

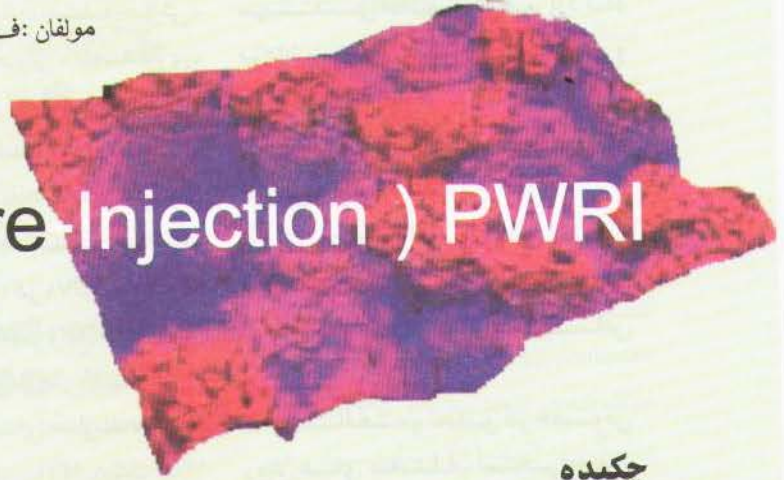
تعیین نمودار تخریب سنگ مخزن

حاصل از رسوب ذرات جامد

با استفاده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی

مولفان: ف. الابدوانی، احمد شیرزادی، و. م. وند بروک، پ. ک. کوری

کار تحقیقی در دانشگاه فنی TUDelft هلند



(Produced Water re-Injection) PWRI

(قسمت اول)

چکیده

حاصل از PWRI را در حد بالایی دارا باشد. این مقاله، به صورتی تفصیلی، روش تجزیه و تحلیل‌های انجام شده را ارائه می‌دهد.

اهمیت تزریق مجدد آب تولیدی همراه نفت به عنوان ارزان‌ترین شیوه دفع آب‌های زاید که با محیط‌زیست نیز سازگاری دارد غیرقابل انکار است این روش در بازیابی ثانویه منابع هیدروکربن از طریق سیلاب‌زنی قابل اجراست.

مقدمه

روش تزریق مجدد آب تولیدی، به عنوان جهشی در دفع آب‌های زاید زمان تولید محسوب می‌شود. این شیوه به عنوان ارزان‌ترین راه‌حل، ضمن سازگاری با محیط‌زیست توجه بسیاری از شرکت‌های نفتی را به خود جلب نموده است. مساله اساسی در فعالیت‌های PWRI، کاهش تزریق پذیری در چاه‌های تزریق است.

اما PWRI دارای محدودیت عدم امکان پیش‌بینی دقیق طول عمر و عملکرد چاه‌های تزریقی است. که ناشی از تعدد عوامل موثر در تزریق آب تولیدی است. اخیراً مدل‌هایی برای تزریق ارائه شده است که اثرات حرارتی PWRI بر روی ایجاد و رشد ترک‌خوردگی در سازند را نیز مدنظر قرار داده است، باید در نظر داشت که نحوه نفوذ آب در PWRI با آنچه در مورد تزریق آب تمیز (آب دریا) مشاهده می‌شود متفاوت است، چرا که تزریق آب تولیدی به داخل سازند باعث تخریب سنگ مخزن به ویژه در سطح ترک‌خوردگی می‌شود. لذا با انجام آزمایش‌های تصفیه استاتیکی همراه با تجزیه و تحلیل‌های مستند و کالبد شکافانه، پروفیل کمی رسوب ذرات در طول مغزه به دست می‌آید. نتایج حاصله، ما را در بررسی صحت مدل‌های موجود کمک می‌کند.

به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی میزان آسیب وارده به سازند - توسط تزریق مجدد آب تولیدی - ضروری است که مدل قابل قبولی از این آسیب، به عنوان تابعی از برخی پارامترهای موثر مانند میزان جریان تزریق، غلظت و تراکم ذرات، در دست داشته باشیم. مدل‌های مختلفی در نشریات علمی معرفی شده‌اند که هر کدام دارای محاسن و معایبی هستند، از این رو، نویسندگان این مقاله، آزمایش‌های کاملاً کنترل شده تصفیه استاتیکی و نیز تجزیه و تحلیل‌های کالبد شکافانه‌ای را ترتیب داده و اجرا نمودند.

