه به نمونه منتقل می شود. با اندازه گیری ولتاژ دو سر نمونه توسط یک ولت متر دیجیتالی، مقاومت نمونه سنگ مغزه تعیین می شود. برای اندازه گیری ولتاژ دو سر نمونه نیز از اختلاف پتانسیل دو الکتروود اطراف نمونه استفاده می شود [۸].

برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی دو دسته روش کلی وجود دارد که عبارتند از: روش دو الکتروود و روش چهار الکتروود. در اندازه گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از دو الکتروود، نمونه مغزه بین دو الکتروود که غالباً دو دیسک فلزی هستند قرار می گیرد. این دو الکتروود وظیفه دارند جریان الکتریکی با اندازه مشخص را از نمونه مغزه عبور دهند. اختلاف پتانسیل به وجود آمده در دو سر نمونه نیز توسط همین دو الکتروود اندازه گیری می شود. به عبارت دیگر در این روش الکتروود اعمال جریان و اندازه گیری پتانسیل مشترک است با دانستن ابعاد نمونه شرایط لازم برای محاسبه مقاومت الکتریکی ویژه نمونه مغزه به دست می آید.

در روش اندازه گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از چهار الکتروود، مشابه روش دو الکتروود، از دو صفحه فلزی قرار گرفته در دو انتهای نمونه به عنوان الکتروود جریان استفاده می شود. تفاوت این روش در استفاده از گمانه یا الکتروود اضافی در طول نمونه به منظور اندازه گیری اختلاف پتانسیل است.

هر دو روش دو الکتروود و چهار الکتروود در عمل استفاده می شوند. از نحوه قرار گرفتن الکتروود ها این امر مشهود است که برای یک نمونه مغزه خاص، در روش چهار الکتروود، حجمی از نمونه که تحت بررسی قرار می گیرد، کمتر از حجمی است که در روش دو الکتروود مورد بررسی قرار می گیرد. این امر منجر به نتایج جامع تر روش دو الکتروود می شود. از طرفی یکی از مشکلات روش دو الکتروود، احتمال وجود مقاومت الکتریکی بالا به طور غیر عادی، میان الکتروود و نمونه مغزه است که منجر به بدست آوردن مقادیر بالاتر از حد واقعی برای نمونه مغزه می شود. این پدیده مقاومت تماسی نام دارد. معمولاً تماس بین دو جسم با رسانایی های متفاوت مقاومتی اضافی در برابر جریان به جود می آید. روش های متعددی برای کم کردن اثر این پدیده در گذشته استفاده شده است که می توان به استفاده از مواد جاذب نظیر دستمال کاغذی، جیر و یا نمک که با آب سازند اشباع شده اند، اشاره کرد. روش های جدید که به نظر موفقیت آمیز ترند، با اسپری کردن و یا رنگ کردن سطوح انتهایی نمونه مغزه با رنگ نقره رسانا مقاومت تماسی بین نمونه مغزه و الکتروود ها را به مقدار بسیار کمی در برابر مقاومت نمونه مغزه کاهش می دهند. این کار در روش چهار الکتروود به سبب استفاده از گمانه های جدا که برای اندازه گیری اختلاف پتانسیل بخشی از نمونه استفاده می شوند، چندان ضرورتی ندارد. در این روش مقاومت تماسی در الکتروود های جریان اتفاق می افتد که در اندازه گیری اختلاف پتانسیل به حساب نمی آید [۹].

عوامل متعددی بر اندازه گیری مقاومت الکتریکی اثرگذار است که از میان آن ها می توان به فرکانس جریان، نحوه چینش الکتروودها و زاویه فازی اشاره کرد. فرکانس های بالا از قطبش الکتروود می کاهند و منجر به کاهش اثر مقاومت تماسی می شوند. بنابراین با تغییر فرکانس، زاویه فازی پایین تر قابل دست یابی است. پارامتر زاویه فازی در حقیقت به اختلاف فاز (زاویه) میان جریان و پتانسیل اشاره می کند. در صورتی که تماس ضعیفی بین نمونه مغزه و الکتروودها وجود داشته باشد، ولتاژ و جریان اختلاف فاز قابل توجهی خواهند داشت و زاویه فازی مقدار بالایی را نشان می دهد. نحوه قرار گیری الکتروود ها به نحوی باشد که نواحی مختلف مغزه را در برگیرد. ابعاد الکتروودها در شیوه بر قراری جریان الکتریکی در نمونه نقش

دارد. ابعاد الکترودهای جریان باید به قدر کافی بزرگ باشد تا میدان الکتریکی یکنواختی در عرض نمونه ایجاد شود [۱۰].

۳.۲. طراحی فرآیند اندازه گیری همزمان فشار مویینگی و مقاومت الکتریکی نمونه سنگ

نمونه مغزه در یک نگهدارنده‌ی مغزه تحت یک فشار محبوس و فشار حفره ای مشابه با شرایط مخزن قرار می‌گیرد. دمای نمونه مغزه تا دمای شرایط مخزن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ملایم فشار پمپ جریان بالادست که نفت را به نمونه مغزه تزریق می‌کند و توسط آن آب سازندی را جابه جا می‌کند، اشباع آب سازندی از ۱۰۰ درصد تا مقادیر کمتر کاهش می‌یابد. حجم آب جابه جا شده باید به صورت دقیق توسط یک دستگاه اندازه گیری مانند پمپ اندازه گیری که در پایین دست جریان نصب شده در فشار ثابت ثبت شود. تزریق سیال به درون مغزه از طریق پمپ صورت می‌گیرد. سیال تزریقی به درون مغزه رفته و سیال تولیدی را به سمت خروجی مغزه جابه جا می‌کند. پمپ تولیدی که به منظور تولید سیال در فشار ثابت در خروجی مغزه قرار گرفته است از طریق صفحه‌ی متخلخل که با سیال تولیدی متناظر اشباع شده است به محفظه نگهدارنده متصل هستند. در حین انجام آزمایش تنها یک سیال به مغزه تزریق می‌شود و سیال دیگر جابه جا می‌شود؛ در نتیجه تنها صفحه‌ی متخلخل متناظر با سیال تولیدی در نگهدارنده مغزه قرار می‌گیرد. حجم سیال جابه جاشده توسط پمپ ها اندازه گیری می‌شود. [۱۱]

۴.۲. توصیف ابعاد و شرایط کاری مورد نیاز دستگاه

یکی از عوامل تاثیر گذار بر ابعاد اجزاء مختلف دستگاه، ابعاد نمونه است. قطر مرسوم نمونه‌ی مغزه ۱ تا ۱.۵ اینچ معادل ۳۰ میلی متر است. طول نمونه بین ۲ تا ۳ اینچ است و معمولاً نمونه‌ی مغزه دارای لبه های گرد و سطح مقطع های موازی است. فشار روباره قابل اعمال به نمونه تا محدوده 7000 psi است. بیشترین فشار منفذی قابل اعمال به نمونه مغزه 6000 psi است. معمولاً فشار مویینگی قابل اندازه گیری توسط دستگاه *CAPRI* تا میزان 150 psi است. در طول انجام آزمایش، فشار مویینگی اندازه گیری شده باید کمتر از فشار آستانه تحمل صفحات متخلخل باشد؛ در نتیجه به صفحات متخلخلی با آستانه تحمل 150 psi مورد نیاز است. معمولاً جنس این صفحات سرامیکی است. دمایی که دستگاه در آن

به انجام آزمایش می‌پردازد باید مشابه دمای مخزن باشد، بنابراین محفظه گرم کننده دستگاه باید قادر باشد تا دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد را تأمین کند. انرژی مورد نیاز دستگاه از برق شهر با ولتاژ ۲۲۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز تأمین می‌شود. البته دستگاه اندازه گیری مقاومت قادر است فرکانس های بالاتر نیز به منظور انجام آزمایش تولید کند.

۲.۵. تجهیزات لازم برای اندازه گیری فشار مویینگی و مقاومت الکتریکی

این دسته از تجهیزات شامل تجهیزات مکانیکی، تجهیزات الکترونیکی، تجهیزات ابزار دقیق و تجهیزات مورد نیاز فرآیند هستند که در ادامه در دسته های خاص خود به آن ها اشاره خواهد شد.

۱. ۵.۲. تجهیزات فرآیندی مورد نیاز

۱- پمپ: برای اندازه گیری فشار مویینگی استفاده از وسیله ای برای تأمین فشار مورد نیاز سیال تزریقی و تولیدی ضروری است. برای برقراری شرایط مخزن و اعمال فشار روباره نیز، نمونه مغزه باید تحت فشار محبوس قرار بگیرد. تأمین این فشار نیز بر عهده‌ی تجهیزاتی نظیر پمپ خواهد بود. لذا به سه پمپ در این دستگاه نیاز است. برای اعمال فشار به سیالات برای انجام آزمایش فشار مویینگی می‌توان از هوای فشرده نیز استفاده کرد. به کمک کپسول حاوی گاز نیتروژن با فشار مورد نیاز و دو انباره‌ی گازی یا هیدروپنوماتیک که حاوی سیالات مورد نیاز آزمایش هستند، می‌توان فشار مورد نیاز آزمایش را تأمین کرد. البته میزان قدرت تولیدی توسط سیستم پنوماتیک کم است و برای انجام آن دسته از آزمایش های اندازه گیری فشار مویینگی که فشار کاری بیش از 10 bar دارند، مناسب نمی‌باشد. هم چنین به سبب خاصیت تراکم پذیری هوا، دقت این سیستم ها نسبت به سیستم های هیدرولیکی پایین تر است. برای فشرده سازی هوا به منظور تأمین فشار مورد نیاز آزمایش، به تجهیزاتی نظیر کمپرسور نیز احتیاج است. این عوامل سبب می‌شوند که عملکرد سیستم های هیدرولیکی در اندازه گیری فشار مویینگی بهتر از سیستم های پنوماتیکی باشد و در عمل هزینه کمتری داشته باشد. بنابراین برای تأمین فشار مورد نیاز بهتر است از پمپ های هیدرولیکی استفاده شود.

