



הפקת גז ונפט
בראי אתגרים גלובליים
לתעשיות המים
דו"ח ראשון שלב א'
סקר ואתגרים



ד"ר גלעד פורטונה
שירי פרוינד-קורן

אודות מוסד שמואל נאמן

מוסד שמואל נאמן שהוקם בטכניון בשנת 1978 ביוזמת מר שמואל (סם) נאמן הוא מכון למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה במגוון רחב של נושאים בתחום הפיתוח הכלכלי, חברתי ומדעי-טכנולוגי של מדינת ישראל. פעילות המחקר בתחום המדיניות הלאומית מתרכזת בתשתיות הפיזיות, המדעיות-טכנולוגיות, התעשייתיות ותשתיות ההון האנושי הקובעות את חוסנה הלאומי של מדינת ישראל. במוסד מבוצעים מחקרי מדיניות וסקירות, שמסקנותיהם והמלצותיהם משמשים את מקבלי החלטות במשק על רבדיו השונים. מחקרי המדיניות נעשים בידי צוותים נבחרים מהאקדמיה, מהטכניון ומוסדות אחרים ומהתעשייה. לצוותים נבחרים האנשים המתאימים, בעלי כישורים והישגים מוכרים במקצועם. במקרים רבים העבודה נעשית תוך שיתוף פעולה עם משרדים ממשלתיים ובמקרים אחרים היוזמה באה ממוסד שמואל נאמן וללא שיתוף ישיר של משרד ממשלתי. בנושאי התוויית מדיניות לאומית שעניינה מדע, טכנולוגיה והשכלה גבוהה נחשב מוסד שמואל נאמן כמוסד למחקרי מדיניות המוביל בישראל.

עד כה ביצע מוסד שמואל נאמן מאות מחקרי מדיניות וסקירות המשמשים מקבלי החלטות ואנשי מקצוע במשק ובממשל. סקירת הפרויקטים השונים שבוצעו במוסד מוצגת באתר האינטרנט של המוסד. בנוסף מוסד שמואל נאמן מסייע בפרויקטים לאומיים דוגמת המאגדים של משרד התמי"ס - מגני"ט בתחומים: ננוטכנולוגיות, תקשורת, אופטיקה ותקשורת, כימיה, אנרגיה, איכות סביבה ופרויקטים אחרים בעלי חשיבות חברתית לאומית. מוסד שמואל נאמן מארגן גם ימי עיון מקיפים בתחומי העניין אותם הוא מוביל.

יו"ר מוסד שמואל נאמן הוא פרופ' זאב תדמור וכמנכ"ל מכהן פרופ' משה משה. המוסד פועל במסגרת תקציב הקרן שהותיר שמואל נאמן להטמעת חזונו לקידומה המדעי-טכנולוגי, כלכלי וחברתי של מדינת ישראל.

כתובת המוסד: מוסד שמואל נאמן, קרית הטכניון, חיפה 32000

טלפון: 04-8292329, פקס: 04-8120273

כתובת דוא"ל: info@neaman.org.il

כתובת אתר האינטרנט: www.neaman.org.il

הפקת גז ונפט
בראי אתגרים גלובליים לתעשיות

המים

דו"ח ראשון שלב א'

סקר ואתגרים

ד"ר גלעד פורטונה

שירי פרוינד-קורן

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחבר/ים ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד שמואל נאמן

רשימת היועצים בפרויקט

ניר סהר - יועץ טכני לכל הסקטורים

ד"ר פרי לב-און וד"ר מרים לב-און - The Levon Group LLC

פרופ' רפי סמיט - הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון

אלה אופנברגר - המכון למחקר המים ע"ש גרנד, הטכניון

ארנון גולדפרב - Israel Cleantech Venture

אריאלה גרינברג - Israel Cleantech Ventures

מנהל הפרויקט : ד"ר גלעד פורטנה

עוזרת מחקר : שירי פרוינד-קורן

תוכן עניינים

עמוד

4	1	תקציר
8	2	הקדמה
9	2.1	נפט
11	2.1.1	עתודות הנפט בעולם
11	2.1.2	קידוח באר
13	2.1.3	סיום הקידוח
14	2.1.4	הפקה
14	2.2	גז טבעי
15	2.3	גז מפצלים (Shale Gas)
18	2.4	קידוח והפקה ימית
18	2.4.1	קידוח ימי
19	2.4.2	הפקה ימית
23	3	טכנולוגיות הפקה ראשיות בדגש על מהלך המים – מיחזור והפרדה
23	3.1	דיאגרמת מהלך המים בתעשיית הגז והנפט
24	3.2	הזנות מים
25	3.2.1	שיטות טכנולוגיות נוספות המערבות שיפורים בתהליכי הקידוח וההפקה
26	3.2.2	שיטות מתקדמות לקידוח
27	3.3	מים מופקים (Produced Water)
29	3.3.1	מהלך המים
30	3.3.2	הוצאת חלקיקי חול
34	3.3.3	טיפול במומסים
34	3.3.4	טיפול במלחים מומסים במים
36	4	התייחסות לנושא הרגולציה בגז ונפט
38	5	אתגרים לחברות מים בדגש על חברות ישראליות
38	5.1	הגנה על הסביבה
39	5.2	סינון, הפרדה וטיפול במים נוספים במים
40	5.3	פצלים
44	5.4	אתגרים במקטע הנפט והגז בים
46	6	ריכוז האתגרים העיקריים לחברות המים בסקטור קידוח והפקת גז ונפט
48		סיכום
49		נספח - מילון מושגים
50		מקורות

רשימת תרשימים

<u>עמוד</u>	<u>תיאור התרשים</u>	<u>#</u>
8	ייצור חשמל בארה"ב על פי סוג מקור האנרגיה, כל המגזרים	1
9	צריכת אנרגיה בעולם לפי סוג מקור האנרגיה, 1990-2035	2
10	צריכת הנפט בעולם	3
13	קידוח	4
21	Spart Platforms	5
21	קידוח כיווני	6
23	דיאגרמת מהלך המים בתעשיית הגז והנפט	7
30	הפרדה אופיינית ב-3 שלבים	8
31	הידרוציקלון	9
32	Coalescence enhanced gravity separation	10
33	ציוד לציפת גז – IGF מכני	11

דו"ח זה סוקר את תעשיית הפקת הנפט והגז, במטרה לאתר את תפקיד המים בתהליכי ההפקה וצרכי הטיפול במים מבחינת חיסכון, שימוש, השבה ומיחזור נכון לסביבה.