تجزیه و تحلیل‌هایی که در این مقاله معرفی شده برای آزمایش‌های تصفیه دینامیکی، به ویژه برای شبیه‌سازی محدوده راس ترک‌خوردگی‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در این تحلیل‌ها بیشتر مدلی دنبال خواهد شد که افت نفوذپذیری و پروفیل رسوب‌گذاری را برای هر سه نوع آزمایش در برداشته باشد و بتواند قابلیت پیش‌بینی کاهش تزریق پذیری

مدل‌ها را مشخص نماییم.

جدول ۱ انجام شد. با به کارگیری قانون داری بر روی افت فشارهای به دست آمده و نیز دبی تزریق، مقادیر کمی افت نفوذپذیری در طول مغزه در فاصله‌های زمانی متفاوت محاسبه شد. با مشخص کردن محتوای ذرات جامد در سیال خروجی، می‌توانیم با استفاده از مدل‌های ریاضی مورد تایید، آسیب وارده به نفوذپذیری را تطبیق دهیم و پیش‌بینی نماییم.

توصیف وضعیت سیال در جریان خروجی به صورت پیوسته (Online) توسط یک دستگاه پراش لیزری انجام گرفت. سپس، نمونه‌های سیال خروجی برای تحلیل‌های شیمیایی جمع‌آوری گردید. کار جدیدی که در این مقاله ارائه شده است معرفی تشخیص‌های کالبد شکافانه، PWRI است. با به کارگیری تحلیل شیمیایی و نیز بصری، یک پروفیل رسوبگذاری قابل اطمینان در طول مغزه حاصل آمد که پیشرفت اساسی در آزمایش مدل‌های در دسترس در نشریات است.

توصیف‌های مفصل‌تر ذیلاً خواهد آمد:

۱-۲- تصفیه استاتیکی

هنگام انجام آزمایش تصفیه استاتیک، با محدودیت‌هایی در دستگاه آزمایش روبه‌رو خواهیم بود که رفع آنها ضروری است. پمپ، مهمترین بخش محدودکننده در مجموعه دستگاه آزمایشی است. با توجه به این که در این بخش نسبتاً پمپ‌های پیچی و یا پیستونی می‌توانند جوابگوی این دبی باشند. برای این آزمایش از یک پمپ پیستونی بادی ثابت استفاده شد. این پمپ در یک محدوده فشار مشخصی می‌تواند دبی ثابتی را تامین کند. خارج از این محدوده، بهینه تغییرات دبی بیش از خطای قابل قبول برای آزمایش (۱۰٪) خواهد بود، بنابراین

در آزمایش‌های تصفیه استاتیکی، از یک غلاف پلاستیکی با پنج سوراخ اتصال، برای به دست آوردن شش کانال اندازه‌گیری افت فشار در طول یک مغزه از جنس ماسه سنگ بنت‌هایم با طول پنج اینچ و قطر یک اینچ استفاده شده است. ماسه سنگ بنت‌هایم، با خواصی نسبتاً همگن، دارای تخلخل ۲۲ درصد و نفوذپذیری ۱/۴ داری است. گستره قطر گلوگاه تخلخل‌ها ۱۵-۱۰ μm است. آب مقطر که دارای ذرات هماتیت (Fe₂O₃) به اندازه‌های بین ۵-۱ μm (۶۵ درصد این ذرات کمتر از 1mm) هستند با غلظت‌های متفاوت (80ppm, 40ppm, 20ppm) و دبی‌های متفاوت (10lit/hr, 5/4lit/hr) به داخل مغزه تزریق شدند. البته هر آزمایش یک غلظت و یک دبی تزریق ثابت دارد. غلظت محلول خروجی از آزمایش به دو صورت پیوسته (Online) توسط یک دستگاه پراش لیزری و نیز با گرفتن نمونه و اندازه‌گیری غلظت توسط تجزیه شیمیایی انجام گرفت. برای جمع‌آوری اطلاعات از راهنمایی Wennberg به عنوان راه‌حل قابل قبول استفاده شده است.

تجزیه و تحلیل‌های پس از انجام تزریق (سیلاب‌زنی)، تحلیل‌های کمی بصری از برش عرضی مغزه و همچنین تحلیل‌های کمی شیمیایی را شامل می‌شود. با استفاده از این دو تکنیک، یک پروفیل رسوبگذاری دقیق از ذرات تزریق شده در طول مغزه ماسه سنگ حاصل آمد. این دو شیوه در بخش بعد به صورت تفصیلی شرح داده خواهد شد.