در طراحی دستگاه CAPRI استفاده از پمپ های سورنگی ارجحیت دارد؛ زیرا این پمپ ها توانایی تأمین فشار های بالا برای دبی های کم و هم چنین قابلیت اندازه گیری دبی های تولیدی و تزریقی با دقت بسیار بالا را دارند. پمپ مورد استفاده برای ایجاد فشار محصور می تواند یک پمپ دستی باشد. نوع این پمپ به سیال تراکم پذیری که نمونه مغزه را احاطه می کند بستگی دارد.

۲- دستگاه LCR meter: برای اندازه گیری مقاومت نمونه یک دستگاه LCR meter مورد نیاز است تا بتواند با دقت بالایی میزان مقاومت را مشخص کند. از LCR meter به عنوان سلف سنج، خازن سنج و اهم سنج نیز یاد می کنند. در این دستگاه ها با استفاده از تکنیک ولتاژ AC و محاسبه امپدانس، دقتی ده برابر بیشتر از مولتی مترهای دیجیتال یعنی در حدود $\pm 0.2\%$ بدست میدهند. در این صورت اثر هر گونه مقاومت تماسی و قطبیدگی الکترودها در هنگام اندازه گیری مقاومت الکتریکی مشخص می شود. یک LCR meter معمولاً سه خروجی جهت اندازه گیری قطعات و یک خروجی برای کالیبراسیون دارد تا خطا را کاهش دهد. فرکانس تست یکی از پارامترهای مهم دستگاه LCR meter است. این دستگاه باید بتواند فرکانس های مورد نیاز آزمایش اندازه گیری مقاومت الکتریکی را پشتیبانی کند. LCR meter با محدوده فرکانس تا ۱۰ کیلوهرتز برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه مغزه مناسب است.

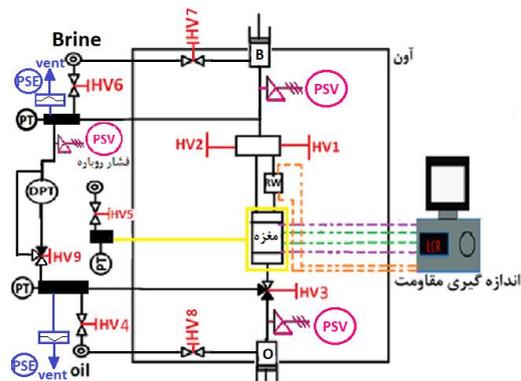
برای اندازه گیری همزمان مقاومت آب سازندی و مقاومت نمونه مغزه، به دو دستگاه LCR meter احتیاج است. کمترین مقاومت الکتریکی که LCR meter با آن روبرو می شود، مقاومت الکتریکی آب سازندی است که بسته به دما و میزان غلظت نمک های مختلف در آن عددی متغیر است. با در نظر گرفتن بیشترین دما و غلظت برای آب سازندی (دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد و غلظت ۳۰۰ kppm) دستگاه LCR meter باید قادر به اندازه گیری مقاومت ۰/۰۱ ohm.m باشد. در آزمایش هایی که توسط دستگاه CAPRI اندازه گرفته می شود بیشترین مقاومت مربوط به سنگی است که به اشباع آب کاهش نیافتنی نزدیک شده باشد (اشباع بالای هیدروکربن). مقاومت چنین نمونه مغزه ای می تواند تا ۱۰۰۰ ohm.m بالا رود [۱۲].

۴- آون: به منظور ایجاد دمای مخزن در حین انجام آزمایش به یک آون احتیاج است. قرار دادن پمپ ها درون آون برای اندازه گیری دقیق تر حجم سیالات تزریقی و تولیدی نیز می تواند موثر باشد. محفظه سنجش مقاومت آب سازندی (RW cell)، برای قرار گرفتن در شرایط دما و فشار مخزن مستلزم قرار گیری در دستگاه آون است. آون مورد استفاده در دستگاه CAPRI از نوع آون گرمایشی است.

۵- شیرهای هیدرولیکی: شیر های هیدرولیکی دستگاه های مکانیکی هستند که برای تنظیم جریان سیال در داخل مسیر یا سیستم هیدرولیک استفاده می شوند. می توان از آنها برای بستن کامل یک خط، برای هدایت مایع تحت فشار یا کنترل میزان جریان به یک منطقه خاص استفاده کرد. در دستگاه CAPRI از چند شیر هیدرولیکی در نقاط خاص استفاده می شود که هر یک به منظوری در دستگاه قرار گرفته اند. در شکل ۱ چیدمان شیرهای هیدرولیکی مورد استفاده در دستگاه نشان داده شده است. در شکل ۱ شیرهای هیدرولیکی با نماد HV نمایش داده شده اند. PT نماد ترانسسمیتر فشار و DPT نماد ترانسسمیتر اختلاف فشار است. O و B نیز به اختصار معرف نفت و آب سازندی هستند. HV1 برای تنظیم میزان جریان آب سازندی از خروجی پمپ به درون محفظه سنجش مقاومت آب سازندی که با نماد RW نشان داده شده است، استفاده می شود. در حالی که HV2 سیال سازند را از خروجی پمپ به درون نمونه مغزه هدایت می کند و وظیفه کنترل جریان در این قسمت از مسیر را بر عهده دارد. HV3 یک شیر هیدرولیکی سه راهه است. یک مجرا به نگهدارنده مغزه، مجرای دیگر به خروجی پمپ نفت و مجرای سوم به منبعی که نفت در آن ذخیره می شود، متصل است. منبع مذکور به ترانسسمیتر فشار متصل است. از آنجا که اتصال مستقیم خروجی پمپ به ترانسسمیتر فشار ممکن است به ترانسسمیتر آسیب برساند، جریان از خروجی پمپ نفت ابتدا وارد منبع می شود و سپس از منبع به ترانسسمیتر فشار رفته و فشار پمپ ثبت می شود. زمانی که فشار خروجی پمپ به میزان مورد نیاز آزمایش برسد، درگاه متصل به نگهدارنده مغزه باز می شود و نفت وارد نمونه مغزه می شود. ذکر این نکته ضروری است که پمپ نفت بر اساس اختلاف فشار کار می کند، بنابراین کنترل کننده ی پمپ نفت، با در نظر گرفتن هر دو مقدار قرائت شده توسط ترانسسمیتر فشار و ترانسسمیتر اختلاف فشار، حرکت

به عنوان تهویه بر روی هر یک از مخازن نصب می‌شود. به سبب وجود این درگاه‌ها احتمال به وجود آمدن خلأ ناگهانی وجود دارد. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از خلأ ناگهانی به دیواره محفظه‌های نگهداری سیال، از تجهیزاتی به نام دیسک گسیختگی در این محفظه‌ها استفاده می‌شود. رایچر دیسک (رایچر دیسک) که دیسک انفجاری و یا دیافراگم انفجاری هم نامیده می‌شود، یک وسیله کنترل فشار است که برای محافظت از مخازن تحت فشار و یا تجهیزاتی که احتمال وجود فشار بسیار زیاد و یا خلأ ناگهانی در آن‌ها وجود دارد به کار می‌رود. زمانی که فشار داخل مخزن از حد مجاز بالاتر رود و یا از حد مجاز کمتر شود، تنش ناشی از فشار وارده بر سطح رایچر دیسک، باعث پارگی آن شده و فشار داخل مخزن با سرعت بالایی به ترتیب کاهش و یا افزایش یافته و تنش وارد بر مخزن از بین می‌رود. [۱۳]

در شکل ۱ محل قرارگیری شیرهای اطمینان و رایچر دیسک‌های مورد استفاده نیز آمده است. در نقشه شماتیک شکل ۱، رایچر دیسک با نماد PSE و شیر اطمینان با نماد PSV نشان داده شده‌اند.



شکل (۱): محل قرارگیری شیرهای هیدرولیکی، شیرهای اطمینان و رایچر دیسک

۶- تجهیزات ابزار دقیق: تجهیزات ابزار دقیقی که در دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: سه ترانسمیتر فشار مطلق در خروجی پمپ‌های آب و نفت و پمپ فشار روباره، یک ترانسمیتر اختلاف فشار، ترانسمیتر دما، دو سنسور سنسجش سرعت موتور و دو سنسور سنسجش موقعیت موتور پمپ‌ها.

استفاده از ترانسمیتر فشار مطلق در کنار ترانسمیتر فشار تفاضلی به سبب کوچک بودن مقدار فشار تفاضلی (فشار

پیستون پمپ را به نحوی تنظیم می‌کند که فشار موینگی مورد نظر حاصل شود. HV4 شیر تنظیم فشار نفت در منبع ذخیره نفت متصل به ترانسمیتر است. در صورتی که فشار این منبع بیش از حد مجاز بالا رود با باز کردن این شیر و انتقال جریان به مخزن اصلی فشار کنترل می‌شود. برای تخلیه خطوط لوله نیز این شیر باز می‌شود. HV5 نیز یک شیر برای تنظیم جریان از منبع تأمین فشار روباره به محفظه پر فشار است. HV6 عملکردی همانند HV4 در خط لوله آب سازندی دارد و فشار منبع آب سازندی را تنظیم می‌کند. HV7 یک شیر یک طرفه است که در ورودی پمپ آب سازندی نصب می‌شود و سیال از طریق این شیر از منبع اصلی به درون پمپ راه پیدا می‌کند. انتقال جریان از طریق این شیر تنها از منبع اصلی به پمپ ممکن است. شیر HV8 نیز همین وظیفه را در خصوص پمپ نفت ایفا می‌کند. یک شیر سه راهه دیگر نیز در مسیر انتقال جریان از منبع ذخیره نفت به ترانسمیتر اختلاف فشار وجود دارد. این شیر در دو حالت کار می‌کند. حالت نخست زمانی است که ترانسمیتر اختلاف فشار قرار است اختلاف فشار خروجی دو پمپ را اندازه بگیرد. در این حالت درگاه میان منبع نفت و ترانسمیتر اختلاف فشار باز می‌شود. در حالت دوم شیر سه راهه نقش شیر میانبر را برای ترانسمیتر اختلاف فشار بازی می‌کند و دو سر ترانسمیتر را به یکدیگر متصل می‌کند. یکی از کاربردهای این حالت کاری شیر، تنظیم کردن ترانسمیتر اختلاف فشار است. این حالت کاری شیر ترانسمیتر اختلاف فشار را از شیر متعادل کننده بی‌نیاز می‌کند.

