

## بررسی تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک در فرایند ترسیب گاز کربن دی اکسید

جواد جدی زاهد، بهزاد رستمی\*<sup>+</sup>

دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده:** ترسیب کربن دی اکسید یکی از بهترین و مؤثرترین روش‌های موجود برای کاهش آزادسازی کربن دی اکسید در جو می‌باشد. از نظر ظرفیت ذخیره سازی آبده‌های شور بالاترین ظرفیت ذخیره سازی را دارا می‌باشند. تزریق مقدار زیادی از گاز در مخازن زیر زمینی عمیق منجر به رسوب نمک در ناحیه اطراف چاه تزریقی می‌شود. از آنجا که حجم زیادی از گاز کربن دی اکسید می‌بایست در سازندهای زیرزمینی برای مدت طولانی (کمینه ۳۰ سال) ذخیره شود، تزریق پذیری موضوعی بسیار مهم است. رسوب نمک ناشی از فرایند تبخیر در اطراف چاه تزریقی می‌تواند به شدت تزریق پذیری را کاهش دهد. هدف از این مطالعه بررسی اثر شدت جریان تزریق گاز کربن دی اکسید و همچنین میزان شوری آب نمک سازندی بر روی تغییرهای تزریق پذیری به دلیل رسوب نمک می‌باشد. نتیجه‌های این مطالعه نشان می‌دهد چندین عامل متقابل، با تغییر شدت جریان تزریق و شوری آب سازندی، بر روی تزریق پذیری تأثیر می‌گذارند که اثر متقابل آن‌ها تعیین کننده ی میزان تزریق پذیری خواهد بود. آنالیز نتیجه‌های تراوایی نهایی نشان داد میزان رسوب نمک با افزایش شدت جریان تزریق و کاهش شوری آب سازندی، کم می‌شود. آنالیز عدد پکلت نشان می‌دهد پروفایل رسوب نمک با تغییر شدت جریان تزریق و درجه ی شوری تغییر می‌کند اما تابع شدیدتری نسبت به تغییرهای شدت جریان تزریق می‌باشد. نتیجه‌های این مطالعه برای کالیبره کردن مدل تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک مورد استفاده قرار گرفت..

**واژه‌های کلیدی:** ترسیب؛ کربن دی اکسید؛ رسوب نمک؛ تراوایی؛ تبخیر؛ نمونه‌ی ماسه سنگی.

**KEYWORDS:** Sequestration, CO<sub>2</sub>; Salt precipitation; Permeability; Evaporation; Sandstone rock sample.

### مقدمه

کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید را برای چند دهه آینده تضمین می‌کند. از جمله کاندیدای تزریق گاز کربن دی اکسید، مخازن نفتی و گازی تخلیه شده هستند. مخزن‌های نفت و گاز به دلیل داشتن پوش سنگ و هم چنین به دلیل آن که در طول عمر تولید خود به‌خوبی شناخته شده‌اند ریسک تزریق گاز کربن دی اکسید

به دلیل استفاده روز افزون از سوخت‌های فسیلی روند تولید گازهای گلخانه‌ای جهش چشم‌گیری داشته است. کربن دی اکسید در بین گازهای گلخانه‌ای تأثیر بیش‌تری در افزایش دمای سطح زمین داشته به طوری که ۶۴ درصد اثر گلخانه‌ای به این گاز منسوب می‌باشد [۱]. تزریق زیرزمینی کربن دی اکسید

\*عقد دار مکاتبات

+E-mail: brostami@ut.ac.ir

واکنش پذیری نمی‌تواند به طور مستقیم برای فرایند ترسیب گاز کربن دی اکسید مورد استفاده قرار بگیرد [۱۰]. این اختلاف ویژگی‌های گازهای نیتروژن و متان با گاز کربن دی اکسید در حالت فوق بحرانی که کربن دی اکسید شرایط خاصی به دلیل چگالی بالا و گرانبوی کم دارد، بیش تر تأثیر گذار خواهد بود. اوت و همکاران<sup>(۶)</sup> [۱۱] با تزریق گاز فوق بحرانی کربن دی اکسید درون نمونه های ماسه سنگی اشباع شده از آب نمک فرایند تبخیر و رسوب نمک را دیدند و به این نتیجه رسیدند که رسوب نمک می‌تواند به شدت تراوایی نمونه های ماسه سنگی را کاهش دهد.

با تزریق گاز کربن دی اکسید درون آبدهای شور افزون بر رسوب نمک به دلیل فرایند تبخیر، واکنش شیمیایی سنگ - سیال در سازندهای کربناته نیز اتفاق می‌افتد. با تزریق گاز کربن دی اکسید و انحلال آن در آب نمک سازند اسید کربنیک ضعیف تولید می‌شود که می‌تواند با انحلال و رسوب کانی های کربناته تخلخل و تراوایی را تغییر دهد [۲۱ - ۱۵]. این مطالعه به دنبال بررسی تأثیر رسوب نمک ناشی از فرایند تبخیر بر روی تزریق پذیری درون نمونه‌ی ماسه سنگی صرفاً به خاطر واکنش فیزیکی تبخیر، می‌باشد. از این رو آنالیز پلاسمای جفت شده القائی - طیف سنجی نشر اتمی<sup>(۷)</sup> در پایان هر آزمایش انجام شد تا امکان وجود واکنش ژئوشیمیایی سنگ - سیال مورد بررسی قرار گیرد. هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی اثر شدت جریان تزریق و شوری آب سازند بر روی تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک می‌باشد.