זהו דו"ח ראשון במסגרת סקירת שימושי המים בשבעה סקטורים תעשייתיים גלובליים.

העבודה נעשתה במטרה להעמיק את ההבנה של תפקיד המים בתעשיות שנבחרו, ולזהות אתגרים עסקיים ארוכי טווח, מתוך רצון לקדם הזדמנויות עסקיות עבור חברות המים הישראליות.

עבודה זו תהווה בסיס חשוב לתוכניות העבודה של Israel NewTech, מכון היצוא ומערך הנספחים המסחריים בשנים הקרובות.

עבודה זו עוסקת בלימוד תעשיית קידוח והפקת הגז והנפט, תוך סקירת תהליכים עיקריים, תפקיד המים בתהליכים אלה וזיהוי אתגרים שמהווים חסם לגידול בחלק מפעילויות הפקת הגז והנפט.

אנו מתרכזים בשלושה סקטורים עיקריים בתחום הפקת הגז והנפט: הראשון הוא הפקת הנפט, השני-הפקת הגז ממאגרים קונבציונליים והשלישי- הפקת גז כלוא מפצלים.

שני הראשונים מתייחסים להפקה הוותיקה ביבשה וגם להפקה ימית, כאשר ההבדל בין השניים בהקשר לנושאי המים אינו כה גדול.

הפקת גז כלוא מפצלי שמן הינו נושא חדש יחסית. הפקות אלה נמצאות בגידול, כאשר תהליך זה מוגבל בגין צריכת המים המרובה והפגיעה של התהליך בסביבה.

נראה כי בנושא הפקת גז כלוא מפצלי שמן טמון סיכוי גדול יותר לחדשנות פורצת דרך, והצורך בחדשנות כזו מצדיק מאמץ תעשייתי ישראלי גדול.

בנושא הגז והנפט סקרנו במסגרת מסמך זה את הבעיות הקשורות בהזנת המים, בטיפול במים המופקים ובמיחזור, וזוהו מספר אתגרים בהם יש מקום לפתרונות חדשניים. בגין העמקת הקידוחים והחידושים הטכנולוגיים באופן הקידוח, התחזדו בעיות קיימות, כמו פגיעה במי התהום והפכו לדומיננטיות.

בפרק 2 אנו סוקרים את תעשיית הגז והנפט והמגמות לגידולה, בפרק 3, מציגים את הטכנולוגיות העקרויות המשמשות בתחום המים בתעשייה זו, בפרק 4 סוקרים את הרגולציה האמריקאית הרלוונטית, בפרק 5 מפורטים האתגרים ובפרק 6 ריכזנו את האתגרים העיקריים בנקודות.

מסמך זה מהווה שלב ראשון, שמטרתו סקירת הסקטור התעשייתי והצבת האתגרים לתעשיית המים הישראלית, בשלב השני נפנה לחברות רלוונטיות מתעשיית המים הישראלית ובשלב הסופי נציג יעדים גלובליים לשיתוף פעולה (חברות הנדסה ומים בין-לאומיות) וכן חברות עסקיות שמהוות את לקוחות היעד הסופיים איתן מומלץ להתקשר ליצירת שיתופי פעולה בפתרון אתגרים אלה.

סקר על מחקרים בתחום המים באוניברסיטאות בארץ, מתוכנן בהמשך ובאמצעותו ננסה להאיר מקומות בהם מחקרים מדעיים אקדמיים עשויים לתת פתרונות חדשניים בטווח הארוך אותם התעשייה תוכל ליישם לשימוש מסחרי.

להלן ריכוז האתגרים לתעשייה הישראלית כפי שזוהו במהלך הכנת המסמך:

- 1.1 הבטחת כמות המים הנדרשת לפעולות קידוח אופקיות בשיטת השבירה ההידראולית.
- 1.2 ביצוע מחקר ופתוח במטרה לפתח הגנות פיסיות על מי התהום (יצירת חיץ), בנוסף להגנות הקיימות על צינורות ההפקה כיום. כמו כן, שכלול אפשרויות לחישה ובקרה, במטרה לקבל התרעה בזמן אמת על דליפות אפשריות למי התהום. בימים אלה (American Petroleum Intitute) API עוסקת בניסוח סטנדרטים למניעת זיהום/דליפה. הכוונה היא להגדיר את המושג Well Integrity , וחשוב, אם כך, לחברה שמעוניינת לפעול בנושא, להתעדכן בסטנדרטים המוגדרים לפני תחילת העבודה.
- 1.3 בנוסף לסעיף הקודם - בניית בארות מושכלת להפקה יעילה, לבלימת דליפות ולמזעור הגירה של מזהמים (כימיקלים) הנגרמת כתוצאה מפעולות הקידוח.
- 1.4 בתחום הממברנות להפרדה: פיתוח ממברנות איכותיות יותר, בעלות זמן חיים ארוך יותר וכאלה שהן עמידות בתנאי לחץ וטמפרטורה שונים. כחלק מהאתגרים בתחום הממברנות ניתן למנות:
 - 1.4.1 הוצאת מינרלים המבוססת על שימוש בממברנות להקטנת נפח התמלחת.
 - 1.4.2 פיתוח תהליכים להגנת הממברנות כולל שכלול תהליכי אפיון לגבי ההרכב המדויק של המים, אותם ניתן להעביר הלאה לטיפול ממברנלי מבלי להרוס את הממברנה.
 - 1.4.3 הארכת זמן חיי הממברנות.
 - 1.4.4 שכלול מערכות אוטומציה לניהול ובקרה on line, וכן מערכות מידע מרכזיות הקשורות אליהן בתחום ניהול המים.
- 1.5 פיתוח טכנולוגיות לחסימת חדירת המים לבאר או להקטנה בכמות המים הנשאבים, אם באמצעות הפרדה בתוך הבאר או באמצעות חסימות מים מכניות או כימיות בתוך הבאר .