۵- شیر اطمینان و دیسک گسیختگی: برای جلوگیری از افزایش بیش از حد فشار در برخی نقاط دستگاه تجهیزاتی به کار گرفته می‌شود. یک نمونه از این تجهیزات شیر اطمینان است که در خروجی پمپ آب سازندی، خروجی پمپ نفت و در مسیر انتقال جریان از منبع آب سازندی به ترانسمیتر اختلاف فشار قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از افزایش فشار بیش از اندازه قرار گرفته است. با بالا رفتن فشار این شیر باز شده و فشار اضافه تخلیه می‌شود. این شیر در مسیر جریان آب سازندی به ترانسمیتر اختلاف فشار قرار گرفته است. محفظه‌های نگهداری آب سازندی و نفت که به ترانسمیتر فشار متصل می‌شوند، حاوی سیالات پر فشار هستند. برای تخلیه هوای درون خط لوله و محفظه‌های نگهداری، دو درگاه

ترین وزن ممکن را داشته باشد و در عین حال مناسب کاربرد خاص خود باشد یعنی تنش ناشی از نیروهای وارده را تحمل کند.

هر نگهدارنده مغزه در خارجی ترین قسمت خود یک محفظه استوانه ای شکل دارد که سایر قسمت های نگهدارنده مغزه را در برمیگیرد. علت انتخاب این محفظه به صورت استوانه ای شکل توزیع بهتر تنش در دیواره محفظه است. ضخامت و جنس این محفظه استوانه ای به صورتی انتخاب می شود که توانایی تحمل فشار روباره ای اعمال شده به نمونه مغزه را داشته باشد. به منظور انجام عملیات مختلف بر روی نمونه مغزه چندین درگاه (درگاه) بر روی این محفظه خارجی نمونه مغزه قرار داده می شود. افزایش تعداد درگاه ها منجر به کاهش استحکام محفظه استوانه ای می شود. در نگهدارنده مغزه دستگاه CAPRI یک درگاه به منظور اعمال فشار روباره ای شعاعی بر روی محفظه خارجی نصب می شود. برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی نیز به چهار درگاه دیگر برای تماس کابل های دستگاه LCR meter با چهار الکترود تعبیه شده در اطراف و روی نمونه مغزه، نیاز است. دیگر جزء مهم در نگهدارنده مغزه، sleeve (روکش) است. این جزء فشار روباره اعمال شده را به نمونه مغزه منتقل می کند در عین حال باید استحکام لازم برای تحمل فشار را داشته باشد و مانع از عبور سیالات درون مغزه به بیرون شود. به منظور تحمل تنش ناشی از فشار روباره و آب بندی مناسب از جنس viton ساخته می شود. viton نوعی لاستیک مصنوعی و الاستومر فلئوئور پلیمر است که در استاندارد ASTM با نام FKM (نام تجاری وایتون) و در استانداردهای ISO با نام FPM شناخته می شود. این لاستیک در برابر گرما، خوردگی و فشار بسیار مقاوم است و فشار مورد نظر را به خوبی به نمونه مغزه منتقل می کند. ویژگی منحصر به فرد دیگر این لاستیک چسپندگی بسیار عالی به فلز است [۱۴]. همین امر اندازه گیری مقاومت الکتریکی توسط الکترود های فلزی که به صورت محیطی بر روی بدنه مغزه قرار می گیرند را تسهیل می نماید. زیرا در حین اندازه گیری مقاومت الکتریکی فشار روباره اعمال شده به sleeve به الکترودها نیز اعمال می شود و الکترودها با بدنه نمونه مغزه تماس مناسب پیدا می کنند. اتصال مناسب الکترودها به نمونه مغزه توسط sleeve از میانبردن جریان میان الکترودها جلوگیری میکند که این امر دقت اندازه گیری

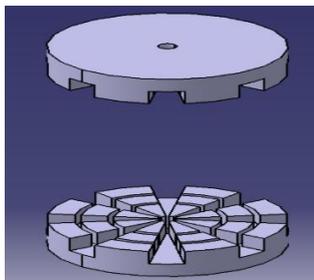
موینگی که برابر اختلاف فشار دو پمپ است) نسبت به مقادیر مطلق فشار است. به همین سبب برای دقت بیشتر در طول آزمایش همواره مقادیر نشان داده شده توسط ترانسسمیتر های فشار مطلق و تفاضلی با هم مقایسه می شوند. ترانسسمیتر دما نیز درون آن قرار می گیرد و در هر لحظه دمای آن را گزارش می کند. در صورتی که دما نسبت به مقدار مطلوب انحراف پیدا کند، چرخه کنترل دما به سرعت این اختلاف را جبران می کند. به کمک ترانسسمیتر فشار مطلق در خروجی پمپ آب، فشار در خروجی پمپ نفت هر لحظه با فشار مطلوب مقایسه می شود و در صورتی که از میزان مطلوب انحراف پیدا کند، کنترل کننده ی پمپ با تنظیم دبی و موقعیت پلانجر، فشار را به میزان مطلوب می رساند. عملکرد کنترل کننده پمپ نفت مشابه پمپ آب است با این تفاوت که کنترل کننده پمپ نفت با توجه به خروجی ترانسسمیتر فشار تفاضلی فرمان کنترلی را ثابت می کند. یعنی هدف کنترل کننده پمپ نفت تثبیت اختلاف فشار است. ترانسسمیتر فشار مطلق باید قادر به اندازه گیری فشار ۷۰۰۰ psi باشد. ترانسسمیتر اختلاف فشار نیز باید بتواند از ۱۵۰- تا ۱۵۰ psi را اندازه گیری کند. ترانسسمیتر دما نیز در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰ سانتی گراد باید قادر به اندازه گیری باشد. به این ترتیب تجهیزات ابزار دقیق نیز از نظر فرآیندی طراحی شدند.

۲.۵.۲. اجزای مکانیکی

۱- نگهدارنده مغزه الکتریکی: برای انجام آزمایش بر روی نمونه مغزه، وجود یک محفظه برای نگهداری مغزه و هم چنین اعمال فشار روباره ای الزامی است. تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش روی نمونه مغزه هر یک به نحوی با نگهدارنده مغزه در ارتباط قرار می گیرند. در دستگاه CAPRI نیز نگهدارنده مغزه با قابلیت هایی خاص مورد نیاز است. یک نگهدارنده مغزه اجزاء مختلفی دارد که هر یک نقش مخصوص به خود را دارند.

در طراحی نگهدارنده مغزه، ابتدا جنس قطعات این جزء از دستگاه CAPRI مشخص می شود. سپس طراحی بر اساس وظیفه ای که هر یک از قطعات نگهدارنده مغزه بر عهده دارد انجام می شود. ارتباط هر یک از این قطعات با سایر قطعات مشخص شده و نیروی های وارد بر قطعات در وضعیت های مختلف اعمال می شوند. پس از اعمال نیروها، ابعاد بهینه تعیین می شود. این ابعاد به نحوی هستند که قطعه سبک

پلاگ توزیع است؛ تنها مکان و جهت قرار گیری این دو قطعه با یکدیگر تفاوت دارد. پلاگ جمع آوری در خروجی جریان نمونه مغزه نصب می‌شود تا جریان خروجی را جمع آوری کند. شکل ۲ پلاگ توزیع و جمع آوری را نشان می‌دهد.



شکل (۲): پلاگ توزیع و جمع آوری

قطعه ferrule نیز به منظور اتصال، آب بندی و تقویت اتصالات موجود استفاده می‌شود. به منظور اعمال فشار روباره محوری از یک درگاه فشار که بر روی یکی از ferrule ها ایجاد شده و با فضای خالی میان نگهدارنده فشار و درپوش انتهایی در ارتباط است، استفاده می‌شود. البته مکان درگاه ایجاد شده می‌تواند بر روی درپوش انتهایی نیز باشد. فشار سیال اعمال شده از طریق درگاه فشار محوری از طریق یک روزنه به درون نگهدارنده فشار اعمال می‌شود. پلاگ قابل حرکت همانند یک پیستون به جلو رفته و فشار را به نمونه مغزه وارد می‌کند. سیال پر فشار در فضای خالی موجود میان نگهدارنده فشار و ferrule قرار گرفته و امکان اعمال نیرو توسط پلاگ قابل حرکت را فراهم می‌کند. در نتیجه فشار محوری اعمال می‌شود. شکل ۳ نگهدارنده مغزه الکتریکی طراحی شده در نرم افزار کتیا را نشان می‌دهد.

