

# شکست های زودرس محور پمپ واحد بازیافت آب پالایشگاه در اثر خوردگی میکروبی و خوردگی خستگی

تحقیق در علوم و مهندسی نفت،  
سال شانزدهم، شماره ۵۴  
صفحه ۷۵-۶۵، ۱۳۸۵

جهانبخش ساعدی\*، سید شمس الدین عابدی و محمد رمضان یارندی  
پژوهشکده حفاظت صنعتی و محیط زیست، پژوهشگاه صنعت نفت  
saedij@ripi.ir

## چکیده

محور یک پمپ واحد بازیافت آب، در مدت ۹ ماه کارکرد سه بار دچار شکست شده است. شرایط آب و مشخصات قطعات شکسته شده مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشات صورت گرفته نشان می دهند با وجود انجام عملیات تصفیه شیمیایی و بیولوژیکی، میکرواورگانسیم های SRB توانسته اند در مناطق راکد در سطح پمپ فعالیت کرده و از طریق ایجاد حفره های عمیق و توئل مانند، شرایط لازم برای بروز تمرکز تنش و شروع خوردگی خستگی را فراهم کنند. مورفولوژی خوردگی میکروبی حاصله به همراه مشخصه های پیشرفت ترک در سطح شکست مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## مقدمه

پمپ ها از جمله تجهیزاتی هستند که به صورت گسترده در صنایع مختلف به کار می روند. در طراحی پمپ ها سعی می شود تا شرایط کاری پمپ از نقطه نظر مسایل مکانیکی و خوردگی مد نظر قرار گیرد. با این وجود بروز شرایط ناخواسته قادر است عمر مفید پمپ را به طور محسوسی کاهش دهد [۱-۵].

در مقاله حاضر علل شکست دو نمونه از محور پمپی از یک واحد بازیافت آب که در مدت ۹ ماه کارکرد، سه بار دچار ترک خوردگی و شکست شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مشکلات از زمانی آغاز شد که پمپ مورد نظر به علت نشتی و خرابی آب بند مکانیکی، تحت تعمیرات قرار گرفت. در واحد مذکور دو پمپ کاملاً مشابه (از نقطه نظر ساختار طراحی و مکانیکی) وجود دارد که به صورت یک هفته در میان کار کرده و عملیات پمپاژ را انجام می دهند. شکست های یاد شده فقط

## واژه های کلیدی

محور پمپ،  
شکستگی،  
خوردگی خستگی،  
میکرواورگانسیم های احیا کننده سولفات

### ریز ساختار

ریز ساختار قطعات شماره ۱ و ۲ در شکل ۲ نشان داده شده اند. ریزساختار قطعه شماره ۱ شامل مارتنزیت تمپر شده می باشد. ریز ساختار قطعه شماره ۲ در سطح و نواحی دور از سطح (مغز) متفاوت است و اختلاف ریزساختار نشان می دهد که در حین ساخت یا بعد از آن، عملیات جوشکار تعمیراتی بر روی سطح این قطعه صورت گرفته است. ریزساختار مغز قطعه (نواحی دور از سطح) مارتنزیت تمپر شده می باشد و ظاهر آن تا حدودی با قطعه شماره ۱ متفاوت است.

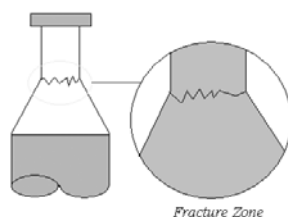
آنالیز ترکیب شیمیایی شفت های مورد استفاده در مقایسه با استاندارد UNI 40NiCrMo3 در جدول ۱ ارایه شده است. اختلاف آنالیز ترکیب شیمیایی مغز و سطح شفت شماره ۲ نیز نشان می دهد که جوشکاری تعمیراتی مذکور به وسیله الکتروود فولاد ساده کربنی صورت گرفته است (جدول ۲).

پمپ B بوده است.

### آزمایشات

#### مشاهدات ظاهری

قطعات مورد بررسی مربوط به قسمت نازکتر محور پمپ می باشند (شکل ۱. الف). شیار قطعه شماره ۲ در اثر خوردگی و تنش های مکانیکی وارده به اندازه  $1/6$  mm گشاد شده است (شکل ۱. ج). محصولات خوردگی تیره رنگ بر روی سطوح شکست و سطوح جانبی محور پمپ دیده می شوند. برخلاف قطعه شماره ۱ علایم سطح شکست قطعه شماره ۲ در اثر برخورد و سایش دو تکه شکسته شده بر روی هم، تا حدودی از بین رفته است.



(الف)



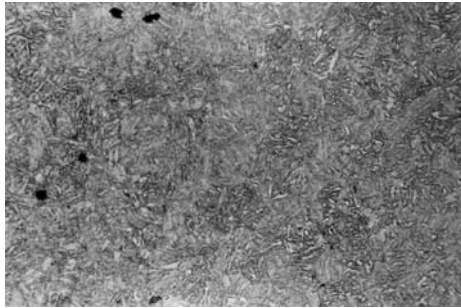
(ج)



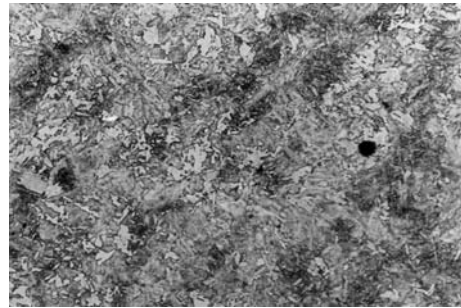
(ب)

شکل ۱- الف- نمایش شماتیک محل شکست محور پمپ و تصاویر محورهای شکسته شده،

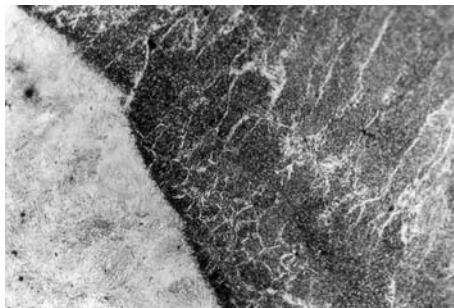
ب- قطعه شماره ۱ و ج- قطعه شماره ۲



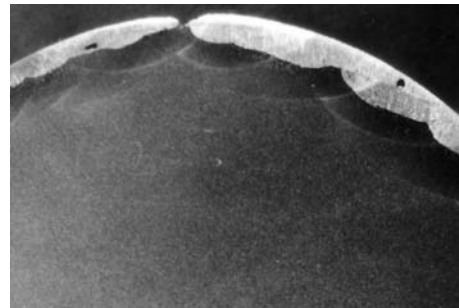
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

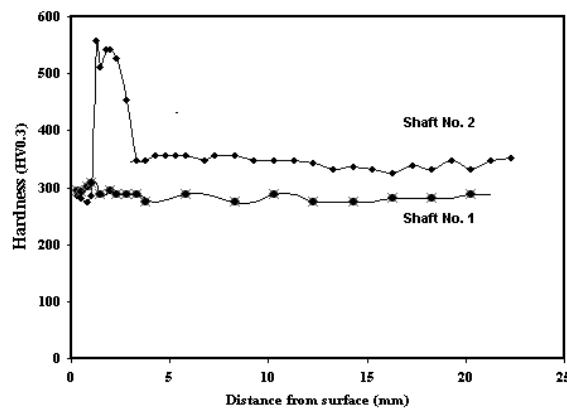
شکل ۲- تصاویر الف- ریزساختار قطعه شماره ۱ (X۲۰۰)، ب- ریزساختار مغز قطعه شماره ۲ (X۲۰۰)، ج- ماکرواچ مقطع شفت شماره ۲ و د- ریزساختار ناحیه جوشکاری تعمیری شده (X۱۰۰)

جدول ۱- آنالیز ترکیب شیمیایی شفت های شکسته شده به روش اسپکترومتری جرمی در مقایسه با استاندارد (wt%)

عنصر نمونه	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%Pb	%Fe
قطعه شماره ۱	۰/۴۲	۰/۳	۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۲۱	۰/۸۳	< ۰/۰۱	پایه
قطعه شماره ۲	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۲۱	۰/۸۵	< ۰/۰۱	پایه
استاندارد UNI 40NiCrMo3	۰/۳۷-۰/۴۳	۰/۱۵-۰/۴	۰/۵-۰/۸	۰/۶-۱	۰/۱۵-۰/۲۵	۰/۷-۱	-	پایه

