

اندازه‌گیری ترشوندگی سنگ مخزن

مهدی عاقبتی^۱، محمد رنجبر^۱

تئوری ترشوندگی

ترشوندگی یک سیستم مخزنی سنگ سیال به عنوان توانایی یک سیال در حضور دیگر سیالات برای پخش شدن روی سطح سنگ و ترکردن آن تعریف می‌شود^[3,2]. درجه ترشدن یک جامد توسط مایع معمولاً به وسیله زاویه تماس (Contact Angle) بیان می‌شود. یک سیستم روغن - آب - جامد (سنگ) در شکل ۱ نشان داده شده است که انرژی‌های سطحی آن براساس قانون Young بیان می‌شود:

$$\sigma_{ow} \cos \theta_c = \sigma_{os} - \sigma_{ws}$$

در این رابطه σ_{ow} انرژی سطح مشترک (کشش سطحی) بین آب و نفت (روغن)، σ_{os} انرژی سطح مشترک بین نفت و جامد، σ_{ws} انرژی سطح مشترک بین آب و جامد و θ_c زاویه تماس هستند.

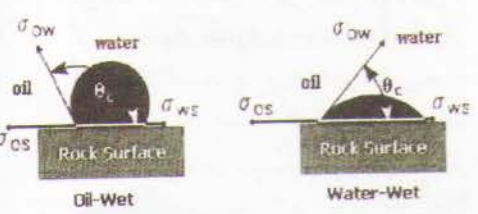
خلاصه

درجه ترشوندگی سنگ مخزن یکی از پارامترهای مورد توجه در مهندسی مخازن است. در صنعت نفت از روشهای گوناگونی برای اندازه‌گیری میزان ترشوندگی سنگهای (مینرالهای سنگ) مخازن استفاده می‌شوند. روشهای زاویه تماس، USBM، Amott و روش ترکیبی Amott/USBM، چهار روش اندازه‌گیری ترشوندگی سنگ مخزن هستند که بیشترین کاربرد را در صنعت نفت دارند. در این تحقیق روشهای مختلف تعیین ترشوندگی بیان و مقایسه می‌گردد.

مقدمه

شناخت میزان ترشوندگی (Wettability) نسبی یک سیستم سنگ - سیالات مخزن و یا افزودنیهای شیمیایی گل حفاری به افزایش بازیابی نفت از مخزن کمک کرده و همچنین از خسارت به مخزن در هنگام حفاری جلوگیری می‌کند. درجه ترشوندگی مخزن را می‌توان با استفاده از روشهای مختلفی به دست آورد که به دو دسته روشهای کمی و کیفی تقسیم بندی می‌شوند. زاویه تماس، USBM، Amott و روش ترکیبی Amott/USBM چهار روش کمی اندازه‌گیری ترشوندگی هستند. از جمله روشهای کیفی اندازه‌گیری ترشوندگی، می‌توان به روش جذب، روش آنالیز میکروسکوپی، فلوتاسیون، منحنی‌های نفوذپذیری نسبی، منحنیهای فشار موئین، روش موئینگی سنجی، نسبتهای نفوذپذیری - اشباع، لاگهای مخزن، رزنانس مغناطیس هسته ای و جذب رنگی اشاره کرد^[5,4,2,1]. برای به دست آوردن اطلاعاتی که معرف ترشوندگی مخزن باشد، توجه به شرایط زیر در آزمایشگاه الزامی است: (۱) روش مورد استفاده نباید به خصوصیات سطحی سنگ خسارتی وارد کند، (۲) روش مذکور باید قادر به تفکیک کامل محدوده ترشوندگی باشد، (۳) نتایج باید اثرات ناهمگنی‌های ریز سنگ را در نظر داشته باشد، (۴) نتایج نباید به پارامترهایی نظیر نفوذپذیری و ویسکوزیته سیال بستگی داشته باشد، به جز در مواردی که تمایز پارامترها ممکن باشد، (۵) نتایج باید هم با توجه به یک نمونه مغزه معین و هم بین مغزه‌های مختلف، دارای خصوصیات یکسان و تکرار پذیر باشند^[1].