## بخش تجربی

### دستگاهها

شکل ۱ نشان دهنده‌ی شماتی دستگاه سیلاب زنی تحت فشار و دما است. مغزه نگهدار، رگلاتور تثبیت فشار<sup>(۸)</sup> و محفظه‌های انتقال درون گرمکن<sup>(۹)</sup> قرار داده شده اند. مغزه نگهدار به صورت افقی قرار گرفته است و تزریق با پمپ جابه‌جایی مثبت در حالت شدت جریان ثابت انجام می‌شود. جمع کننده ی مایع و بخار آب در خروجی بر روی ترازو قرار گرفته اند تا به صورت خودکار آب نمک

در آن‌ها کاهش می‌یابد و افزون بر این تزریق گاز کربن دی اکسید خود به نوعی می‌تواند باعث افزایش تولید نفت و یا گاز در سال‌های پایانی عمر مخزن شود که از نظر اقتصادی می‌تواند مفید باشد [۲]. اما چون این مخازن گاز و نفتی ظرفیت محدودی برای تزریق دارند برای پروژه های ترسیب کربن دی اکسید زیاد مورد توجه قرار نمی‌گیرند.

آبدهای عمیق با آب شور<sup>(۱)</sup> برای ترسیب<sup>(۲)</sup> کربن دی اکسید جذابت بالایی دارند چون دارای ظرفیت بالایی از ذخیره‌سازی هستند و همچنین چون آب موجود در این سازند ها درجه شوری بالایی دارند، نمی‌توانند به عنوان آب آشامیدنی استفاده شود. فرایند ترسیب یک فرایند بلند مدت (کمینه ۳۰ سال) می‌باشد از این رو تزریق پذیری<sup>(۳)</sup> موضوعی مهم در فرایند ترسیب می‌باشد. تزریق پذیری به‌وسیله‌ی تراوایی سازند، ضخامت سازند، و تراوایی نسبی کنترل می‌شود [۳]. تزریق گاز در آبده های شور منجر به رسوب نمک در ناحیه اطراف چاه می‌شود. با تزریق گاز کربن دی اکسید درون آبدهای شور، آب اطراف چاه تزریق به‌وسیله‌ی جریان گاز تبخیر شده و وارد جریان گاز می‌شود که این پدیده باعث خشک شدن ناحیه اطراف چاه و رسوب نمک خواهد شد که منجر به کاهش تراوایی و تخلخل سازند می‌شود. این موضوع می‌تواند تزریق پذیری را به شدت کاهش دهد. بخار شدن آب برای مخازن گازی به عنوان دلیلی برای کاهش تراوایی گزارش شده است که حتی باعث غیر قابل تولید شدن چاه های گازی شده است [۴، ۵]. مطالعه‌های آزمایشگاهی برای درک بهتر عامل‌های مهم و مؤثر در فرایند ترسیب گاز کربن دی اکسید لازم هستند. زالواگا و همکاران<sup>(۴)</sup> [۶، ۷] با تزریق گاز متان را به درون پک‌های ماسه سنگی و همچنین پیسن و همکاران<sup>(۵)</sup> [۸، ۹] با تزریق گاز نیتروژن به درون مغزه های ماسه سنگی به دنبال بررسی فرایند تبخیر آب و رسوب نمک بودند. در این مطالعه های آزمایشگاهی کاهش تزریق پذیری به دلیل رسوب نمک نشان داده شد، اما این نتیجه‌ها به دلیل تفاوت‌های چشمگیر ویژگی‌های ترمودینامیکی گاز های متان و نیتروژن با گاز کربن دی اکسید مثل چگالی، گرانبوی، ظرفیت گرمایی، کشش بین سطحی و هم چنین

(۱) Aquifers

(۲) Sequestration

(۳) Injecivity

(۴) Zuluaga E. et al

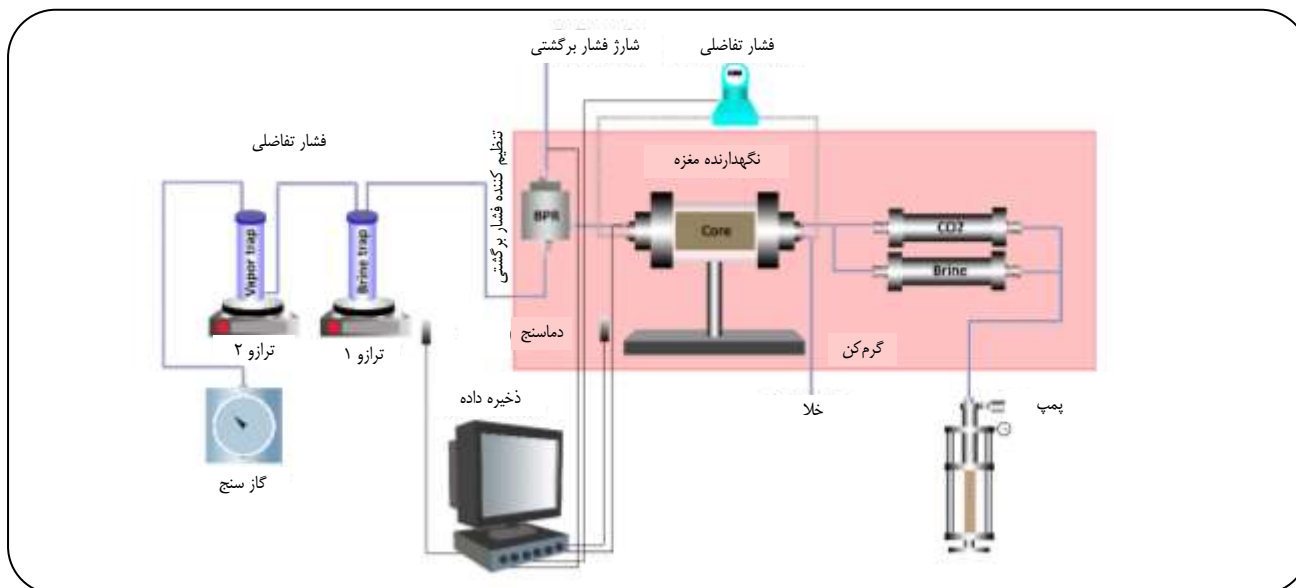
(۵) Peysson Y. et al

(۶) Ott H. et al

(۷) Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES)

(۸) Back pressure regulator

(۹) Oven



شکل ۱- شمای دستگاه تزریق گاز در شرایط مخزن.

