

بهینه‌سازی زاویه‌بندی در الگوی مشبک کاری مارپیچی منفرد در مخازن هیدروکربنی

علی شیخ‌الاسلام^۱، سید محمداسماعیل جلالی^{۱*}، احمد رمضان‌زاده^۱ و حسن شجاعی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- اداره مهندسی زمین‌شناسی، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

چکیده

جداره‌گذاری و مشبک کاری آن، به دلیل ایمنی اجرا و مقرون‌به‌صرفه بودن یکی از بهترین روش‌های تکمیل چاه در مخازن محتمل به ماسه‌زایی به‌شمار می‌آید. در طراحی آرایش مشبک کاری تعداد شلیک در هر فوت به‌طور معمول با حجم تولید هیدروکربن مورد نیاز تعیین می‌شود. در نتیجه بهینه‌سازی زاویه‌بندی (Phasing) برای پیش‌گیری از هم‌پوشانی نواحی آسیب‌دیده اطراف حفره‌های مجاور و کاهش برهم‌کنش آن‌ها یکی از اصلی‌ترین پارامترهای طراحی است. با توجه به عدم محدودیت و سادگی ایجاد الگوی مشبک کاری مارپیچی یکنواخت منفرد (Single Helical Pattern) نسبت به الگوهای دیگر، در این مطالعه با تمرکز بر کمترین فاصله بین حفره‌های مجاور (Perforation-to-Perforation Spacing) حاصل از زاویه‌بندی‌های مختلف در این الگو و کدنویسی روابط در محیط پایتون به‌روش جستجوی فراگیر (Brute-Force Search Approach)، به بررسی بهترین زاویه‌بندی‌ها برای تعداد ۶، ۹ و ۱۲ شلیک در هر فوت در سه قطر چاه مرسوم پرداخته شده است. در نظر گرفتن بیش از سه دور حفره مشبک کاری (Wrap) متوالی در تعیین زاویه‌بندی بهینه و همچنین تأثیر توأمان پایداری حفره‌های مشبک کاری و توزیع یکنواخت جریان در اطراف چاه در کاهش احتمال ماسه‌زایی، از نوآوری‌های این مطالعه به حساب می‌آیند. توزیع یکنواخت حفره‌های مشبک کاری با تعریف پارامتری به نام امتیاز تشابه متساوی‌الاضلاع (Equilateral Likeness Score) صورت گرفته است به‌طوری‌که کمترین مقدار آن بیان‌گر یکنواخت‌ترین حالت توزیع حفره‌های مجاور است. زاویه‌بندی‌های بهینه با الهام از دو دیدگاه مختلف؛ بیشترین اندازه مقدار فاصله‌بندی (Spacing) بین حفره‌ها و بیشترین اندازه مقدار زاویه‌بندی ممکن تعیین شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از تئوری ارائه‌شده و تئوری‌های پیشین نشان از امکان تفاوت زیاد اندازه مقدار زاویه‌بندی‌های تعیین‌شده در برخی از تراکم‌های شلیک دارد. اندازه زاویه‌بندی‌های بهینه برای تراکم‌های شلیک پیش‌گفته، در چاه با قطر $4\frac{1}{8}$ in، به ترتیب، ۱۲۷، ۱۳۰ و 97° در چاه با قطر $6\frac{1}{8}$ in، به ترتیب، ۱۳۰، ۹۷ و 143° و در چاه با قطر $8\frac{1}{2}$ in، به ترتیب، ۹۷، ۱۴۳ و 77° برآورد شده‌اند.

کلمات کلیدی: ماسه‌سنگ ضعیف، تولید ماسه، مشبک کاری، الگوی مارپیچی یکنواخت منفرد، بهینه‌سازی زاویه‌بندی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: jalalisme@gmail.com

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2024.5360.3387)

مقدمه

تولید ماسه یکی از چالش‌های مهم تولید از مخازن هیدروکربنی به حساب می‌آید که بر مباحث فنی، به‌خصوص اقتصادی، ایمنی و زمان رسیدن به بیشینه تولید تأثیر به‌سزایی دارد [۱]. روش‌های مواجهه با مخازن ماسه‌سنگی با ظرفیت ماسه‌دهی به‌طور کل به دو دسته پیش‌گیری‌کننده و کنترل‌کننده تقسیم می‌شوند. به بیان ساده، روش پیش‌گیری‌کننده آن‌هایی هستند که با مشبک‌کاری تکمیل می‌شوند. برخی از نکات برای پیش‌گیری از تولید ماسه عبارتند از استفاده از خرج^۱ حفر عمیق (DP)^۲ برای پایداری حفره در زمان تخلیه و افت فشار و فاصله‌بندی^۳ بهتر، زاویه‌بندی^۴ بهینه برای به حداقل رساندن ارتباط داخلی بین نواحی شکسته‌شده اطراف حفره‌های مجاور (کاهش احتمال مچالیدگی) بدون لطمه به نرخ تولید از هر حفره (تراکم شلیک^۵ کافی برای انتقال حداقلی ماسه‌ها)، مشبک‌کاری جهت‌دار^۶ برای بیشترین پایداری حفره‌ها در شرایط تضاد تنشی زیاد و مشبک‌کاری انتخابی^۷ در سازندهایی با ویژگی‌های مقاومتی سنگ متغیر در عمق مختلف که منجر به پوسته^۸ اضافه مرتبط با تکمیل بخشی^۹ می‌شود [۲]. از زمان ابداع مشبک‌کاری در دهه ۱۹۳۰، مطالعات متعددی به‌منظور بررسی تأثیر و بهینه‌سازی عملیات مشبک‌کاری صورت گرفته است [۳]. با طراحی عملیات مشبک‌کاری مناسب، حجم تولید از چاه تکمیل‌شده به‌روش مشبک‌کاری نسبت به‌روش چاه‌باز بیشتر خواهد بود [۴]. به‌طوری‌که اهمیت این موضوع شرکت‌های مهندسی و مشاور مربوطه را به استفاده از برخی نرم‌افزارهای تعبیه‌شده برای آن، از جمله نرم‌افزارهای SPAN و Pipesim محصول شرکت خدمات فنی میادین سلومبرژه^{۱۰}، سوق داده است. عملیات مشبک‌کاری با روش‌های مختلفی انجام‌پذیر است [۵] اما موفقیت آن‌ها به هندسه مشبک‌کاری بستگی دارد [۶]. به‌طور معمول، به چهار ویژگی مشبک‌کاری؛ قطر، طول، زاویه‌بندی و تراکم شلیک حفره‌ها هندسه مشبک‌کاری گفته می‌شود

[۷]. توان اجرای مشبک‌کاری برپایه ویژگی‌های بهینه برآوردشده در طراحی‌ها از شرایط موجود، از جمله حضور یا عدم حضور دکل، ویژگی‌های ادوات سرچاهی و رشته تکمیلی و محدودیت‌های درون‌چاهی و ابزارهای موجود، اثرپذیر است و اجرای موفق آن مطابق با تئوری‌های ارائه‌شده، در شرایط مختلف، به تجربه کارفرمایان و مجریان با سابقه بستگی دارد [۸]. از طرفی ویژگی‌های هندسی حفره‌ها ممکن است از تراکم‌های شلیک تأثیرپذیر باشند به‌طوری‌که افزایش تراکم‌های شلیک موجب کاهش بازدهی تفنگ‌های با تراکم‌های شلیک زیاد شود [۹]. حصول بهترین نتیجه نیازمند بررسی تمامی چالش‌ها به‌صورت موردی در کنار یکدیگر است. در مطالعه شیخ‌الاسلام و همکاران، با در نظر گرفتن اثر مقیاسی در تعیین مقاومت سنگ و بررسی پایداری یک حفره از لحاظ پیش‌گیری از تولید ماسه، با تعریف زاویه‌های MSDA^{۱۱} و CPOA^{۱۲} راهکاری برای انتخاب روش مشبک‌کاری جداره چاه‌های قائم و مایل یا افقی در سازندهای ماسه‌سنگی ضعیف ارائه شده است. به‌طوری‌که، در رژیم گسلس نرمال، استفاده از الگوی مشبک‌کاری غیرجانغی^{۱۳} با تراکم شلیک زیاد^{۱۴} با استفاده از خرج‌های DP و مشبک‌کاری جهت‌دار با الگوی جانغی ضربدری^{۱۵} برپایه زاویه برآوردشده CPOA در صورت توانمندی در تمیزکاری نخاله‌های مشبک‌کاری^{۱۶}، به‌ترتیب، برای زاویه‌های انحراف‌چاه کمتر و بیشتر از مقدار برآوردشده MSDA توصیه شده است [۱].

1. Shaped Charge or Perforating Charge

2. Deep Penetrating, DP

3. Spacing

4. Phasing

5. Shot Density

6. Oriented Perforating

7. Selective Perforating

8. Skin

9. Partial Penetration

10. SchLumBerger (SLB)

11. Minimum Safe Deviation Angle, MSDA

12. Critical Perforation Orientation Angle, CPOA

13. Non-Staggered

14. High Shot Density, HSD

15. X-shape Staggered

16. Perforating Debris

شکستگی‌های کوچکی در اثر موج شوک ناگهانی ایجاد خواهند شد [۱۶]. بررسی چاه جداره‌گذاری و مشبک‌کاری‌شده (CCP)^۵ مؤید آشفستگی محدود میدان تنشی اطراف حفره‌ها در دیواره چاه است [۱۷]. ژانگ و همکاران با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به احتمال تخریب و تولید ماسه در صورت هم‌پوشانی در نواحی تنشی اطراف یک حفره با حفره‌های مجاور اشاره کردند [۱۸]. شدت این هم‌پوشانی به تراکم خرج^۶ (قطر چاه و زاویه‌بندی و تراکم شلیک حفره‌ها) بستگی دارد و راحت‌ترین راه برای مشاهده آن ترسیم دیواره چاه روی صفحه دوبعدی و بررسی فاصله بین حفره‌های مجاور (PPS)^۷ در شرایط مختلف است (شکل ۱) [۱۰]. در صورت نبود آسیب‌های حاصل از حفاری و تکمیل چاه، اثر زاویه دورانی و تراکم شلیک بسیار ناچیز است [۲۰]. با این‌همه عدم آسیب امکان‌پذیر نبوده و تنها کاهش آن ممکن است. ضخامت CZ معمولاً در حدود ۰/۲۵ in تا ۰/۵ in است [۲۱] که تا ۱ in هم گزارش شده است [۲۲]. برپایه آزمایش کردوک و همکاران، ضخامت CZ را می‌توان در طول حفره تقریباً ثابت و برای ماسه‌سنگ‌ها به‌طور میانگین در حدود ۰/۵ in در نظر گرفت [۲۳]. در سنگ‌های ضعیف، اندازه مقدار PPS سه تا چهار برابری نسبت به اندازه قطر میانگین حفره‌ها را می‌توان معیاری برای پیش‌گیری از شکست بین حفره‌ها در نظر گرفت [۲۴]. در نتیجه هر چه قطر حفره‌ها کمتر باشد، طراحی چیدمان آن‌ها برای تراکم‌های شلیک زیاد از لحاظ پیش‌گیری از برهم‌کنش نواحی آسیب‌دیده اطراف آن‌ها ساده‌تر خواهد بود.

در این مطالعه، در ادامه مطالعه آن‌ها، به بهینه‌سازی زاویه‌بندی حفره‌ها برپایه قطرهای مرسوم چاه در مخازن هیدروکربنی و تراکم‌های شلیک انجام‌پذیر در ایران برای عملیات مشبک‌کاری چاه قایم با الگوی مشبک‌کاری غیرجناغی به‌صورت مارپیچ یکنواخت منفرد^۱ پرداخته شده است به‌طوری‌که با تمرکز بر سازندهای ضعیف ماسه‌سنگی پیشنهادهایی برای انجام این عملیات به‌منظور پیش‌گیری از تولید ماسه ارائه شده است. در ادامه این تحقیق، استفاده از واژه «حفره» به «حفره مشبک‌کاری‌شده» اشاره دارد.