جدول ۲- مقایسه آنالیز ترکیب شیمیایی سطح و مغز قطعه شماره ۲ (wt%)

عنصر نمونه	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%Pb	%Fe
قطعه شماره ۲	وسط مقطع (مغز)	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۸۵	< ۰/۰۱	پایه
نزدیک به سطح خارجی	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۳۱	۰/۰۸	۰/۳۳	< ۰/۰۱	پایه



شکل ۳- تغییرات سختی ساختار قطعات شماره ۱ و ۲ به صورت تابعی از فاصله از سطح

می گردد. ویال های تلقیح شده، در تاریکی و در دمای حدود ۳۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و به طور روزانه، ظهور رنگ سیاه آن (حداکثر تا ۱۲ روز) بررسی می شود. سپس با مراجعه به جدول مربوطه مقدار جمعیت، با توجه به زمان سیاه شدن، به روش مشاهده روزانه تعیین می شود. یادآوری می شود که پمپ مذکور به همراه یک پمپ دیگر که هر کدام به صورت یک هفته در میان کار می کنند، در حوضچه پساب واحد بازیافت آب قرار داشته و به منظور ضد عفونی پساب، هیپوکلریت کلسیم به طور مداوم به حوضچه پمپاژ، تزریق می شود. مقدار هیپوکلریت کلسیم تزریقی به میزان ۱/۵ کیلوگرم به ازای ۲۰۰ لیتر آب بوده و محل تزریق آن در حوضچه پمپاژ در نزدیکی پمپ A می باشد (شکل ۴). لازم به ذکر است که پمپ B که دور از محل تزریق قرار دارد، همان پمپی است که محور آن دچار خوردگی و شکست شده است.

### شکست نگاری<sup>۲</sup>

به منظور بررسی مورفولوژی سطوح شکست و آثار خوردگی حادث شده بر روی قطعات شکسته شده و نیز آنالیز محصولات خوردگی در این نواحی، بررسی های شکست نگاری و آنالیز شیمیایی فازها و محصولات خوردگی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی SEM و سیستم آنالیز EDAX آن انجام پذیرفت.

### سختی سنجی

آزمایش سختی سنجی به دو روش ماکرو و میکرو بر روی هر دو قطعه شماره ۱ و ۲ صورت گرفت. نتایج ماکروسختی سنجی به روش راکول C، متوسط سختی مغز قطعات شماره ۱ و ۲ را به ترتیب ۲۳ و ۳۲ HRC نشان می دهد. ملاحظه می شود که سختی قطعه شماره ۲ تا حدودی از قطعه شماره ۱ بیشتر است. به علاوه در نزدیکی سطح که شامل نواحی جوش تعمیراتی و HAZ است، سختی قطعه شماره ۲ بسیار بالاتر است. آزمایش میکروسختی سنجی نیز به روش ویکروز با وزنه ۳۰۰ گرمی از مقطع هر دو قطعه انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ به صورت تابعی از فاصله از سطح آورده شده است.

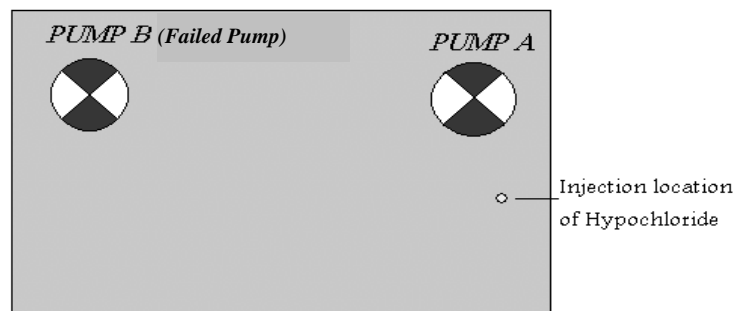
### بررسی شرایط آب

نمونه ای از نتایج آنالیز پساب خروجی پمپ مورد نظر (پمپ B) در جدول ۳ ارائه شده است. SRB موجود در پساب با استفاده از کیت های مخصوص شمارش باکتری [۶] مورد اندازه گیری قرار گرفت که نتایج آن برابر  $10^5$  /ml به دست آمد. در این آزمایش برای هر نمونه آب، ۲ عدد ظرف کوچک شیشه ای<sup>۱</sup> در نظر گرفته و مشخصات و تاریخ تلقیح بر روی آن قید می شد. توسط سرننگ استریل ۲ میلی لیتر آب مورد آزمایش، به یک عدد ویال نمونه گیری منتقل شده و پس از چند بار تکان دادن، به ۲ ویال حاوی محیط کشت منتقل

2. Fractography

1. Vial

## Pumpage Station



شکل ۴- تصویر شماتیک از محل و موقعیت قرارگیری نازل تزریق ماده ضد عفونی کننده هیپوکلریت کلسیم

نسبت به پمپ های A و B

جدول ۳- نتایج آنالیز شیمیایی پساب خروجی از پمپ مورد نظر

CL <sub>2</sub> (ppm)	COD (ppm)	CaH (ppm as Ca CO <sub>3</sub> )	TH (ppm as Ca CO <sub>3</sub> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	SiO <sub>2</sub> (ppm)	CON. (μS/cm)	PO <sub>4</sub> (ppm)	pH
۰/۱۵	۱۶	۳۵۰	۴۶۰	Tr	۲۳	۲۲۸۰	۱	۸
۰.۵	-	۲۲۴	۴۱۶	۳	۱۵	۲۸۸۰	۰/۷	۸.۵

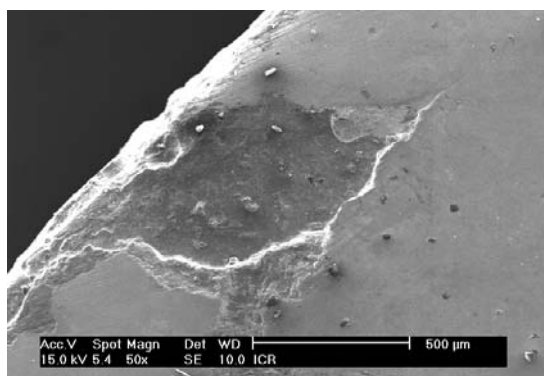
### الف. قطعه شماره ۱

ملاحظه می شود که میزان گوگرد موجود در محصول خوردگی به طور غیر عادی بالا می باشد (شکل ۶-ب). در ادامه بررسی های میکروسکوپی و به منظور ارزیابی مورفولوژی و مکانیزم جوانه زنی و اشاعه ترک در قطعات مورد نظر، سطح شکست آنها، ابتدا به وسیله محلول اسید کلریدریک ۶ نرمال حاوی بازدارنده هگزامتیل تترآمین به روش اولتراسونیک تمیز کاری شد. تصاویر تهیه شده در ارتباط با مکانیزم جوانه زنی و اشاعه ترک در شکل ۷ ارایه شده است. همانگونه ملاحظه می شود، SRB با ایجاد حفره در سطح خارجی قطعات (شکل ۷. الف) شروع به نفوذ به داخل قطعات کرده است و آثار پیشروی تونل مانند آن از طرف سطح به سمت مغز نمونه در تصویر کاملاً مشهود است. در بعضی از نواحی نیز آثار خوردگی - خستگی را می توان به عنوان عامل مؤثر در جوانه زنی و اشاعه ترک مشاهده نمود (شکل ۷. ب و ج). آثار اشاعه ترک به صورت شبه کلیواژ در شکل ۷. د مشهود است.

