دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی شیمی (گاز)

مدلسازی دو بعدی اسیدکاری در مخازن کربناته شکافدار

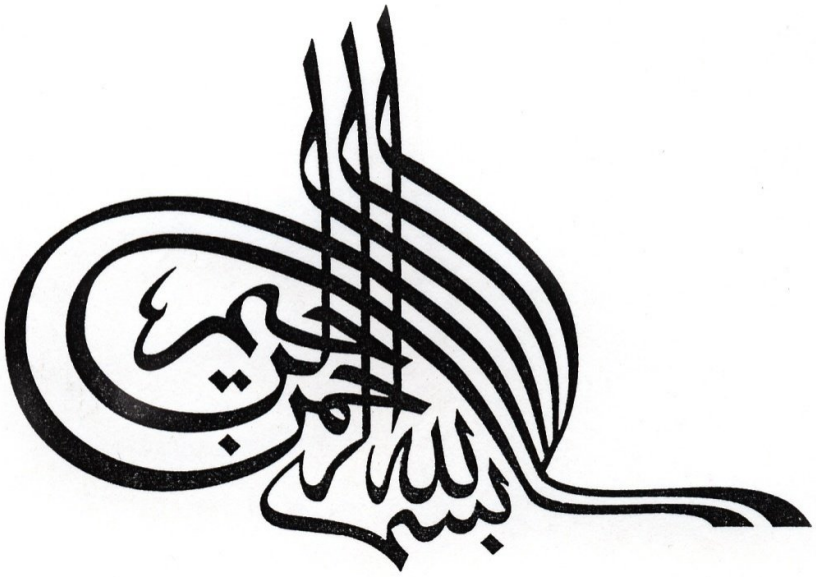
توسط:

مجتبی حسین بیگی

اساتید راهنما:

دکتر فریدون اسماعیل زاده و دکتر داریوش مولا

بهمن ماه ۱۳۹۰


بسم الله الرحمن الرحيم

اظهارنامه

اینجانب **مجتبی حسین بیگی** (۸۸۰۷۲۷) دانشجوی رشته ی **مهندسی گاز** دانشکده ی **مهندسی شیمی، نفت و گاز** اظهارمی کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام.
همچنین اظهارمی کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام ونام خانوادگی: **مجتبی حسین بیگی**

تاریخ و امضا:

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

آنان که ناتوان شدند تا به توانایی برسم...

موهایشان سپید شد تا روسفید شوم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجودم و روشنگر راهم باشند...

سپاسگزاری

(و یزکیهم و یعلمهم الکتاب و الحکمه)

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از هیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگیم مرا قوت قلب بود.

صمیمانه از زحمات اساتید راهنمای دلسوزم جناب آقای دکتر فریدون اسماعیل زاده و جناب آقای دکتر داریوش مولا کمال تشکر و قدردانی را دارم که در تمامی مراحل انجام پایان نامه همواره پشتیبانم بوده و در این راه از هیچ کمکی دریغ نکردند. همچنین از اعضای محترم کمیته پایان نامه، جناب آقای دکتر حجت مهدیار و جناب آقای دکتر عبدالحسین جهانمیری تشکر می کنم. در نهایت از کلیه دوستان و همچنین از خانواده عزیز، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم، سپاسگزاری نمایم.

چکیده:

اسیدکاری یک روش انگیزش برای بهبود بهره وری در مخازن کربناته می باشد. هدف اصلی از اسیدکاری حذف کردن آسیبهای اطراف چاه و کاهش افت فشار سیال می باشد.