مروری بر مطالعات پیشین

برای تعیین توان تولید کل در مشبک‌کاری، کارآمدی یک حفره باید مشخص باشد تا با ترکیب زاویه‌بندی و تراکم شلیک، بهره‌وری مشبک‌کاری مشخص شود [۱۰]. یکی از اولین مطالعات معتبر در تعیین بهره‌وری مشبک‌کاری که در برخی از شبیه‌سازها قرار داده شده است، نمودار محاسباتی لوکه برای پیش‌بینی ضریب پوسته است که محدود به اندازه‌های خاصی از زاویه‌بندی، تراکم شلیک و قطر حفره است. [۱۱]. مقایسه نتایج نمودار لوکه با مدل شبه‌تحلیلی کاراکاس و طارک [۱۲]، بیان‌گر نتایج خوش‌بینانه این نمودار است [۱۰]. برخی آزمایش‌های آزمایشگاهی روی سازندهای با مقاومت متوسط [۱۳] نشان از ایجاد ناحیه فشرد (CZ)^۲ و ناحیه ضعیف (WZ)^۳ در اثر امواج شوک حاصل از مشبک‌کاری دارد. CZ معمولاً در حالت UBD^۴ و پس از جریان خارج می‌شود. ناحیه ضعیف حاوی مقدار چشم‌گیری از ذرات ریز ایجادشده با موج شوک مشبک‌کاری است که حتی با شکسته شدن سیمان این ناحیه، به‌دلیل وجود تنش باقی‌مانده و مقاومت باقی‌مانده کم در اطراف حفره باقی می‌ماند [۱۴]. با مشبک‌کاری تقریباً تمامی اتصالات بین دانه‌ها در اطراف حفره‌ها در CZ از بین می‌رود [۱۵]. در واقعیت علاوه‌بر شکست اتصالات بین‌دانه‌ای، در دانه‌ها نیز

1. Single Helical (\approx Uniform Spiral) Pattern (Helix)

2. Crushed Zone or Compacted Zone, CZ

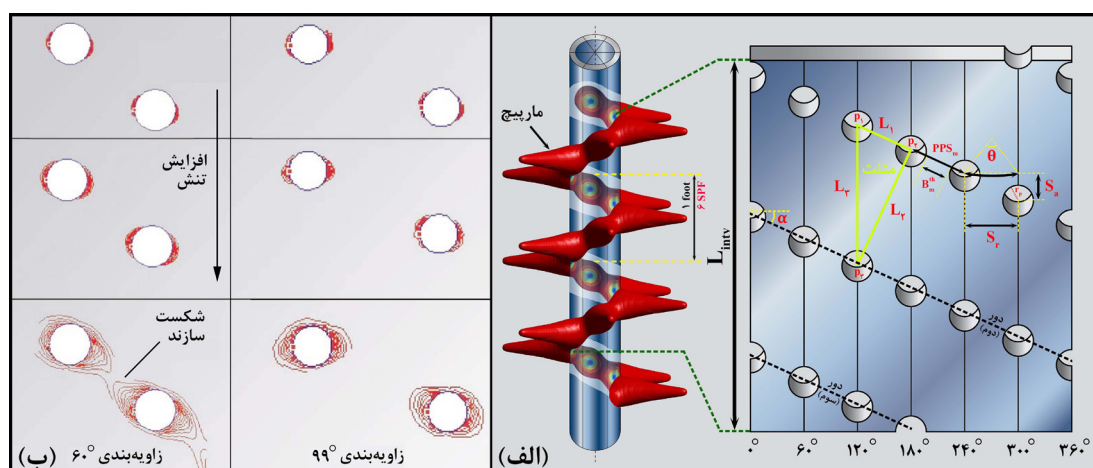
3. Weakened Zone, WZ

4. UnderBalanced Drilling, UBD

5. Cased, Cemented and Perforated, CCP

6. Charge Density

7. Perforation-to-Perforation Spacing, PPS



شکل ۱ الگوی مشبک کاری مارپیچی یکنواخت منفرد و تأثیر انتخاب زاویه‌بندی بهینه در کاهش احتمال ناپایداری ژئومکانیکی؛ (الف) آرایش دوبعدی حفره‌ها در تراکم شلیک ۶ spf و پارامترهای مشبک‌کاری، (ب) پیوند بین نواحی آسیب‌دیده اطراف حفره‌های مجاور در اثر انتخاب زاویه‌بندی نامناسب [۱۹]

هیدروکربنی نازک را به هم متصل می‌کند. بسیاری از مهندسان به‌عنوان یک قانون سرانگشتی معتقد به قابل مقایسه بودن میزان تولید از چاه باز با چاه تکمیل‌شده با CCP با تراکم شلیک ۴ spf هستند. با این‌همه این تفکر ممکن است به دلیل پیچیده بودن نتایج حاصل در روش‌های مختلف مشبک‌کاری از لحاظ مکانیکی و مؤثر نبودن تمامی حفره‌های ایجادشده، حتی مسدودی برخی از آن‌ها، کاملاً گمراه‌کننده باشد [۲۷]. به‌طوری‌که برپایه مطالعات کیز و اودن [۲۸] و هاشبک [۲۹] در صنعت، تنها حدود ۵۰ تا ۷۰٪ از حفره‌ها کاملاً مؤثر بوده و در طراحی عملیات مشبک‌کاری نیاز به ملاحظه بیشتر دارند. تراکم شلیک به‌طور معمول بین ۱ تا ۲۴ spf است [۲۷] و تا ۲۷ spf نیز در دسترس است [۳۰]. تراکم‌های بیشتر را می‌تواند با مشبک‌کاری چندباره ایجاد کرد [۲۷]. معمولاً در سازندهای ضعیف محتمل به ماسه‌زایی به استفاده از DP با تراکم‌های شلیک زیادتر توصیه می‌شود [۱۴] که به‌عنوان نمونه می‌توان به عملیات موفقیت‌آمیز انجام‌شده در دریای کاسپین با ۲۷ spf اشاره کرد [۲۴]. تراکم‌های شلیک زیاد در چاه‌های قائم با رژیم گسلش نرمال علاوه‌بر کاهش تنش

با توجه به مرسوم بودن استفاده از DP در سازندهای ضعیف ماسه‌سنگی و فرض قطر استاندارد حفره بین ۰/۴ تا ۰/۵ in برای حفره‌ها [۱۴] و معیار اشاره‌شده، مقادیر بیشتر از ۱/۲ تا ۲ in برای PPS ممکن است از تولید ماسه پیش‌گیری کند. از طرفی، ۱ تا ۱/۵ in پیرامون حفره‌ها را می‌توان به‌عنوان ناحیه ضعیف در نظر گرفت [۱۴]، در نتیجه می‌توان مقادیر ۲/۴ تا ۳/۵ in را معیاری دیگر برای فرض حد بحرانی PPS به‌منظور پیش‌گیری از هم‌پوشانی نواحی آسیب‌دیده اطراف حفره‌ها در نظر گرفت. موقعیت نسبی مکان حفره‌ها روی ویژگی‌های جریان تولیدی اثرگذار است [۲۵] به‌طوری‌که در صورت نزدیکی بیش از حد حفره‌های مجاور در نزدیکی سطح‌ماسه‌ای^۱ ممکن است بخشی از سازند که بین آن‌ها قرار دارد (پل^۲) شکسته شده و با ارتباط برقرار کردن بین آن‌ها منجر به تولید ماسه جداشده از آن‌ها شده [۲۶] و مانع جریان تولیدی شود. از طرفی جریان سیال تولیدی با افزایش PPS مسیر طولانی‌تری را برای رسیدن به آن‌ها طی خواهد کرد که موجب کاهش نرخ استخراج خواهد شد. در نتیجه انتخاب زاویه‌بندی بهینه، به‌خصوص در مخازن ماسه‌سنگی ضعیف، در میزان تولید و ایمنی آن بسیار حائز اهمیت است [۲۵]. تراکم شلیک مؤثر علاوه‌بر افزایش مسیرهای جریان تولیدی، لایه‌های

1. Sandface
2. Bridge

شلیک مرسوم spf ۶ از تراکم‌های شلیک ۴ یا spf ۵ استفاده می‌شود [۸]. زاویه‌بندی‌های صفر و 90° ($\pm 45^\circ$)، که به ترتیب با تراکم‌های شلیک ۳ یا ۴ و spf ۶ به کار می‌روند، اولویت‌های بعدی هستند. زاویه‌بندی 72° نیز برای تراکم شلیک spf ۵ مشاهده می‌شود. هر چند تراکم شلیک spf ۱۲ به ندرت در صنعت ایران استفاده می‌شود و در صورت نیاز معمولاً کارفرمایان به منظور به کار گرفتن روش‌های دیگر کنترل‌کننده تولید ماسه، از جمله بسته گراولی^۱، مایل به استفاده از آن با خرج‌های حفره گشاد (BH)^۲ هستند، که موفقیت نهایی عملیات و رسیدن به نتیجه مورد انتظار را چالش برانگیز می‌کند، با این‌همه زاویه‌بندی 135° نیز در برخی کتابچه‌ها برای این تراکم شلیک مشاهده می‌شود. به طور معمول، زاویه‌بندی‌های دیگر، به طور معادل، با جای‌گذاری خرج‌ها در مکان‌های متناظر با مقاطع تورفته تعبیه‌شده روی تفنگ‌ها^۳ برای دیگر تراکم‌های شلیک موجود به کار می‌روند [۸]. به طور معمول تعیین زاویه‌بندی‌های بهینه با روش‌های تحلیلی و عددی برپایه بیشینه اندازه مقادیر ایمن ممکن برای زاویه‌بندی صورت می‌گیرد [۸]. این روش‌گزینش موجب ساده‌تر شدن ساخت ابزار مشبک‌کاری از لحاظ چینش تفنگ‌ها^۴ در کنار یکدیگر در برخی موارد خواهد شد. امروزه روش‌های تحلیلی به طور گسترده‌ای در حال استفاده و بهبود هستند و اغلب با بررسی موقعیت مکانی حفره‌ها در زاویه‌بندی‌های مختلف، زاویه‌بندی متناظر با موقعیتی که کمترین فاصله بین حفره‌های مجاور بیشتر از موقعیت‌های دیگر باشد را به عنوان زاویه‌بندی بهینه انتخاب می‌کنند. نیروی پسار^۵ سیال یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در روش‌های عددی است [۳۱].

قایم، با کاهش بیشتر نرخ جریان از هر حفره نسبت به تراکم‌های شلیک کم، از آسیب به حفره‌ها در اثر جریان غیرداری و نیروی جریان در جداسازی و حمل دانه‌های ماسه می‌کاهد [۱۴]. تراکم شلیک معمولاً قبل از شروع عملیات و برپایه ترکیبات سازنده، نرخ جریان تولیدی مورد انتظار، اندازه خرج‌ها و هندسه چاه مشخص می‌شود [۲۵]. به طوری که با مشخص بودن نرخ تولید مورد نیاز و هندسه تقریبی حفره‌ها، و در نظر گرفتن یک ضریب ایمنی برای آن، با توجه به افت فشارهای مجاز برآورد شده برای جلوگیری از تولید ماسه می‌توان مقادیر مناسبی را برای آن در نظر گرفت [۳۱]. عدم توانمندی در ساخت داخلی تفنگ‌های قابل اطمینان برای تراکم‌های شلیک زیاد، کارفرمایان و تولیدکنندگان را به منظور افزایش نسبت خطر به بازده عملیات مشبک‌کاری، به سمت استفاده و تولید تفنگ‌های با تراکم شلیک کمتر سوق داده است. به طوری که برای ایجاد تراکم‌های شلیک زیاد معمولاً از مشبک‌کاری چندباره یک بازه عمقی استفاده می‌شود [۸]. با این‌همه در سازندهایی که نیاز به ایجاد حفره‌های یکنواخت در سازند است، عدم دقت کافی این نوع مشبک‌کاری کارفرمایان را ناگزیر به درخواست تولید تفنگ با تراکم‌های شلیک زیاد می‌کند. تاریخچه تفنگ‌های استفاده‌شده برای مخزن آسماری در میدان اهواز گویای استفاده مکرر و موفق محصولات شرکت‌های خارجی با تراکم شلیک spf ۱۲ برای سازندهای ماسه‌سنگی ضعیف است. مشاهده برخی از کتابچه‌های محصولات شرکت‌های داخلی اشاره به استفاده از تنها چند زاویه‌بندی مشخص دارد. زاویه‌بندی 60° محبوب‌ترین زاویه‌بندی در بین محصولات داخلی و خارجی است که به طور معمول برای تراکم شلیک spf ۶ مورد استفاده است. با افزایش قطر چاه و در نتیجه تفنگ مورد استفاده، به دلیل استفاده از خرج‌های بزرگ‌تر و گنجایش محدود ابزار، به جای تراکم

1. Gravel Pack, GP

2. Big Hole, BH

3. Scallop

4. Winding

5. Drag

چاه کاهش می‌دهد [۲۵]. این الگوی ایده‌آل به جز برای تعداد کمی از تراکم‌های شلیک غیراستاندارد مجزا، امکان‌پذیر نبوده است. با این‌همه، در حال حاضر برخی از شرکت‌های خدماتی مشبک‌کاری در فراهم‌سازی زاویه‌بندی‌های غیرمعمول توانمند هستند [۱۰]. در واقعیت، به‌دلیل ناممکن بودن ایجاد الگوی ایده‌آل در الگوی مشبک‌کاری ماریپچی یکنواخت منفرد، معمولاً زاویه‌بندی منجر به برابرسازی دو PPS کمتر (الگوی مثلث متساوی‌الساقین منفرجه (IOTP)^۲)، با بیشترین PPS ممکن، بهترین راه حل در نظر گرفته می‌شود [۳۳]. عمده مطالعات انجام‌شده در این زمینه برپایه شرایط مختلف، مانند پیش‌گیری از تولید ماسه و ایجاد شکست، به‌صورت ابداعات ثبتي ارائه شده‌اند [۳۴-۳۸] که در ادامه به برخی از شاخص‌ترین آن‌ها در بهینه‌سازی زاویه‌بندی در الگوی مشبک‌کاری ماریپچی یکنواخت منفرد پرداخته شده است. گروو روشی را برپایه محاسبات ریاضی ساده برای محاسبه زاویه‌بندی بهینه، تنها برپایه دو دور کامل مشبک‌کاری پیرامون چاه^۳، ثبت کرد. در مطالعه ایشان زاویه‌بندی بهینه با مشخص بودن قطر چاه و تراکم شلیک با الگوی مربع برای چینش حفره‌های مجاور با دو PPS برابر و ETP برای چینش حفره‌های مجاور به‌طور کاملاً یکنواخت با PPS‌های برابر محاسبه شد. هر چند به‌کار گرفتن این روش برای الگوهای مشبک‌کاری دیگر پیچیده‌تر از مفاهیم ارائه‌شده به‌نظر می‌رسد، با این‌همه توانمندی روش ارائه‌شده در به‌کار گرفتن الگوهای دیگر و همچنین الگوهای ماریپچی چندگانه از موارد مورد ادعای این روش بوده است [۲۵]. ایده IOTP، اولین بار توسط بهرمن، به‌منظور تعیین زاویه‌بندی بهینه ارائه شد. در این مطالعه، زاویه‌بندی بهینه تنها برپایه بررسی دو دور حفره در سازند در الگوی ماریپچی محاسبه شد.