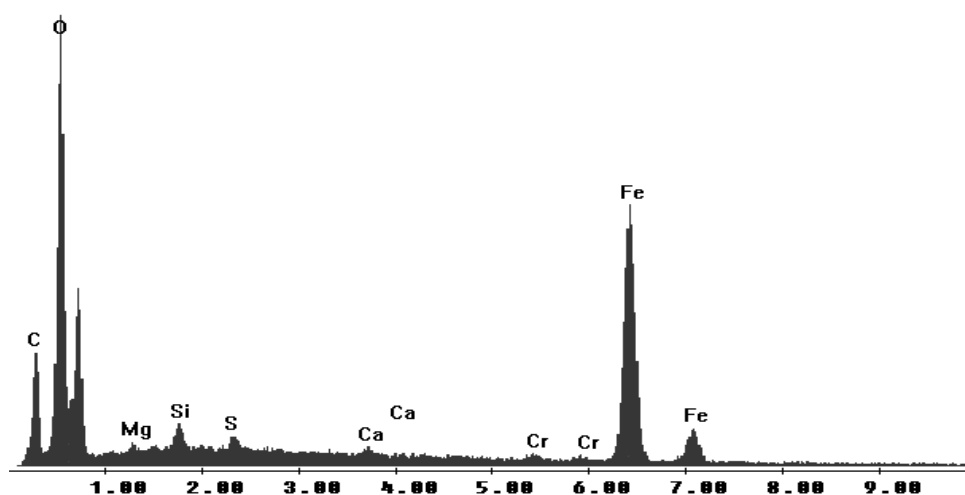
تصاویر تهیه شده از مورفولوژی ترک ها و حفرات به وجود آمده در ناحیه نزدیک به سطح این قطعه به همراه نتایج آنالیز شیمیایی محصولات خوردگی درون آن در شکل ۵ ارایه شده است. همانطور که از این تصویر ملاحظه می شود ترک از کف یک حفره سطحی شروع به اشاعه کرده است. آنالیز محصولات نشان می دهد که میزان گوگرد موجود در کف حفره و سطوح ترک نسبتاً بالا می باشد (شکل ۵. ب).

### ب. قطعه شماره ۲

تصویر ایجاد حفره و شروع خوردگی (که احتمالاً ناشی از فعالیت میکروارگانیزم های غیرهوازی از نوع SRB بوده است) در سطح شفت و اشاعه تونل مانند آن به داخل مقطع نمونه به همراه نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی محصولات خوردگی درون آنها در شکل ۶ ارایه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، SRB ابتدا یک حفره خوردگی در سطح ایجاد کرده و سپس از کف حفره مذکور شروع به نفوذ تونل مانند به طرف مغز نمونه کرده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- الف- تصویر مورفولوژی ایجاد حفره و ترک در لبه قطعه شماره ۱ و ب- نمونه آنالیز EDAX ترکیب شیمیایی محصولات خوردگی در دهانه و سطوح ترک

### بحث و بررسی

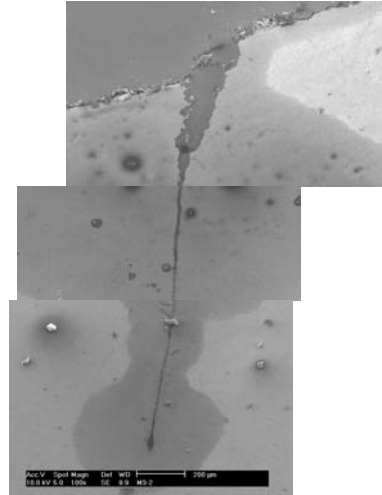
مشاهده نتایج آنالیز شیمیایی آب در نگاه اول نشان می دهد که میزان اجزاء مختلف در حد قابل قبولی بوده و عاملی که می تواند مستقیماً نقش خوردگی را داشته باشد، در داده های موجود مشاهده نشد.

نتایج آزمایش میکروبی انجام شده نشان دهنده آلوده بودن بیش از حد پساب بوده و لذا می توان گفت که آب موجود در پمپ، پتانسیل خوردگی میکروبی را دارا می باشد. به علاوه با توجه به آنکه شرایط عملیاتی پمپ به گونه ای است که هر

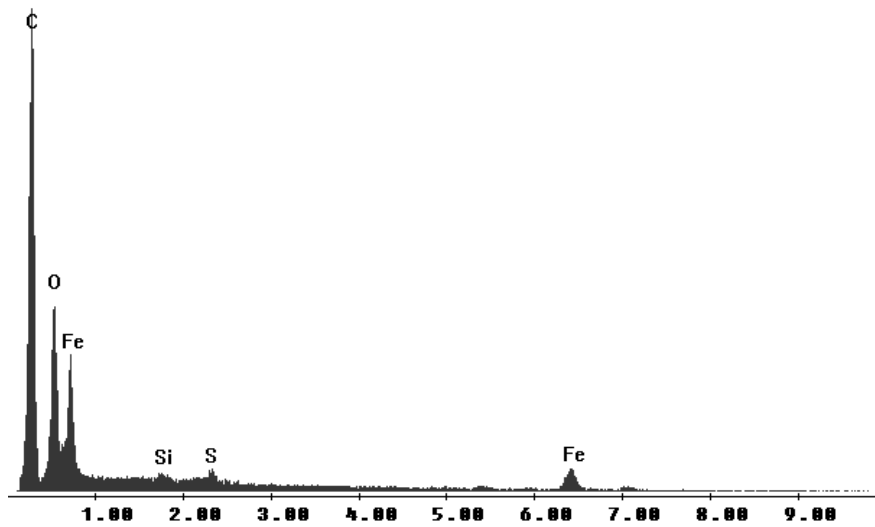
بررسی علل تخریب شفت پمپ مورد نظر را می توان از دو جنبه ذیل مورد تجزیه و تحلیل قرار داد:

الف- شرایط شیمیایی و بیولوژیکی آب

ب- مشخصات مکانیکی، متالورژیکی و شرایط عملیاتی پمپ  
شرایط آب از نظر خوردگی می تواند در ایجاد شکست دخیل بوده و عوامل مکانیکی و متالورژیکی اجزاء پمپ، نقش تخریبی خود را در شرایط عملیاتی پمپ نشان می دهند.

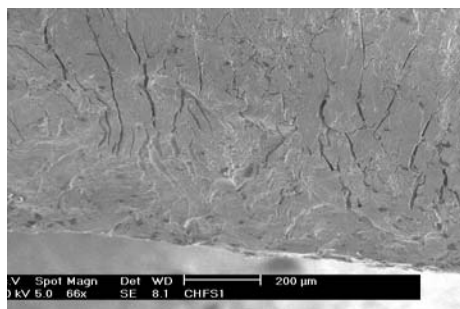


(الف)

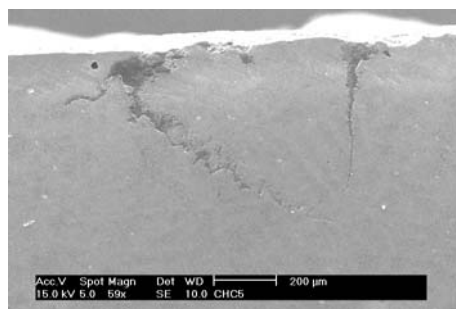


(ب)

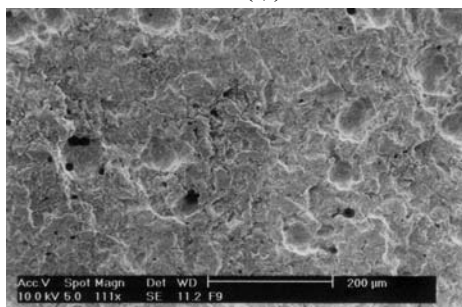
شکل ۶- الف- تصویری از مورفولوژی خوردگی موضعی ناشی از SRB و اشعه تونل مانند آن به داخل ساختار قطعه شماره ۳ و ب- نمونه آنالیز EDAX ترکیب شیمیایی محصولات خوردگی درون حفرات تونل مانند



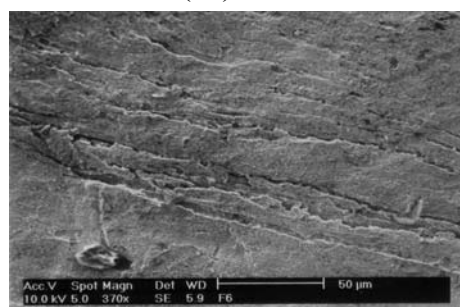
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

**شکل ۷-** مورفولوژی و مکانیزم جوانه زنی و اشاعه ترک در سطح شکست قطعات مورد بررسی الف- حفره ایجاد شده توسط SRB و مسیرهای کانال شکل در جلوی آن و ب و ج - مجموعه ترک های ناشی از خوردگی - خستگی و د- اشاعه ترک با مکانیزم شبه کلیواژی در انتهای فرایند شکست