قرار دادن صفحات متخلخل به کار گرفته شده برای اندازه گیری فشار موینگی پیش از نمونه مغزه، منجر به منعطف کردن فرآیند ایجاد اشباع باقیمانده سیال در نمونه مغزه می‌شود و اجازه اندازه گیری فشار موینگی در حالت استاتیک را می‌دهد. در صورتی که صفحه متخلخل در تماس با نمونه مغزه قرار نمی‌گرفت امکان تولید فاز جابه جا کننده به همراه فاز جابه جا شونده بود و علاوه بر اینکه شرایط مورد نیاز اندازه گیری فشار موینگی استاتیک برقرار نمی‌شد برای محاسبه اشباع سیال جابه جاشونده، احتیاج به جداسازی و اندازه گیری سیال جابه جا کننده تولید شده در خروجی نیز بود. معمولاً جنس صفحات متخلخل از سرامیک است. یکی از

مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد. روی sleeve دو درگاه تعبیه شده است که محل عبور اتصالات الکتریکی است. در دستگاه CAPRI برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از چهار الکتروود، دو تا از الکتروود های بر روی بدنه نمونه مغزه قرار می‌گیرند. به منظور اندازه گیری دقیق تر پتانسیل و در نظر گرفتن تمامی نواحی محیط مغزه در اندازه گیری، این الکتروودها را به شکل حلقه ای انتخاب می‌کنند. از این دو الکتروود به عنوان الکتروود اندازه گیری پتانسیل استفاده می‌شود و در فاصله حدود ۱ اینچ از یکدیگر بر روی مغزه سوار می‌شوند. برای اندازه گیری پتانسیل این الکتروودها به اتصالاتی احتیاج است که مدار پتانسیل را به دستگاه LCR meter منتقل کند. این اتصالات از طریق دو درگاه تعبیه شده بر روی sleeve به دو الکتروود محیطی قرار گرفته بر روی نمونه مغزه متصل می‌شوند. دو درگاه قرار داده شده روی بدنه sleeve محل قرار گیری یک ارتباط دهنده الکتریکی است که از یک سمت به الکتروودهای حلقوی پتانسیل متصل است و از سمت دیگر به کابل متصل به دستگاه LCR meter متصل می‌شود. برای برقراری جریان الکتریکی در نمونه مغزه به دو الکتروود جریان احتیاج است. این دو الکتروود در دو طرف نمونه مغزه قرار می‌گیرند و جریان الکتریکی را در طول نمونه مغزه برقرار می‌سازند. در این قسمت نیز برای اتصال الکتروود جریان و دستگاه LCR meter از یک اتصال دهنده الکتریکی مانند اتصال دهنده سوزنی استفاده می‌شود. نکته مهم در خصوص این اتصالات توانایی تحمل فشار بالای روباره است که به نمونه مغزه وارد می‌شود. این اتصال دهنده ها، تحت فشار های روباره مختلف توانایی اتصال مناسب خود را حفظ کنند. الکتروود های جریان در بخش های انتهایی مغزه در تماس با قطعه پلاگ توزیع و پلاگ جمع آوری که بخشی از صفحات انتهایی هستند قرار گرفته است. پلاگ توزیع قطعه ای است که در سر راه ورودی سیال به نمونه مغزه نصب می‌شود و تقسیم جریان را به منظور افزایش سرعت برقراری تعادل و هم چنین دقت بیشتر آزمایش انجام می‌دهند. قسمتی از پلاگ توزیع که در تماس با اتصالات الکتریکی قرار می‌گیرد، عایق الکتریکی شده است تا از انحراف جریان الکتریکی به خارج از نمونه جلوگیری کند و جریان را به درون نمونه هدایت می‌کند. برای هدایت بهتر جریان الکتریکی سطح پلاگ توزیع با نقره آبکاری شده است. قطعه پلاگ جمع آوری نیز کاملاً مشابه

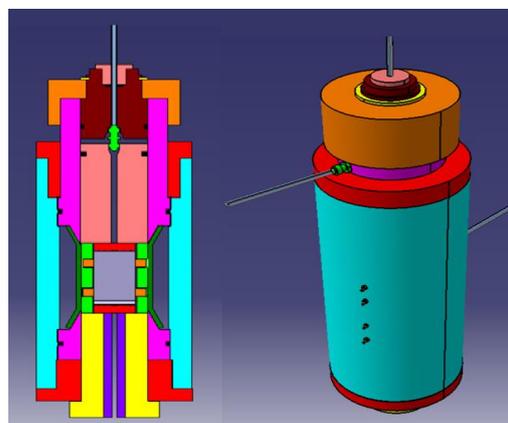
می‌شود. پس از طراحی فرآیندی لوله ها و اتصالات، میزان افت فشار رخ داده در آن ها، باید در طراحی چرخه کنترل لحاظ شود. به این ترتیب فشار موینگی خارجی در آزمایش به طور دقیق تری به نمونه مغزه اعمال می‌شود. در طراحی خطوط لوله دستگاه capri افت فشار خط لوله، ضابطه‌ی اصلی تعیین کننده قطر لوله نیست. زیرا عمده‌ی افت فشار در شیر کنترلی اتفاق می‌افتد و افت فشار خطوط لوله در برابر این اختلاف فشار ناچیز است. قطر لوله باید متناسب با بیشترین و کمترین سرعت مجاز نیز انتخاب شود. سرعت سیال باید از سرعت بیشینه کمتر باشد تا از پدیده‌های نظیر خوردگی، سرو صدا و ضربه قوچ جلوگیری کند. [۱۶] در سیستم CAPRI چون ذرات جامد وجود ندارد، سرعت کمتر از ft/s ۳ نیز تا حدی قابل قبول است. با توجه به کمترین دبی سیستم CAPRI که معادل 1 cc/min است، و در نظر گرفتن شرط سرعت بالاتر از 3 ft/s قطر متناظر محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی افت فشار در خطوط لوله در نظر گرفتن بازه‌های مختلف برای چگالی سیالات نفتی و سیال سازند افت فشار ناشی از اصطکاک و تغییر ارتفاع سیال در خطوط لوله در گستره 5 psi در نظر گرفته می‌شود. در خط لوله انتقال سیال سازند به نمونه مغزه، یک اتصال تی شکل، شیر هیدرولیکی دو راهه و دو زانویی قرار می‌گیرد. هر یک از این اتصالات، ضریب مقاومت ویژه‌ی خود را دارند که به صورت تجربی تعیین و توسط شرکت سازنده ارائه می‌شوند. بنابراین افت فشار ناشی از اتصالات خط لوله آب سازندی 0.08 psi و افت فشار ناشی از اتصالات خط لوله نفت 0.05 psi محاسبه می‌شود. بنابراین افت فشار ناشی از اتصالات نیز مقداری ناچیز است و در محدوده مجاز افت فشار قرار دارد.

برای تعیین ضخامت جداره‌ی لوله ابتدا باید تنش مجاز برای ماده‌ی که لوله از آن ساخته شده است در نظر گرفته شود. سپس این میزان تنش در رابطه‌ی تعیین ضخامت به عنوان تنش مماسی اعمال شده قرار داده می‌شود.

۳.۵.۲. اجزای الکتریکی

۱- محفظه نگهداری آب سازندی : برای اندازه گیری مقاومت آب سازند از یک سلول مقاومت استفاده می‌شود. اندازه گیری مقاومت آب سازندی با استفاده از روش دو الکتروود توسط یک مولتی متر صورت می‌گیرد و در حقیقت الکتروودهای جریان و

سرامیک های رایج مورد استفاده برای تولید صفحه متخلخل، آلفا آمونیا است که با انجام واکنش‌ها شیمیایی دستیابی به هر دو نمونه آب دوست و نفت دوست آن ممکن است. [۱۵]



شکل (۳): مونتاژ نهایی نگهدارنده مغزه‌ی الکترونیکی به همراه برش در راستای محور x

۲- اتصالات مکانیکی: برای اتصال مخازن نگهداری سیال به پمپ های متناظر و هم چنین اتصال پمپ به نمونه مغزه به لوله‌هایی از جنس استیل با تحمل فشار بالا مورد نیاز است. قطر این لوله‌ها سرعت سیال ورودی به نمونه مغزه را مشخص می‌کند. قطر معمولی که برای این لوله‌ها انتخاب می‌شود $\frac{1}{8}$ اینچ است. ضخامت این لوله‌ها نیز با توجه به تنش اعمال شده به آن‌ها تعیین می‌شود. زانویی‌ها از جمله دیگر اتصالات مکانیکی به کار گرفته شده هستند که طراحی آن‌ها در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

در طراحی لوله‌های هیدرولیکی که مسیر انتقال سیال از پمپ‌ها به نمونه مغزه هستند، قطر و ضخامت لوله به نحوی تعیین می‌گردد که بتوان جریان را از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر انتقال داد طوری که انتقال سیال، در افت فشار مجاز و نرخ فشاری که فرآیند تحمیل می‌کند، انجام پذیرد. با تعیین قطر لوله، به کمک محاسبه افت فشار و سرعت مجاز، لوله از نظر فرآیندی طراحی می‌شود. تعیین ضخامت دیواره و جنس لوله نیز طراحی مکانیکی است که با توجه به فشار سیال درون لوله انجام می‌پذیرد.

پس از انجام تحلیل و بررسی و در نظر گرفتن استاندارد های آزمایشگاهی از لوله‌هایی با قطر داخلی $\frac{1}{8}$ اینچ و ضخامت $\frac{2}{16}$ اینچ و از جنس فولاد ضد زنگ درجه‌ی H02-224 برای لوله‌های کوتاه و H02-213 برای لوله‌های بلند استفاده

اندازه گیری پارامترهای فشار مویبگی و مقاومت الکتریکی به برقراری هر چه سریعتر تعادل در نمونه نیز کمک می‌کند. دستگاه CAPRI با توجه به شرایط خاص آزمایشگاهی نیازمند یک سیستم کنترل خودکار است.