۲- روش‌های آزمایشگاهی

شش آزمایش تصفیه استاتیکی، به صورتی کاملاً استاندارد مطابق

	Suspension concentration (by weight)	Suspension concentration (chemical)	Flow rate (l/hr)	Error in flow rate (l/hr)	Core length (m)	Core diameter (m ²)	PV (ml)	Average mass flux (mg/hr)	Final PV value
Exp1	20	21.24	5.48	0.08	0.12712	0.02566	14.46	113.01	662.50
Exp2	20	21.69	5.40	0.05	0.12712	0.02566	14.46	112.55	1179.53
Exp4	78.3	83.97	4.95	0.35	0.12722	0.02564	14.45	401.62	378.62
Exp3	38.5	43.12	5.45	0.22	0.12712	0.02564	14.44	222.43	1017.16
Exp5	20	23.59	10.25	0.05	0.12725	0.02565	14.47	223.42	1032.82
Exp6	40.3	-	9.85	0.44	0.12775	0.02567	14.55	396.96	423.46

جدول ۱- مولفه‌های شش آزمایش مختلف

ضروری است که یک تنظیم کننده فشار معکوس را بعد از نگهدارنده مغزه قرار داد و در آغاز آزمایش، آن را بر روی درجه معینی که فشار هد پمپ را در محدوده فشار بهینه پایدار می نماید تنظیم نمود.

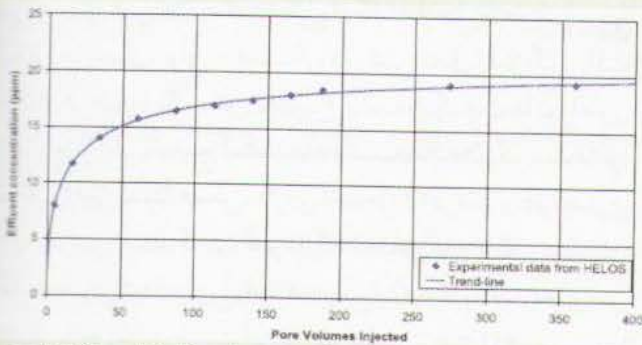
علاوه بر نشانگر روی پمپ که دبی را مشخص می کند، دو اندازه گیر دیگر نیز برای اندازه گیری دبی مورد استفاده قرار گرفت. یکی اسپینر (چرخنده) و دیگری سیستم موازنه کننده جرم. سیستم موازنه کننده جرم برای مشخص نمودن دبی دقیق تر است، اما هرگونه صدا و لرزش بر روی دقت آن تاثیر می گذارد. اندازه گیر چرخنده اینرسی زیادی دارد که سبب می شود ثبت تغییرات دبی با تاخیر زمانی همراه باشد.

تمام سیستم های برداشت اطلاعات همزمان شدند. حجم داخلی کلیه لوله های متصل کننده، از نگهدارنده مغزه به پمپ و نیز به واحد لیزری به طور دقیق اندازه گیری شد. حجم های محاسبه شده - با توجه به دبی مربوطه - مقادیر جابه جایی زمانی بر روی اطلاعات حاصله را تعیین می کنند. این اطلاعات، سپس بر اساس میزان حجم متخلخل مغزه (PV) فرموله می شوند. حجم داخلی اتصالات بین تانک حاوی آب تولیدی فرضی و ورودی به مغزه معادل (PV) ۸/۵ و حجم اتصالات بین خروجی مغزه و بخش مشاهده واحد لیزری (PV) ۱۱/۰ است.

۲-۲- محتویات جامد جریان خروجی

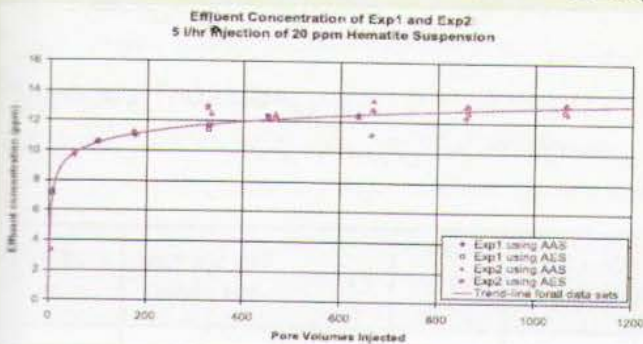
غلظت جریان خروجی به دوروش اندازه گیری شد. در این بخش استفاده از اندازه گیر ذره توسط پراش لیزری مناسب تر است. برای این منظور، از واحد لیزری مدل HELOS (ساخت شرکت Sympatec) استفاده شد. این واحد لیزری، توزیع اندازه ذرات و غلظت بصری سوسپانسیونی که از داخل آن عبور می کند را اندازه گیری می نماید. با عبور دادن محلول هایی با غلظت مشخص، در دبی های تزریق متفاوت از داخل سلول این دستگاه، معلوم شد که این غلظت بصری، نسبت به دبی حساس است، لذا تنها غلظت سوسپانسیون را مشخص می نماید. در ادامه، یک منحنی کالیبراسیون برای مرتبط نمودن غلظت بصری به غلظت سوسپانسیون ترسیم شد.