هنگامی که یک سازند کربناته با شکاف های طبیعی توسط اسید در فشار زیر فشار شکست سازند مورد عمل قرار گیرد، اسیدکاری اندکی متفاوت با اسیدکاری ماتریس و یا اسیدکاری به همراه ایجاد شکاف می باشد. در این نوع اسیدکاری ممکنست همانند اسیدکاری ماتریس بدون حضور شکاف موجب تشکیل کرم چاله شود و یا اینکه موجب خورده شدن سطوح شکاف همانند اسیدکاری با ایجاد شکاف شود. هدف اصلی از این پژوهش، یافتن نحوه حرکت اسید در ساختار سنگ، مکانیزم حل شدن سنگ و همچنین به دست آوردن میزان نفوذ اسید در شکاف می باشد. در این پژوهش با استفاده از قانون بقاء جرم و انتقال اسید، مجموعه ای از معادلات حاکم بر اسیدکاری مخازن کربناته شکافدار نوشته شده است که پس از حل آن ها می توان تغییرات عرض شکاف، تراوائی شکاف، فاکتور پوسته و همچنین فشار ته چاهی را در حین عملیات اسیدکاری محاسبه می شود. نتایج این پروژه می تواند بر طراحی عملیات اسیدکاری در مخازن شکافدار کمک نماید.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
مقدمه	۱
۱-۱ توصیف تشکیل آسیب	۲
۱-۲ عملیات اسیدکاری	۳
۱-۲-۱ شستشو و تـمیز کردن سنـگ مخزن بوسیـله اسیـد	۴
۱-۲-۲ اسیدکاری با ایجاد شکاف	۵
۱-۲-۳ اسیدکاری ماتریس	۶
۱-۲-۴ اسیدکاری ماتریس شکاف های طبیعی	۸
۱-۳ بررسی اسید های مورد استفاده	۱۰
۱-۳-۱ نوع اسید	۱۰
۱-۳-۲ اسیدهای غیر آلی	۱۱
۱-۳-۲-۱ اسید کلریدریک	۱۱
۱-۳-۲-۲ اسید فلوئوریدریک	۱۴
۱-۳-۳ اسیدهای آلی	۱۴
۱-۳-۳-۱ اسید استیک	۱۵
۱-۳-۳-۲ اندرید استیک	۱۶
۱-۳-۳-۳ اسید سیتریک	۱۶
۱-۳-۳-۴ اسید فرمیک	۱۶
۱-۳-۴ اسیدهای پودرشده و یا کریستال	۱۷

۱-۳-۵ هیبـریـد اسیـدهـا ۱۸
۱-۳-۶ افزایه های اسید ۱۹
۱-۴ استوکیومتری واکنش ۲۲
۱-۵ سینتیک واکنش ۲۳
۱-۶ عوامل موثر در سرعت واکنش اسید ۲۳
۱-۶-۱ فشار ۲۴
۱-۶-۲ دما ۲۴
۱-۶-۳ غلظت ۲۴
۱-۷ انتقال جرم ۲۵
۱-۸ مدل واکنش اسید ۲۶
فصل دوم ۲۸
۲-۱ مروری بر تحقیقات صورت گرفته ۲۸
فصل سوم ۳۸
۳-۱ خواص شکاف ۳۸
۳-۱-۱ تراوائی شکاف ۳۸
۳-۱-۲ تراوائی ذاتی شکاف ۳۸
۳-۱-۳ تراوائی سیستم ماتریس- شکاف ۳۹
۳-۱-۴ طول، هدایت‌پذیری و اثر پوسته معادل در شکاف ۳۹
۳-۲ سیستم‌های هتروژن ۴۲
فصل چهارم ۴۴
۴-۱ مدلسازی اسیدکاری در شکاف های طبیعی ۴۴

۴-۱-۱ موازنه جرم ۴۴
۴-۱-۱-۱ معادلات جریان در سیستم استوانه ای ۴۵
۴-۱-۲ انتقال اسید ۴۶
۴-۱-۳ تغییرات عرض شکاف ۴۷
۴-۱-۴ شرایط اولیه و مرزی شکاف ۴۸
۴-۲ الگوی جریان اسید درون شکاف ۴۹
۴-۳ مدلسازی اسیدکاری ماتریس ۵۰
۴-۴ مدل در مقیاس حفره ۵۴
۴-۵ دبی تزریقی بیشینه اسید ۵۵
۴-۶ محاسبات مربوط به افت فشار سیال در چاه ۵۶
۴-۷ پیش شویی و پس شویی ۵۸
۴-۸ تقسیم بندی مخزن ۵۸
۴-۸-۱ تقسیم بندی مخزن برای شبیه سازی تک چاه ۵۹
فصل پنجم ۶۲
۵-۱ حل عددی معادلات ۶۲
۵-۲ منقطع کردن معادلات فشار و غلظت ۶۲
۵-۲-۱ معادله فشار ماتریس سنگ ۶۲
۵-۲-۲ معادله غلظت ماتریس سنگ ۶۴
۵-۲-۳ معادله فشار مربوط به شکاف ۶۴
۵-۳ روش Upwind ۶۶
۵-۴ روش حل معادلات دیفرانسیلی ۶۷