است. بنابراین آب راکد درون پمپ B مستعد به خوردگی میکروبی می باشد در حالی که دور بودن محل تزریق هیپوکلریت به پمپ B (شکل ۴) سبب می شود که در هنگام در سرویس قرار گرفتن این پمپ، آب راکد درون پمپ A حاوی هیپوکلریت کافی باشد. به طور کلی بروز خوردگی میکروبی را از سه جنبه می توان مورد بررسی قرار داد:

۱- میکروبی

۲- متالورژیکی

۳- آنالیز شیمیایی محصولات خوردگی

بالا بودن میزان SRB در پساب پمپ مورد نظر، جنبه اول بررسی یا وجود شرط اول را برای این نوع خوردگی تایید می کند. وجود حفرات متعدد بر روی سطوح جانبی و سطوح شکست و ظاهر تونل مانند با دیواره های شیار دار که تا چند میلیمتر به زیر سطح ادامه دارد می تواند به حفره های میکروبی

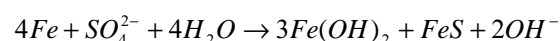
هفته یکی از آنها در سرویس قرار می گیرد، لذا می توان انتظار داشت که زمان کافی برای راکد بودن آب درون پمپ ها و زمینه لازم برای خوردگی میکروبی فراهم بوده است. با وجود آنکه در نتایج آزمایش شیمیایی آب، نمی توان عامل خورنده ای را که مستقیماً نقش خورندگی را داشته باشد، تشخیص داد، لیکن وجود مواد آلی و ازت آمونیاکی را می توان از عواملی دانست که بر روی کارایی هیپوکلریت تاثیر می گذارند. به بیان دیگر وجود ازت آمونیاکی در خروجی فیلتر نشان می دهد که کلر اندازه گیری شده به صورت کلر ترکیبی (مونودی کلروآمین) است که قابلیت میکروب کشی ضعیفی دارد. از سوی دیگر نزدیک بودن محل تزریق هیپوکلریت به پمپ A در ایستگاه پمپاژ نشان می دهد که در هنگامیکه پمپ A در سرویس می باشد، پراکندگی میزان هیپوکلریت در حوضچه ایستگاه پمپاژ به صورت یکنواخت نبوده و میزان آن درون پمپ B کمتر از حد لازم



نمی باشد لیکن وجود شرایط غیرعادی مانند هم راستا نبودن<sup>۱</sup> بخش های مختلف محور و مشکلات مربوط به کوپلینگ ها می تواند سبب بروز عوامل ناخواسته ای مانند ارتعاشات غیرعادی، رزونانس و یا ممان های سیکلی شود که پیامد آن خستگی قطعات مختلف پمپ می باشد. گشاد شدن پهنای شیار روی شفت های مورد بررسی (قطعه شماره ۲) نشان دهنده تحمل تنش های زیاد غیر معمول توسط آنها می باشد. شکست ایجاد شده در شفت ها، درست از ناحیه ای که تغییر قطر در شفت شروع می شود آغاز شده است. این مکان، از نظر تمرکز تنش نسبت به مقاطع دیگر شفت، به ایجاد ترک مستعدتر می باشد. بررسی سطوح شکست نشان داد که ترک ها عمدتاً از زیر حفرات شروع به گسترش کرده اند (شکل ۷). شکست در ابتدای رشد و نزدیک سطح عمدتاً به صورت مرزدانه ای بوده و اشاعه ترک پس از مقداری رشد به صورت شبه کلیواژی بوده است. ترک های ریز زیادی عمود بر جهت گسترش ترک نیز مشاهده شد. وجود ترک های ریز دسته جمعی، از مشخصات پدیده خوردگی خستگی می باشند [۱، ۲ و ۵]. هرچند که ظاهر شبه کلیواژی، کلیواژی و اشاعه مرزدانه ای به طور کلی جزء علائم شکست های خستگی به حساب نمی آیند، لیکن در بسیاری از موارد به عنوان پیامدهای طبیعی اشاعه ترک خستگی در محیط خورنده مطرح می شوند. در بررسی سطوح شکست یکی از قطعات آثار خطوط رود خانه ای مشاهده شد. لیکن در بررسی های SEM، علائم قابل توجه ای از Striation ها مشاهده نشد. در خصوص فولادهای استحکام بالا و همچنین در شرایطی که محیط خورنده توأم با خستگی است، عدم مشاهده واضح Striation را می توان ناشی از، از بین رفتن آنها در اثر پدیده خوردگی (خصوصاً در هنگام در معرض قرار گرفتن طولانی مدت سطح شکست نمونه با محیط خورنده و اتمسفر) دانست [۵]. به هر حال Striation ها در خوردگی خستگی، معمولاً از نوع ترد بوده و فاصله آنها تابع سرعت رشد ترک می باشد و در رشد بالا سرعت های تشخیص آنها مشکل تر است.

ارتباط داده شده که نمونه ای از تصاویر آنها در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج آنالیزهای انجام شده به وسیله SEM از محصولات خوردگی، میزان قابل توجه گوگرد را درون ترک ها و سطوح شکست نشان می دهد (شکل های ۶ و ۵). منشاء این میزان گوگرد می تواند ناشی از واکنش هایی باشد که به واسطه باکتری های احیاء کننده سولفات (SRB) انجام می شود. این باکتری ها غیر هوازی هستند، با این حال در شرایط هوازی نیز می توانند زنده بمانند لیکن فعال نیستند. SRB ها قادرند تا در دماهای بالا تا ۸۰°C و pH ۵ تا ۹ به حیات خود ادامه دهند [۷ و ۸]. در واکنش هایی که به واسطه آنها انجام می شود، سولفات های غیر آلی در حضور هیدروژن به سولفید احیاء می شوند و خوردگی به علت هیدروژن جذب شده اتفاق می افتد. واکنش کلی به صورت ذیل می باشد:



بنابراین تا اینجا می توان گفت که شرایط بروز خوردگی میکروبی شفت مورد نظر از هر سه جنبه آزمایشات میکروبی، متالورژیکی و محصولات خوردگی مورد تأیید می باشد و می توان آنها را از عوامل اصلی در شکست شفت تلقی کرد. اکنون لازم است که آنالیز شکست را با توجه به علائم سطوح شکست، مورد بحث قرار دهیم.

خوردگی میکروبی در شرایطی که پمپ B خارج از سرویس قرار دارد، سبب ایجاد حفراتی بر سطح شفت آن شده است و وجود این حفرات، حداقل نقش جوانه زنی را در ایجاد ترک عهده دار بوده اند.

گسترش و رشد ترک تا حد زیادی تابع شرایط بار گذاری می باشد. پمپ مورد بررسی عمودی بوده و لذا انتظار می رود که نسبت به پمپ های افقی، شفت آن کمتر تحت بار گذاری خمشی و تنش های کششی ناشی از آن قرار داشته باشد. در شرایط عملیاتی نرمال و در هنگامی که عدم تعادل در حرکت محور پمپ وجود ندارد، بروز تنش های کششی و ممان خمشی قابل توجهی در بخش های مختلف آن متصور

سیکلی می شوند و عامل چهارم، مقاومت به خستگی آلیاژ را تحت تأثیر قرار می دهد. اختلاف قابل ملاحظه میکروساختار و خواص مکانیکی آلیاژ شفت های مورد بررسی، گویای آن است که مقاومت به خستگی دو آلیاژ علیرغم یکسان بودن ترکیب شیمیایی، متفاوت است. سختی پائین آلیاژ قطعه شماره ۱ نشان می دهد که عملیات حرارتی آن در هنگام ساخت به خوبی انجام نشده است. به علاوه علت جوشکاری سطحی قطعه شماره ۲ با الکترودی که احتمالاً از جنس فولاد کربنی ساده بوده است، با توجه به سختی پذیری آلیاژ فلز پایه که از جنس فولاد کم آلیاژ می باشد، نامعلوم بوده و انجام آن بدون عملیات حرارتی، غیر منطقی به نظر می رسد.