۶.۲ طراحی چرخه های کنترل

در دستگاه CAPRI کنترل چند پارامتر به صورت مستقیم بر نتایج آزمایش اثرگذار است و تنظیم این پارامترها حائز اهمیت است. بسته به حالت کاری هر یک از اجزاء دستگاه CAPRI طراحی چرخه کنترلی می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال پمپ های دستگاه CAPRI قادر به کار کردن در سه حالت فشار ثابت، دبی ثابت و حجم ثابت هستند. در آزمایش اندازه گیری فشار مویبگی، برای دقت بیشتر معمولاً پمپ ها در حالت فشار ثابت کار می‌کنند. در این حالت سایر متغیر های پمپ نظیر دبی و موقعیت پیستون پمپ، به نحوی تنظیم می‌شوند که فشار پمپ ثابت بماند. در ادامه به طور مفصل هر یک از این چرخه ها توضیح داده خواهند شد.

۶.۲.۱ چرخه کنترل دما

در مدت زمان انجام آزمایش تنظیم دمای داخل آون در دقت آزمایش اثرگذار است. دما بر حجم سیالات تزریق و تولید شده تاثیر می‌گذارد. بنابراین محاسبه اشباع دقیق سیالات درون مغزه مستلزم ثبات دمای داخل آون می‌باشد. از دیگر قابلیت دستگاه CAPRI اندازه گیری مقاومت الکتریکی آب سازندی در دما های مختلف است. دما تأثیر مستقیم بر میزان مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده دارد. لذا کنترل دمای آون بسیار مهم است. به کمک معادلات انتقال حرارت سیستم آون الکتریکی چرخه کنترلی طراحی می‌شود. برای کنترل موثر دما از کنترل کننده PID استفاده می‌شود.

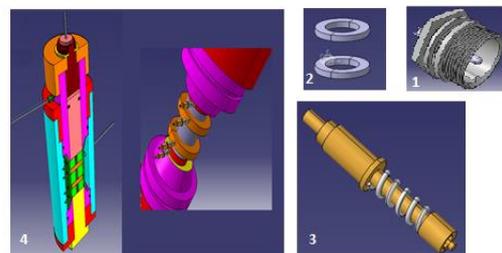
گستره دمای کاری آون طراحی شده از ۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد است. به طور مثال برای تنظیم و نگهداری دما در ۱۸۰ درجه سانتی گراد جدول ضرایب PID به کمک روش زیگلر- نیکولاس به صورت جدول ۱ به دست می‌آید [۱۷].

جدول ۱. ضرایب کنترل کننده PID آون	
مقدار	کنترل کننده
۲۰۰۰	Proportional (P)
۰.۶۲۵	Integral (I)
۰.۱۵۶۲۵	Derivative (D)

پتانسیل مشترک هستند. اندازه گیری مقاومت ویژه آب سازند باید در دما و فشار مخزن صورت بگیرد. لذا سلول مقاومت RW درون آون و تحت فشار روباره ای قرار می‌گیرد.

۲- اتصالات الکتریکی: برای اتصال منبع تأمین ولتاژ و جریان به گیرنده های جریان و ولتاژ که در حقیقت الکترودها هستند از کابل های حامل جریان الکتریکی استفاده می‌شود. این کابل ها با استفاده از یک واسطه که اتصال دهنده نامیده می‌شوند، به الکترودها متصل می‌شوند. در دستگاه CAPRI معمولاً از اتصال دهنده سوزنی با قابلیت تحمل فشار بالا استفاده می‌شود. برای اتصال مناسب و قابل تکرار الکترودها اتصال دهنده سوزنی از یک گمانه با ساق قابل تنظیم استفاده می‌شود. با اعمال فشار، ساق به سمت پایین حرکت کرده و اتصال دهنده سوزنی به خوبی به الکترودها می‌چسبند.

۳- بخش های الکتریکی نگهدارنده مغزه: این بخش ها الکترودهای جریان و پتانسیل، کابل های الکتریکی اتصال دهنده دستگاه LCR meter و الکترودها و واسطه ها که اتصال دهنده کابل ها و الکترودها هستند، را شامل می‌شوند. شکل ۴ محل قرارگیری هر یک از این اجزاء را نشان می‌دهد.



شکل (۴): اجزای الکتریکی و چگونگی قرارگیری آن ها در نگهدارنده مغزه (۱-اتصال دهنده، ۲-الکترودهای پتانسیل، ۳- گمانه‌ی الکتریکی، ۴- نحو اتصال الکترودها به نمونه مغزه)

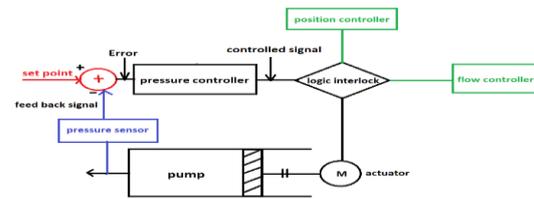
۴- منبع تغذیه: برای تأمین انرژی مورد نیاز پمپ ها و انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه LCR meter معمولاً از منبع تغذیه ای با ولتاژ ۲۲۰ VAC و فرکانس ۵۰ هرتز استفاده می‌شود.

۵.۲.۴ سیستم کنترل

استفاده از چرخه های کنترلی داری بازخورد برای عملکرد بهتر دستگاه بسیار مفید است. با تنظیم پارامترهایی نظیر فشار پمپ ها، دمای آون و دبی پمپ ها علاوه بر افزایش دقت

۲.۶.۲. چرخه کنترل فشار

سه فشار موثر در تجهیزات دستگاه CAPRI، فشار پمپ آب سازندی، فشار پمپ نفت و فشار روبراه ای اعمال شده به نمونه مغزه هستند. فشار پمپ های آب و نفت که از نوع سورنگی هستند از طریق گشتاور تولید شده توسط موتور پمپ ها تأمین می شود. شماتیک چرخه ی کنترلی نشان داده شده در شکل ۵ برای کنترل فشار خروجی پمپ های آب و نفت استفاده می شود.



شکل (۵): چرخه کنترل فشار پمپ

همانطور که در شکل ۵ مشخص است، پس از تعیین میزان فشار مورد نیاز برای آزمایش فشار مویبگی، این فشار به عنوان مقدار تنظیم شده به کنترل کننده فشار داده می شود. کنترل کننده فشار نیز، فرمان کنترلی مناسب را صادر می کند. فرمان کنترلی صادر شده از جانب کنترل کننده فشار به سمت یک عملگر منطقی می رود. عملگر منطقی با بررسی فرامین کنترلی دریافت شده از کنترل کننده های موقعیت، دبی و فشار بر اساس منطق حاکم بر آن فرمان مناسب را صادر کرده و به عمل کننده می گوید که به چه میزان گشتاور موتور برای اعمال فشار مورد نظر احتیاج است. کنترل کننده مرکزی باید سه حلقه کنترل گشتاور، موقعیت و دبی را باهم هماهنگ سازد. هدف از ایجاد چرخه کنترلی، تزریق و یا تولید میزان مشخص سیال با فشار مطلوب در هر زمان است. کنترل کننده با اعمال دستور به موتور پمپ، موقعیت شفت پمپ، سرعت و جهت دبی را به نحوی تعیین می کند که فشار در میزان مطلوب قرار بگیرد.

با تنظیم ضرایب PID، فشار مطلوب برای پمپ آب و فشار مویبگی مطلوب حاصل می شود. این امر منجر به افزایش دقت اندازه گیری فشار مویبگی می شود.

جدول ۲. ضرایب کنترل کننده PID پمپ آب و نفت

مقدار	کنترل کننده
۶۰۰	Proportional (P)
۱۰۰	Integral (I)
۰.۴۵	Derivative (D)

با توجه به مقادیر به دست آمده برای ضرایب کنترل کننده PID، لازم است گشتاور و دور موتور اعمال شده بررسی شوند. در صورتی که گشتاور و دور موتور در محدوده ی مجازی که توسط موتور ارائه می شود قرار بگیرد، تلاش کنترلی قابل اعمال است.

در صورتی که موتور پمپ نفت بتواند در دور ۲۰۰۰ rpm، گشتاوری معادل ۶۵۰ تحویل دهد، عملیات کنترل به طور مناسب انجام می شود. نکته ی دیگری که حائز اهمیت است این است که چرخه ی کنترلی پمپ نفت با فرض ثابت ماندن مقدار مطلوب انجام شد. در فرآیند اندازه گیری فشار مویبگی، مقدار مطلوب برای پمپ نفت به صورت پله ای تغییر می کند بنابراین ممکن است به تنظیم مجدد ضرایب کنترلی نیاز باشد. در این صورت بهتر است از یک کنترل کننده تطبیقی استفاده شود. بسته به نیرویی که پلانجر اعمال می کند، سیال تحت فشاری خاص به بیرون پمپ تزریق و یا به داخل کشیده می شود. فشار اعمال شده از جانب پلانجر، بر اساس قانون پاسکال به سیال درون سورنگ انتقال داده می شود.

۲.۷. بهینه سازی ابعاد قطعات نگهدارنده مغزه

این مرحله شامل سه بخش است که عبارتند از: تحلیل استاتیکی، تحلیل حرارتی و بهینه سازی ابعاد قطعات نگهدارنده مغزه.