۵-۵ روش LSOR (Line Successive Overrelaxation) ۶۸
۵-۵-۱ Sweep در جهت x ۶۹
۵-۵-۲ Sweep در جهت y ۷۱
۵-۶ الگوریتم توماس ۷۲
فصل ششم ۷۴
۶-۱ نتایج بدست آمده از مدلسازی ۷۴
۶-۲ بحث و نتیجه گیری ۸۳
۶-۳ پیشنهادات ۸۳
۶-۴ مراجع ۸۴

فهرست جدول ها:

عنوان جدول **صفحه**

جدول (۱-۱): واکنش اسیدها با سنگ آهک در غلظت های مختلف ۱۸

جدول (۱-۲): ثابت های مربوط به سینتیک واکنش اسید کلریدریک با سنگ کربناته ۲۳

جدول (۶-۱): خواص سنگ، اسید و شرایط تزریق ۷۴

جدول (۶-۲): خواص سنگ، اسید و شرایط تزریق برای اطلاعات ورودی به مدل ۷۸

جدول (۶-۳): مقادیر عددی فشار ته چاهی در زمان های مختلف ۸۰

فهرست شکل ها:

عنوان شکل **صفحه**

شکل (۱-۱): نحوه ایجاد شکاف در هنگام اسیدکاری [5] ۵

شکل (۱-۲): نحوه حرکت اسید در یک سنگ ماتریسی [5] ۷

شکل (۱-۳): میزان سنگ آهک حل شده در ۱۰۰۰ گالون اسید کلریدریک [1] ۱۳

شکل (۳-۱): عدد بی بعد موثر چاه ذر یک چاه شکافدار [42] ۴۰

شکل (۴-۱): شماتیک شکاف در چاه ۴۴

شکل (۴-۲): مختصات نقطه در سیستم شعاعی و کارتزین ۵۹

شکل (۴-۳): شماتیک نقطه (i, j, k) در شبیه سازی ۶۰

شکل (۴-۴): بلوک (i, j, k) و بلوک های مجاور در صفحه افقی ۶۰

شکل (۴-۵): بلوک (i, j, k) و بلوک های مجاور در راستای z ۶۱

شکل (۵-۱): اعمال روش Upwind روی سرعت ۶۶

شکل (۵-۲): Sweep در جهت x ۷۰

شکل (۵-۳): Sweep در جهت y ۷۲

شکل (۶-۱): تغییرات غلظت اسید در جهت شکاف برای اسید کلریدریک ۱۵٪ ۷۵

شکل (۶-۲): تغییرات غلظت اسید در جهت شکاف برای مخلوط اسید استیک و اسید فرمیک ۱۳.۹٪ ۷۶

شکل (۶-۳): تغییرات عرض شکاف در جهت شکاف برای اسید کلریدریک ۱۵٪ ۷۶

شکل (۶-۴): تغییرات عرض شکاف در جهت شکاف برای مخلوط اسید استیک و اسید فرمیک ۱۳.۹٪ ۷۷

شکل (۶-۵): تغییرات فاکتور پوسته با زمان در حین عملیات اسیدکاری ۷۸

شکل (۶-۶): تغییرات فشار ته چاهی با زمان ۷۹

شکل (۶-۷): تغییرات عرض شکاف در زمان های مختلف در راستای شکاف ۸۱

شکل (۶-۸): تغییرات غلظت اسید با فاصله از چاه برای HCl ۱۵٪ ۸۲

شکل (۶-۹): تغییرات عرض شکاف با فاصله از چاه برای غلظت های مختلف اسید ۸۲

فهرست نشانه های اختصاری

علایم

a	ظرفیت نسبی
a_v	سطح مخصوص واکنش (ft^{-1})
a_{vo}	سطح مخصوص واکنش در شروع اسیدکاری(ft^{-1})
A_f	سطح مقطع شکاف cm^2
B	عرض شکاف Cm
b_i	فاصله مرکزی جزء ها از مرکز چاه
B	ضریب حجمی مایعات RB/STB
C_f	غلظت اسید
C	غلظت اسید درون شکاف
C_w	غلظت اسید در روی دیواره شکاف
C_s	غلظت اسید در فصل مشترک سنگ و اسید
C_{RD}	هدایت پذیری بی بعد
D	ارتفاع سازند(ft)
D	قطر داخلی Treatment Path
D_m	ضریب نفوذ ($ft.s^{-1}$)
D_{eff}	ضریب نفوذ موثر
E_f	ثابت سرعت واکنش
F	ضریب اصطکاک
F_{CD}	هدایت پذیری شکاف
h	عمق چاه (ft)
I	شمارنده در جهتr
J	شمارنده در جهت θ
K	شمارنده در جهت Z
k_c	ضریب انتقال جرم ($ft.s^{-1}$)
K_r	ثابت سرعت واکنش ($ft.s^{-1}$)
k_s	ثابت سرعت واکنش ($ft.s^{-1}$)
K	تراوایی متوسط مخزن (md)
K_f	تراوایی شکاف(md)
K_t	تراوایی کلی(md)
K_o	تراوایی متوسط اولیه (md)
k_r	تنسور تراوایی در جهت r (md)
k_θ	تنسور تراوایی در جهت θ(md)