- 1.6 כיום יש ניסיונות לשימוש באגנים ירוקים כאפשרות נוספת לטיפול במים מופקים. פתרונות חדשניים נחוצים בתחום מתפתח זה, במיוחד בנושא האצת הפעילות של אגנים ירוקים.
- 1.7 שכלול תהליכי Fracturing שנעשים באמצעות אוויר או באמצעות תערובת CO₂ וחול.
- 1.8 פיתוח פורמולציות חדשות לטיפול במים הנכנסים לתהליך (נוזל הקירור והסיכוך של המקדח, נוזלי השבירה), וכן חומצות לטיפול בבוץ הקידוח, בסביבת פתח הקידוח עצמו.
- 1.9 פיתוח של SBM (Synthetic Based Mud) כתחליף ל-OBM (Oil Based Mud), נראה שאפשר לשלב בין הסעיף הקודם לזה הנוכחי, באמצעות יצירת שיתוף פעולה בין חברה שמייצרת אלמנטים כמו מקדחים מתוחכמים לחברה המייצרת כימיקלים, במטרה ליצור מערך המשלב מקדח ונוזל קירור וסיכה.
- 1.10 פיתוח תהליכי שבירה הידראולית ו/או תוספי נוזל שיאפשרו את השימוש במים עם TDS גבוה (Total Dissolved Solids).
- 1.11 פיתוח מתקנים רב – שלביים למשל: אגן ירוק ומתקן אידוי וגיבוש מינרלים לטיפול במים מופקים.
- 1.12 פיתוח חומרים מתוחכמים וכדאיים מבחינה כלכלית למניעת קורוזיה, כמו כן פיתוח מערך מתקדם לניטור פעיל של מידת הקורוזיה שבעקבותיו יבוא שינוי ON LINE של פעולת המשאבות.
- 1.13 אתגר משלים: פיתוח חומרים עמידים לקורוזיה במחירים נמוכים יותר, במיוחד לשימוש בקידוחים ימיים.
- 1.14 צנרת מפלדת פחם – פיתוח ושכלול המערכות הקיימות.
- 1.15 שכלול ופיתוח שיטות מתקדמות לקידוח במיוחד בתחום הקידוח האופקי ובשיטות ניטור מתקדמות תוך כדי קידוח.
- 1.16 מכיוון שטיפול במים מופקים ("Produced Water"), כאמור, נעשה באמצעות מערכת המורכבת ממספר אלמנטים, אנו רואים אתגר לחדשנות המשלבת מספר פתרונות גם כאן, ביצירת מערכות יעילות יותר וכדאיות יותר מבחינה כלכלית.

1.17 במקטע הימי : טיפול במים המופקים במטרה להפחית ריכוז שאריות נפט, כימיקלים, חומרים בעלי רעילות אקוטית וטוקסינים ארוכי טווח במים המושבים לים, ניטור טמפרטורת המים המושבים לים ובנוסף – השבתת המים המופקים למטרות שימוש חוזר וטיפולים לפני הזרקה.

1.18 פיתוח מערכות קומפקטיות של סינון והפרדה לצורך פעילות הנעשית על אסדות ימיות.

1.19 תחזוקת מערכות טיפול והזרקה של מים מופקים בצורה יעילה והסכונת.

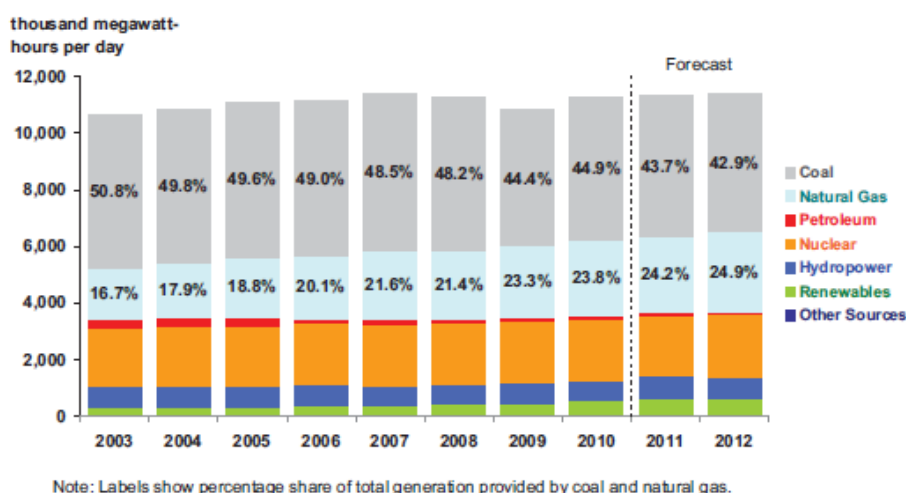
1.20 מכיוון שכיום לא נראה שישנו פתרון אחד שיהיה תקף לכל אתרי הפקת הגז והנפט מפצלים כפתרון גנרי, יש צורך ללמוד לעומק את האתרים הגדולים יותר, ולהציע פתרונות ספציפיים עבור המים המופקים מאתרים גדולים.

בסוף המסמך הוספנו מילון מושגים מקצועיים חיוניים בתקשורת עם אנשי התעשייה בעולם.

ממש כפי שצורכי האנרגיה של מדינות תלויים באספקה מהימנה של מים, כך גם הטיפול וההפצה של מים איכותיים תלויים באספקה רציפה של אנרגיה זמינה.

בצריכת אנרגיה בתהליך ייצור החשמל, צופים ירידה באחוז השימוש בנפט ככל שתכנסנה מערכות גז זמין ואנרגיה חליפית – למשל: אנרגיה סולארית ואנרגית רוח. אולם בתחום התחבורה, הנפט הוא דומיננטי. בגרף מספר 1 אפשר לראות, כי מרכיב הדלק בייצור החשמל מזערי:

תרשים 1 – ייצור חשמל בארה"ב על פי סוג מקור האנרגיה, כל המגזרים



Note: Labels show percentage share of total generation provided by coal and natural gas.