به‌طوری‌که با توزیع بهینه حفره‌ها، توزیع جریان در اطراف چاه به یکنواخت‌ترین حالت ممکن تبدیل شده و از ایجاد اندازه مقادیر زیاد این نیرو در برخی حفره‌ها نسبت به برخی دیگر جلوگیری می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش زاویه‌بندی، میزان یکنواختی حفره‌ها در پیرامون چاه افزایش می‌یابد. در این صورت، با کنترل و توزیع یکنواخت پارامترهای افت‌فشار و نیروی پसार در حفره‌ها و قرار گرفتن اندازه مقادیر آن‌ها در محدوده مجاز و یا نزدیکی به حد بحرانی آن‌ها، توانمندی در کنترل تولید ماسه افزایش خواهد یافت. اندازه فاصله‌بندی کمتر از ۳ in بین دو حفره هم‌جهت احتمال ایجاد گسیختگی در جداره را زیاد می‌کند. به‌طوری‌که با زاویه‌بندی صفر درجه‌ای ایجاد این گسیختگی‌ها در جداره در شرایط استفاده از HSD با BH محتمل‌تر است. استفاده از زاویه‌بندی‌های غیرصفر درجه‌ای در کاهش احتمال این گسیختگی‌ها مؤثر خواهد بود [۹]. زاویه‌بندی باید به‌طوری انتخاب شود که PPS_{III} بیشینه و آرایش حفره‌ها تا جای ممکن به‌صورت یکنواخت شود به‌طوری‌که زاویه‌بندی بین دو حفره مجاور، به‌منظور جلوگیری از کاهش مقاومت جداره و در نتیجه کاهش احتمال آسیب‌های ناخواسته ناشی از آن، بیشتر از ۱۵° باشد [۳۲]. بهینه‌سازی زاویه‌بندی برای پیش‌گیری از هم‌پوشانی نواحی تنشی اطراف حفره‌ها در تاخیر شروع ماسه‌دهی و افزایش بهره‌وری مفید است. بین تراکم‌های شلیک زیاد برای افزایش توان تولید و کاهش هم‌پوشانی حفره‌های مجاور یک سازگاری وجود دارد [۱۰] به‌طوری‌که با محاسبه فواصل بین حفره‌های مجاور، امکان بهینه‌سازی زاویه‌بندی برپایه هم‌پوشانی حفره‌ها برای هر تراکم شلیک و قطر چاه وجود دارد [۱۹]. ایجاد حفره‌ها با PPS یکنواخت (الگوی مثلث متساوی‌الاضلاع (ETP)^۱ با سه PPS برابر) در جهات مختلف احتمال ادغام حفره‌های مجاور را هم‌زمان با به حداقل رساندن طولانی‌ترین مسیر جریان سیال از سازند به درون

1. Equilateral Triangle Pattern, ETP

2. Isosceles Obtuse Triangle Pattern, IOTP

3. Wrap

شکسته شده در اطراف حفره‌ها در اثر تخلیه‌های بیشتر مخزن را نشان دادند. به طوری که برهم کنش بین حفره‌ها در ۳۳٪ تنش‌های مؤثر کمتر، حاصل از تخلیه یا افت فشار بیشتر، نسبت به زاویه بندی ۶۰° ایجاد می‌شود (شکل ۱-ب) [۱۹]. بهرمن و همکاران تأثیرگذاری حفره‌های دور سوم را در صورت گذر اندازه مقدار مجموع فاصله تقریبی مرکز تفنگ‌ها از دیواره چاه^۱ (ضرب مقدار تراکم شلیک در طول پارامتر شعاعی) از مقدار تقریبی ۴۲ in×spf ممکن دانستند. آن‌ها با تغییر زاویه بندی و محاسبه فاصله چهار حفره مجاور، بهترین زاویه بندی منجر به برابر شدن دو PPS را برپایه انحراف معیار حداقلی به دست آوردند. در این مطالعه دستورالعمل‌هایی برای استفاده از روابط ارائه شده در شرایط قرار گرفتن غیرهم‌مرکز ابزار مشبک کاری با سطح ماسه‌ای سازند و برخی شرایط دیگر مانند استفاده از اسیدکاری در سازندهای کربناته بیان شد. در نتیجه روش ارائه شده به نحوه انتخاب طول پارامتری شعاعی بستگی دارد به طوری که دقت نتایج تا حدودی از آن تأثیرپذیر است. آن‌ها توانمندی روش ارائه شده در به دست آوردن سه PPS با کمترین تفاوت (ETP) را ادعا کردند [۲۶]. مهم‌ترین کارهای انجام شده مرتبط با بهینه سازی زاویه بندی مشبک کاری در الگوی ماریچی یکنواخت منفرد در جدول ۱ آورده شده‌اند.

این مسئله موجب بیش‌برآورد اندازه مقدار زاویه بندی‌های بهینه شد، به طوری که مقادیر برآورد شده در محدوده بیش از ۱۳۰° قرار گرفتند [۳۳]. با توجه به اندازه مقادیر زیاد به دست آمده برای زاویه بندی بهینه و مناسب بودن آن تنها برای دو دور حفره، نتایج حاصل از این مطالعه تنها برای بازه‌های عمقی کم، حدود ۰/۵ ft، مناسب بوده و در عمل توجیه پذیر نیست. در مواردی که تراکم شلیک در الگوی ماریچی بیش از دو دور حفره در سازند ایجاد کند، انتخاب زاویه بندی منجر به بیشترین PPS حائز اهمیت است و ممکن است بهترین انتخاب بین حفره‌ها در سه دور مختلف صورت گیرد. با الهام از این تئوری و توسعه آن، زاویه بندی ۹۹° به جای زاویه بندی مرسوم ۶۰°، که پیش از آن به طور گسترده‌ای در طراحی‌های مشبک کاری مورد استفاده بوده است، در الگوی مشبک کاری ماریچی یکنواخت منفرد برای تراکم شلیک ۶ spf در سازندهای با ظرفیت ماسه‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. به طوری که مقایسه نتایج، کاهش چالش‌های حاصل از تولید ماسه در این سازندها را با زاویه بندی ۹۹° ثابت کرد. ونکیتارامن و همکاران با شبیه سازی عددی رفتار الاستوپلاستیک سنگ در اطراف چاه با قطر ۸^{۱/۲} in برپایه مدل کرنش صفحه‌ای دوبعدی توانمندی این زاویه بندی در پیش گیری از ارتباط بین نواحی

جدول ۱ خلاصه پیشینه مهم ترین مطالعات انجام شده مرتبط با بهینه سازی زاویه بندی مشبک کاری در الگوی ماریچی یکنواخت منفرد

ردیف	محققین	سال	موضوع تحقیق	روش
۱	بهرمن [۳۳]	۱۹۹۵	معرفی IOTP برای بهینه سازی زاویه بندی با قطر چاه و تراکم شلیک مشخص به منظور کاهش هم پوشانی نواحی آسیب دیده اطراف حفره‌های مجاور در دو دور حفره متوالی	IOTP
۲	بهرمن و همکاران [۲۶]	۲۰۰۰	بهینه سازی زاویه بندی با قطر چاه و تراکم شلیک مشخص به منظور کاهش هم پوشانی نواحی آسیب دیده اطراف حفره‌های مجاور در سه دور حفره متوالی	IOTP
۳	ونکیتارامن [۱۹]	۲۰۰۰	اعتبارسنجی روش ارائه شده بهرمن و همکاران [۲۶] با شبیه سازی عددی رفتار الاستوپلاستیک سنگ برپایه مدل کرنش صفحه‌ای دوبعدی	IOTP
۴	گروو [۲۵]	۲۰۲۰	بهینه سازی زاویه بندی با قطر چاه و تراکم شلیک مشخص به منظور کاهش هم پوشانی نواحی آسیب دیده اطراف حفره‌های مجاور و بهینه سازی مسیره‌های جریانی بین آن‌ها	ETP و IOTP

1. Total Wellbore Radius

شده است. برپایه اطلاعات جمع‌آوری‌شده در بخش پیشین، اندازه قطر حفره‌ها مطابق با اندازه قطر استاندارد خرج‌های DP برابر با ۰/۴ in در نظر گرفته شده است. با مشخص بودن تراکم شلیک در الگوی مشبک‌کاری مورد استفاده می‌توان اندازه مقدار فاصله‌بندی را به‌دست آورد [۲۵]:

$$S_a = \frac{12}{SPF} \quad (1)$$

با مشخص شدن اندازه مقدار فاصله‌بندی، مختصات حفره‌ها را می‌توان برای هر زاویه‌بندی دلخواه محاسبه کرد:

$$x_n = \frac{\pi r_w ((n\theta) \bmod 360)}{180} \quad (2)$$

$$y_n = n S_a \quad (3)$$

که در آن $n \in \mathbb{Z} \cap [0, L_{inv}/S_a]$ هستند. پس از به‌دست آوردن مختصات حفره‌ها، با محاسبه فاصله بین تمامی آن‌ها از طریق رابطه اقلیدس^۴، رابطه ۴، و مقایسه اندازه آن‌ها، کمترین فاصله به‌عنوان PPS_m و ضلع متناظر با آن به‌عنوان ضلع کوچک مثلث بهینه در نظر گرفته می‌شود.

$$L_{lm} = \sqrt{(x_m - x_l)^2 + (y_m - y_l)^2} \quad (4)$$

با ترکیب دو حفره سازنده ضلع کوچک مثلث بهینه با دیگر حفره‌ها و ایجاد مثلث‌های مختلف برپایه آن‌ها، امتیاز تشابه متساوی‌الاضلاع (ELS)^۵ برای هر مثلث، طبق رابطه ۶، از محاسبه مجموع تفاضل مقدار طول ضلع‌های آن مثلث از میانگین طول آن‌ها به‌دست می‌آید. با مقایسه بزرگی اندازه مقدار ELS‌های متناظر با مثلث‌های مختلف برای هر زاویه‌بندی، کمترین ELS ممکن برای آن زاویه‌بندی به‌دست می‌آید.

$$L_{avg} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (5)$$

$$ELS = |L_1 - L_{avg}| + |L_2 - L_{avg}| + |L_3 - L_{avg}| \quad (6)$$

با مقایسه بزرگی اندازه مقادیر کمترین ELS‌های به‌دست آمده برای زاویه‌بندی‌های مختلف، برای

هر چند تاکنون مطالعات مختلفی در مورد بهینه‌سازی زاویه‌بندی در عملیات مشبک‌کاری صورت گرفته است، لیکن تعیین زاویه‌بندی بر روی بیش از سه دور حفره متوالی با در نظر گرفتن هر دو عامل افزایش حداکثری فاصله بین حفره‌های مجاور و یکنواختی توزیع حفره‌ها، صورت نگرفته است. در نظر گرفتن این موارد علاوه بر رفع ضعف احتمالی نتایج پیشین برای برخی از تراکم‌های شلیک، امکان تعیین زاویه‌بندی‌های مؤثرتر را برپایه هر دو تأثیر؛ آشفتگی تنشی اطراف حفره‌ها و نیروهای جریانی سیال مخزنی، فراهم می‌کند.