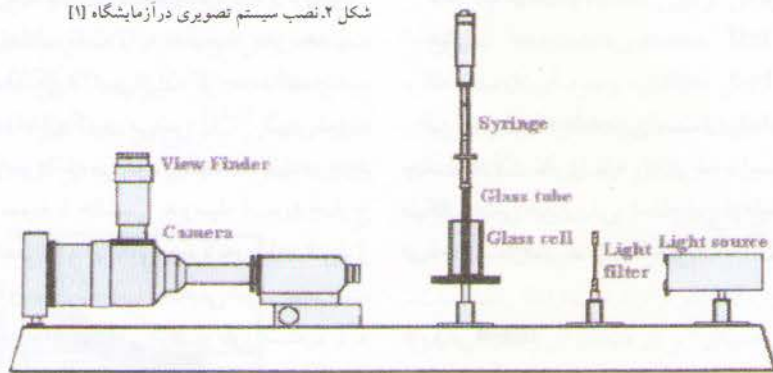
شماره دهم / اردیبهشت ۸۳



شکل ۱- ترشوندگی سیستم نفت/آب/سنگ



شکل ۲. نصب سیستم تصویری در آزمایشگاه [۱]



مطابق شکل ۱، زمانی که θ از 90° درجه کمتر باشد، ترجیحاً به وسیله آب و زمانی که θ بیشتر از 90° درجه باشد، سطح ترجیحاً به وسیله نفت، تر می شود. آبدوستی مطلق تحت زاویه صفر درجه و آبرانی مطلق تحت زاویه 180° درجه به دست می آید که به ندرت مشاهده می شود و اغلب سطوح به صورت نسبی آبران یا آبدوست هستند [3,2,1].

روشهای کمی اندازه گیری ترشوندگی سنگ مخزن

روش زاویه تماس

اندازه گیری زاویه تماس در تصور ساده، اما در عمل بسیار پیچیده است و تفسیر نتایج آن ساده نیست. زاویه تماس بین نفت، آب و سطح جامد به ترکیب نفت خام، خواص الکتریکی سطحی (PH و نمک محتوی آب)، سطح خود جامد، زبری و ناهمگونی سطح جامد، اثرات دینامیکی، فشار و دما بستگی دارد.

در عمل در یک محیط متخلخل، اندازه گیری زاویه تماس به علت شکل گوناگون حفرات و مینرالوژی، پیچیده است. به همین علت سطح سنگ می بایستی با دقت صیقل داده شود و اندازه گیریها را در صورت امکان باید بر روی سطح طبیعی کلیواژ بلور انجام داد. انواع مختلفی از ناخالصی ها بر روی اندازه گیریهای زاویه تماس تاثیر می گذارند و آن را تغییر می دهند [1].

روش زاویه تماس بهترین روش اندازه گیری ترشوندگی در زمان استفاده از سیالات خالص و مغزه های مصنوعی است، زیرا در این حالت احتمال وجود سورفاکتانتها (surfactants) و یا دیگر ترکیباتی که ممکن است ترشوندگی را تغییر دهند، وجود ندارد [2]. روشهای گوناگونی برای اندازه گیری زاویه تماس، نظیر روش تصویری، روش جاذبه ای Wilhelmy، روش صعود موئینگی و قطره چسبیده (Sessile Drop) وجود دارند. ذکر این نکته ضروری است که

در صنعت نفت تمامی این روشها مورد استفاده قرار نمی گیرند [2,1].

روش تصویری، متداولترین روش برای اندازه گیری ترشوندگی مخزن در سیستم های سه فازی (گاز/مایع/جامد یا مایع/مایع/جامد) است. روش تصویربرداری به سادگی در آزمایشگاه قابل اجرا است (شکل ۲) [1].

در مطالعات آزمایشگاهی، قطعه ای از بلوک سنگی صاف و صیقلی را در سلولی پر از نفت قرار داده، سپس

بر روی سطح سنگ قطره ای کوچک ($2-3 \text{ mm}^2$) از آب قرار می دهند. پس از آن تصویر بزرگی از قطره آب را توسط عکسبرداری برداشت نموده و از ابعاد تصویر این قطره برای محاسبه زاویه تماس و در نتیجه ترشوندگی سیستم مورد استفاده قرار می گیرند (شکل ۳). پس از برداشت ابعاد قطره در روی سطح سنگ، توسط رابطه زیر زاویه تماس محاسبه می گردد [1].