ویژگی‌های مناسب سامانه کربن دی اکسید - آب نمک در شرایط آزمایشگاه با در نظر گرفتن شرایط ترسیب کربن دی اکسید در حوضه‌های ذخیره‌سازی تعیین می‌شود. نوردباتن و همکاران<sup>(۱)</sup> [۱۷] براساس دو پارامتر دما و فشار حوضه‌های ذخیره‌سازی کربن دی اکسید به صورت جدول ۲ تقسیم بندی کردند. در تقسیم بندی نوردباتن و همکاران مخازن کم عمق مخازنی با عمق ۱۰۰۰ متر و مخازن عمیق با عمق ۳۰۰۰ متری در نظر گرفته شد. مقایسه ویژگی‌های سیال‌ها در شرایط آزمایشگاه با شرایط در حوضه‌های ذخیره‌سازی هماهنگی مناسبی را با حوضه های گرم-کم عمق می‌دهد.

### شرح آزمایش

نمونه تمیز و خشک وزن می‌شود و از داخل به بیرون به دور آن فویل آلومنیومی و تفلونی پیچیده می‌شود تا شرایط مناسب برای کار با گاز خورنده‌ی کربن دی اکسید ایجاد شود. پیش از اشباع نمونه با آب نمک با درجه شوری مشخص هوای داخل خلل و فرج نمونه به مدت ۱۲ ساعت توسط پمپ خلا خارج می‌شود. در طول فرایند اشباع نمونه با آب نمک تراوایی مایع از روی اختلاف فشار دو سر نمونه تعیین می‌شود. دما و فشار آزمایش به ۶۵ درجه سلسیوس و ۱۲۵۰ پام می‌رسد و تزریق گاز کربن دی اکسید با شدت جریان ثابت شروع می‌شود. فرایند تزریق هنگامی به پایان می‌رسد که بخار آبی در جمع کننده ی بخار آب ثبت نشود.

و بخار آب تولیدی را ثبت کنند. در جمع کننده‌ی بخار آب از سیلیکا ژل که نوعی جاذب رطوبت است، استفاده شده است تا بخار آب تولیدی ناشی از فرایند تبخیر را جذب کند.

### نمونه ی سنگ

در این مطالعه از یک رخنمون ماسه سنگی که دارای تخلخل و تراوایی متناسب با آبده های شور بود، استفاده شد. نمونه ی ماسه سنگی دارای طول ۸ سانتی متر و قطر ۳/۸۱ سانتی متر بود. تخلخل این نمونه برابر با ۲۳ درصد و تراوایی گاز برابر با ۲۱۲ میلی داریسی بود.

### ویژگی‌های سیال‌ها

گاز تزریقی در این مطالعه کربن دی اکسید با درجه خلوص ۹۹/۹ درصد بود. نقطه بحرانی گاز کربن دی اکسید در فشار ۱۰۷۱ پام و دمای ۳۱/۱ سلسیوس می‌باشد، به همین منظور برای ایجاد شرایط فوق بحرانی کربن دی اکسید دما و فشار آزمایش ۶۵ درجه سلسیوس و ۱۲۵۰ پام در نظر گرفته شد. سدیم کلرید به عنوان بیش‌ترین نمک رسوبی در آبده های شور گزارش شده است [۱۶]، از این رو در این مطالعه از نمک سدیم کلرید شرکت مرک آلمان برای تولید آب نمک استفاده شد. جدول ۱ ویژگی‌های ترمودینامیکی سیال‌های مورد استفاده در این مطالعه نشان می‌دهد.

(۱) Nordbotten J. et al.

جدول ۱- ویژگی‌های ترمودینامیکی سیالات مورد استفاده در شرایط آزمایشگاه.

نام سیال	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	اختلاف چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	گرانروی (cp)	نسبت گرانروی
دی اکسید کربن	۲۱۰	۸۰۸-۹۱۶	۰,۰۲۰۲	۰,۰۲۷-۰,۰۴۰۴
آب نمک	۱۰۱۸-۱۱۲۶		۰,۵۰-۰,۷۴	

جدول ۲- ویژگی‌های ترمودینامیکی سیال‌ها در حوضه‌های ذخیره‌سازی گاز کربن دی اکسید [۱۷].

خواص سیال	گرم - کم عمق	گرم - عمیق	سرد کم عمق	سرد عمیق
عمق تزریق (m)	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰
چگالی کربن دی اکسید ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۶۶	۴۷۹	۷۱۴	۷۳۳
چگالی آب نمک ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۹۸-۱۲۱۰	۹۴۵-۱۱۴۵	۱۰۱۲-۱۲۳۰	۹۹۵-۱۲۰۲
گرانروی کربن دی اکسید (cp)	۰,۰۲۳	۰,۰۳۹۵	۰,۰۵۷۷	۰,۰۶۱۱
گرانروی آب نمک (cp)	۰,۴۹۱-۰,۸۸۳	۰,۱۹۵-۰,۳۱۲	۰,۷۹۵-۱,۵۸	۰,۳۷۸-۰,۶۴۴
اختلاف چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۷۳۲-۹۴۴	۴۶۶-۶۶۶	۲۹۸-۵۱۶	۲۶۲-۴۶۹
نسبت گرانروی	۰,۰۲۶-۰,۰۴۶	۰,۱۲۶-۰,۲۰۲	۰,۰۳۶-۰,۰۷۲	۰,۰۹۴-۰,۱۶۱

شوری بر روی فرایند ترسیب استفاده شد. گفتنی است که مطابق عدد رینولدزی که برای محیط‌های متخلخل به صورت معادله‌ی (۱) تعریف می‌شود در تمامی آزمایش‌های طراحی شده رژیم جریان آرام می‌باشد و مطابق با عدد موینگی تعریف شده برای محیط‌های متخلخل مطابق معادله (۲) کم‌ترین شدت جریان تزریق برای آن‌ها که بر نیروی موینگی غلبه کرد برای سامانه مورد مطالعه برابر با ۰,۱۳ (میلی لیتر در دقیقه) محاسبه شد [۱۸].

$$N_{Re} = \frac{1 \cdot \rho V \sqrt{K}}{\phi^{1/2} \mu} \quad (N_{Re} \leq 1) \quad (1)$$

$$N_c = \frac{\mu V}{\sigma} \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  دانسیته ی سیال تزریقی (گرم/ سانتی متر مکعب)،  $V$  سرعت (متر/ثانیه)،  $K$  تراوایی (سانتی متر مربع)،  $\phi$  تخلخل،  $\mu$  گرانروی سیال (پویس) و  $\sigma$  تنش بین سطحی آب نمک و کربن دی اکسید (میلی نیوتن/ متر) است.