با استفاده از این منحنی، مقادیر غلظت بصری به دست آمده از آزمایش های تصفیه استاتیکی به غلظت سوسپانسیون تبدیل گردید. یک مثال از غلظت جریان خروجی که توسط این روش حاصل شد در منحنی شماره ۱ آورده شده است.



شکل ۱- غلظت جریان خروجی در Exp6 که به طور پیوسته توسط دستگاه پراش لیزری HELOS (ساخت شرکت Sympatec) اندازه گیری شده است

تحلیل های شیمیایی بر مبنای اندازه گیری مقادیر ذرات تزریق شده انجام گرفته است. نمونه هایی از محلول در جریان خروجی با حجم تقریبی 100ml در بازه های زمانی متفاوت جمع آوری شد و با افزودن اسید کلریدریک به نمونه ها و گرم کردن آن در یک سیستم بسته، تمام هماتیت موجود در آن حل می شود. این نمونه ها، سپس تحت طیف سنجی جذب اتمی (AAS) و طیف سنجی تابش اتمی (AES) قرار گرفته و از این طریق، اندازه غلظت معین می گردد، سپس، حجم اسید اضافه شده به محلول و هر حجم آب مقطری که برای رقیق کردن اسید اضافه شده است، در اعداد غلظت به دست آمده اصلاح گردید. شکل ۲ مثالی از اندازه غلظت جریان خروجی است که با استفاده از AAS و AES به دست آمده است.



شکل ۲- غلظت آب خروجی در Exp1 Exp2 که از طریق طیف سنجی جذب اتمی (AAS) و طیف سنجی تابش اتمی (AES) اندازه گیری شده است

مقایسه دو روش فوق برای اندازه گیری غلظت، مشخص می کند که استفاده از HELOS اولویت بیشتری دارد. HELOS می تواند به صورت پیوسته (Online)، غلظت جریان خروجی را اندازه بگیرد. هر برداشت اطلاعات، یک ثانیه وقت لازم دارد. در هر باره ۱۰ برداشت متوالی انجام گرفته و از نتایج به دست آمده، معدل گرفته می شود. این کار، بسیار سریع تر از آزمایش شیمیایی است که برای گرفتن نمونه در یک آزمایش با دبی ۰/۵ L/hr

مقطع، مناسب است.

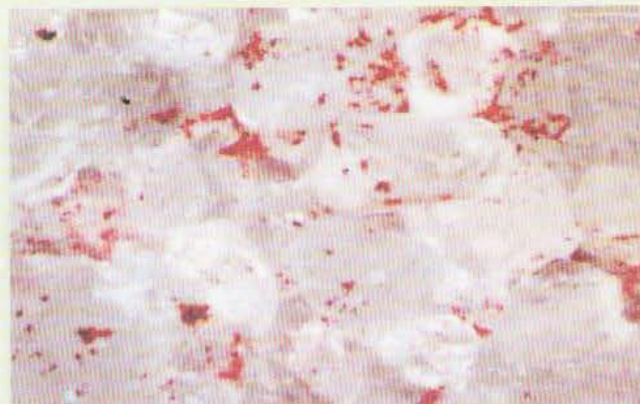
عمق میدان در تصاویر حدود $10\ \mu\text{m}$ و حرکت دهنده در امتداد Z، دارای آزادی حرکت $380\ \mu\text{m}$ است. با به کار گرفتن یک بسته نرم افزار به نام اتومونتاژ ایجاد یک تصویر واضح سه بعدی از یک سری تصاویر دوبعدی متوالی ممکن گردید. و بالعکس، این نرم افزار می تواند تصاویر دوبعدی کاملاً واضح از یک تصویر سه بعدی ایجاد نماید.