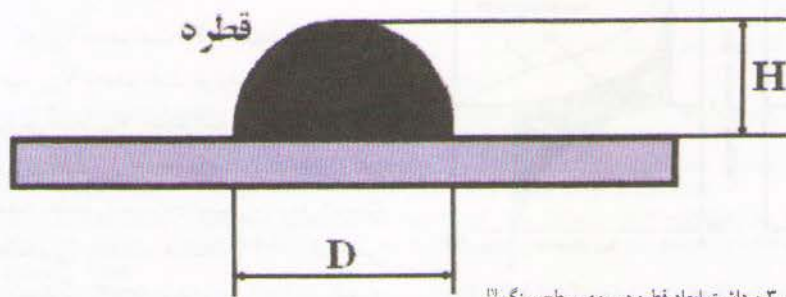
$$\theta = 2 \tan^{-1} (2H / D)$$

نفت تر $\theta > 133^\circ$ رطوبت $\theta = 62-133^\circ$ آب تر $\theta > 62^\circ$

یک مشکل در اندازه گیری زاویه تماس سنگ مخزن این است که زاویه تماس رانمی توان به سنگ مخزن نسبت داد، زیرا زاویه تماس تنها بر روی یک بلور کانی اندازه گیری می شود در حالی که یک مخزن می تواند حاوی بسیاری از مواد تشکیل دهنده ناهمگن باشد [2]. محدودیت دیگر در اندازه گیری زاویه تماس، نداشتن اطلاعاتی در مورد حضور یا عدم حضور مواد آلی پوشاننده سنگ های مخزن است. برای موفقیت در اندازه گیری ترشوندگی، می بایستی تمامی این مواد توسط فرآیند تمیزکاری از مغزه خارج شوند [2].

روش Amott

در روش Amott، از روشهای جذب و جانشینی نیرویی برای اندازه گیری میانگین ترشوندگی یک مخزن استفاده شده است [2]. در این روش پس از اینکه نمونه ای از مغزه انتخاب شد، به وسیله نفت اشباع می شود. سپس نمونه را در یک سلول جذبی که توسط آب پر شده است، قرار می دهند. آب اجازه



شکل ۳. برداشت ابعاد قطره در روی سطح سنگ [۱]

۵ چرخانده می شود، (۴) مغزه در محفظه مغزه‌ای که با آب شور پر شده است به طور برعکس قرار داده می شود. به آب شور اجازه داده می شود تا فوراً به درون مغزه جذب شود. سپس مغزه در گامهای افزایشی، سانتریفوژ می شود (منحنی II شکل ۵. جذب نیرویی)، (۵) مغزه در یک محفظه مغزه پر از نفت قرار داده می شود و منحنی III (زهکشی ثانویه) سانتریفوژ به دست می آید، (۶) مساحت‌های زیر دو منحنی II و III به دست می آید. از لگاریتم نسبت مساحتها برای تعیین معیار ترشوندگی استفاده می کنیم

$$WI_{USBM} = \text{Log}(A_1/A_2)$$

گرایش مرطوب کردن نسبی مایعات در یک محیط متخلخل و توزیع اندازه حفرات، شکل منحنیهای فشار موئینگی را تعیین می کند. عموماً سیستم های آب دوست (آب تر) مساحت بزرگتری (مساحت A_1 در شکل ۵a) را در منحنی های آب جابه جاشده به وسیله نفت، نسبت به مساحت زیر منحنیهای نفت جابه جاشده به وسیله آب (مساحت A_2 در شکل ۵a) دارند. بنابراین لگاریتم نسبت مساحت برای سیستم آب دوست بزرگتر از صفر است. برعکس، نسبت مساحتها برای سیستم های نفت تر (شکل ۵b) کوچکتر از یک است و لگاریتم نسبت آن منفی است. شکل ۵c موردی را که نسبت مساحتها به یک نزدیک است (سیستم خنثی) نشان می دهد [5,2,1]. این آزمایش نسبتاً سریع است و مزیت آن نسبت به آزمایش ترشوندگی Amott حساسیت آن در تعیین ترشوندگی در نزدیکی نقاط خنثی است. عیب کوچک این روش این

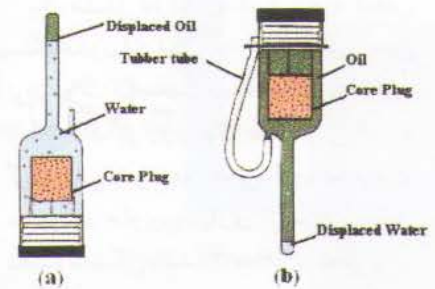
کاملاً آب دوست
 WI=1
 خنثی
 WI=0
 کاملاً آب ران
 WI=-1
 این آزمایش کاملاً تجربی است و براساس چند استدلال نظری پایه ریزی شده است. اشکال اصلی این روش، انجام این آزمایش در دما و فشارهای مخزن مشکل است [2].