پس از طراحی اولیه اجزاء مختلف نگهدارنده مغزه و نسبت دادن ماده ی سازنده به آن ها، این قطعات باید از نظر استاتیکی آنالیز شوند. در نخستین مرحله از تحلیل استاتیکی، شبکه بندی صورت می گیرد. یعنی مدل به صورت ریاضی تعریف می شود و به المان های کوچکی تقسیم می شود. سپس برای انجام تحلیل آماده می شود. مرحله ی بعدی تعریف قید تکیه گاهی است. یعنی مدل به وسیله انواع تکیه گاه ها نظیر تکیه گاه گیر دار محدود می شود. پس از انجام مراحل گفته شده نوبت به بارگذاری می رسد. در این مرحله تمامی فشارها، نیرو های نقطه ای و گسترده، گشتاور و... که به قطعات مختلف نگهدارنده مغزه وارد می شوند، به مدل در حال تحلیل اعمال

بیشترین تنش اعمال شود، به منظور انجام دقیق تر محاسبات، اندازه‌ی مش‌ها تا حد امکان کوچک انتخاب می‌شود.



شکل (۶): sleeve شبکه بندی شده در نرم افزار کنیا

پس از شبکه بندی قطعه و محدود کردن آن با قیدهای تکیه گاهی و بارگذاری فشار، تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و جابه جایی sleeve بررسی می‌شود. سپس ابعاد sleeve به گونه بهینه سازی می‌شود که تنش را در محدوده مجاز نگه دارد و جابه جایی را کمینه کند. به عنوان نمونه در شکل ۷ نمودار تنش sleeve نشان داده شده است.

مطابق انتظار، تمرکز تنش در شکل ۷، در محل سوراخ‌های sleeve مشاهده می‌شود. در طراحی قطعات زمانی که ضخامت یک بخش کم می‌شود، تنش در آن قسمت با ضریب بیشتری اعمال می‌شود. مطابق شکل ۷، بیشینه تنش اعمال شده به sleeve در محدوده تنش مجاز قرار دارد. هم چنین میزان جابه جایی بر اثر اعمال فشار روباره در محدوده ۰.۹ میلی متر قرار دارد که برای جزئی نظیر sleeve مشکلی ایجاد نمی‌کند. از آنجا که تنش اعمال شده در محدوده تنش الاستیک قرار دارد، تغییر شکل دائم در قطعه به وجود نمی‌آید. پس از انجام آزمایش‌های مکرر و تحت فشار قرار گرفتن مداوم، ممکن است خستگی در sleeve ایجاد شود و عملکرد قبلی را از خود نشان ندهد. بنابراین این قطعه پس از چندین مرتبه آزمایش باید تعویض گردد.

می‌شود. در نهایت در بخش نتیجه گیری انواع نتایج نظیر تغییر شکل قطعه، تنش ون - میز، تغییر مکان قطعه بر اثر بارگذاری، بیشترین و کمترین میزان تنش و ... را مشاهده کرد [۱۸]. به منظور انجام همزمان تحلیل استاتیکی و حرارتی و بررسی اثرات دما بر روی قطعه، دمای مورد نظر به قطعه اعمال می‌شود و تحلیل استاتیکی در دمای متناظر صورت می‌گیرد. حال که قطعه از منظر استاتیکی و حرارتی تحلیل شده است، آماده‌ی انجام مرحله بهینه سازی است. بهینه سازی با چند هدف صورت می‌گیرد. نخستین هدف بهینه سازی کاهش هزینه‌ی ساخت قطعه است. یعنی در بهینه سازی ابعاد قطعات به نحوی انتخاب می‌شوند که علاوه بر پاسخگویی به نیاز دستگاه، از کمترین جرم نیز برای ساخت آن‌ها استفاده شده باشد. در بهینه سازی هدف بیشینه و یا کمینه کردن یک پارامتر است. این پارامتر، به عنوان پارامتر هدف شناخت می‌شود. سایر پارامترهای که در بهینه سازی در نظر گرفته می‌شوند، پارامترهای موثر بر پارامتر هدف هستند. به دسته ای از پارامترهای موثر که قابل تغییر هستند، پارامتر آزاد گفته می‌شود. در بهینه سازی پارامترهای آزاد به نحوی تغییر می‌کنند که پارامتر هدف بسته به شرایط مسئله بیشینه یا کمینه شود. دسته ای از پارامترهای موثر نیز غیر قابل تغییر هستند که به آن‌ها قیدهای مسئله گفته می‌شود. هم چنین گاهی برای پارامترهای آزاد نیز شروطی وجود دارد. برای مثال این پارامترها نباید از حد مشخصی کمتر و یا بیشتر باشند. این شروط نیز باید در مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شود. بهینه سازی ابعاد قطعات نگهدارنده مغزه پس از انجام آنالیز استاتیکی و حرارتی صورت می‌گیرد. هدف از بهینه سازی ابعاد قطعات نگهدارنده مغزه، تعیین ابعاد قطعات به نحوی است که کمترین میزان تغییر شکل، جابه جایی را داشته باشند و تنش وارد شده به آن‌ها در محدوده تنش مجاز جنس قطعه باشد. در ادامه برای تمامی قطعات نگهدارنده مغزه که در قسمت قبل طراحی شده اند، تحلیل استاتیکی و حرارتی انجام می‌شود و ابعاد بهینه برای آن‌ها تعیین می‌شود.

۷.۲.۱. تحلیل استاتیکی و حرارتی قطعات نگهدارنده مغزه

شکل ۶ به عنوان نمونه نحوه شبکه بندی sleeve برای انجام تحلیل را نشان می‌دهد. در بعضی نقاط که پیش بینی می‌شود

بیشینه تنش مجاز به عنوان پارامتر هدف در عملیات بهینه سازی در نظر گرفته شده است و نرم افزار کتیا با تغییر ضخامت retainer بیشینه تنش اعمال شده به قطعه را طوری تنظیم می کند که از تنش آستانه کمتر باشد. در این مسئله بهینه سازی ضخامت retainer متغیر آزاد است که با تغییر قطر آن می توان بیشینه تنش اعمال شده را مدیریت کرد.

۸.۲. محاسبات پارامترهای مهندسی نفت و تجزیه و تحلیل آن ها

این بخش به بررسی داده های اندازه گیری شده به کمک دستگاه CAPRI می پردازد. با انجام محاسبات مربوط به هر یک از مجموعه داده ها، خروجی دلخواه شامل منحنی فشار موینگی بر حسب درجه اشباع، شاخص مقاومت الکتریکی سنگ و پارامترهای معادله آرچی حاصل می شود.

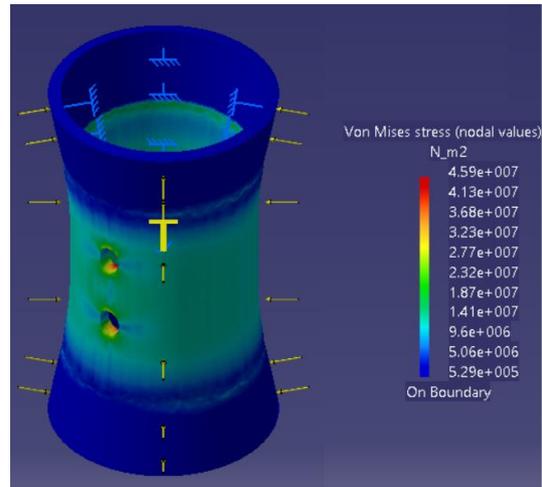
۸.۲.۱. نتایج آزمایش اندازه گیری PC به کمک دستگاه CAPRI

پس از انجام آزمایش اندازه گیری فشار موینگی در چهار چرخه ی آشام و تخلیه خود به خودی و اجباری، منحنی کامل فشار موینگی بر حسب درجه اشباع حاصل می شود. برای دستیابی به این منحنی، به خروجی ترانسسمیتر اختلاف فشار و اشباع سیالات درون نمونه مغزه احتیاج است. اشباع سیالات درون نمونه مغزه به کمک موازنه حجمی میان شرایط اولیه و شرایط ثانویه نمونه مغزه بدست می آید. [۱۹]

برای انجام محاسبات مربوط به داده های اندازه گیری شده توسط دستگاه CAPRI یک فایل اکسل برنامه نویسی شده است که به صورت خودکار با فشردن دکمه ی اجرا، کلیه محاسبات را انجام می دهد. محاسبات مربوط به شاخص ترشوندگی نیز به کمک نسبت گیری سطح زیر نمودار فشار موینگی مربوط به چرخه های آشام و تخلیه در حضور سیالات مناسب و برقراری شرایط مناسب قابل انجام است.

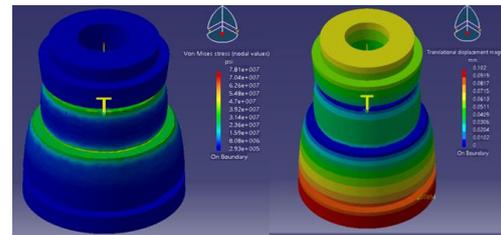
۸.۲.۲. نتایج آزمایش اندازه گیری RI به کمک دستگاه CAPRI

اندازه گیری مقاومت ویژه به طور گسترده در چاه پیمایی و مطالعات آزمایشگاهی برای تخمین تخلخل و اشباع آب استفاده می شود. پارامترهای الکتریکی اندازه گیری شده a ، m و n در نمونه سنگهای متخلخل، الزامات اساسی برای



شکل (۷): نمودار تنش ون-میز، جابه جایی و تغییر شکل در sleeve

سایر قطعات نگهدارنده مغزه به همین ترتیب مورد تحلیل استاتیکی و حرارتی قرار می گیرند. شکل ۸ نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی و حرارتی را پلاگ انتهایی نگهدارنده پلاگ قابل حرکت، نشان می دهند.



شکل (۸): نمودار تنش ون-میز و جابه جایی پلاگ نگهدارنده پلاگ قابل حرکت پس از اعمال فشار

همانطور که در شکل ۸ پیداست به سبب تنش اعمال شده به پلاگ نگهدارنده، تغییر شکل پلاستیک رخ داده است. این امر به سبب بزرگ بودن حفره ای است که در میانه ی این پلاگ به عنوان مجرای عبور لوله ی حامل جریان سیال و اتصالات متناظر با آن، قرار گرفته است. بنابراین اندازه ی این حفره باید اصلاح شود. به علاوه با کمک این پلاگ، فشار روبراه در راستای محوری به نمونه مغزه اعمال می شود. این قطعه باید تحمل این تنش را نیز داشته باشد.