تعداد ۴۱ تصویر متوالی با عمق میدان کم، با تغییرات ثابت فاصله $6/5\ \mu\text{m}$ تا $9/5\ \mu\text{m}$ در امتداد Z - که بستگی به هر نمونه خاص دارد - گرفته شد. (شکل ۴) مثالی از این تصاویر است.



شکل ۴ - مثالی از تصاویر نیمه واضح گرفته شده توسط میکروسکوپ (قطعه دوم از Exp1. سی و سومین تصویر گرفته شده در فاصله $305.5\ \mu\text{m}$ از بالاترین تصویر)

سطح پوشیده شده توسط رسوبات هماتیت، به طور نظری قابل اندازه گیری است، اما به دلیل وقت گیر بودن کار (ناشی از انجام آن به طریق دستی)، به جای آن، در محیط یک برنامه کامپیوتری تصفیه کننده (با قرار دادن تصاویر دوبعدی (شکل ۵ و ۶))، سطح کل پیکسل های هماتیت، اندازه گیری شد و از این طریق، نسبت سطح پوشیده شده توسط هماتیت رسوب شده، به سطح کل تصویر شده دو بعدی، اندازه گیری گردید.



شکل ۵ - تصویر دوبعدی حاصل از اتومونتاژ (تکه دوم در Exp1)

حدقل ۷۲ ثانیه وقت لازم دارد. علاوه بر این، HELOS توزیع اندازه ذرات را تعیین می کند که در آنالیز شیمیایی نمی توان آن را انجام داد.

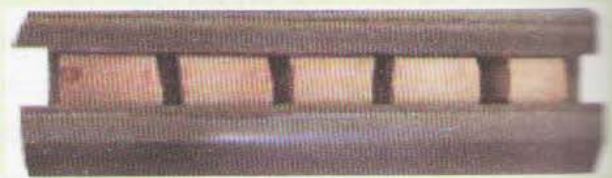
۲-۳- تجزیه و تحلیل های کالبد شکافانه پس از انجام سیلاب زنی در مغزه PMA

PMA نتایج بسیار مهمی را به دنبال داشت (نتایجی از این دست ترکارهای محققان قبلی مشاهده نشده است). پروفیل رسوب گذاری به دست آمده از این فرایند، برای محک زدن مدل های ریاضی موجود لازم و ضروری است.

تربایان هر آزمایش تصفیه استاتیکی، جریان آب به وسیله یک سیرانحرافی از مسیر مغزه منحرف می شود و فشار معکوس آزاد می گردد. مغزه از نگهدارنده مغزه خارج شد و پس از خشک کردن مغزه، تجزیه و تحلیل های PMA بر روی آن انجام گرفت.

PMA از دو تکنیک مکمل بهره می گیرد، تحلیل تصویری و تحلیل شیمیایی.

برای انجام همین آزمایش، نخست می بایست مغزه را به بخش هایی که سطح مقطع مسطحی دارند تقسیم کرد. با استفاده از یک ماشین سه محوره با خمش نقطه ای، با کمترین آسیب سکن، مغزه به قطعاتی به طول یک اینچ تقسیم شد (شکل ۳). روش هایی دیگر مانند برش باره و یا برش در حالت منجمد، به دلیل از دست رفتن مواد مغزه و شسته شدن ذرات جامد تریق شده، رضایت بخش نیست.



شکل ۳ - یک مغزه شکسته شده به پنج قطعه در محل فشار سنج

۱-۲-۳- تحلیل تصویری

هر بخش از مغزه، بر روی نگهدارنده ای که برای قرار گرفتن بر روی سکوی امتداد z میکروسکوپ طراحی شد قرار گرفت. چشمه نور سحری، همراه با عدسی شیء $2 \times$ ، یک عدسی بزرگنمایی $50 \times$ و دوربین دیجیتال تصویر برداری در یک امتداد هم مرکز هستند. تصویر گرفته شده دارای وضوح 2088 پیکسل در 100 پیکسل، (با ابعاد پیکسل $465/0$) است، لذا، ابعاد تصویر دوبعدی حاصله، $969\ \mu\text{m}$ در $719\ \mu\text{m}$ خواهد بود. این ابعاد تصویر، برای شصت نمودن ذرات جامد رسوب شده بر روی یک سطح

به منظور پایین آوردن میزان خطا، متوسط سطوح مختلف پوشیده شده در یک سطح مقطع، ملاک قرار گرفته اند و از سه نقطه مختلف در سطح مقطع مغزّه برداشته شد. در حال حاضر سطوح رسوب گذاری شده از تصاویر دوبعدی انتقالی برای یک سلسله تصاویر در هر سطح مقطع اندازه گیری شده است. (استفاده از یک میزان متوسط برای توصیف سطوح رسوب گذاری شده در نوشتاری دیگر بحث خواهد شد، در این مقاله، تنها از ارقام حاصل از یک دسته، استفاده شده است).