روش کار

به‌دلیل اهمیت ایجاد اندازه حفره‌های یکنواخت در مخازن محتمل به تولید ماسه [۳۹] و معمول بودن نحوه چیدمان خرج‌ها به‌صورت تک‌مارپیچ^۱، الگوی مشبک‌کاری غیرجناغی مارپیچی یکنواخت منفرد به‌جای الگوهای غیریکنواخت^۲ به‌منظور بهینه‌سازی زاویه‌بندی استفاده شده است. در این مطالعه، با استفاده از کدنویسی مفاهیم آماری و ریاضی به‌روش جستجوی فراگیر^۳ در محیط پایتون، رویکردی نوآورانه برای ارزیابی درجه تشابه ترکیب هر سه نقطه (مرکز حفره) با مثلث متساوی‌الاضلاع در مجموعه حفره‌ها ارائه شده است. اندازه قطر چاه و تراکم شلیک دو پارامتر مورد نیاز برای محاسبه اندازه مقدار فاصله‌بندی و جانمایی حفره‌ها هستند که قبل از شروع محاسبات باید به‌عنوان ورودی‌های مسئله تعیین شوند. در این مطالعه اندازه مقادیر آن‌ها با توجه به عملیات مرسوم و امکان‌سنجی اجرا، که در بخش قبل به آن اشاره شد، در ایران صورت گرفته است به‌طوری‌که مقادیر $4^{1/8}$ ، $6^{1/8}$ و $8^{1/8}$ برای اندازه قطر چاه و مقادیر ۶، ۹ و ۱۲ spf برای تراکم‌های شلیک در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، در این مطالعه مکان قرارگرفتن ابزار مشبک‌کاری در وسط چاه (هم‌مرکز، دیواره چاه صاف)، طول حفره‌ها برابر و شکل آن‌ها یکنواخت در نظر گرفته

1. Single Helix
2. Spiral Pattern
3. Brute-Force Search Approach
4. Euclidean Distance
5. Equilateral Likeness Score, ELS

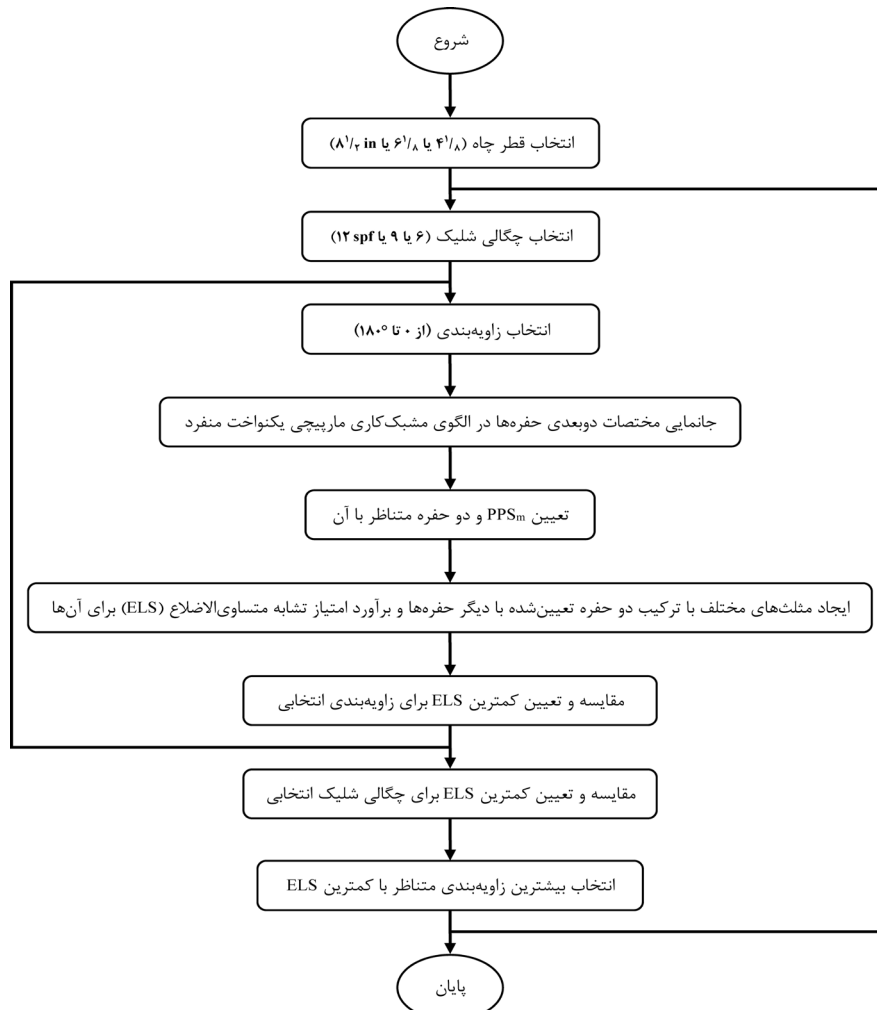
است. شکل ۲ روندنمای مراحل انجام این طرح را نشان می‌دهد. با فرض یکسان بودن قطر حفره‌ها، برای هر زاویه‌بندی، کمترین ضخامت پل از روی اندازه مقدار PPS_m متناظر با ELS_m در آن زاویه‌بندی قابل محاسبه خواهد بود:

$$B_m^{th} = PPS_m - 2 r_p \quad (7)$$

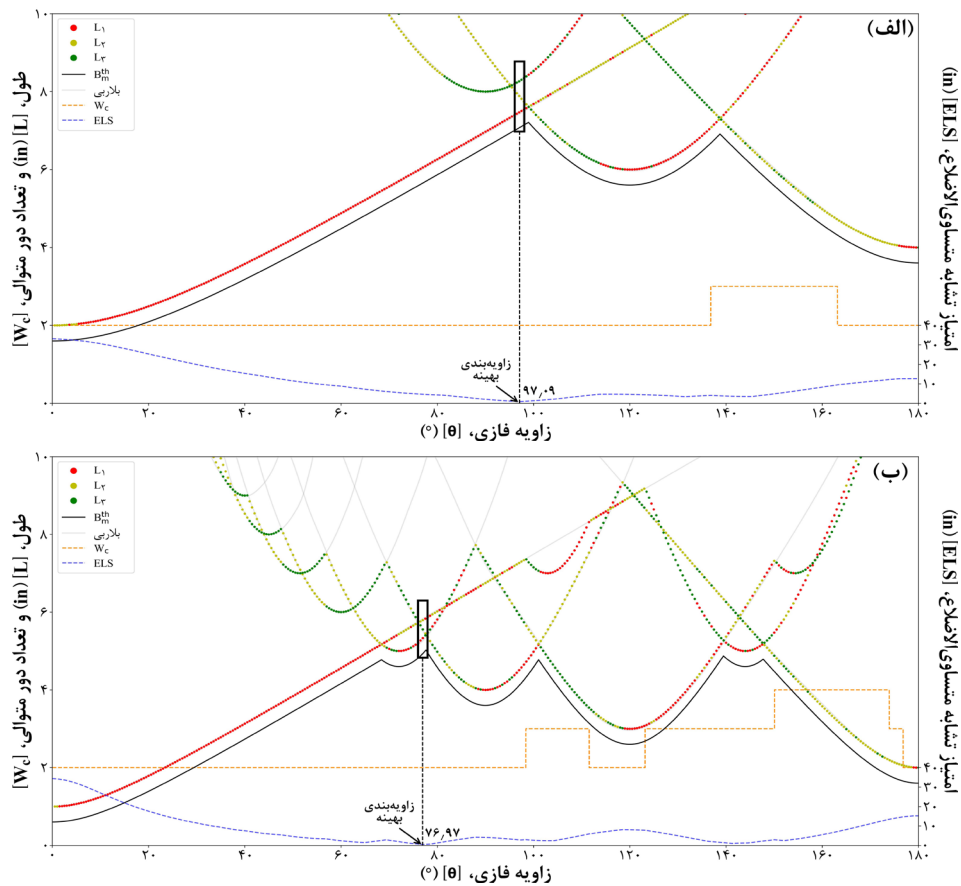
نتایج و بحث

نحوه اجرای محاسبات و تعیین زاویه‌بندی بهینه با ETP در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اندازه زاویه‌بندی‌های مختلف تا 180° ، نزدیک‌ترین شکل مثلث‌های ایجادشده به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع با کمترین ELS ممکن پیدا شده و طول ضلع‌های آن مثلث روی شکل ترسیم شده‌اند.

هر اندازه قطر چاه، زاویه‌بندی‌های متناظر با کمترین اندازه مقدار ممکن ELS_m به‌عنوان بهترین زاویه‌بندی‌ها تعیین می‌شوند. در این مطالعه پایه هر دو روش تحلیلی و عددی، که در مقدمه به آن‌ها اشاره شد، مد نظر قرار گرفته است. اولویت اول انتخاب زاویه‌بندی بهینه در این مطالعه، پایه روش‌های تحلیلی است که در آن تئوری IOTP به‌رمن و همکاران [۲۶] نیز ارضا می‌شود. در شرایط برابر بودن ELS_m در دو زاویه‌بندی مختلف، با توجه به پایه روش‌های عددی، زاویه‌بندی با اندازه مقدار بیشتر به‌عنوان زاویه‌بندی بهینه نهایی انتخاب شده است. با این‌همه، در روش ارائه‌شده علاوه‌بر شرط برابر بودن اندازه مقادیر ELS_m ، شرایط دیگر با تفاوت‌های تعیین‌شده مجاز اختیاری بین اندازه مقادیر ELS_m نیز انجام‌پذیر



شکل ۲ روندنمای مراحل انجام کار



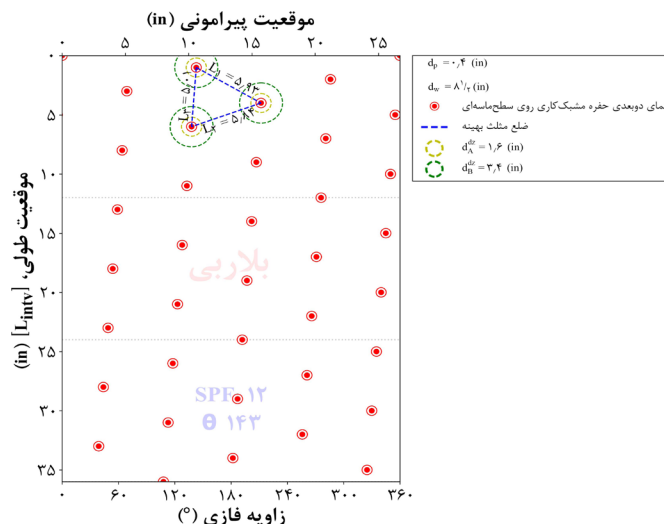
شکل ۳ اثر زاویه‌بندی بر فاصله بین حفره‌ها در بهترین مثلث‌های متناظر با هر زاویه‌بندی در چاه با قطر $in^{1/2}$ ۸؛ الف) تراکم شلیک ۶ spf و ب) تراکم شلیک ۱۲ spf

که روندها همدیگر را قطع می‌کنند نشان از تشکیل مثلث متساوی‌الساقین دارد، به طوری که اگر اندازه مقدار طول ضلع سوم از ناحیه تلاقی آن‌ها بیشتر باشد مثلث ایجادشده منفرجه بوده و تئوری IOTP بهرمن و همکاران ارضا شده است. پس از ترسیم کامل نمودار ELS و ضلع‌های بهترین مثلث‌های متناظر زاویه‌بندی‌های مورد بررسی، زاویه‌بندی متناظر با کمترین مقدار ELS، زاویه‌بندی بهینه برای چاه مورد بررسی با تراکم شلیک انتخاب شده است. نمودار ELS با خط‌چین آبی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، مستطیل مشکی‌رنگ ترسیم‌شده در این شکل، نزدیکی طول ضلع‌های مثلث ایجادشده متناظر با زاویه‌بندی بهینه به یکدیگر را نسبت به دیگر نقاط تمیز داده است. به‌منظور مقایسه نتایج ETP با نتایج بلاربی، داده‌های محاسبه‌شده توسط ایشان نیز از روی نمودارها به‌طور تقریبی استخراج شده و با رنگ طوسی روشن در پس‌زمینه شکل ۳ ترسیم شده‌اند.