k_f	تراوایی شکاف md
k_{eff}	تراوایی موثر md
m_i	جرم ورودی
m_o	جرم خروجی
M_w	جرم مولکولی (lbm/lbmol)
N	بازه زمانی
n_i,n_j	تعداد تقسیم ها در جهت r و θ
P	فشار (psia)
p_e	فشار مخزن (psia)
p_h	فشار هیدرواستاتیکی(psi)
p_w	فشار جریانی ته چاهی (psia)
P_o	فشار فعلی مخزن (psia)
$P_{p,max}$	بیشترین فشار پمپ (psia)
P_f	فشار شکست سنگ مخزن (psia)
$P_{w,max}$	بیشترین فشار جریانی ته چاه (psia)
q_o	دبی تولیدی مایعات در سطح زمین, (STB/D)
q_{max}	بیشترین دبی تزریق ($bbl.day^{-1}$)
R	شعاع (ft)
r_e	شعاع تخلیه (ft)
r_w	شعاع دهانه چاه (ft)
r_s	شعاع منطقه آسیب دیده (ft)
$\tilde{r_w}$	شعاع موثر چاه(ft)
r_{wD}'	شعاع بی بعد موثر چاه
Re	عدد رینولدز
r_p	شعاع حفره (ft)
r_{po}	شعاه اولیه حفره (ft)
S	فاکتور پوسته
S_f	فاکتور پوسته شکاف
Sc	عدد اشمیت
Sh	عدد شروود
T	زمان, (Day)
T,T_r,T_θ	ضرایب معادله فشار در حالت منقطع شده(psi^{-1})
U	سرعت دارسی ($ft.s^{-1}$)
v_r	مولفه سرعت دارسی در جهت r ($ft.s^{-1}$)
v_θ	مولفه سرعت دارسی در جهت θ ($ft.s^{-1}$)
v_f	سرعت سیال درون شکاف(ft/s)
W	عرض شکاف(mm)

x_f	نصف طول شکاف

حروف یونانی

علایم

A	قدرت حل کنندگی اسید (lbm dissolved rock/lbmol reacted acid)
α_f	ثابت فرمول محاسبه فشار شکست
B	توان معادله کارمن-کوزنی
ε/d	زبری نسبی
E	تخلخل
ε_o	تخلخل اولیه
M	ویسکوزیته (cp)
ρ_s	دانسیته سنگ ($lbm.ft^{-3}$)
P	دانسیته سیال ($lbm.ft^{-3}$)
N	سرعت انتقال جرم
N	استوکیومتری واکنش
Ω	پارامتر سرعت دهنده در روش حل LSOR
ζ	ضریب شکنندگی
η	کسر نفوذپذیری

فصل اول – مقدمه

استحصال نفت و گاز از مخازن در بسیاری از موارد بدلیل آسیب های وارده به سازند و کاهش نفوذ پذیری در محدوده نزدیک چاه، از حد مطلوب پائین تر آمده و از جریان نفت بدرون چاه کاسته می شود. آسیب سازند که در واقع بر هم خوردن شرایط طبیعی طبقات نفتی است، علاوه بر تاخیر در تولید و افزایش هزینه ها، باعث متروک شدن زودرس چاهها می شود.