روش USBM

سومین آزمایش کمی که برای اندازه گیری ترشوندگی یک سیستم مورد استفاده قرار می گیرد، آزمایش پیشرفته USBM (United States Bureau Of Mines) توسط "Donaldson" و همکارانش تهیه شده است. آزمایش USBM نیز ترشوندگی میانگین یک مغزه را اندازه گیری می کند [1]. روش USBM (یا روش سانتریفوژ) براساس ارتباط بین درجه مرطوب کردن و مساحت‌های زیر منحنی های فشار موئینگی - میانگین درجه اشباع آب، پایه ریزی شده است. این روش از دو ناحیه زیر منحنی های فشار موئینگی آب - نفت که از روش سانتریفوژ به دست آمده است، استفاده می کند (شکل ۵) [2,1].

مثال شکل ۵ فشار موئینگی سیستم های آب دوست، آب ران و خنثی را نشان می دهد. روش به دست آوردن چنین منحنیهایی به شرح زیر است: (۱) نمونه مغزه با آب شور (آب نمک) اشباع می شود، (۲) مغزه در محفظه مغزه دستگاه سانتریفوژ قرار داده می شود، (۳) محفظه مغزه با آب پر شده و در یک سرعت معین تا به دست آوردن منحنی I شکل

می یابد تا به درون مغزه نفوذ کند و تارسیدن به تعادل، نفت را به خارج از مغزه هدایت کند (شکل ۴a) پس از آن، کل حجم آب جذب شده اندازه گیری می شود [5,2,1]. سپس نمونه مغزه برداشته می شود و باقیمانده نفت موجود در نمونه با جانشینی به وسیله آب، به خارج رانده می شود. این عمل معمولاً به وسیله سانتریفوژ یا به وسیله یک پمپ انجام می شود. حجم نفت جابه جا شده را می توان به طور مستقیم یا به وسیله اندازه گیری وزن، تعیین کرد [1].

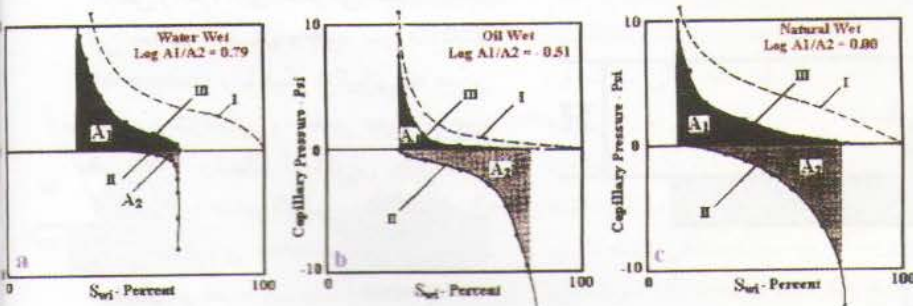


شکل ۴. (a) سلول جذب با مغزه اشباع شده به وسیله نفت، (b) مغزه اشباع شده با آب که توسط نفت احاطه گردیده است [1].

پس از آن مغزه در سلول قرار داده می شود و به وسیله نفت احاطه می گردد. نفت اجازه دارد تا به درون مغزه وارد شود و جانشین آب نمونه شود (شکل ۴b) و سپس حجم آب جابه جا شده اندازه گیری می شود. بعد از رسیدن به حالت تعادل، مغزه از سلول خارج می شود و آب باقیمانده در مغزه به وسیله یک سانتریفوژ به خارج رانده می شود و حجم آب جابه جا شده اندازه گیری می شود. با ثبت تمامی حجم های ذکر شده، محاسبه شاخص ترشوندگی WI ممکن می شود:

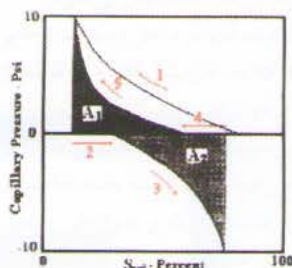
$$WI = (V_{O1}/V_{O1} + V_{O2}) - (V_{W1}/V_{W1} + V_{W2}) = rw - ro$$

که V_{O1} حجم نفت تولید شده در طی جذب آب، V_{O2} حجم نفت تولید شده در هنگام تزریق آب، V_{W1} حجم آب تولید شده در طی تزریق نفت، V_{W2} حجم آب تولید شده در طی طغیان نفت، r_w نسبت جانشینی با آب و r_o نسبت جانشینی با نفت، هستند [5,2,1]. شاخص ترشوندگی Amott عددی بین ۱ و -۱ می شود:



شکل ۵. اثر ترشوندگی روی نسبت مساحت منحنی های فشار موئین (a) آب دوست، (b) آب ران، (c) سیستم خنثی [2].