### نتیجه گیری

- ۱- خوردگی میکروبی ناشی از SRB نقش اصلی در جوانه زنی ترک ها داشته و اشاعه ترک منجر به شکست در اثر پدیده خوردگی - خستگی به وقوع پیوسته است.
- ۲- عدم تعادل کافی و هم راستا نبودن شفت و عدم نصب صحیح کوپلینگ ها از جمله عوامل مکانیکی است که سبب ایجاد تنش های زیاد سیکلی در شفت می شوند. لذا می بایست هنگام بستن آنها کنترل دقیق و حساسیت کافی در خصوص هم راستا شدن اجزاء شفت و نصب صحیح آنها صورت گیرد.
- ۳- بروز شکست های متوالی در پمپ B و عدم مشاهده شکست در پمپ A می تواند ناشی از موقعیت قرار گیری متفاوت آنها نسبت به محل تزریق مواد ضدعفونی کننده باشد. بنابراین موقعیت نازل تزریق مواد ضد عفونی کننده را می توان به گونه ای تغییر داد تا شرایط یکسان برای هر دو پمپ حاصل شود، و یا اینکه یک نازل تزریق مواد ضد عفونی کننده کمکی نیز در نزدیکی پمپ B، نصب شود.
- ۴- بالا بودن میزان SRB پساب در خروجی پمپ، نشان می دهد که عملیات افزودن مواد ضد عفونی کننده به خوبی انجام نمی شود که در این ارتباط افزایش غلظت کلر به صورت شوک مانند تا حد  $4 \text{ mg/lit}$  می تواند موثر باشد.

از مجموع بحث های مطرح شده چنین می توان گفت که خوردگی میکروبی سبب ایجاد حفرات زیادی بر سطح شفت شده است و از زیر چنین حفراتی، جوانه زنی ترک آغاز شده و با مکانیزم خوردگی خستگی رشد و نهایتاً شکست شفت به وقوع پیوسته است. شرایط عملیاتی غیر معمول نقش اصلی را در جوانه زنی و شروع شکست شفت عهده دار بوده اند. این شرایط از یک سو به وجود میزان قابل توجه میکروارگانیزم های SRB مربوط می شود و از سوی دیگر ناشی از ایجاد تنش های زیاد سیکلی در اثر عوامل مکانیکی می باشد. وجود میزان قابل توجه SRB، به عدم دسترسی کافی پساب درون پمپ B به مواد ضدعفونی کننده مربوط می باشد. این عدم دسترسی می تواند منشأهای مختلفی داشته که موارد زیر از جمله این عوامل می باشند:

- ۱- عدم تزریق کافی هیپوکلریت کلسیم
  - ۲- یکنواخت نبودن مقدار آن در کل پساب درون ایستگاه پمپاژ
  - ۳- ساکن بودن آب درون پمپ در زمان های بیشتر از مدت طراحی
  - ۴- نقش مواد دیگر آب بر کارآیی کلر فعال
- عوامل مکانیکی و متالورژیکی که می تواند منجر به ایجاد تنش های زیاد سیکلی و نهایتاً خستگی در شفت شود نیز تابع پارامترهای مختلفی است که برخی از آنها به شرح زیر می باشند:
- ۱- عدم تنظیم کافی و هم راستا نبودن تکه های شفت در هنگام نصب یا تعمیرات
  - ۲- عدم نصب صحیح کوپلینگ ها
  - ۳- فرسوده شدن کوپلینگ ها و یا بستن کوپلینگ های نو به کوپلینگ های کهنه و فرسوده
  - ۴- خواص متالورژیکی آلیاژ شفت
- هر یک از عوامل فوق می توانند سبب کاهش عمر خستگی آلیاژ شفت شوند. سه عامل اول موجب افزایش تنش های زیاد

**منابع**

- [1] *Fractography, ASM Handbook*, Vol. 12, 9th Edition, ASM, 1987.
- [2] M.H. Harvey, *The Nalco Guide to Cooling Water System Failure Analysis*, 1993.
- [3] *Corrosion, ASM Handbook*, Vol. 13, 9th Edition, ASM, 1987.
- [4] A.E. Khlefa (Editor), *Handbook of Case Histories in Failure Analysis*, Vol. 2, ASM, 1993.
- [5] *Failure Analysis and Prevention, ASM Handbook*, Vol. 11, 9 th Edition, ASM, 2002.
- [6] G. Mohebali and A. Keitash, *SRBs Detection Kit*, Iranian Patent No. 30099, 2004.
- [7] G. Kobrin, *Microbiologically Influenced Corrosion*, NACE, 1993.
- [8] B.J. Little, P.A. Wagner and F. Mansfeld, *Microbiologically Influenced Corrosion*, NACE, 1997.

## کاربرد آنالیز ردیاب در محاسبه حجم فضای خالی مؤثر سنگ مخزن

سید مجید هاشمی\*، محمد رضا اصفهانی و حسن کریمیایی

مرکز مطالعات اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت

hashemism@ripi.ir

### چکیده

معادلات مختلف به کار گرفته شده در مدل سازی جابجایی امتزاجی نفت در محیط متخلخل سنگ مخزن، شامل عامل های اساسی می باشند که تعیین مقدار دقیق آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مهمترین این عوامل عبارتند از: ضریب نفوذ (ضریب دیفیوژن)، ضریب پراکندگی (ضریب دیسپژن) و حجم فضای خالی قابل دستیابی [۱]. حجم فضای خالی قابل دستیابی یکی از مهمترین عامل های فوق می باشد که روش های مختلفی برای اندازه گیری آن پیشنهاد شده است [۲]. از جمله این روش ها می توان به نتایج حاصل از مطالعات X-Ray، مقاطع نازک، مدل سازی شبکه ای و پراکندگی قطر نازک و روش های آماری اشاره کرد. در این مطالعه از روش تجربی و آزمایشگاهی آنالیز ردیاب برای تعیین عامل فوق استفاده شد. در این روش به دلیل استفاده از نمونه واقعی سنگ و نیز به کارگیری سیال مشابه سیال مخزن، نتایج به دست آمده از درجه اعتبار بالایی برخوردار می باشد. از مزایای به کارگیری این روش، سهولت انجام آزمایشات است.

### مقدمه

گسترش ناحیه امتزاج یا مخلوط شده دو سیال در مکانیزم جابجایی امتزاجی وابسته به عواملی از قبیل ضرایب پراکندگی و نفوذ، تفکیک ثقلی<sup>۱</sup>، افزایش سرعت، پدیده انگشتی حاصل از گرانش<sup>۲</sup> و حجم فضای خالی قابل دستیابی از محیط متخلخل می باشد [۳]. مدل های ریاضی متفاوتی

مدل معکوس- ماتریس - دیفیوژن<sup>۶</sup> و مدل کره متخلخل<sup>۷</sup> در تمامی مدل های فوق اثر ناهمگونی و فضای خالی قابل دستیابی، لحاظ شده است. تاثیر مجموعه ای از عوامل فوق در مدل پراکندگی - ظرفیت به شکل زیر توسط اسمیت و کوتس<sup>۸</sup> بیان شده است

[۶]:

(۱)

$$K_D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - x \frac{\partial C}{\partial x} = f \frac{\partial C}{\partial t} + (1-f) \frac{\partial C^*}{\partial t}$$

(۲)

$$(1-f) \frac{\partial C^*}{\partial t} = K_M (C - C^*)$$

برای مدل سازی جابجایی امتزاجی و اثر

عامل های فوق بر روی راندمان جابجایی پیشنهاد شده است. برخی از این مدل ها

عبارتند از: مدل های پراکندگی [۴]، حرکت

توده ای<sup>۳</sup> [۵]، حرکت توده ای-کانالی<sup>۴</sup>،

حرکت توده ای - پراکندگی - ماتریس<sup>۵</sup>،

### واژه های کلیدی

آنالیز ردیاب، فضای خالی قابل دستیابی، همرفت-پراکندگی، جابجایی امتزاجی، ضریب پراکندگی، ضریب نفوذ

6. Transverse-Matrix-Diffiusion Model  
7. Porous-Sphere Model  
8. Coats and Smith

1. Gravity Segregation  
2. Viscosity Fingering  
3. Advection  
4. Advection-Channeling  
5. Advection-Dispersion-Matrix