جهت رفع این مشکلات و افزایش تولید بیشتر معمولاً از روش‌های تحریک چاه استفاده می‌شود. یکی از راه‌های موثر افزایش برای تولید چاه، اسیدکاری پوسته چاه می‌باشد. این عملیات در مورد مخازن کربناته بسیار رایج بوده و در حال حاضر در حال انجام می‌باشد. اولین بار در سال ۱۸۹۵ تزریق اسید به چاه‌های کربناته، جهت بهبود و افزایش میزان تولید، به عنوان ایده‌ای نو مطرح شد. در آن زمان دو گونه اسید کلریدریک و اسید سولفوریک به عنوان گزینه‌های قابل استفاده مطرح شدند. اما این ایده بخاطر میزان خوردگی بسیار بالای این اسیدها با شکست روبرو شد. چرا که به خاطر خورندگی بالای اسید سولفوریک و اسید کلریدریک، وسایل سرچاهی خورده می شدند. تلاش بعدی جهت این کار در سال ۱۹۲۵ و ۱۹۳۰ صورت گرفت.

بیشتر مخازن نفت و گاز جهان از نوع مخازن کربناته آهکی[1] و دولومیتی[2] می‌باشند. سازندهای کربناته در حدود ۳۵٪ کل مخازن دنیا را تشکیل می‌دهند. این مخازن در اکثر نقاط نفت خیز دنیا و به طور مشخص در خاورمیانه، آسیای مرکزی، آمریکای شمالی و اروپای شمالی یافت می‌شوند. از ویژگی‌های این مخازن می‌توان به استحکام مکانیکی بالا و حلالیت بالای سنگ در اسید اشاره کرد. البته مخازنی با ساختار ترکیبی، شامل کربناته آهکی، دولومیتی و سیلیسی

1-$CaCO_3$
2-$CaMg(CO_3)_2$

وجود دارد. تنها تفاوت عمده در این ساختارها، سرعت و مکانیزم اسید در واکنش با سنگ می‌باشد. مخازن ماسه‌سنگی نیز به عنوان گروه دیگری از مخازن، شامل ذرات کوارتز و دی اکسید سیلیکون[1] می‌باشد.

اهمیت جلوگیری از آسیب سازند باعث شد تا اولین سمپوزیم آسیب سازند توسط جامعه مهندسین نفت در فوریه ۱۹۷۴ تشکیل شود. بعد از آن یک کمپانی در گلف کاست با کوششهای خود در بهبود تکنیکهای جلوگیری از آسیب سازند توانست شاخص بهره دهی را از ۲ به ۲۰ برساند. کمپانی دیگری نیز با بهبود تکنیکهای تکمیل چاه، تولید را ۵۰۰۰ از به ۱۱۰۰۰ بشکه در روز رساند.

۱-۱ توصیف تشکیل آسیب

آسیبها بسته به نحوه تشکیل آن به دو دسته طبیعی و القائی تقسیم‌بندی می‌شوند.

آسیبهای طبیعی معمولاً به خاطر تولید از مخزن به وجود می‌آیند. آسیبهای القائی نیز به خاطر انجام عملیاتهای خارجی بر روی چاه از جمله حفاری، تکمیل چاه، تعمیر چاه، انگیزش چاه و یا عملیات تزریق بوجود می‌آیند.

آسیبهای طبیعی شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- مهاجرت ذرات ریز

۲- تورم گل[2]

۳- رسوبات ایجاد شده از آب

۴- رسوب مواد آلی مانند پارافین، آسفالتین

۵- رسوبات ناشی از ترکیب مواد آلی و غیرآلی

۶- امولسیونها

1-SiO_2
2-Clay Swelling

آسیبهای القاء شده نیز شامل:

۱- بسته شدن توسط ذرات جامد و پلیمرهای موجود در سیال تزریقی

۲- تغییرات خواص ترشوندگی به خاطر سیالات تزریقی در عملیات حفاری

۳- محصولات واکنش با اسید

۴- رسوب آهن

۵-لخته های کاتالیزور آهن

۶- باکتری

۷- بسته شدن سازند توسط آب

۸- ناسازگاری با سیال حفاری

۱-۲ عملیات اسیدکاری

برای طراحی یک چنین عملی بایستی موارد زیر را در نظر گرفت:

۱. انتقال جرم مولکولهای اسید با سطح ماده معدنی و واکنشهای جانبی آن.
۲. تغییر ساختار روزنه ها و شکاف ها : اسیدی که ماده معدنی را در خود حل میکند، موجب تغییرات فیزیکی در ساختار روزنه ها میشود که با اسیدکاری ماتریس، این مکانیسم موجب افزایش تراوایی میشود.
۳. رسوب محصولات واکنش : واکنش ثانویه ای که در اسیدکاری رخ میدهد، به خصوص در ماسه سنگ میتواند خود باعث بسته شدن روزنه ها شود.
۴. محلول اسید تزریق شده میتواند به صورت فیزیکی یا شیمیایی با سیال مخزن واکنش دهد و موجب تغییر در ترشوندگی، توزیع اشباع فاز و رسوب جامدات شود.