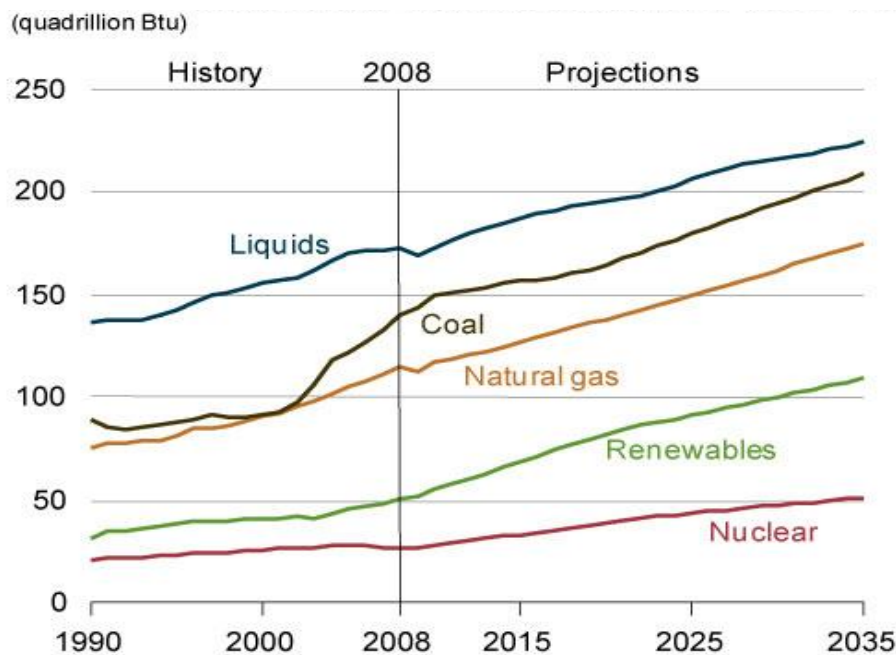
Source: Short-Term Energy Outlook, September 2011



אולם, מרכיב הנפט בסך צריכת האנרגיה העולמית כפי שמוצג בגרף מספר 2 מגיע לכדי כ-33% ב-2008, ולכן, כל עוד לא ימצא תחליף כלכלי ריאלי לנפט, יהיה זה דומיננטי יותר מהגז, כאשר נתח הגז ילך ויגדל עם השנים ונתח הפחם ילך ויקטן, ככל שנשכיל לפתור את בעיות המים והבעיות הסביבתיות בהפקת הגז והנפט באופן כלכלי.

הגרף המצורף מציג את התחזית הנוכחית, כמובן שאם יחולו שינויים טכנולוגיים משמעותיים – פילוג הצריכה ישתנה.

תרשים 2 – צריכת אנרגיה בעולם לפי סוג מקור האנרגיה, 1990-2035



את האתגרים לתעשייה הישראלית ריכזנו בתקציר למסמך ובסיומו, כמו כן הדגשנו אותם במהלכו (Bold).

2.1 נפט

נפט הוא מחצב המורכב מתערובת תרכובות אורגניות, בעיקר פחמימנים גבוהים, המכילות פחמן, מימן ומעט גופרית וחנקן.

מחיר הנפט הינו גורם המשפיע על כל אחד מאתנו בכל יום. מחירה של חבית נפט משליך על מחירי הדלק והתחבורה, מחיר החשמל ועוד שלל מוצרי צריכה שונים.

נפט אינו חומר גלם אחד, ישנם סוגים רבים של נפט גולמי בעולם. נהוג להשתמש במאפיינים גיאוגרפיים על מנת לסווג את ההבדלים בין סוגי הנפט, כיוון שלכל אזור גיאוגרפי קיימים מאפיינים הייחודים לו, כגון: מוצקות, צמיגות, נדיפות, משקל יחסי, אחוז גופרית ורעילות.

על פי ארגון אופ"ק¹, הביקוש העולמי לנפט עמד על 85.5 מיליון חביות ליום בשנת 2010, וצפוי לגדול ל-96.2 ו-105.5 מיליון חביות ליום בשנת 2020 ובשנת 2030 בהתאמה. הצמיחה הכלכלית הלא מאוזנת בעולם, המובלת על ידי מדינות מתפתחות (כמו למשל מדינות ה BRIC - ברזיל, רוסיה, הודו וסין) מתבטאת גם בביקוש לנפט. חלקן היחסי של מדינות מתפתחות בביקוש העולמי לנפט ממשיך

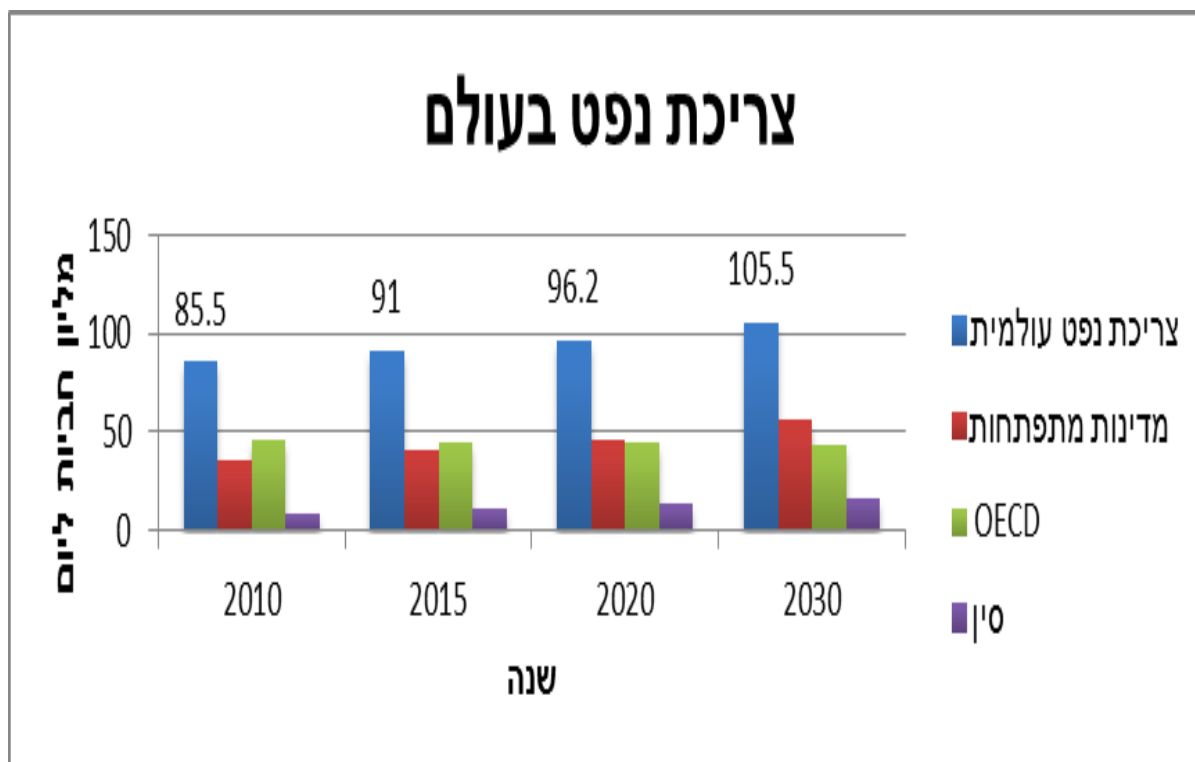
לצמוח עם השנים. בעוד שבשנת 2010 הן צרכו כ-35% מהנפט בעולם, הצפי כי בשנת 2015 הן יצרכו כמעט 41%. מבין המדינות המתפתחות בולטת סין, שצפויה להגדיל את חלקה היחסי בביקוש העולמי מ-8.7% בשנת 2010, ל-10.9% בשנת 2015.