### نتیجه‌ها و بحث

#### تأثیر شدت جریان تزریق

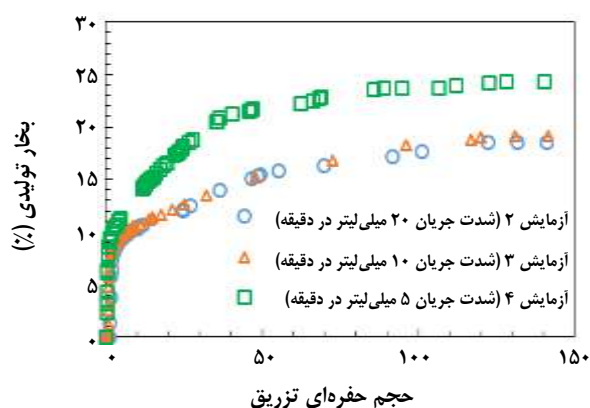
شکل ۲ داده‌های آب نمک تولیدی برای آنالیز تأثیر شدت جریان می‌باشد. مطابق شکل ۲، با افزایش میزان شدت جریان

سپس دمای گرمکن به دمای محیط رسانده می‌شود و فشار به فشار محیط می‌رسد و تراوایی نهایی گاز که معیاری از میزان رسوب نمک است، اندازه‌گیری می‌شود و وزن نهایی نمونه ثبت می‌شود تا میزان رسوب نمک در هر آزمایش تعیین شود. برای بررسی واکنش ژئوشیمیایی سنگ - سیال آنالیز پلاسمای جفت شده لقاتی - طیف سنجی نشر اتمی بر روی آب نمک تولیدی انجام می‌شود. برای شروع آزمایش بعدی لازم بود نمونه سنگ به طور کامل تمیز شود. به همین منظور ۱۵ برابر حجم حفره‌ای به درون نمونه سنگ آب نمک با درجه‌ی شوری‌های کم (۳۰ گرم/لیتر، ۵ گرم/لیتر و ۲ گرم/لیتر) تزریق شد تا نمک رسوبی به حالت محلول در بیاید و با تزریق ۱۰ برابر حجم حفره‌ای اتانول نمک رسوبی از نمونه خارج شد. ثابت بودن وزن نمونه پیش از هر آزمایش و همچنین تغییر اندک تراوایی آب نمک ( $\pm 2$  درصد) در مرحله اشباع نشان می‌دهد که فرایند تمیز کردن نمونه از نمک‌های رسوبی به خوبی انجام شده است. دو مجموعه آزمایش برای بررسی اثر شدت جریان تزریق گاز کربن دی اکسید و شوری آب نمک سازند طراحی شده است که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

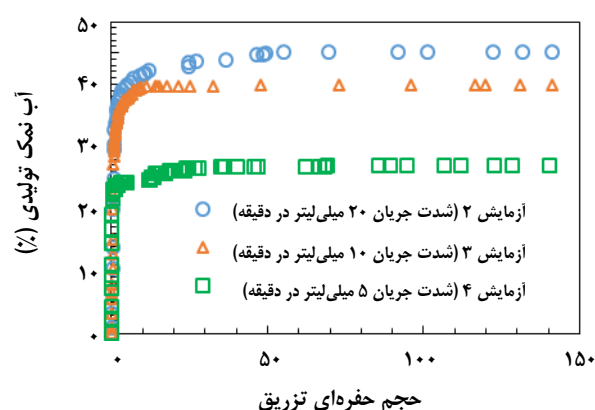
مجموعه آزمایش‌های ۳، ۲ و ۴ برای بررسی اثر شدت جریان تزریق و مجموعه ی آزمایش‌ها ۳، ۱ و ۵ برای بررسی اثر درجه

جدول ۳- ویژگی‌های آزمایش‌های طراحی شده.

شماره آزمایش	دما °C	فشار (psi)	شوری (g/L)	دبی (cc/min)
۱	۶۵	۱۲۵۰	۵۰	۱۰
۲	۶۵	۱۲۵۰	۱۰۰	۲۰
۳	۶۵	۱۲۵۰	۱۰۰	۱۰
۴	۶۵	۱۲۵۰	۱۰۰	۵
۵	۶۵	۱۲۵۰	۲۰۰	۱۰



شکل ۳- داده‌های بخار آب تولیدی برای بررسی اثر شدت جریان تزریق.



شکل ۴- داده‌های آب نمک تولیدی برای بررسی اثر شدت جریان تزریق.

### تأثیر درجه شوری

شکل ۴ داده‌های آب نمک تولیدی برای آنالیز تاثیر درجه شوری می‌باشد. مطابق شکل ۴، با افزایش درجه‌ی شوری به دلیل افزایش گرانیوی آب نمک درون نمونه، توانایی جاروب گاز کربن دی اکسید کم تر می‌شود و چون اختلاف گرانیوی بین گاز کربن دی اکسید و آب نمک بیشتر می‌شود، پدیده‌ی انگشتی شدن زودتر رخ می‌دهد و میزان تولید آب نمک کم تر می‌شود. شکل ۵ داده‌های تولیدی بخار آب را نشان می‌دهد. از عامل‌های تاثیر گذار بر تبخیر مساحت سطح در تماس با جریان گاز می‌باشد. هر چه قدر این مساحت سطح بیشتر شود میزان تبخیر شدیدتر خواهد شد. افزایش درجه‌ی شوری باعث کاهش مساحت سطح در تماس با گاز کربن دی اکسید به دلیل افزایش جامدهای محلول می‌شود.