این صورت منحنی غلظت سیال خروجی به صورت S شکل بوده که تصویر آینه ای حول محور یک حجم فضای خالی تزریق خواهد بود. باید توجه داشت که دو سیال دارای گرانش و چگالی و کشش میان رویه<sup>۱</sup> یکسانی باشند. در صورتی که هیچگونه عمل مخلوط شدن در این عمل انجام نپذیرد، آنگاه منحنی غلظت سیال خروجی به صورت یک تابع پله ای در محور یک حجم فضای خالی خواهد بود. در حقیقت مسیر عبور سیال ها در یک محیط متخلخل طبیعی از یک سری کانال ها و خلل و فرج بسیار کوچک تشکیل یافته که همین امر سبب می شود تا دو سیال در سطوح بسیاری در تماس با یکدیگر قرار گرفته و پدیده های پراکندگی و نفوذ مولکولی انجام پذیرد. این پدیده ها موجب مخلوط شدن دو سیال شده و در نتیجه منحنی خروجی به شکل S می شود [۱۰]. هر گونه تغییر در ضرایب پراکندگی و نفوذ، همچنین تغییر در فضای خالی قابل دستیابی موجب تغییر در عمل مخلوط شدن دو سیال شده و در نتیجه بر روی شکل منحنی غلظت سیال خروجی تأثیر خواهد گذاشت و موجب انحراف آن از حالت پله ای می شود [۳].

نظر به این که ویژگی های هر محیط متخلخل وابسته به چگونگی رسوب ذرات، دانه بندی، قطر منافذ و جنس سنگ می باشد، لذا هر سنگ با ساختار خاص خود دارای ضرایب ویژه ای می باشد که باید اندازه گیری و مشخص شود.

### چگونگی انجام محاسبات

#### چگونگی محاسبه ضرایب پراکندگی و نفوذ

یکی از روش های تجربی برای محاسبه ضرایب پراکندگی، استفاده از رابطه زیر می باشد:

(۳)

$$D = \frac{1}{4\pi} VL \frac{1}{\left( \frac{\partial C}{C_o} / \frac{\partial V}{V_o} \right)_{V/V_o=1}}$$

در معادله بالا C و C\* به ترتیب غلظت سیال در نواحی در حرکت و راکد می باشند. K<sub>D</sub> ضریب دیسپژن یا پراکندگی، K<sub>M</sub> ضریب انتقال جرم و (1-f) نیز بیانگر کسری از حجم فضای متخلخل بوده که به صورت راکد می باشد.

بسیاری از محققین در مطالعات خود از مقاطع نازک و پراکندگی قطر منافذ برای تعیین بخش موثر در جریان در فضای متخلخل سنگ مخزن استفاده کرده اند. هلر نیز از یک روش آماری برای محاسبه تراوایی تصادفی در جابجایی امتزاجی استفاده کرد.

### تئوری

تحقیقات بسیاری پیرامون ناحیه راکد از فضای خالی محیط متخلخل انجام پذیرفته و اثر آن بر روی راندمان جابجایی امتزاجی سیالات مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که ضریب پراکندگی اندازه گیری شده در مخزن، از مقدار به دست آمده در آزمایشگاه بیشتر است [۷]. همچنین نتایج حاصل از مدل سازی اثر رفتار سیالات در بخش راکد از محیط متخلخل نشان دهنده کاهش راندمان جابجایی امتزاجی در اثر وجود این ناحیه می باشد [۸].

محیط متخلخل سنگ های مخزن دارای پیچیدگی هایی بوده که آنها را از یکدیگر متمایز می کند. نظر به این که پدیده های پراکندگی، نفوذ مولکولی و نیز فضای خالی قابل دستیابی وابسته به چگونگی دانه بندی، قطر منافذ و نوع سنگ می باشد، لذا این عامل ها در سنگ های مختلف متفاوت می باشد. یکی از روش های اصلی برای تعیین عوامل فوق روش آنالیز ردیاب می باشد [۹]. در این روش با استفاده از رفتار دو سیال قابل امتزاج می توان خصوصیات ویژه محیط متخلخل را تعیین کرد.

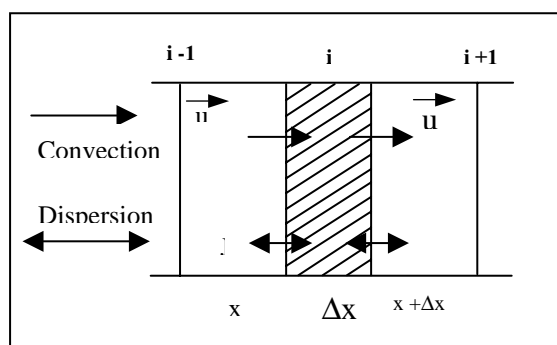
### آنالیز ردیاب

فرض کنید در زمان t=0 یک سیال قابل امتزاج به یک نمونه مغزه که با سیال قابل امتزاج دیگر اشباع شده، تزریق شود. در

محیط از سیال قابل امتزاج دیگر اشباع شده، وارد شود. برای درک بهتر مفهوم، یک المان از محیط را به صورت شکل ۱ در نظر می گیریم.

همانگونه که مشاهده می شود سیال تزریقی با سرعت  $u$  از سمت چپ به محیط وارد شده و بین سیال موجود در بلوک  $i$  و بلوک های مجاور انتقال جرم صورت می گیرد. تغییرات جرمی در طی زمان برای بلوک  $i$  به صورت زیر خواهد بود:

$$A\Delta x\phi(C|_{t+\Delta t}-C|_t) = A\Delta t[-u(C|_{x+\Delta x}-C|_x)-(J_{x+\Delta x}-J_x)]$$



شکل ۱- یک المان از محیط متخلخل

که در آن:

$C$ : غلظت، (جرم بر حجم سیال)

$u$ : سرعت داری،  $Q/A$

$J$ : فلاکس جرمی حاصل از دیسپژن

$A$ : سطح مقطع

$\phi$ : تخلخل

در صورتی که سرعت را به صورت سرعت در محیط متخلخل یا سرعت واقعی  $V=u/\phi$  در نظر بگیریم آنگاه پس از ساده سازی معادله (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{\phi} \frac{\partial J}{\partial x} \quad (5)$$

از طرفی معادله دیفیوژن فیکس<sup>۳</sup> به صورت زیر بیان شده است:

که در آن  $V$  سرعت در محیط متخلخل بوده و از رابطه  $V=q/Af$  به دست می آید.  $L$  طول نمونه و مخرج کسر دوم عبارتست از شیب منحنی تغییرات غلظت نسبت به مقدار حجم منافذ تزریقی<sup>۱</sup> که از آزمایش آنالیز ردیاب به دست می آید. لذا با توجه به نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب می توان ضریب پراکندگی را نیز برای محیط فوق محاسبه کرد [۱۰].

ضریب دیگری که برای حل معادله اصلی لازم است ضریب نفوذ بوده که به دو صورت می توان آن را به دست آورد. یکی در آزمایشگاه و استفاده از روش های تجربی و دیگری استفاده از منحنی های تغییرات ضریب پراکندگی. اطلاعات موجود در خصوص ضرایب نفوذ دو ماده مختلف که به صورت تجربی در محیط ایده آل و در آزمایشگاه به دست آمده است در اغلب مراجع موجود می باشد [۱۱]. این ضرایب غالباً در شرایط ایده آل و خارج از محیط متخلخل اندازه گیری شده و لذا به کارگیری مستقیم آنها در معادلات جابجایی در محیط متخلخل سبب به وجود آمدن خطا در محاسبات مربوطه می شود. روش دیگر برای به دست آوردن ضریب نفوذ استفاده از منحنی های تغییرات ضریب پراکندگی بر حسب سرعت می باشد [۱۲]. با توجه به این واقعیت که نفوذ بین دو ماده غالباً در شرایطی اتفاق می افتد که دو ماده ساکن بوده و سرعت حرکت صفر می باشد، لذا با برون یابی منحنی تغییرات فوق تا سرعت صفر، می توان ضریب نفوذ را بین هر دو ماده محاسبه کرد.