בתחזיות לטווח הקצר צפוי כי מדינות ה-OECD יישמרו על ביקוש די קבוע של כ-45 מיליון חביות ליום עד שנת 2015. ארה"ב צפויה להמשיך להוביל בראש רשימת צרכניות הנפט בעולם, כאשר סין, יפן והודו מאחוריה.

צריכת נפט עולמית¹

שנה	ביקוש עולמי [מליון חביות ליום]	מדינות מתפתחות ²	סין	מדינות OECD
2010	85.5	35.4	8.7	45.4
		41.4%	10.2%	53.1%
2015	91.0	40.8	10.9	45.3
		44.8%	12%	49.8%
2020	96.2	46.3	13.1	44.7
		48.15%	13.6%	46.46%
2030	105.5	56.8	16.7	43.1
		53.8%	15.8%	40.85%

תרשים 3 – צריכת הנפט בעולם



שלוש יצרניות הנפט המובילות בעולם הן: רוסיה, ערב הסעודית וארה"ב. שלושתן מייצרות כשליש מהייצור העולמי, המוערך ב -87 מיליון חביות ביום, בשנת 2011. על פי נתוני אופ"ק, ההיצע העולמי צפוי להיות גבוה במקצת מהביקוש העולמי במהלך השנים הקרובות ולעמוד על כ -90 מיליון חביות ליום בשנת 2014, כאשר 19.2 מיליון חביות מיוצרות על ידי מדינות ה-OECD, לעומת 4.1 מיליון ו -10.3 מיליון חביות בסין וברוסיה בהתאמה. כאמור, רוסיה הינה המדינה המובילה בעולם בייצור נפט, בשנת 2010 הופקו 10.1 מיליון חביות ביום ברוסיה, כ-12% מהייצור העולמי.

הגורמים המרכזיים המשפיעים על היצע הנפט כיום הינם שיפורים טכנולוגיים בקידוחים יבשתיים וימיים וביכולות ההפקה אשר יוזילו את עלויות ההפקה וישפרו את הסיכויים במציאת מאגרים חדשים, המצב הגיאוגרפי במדינות המפיקות נפט, והביקוש העולמי.

2.1.1 עתודות הנפט בעולם

המדינה המובילה בעולם בעתודות נפט הינה ערב הסעודית ואחריה קנדה, אירן ועירק. התמונה המדאיגה את העולם המערבי מעיון בתמונת המצב של עתודות הנפט העולמי היא, כי החלק הארי של העתודות נמצא בידי מדינות שאינן מערביות, מלבד קנדה. לכן, המדינות המערביות באירופה הציבו לעצמן יעדי הפחתת התלות בנפט במהלך השנים הבאות, וכמו כן דנים בארה"ב בדרכים להפחתת התלות בנפט והגדלת חלקה היחסי של אנרגיה חלופית.

ערב הסעודית לבדה מחזיקה ב 20% מהעתודות המזוהות וקנדה בכ-15%³. מיקום העתודות מצביע על העדפה לטווח ארוך למיקוד לתעשיית המים.

2.1.2 קידוח באר

ברגע שזוהה מבנה גיאולוגי מבטיח, הדרך היחידה לאשר את קיומם של נפט ו/או גז ואת העובי והלחץ הפנימי של מאגר הוא לקדוח בארות בדיקה (Exploratory drilling). קידוח לשם בדיקה משמש, כמובן, להפקה לאחר שנמצאו נפט או גז בכמויות מסחריות. אנו נתייחס להפקה בלבד.

עבור פעולות המתבצעות ביבשה, בונים משטח (pad) באתר הנבחר על מנת לספק תשתית וציוד קידוח לשירותי התמיכה.

מתקן קידוח, יוצר חור באדמה בעומק מסוים ולאחר מכן מחדיר פנימה צינור פלדה על מנת לשמור על חוזק מבני של הבור ולבודד אזורים עם לחץ גבוה אחד מהשני ומפני הקרקע.

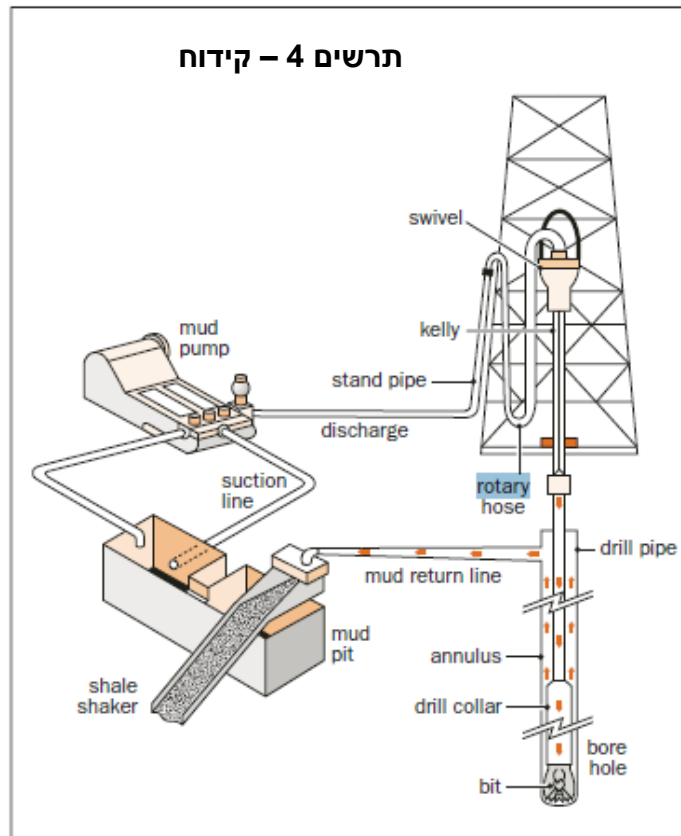
ברגע שמתחילים לקדוח, נוזל קידוח הנקרא בויץ, נע במחזוריות כלפי מטה בתוך צינור הקידוח ובחזרה, במרווח שבין הצינור וקיר הקידוח, לציוד הנמצא על פני השטח. נוזל הקידוח מכיל חומרים רבים (נוזליים ומוצקים) שנבחרים כך שיענו על התכונות הפיסיקליות והכימיות הנדרשות. למשל: קירור המקדח (bit), הרמת שברי סלע אל פני הקרקע, מניעת אי יציבות של הסלע בחור הקידוח ואיזון לחץ הידרוסטטי תת-קרקעי. הסיכון של זרימה בלתי מבוקרת מהמאגר לפני השטח מצומצם במידה רבה על ידי שימוש בציוד המונע התפוצצות (BOP-Blow-Out Preventer) – סידרה של אילי ברזל עשויים פלדה המופעלים באופן הידראולי ומסוגלים להיסגר במהירות מסביב לכלל הקידוח או לבית המקדח ולהיאטם.⁴