با به کارگیری این تحلیل تصویری، یک پروفیل نسبی از رسوب گذاری حاصل می شود که نیاز به داده هایی از تحلیل شیمیایی برای نزدیک کردن مقادیر به پروفیل واقعی رسوب گذاری دارد. برخی معتقدند که استفاده از تصاویر سه بعدی به جای تصاویر انتقالی دوبعدی، مقادیری از رسوب ذرات را حاصل می نماید که مستقل از مقادیر حاصل از تحلیل شیمیایی عمل کند.

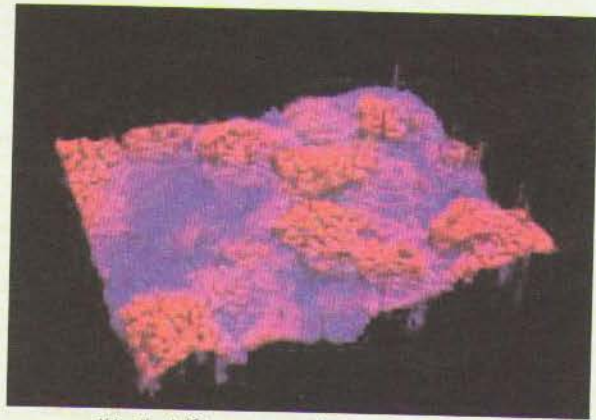
پیش بینی می شود که با تصاویر سه بعدی بازسازی شده، بتوانیم میزان رسوب ذرات بر سطح گلوگاه تخلخل را، با تمییز دادن آنها از رسوب گذاری بر روی دانه ها، مشخص نماییم.

از این طریق علاوه بر ایجاد ارتباط بین تخریب نفوذ پذیری و پروفیل کلی رسوب گذاری، می توانیم بین تخریب نفوذ پذیری و رسوب ذرات بر روی گلوگاه تخلخل ارتباط برقرار کنیم. دانستن قوانین حاکم بر این ارتباط، برای تصدیق فرضیه تاثیر بسیار زیاد تر رسوب گذاری ذرات بر روی گلوگاه تخلخل بر کاهش نفوذ پذیری و نیز برای اندازه گیری میزان این تاثیر، ضروری است. متأسفانه، کار با تصاویر سه بعدی، از آنچه در ابتدا پیش بینی می شد، بسیار طاقت فرساست. لذا باید راه حلی برای تسهیل این کار و نیز برای مشکل مربوط به تصاویر دوبعدی پیدانمود. ■



شکل ۶- نقشه عمق مربوط به تصویر دوبعدی در اتومونتاژ

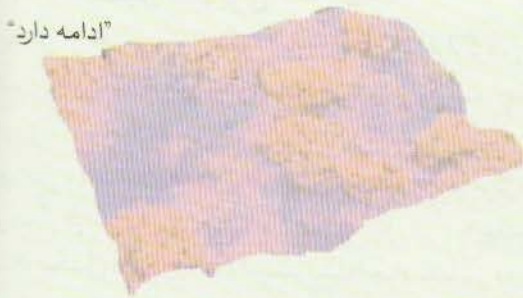
باید یادآور شد که کار با تصاویر دوبعدی اتومونتاژ به جای مدل های سه بعدی واقعی (شکل ۷ و ۸)، سبب ایجاد خطا در محاسبات مربوطه می گردد. این تصاویر دوبعدی، انتقال منحرف شده (BIASED PROJECTION) تصاویر سه بعدی است. لذا، تصاویری که شیب خیلی زیادی دارند، همسان با آنهایی که دارای شیب کمی هستند مدنظر قرار نگرفته اند. این خطا با افزایش زاویه دار شدن دانه های ماسه سنگ بیشتر می شود.



شکل ۷- نقشه سه بعدی مربوط به تصویر دوبعدی شکل ۵ در اتومونتاژ



شکل ۸- نقشه سه بعدی ترکیبی با تصویر دوبعدی حاصل از اتومونتاژ



"ادامه دارد"

منبع: SPE 82235

این مقاله در سال ۲۰۰۲ در کنفرانس اروپایی تخریب سازند ارایه شده است