موقعیت مکانی ضلع‌های L_1 ، L_2 و L_3 نسبت به یکدیگر، با شروع از بالاترین حفره، به‌صورت ساعت‌گرد و مطابق با آرایش مشبک‌کاری ترسیم‌شده در شکل ۱-الف در نظر گرفته شده‌اند. پایداری پل‌های بین حفره‌ها در روش ارائه‌شده بهرمن و همکاران با کمترین طول ضلع مثلث رابطه مستقیم دارد [۲۶]، به طوری که نزدیک‌ترین حفره‌ها در کاهش تنش شرکت دارند و ممکن است در جهات مختلف باشند [۱۴]. در نتیجه PPS_m محاسبه‌شده برای هر زاویه‌بندی نشان‌گر میزان پایداری حفره‌ها در آرایش مشبک‌کاری استفاده‌شده است. این پارامتر برابر با کمترین مقدار طول ضلع‌های بهترین مثلث متناظر با هر زاویه‌بندی است که در شکل ۳ قابل مشاهده است. روند تغییرات این پارامتر در این شکل از روی خط ممتد مشکی‌رنگ ترسیم‌شده معرف کمترین ضخامت پل متناظر با آن به‌طور متمایزی قابل تشخیص است. با ترسیم طول ضلع‌های بهترین مثلث متناظر با زاویه‌بندی‌های مختلف، نواحی

برای ساخت بهترین مثلث‌های متناظر با هر زاویه‌بندی است به نظر می‌رسد نمودارهای محاسبه‌شده بلاری تنها با بررسی دو دور متوالی از حفره‌ها ترسیم شده‌اند و منجر به عدم توانمندی در تعیین صحیح زاویه‌بندی بهینه در این نواحی شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، تئوری‌های برپایه بررسی دو دور متوالی حفره‌ها تقریباً از سال ۱۹۹۷ رد شدند [۱۹] به‌طوری‌که بهرمن و همکاران در مطالعه خود به آن اشاره کردند [۲۶]. بلاری با اینکه از تئوری IOTP بهرمن و همکاران استفاده کرده است باین‌همه تنها برابری دو ضلع را مد نظر قرار داده است و حاده یا منفرجه بودن مثلث را در محاسبات در نظر نگرفته است. به‌منظور بررسی این ادعا، نمای دوبعدی چاه مشبک‌کاری‌شده با زاویه‌بندی بهینه تعیین‌شده توسط وی در شکل ۴ ترسیم شده است. آرایش حفره‌ها در این شکل در سه فوت از چاه به نمایش در آمده است به‌طوری‌که بازه‌های یک‌فوتی با نقطه‌چین‌های به رنگ طوسی کم‌رنگ از یکدیگر تمیز داده شده‌اند. با انتخاب یکی از حفره‌ها در راس شکل، مابقی آن‌ها در پیرامون چاه با توجه به اندازه مقدار زاویه‌بندی و فاصله‌بندی نشان داده شده‌اند. حفره‌ها به‌صورت دایره قرمز توپر با قطر انتخابی، به‌همراه دایره قرمز دور آن‌ها تنها برای نمایش بعد مشبک‌کاری، روی شکل نشان داده شده‌اند.

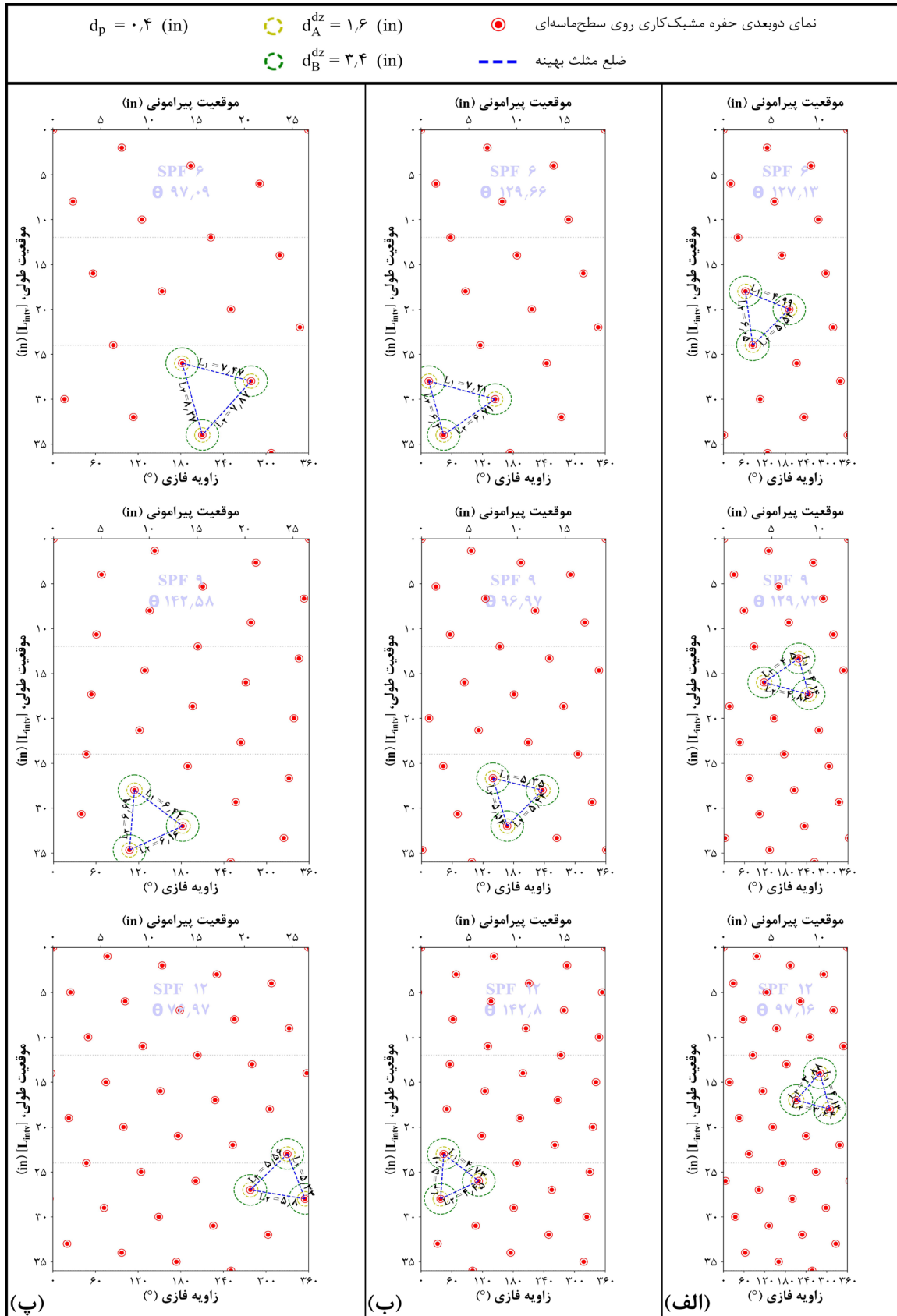
مقایسه نتایج حاصل از روش ارائه‌شده در این تحقیق با نتایج IOTP ارائه‌شده توسط ونکیتارامن و همکاران و بلاری برای تراکم‌های شلیک ۶ و spf ۱۲، برای چاه با قطر $8\frac{1}{2}$ in، بیان‌گر امکان تفاوت چشم‌گیر آن‌ها در تعیین زاویه‌بندی بهینه است. همان‌طور که در شکل ۳-الف دیده می‌شود برای تراکم شلیک ۶، اندازه زاویه‌بندی بهینه با ETP حدود 97° به‌دست می‌آید که تنها 2° با مقدار 99° تعیین‌شده توسط ونکیتارامن و همکاران و بلاری تفاوت دارد. این تفاوت برای تراکم شلیک ۱۲ spf در حدود 66° است به‌طوری‌که زاویه‌بندی بهینه 143° که توسط بلاری با IOTP تعیین شده به اندازه حدود 77° با ETP کاهش یافته است (شکل ۳-ب). با توجه به شکل ۳-ب، هر چند در نواحی زاویه‌بندی‌های بین 140° تا 150° زاویه‌بندی بهینه بعدی قرار دارد، باین‌همه نمودار بلاری با نتایج حاصل در این تحقیق متفاوت بوده و نشانه‌ای از بهینه بودن زاویه‌بندی 143° برپایه IOTP وجود ندارد. تفاوت‌های ناچیز موجود بین داده‌های استخراج‌شده و داده‌های محاسبه‌شده در این تحقیق قابل‌چشم‌پوشی است اما تفاوت‌های چشم‌گیری در حدود اندازه زاویه‌بندی‌های بین 100° تا 110° و 170° در سه قوس مختلف طول ضلع‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار خط‌چین نارنجی‌رنگ در این شکل که بیان‌گر تعداد دورهای متوالی مورد نیاز



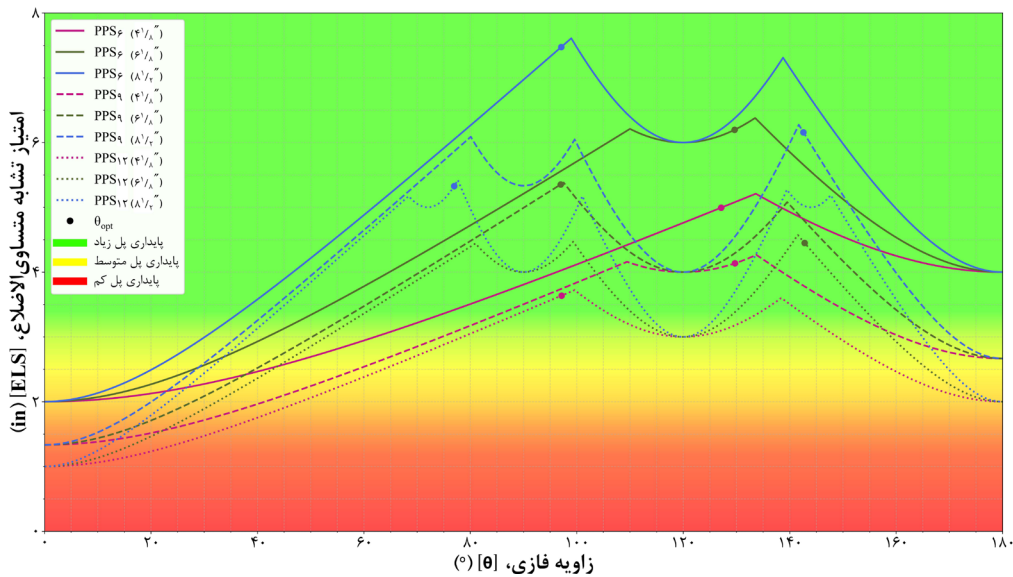
شکل ۴ نمای دوبعدی آرایش حفره‌ها با زاویه‌بندی 143° تعیین‌شده توسط بلاری برای تراکم شلیک ۱۲ spf در چاه با قطر $8\frac{1}{2}$ in

راس‌های تشکیل‌شده برای PPS_m نشان‌گر محل تلاقی طول دو ضلع مثلث‌های متساوی‌الساقین منفرجه ایجاد شده و تئوری IOTP در بیشینه مقدار آن است. با ترسیم نمودارهای PPS_m برای تراکم‌های شلیک مورد بررسی (شکل ۶) و مقایسه نسبی راس‌های هر یک از آن‌ها، اختلاف مقداری راس‌های مربوط به هر تراکم شلیک را می‌توان کمتر از ۰/۵ in بیان کرد. زاویه‌بندی‌های بهینه انتخابی با ETP در شکل ۶ با دایره‌های توپر آبی‌رنگ نشان داده شده‌اند. اختلاف ناچیز PPS_m متناظر با زاویه‌بندی‌های انتخاب‌شده و راس‌های نمودارهای PPS_m تاییدکننده زاویه‌بندی‌های انتخاب‌شده با ETP توسط IOTP است. با توجه به اختلاف ناچیز بین مقادیر راس‌های نمودار PPS_m، می‌توان با توجه به میزان ایمنی پل‌های بین حفره‌ها، زاویه‌بندی‌های متناظر با راس‌های دیگر را نیز به‌منظور ساده‌سازی عملیات، مانند چینش تفنگ‌ها در ابزار، با بسط تئوری IOTP برای دیگر راس‌ها در صورت نیاز استفاده کرد. باین‌همه اولویت انتخاب زاویه‌بندی بهینه، به‌خصوص در سازندهای ضعیف با احتمال ماسه‌زایی، زاویه‌بندی تعیین‌شده با ETP و پس از آن زاویه‌بندی متناظر با IOTP با بیشترین PPS_m است. ایمنی پل‌های بین حفره‌ها، با توجه به معیارهای مرتبط با شعاع آسیب اطراف آن‌ها، با رنگ‌بندی روی شکل ۶ مشخص شده است به‌طوری‌که با میل کردن از ناحیه قرمز رنگ به سمت ناحیه سبز رنگ و افزایش PPS_m ایمنی این پل‌ها افزایش می‌یابد. در این شکل، همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشهود است، قرار گرفتن PPS_m‌های متناظر با زاویه‌بندی‌های بهینه تعیین‌شده با ETP و IOTP، حتی راس‌های PPS_m دیگر غیربیشینه، بالاتر از مقدار ۳/۴ in (حد بیشینه معیارها برای قطر حفره انتخابی) و در ناحیه سبز رنگ عدم هم‌پوشانی نواحی آسیب‌دیده احتمالی اطراف حفره‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به اندازه قطر حفره انتخابی و برپایه حد بیشینه دو معیار توصیف شده در بخش قبل، شعاع‌های ۰/۶ و ۱/۵ in از دیواره حفره‌ها، به‌ترتیب، با دایره‌های خط‌چین زرد رنگ و سبزرنگ اطراف آن‌ها نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل به‌خوبی نشان داده شده است، زاویه‌بندی شکل ۱۴۳° مثلث متساوی‌الساقین حاده ایجاد می‌کند، در نتیجه بهینه بودن این زاویه‌بندی با نادیده گرفته شدن ضلع کوچک مثلث در محاسبات، به‌عنوان اصلی‌ترین ضلع کنترل‌کننده پایداری پل‌های بین حفره‌ها، در هاله ابهام قرار می‌گیرد. شکل ۵ نمای دوبعدی آرایش حفره‌ها در زاویه‌بندی‌های بهینه متناظر با تراکم‌های شلیک ۶، ۹ و ۱۲ spf، برای هر یک از چاه‌های مورد بررسی، را با طول ضلع‌های مثلث بهینه پیدا شده با ETP و نواحی احتمال آسیب سنگ در اطراف حفره‌ها در اثر مشبک‌کاری نشان می‌دهد. بررسی نواحی مشخص شده احتمال آسیب اطراف حفره‌ها و عدم هم‌پوشانی آن‌ها، حتی برای دایره‌های خط‌چین سبزرنگ معرف بیشترین حد معیارهای هم‌پوشانی تعیین‌شده، حتی در تراکم‌های شلیک زیاد، توانمندی ETP در تعیین زاویه‌بندی بهینه را اثبات می‌کند. با اینکه شکل مثلث متساوی‌الاضلاع بهینه و شرایط بهینه زاویه‌بندی در محیط پایتون تعیین شده است، محل این مثلث به‌دلیل انعطاف و توانمندی کد نوشته‌شده در انواع الگوهای مشبک‌کاری از جمله مشبک‌کاری‌های غیریک‌نواخت به انتخاب محاسبات پایتونی بوده و جایگاه آن در این شکل‌ها آنچنان حائز اهمیت نیست. با مقایسه طول کوچک‌ترین ضلع مثلث ایجادشونده با زاویه‌بندی ۱۴۳° تعیین‌شده توسط بلاربی در شکل ۴ (۵/۰۱ in) با ETP در شکل ۵-پ (۵/۳۳ in) و بیشتر بودن آن در روش ETP، بهینه‌تر بودن زاویه‌بندی ۷۷° نسبت به ۱۴۳° برای تراکم شلیک ۱۲ spf مشهود است. همان‌طور که در شکل ۳ نیز دیده می‌شود،