מספר הבארות הנדרשות לניצול מאגר הפחמימנים (נפט/גז) משתנה בהתאם לגודל המאגר ולמבנה הגיאולוגי שלו. כדי לקדוח בשדות נפט גדולים, תידרשנה מאה בארות או יותר, בעוד ששדות נפט קטנים יותר ידרשו כעשר בלבד.

קידוח של בארות ייצור מרובות מתבצע לעתים קרובות ממשטח אחד, כדי לצמצם את הדרישה לקרקע ואת עלויות התשתית הכוללות. במקום זאת צינור הקידוח הכבד יוחלף על ידי צנרת קלה יותר בתוך הבאר. לעיתים באר אחת עשויה להכיל שתיים או שלוש מערכות של צנרת, כאשר הייצור של כל אחת מהן מגיע משכבות שונות של סלע המאגר.

רוב בארות הנפט המסחריות החדשות, מפיקות בזרימה חופשית. הלחצים התת-קרקעיים מניעים את הנוזל מתחתית הבאר כלפי מעלה לעבר פני השטח. קצב הזרימה תלוי במספר גורמים, כגון תכונותיהם של הסלעים הנמצאים במאגר, הלחצים התת-קרקעיים, הצמיגות של הנפט והיחס בין הנפט לבין הגז. בכל אופן, גורמים אלה אינם קבועים במשך החיים המסחריים של הבאר, וכאשר הנפט לא יכול להגיע לפני השטח ללא עזרה, דרושות התערבויות נוספות, בדרך כלל הן כוללות שאיבה או הזרקה של גז או מים, כדי לשמר את הלחצים של המאגר. במצב כזה, מזריקים מים או קיטור לתוך המאגר כדי לשמר את הלחצים ולנצל בצורה אופטימלית את קצבי הייצור ואת פוטנציאל השאיבה האולטימטיבי של הנפט והגז. תהליך זה, בתורו, עשוי לחייב את הקידוח של בארות נוספיות הנקראות בארות הזרקה. ניתן להשתמש בשיטות נוספות לעידוד הייצור, כגון שבירה הידראולית של התצורה הגיאולוגית המכילה את הפחמימנים, וטיפול בחומצה (במיוחד באבני סיד) לשיפור ערוצי הזרימה.

בתרשים הבא ניתן לראות את החלקים המשמשים בתהליך הקידוח⁴:



ברגע שהנפט והגז מגיעים לפני השטח, הם מופנים למתקן הייצור המרכזי שאוסף ומפריד בין החומרים שיוצרו (נפט, גז ומים).

לפני השלב הבא, בדרך כלל, על הנפט להיות נקי מגזים מומסים. באותו אופן, הגז צריך להיות נקי מנוזלים ומרכיבים בלתי רצויים, כגון מימן גפרתי ודו-תחמוצת הפחמן.⁴

מאגרי נפט וגז מכילים, לעיתים קרובות, גם מים. המים המתקבלים יחד עם הנפט ו/או הגז נקראים מים מופקים. גם המים הנוספים המוזרקים לאזור המאגר על מנת "לדחוף" את הנפט אל עבר באר ההפקה לשיפור ההפקה וגם המים הנמצאים באופן טבעי במאגר הנפט עשויים להישאב בסופו של דבר יחד איתו.⁴

2.1.3 סיום הקידוח

סיום שלב הקידוח זהו תהליך בו מאתחלים את השאיבה הסדירה לאחר סיום קידוח הבאר. לאחר סיום הקידוח אפשר לבצע שבירה (Fracturing), כדי להכין ולעודד את מעבר הנפט דרך הסלעים ואל חור קידוח – על כך נרחיב בפרק על הפקת גז מפצלי שמן. בסופו של התהליך מוכנס הצינור להפקת הנפט ו/או הגז.

2.1.4 הפקה

על מנת להתחיל בתהליך ההפקה מותקן בראש הבאר "Christmas Tree" - מערך של צינורות, מתאמים, ושסתומים לניטור והובלת הנפט. מערך זה מנטר את הלחץ והזרימה ומאפשר גישה לבאר במקרה הצורך (מקרה חרום, שיפוצים, טיפולים תחזוקה ושיפור וכו').

המפעיל יהיה מסוגל להפיק רק חלק מהנפט הקיים בעזרת שאיבה ראשונית (כלומר, לחץ טבעי ושאיבה פשוטה), אך קיימות מגוון שיטות שאיבה נוספות, כפי שמתואר לעיל. לדוגמה, להגברת היעילות של שאיבת הנפט, ניתן גם להשתמש בשאיבה משנית הנעזרת בהזרקה מים או בהזרקה גז ובשיטות שלישוניות הנעזרות בכימיקלים, בגזים או בחום. לשם כך חופרים בארות הזרקה מיוחדות או משתמשים בבורות שאיבה ישנים שמתאימים לכך.

כאשר השאיבה מפסיקה להיות כלכלית, הבאר ננטשת, הצנרת מוסרת ומלט מוחדר פנימה עד לעומק מספק (לא עד לפני השטח). ראש הבאר מכוסה ונאטם.