### معادله همرفت - پراکندگی

برای مدل سازی رفتار دو سیال قابل امتزاج در یک محیط همگن از معادله همرفت - پراکندگی<sup>۲</sup> استفاده می شود [۸]. فرض می کنیم که سیالی با غلظت  $C$  و با سرعت  $u$  به یک

1. Pore Volume Injection
2. Convection-Dispersion

حل معادله دیسپرژن-همرفت با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر بیان می شود [۱۴]:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \frac{x - V_x t}{2\sqrt{Dt}} + \exp\left(\frac{V_x t}{D}\right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x + V_x t}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (11)$$

در رابطه بالا  $De = fD$  و  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$  می باشند. با استفاده از رابطه فوق و با مشخص بودن زمان، سرعت، طول نمونه، غلظت سیال تزریقی، غلظت سیال خروجی، ضریب دیسپرژن و به کارگیری جدول تابع خطا و روش سعی و خطا و رابطه  $De = fD$  مقدار حجم فضای خالی قابل دستیابی (f) نمونه سنگ محاسبه می شود [۱۵].

### مشخصات نمونه های سنگ و سیال مورد استفاده

برای انجام آزمایشات، ۴ نمونه از سنگ های مخازن واقع در جنوب ایران انتخاب شد (۲ نمونه ماسه سنگی و ۲ نمونه دولومیتی). پلاگ های یاد شده با قطر ۳/۷ سانتیمتر و طول ۶/۸ سانتیمتر توسط متانول و تولوئن تمیز، سپس در کوره کوچک در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. برای اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق از دستگاه اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری مطلق نسبت به هوا در شرایط محیط استفاده شده است. برای اندازه گیری حجم

$$J = -\phi D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

که در آن D ضریب نفوذ یا پراکندگی می باشد با جایگزینی در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{\phi} \frac{\partial J}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

لذا می توان معادله کلی همرفت - پراکندگی را به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (8)$$

جمله دوم سمت راست معادله، جمله همرفت و جمله اول، جمله پراکندگی خواهد بود. در صورتی که غلظت سیال تزریقی در ابتدای تزریق برابر  $C_0$  در نظر گرفته شود، شرایط اولیه و مرزی زیر را می توان برای حل معادله بالا به کار برد:

$$C(x, 0) = 0, \quad x \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0, \quad t \geq 0$$

$$C(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0$$

باتوجه به شرایط مرزی و اولیه بالا حل معادله همرفت-پراکندگی به صورت زیر خواهد بود:

$$C = \frac{C_0}{2} \left( \operatorname{erfc} \frac{x - V_x t}{2\sqrt{Dt}} + \exp\left(\frac{V_x t}{D}\right) \operatorname{erfc} \frac{x + V_x t}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (9)$$

در معادله فوق  $\operatorname{erfc}$  تابع خطایی بوده که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \quad (10)$$

جدول ۱- خواص فیزیکی نمونه های مورد استفاده

شماره نمونه	طول نمونه (cm)	قطر نمونه (cm)	درصد تخلخل (%PV)	تراوایی (mD)	حجم منافذ (cc)	جنس سنگ
۱	۶/۷۱۰	۳/۷۴۰	۱۷	۱۴۰	۱۲/۱۵	ماسه سنگی سیمان شده
۲	۶/۸۰	۳/۷۲۵	۱۹	۱۶۰	۱۴/۰۵	ماسه سنگی یکنواخت سیمان شده
۳	۶/۷۲	۳/۷۳۵	۱۲	۸۵	۸/۸۱	دولومیتی با تخلخل ماتریسی
۴	۶/۸۳	۳/۷۴۱	۸	۱۴	۶/۰۱	دولومیتی با تخلخل کاپی

جدول ۲- خواص فیزیکی سیال های مورد استفاده

نام سیال	فرمول	دانسیته (gr/cc)	ویسکوزیته (cp)
نرمال هپتان	n-C7	۰/۶۸	۰/۴
نرمال دکان	n-C10	۰/۷۳	۰/۸۶۸

دلیل کالیبره نبودن، روش تیتراسیون جایگزین شد. در روش فوق برای به دست آوردن غلظت نمک، غلظت یون کلراید اندازه گیری شد. روش کار بدین ترتیب بود که مقداری از محلول کرومات پتاسیم به نمونه افزوده و سپس با نترات نقره تیتراگریدید. پس از تعیین میزان غلظت نمک در هر نمونه، با توجه به حجم سیال تزریقی، میزان پخش شدگی ردیاب در محیط اندازه گیری می شود. سپس داده های حاصله برای انجام محاسبات و تعیین اندازه f استفاده می شود.

### انجام آزمایشات جابجایی امتزاجی

در این مرحله نمونه ای که روی آن آزمایش آنالیز ردیاب انجام شده بود، شسته و کاملاً خشک شده و سپس با سیال های دکان یا دودکان اشباع می شود. سپس نمونه داخل مغزه نگهدار قرار گرفته و توسط سیال تزریقی هپتان، جابجایی امتزاجی انجام می گیرد. در این مرحله نیز برای مقدار حجم های معین از سیال خروجی، زمان اندازه گیری شده و آزمایش به همین ترتیب ادامه یافت تا حداقل دو برابر حجم منافذ، نمونه خروجی داشته باشیم. نمونه ها پس از شماره گذاری برای تعیین درصد حضور هریک از سیال ها با دستگاه گاز کروماتوگرافی<sup>۱</sup> آنالیز شد. پس از تعیین درصد غلظت هریک از عناصر، منحنی های مربوطه ترسیم شد.

### نتایج

آزمایشات آنالیز ردیاب بر روی چهار نمونه انتخاب شده از سنگ مخازن انجام شد. در شکل شماره ۱ نتایج آزمایشات آنالیز ردیاب به صورت منحنی های غلظت بدون بعد  $C/C_0$

فضای خالی هر نمونه با آب اشباع می شود. جدول ۱ خواص فیزیکی نمونه ها را نشان می دهد. همچنین در جدول ۲ نوع و مشخصات فیزیکی نمونه های سیال مورد استفاده درج شده است.

### چگونگی انجام آزمایشات

برای تعیین برخی پارامترهای مورد استفاده در مطالعه فوق نیاز به انجام آزمایشات مقدماتی و سپس آزمایشات تکمیلی می باشد. آزمایشات مقدماتی شامل آزمایش آنالیز ردیاب بوده که برای تعیین اندازه منافذ قابل دستیابی در نمونه سنگ انجام می شود. سپس آزمایشات تکمیلی که شامل آزمایش جابجایی امتزاجی می باشد، به منظور تحقیق در خصوص دقت ضرایب حاصله انجام می گیرد.

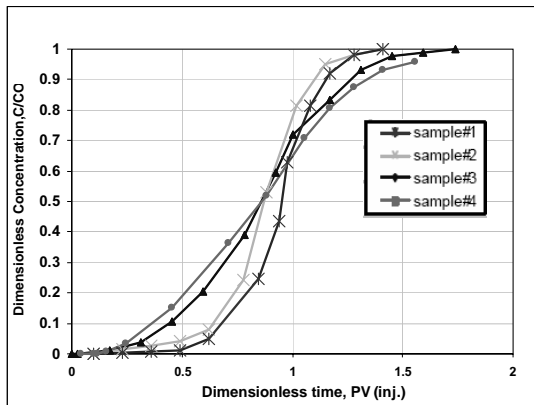
### آزمایشات آنالیز ردیاب

در آزمایش فوق، ابتدا نمونه با آب خالص اشباع شده و سپس یک ماده ردیاب مانند نمک طعام با درصد بسیار پائین در سیستم تزریق می شود. درصد نمک به کار رفته به گونه ای در نظر گرفته شده است که اختلاف دانسیته و ویسکوزیته دو سیال ناچیز باشد. در آزمایش فوق مقدار ppm نمک مورد استفاده ۲۰۰۰ بوده که مقداری ناچیز می باشد. سیال تزریقی که همان آب نمک می باشد به تدریج با سرعت یکنواخت به سیستم تزریق شده و در زمان های مختلف حجم های معینی از سیال خروجی نمونه گیری شده و هر نمونه شماره گذاری می شود. سپس میزان نمک خروجی توسط دستگاه جذب اتمی<sup>۱</sup> آنالیز و تعیین می شود. لازم به ذکر است که به دلیل عدم دقت در نتایج حاصل از آنالیز توسط دستگاه فوق، به