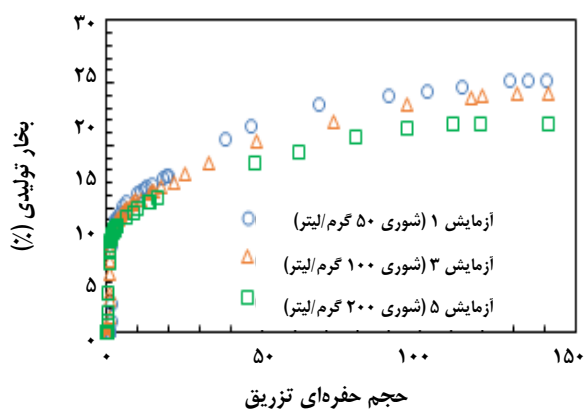
چندین عامل متقابل بر روی میزان رسوب نمک به دلیل تغییر در درجه شوری اثر گذارند. عامل ۱ که در آن با افزایش درجه شوری میزان باقی مانده‌ی آب نمک درون نمونه که می‌تواند باعث رسوب

تزریق مقدار تولید آب نمک بیش تر شده است. نیروی مخالف با تولید آب نمک نیروی موینگی می‌باشد. با افزایش شدت جریان تزریق (در نتیجه افزایش سرعت عبور گاز درون مسیره‌های جریان) نیروهای ناشی از جریان تقویت می‌شود و منجر به غلبه‌ی بیش تر بر نیروهای موینگی و افزایش تولید آب نمک خواهد شد. شکل ۳ داده‌های تولید بخار آب را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ با افزایش شدت جریان تزریق، میزان تولید بخار کم تر می‌شود.

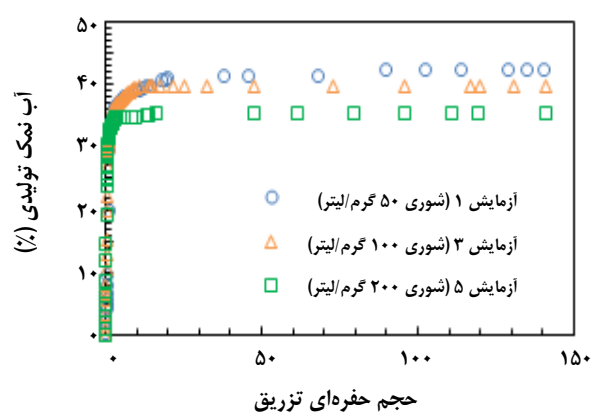
در بررسی اثر شدت جریان تزریق بر روی میزان رسوب نمک دو عامل هم ارز وجود دارد. عامل ۱ که در آن، با افزایش شدت جریان تزریق میزان آب باقی مانده درون نمونه که می‌تواند منجر به رسوب نمک شود، کم تر می‌شود (شکل ۲). عامل ۲ که در آن با افزایش شدت جریان، نرخ تبخیر که باعث رسوب نمک است، کم تر می‌شود (شکل ۳). با افزایش شدت جریان تزریق مجموعه عامل‌های ۱ و ۲ در جهت کاهش میزان رسوب نمک عمل خواهند کرد.

جدول ۴- آنالیز تراوایی نهایی.

شماره آزمایش	شدت جریان (cc/min)	شوری (g/L)	تراوایی نهایی گاز (mD)	تراوایی اولیه گاز (mD)	تراوایی نهایی گاز (mD)
۱	۱۰	۵۰	۱۶۶	۲۱۱	۱۶۶
۲	۲۰	۱۰۰	۱۲۲	۲۱۴	۱۲۲
۳	۱۰	۱۰۰	۱۰۶	۲۱۳	۱۰۶
۴	۵	۱۰۰	۸۲	۲۱۶	۸۲
۵	۱۰	۲۰۰	۷۳	۲۱۴	۷۳



شکل ۵- داده‌های بخار آب تولیدی برای بررسی اثر شوری.



شکل ۴- داده‌های آب نمک تولیدی برای بررسی اثر شوری.

باقی مانده درون نمونه و افزایش جامدهای محلول درون آب نمک که در جهت هم عمل می‌کنند، تأثیر بیش‌تری نسبت کاهش نرخ تبخیر بر روی میزان رسوب نمک دارند.

#### پروفیل رسوب نمک

شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده‌ی سطح ورودی و خروجی نمونه سنگ در پایان آزمایش ۳ می‌باشد.

مطابق شکل‌های ۶ و ۷، میزان رسوب نمک در ورودی و خروجی نمونه یکسان نیست و بیش‌تر رسوب نمک در ورودی نمونه می‌باشد و رسوب نمک به صورت نا همگون رخ داده است. برای بررسی اثر همگونی یا ناهمگونی رسوب می‌توان از عدد پکلت<sup>(۱)</sup> استفاده کرد که نسبت سرعت همرفت<sup>(۲)</sup> به سرعت فرایند دیفیوژن می‌باشد. پیسون و همکاران<sup>(۳)</sup> رابطه‌ی عدد پکلت را به صورت زیر گزارش دادند [۱۹]:

نمک شود، بیش‌تر می‌شود (شکل ۴). فاکتور ۲ که در آن با افزایش درجه‌ی شوری خود به طور مستقیم جامدهای محلول درون آب نمک را بیش‌تر می‌کند و رسوب نمک را سریع‌تر می‌کند. عامل ۳ که در آن با افزایش درجه‌ی شوری نرخ تبخیر کم می‌شود (شکل ۵). تقابل عامل‌های هم ارز (۲ و ۱) با عامل ۳ تعیین کننده‌ی میزان رسوب نمک خواهد بود. در این مورد می‌توان از آنالیز تراوایی نهایی استفاده کرد.

#### آنالیز تراوایی نهایی

تراوایی نهایی معیاری دیگر برای بررسی اثر شدت جریان تزریق و درجه‌ی شوری بر میزان رسوب نمک خواهد بود. مطابق جدول ۴ با افزایش شدت جریان تزریق گاز کربن دی اکسید میزان کاهش تراوایی کم‌تر می‌شود. با افزایش میزان شوری میزان کاهش تراوایی بیش‌تر شده است از این رو افزایش آب نمک

(۱) Peclet number

(۲) Advection

(۳) Peysson Y. et al



شکل ۷ - تصویر خروجی نمونه سنگ در پایان آزمایش.