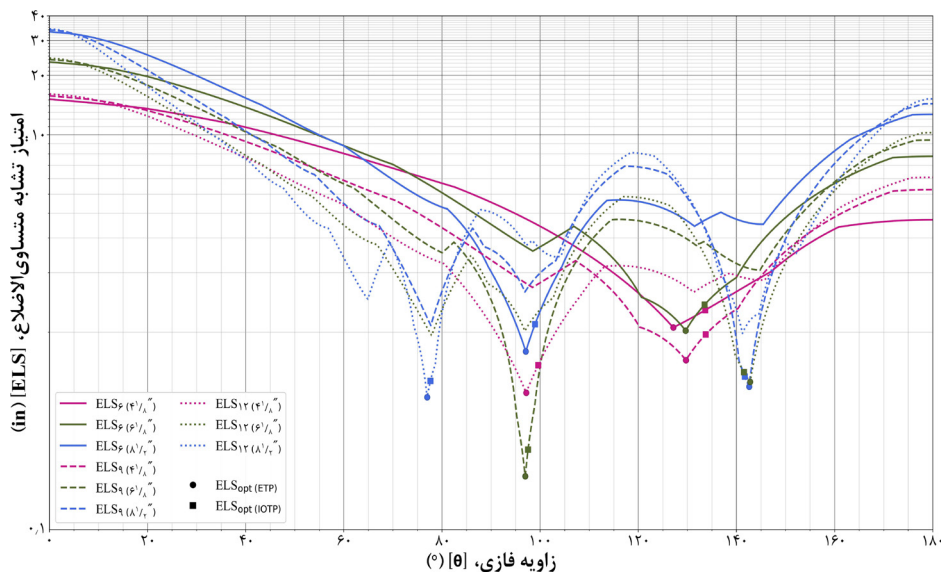
شکل ۵ نمای دوبعدی آرایش حفره‌ها در زاویه‌بندی‌های بهینه متناظر با تراکم‌های شلیک انتخابی؛ الف) چاه با قطر ۱ in (۴^{۱/۸}، ب) چاه با قطر ۱ in (۶^{۱/۸} و پ) چاه با قطر ۱ in (۸^{۱/۲})



شکل ۶ نمودار PPS_m برای بهترین مثلث‌های متناظر با هر زاویه‌بندی در تراکم‌های شلیک و قطرهای چاه انتخابی

ایجادشده در آرایش حفره‌های متناظر با آن‌ها در **جدول ۲** نشان داده شده‌اند. با توجه به فاصله یکنواخت‌تر حفره‌ها تا یکدیگر در ETP نسبت به IOTP (کوچک‌تر بودن مقادیر ELS به دست آمده برای ETP نسبت به IOTP نشان داده شده در **جدول ۲**) و قرار گرفتن مقدار طول کوچک‌ترین ضلع مثلث‌های بهینه ETP در محدوده ایمن سبزرنگ در **شکل ۶**، بهتر بودن زاویه‌بندی‌های تعیین شده با ETP، **جدول ۲**، در کاهش احتمال تولید ماسه از مخازن ماسه‌سنگی ضعیف را اثبات می‌کند.

به منظور ایجاد امکان ارزیابی دیگر زاویه‌بندی‌ها از دیدگاه بزرگی اندازه مقدار ELS در صورت عدم توانمندی در استفاده از زاویه‌بندی‌های بهینه ارائه شده به هر دلیل، نمودارهای ELS متناظر با هر تراکم شلیک در **شکل ۷** ترسیم شده است. در این شکل اندازه مقدار ELS‌های متناظر با زاویه‌بندی‌های بهینه تعیین شده با ETP و IOTP، به ترتیب، با دایره‌ها و مربع‌های توپر نشان داده شده‌اند. اندازه مقادیر زاویه‌بندی‌های تعیین شده متناظر با تراکم‌های شلیک و چاه‌های مورد بررسی به همراه ویژگی‌های



شکل ۷ نمودار ELS برای بهترین مثلث‌های متناظر با هر زاویه‌بندی در تراکم‌های شلیک و قطرهای چاه انتخابی

جدول ۲ ویژگی‌های ایجادشده در تعیین زاویه‌بندی بهینه با روش ETP

ویژگی دور	ویژگی مثلث بهینه					زاویه‌بندی بهینه (°)		تراکم شلیک (spf)	قطر چاه (in)
						امتیاز تشابه متساوی‌الاضلاع (in)			
α (°)	D_{v-12} (in)	D_{h-12} (in)	$\angle 12$ (°)	θ_{12} (°)	L_1 (in)	IOTP	ETP	۶	۴ ^{۱/۸}
	D_{v-23} (in)	D_{h-23} (in)	$\angle 23$ (°)	θ_{23} (°)	L_2 (in)				
W_d (in)	W_c	D_{v-31} (in)	D_{h-31} (in)	$\angle 31$ (°)	θ_{31} (°)	L_3 (in)			
۲۳/۶۱	۲	۲/۰	۴/۵۸	۲۳/۶۱	۱۲۷/۱۳	۴/۹۹	۱۳۳/۶۴	۱۲۷/۱۳	۶
		۴/۰	۳/۸۱	۴۶/۴۲	۱۰۵/۷۴	۵/۵۲			
۵/۱۹	۲	۶/۰	۰/۷۷	۸۲/۶۹	۲۱/۳۹	۶/۰۵	۱/۲۹	۱/۰۵	
۱۵/۹۴	۲	۴/۰	۱/۰۵	۷۵/۳	۲۹/۱۶	۴/۱۴	۱۳۳/۷۴	۱۲۹/۷۲	۹
		۱/۳۳	۴/۶۷	۱۵/۹۴	۱۲۹/۷۲	۴/۸۶			
۳/۵۶	۲	۲/۶۷	۳/۶۲	۳۶/۳۸	۱۰۰/۵۶	۴/۵	۰/۹۷	۰/۷۲	
۱۵/۹۶	۲	۴/۰	۱/۰۳	۷۵/۵۵	۲۸/۶۴	۴/۱۳	۹۹/۶	۹۷/۱۶	۱۲
		۱/۰	۳/۵	۱۵/۹۶	۹۷/۱۶	۳/۶۴			
۳/۵۶	۲	۳/۰	۲/۴۷	۵۰/۵۷	۶۸/۵۲	۳/۸۸	۰/۶۸	۰/۴۹	
۱۶/۱	۲	۲/۰	۶/۹۳	۱۶/۱	۱۲۹/۶۶	۷/۲۱	۱۳۳/۵۱	۱۲۹/۶۶	۶
		۴/۰	۵/۳۸	۳۶/۶۲	۱۰۰/۶۸	۶/۷۱			
۵/۳۴	۲	۶/۰	۱/۵۵	۷۵/۵۲	۲۸/۹۸	۶/۲	۱/۳۸	۱/۰۲	
۱۴/۴۳	۲	۱/۳۳	۵/۱۸	۱۴/۴۳	۹۶/۹۷	۵/۳۵	۹۷/۵۵	۹۶/۹۷	۹
		۴/۰	۳/۶۹	۴۷/۲۹	۶۹/۰۹	۵/۴۴			
۴/۷۹	۲	۵/۳۳	۱/۴۹	۷۴/۳۹	۲۷/۸۸	۵/۵۴	۰/۲۵	۰/۱۹	
۷/۴۶	۳	۳/۰	۳/۶۶	۳۹/۳۷	۶۸/۴	۴/۷۳	۱۴۱/۵۳	۱۴۲/۸	۱۲
		۲/۰	۳/۹۸	۲۶/۷	۷۴/۴	۴/۴۵			
۲/۵	۳	۵/۰	۰/۳۲	۸۶/۳۳	۶/۰	۵/۰۱	۰/۶۳	۰/۵۶	
۱۵/۵۲	۲	۲/۰	۷/۲	۱۵/۵۲	۹۷/۰۹	۷/۴۷	۹۸/۹۷	۹۷/۰۹	۶
		۶/۰	۵/۱	۴۹/۶۵	۶۸/۷۳	۷/۸۷			
۷/۱۵	۲	۸/۰	۲/۱	۷۵/۲۷	۲۸/۳۶	۸/۲۷	۱/۱	۰/۸	
۷/۱۹	۳	۴/۰	۵/۰۲	۳۸/۵۲	۶۷/۷۴	۶/۴۲	۱۴۱/۷۲	۱۴۲/۵۸	۹
		۲/۶۷	۵/۵۵	۲۵/۶۶	۷۴/۸۴	۶/۱۶			
۳/۳۴	۳	۶/۶۷	۰/۵۳	۸۵/۴۸	۷/۱	۶/۶۹	۰/۵۹	۰/۵۳	
۹/۹۳	۲	۵/۰	۱/۸۴	۶۹/۷۶	۲۴/۸۵	۵/۳۳	۷۷/۶۶	۷۶/۹۷	۱۲
		۱/۰	۵/۷۱	۹/۹۳	۷۶/۹۷	۵/۸			
۴/۶۱	۲	۴/۰	۳/۸۷	۴۵/۹۸	۵۲/۱۲	۵/۵۶	۰/۵۷	۰/۴۷	

برای سه اندازه قطر چاه مختلف، $4^{1/8}$ ، $6^{1/8}$ و $8^{1/2}$ in، برای تراکم شلیک ۶ spf، به ترتیب، ۱۲۷، ۱۳۰ و ۹۷°، برای تراکم شلیک ۹ spf، به ترتیب، ۱۳۰، ۹۷ و ۱۴۳° و برای تراکم شلیک ۱۲ spf، به ترتیب، ۹۷، ۱۴۳ و ۷۷° و با ETP برآورد شده است. قرار گرفتن اندازه مقدار PPS‌های متناظر با این زاویه‌بندی‌ها در محدوده ایمن، قابلیت استفاده از آن‌ها برای جلوگیری از تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنجی ضعیف را تایید می‌کند.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب قرارداد شماره ۱۳۸۰-دک-۹۸ مورخ ۱۳۹۸/۱۲/۲۰ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب انجام شده است. بر این پایه نویسندگان مقاله، مراتب قدردانی خود از مدیران و کارشناسان محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، به‌خصوص جناب آقای دکتر محمد میرهاشمی کارشناس ارشد مهندسی بهره‌برداری، را اعلام می‌دارند. همچنین از دیگر متخصصین محترم در دیگر شرکت‌های تابعه وزارت نفت، جناب آقای دکتر محمد صادقی، معاون تحت‌الارض در شرکت توسعه پتروایران، و جناب آقای دکتر مهرداد ثانی، سرپرست واحد عملیات مشبک‌کاری و چاه‌پیمایی در شرکت خدمات فنی میادین آسماری، که با شکیبایی بسیار در جمع‌آوری اطلاعات و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند در تحلیل بهتر ابعاد مسئله تولید ماسه و بخش‌های عملیاتی همکاری نموده‌اند، کمال تشکر را دارند.