۵. تغییرات تراوایی مخزن یا توزیع آسیب.

در یک اسیدکاری موفق، بایستی تمامی نواحی آسیب دیده با اسید در تماس باشد، که برای این کار بایستی تغییراتی در تزریق اسید انجام داد.

عملیات اسید توسط یکی از سه تکنیک زیر انجام می شود:

۱) شستشوی اسیدی

۲) اسیدکاری با ایجاد شکاف

۳) اسیدکاری ماتریس

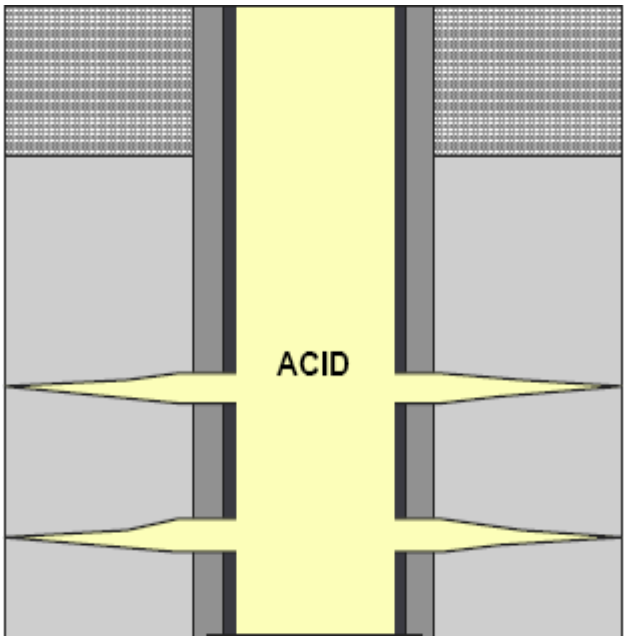
۱-۲-۱ شستشو و تـمیز کردن سنـگ مخزن بوسیـله اسیـد[1]

این سیستم معمولاً جهت شستشو دادن مواداندودشده[2] بر سنگ مخزن در محل تماس با چاه، طرح ریزی می گردد. (البته لازم است که این مواد بتوانند در اسید حل شوند) علت دیگر برای به کار بردن این روش تمیز نمودن مجرای شبکه های به وجود آورده شده[3] بر روی دیواره چاه می باشد. معمولاً در این حالت اسید را در مجاور شبکه ها قرار می دهند و تمیزکردن را به روش به گردش در آوردن سیال داخل چاه صورت می دهند. به علاوه روش های فوق صوردیگری برای به کار بردن اسید موجود است. از بین بردن امولسیون به وجود آمده در چاه، یا بازکردن مجرائی برای خارج کردن آبی که در قسمتی از سنگ مخزن محبوس است از علل دیگر برای به کار بردن اسید می باشند.

1-Acid Washing
2-Mud Cake
3-Perforations

۱-۲-۲ اسیدکاری با ایجاد شکاف

اسیدزنی مخازن شکاف‌دار تنها به مخازن کربناته محدود می شود. در اسیدکاری با ایجاد شکاف، اسید اگر طریق شکاف های طبیعی یا القائی در فشاری معمولاً بیشتر از فشار شکست سازند تزریق می شود. این فشار با غلبه بر تنش‌های سنگ مخزن، در مخزن شکاف ایجاد می کند. با تداوم تزریق اسید، اسید با سنگ واکنش داده و عمق شکاف افزایش می‌یابد. همچنین شکاف‌های بسته‌شده نیز بخاطر نفوذ اسید باز خواهند شد. با توجه به مکانیزم ارائه شده، معمولاً بیان میزان بهبود در تولید پس از اسیدزنی این نوع مخازن غیر قابل پیش بینی می‌باشد.



شکل (۱-۱) نحوه ایجاد شکاف در هنگام اسیدکاری[5]

توجه به این نکته لازم است که عمل ایجاد ترک با استفاده از سیالات دیگر غیر از اسید هم انجام می گیرد ولی استفاده از اسید موجب خوردگی سنگ و ایجاد دندانه روی سطح شکاف ها می شود.