شکل ۶ - تصویر ورودی نمونه سنگ در پایان آزمایش.

### آنالیز پلاسمای جفت شده القائی - طیف سنجی نشر اتمی

جدول ۶ نشان دهنده آنالیز پلاسمای جفت شده القائی - طیف سنجی نشر اتمی برای آب نمک تولیدی آزمایش ۱ و ۵ با کم ترین و بیش ترین درجه شوری است. گاز کربن اکسید دی تزریقی در مجاورت آب نمک می تواند کربنیک اسید ضعیف تشکیل دهد. هر چه میزان شوری آب نمک کم تر شود قدرت کربنیک اسید تشکیل شده بیش تر می شود و توانایی انحلال کانی های کربناته در آن بیش تر فراهم می شود [۲۲]. مطابق این جدول ۶ سهم واکنش شیمیایی سنگ - سیال در آزمایش با شوری ۵۰ گرم/لیتر برابر با ۶ در صد و برای آزمایش با درجه ی شوری ۲۰۰ گرم/لیتر برابر با ۱/۵ درصد است. این آنالیز نشان می دهد بیش ترین عنصر سازنده آب نمک تولیدی سدیم که نماینده ی سدیم کلرید می باشد، است. به دلیل آنکه که با حل شدن کربن دی اکسید در آب نمک، کربنیک اسید تولید می شود عنصر های دیگر موجود در نمونه می تواند به دلیل واکنش سنگ و سیال در تولیدی حضور داشته باشند. طبق این آنالیز می توان از واکنش سنگ و سیال برای این آزمایش چشم پوشی کرد و می توان گفت تغییرهایی به دلیل واکنش سنگ و سیال در داده های خروجی وجود ندارد. این نتیجه گیری را می توان برای سایر آزمایش ها این مطالعه گسترش داد.

### مدل تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک

تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک تابعی از تغییرهای تخلخل به صورت زیر است [۲۳]:

$$\frac{K}{K_0} = f\left(\frac{\phi_f}{\phi_0}\right) = f(1 - S_s) \quad (5)$$

که در آن  $K$  تراوایی نهایی،  $K_0$  تراوایی اولیه،  $\phi_f$  تخلخل نهایی،  $\phi_0$  تخلخل اولیه و  $S_s$  حجم از حفره هایی که در انتهای تست

$$P_e = \frac{\xi L}{\rho \phi D} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{-M_i}{A} \frac{dS}{dt} \quad (4)$$

که در آن  $\xi$  نرخ خشک شدن (کیلوگرم/مترمربع × ثانیه)،  $L$  طول مغزه (متر)،  $\rho$  چگالی آب نمک در حالت استاندارد (کیلو گرم/متر مکعب)،  $\phi$  تخلخل و  $D$  ثابت نفوذ نمک در آب،  $M_i$  جرم اولیه ی آب نمک درون نمونه،  $A$  سطح مقطع نمونه و  $(dS/dt)$  کاهش اشباع متوسط آب نمونه نسبت به زمان می باشد. ثابت نفوذ تابعی از دما، فشار و غلظت نمک محلول می باشد [۲۰]. با توجه به این که دما و فشار در این مطالعه ی آزمایشگاهی ثابت می باشد و دامنه ی تغییر شوری زیاد نمی باشد، از این رو ثابت نفوذ برابر با  $10^{-10}$  متر مربع/ثانیه [۹] در نظر گرفته شد. به صورت کلی می توان گفت برای اعداد پکلت  $\gg 1$  رسوب به صورت همگن و برای اعداد پکلت  $\ll 1$  رسوب به صورت ناهمگن خواهد بود [۲۱]. جدول ۵ نشان دهنده ی مقدار عدد پکلت این مطالعه می باشد:

باید یادآور شد که در محاسبه ی عدد پکلت در آزمایش هایی که با شدت جریان تزریق برابر برای بررسی اثر شوری انجام شده اند، تأثیر درجه ی شوری خود را بر روی نرخ خشک شدن و همچنین دانسیته ی آب نمک نشان می دهد. مطابق جدول ۵ با افزایش شدت جریان مقدار عدد پکلت به شدت افزایش می یابد و منجر به رسوب ناهمگن تر خواهد شد. با افزایش مقدار شوری مقدار عدد پکلت کاهش می یابد و باعث همگن تر شدن پروفیل رسوب می شود، اما تغییر عدد پکلت به دلیل تغییر شوری در مقابل تغییر عدد پکلت به دلیل تغییر شدت جریان تزریق، قابل چشم پوشی است.

جدول ۵ - مقدار عدد پکلت برای آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	شوری (g/L)	دبی تزریقی گاز (cc/min)	$\xi$ (kg/(m <sup>2</sup> ×s))	P <sub>e</sub>
۱	۵۰	۱۰	۲,۴۰	۲۲۴۴
۲	۱۰۰	۲۰	۵,۰۲	۴۵۳۱
۳	۱۰۰	۱۰	۲,۳۴	۲۱۱۹
۴	۱۰۰	۵	۱,۰۲	۹۲۲
۵	۲۰۰	۱۰	۲,۲۲	۱۸۲۴

جدول ۶ - آنالیز پلاسمای جفت شده القائی - طیف سنجی نشر اتمی.