علائم و نشانه‌ها

P_n : حفره شماره n

r_p : شعاع حفره مشبک‌کاری (in)

d_p : قطر حفره مشبک‌کاری (in)

d_A^{dz} : قطر حداقلی ناحیه آسیب‌دیده با مشبک‌کاری

(in)

d_B^{dz} : قطر حداکثری ناحیه آسیب‌دیده با مشبک‌کاری

نتیجه‌گیری

از آنجاکه الگوی مشبک‌کاری غیرجانغی ماریچی یکنواخت منفرد از الگوهای مرسوم مورد استفاده در چیدمان تفنگ‌های مشبک‌کاری بوده و از لحاظ پایداری ژئومکانیکی پل‌های بین حفره‌های مجاور، با کاهش تأثیر تنش‌های قائم در تراکم‌های شلیک زیاد، برای جلوگیری از تولید ماسه در سازندهای ضعیف ماسه‌سنجی حائز اهمیت هستند، این مطالعه به بهینه‌سازی پارامترهای تأثیرگذار آن، از بعد پایداری و تولید، پرداخته است. با توجه به مشخص بودن میزان تولید مورد نیاز و تحمیل تراکم‌های شلیک متناسب با آن، با الهام از دو دیدگاه مختلف؛ یکی برپایه بیشترین PPS_m ، با اولویت بیشتر، و دیگری برپایه بیشترین اندازه مقدار زاویه‌بندی ممکن، روش نوینی برای انتخاب زاویه‌بندی بهینه متناظر با هر تراکم شلیک در هر اندازه قطر چاه دلخواه ارائه شده است. به‌منظور کاهش اثر منفی تفاوت طول مسیرهای جریانی بین حفره‌ها، با تعریف ELS، بهترین ترکیب سه حفره مجاور متناظر با زاویه‌بندی‌های مختلف، برای هر تراکم شلیک دلخواه، به‌طوری انتخاب شده است که تفاوت فاصله آن حفره‌ها با یکدیگر در کمترین حالت ممکن قرار گیرد. نزدیکی شکل مثلث‌های تشکیل‌شده با این سه حفره به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع و مقایسه نتایج PPS_m حاصل از آن‌ها با IOTP، که تنها برپایه برابری دو ضلع کوچک مثلث است، توانمندی ETP در ارضای بیشترین طول ممکن پل‌های بین حفره‌ای به‌همراه حفظ یکپارچگی جریانی را اثبات می‌نماید. راهکار ارائه‌شده ضعف راهکارهای پیشین در نظر نگرفتن مثلث‌های بهینه تشکیل‌شونده در بیش از سه دور متوالی چیدمان تفنگ‌های مشبک‌کاری را رفع کرده و در انتخاب این مثلث‌ها در الگوهای مشبک‌کاری دیگر غیریکنواخت و غیرمرسوم نیز کاربرد دارد. با مقایسه آرایش حفره‌های متناظر با ویژگی‌های مشبک‌کاری مورد بررسی، اندازه زاویه‌بندی بهینه

- S_r : فاصله قوسی بین مرکز دهانه دو حفره متوالی در صفحه عمود بر محور چاه (in)
- r_w : شعاع چاه (in)
- d_w : قطر چاه (in)
- PPS : فاصله قوسی بین مرکز دهانه حفره‌ها (in)
- PPS_m : کمترین فاصله قوسی ممکن بین مرکز دهانه حفره‌ها (in)
- n : تعداد شلیک (shots)
- SPF : تراکم یا چگالی شلیک (shots/ft)
- θ : زاویه‌بندی یا زاویه‌فازی؛ زاویه قوسی بین مرکز دهانه دو حفره متوالی در صفحه عمود بر محور چاه (°)
- θ_{opt} : زاویه‌بندی بهینه (°)
- θ_m : زاویه قوسی بین مرکز دهانه حفره‌های ۱ و m در صفحه عمود بر محور چاه (°)
- α : زاویه شیب دور حفره‌ها^۱ (°)
- Zlm : زاویه شیب ضلع بین حفره‌های ۱ و m نسبت به خط افقی (°)
- (x_n, y_n) : مختصات مرکز دهانه حفره n در شکل دوبعدی دیواره چاه (in)
- D_{h-lm} : فاصله قوسی بین مرکز دهانه حفره‌های ۱ و m در صفحه عمود بر محور چاه (in)
- D_{v-lm} : فاصله بین مرکز دهانه حفره‌های ۱ و m در صفحه موازی با محور چاه (in)
- S_a : فاصله‌بندی؛ فاصله بین مرکز دهانه دو حفره متوالی در صفحه موازی با محور چاه (in)
- S_r : فاصله قوسی بین مرکز دهانه دو حفره متوالی در صفحه عمود بر محور چاه (in)
- B_m^{th} : کمترین ضخامت قوسی ممکن بین دیواره حفره‌ها (in)
- L_{lm} : طول ضلع یا فاصله بین مرکز دهانه حفره‌های ۱ و m (in)
- L_n : طول ضلع بین حفره‌های شماره n و $n+1$ (in)
- L_{avg} : میانگین طول ضلع‌های مثلث (in)
- L_{intv} : طول بازه عمقی مشبک‌کاری (in)
- W_d : فاصله بین دو دور متوالی حفره‌ها (in)
- W_c : تعداد دورهای متوالی مورد نیاز حفره‌ها برای تشکیل مثلث بهینه
- ETP : الگوی مثلث متساوی‌الاضلاع
- $IOTP$: الگوی مثلث متساوی‌الساقین منفرجه
- ELS : امتیاز تشابه متساوی‌الاضلاع (in)
- $ELS_{n(D)}$: ELS برای تراکم شلیک n شلیک‌برفوت در چاه با قطر D اینچ (in)
- ELS_{opt} : ELS متناظر با زاویه‌بندی بهینه؛ کمترین مقدار ممکن برای ELS (in)

مراجع

- [1]. Sheikholeslam, A., Jalali, S.E., Ramezanzadeh, A., & Shojaei, H. (2023). Analytical evaluation of sand production process for oil and gas wells in the Asmari reservoir of the Ahwaz field. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 6 (4), 25-50. doi.org/10.22107/JPG.2023.408338.1203.
- [2]. Venkitaraman, A., Manrique, J.F., & Poe, B.D., Jr. (2001). A comprehensive approach to completion optimization. SPE Eastern Regional Meeting. doi.org/10.2118/72386-MS.
- [3]. Roostapour, A. & Yildiz, T. (2005). Post-perforation flow models for API recommended practices 19B. SPE Production Operations Symposium. doi.org/10.2118/94245-MS.
- [4]. Pasztor, A.V. & Toth, A. (2017). Effect of perforation parameters on the productivity of geothermal wells. MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference. University of Miskolc, Hungary. doi.org/10.26649/musci.2017.002.
- [5]. Behrmann, L.A., Hughes, K., Johnson, A.B., & Walton, I.C. (2002). New underbalanced perforating technique increases completion efficiency and eliminates costly acid stimulation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. doi.org/10.2118/77364-MS.
- [6]. Economides, M.J. (2013). *Petroleum production systems*.
- [7]. Bell, W., Sukup, R., & Tariq, S. (1995). Perforating, in SPE Monograph Volume 16. Richardson, TX. doi: archive.org/details/perforating0000bell.
- [8]. According to a personal communication with Sani, M. (2024).
- [9]. According to a personal communication with King, G.E. (2023).
- [10]. Bellarby, J. (2009). *Well completion design*.

- [11]. Locke, S. (1981). An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well. *Journal of Petroleum Technology*, 33 (12), 2481-2488. doi.org/10.2118/8804-PA.
- [12]. Karakas, M. & Tariq, S.M. (1991). Semianalytical productivity models for perforated completions. *SPE Production Engineering*, 6 (01), 73-82. doi.org/10.2118/18247-PA.
- [13]. Behrmann, L.A. & Halleck, P.M. (1988). Effects of wellbore pressure on perforator penetration depth. 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas. doi.org/10.2118/18243-MS.
- [14]. Morita, N. (2022). Geomechanics of sand production and sand control.
- [15]. Sarmadivaleh, M., Nabipour, A., Asadi, M.S., Sabogal Polania, J.M., & Rasouli, V. (2010). Identification of porosity damaged zones around a perforation tunnel based on DEM simulation. *ISRM International Symposium - 6th Asian Rock Mechanics Symposium*.
- [16]. Yew, C.H. & Zhang, X. (1993). A study of the damage zone created by shaped-charge perforating. *Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium*. Denver, CO, U.S.A. doi.org/10.2118/25902-MS.
- [17]. Papamichos, E. & Furui, K. (2019). Analytical models for sand onset under field conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172 171-189. doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.009.
- [18]. Zhang, J., Standifird, W.B., & Shen, X. (2007). Optimized perforation tunnel geometry, density and orientation to control sand production. *European Formation Damage Conference*. doi.org/10.2118/107785-MS.
- [19]. Venkitaraman, A., Behrmann, L.A., & Noordermeer, A.H. (2000). Perforating requirements for sand prevention. *SPE International Symposium on Formation Damage Control*. doi.org/10.2118/58788-MS.
- [20]. Zhang, Z., Guo, J., Liang, H., & Liu, Y. (2021). Numerical simulation of skin factors for perforated wells with crushed zone and drilling-fluid damage in tight gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 90. doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103907.
- [21]. Asadi, M. & Preston, F.W. (1994). Characterization of the jet perforation crushed zone by SEM and image analysis. *SPE Formation Evaluation*, 9 (02), 135-139. doi.org/10.2118/22812-PA.
- [22]. Pucknell, J.K. & Behrmann, L.A. (1991). An investigation of the damaged zone created by perforating. 66th SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas (511-522). doi.org/10.2118/22811-MS.
- [23]. Craddock, G.G., Smith, J., & Haggerty, D. (2018). Perforation crushed zone characteristics in a subsurface sandstone. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. doi.org/10.2118/189483-MS.
- [24]. Martin, A., Behrmann, L., Venkitaraman, A., & Rogers, G. (2005-2007). Perforation. Schlumberger private seminar. Aberdeen, UK.
- [25]. Grove, B.M. (2020). Downhole tool for creating evenly-spaced perforation tunnels. WIPO: WO 2020/256741 A1. Halliburton Co. patents.google.com/patent/WO2020256741A1.
- [26]. Behrmann, L.A., Lopez De Cardenas, J., & Parrott, R.A. (2000). Optimizing charge phasing of a perforating gun. WIPO: WO 2000/066881 A1. Schlumberger Tech. Corp. patents.google.com/patent/WO2000066881A1.
- [27]. Economides, M.J., Watters, L.T., & Dunn-Norman, S. (1998). *Petroleum well construction*.
- [28]. Keese, J.A. & Oden, A.L. (1976). A comparison of jet perforating services Kern River field. *SPE Symposium on Formation Damage Control*. doi.org/10.2118/5690-MS.
- [29]. Hushbeck, D.F. (1986). Precision perforation breakdown for more effective stimulation jobs. *International Meeting on Petroleum Engineering*. doi.org/10.2118/14096-MS.
- [30]. https://petrowiki.spe.org/Perforating_design.
- [31]. National Iranian South Oilfields Company (NISOC). (2023).
- [32]. King, G.E. (2009). *Perforating basics: How the perforating processes work*.
- [33]. Behrmann, L.A. (1995). Apparatus and method for determining an optimum phase angle for phased charges in a perforating gun to maximize distances between perforations in a formation. US Patent: US 5,392,857 A. Schlumberger Tech. Corp. patents.google.com/patent/US5392857A.
- [34]. Brooks, J.E. & Lopez de Cardenas, J. (2004). Optimizing charge phasing of a perforating gun. US Patent: US 2004/0118607 A1. Schlumberger Tech. Corp. patents.google.com/patent/US20040118607A1.
- [35]. Hardešty, J.T. (2017). Optimal phasing of charges in a perforating system and method. US Patent: US 2017/0275975 A1. GEODynamics Inc. patents.google.com/patent/US20170275975A1.
- [36]. Hardešty, J.T. & Rollins, J.A. (2016). Limited entry phased perforating gun system and method. EPO: EP 3,101,221 A1. GEODynamics Inc. patents.google.com/patent/EP3101221A1.
- [37]. Hardešty, J.T. & Wesson, D.S. (2017). Optimal phasing of charges in a perforating system and method. US Patent: US 2017/0275973 A1. GEODynamics Inc. patents.google.com/patent/US20170275973A1.
- [38]. Revett, L.W. (1985). Spiral gun apparatus. US Patent: US 4,552,234 A. Halliburton Co. patents.google.com/patent/US4552234A.
- [39]. Coludrovich, E. (2009). *Perforating*. Chevron Corp.