2.2 גז טבעי

גז טבעי מהווה מרכיב חיוני באספקת האנרגיה העולמית. הוא אחד ממקורות האנרגיה הבטוחים והנקיים ביותר. מורכב מתערובת גזים הידרוקרבונים דליקה – בעיקר מתאן (CH_4) - 70-90% אך יכול להכיל גם חומרים נוספים בכמויות קטנות ומשתנות בהתאם למקורו, למשל – אתאן, פרופאן, בוטאן ופנטאן. כאשר שורפים גז טבעי, מתקבלת כמות גדולה של אנרגיה ובניגוד לסוגים אחרים של דלקים פוסיליים, בתהליך השריפה נפלטות כמויות קטנות יותר של תוצרי לוואי מזיקים לסביבה.⁵ לגז הטבעי תפקיד מרכזי בעמידה בדרישות האנרגיה האמריקניות. גז טבעי, פחם ונפט מספקים כ-85% מצרכי האנרגיה של ארה"ב, כאשר גז טבעי מספק כ-22% מסך הכל. ההערכה היא שאחוז התרומה של גז טבעי לאספקת האנרגיה בארה"ב צפוי להישאר קבוע למדי במשך 20 השנים הבאות.⁶ הגז לכווד במאגרים שעשויים בדרך כלל מאבן נקבובית (כמו אבן גיר או חול) כאשר מעל השכבה המכילה אבן זו נמצאת שכבה אטומה ובלתי חדירה לגז.⁵ הגז יכול להיות אגור במשותף עם נפט (ואז יהיה קרוב יותר אל פני השטח) או במאגר גז נפרד. הגז האגור נמצא תחת לחץ ובתחילת ההפקה יוצא באופן חופשי. לעיתים בהפקת נפט מזריקים את הגז הנפלט חזרה למאגר להגדלת הלחץ לשם שיפור תהליך ההפקה או לשימושים בעתיד.

2.3 גז מפצלים (Shale Gas)

גז טבעי מופק בדרך כלל יחד עם נפט (Associated Gas). בהעדר נפט תתכן הפקה ישירה של גז ממצבורי גז המסווגים כקונבנציונליים או לא קונבנציונליים. בתחום הפקת הגז ממקורות לא קונבנציונליים, אין ספק שהעתודות הגדולות נמצאות בשלושה מקורות (יבשתיים):

1) בסלעי הצפחה – גז מפצלים (Shale Gas)

2) באבן חול (tight sands – TS)

3) באבן פחם (Coal Bed Methan – CBM)

הערכה זהירה מראה שכמות הגז הניתנת להפקה ממאגרים כאלה בכל העולם היא 210,456, ו-256 Tcm ממאגרים מסוג 1, 2, או 3 בהתאמה, כאשר כ-30% מתפוקה זו עשויה לבוא ממאגרים שבצפון אמריקה.

בהפקת מאגרים מסוג 1 או 2 יש להתמודד עם כמויות גדולות של מים הנחוצות לקידוח וכן לטפל בכמויות המים הגדולות המופקות יחד עם הגז הטבעי והכוללות ריכוזים של התוספים בהם משתמשים להגברת התפוקה. ההבדל העיקרי בין שני סוגי המאגרים הוא הלחץ וקצב הזרימה חזרה של תערובת המים והגז בעת ההפקה היות ומאגרי פצלים נוטים להיות מאופיינים בלחצים גבוהים וקצב זרימה גבוה יותר מאלו של מאגרי אבן חול. לשם השוואה, בהערכה שנעשתה במדינת טקסס לצריכת המים האופיינית למגזר הנפט והגז במדינה, הפקת גז ממאגרי אבן חול צפויה לצרוך כ-40-50% פחות מים ממוצע מצריכת המים בהפקת גז ממאגרי הפצלים המצויים במדינה. האתגרים עבור הפקה עם שבירה הידראולית ממאגרי אבן חול זהים עקרונית לאתגרים בהפקה ממאגרי פצלים.

בהפקה מאבן פחם (סוג 3 לעיל) משתמשים בכמויות גדולות של מים לריווי מצע הפחם ורק אז מקובל לשאוב את המים בכדי להפחית את הלחץ באופן משמעותי ולגרום לנדידת הגז הטבעי מפני השטח של מצעי הפחם שעליו הוא היה ספוח.

במסמך זה אנו מתייחסים בהרחבה להפקת גז מפצלים, בהמשך, אם יעלה הצורך, נעמיק בתחום ה-TS.

גז מפצלי שמן נמצא, כאמור, בסלע צפחה שנוצר לפני כשלוש מאות וחמישים מליון שנים. סלע זה הוא "fine grained" ונשבר בקלות לשכבות דקות מקבילות. זהו סלע רך שאינו מתפרק ברטיבות. בגלל מבנה הסלע, הפקת גז ממאגרים כאלה מורכבת ויקרה יותר מהפקה ממאגרי גז רגילים.

עפ"י הערכת ה-FERC (Federal Energy Regulatory Commission), ב-7 בנובמבר 2008, היו בארה"ב 21 Tcm מאגרי גז מפצלים הניתנים להפקה (מבחינה טכנולוגית). גז מפצלים מהווה חלק הולך וגדל ממקורות האנרגיה הניתנים להפקה בארה"ב.

לפי דו"ח של FERC מ-2010, הפקת גז גדלה בין השנים 2005 עד 2010 ב-23% לכמות של יותר מ-1.67Bcm ליום, מכמות של 1.36Bcm ליום ב-2005, כאשר גידול זה נובע ברובו מגידול ההפקה מפצלים שמהווה 20% מהפקות הגז בארה"ב.

לפי ה-EIA (U.S. Energy Information Administration), יותר מ-70% מעתודות גז הפצלים הניתנים להפקה נמצאות מחוץ לצפון אמריקה.

בטבלה הבאה, מתוך נתונים של ה-EIA, ניתן לראות השוואת רזרבות לכמויות מופקות בכמה מן המדינות בעולם בהן יש מאגרים גדולים של גז מפצלים:

רזרבות גז פצלים ניתנות להפקה (Tcm)	רזרבות גז טבעי מוכחות (Tcm)	הפקת גז טבעי בשנת 2009 (Tcm)	
0.48	1.39	0.08	הולנד
2.35	2.04	0.10	נורבגיה
0.57	0.26	0.06	בריטניה
24.4	7.72	0.54	ארה"ב
10.99	1.76	0.16	קנדה
36.1	3.03	0.08	סין
6.54	4.5	0.08	אלג'יריה

אם כן, קיימות כמויות גדולות של רזרבות פצלים ודרישה הולכת וגדלה לגז, ולכן, יש צורך הולך וגובר בהצגת פתרונות חדשניים לשימוש והשבת המים בסקטור הפקה זה.