عنصر	درصد حضور عناصر (شوری ۵۰ گرم/لیتر)	درصد حضور عناصر (شوری ۲۰۰ گرم/لیتر)
Aluminum(Al)	<۰,۰۰۱	۰,۰۱
Arsenic(As)	۰,۰۳	۰,۰۱
Barium(Ba)	۰,۰۴	۰,۰۱
Calcium(Ca)	۴,۵۹	۰,۸۶
Potassium (K)	۱,۰۵	۰,۴۴
Magnesium (Mg)	۰,۲۲	۰,۰۳
Manganese (Mn)	۰,۰۰۵	<۰,۰۰۱
Sodium (Na)	۹۳,۸۱	۹۸,۵۵
Nickel (Ni)	۰,۰۰۳	<۰,۰۰۱
Phosphor (P)	۰,۰۳	<۰,۰۰۱
Strontium (Sr)	۰,۰۱	<۰,۰۰۱

$$w = 1 + \frac{\Gamma}{\frac{1}{\phi_r} - 1} \quad (۸)$$

در معادله‌های بالا تنها دو پارامتر  $\Gamma$  و  $\phi_r$  مجهول هستند که می‌توان به روش تطابق مدل ورما و همکاران با داده‌های آزمایشگاهی این مجهول‌ها را تعیین کرد و این مدل را برای داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه برسنجی کرد. جدول ۷ نشان دهنده داده‌های تغییرهای تراوایی و تخلخل برای آزمایش‌ها می‌باشد: جدول ۸ نشان دهنده نتیجه‌های تطابق مدل ورما و همکاران با داده‌های آزمایشگاهی است:

با تطابق داده‌های آزمایشگاهی با مدل ورما و پرس مقدار  $\phi_r$  برابر با ۰/۵۱ و مقدار  $\Gamma$  برابر با ۰/۵۲ به دست آمد. نتیجه‌های این برسنجی مدل ورما و پرس می‌تواند در نرم افزارهای شبیه‌سازی‌های

توسط نمک پر شده است، می‌باشد. ورما و همکاران<sup>(۱)</sup> [۲۴] به کمک مدل تیوب‌های سری وار<sup>(۲)</sup> رابطه‌ی تغییرهای تراوایی به دلیل رسوب نمک را به صورت زیر گزارش کردند:

$$\frac{K}{K_0} = \theta^2 \frac{1 - \Gamma + \frac{\Gamma}{w^2}}{1 - \Gamma + \Gamma \left[ \frac{\theta}{\theta + w - 1} \right]^2} \quad (۶)$$

$$\theta = \frac{1 - S_s - \phi_r}{1 - \phi_r} \quad (۷)$$

در معادله‌های فوق  $1 - S_s$  فضایی از حفره‌ها است که در اختیار سیال‌ها باقی مانده قرار می‌گیرد، پارامتر  $\phi_r$  تخلخلی است که در آن تراوایی صفر می‌شود،  $\Gamma$  طول نسبی حفره‌ها و  $w$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۱) Verma A. et al

(۲) Tube -in- series



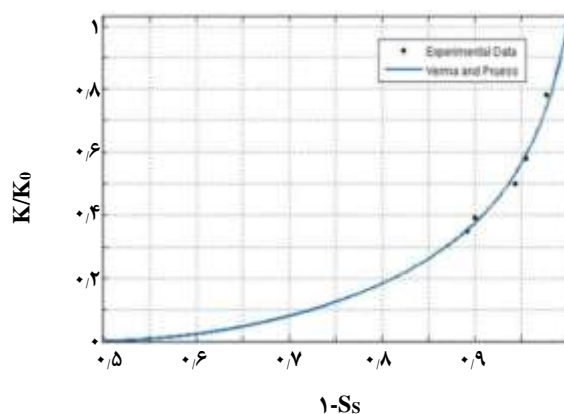
جامدهای محلول دو عامل هم راستا هستند که تقابل این دو عامل با عامل نرخ تبخیر نشان دهنده‌ی تاثیر بیش‌تری این دو عامل بر روی میزان رسوب نمک می‌باشد. تغییرهای شدت جریان تزریق تأثیرهای بیش‌تری نسبت به درجه شوری بر روی پروفیل رسوب دارد. افزایش شدت جریان تزریق باعث رسوب نا همگن تر و افزایش درجه شوری باعث رسوب همگن تر خواهد شد. آنالیز تراوایی پایانی کاهش چشمگیر تراوایی به دلیل رسوب نمک را نشان می‌دهد حتی برای حالتی که میزان کاهش تخلخل ۴۹ درصد باشد تراوایی به صفر می‌رسد. با افزایش شدت جریان تزریق کاهش تراوایی کم‌تری رخ می‌دهد این درحالی است که افزایش درجه‌ی شوری منجر به کاهش تراوایی شدیدتری خواهد شد.

### فهرست نمادها

$\rho$	چگالی
$V$	سرعت
$K$	تراوایی
$\phi$	تخلخل
$M$	جرم اولیه
$\xi$	نرخ خشک شدن
$L$	طول نمونه
$D$	ثابت دیفیوژن
$A$	سطح مقطع
$\Gamma$	طول نسبی حفره‌ها

جدول ۷- داده‌های تغییرهای تراوایی و تخلخل.

شماره آزمایش	$K/K_0$	$\phi/\phi_0$
۱	۰٫۷۸	۰٫۹۷۷
۲	۰٫۵۷	۰٫۹۵۵
۳	۰٫۵	۰٫۹۴۴
۴	۰٫۳۸	۰٫۹۰۱
۵	۰٫۳۴	۰٫۸۹۱



شکل ۸- رابطه‌ی بین تغییرهای تراوایی و تخلخل به دلیل رسوب نمک.

رسوب نمک مانند تاف تو<sup>(۲)</sup> مورد استفاده قرار بگیرد. نکته‌ی چشمگیری که از شکل ۹ می‌توان استنتاج کرد این است که کاهش مقدار جزیی در تخلخل به شدت می‌تواند باعث کاهش تراوایی شود و مطابق شکل ۹ حتی تراوایی در کاهش ۴۹ درصدی تخلخل به صفر می‌رسد.

### نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اثر شدت جریان تزریق گاز کربن دی اکسید و درجه شوری آب سازند بر روی رسوب نمک در فرایند ترسیب گاز کربن دی اکسید چندین تست آزمایشگاهی انجام شد که نتیجه‌های زیر به دست آمد:

اشباع باقی مانده‌ی آب نمک و نرخ تبخیر دو عامل هم راستا هستند که به دلیل تغییر در شدت جریان تزریق می‌تواند بر رسوب نمک مؤثر باشند. با تغییر شوری، اشباع باقی مانده‌ی آب و

## مراجع

- [1] Bachu S., Adams J.J., [Sequestration of CO<sub>2</sub> in Geological Media in Response to Climate Change: Capacity of Deep Saline Aquifers to Sequester CO<sub>2</sub> in Solution](#), *Energy Conversion and Management*, **44**(20): 3151-3175 (2003).
- [۲] صفرزاده م.ا.، مطهری م.، [بهینه‌سازی همزمان ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و ازدیاد برداشت نفت در فرایند تزریق گاز کربن دی‌اکسید با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه](#)، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۳**(۳): ۸۵ تا ۹۷ (۲۰۱۴).
- [3] Liu H.-H., Zhang G., Yi Z., Wang Y., [A Permeability-Change Relationship in the Dryout Zone for CO<sub>2</sub> Injection into Saline Aquifers](#), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **15**: 42-47 (2013).
- [4] Le D., Mahadevan J., [Productivity Loss in Gas Wells Caused by Salt Deposition](#), Society of Petroleum Engineers, **16**(04), In: Paper *SPE-132606-PA*, (2011).
- [5] Van Dorp QT., Slijkhuis M., Zitha PLJ., ["Salt Precipitation in Gas Reservoirs"](#), In: Paper *SPE 122140-MS* Presented at *8th European Formation Damage Conference*, Scheveningen, The Netherlands, 27-29 May (2009).
- [6] Zuluaga E., Monsalve JC., ["Water Vaporization in Gas Reservoirs"](#), In: Paper *SPE 84829-MS* Presented at the *SPE Eastern Regional Meeting*, Pittsburgh, Pennsylvania, 6-10 September (2003).
- [7] Zuluaga E., Munoz N.I., Obando G.A., ["An Experimental Study to Evaluate Water Vaporisation and Formation Damage Caused by Dry Gas Flow Through Porous Media"](#), In: Paper *SPE 68335-MS* Presented at *International Symposium on Oilfield Scale*, Aberdeen, United Kingdom, 30-31 January (2001).
- [8] Peysson Y., [Permeability Alteration Induced by Drying of Brines in Porous Media](#), *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **60**(2), (2012).
- [9] Peysson Y., André L., Azaroual M., [Well Injectivity During CO<sub>2</sub> Storage Operations in Deep Saline Aquifers—Part 1: Experimental Investigation of Drying Effects, Salt Precipitation and Capillary Forces](#), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **22**: 291-300, (2014).
- [10] Bacci G., Korre A., Durucan S., [Experimental Investigation into Salt Precipitation During CO<sub>2</sub> Injection in Saline Aquifers](#), *Energy Procedia*, **4**: 4450-4456, (2011).
- [11] Ott H., Roels S.M., De Kloe K., [Salt Precipitation Due to Supercritical Gas Injection: I. Capillary-Driven Flow in Unimodal Sandstone](#), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **43**, 247-255 ,(2015).
- [12] Azin R., Mehrabi N., Osfouri S., Asgari M., [Experimental Study of CO<sub>2</sub> – Saline Aquifer-Carbonate Rock Interaction During CO<sub>2</sub> Sequestration](#), *Procedia Earth and Planetary Science*, **15**: 413-420, (2015).
- [13] Smith M.M., Sholokhova Y., Hao Y., Carroll S.A., [CO<sub>2</sub>-Induced Dissolution of Low Permeability Carbonates. Part I: Characterization and Experiments](#), *Advances in Water Resources*, **62**: 370-387, (2013).

- [14] Yu Z., Liu L., Yang S., Li S., Yang Y., *An Experimental Study of CO<sub>2</sub>-Brine-Rock Interaction at in Situ Pressure-Temperature Reservoir Conditions*, *Chemical Geology*, **326-327**: 88-101 (2012).
- [15] Zhao D.F., Liao X.W., Yin D.D., *An Experimental Study for the Effect of CO<sub>2</sub>-Brine-Rock Interaction on Reservoir Physical Properties*, *Journal of the Energy Institute*, **88**(1): 27-35, (2015).
- [16] Pruess K., Müller N., *Formation Dry-out From CO<sub>2</sub> Injection into Saline Aquifers: 1. Effects of Solids Precipitation and Their Mitigation*, *Water Resources Research*, **45**(3), (2009).
- [17] Nordbotten J., Celia M., Bachu S., *Injection and Storage of CO<sub>2</sub> in Deep Saline Aquifers: Analytical Solution for CO<sub>2</sub> Plume Evolution During Injection*, *Transport in Porous Media*, **58**(3): 339-360, (2005).
- [18] Racht V.G., *"Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering"*, Vol. **12**, 1st ed., Elsevier Science (2007).
- [19] Peysson Y., Fleury M., Blázquez-Pascual V., *Drying Rate Measurements in Convection- and Diffusion-Driven Conditions on a Shaly Sandstone Using Nuclear Magnetic Resonance*, *Transport in Porous Media*, **90**(3): 1001-1016, (2011).
- [20] Jafari Raad S.M., Azin R., Osfouri S., *Measurement of CO<sub>2</sub> Diffusivity in Synthetic and Saline Aquifer Solutions at Reservoir Conditions: the Role of Ion Interactions*, *Heat and Mass Transfer*, **51**(11): 1587-1595, (2015).
- [21] Huinink H.P., Pel L., Michels M.A.J., *How Ions Distribute in a Drying Porous Medium: A Simple Model*, *Physics of Fluids*, **14**(4): 1389-1395, (2002).
- [22] Duan Z., Sun R., Zhu C., Chou I.M., *An Improved Model for the Calculation of CO<sub>2</sub> Solubility in Aqueous Solutions Containing Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>*, *Marine Chemistry*, **98**(2-4): 131-139, (2006).
- [23] Pruess K., *ECO2M: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO<sub>2</sub>, Including Super- and Sub-Critical Conditions, and Phase Change Between Liquid and Gaseous CO<sub>2</sub>*, *Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, CA 94720* (2011).
- [24] Verma A., Pruess K., *Thermohydrological Conditions and Silica Redistribution Near High-Level Nuclear Wastes Emplaced in Saturated Geological Formations*, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **93**(B2): 1159-1173 (1988).