Phasing Optimization in the Single Helical Perforation Pattern in Hydrocarbon Reservoirs

Ali Sheikholeslam¹, Seyed-Mohammad Esmaeil Jalali^{1*}, Ahmad Ramezanzadeh¹ and Hasan Shojaei²

1. Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Semnan, Iran

2. Department of Geological Engineering, National Iranian South Oilfields Company, Ahvaz, Khuzestan, Iran

Jalalime@shahroodut.ac.ir

DOI:10.22078/pr.2024.5360.3387

Received: July/15/2023

Accepted: May/14/2024

Introduction

The production of sand stands as a significant challenge in hydrocarbon reservoir production, exerting considerable influence on technical, economic, safety, and time-to-maximum-production aspects [1]. Strategies for addressing sand-prone sandstone reservoirs can be broadly classified into preventive and controlling methods. In simple terms, preventive methods refer to wells that are completed with a perforation job [2]. Since the invention of perforation in the 1930s, numerous studies have been undertaken to examine the influence and optimize the efficiency of perforation operations [3]. Through well-designed perforation job, the production volume from a well completed using that is expected to surpass that of an openhole completion method [4].

The relative positioning of perforation locations significantly influences flow characteristics [5]. Excessive proximity between adjacent perforations, particularly near the sandface, can lead to failure of the reservoir rock between them, known as a 'bridge'. This establishes connectivity between these perforations, resulting in the production of detached sand particles that impede fluid flow [6]. Conversely, an increase in the flow path length, associated with higher Perforation-to-Perforation Spacing (PPS), leads to a reduction in production rates. Therefore, the optimal choice of phasing, especially in weak sandstone reservoirs, plays a pivotal role in both production

levels and safety considerations [5].

Phasing optimization proves advantageous in mitigating overlaps within stressed regions surrounding perforations, effectively delaying sand production and enhancing overall productivity [7]. Compatibility exists between higher shot densities, increasing production capacity, and the reduction of overlap between adjacent perforations. This synergy contributes to optimizing phase angles based on perforation overlaps for each shot density and well diameter, a computationally achievable task [8]. The introduction of perforations with a uniform PPS distribution in various directions, with equal PPSs among each three combinations of adjacent perforations (Equilateral Triangle Pattern (ETP)) concurrently minimizes the likelihood of merging adjacent perforations while reducing the longest fluid flow path from the reservoir to the wellbore [5]. In practice, achieving the ideal pattern within a single helical perforation pattern proves impractical. Consequently, the phasing typically results in an equalization of the two shorter PPSs (Isosceles Obtuse Triangle Pattern (IOTP)), with the highest possible magnitude for the minimum PPS considered the optimal solution [9].

Continuing from the study by Sheikholeslam et al. [7], which proposed a method to prevent sand production in the Asmari hydrocarbon reservoir of the Ahvaz field in Iran, this study centers on optimizing phasing, as similar as possible to ETP, with consideration for

typical well diameters in hydrocarbon reservoirs and possible shot densities in Iran. Specifically targeting vertical well perforation operations employing a non-staggered single helical perforation pattern, the study offers operational guidelines designed to prevent sand production, particularly in weak sandstone formations.

Materials and Methods

Given the paramount significance of attaining uniform perforation sizes in reservoirs prone to sand issues [10] and the prevalent practice of arranging charges in a single helix, this study adopts a non-staggered single helical perforation pattern for phasing optimization. Employing advanced statistical and mathematical concepts, the study introduces an innovative approach to evaluating the degree of similarity in the arrangement of each set of three points (perforation centers) with respect to the ETP.

In the context of this investigation, the assumption has been made that the perforation tool is positioned at the well center (co-centric) and along the smooth wellbore wall. Additionally, the perforation lengths and shapes have been considered uniformly, and the perforation diameter aligns with the standard diameter of DP charges, specifically set at 0.4 inches. So, for well diameters of $4^{1/8}$, $6^{1/8}$, and $8^{1/2}$ inches, and shot densities of 6, 9, and 12 SPF, the calculation of Equilateral Likeness Score (ELS) values is obtained from the following equation:

$$ELS = \left| L_1 - L_{avg} \right| + \left| L_2 - L_{avg} \right| + \left| L_3 - L_{avg} \right| \quad (1)$$

where L refers to side lengths of triangles.

By conducting a comparative analysis of the smallest ELS values obtained for various phase angles, we determine the most optimal angles for each well diameter. The phase angles corresponding to the minimum achievable ELS values are identified as the optimal choices. Ultimately, the larger of the identified

angles is considered the most optimum one.

Results and Discussion

The quest for the closest approximation to the ETP with the minimum ELS spans various phasing adjustments, extending up to 180 degrees. The closest perforations contribute to stress reduction and may vary in different directions [11]. Subsequently, the computed PPS_m for each phasing serves as an indicator of perforation stability within the adopted arrangement (Fig. 1). The peaks in the PPS_m diagrams signify the manifestation of the IOTP theory. Following the comprehensive plotting of the ELS diagrams for the examined phase angles in Fig. 2, the phasing associated with the minimum ELS value is chosen as the optimal one for the investigated well with the selected shot density.

Through a relative comparison of peaks in each of the PPS_m diagrams in Fig. 1, the difference in their values for each shot density can be expressed as less than 0.5 inches. Moreover, the negligible difference in PPS_m corresponding to the selected optimum phasing, coupled with other peaks in the PPS_m diagrams confirming the validation of the chosen angles with ETP via IOTP, underscores the insignificance of variations in PPS_m values. Given the minimal disparity among the peak values in the PPS_m diagrams, one may consider utilizing phasing corresponding to other peaks if necessary. In light of these considerations, the primary criterion for selecting the optimal phasing, especially in weak formations prone to potential sanding issues, is the angle determined by ETP. Following this, the angle corresponding to IOTP with the highest PPS_m assumes secondary priority. The placement of PPS_m values corresponding to the optimal phase angles determined by ETP and IOTP, even for other non-maximum PPS_m peaks, in the green region indicates the non-overlapping areas of potential damage around the boreholes.

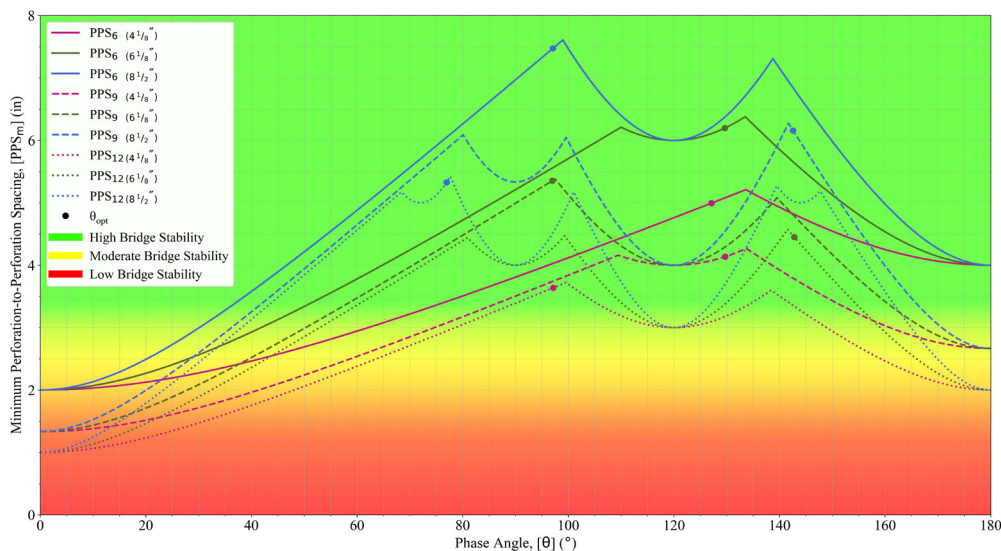


Fig. 1 PPS_m diagram for the optimal triangles corresponding to each phasing at selected shot densities.

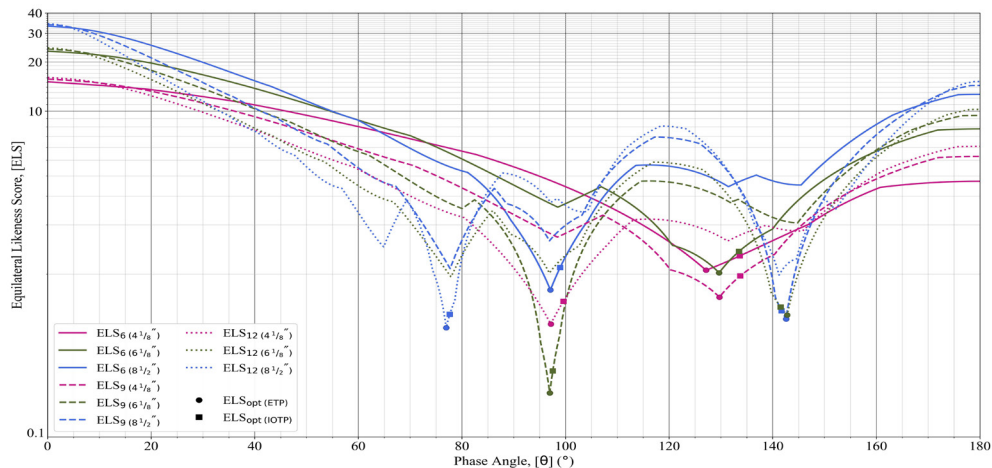


Fig. 2 ELS diagram for the optimal triangles corresponding to each phasing at selected shot densities.

Conclusions

This study focuses on optimizing perforation phasing with respect to both perforation stability and production aspects, employing a non-staggered single helical perforation pattern. Given the predetermined production requirements and the imposition of corresponding shot densities, this study introduces a novel approach to selecting the optimal phasing for each shot density at any desired well diameter. Drawing inspiration from two distinct perspectives—primarily emphasizing the maximum PPS_m and secondarily prioritizing the maximum feasible phasing magnitude—this method provides a fresh perspective on optimizing phase angles. In order to mitigate the negative impact of variations in flow path lengths between perforations, the definition of ELS is employed to select the optimal combination of three adjacent perforations corresponding to different phase angles. For each desired shot density, this selection is made in a way that minimizes the distance difference between these perforations. The proximity of the triangles formed by these three perforations to an equilateral triangle shape, coupled with the comparison of PPS_m results using IOTP, which relies solely on the equality of two smaller sides of the triangle, demonstrates the capability of ETP in satisfying the maximum possible length of bridges between adjacent perforations while preserving flow integrity. The presented solution addresses the shortcomings of previous approaches by considering optimal triangles formed in more than three wraps, extending its applicability to irregular and unconventional perforation patterns. Through a comparison of the perforation arrangement corresponding to the investigated characteristics, the optimal phasing for three distinct well diameters— $4^{1/8}$, $6^{1/8}$, and $8^{1/2}$ inches—has been determined using the ETP. For shot densities of 6 SPF, these optimal angles are 127, 130, and 97 degrees, respectively. In the case of a shot density of 9 SPF, the estimated optimal angles are 130, 97, and 143 degrees. Lastly, for a shot density of 12 SPF, the optimal angles are estimated to be 97, 143, and 77 degrees, respectively.

Nomenclatures

ETP: Equilateral Triangle Pattern
 IOTP: Isosceles Obtuse Triangle Pattern
 PPS: Perforation-to-Perforation Spacing
 PPS_m : minimum PPS
 ELS: Equilateral Likeness Score
 L_n : side length of triangles
 L_{avg} : average of side lengths of triangles

References

1. Sheikholeslam, A., Jalali, S.M.E., Ramezanzadeh, A., & Shojaei, H. (2023). Analytical evaluation of sand production process for oil and gas wells in the Asmari reservoir of the Ahwaz field. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 6 (4), 25-50. doi.org/10.22107/JPG.2023.408338.1203.
2. Venkitaraman, A., Manrique, J.F., & Poe, B.D., Jr. (2001). A comprehensive approach to completion optimization. SPE Eastern Regional Meeting. doi.org/10.2118/72386-MS.
3. Roostapour, A. & Yildiz, T. (2005). Post-perforation flow models for API recommended practices 19B. SPE Production Operations Symposium. doi.org/10.2118/94245-MS.
4. Pasztor, A.V. & Toth, A. (2017). Effect of perforation parameters on the productivity of geothermal wells. *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. University of Miskolc, Hungary. doi.org/10.26649/musci.2017.002.
5. Grove, B.M. (2020). Downhole tool for creating evenly-spaced perforation tunnels. WIPO: WO 2020/256741 A1. Halliburton Co. <https://patents.google.com/patent/WO2020256741A1>.
6. Behrmann, L.A., Lopez De Cardenas, J., & Parrott, R.A. (2000). Optimizing charge phasing of a perforating gun. WIPO: WO 2000/066881 A1. Schlumberger Tech. Corp.. <https://patents.google.com/patent/WO2000066881A1>.
7. Bellarby, J. (2009). Well completion design.
8. Venkitaraman, A., Behrmann, L.A., & Noordermeer, A.H. (2000). Perforating

- requirements for sand prevention. SPE International Symposium on Formation Damage Control. <https://doi.org/10.2118/58788-MS>.
9. Behrmann, L.A. (1995). Apparatus and method for determining an optimum phase angle for phased charges in a perforating gun to maximize distances between perforations in a formation. US Patent: US 5,392,857 A. Schlumberger Tech. Corp. <https://patents.google.com/patent/US5392857A>.
 10. Coludrovich, E. (2009). Perforating. Chevron Corp..
 11. Morita, N. (2022). Geomechanics of sand production and sand control.