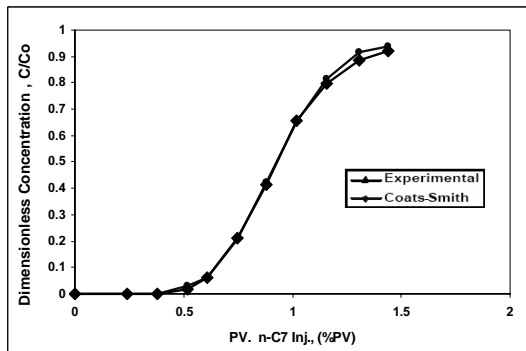
2. Gas Chromatography

1. Atomic Adsorbition

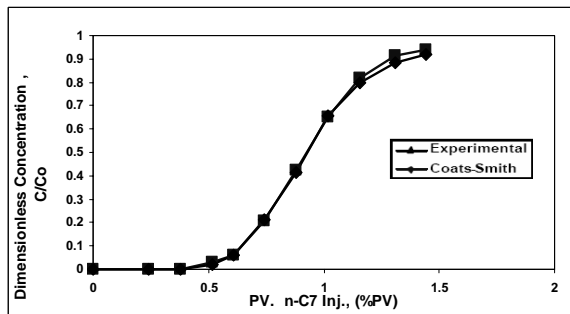




منحنی ۱- مقایسه پروفایل غلظت خروجی حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب برای نمونه های مختلف



منحنی ۲- پروفایل غلظت خروجی سیال در آزمایش جابجایی امتزاجی برای نمونه شماره ۱



منحنی ۳- پروفایل غلظت خروجی سیال در آزمایش جابجایی امتزاجی برای نمونه شماره ۳

(حجم سیال تزریقی بر حسب حجم منافذ تزریق) رسم شده اند. همانگونه که در منحنی های آنالیز ردیاب انجام شده برای نمونه های مختلف در این مطالعه مشاهده می شود، منحنی ها دارای شیب های مختلف بوده و در یک حجم منفذ تزریق، مقادیر متفاوتی از غلظت را نشان می دهند.

با استفاده از نتایج حاصله، مقادیر ضرایب پراکندگی و نفوذ برای هر نمونه محاسبه و تعیین شد. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده و روابط موجود، مقادیر فضاهای خالی قابل دستیابی برای هر نمونه سنگ محاسبه که در جدول ۳ نشان داده شده اند.

به منظور تحقیق در دقت نتایج حاصله، بر روی ۲ عدد از نمونه های مورد آزمایش، آزمایشات جابجایی امتزاجی انجام پذیرفت. پارامترهایی که از آزمایش آنالیز ردیاب حاصل شد، در مدل ریاضی جایگزین شد. نتایج به دست آمده از مدل ریاضی با مقادیر حاصل از آزمایش در نمودارهای ۲ و ۳ مقایسه شده اند.

### بحث و نتیجه گیری

آزمایش آنالیز ردیاب بر روی ۴ نمونه سنگ مخزن از جنس دولومیت و ماسه سنگی انجام پذیرفت. منحنی غلظت سیال خروجی رسم و پس از محاسبه ضرایب پراکندگی و نفوذ، درصد حجم فضای خالی قابل دستیابی که در مکانیزم جابجایی امتزاجی از اهمیت می باشد، محاسبه شد.

در مطالعات جابجایی امتزاجی عامل های ضریب دیسپرژن ضریب دیفیوژن و درصد حجم منافذ قابل دسترس از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و تعیین دقیق این عوامل می تواند نتایج معقول تری در مدلسازی جابجایی امتزاجی را سبب شود.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب

نمونه شماره	ضریب نفوذ محاسبه شده $K_m (\times 10^{-6}) [cm^2/s]$	ضریب پراکندگی محاسبه شده $K_D (\times 10^{-4}) [cm^2/s]$	حجم فضای خالی قابل دستیابی محاسبه شده f (%)
۱	۰/۸۹	۷/۷۶	۰/۶۶۸
۲	۰/۸۶	۶/۴۱	۰/۷۲
۳	۰/۸۱	۸/۳۸	۰/۶۲۱
۴	۰/۷۹	۹/۳۲	۰/۵۸۵

ضریب پراکندگی و ضریب نفوذ نیز استفاده کرد. با استفاده از ضرایب به دست آمده از این روش، تطابق مناسبی با نتایج واقعی حاصل می شود.

در مدل های موجود، عامل فوق به عنوان عامل تطابقی مورد استفاده قرار می گرفت که این مسئله باعث بروز اختلافات فاحشی بین مقادیر پیش فرض شده و مقادیر واقعی می شود. و نهایتاً در مدل هایی که از این عامل ها استفاده کرده اند نمی توان به عنوان الگوی رفتاری مناسب برای پیش بینی جابجایی امتزاجی در محیط متخلخل استفاده کرد.

نتایج حاصل از آزمایش آنالیز ردیاب نشان می دهد که منحنی غلظت سیال خروجی برای هر نمونه شکل مخصوص به خود را داشته و با توجه به جنس سنگ و چگونگی دانه بندی آن تغییر می کند.

با توجه به نتایج حاصله می توان گفت که آنالیز ردیاب می تواند به عنوان روش مناسبی برای محاسبه حجم منافذ قابل دستیابی به کار رود. علاوه بر عامل فوق، از این روش می توان برای شناخت ساختار فیزیکی محیط متخلخل و تعیین عامل های مؤثر در مدل سازی جابجایی امتزاجی که عبارتند از

## منابع

- [1] G.H. Tang, E.O. Frind and E.A. Sudicky, *Contaminant Transport in Fractured Porous Media: An Analytical Solution for a Single Fracture*, Water Resource Research, Vol. 17, p. 555, 1981.
- [2] R.A. Greenkorn, *Fluid Flow Through Porous Media*.
- [3] R.A. Greenkorn and D.P. Kessler, *Dispersion in Heterogeneous Non-uniform Anisotropic Porous Media*, I & E.C., Vol. 61, No. 9, 1969.
- [4] J.B. Passioura, *Hydrodynamic Dispersion in Aggregated Media: I. Theory*, Soil Science, Vol. 111, pp. 339-344, 1971.
- [5] P.S.C. Rao, *Solute Transport in Aggregated Porous Media: Theoretical and Experimental Evaluation*, Soil Science Society of American Journal, Vol. 44, pp. 1139-1146, 1980.
- [6] K.H. Coats and B.D. Smith, *Dead-End Pore Volume and Dispersion in Porous Media*, SPEJ, Vol. 4, No. 2, 1964.
- [7] A. Arya, T.A. Hewett, R.G. Larson and L.W. Lake, *Dispersion and Reservoir Heterogeneity*, SPE Reservoir Eng., pp. 139-148, 1988.
- [8] A.P. Spence and R.W. Watkins, *The Effect of Microscopic Core Heterogeneity on Miscible Flood Residual Oil Saturation*, Paper Presented at the SPE Annual Meeting, Dallas, Sept. 21-24, 1980.
- [9] L. Moreno, I. Neretnieks and E. Klockars, *Evaluation of Some Tracer Tests in the Granitic Rock at Finnsjon*, KBS Tech. Rep., pp. 38-83, 1983.
- [10] I. Neretnieks, *A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground*, Water Resource Research, Vol. 19, p. 364, 1983.
- [11] L. Lapidus and N.R. Amundson, *Mathematics of Adsorption in Beds*, Physical Chemistry, Vol. 56, p. 984, 1952.
- [12] R.M. Specter, *Effect of Pore Structure on Mixing in Stable Single-Phase Miscible Displacement*, M.Sc. Thesis, New Mexico Institute of Mining and Tech., Socorro. 1984.
- [13] K.K. Dai and F.M.Jr. Ow, *Prediction of CO<sub>2</sub> Flood Performance: Intraction of Phase Behavior with Microscopic Pore Structure Heterogeneity*, SPE Annual Meeting, Hoston. pp. 16-19, 1984.
- [14] J.P. Batycky, B.B. Maini and D.B. Fisher, *Simulation of Miscible Displacement in Full Diameter Carbonate Cores*, Petroleum Recovery Institute Research Report, 1980.
- [15] J.K. Jasti, R.N. Vaidya and H.S. Fogler, *Capacitance Effect in Porous Media*, SPE 16707.