پس از انجام تحلیل استاتیکی و حرارتی، بهینه سازی ابعاد اجزاء نگهدارنده مغزه با هدف ایجاد تنش مجاز برای اجزاء و کمترین جابه جایی آن ها در طول انجام آزمایش صورت می گیرد. برای نمونه در بهینه سازی ابعاد retainer

است انجام می‌شود. در این مرحله با تزریق سیال غیر ترشونده به نمونه مغزه اشباع سیال سازند در مغزه کم می‌شود و در اشباع های مختلف، مقاومت ویژه الکتریکی نمونه مغزه اندازه گرفته می‌شود. سپس مقدار n تعیین می‌شود. رسم منحنی I_R شاخص مقاومت ویژه بر حسب اشباع آب در نمودار تمام لگاریتمی نیز مقدار n را به دست می‌دهد. [۲۰]

در این پژوهش با بهره گیری از روابط آرچی، پارامترهای m و n به همراه پیچاپیچی به کمک برنامه نویسی در اکسل محاسبه شده اند که به عنوان نمونه نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است.

input		process parameters	
core identification	sand stone	Brine identification	
core length(mm)	55.9	salinity (g/l)	20
core diameter(mm)	37.5	cell factor (m)	0.0075
pore volume(cc)	16.38	coreholder factor(m)	0.04348292
porosity(%)	26.5307589		
resistivity analysis			
Formation factor	Rw(ohm)	Rtw(ohm.m)	Rcore(ohm)
12	30	35.085	0.2831375
13	35	32.1	0.24075
14	40	29.4	0.2205
15	45	27	0.2025
16	50	25.08	0.1881
17	55	23.35	0.175125
18	60	21.85	0.163875
19	65	20.8	0.156

شکل (۹) محاسبه پارامترهای ضریب سازند، ضریب سیمان شستگی و پیچاپیچی

۳. نتایج و بحث

در این قسمت ابعاد بهینه قطعات نگهدارنده مغزه، ویژگی های تجهیزات به کار رفته و خروجی نهایی دستگاه CAPRI بیان می‌شود. ابعاد بهینه قطعات نگهدارنده مغزه در جدول ۳ ذکر می‌شود. (ک) نماد کوچکترین و (ب) نماد بزرگترین قطر است.

دستگاه LCR meter با بازه کاری 0.01 ohm.m تا 1000 ohm.m مورد نیاز است. البته گاهی به سبب شرایط آزمایش و اتصال نامناسب الکترودها به نمونه مغزه و پدیده هایی نظیر پس ماند، مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده به طور مصنوعی بسیار بالاتر از آنچه که در واقعیت وجود دارد، گزارش می‌شود. بنابراین لازم است که بازه ای اندازه گیری توسط دستگاه LCR meter ضریب اطمینانی داشته باشد. در نتیجه بهتر است این دستگاه تا محدوده 2000 ohm.m را بتواند اندازه بگیرد.

ارزیابی اشباع سیالات و ذخیره هیدروکربن در مخزن هستند. برآورد ذخایر هیدروکربن بسیار متأثر از مقادیر n وارد شده به شیب ساز مخزن است. وابستگی مقدار نفت در جای تخمین زده شده به پارامتر n در مخازن نفت دوست، شدیدتر است. [۲۰]

برای تعیین هر یک از پارامترهای رابطه آرچی، احتیاج به برقراری شرایط خاصی در نمونه مغزه است. اولین گام تعیین مقاومت ویژه آب سازندی R_w است. برای تعیین این پارامتر محفظه‌ی تعبیه شده در دستگاه، از آب سازندی پر می‌شود. سپس توسط دستگاه LCR Meter مقاومت الکتریکی اندازه گیری می‌شود. از آنجا که ابعاد محفظه‌ی حاوی آب سازندی مشخص است، مقاومت ویژه الکتریکی آب سازند تعیین می‌شود.

بنابراین مقاومت ویژه آب سازند در آزمایشگاه با کمک ولتاژ، جریان الکتریکی و دانستن ابعاد محفظه قابل محاسبه است. گام بعدی، تعیین ضریب سازند R_o است. برای اینکار نمونه مغزه به طور کامل به وسیله آب سازندی اشباع می‌شود. پس از آن مقاومت الکتریکی مغزه به وسیله دستگاه LCR Meter تعیین می‌شود. برای تعیین ضریب سیمانی شدن m ، نمونه مغزه های مختلف با تخلخل های متفاوت به طور کامل با آب سازندی اشباع می‌شوند و مقدار R_o برای هر یک از آن ها تعیین می‌شود. سپس مقدار m برای هر یک از نمونه های مغزه با رسم مقادیر ضریب سازند بر حسب تخلخل در نمودار لگاریتمی - لگاریتمی تعیین می‌شود و شیب منحنی مقدار m را به دست می‌دهد.

برای بدست آمدن مقدار دقیق a می‌توان از نمودار لگاریتمی ضریب سازند بر حسب تخلخل بهره جست. شیب این نمودار مقدار m را نشان می‌دهد و طول از مبدأ نمودار، یعنی نقطه ای که مقدار تخلخل برابر ۱ است مقدار a را نشان می‌دهد. هم چنین برای بررسی اثر دما بر ضریب سیمانی شدن مقاومت ویژه نمونه مغزه R_o و مقاومت ویژه سیال سازند R_w در دماهای مختلف اندازه گیری می‌شود و سپس مقدار m محاسبه می‌شود. به کمک سه پارامتر R_o ، R_w و تخلخل پیچاپیچی محیط متخلخل محاسبه می‌شود. گام بعدی اندازه گیری، در راستای بدست آوردن پارامتر n که ضریب اشباع

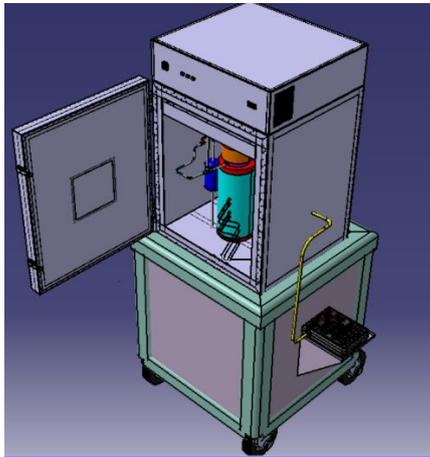
جدول ۱. ابعاد بهینه‌ی قطعات نگهدارنده‌ی مغزه

نام	ارتفاع	قطر خارجی	قطر داخلی	قطر (ک)(ب)	ضخامت	طول رزوه داخلی	طول رزوه خارجی
sleeve	15Cm	-	6 cm	4 cm	5 mm	-	-
Ferrule1	6Cm	10 cm	6 cm	10 cm	2 cm	-	-
Ferrule2	16 cm	10 cm	6 cm	10 cm	2 cm	-	3.3
پلاگ توزیع	1 cm	3.81 cm	3.175 mm	3.81 cm	0.9 cm	-	-
end plug	5 cm	11 cm	6 cm	14 cm	2 cm	5 cm	3.5 cm
o-ring seal	0.5 cm	10 cm	9.5 cm	-	0.5 cm	-	-
retainer	13 cm	6 cm	2 cm	8 cm	2 cm	13 cm	4.5 cm
بدنه نگهدارنده مغزه	28 cm	14 cm	10 cm	10 cm	2.5 cm	4.8 cm	-
صفحه متخلخل	1 cm	3.81 cm	-	-	-	-	-
moveable plug	12 cm	6 cm	0.5 cm	-	2.75 cm	-	-
پلاگ انتهایی	8.5 cm	6 cm	0.5	6 cm	2.7 cm	2 cm	-
پلاگ توخالی	7 cm	12 cm	9 cm	14 cm	1.5 cm	-	4.8 cm
End cap	5.5 cm	12 cm	9.5 cm	5 cm	1.2 cm	3.3 cm	-
tubing	6.8 cm	0.476 cm	0.3175 cm	-	0.16 cm	-	-
Tubing plug	2.5 cm	2.25 cm	0.48 cm	3.3 cm	0.9 cm	-	2 cm
Rw cell	10 cm	8 cm	-	-	-	-	-
الکتروود جریان	0.5 cm	3.81 cm	3.175 mm	-	-	-	-
الکتروود پتانسیل	1 cm	4.81 cm	3.8 cm	-	-	-	-

است. بیشترین دبی مورد نیاز نیز در حدود 50 cc/min است. بنابراین با فرض بازده مکانیکی ۰.۸۵ برای مکانیزم پیچ ساچمه ای که در پمپ های دستگاه capri استفاده می‌شود، توان مورد نیاز پمپ 3.752 hp محاسبه می‌شود. با مشخص شدن محدوده دور موتور گام زمانی برای کمترین و بیشترین دبی تعیین می‌شود. گام زمانی فواصل زمانی بین پله های موتور را تعیین می‌کند و به کمک آن سرعت و موقعیت شفت موتور تنظیم می‌شود. به کمک مشخصاتی که در جدول ۴ آمده است، زمان مورد نیاز برای دستیابی به یک دبی مشخص تعیین می‌شود. بررسی میزان گرمای مورد نیاز آون الکتریکی نشان می‌دهد که به حداکثر ۳۶۰۰ کیلو وات توان الکتریکی نیاز است.