روش ترکیبی USBM/Amott دو مزیت نسبت به روش Amott دارد: (۱) تجزیه و تحلیل روش USBM به دلیل تغییرات اشباعی که در فشار موئینگی صفر رخ می‌دهد، بهبود یافته و (۲) شاخص Amott نیز محاسبه می‌گردد [2].



شکل ۶ روش ترکیبی USBM/Amott

■ روش ترکیبی USBM/ Amott اخیراً "Wunderlich و sharma" تغییری را در روش USBM به وجود آوردند که اجازه محاسبه شاخصهای Amott و USBM را می‌دهد. این روش در شکل ۶ نشان داده شده است که شامل پنج مرحله زیر است: (۱) راندن اولیه نفت، (۲) نفوذ آزاد آب شور، (۳) راندن آب شور، (۴) نفوذ آزاد نفت، (۵) راندن نفت. مساحت‌های زیر در منحنیهای راندن آب شور و نفت برای محاسبه شاخص ترشوندگی USBM استفاده می‌شود، در حالی که شاخص ترشوندگی Amott از حجم‌های آزاد و کل آب و نفت جانشینی برای محاسبه، استفاده می‌کند [1,2,5,6].

است که شاخص ترشوندگی USBM فقط می‌تواند نمونه‌های با اندازه محدود را اندازه گیری کند، از سوی دیگر این آزمایش نمی‌تواند تعیین کند که ترشوندگی سیستم، جزئی (Fractional) است یا مخلوط (Mixed). این روش مستقل از ویسکوزیته و نسبت به آزمایش Amott مناسبتر است.

روش اندازه گیری زاویه تماس، ترشوندگی سطوح به خصوصی را اندازه گیری می‌کند در حالی که روشهای Amott و USBM ترشوندگی میانگین یک مغزه را اندازه گیری می‌کنند. مقایسه‌ای از شاخصهای ترشوندگی این سه روش در جدول ۱ آورده شده است [2,1].

جدول ۱. وابستگی های تقریبی بین شاخصهای ترشوندگی زاویه تماس، USBM، Amott [2]

نفت تر	خنثی	آب تر	زاویه تماس
۱۰۵-۱۲۰°	۶۰-۷۵°	۰°	مینیم
۱۸۰°	۱۰۵-۱۲۰°	۶۰-۷۵°	ماکزیم
W ~ -۱	W ~ ۰	W ~ ۱	شاخص ترشوندگی USBM
			شاخص ترشوندگی Amott
۰	۰	مثبت	نسبت جانشینی به وسیله آب
مثبت	۰	۰	نسبت جانشینی به وسیله نفت

Email: m72agh@yahoo.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲. دانشیار بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان

جمع بندی

۱. روش زاویه تماس بهترین روش اندازه گیری ترشوندگی در زمان استفاده از سیالات خالص و مغزه های مصنوعی است.
 ۲. روشهای Amott و USBM ترشوندگی میانگین یک مغزه را اندازه گیری می‌کند.
 ۳. روش USBM نسبت به آزمایش Amott مناسبتر و در تعیین ترشوندگی در نزدیکی نقاط خنثی حساس تر است.
 ۴. روش ترکیبی USBM/Amott دو مزیت نسبت به روش Amott دارد: (۱) تجزیه و تحلیل روش USBM به دلیل تغییرات اشباعی که در فشار موئینگی صفر رخ می‌دهد، بهبود یافته و (۲) شاخص Amott نیز محاسبه می‌گردد.
- این مقاله، خلاصه بخشی از طرح تحقیقاتی است که در دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام می‌شود.

منابع:

1. O.Torsaeter, M.Abtahi, "Experimental Reservoir Engineering Laboratory Work book", Norwegian University of Science and Technology, August 2000.
2. William G. Anderson, "Wettability litherator Survey - Part 2: Wettability Measurement", SPE, November 1986.
3. C. Drummond, J. Israelachvili, "Surface Force and Wettability", USA, 2002.
4. W.G. Anderson, "Wettability Lituratur Survey-Part5: The Effects of Wettability on Relative Permeability", SPE, November 1986.
5. M.T. Tweheyo, T.Holt, O.Torsaeter, "An Experimental Study of the Relationship between Wettability and Oil production Characteristics", 1999.
6. E.Kowalewski, T.Holt, O.Torsaeter, "Wettability Alteration due to an Oil Soluble additives", 2002.