ضخامت جداره $\frac{2}{16}in$ انتخاب می‌شود. بنابراین برای خطوط لوله مورد استفاده در دستگاه capri از لوله هایی از جنس فولاد ضدزنگ با درجه H و قطر داخلی $\frac{1}{8}in$ و قطر خارجی $\frac{4}{16}in$ استفاده می‌شود. استاندارد مورد استفاده برای دستگاه CAPRI، API 6A است. این استاندارد دارای چندین کلاس کاری است که هر یک از این کلاس ها نشان دهنده‌ی فشار کاری در دمای ۱۰۰ درجه فارنهایت می‌باشد. کلاس کاری ۱۰۰۰۰ psi برای شیر آلات، فلنج ها و اتصالات دستگاه CAPRI انتخابی محتاطانه و ایمن است.

با در نظر گرفتن حجم پیستون معادل ۱۰۰ میلی لیتر برای پمپ سورنگی و طول دوره ۶ cm و با فرض استفاده از بیشترین دبی، پمپ دستگاه CAPRI که ۵۰ cc/min است، نیروی مورد نیازی که شفت موتور باید به سورنگ اعمال کند ۷۳۲۴.۴۵۶ lbf است. حداکثر فشار مورد نیاز پمپ های تزریق دستگاه capri طراحی شده در این پژوهش، ۷۰۰۰ psi



شکل (۱۱): خروجی نهایی دستگاه CAPRI

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی تئوری حاکم بر پارامترهای فشار موینگی و شاخص مقاومت سنگ و بررسی روش های اندازه گیری این دو پارامتر، دستگاهی با قابلیت اندازه گیری همزمان فشار موینگی و شاخص مقاومت سنگ طراحی شد. در این طراحی، اجزاء دستگاه CAPRI به دقت بررسی و سپس در نرم افزار کتیا طراحی شدند و در کنار یکدیگر قرار گرفتند. تحلیل استاتیکی و حرارتی بر روی اجزاء مختلف دستگاه انجام شد تا از عملکرد اجزاء در حین انجام آزمایش اطمینان حاصل شود. در این پژوهش نگهدارنده مغزه الکتریکی با قابلیت همزمان اندازه گیری فشار موینگی و مقاومت الکتریکی، به کمک نرم افزار کتیا، طراحی و مدلسازی شد و پس از تحلیل استاتیکی و حرارتی از نظر ابعادی بهینه سازی شد. کلیه شیرها، اتصالات هیدرولیکی و الکتریکی از نظر فرآیندی و مکانیکی طراحی شدند. پمپ های دستگاه از نظر فرآیندی طراحی شده و چرخه کنترلی برای تنظیم پارامترهای فشار و دبی پمپ ها طراحی شد. آون دستگاه CAPRI به طور کامل بررسی شد و چرخه کنترل مناسب برای تنظیم دمای آن نیز طراحی شد. با توجه به اعتبار سنجی های صورت گرفته در هر مرحله از طراحی انجام شده در این پژوهش، نتایج حاصل از آن میتوانند با دقت بالایی برای ساخت دستگاه CAPRI به کار گرفته شوند.

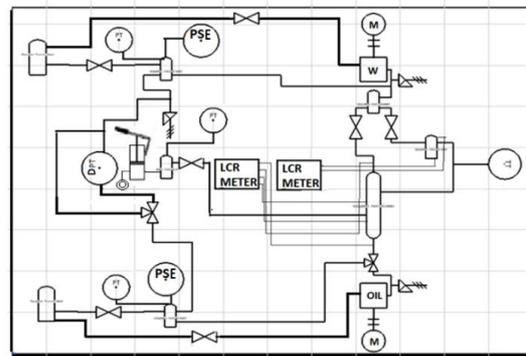
مراجع

- [1] M. Fleury, D. Longeron "Combined resistivity and capillary pressure measurements using micropore

جدول ۴. مشخصات پمپ سورنگی

تعداد پله ها	400
طول پیچ (سانتی متر)	0.297
حجم سیال درون سیلندر (میلی لیتر)	100
طول سیلندر (سانتی متر)	6

P&ID ها نقش مهمی در تعمیرات و نگهداری و نیز اصلاح فرآیندی که آن را توصیف می کنند، دارند. نمایش توالی فیزیکی تجهیزات و سیستم ها و نیز اتصال و ارتباط سیستم ها با یکدیگر از اهمیت فراوانی برخوردار است. در شکل ۱۰ تصویر نقشه P&ID دستگاه CAPRI نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نقشه خطوط لوله و ابزار دقیق

پس از طراحی هر یک از اجزاء دستگاه CAPRI، اجزاء در کنار یکدیگر قرار می گیرند. چیدمان اجزاء در کنار یکدیگر به نحوی است که علاوه بر ایمن بودن طراحی، کمترین فضا نیز اشغال شود. به طور معمول آون دستگاه CAPRI بر روی یک میز کار قرار می گیرد. نگهدارنده مغزه الکتریکی و محفظه نگهدارنده سیال سازند نیز درون آون قرار می گیرند. از فضای داخل میز می توان برای قرار دادن تجهیزاتی نظیر پمپ، مخازن سیالات سازند و... استفاده کرد. در نهایت پس از تحلیل استاتیکی میز برای تحمل وزن قطعات، نگهدارنده مغزه، مخزن نگهدارنده سیال سازند درون آون قرار می گیرند. سایر تجهیزات شامل پمپ ها، مخازن نگهداری سیالات، لوله ها و اتصالات، شیرها، ترانسسمیترهای فشار و اختلاف فشار در داخل محفظه زیر آون قرار می گیرند. شکل ۱۱ تصویر کامل شده ی دستگاه CAPRI را با حضور تمامی اجزاء طراحی شده نشان می دهد.

- using vapor desorption method" Society of Petroleum Engineers,2010.
- [15] S, Sakthivel, "Imidazolium based ionic liquids for enhanced oil recovery on the carbonate reservoir," Journal of Molecular Liquids, Vol. 366, 2022.
- [16] H. Jang " A Review: Technological Trends and Development Direction of Pipeline Robot Systems," Trans. AIME, Journal of Intelligent & Robotic Systems Vol. 146, PP. 54-67,2022.
- [17] Y. ALTUN "temperature control of the electrically heated oven production system by using ziegler-nichols method ", International Conference on Hydraulics and Pneumatics, HERVEX,2016.
- [18] Z. Zheng" Mechanical behavior and failure mechanisms of cylindrical and prismatic rock specimens under various confining stresses." SCA-9945, International Journal of Damage Mechanics, 2022.
- [19] Moss, A. K. and Jing, X. D. "Resistivity Index and Capillary Pressure Characteristics of Reservoir Sandstones in Different Wettability Conditions." SCA-9945, (1999).
- [20] W. McCarter, "Electrode Configurations for Resistivity Measurements on Concrete" ACI materials journal,2009.
- [21] N.Begum, "A case study of reservoir parameter estimation in Norne oil field, Norway by using Ensemble Kalman Filter (EnKF) ", Innovative Exploration Methods for Minerals, Oil, Gas, and Groundwater for Sustainable Development, p.61-78,2022.
- [22] Sun.x, "Estimation of Flow Functions During Drainage Using Genetic Algorithm", SPE Annual Technical Conference and Exhibition 10(4): 449-457,2003.
- membrane technique" Journal of Petroleum Science and Engineering,1998.
- [2] R. Dernaika et al "Capillary Pressure and Resistivity Index Measurements in a Mixed-Wet Carbonate Reservoir" PETROPHYSICS, VOL. 55, NO. 1,2014. N. M. M. C. S.M. Mahmood, "Laboratory Measurements of Electrical Resistivity at Reservoir Conditions," SPE Formation Evaluation, 1991.
- [3] N. Mahmood, "Laboratory Measurements of Electrical Resistivity at Reservoir Conditions," SPE Formation Evaluation, 1991.
- [4] G. Sharifi, "Measurement of Archie Parameters of Some Carbonate Cores at Full Reservoir Conditions" Journal of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tehran, Vol.46, No.1,2012.
- [5] R, Dernaika "Drainage Capillary Pressure and Resistivity Index from Short-Wait Porous-Plate Experiments" PETROPHYSICS, VOL. 57, NO. 4,2016.
- [6] A.Dujalili, "Effect of Heterogeneity on Capillary Pressure and Relative Permeability Curves in Carbonate Reservoirs. A Case Study for Mishrif Formation in West Qurna/1 Oilfield, Iraq," Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 24 No. 1 ,2023.
- [7] A. tavangarrad, "Capillary pressure saturation curves of thin hydrophilic fibrous layers: effects of overburden pressure, number of layers, and multiple imbibition–drainage cycles", Textile Research Journal, vol.89,2019.
- [8] R. Dernaika "Combined capillary pressure and resistivity index measurements in tight gas sand using vapor desorption method" Society of Petroleum Engineers,2010.
- [9] S. G. P. M. K. P. a. S. M. Tamotsu Matsui, "Relationship Between Electrical Resistivity and Physical Properties of Rocks," in International Society for Rock Mechanics, Melbourne, Australia, 2000.
- [10] Moss, A. K. and Jing, X. D. "Resistivity Index and Capillary Pressure Characteristics of Reservoir Sandstones in Different Wettability Conditions." SCA-9945, (1999).
- [11] M.Dernika, " Hysteresis of Capillary Pressure, Resistivity Index and Relative Permeability in Different Carbonate Rock Types," Petrophysics 53 (05): 316–332, 2011.
- [12] W.zhao, "Experimental Study of Complex Resistivity Characteristics of a Sandstone Reservoir under Different Measurement Conditions," Petroleum geoscience, 2023.
- [13] Taylor & Francis "Experimental Analysis of Steam Generator Tube Rupture in CIRCE Facility for MYRRHA Configuration" Nuclear Technology, 2023.
- [14] R. Dernaika "Combined capillary pressure and resistivity index measurements in tight gas sand