ההתפתחות בתחום גז מפצלים גרמה לשינוי מסיבי בכלכלת קידוחי הגז, עלות הפקת גז מפצלים צנחה ועילות ההפקה עלתה עם העלייה באיכות הטכנולוגיה והניסיון שנצבר. במקרים מסוימים הזמן הנדרש לחפירת באר גז מפצלים ירד משבועות לימים בודדים.

עובדה זו הורידה את העלויות של רוב הפקות הגז מהפצלים והפכה אותן כדאיות. מכיוון שקיימת דאגה מההיבטים הסביבתיים של תהליכי שבירת הסלע הנעשים בהפקות אלה, מתפתחים תהליכי רגולציה, המיועדים להגן על הסביבה והמים, אליהם יש צורך להתאים את אופן ההפקה.

המשך ההתפתחות בתחום הגז מהפצלים צפוי להמשיך למתן את מחירי הגז בטווח הארוך. הכדאיות הכלכלית בהפקת גז מפצלים בשנים האחרונות נובעת מחבירה בין שלושה גורמים: (1) שיפור ביכולות הקידוח האופקי, (2) התקדמות שנעשית בטכניקת השבירה ההידראולית, וכנראה החשוב ביותר - (3) עליות מהירות במחירים של גז טבעי במספר השנים האחרונות כתוצאה מפערים בין ביקוש והיצע.

המאגרים של פצלי השמן שונים זה מזה ולכל אחד קריטריונים שונים לגילוי ואתגרים תפעוליים. מתוך כך, ההתפתחות של המשאבים של פצלי השמן בכל אחד מאזורים אלה עומד באופן פוטנציאלי בפני הזדמנויות ואתגרים ייחודיים.

כיום, קידוח של בארות פצלי השמן כולל הן בארות אנכיות והן בארות אופקיות. בשני סוגי הבארות, מכניסים שילוב של צינורות ומלט כדי להגן על האקוויפרים.

המפתח הטכנולוגי השני לכדאיות הכלכלית של הפקת גז מפצלי השמן, הוא שבירה הידראולית, הכוללת החדרת נוזל מימי תחת לחץ גבוה לתוך המאגר כדי ליצור שברים או סדקים בתצורת הסלע הגיאולוגית המיועדת. דבר זה מאפשר לגז הטבעי לזרום לבאר ואל פני השטח בכמויות כלכליות. בעת תהליך שבירת פצלי השמן, מי התהום אמורים להיות מוגנים על ידי שילוב בין צינור ומלט המותקנים כחלק מתהליך הקידוח וכן כיוון שקיים חיץ של סלעים בין אזור השבירה לבין אקוויפרים כלשהם. כל טיפול הכולל שבירה הידראולית הנו תהליך מבוקר ברמה גבוהה המתוכנן לתנאים הספציפיים של התצורה הגיאולוגית המיועדת.

מים המיועדים לקידוח ולשבירה הידראולית של בארות אלה מגיעים לעתים קרובות מגופי מים עיליים, כגון נהרות ואגמים, אך הם עשויים גם להגיע ממי תהום, ממקורות מים פרטיים, ממים עירוניים וממים מופקים המיועדים לשימוש מחדש.

אלטרנטיבה אחת שנלקחת בחשבון היא להשתמש בשינויים עונתיים בזרמי הנהר כדי ללכוד מים כאשר זרמי המים העיליים הנם חזקים ביותר. ניצול הבדלים עונתיים בזרימה מאפשר תכנון של שאיבות מים, במטרה למנוע השפעות פוטנציאליות על אספקות של מי שתייה עירוניים או על קהילות החיות בתוך או ליד מקווי מים או נהרות.

כמות המים הנחוצה לקידוח ולשבירה של באר אופקית של פצלי שמן, נעה בדרך כלל בין 7,600 ל-19,000 מ"ק, תלוי במאפיינים של המשקע ושל התצורה הגיאולוגית.⁶

לאחר שהקידוח והשבירה של הבאר הושלמו, מים מופקים יחד עם הגז הטבעי. מים אלה מורכבים מחלק מנוזל הקידוח, שחוזר עם שברי סלעים וממים טבעיים שהגיעו מהתצורה הגיאולוגית. ללא קשר למקור, מים מופקים אלה דורשים טיפול. מדינות, ממשלות מקומיות ומפעילים של הפקת גז מפצלי שמן מחפשים אמצעים לניהול מים מופקים במטרה להגן על מי התהום והמים העיליים ובה בעת לצמצם את הביקוש למים בתהליך בעתיד, אם ניתן. נושא זה ראוי לתשומת לב של תעשיית המים הישראלית.

2.4 קידוח והפקה ימית

2.4.1 קידוח ימי

כאשר קידוח מתבצע בים, קרקעית הים עשויה להיות עשרות ועד אלפי מטרים מתחת לפני הים, לכן יש לבנות פלטפורמות מלאכותיות לקידוח בהתאם לעומק הים, תנאי המאגר, תנאי מזג האוויר – הרוחות, הזרמים ועוד.

קידוחי ים ניתן לבצע באמצעות מגוון של יחידות קידוח ניידות עצמאיות המיועדות לאזורים שונים.

בעת ההגעה לאתר, מרכיבים את אסדת הקידוח ואת מתקן התמיכה העצמאי. יחידה טיפוסית של אסדת קידוח כוללת עגורן, מגדל קידוח, ציוד לטיפול ולקידוח בבוץ, גנרטור חשמלי, ציוד לעבודה עם מלט ומיכלים עבור דלק ומים. אפשר לחלק את אסדות הקידוח וההפקה לשני סוגים עיקריים: ניידות ונייחות.

אסדות ניידות הנמצאות בשימוש בזמן הקידוח (אסדות קידוח), הן זולות יותר, בזמן ההפקה בונים לעיתים אסדות מקובעות, אם עומק המים מאפשר זאת.

אסדות ניידות

(1) דוברת קידוח (Drilling Barges)

משמשת לקידוח במים רדודים – אגמים, ביצות, נהרות ותעלות. אסדה זו מורכבת מפלטפורמה צפה שנגררת ממקום אחד לשני באמצעות ספינה.

(2) Jack-up Rigs

דומה לדוברת, בשינוי אחד – ברגע שממוקמת באתר הקידוח, מורדות שלוש-ארבע רגליים לקרקעית הים לשם אחיזה כנגד זרמים או רוחות. מתאימה לקידוח במים רדודים, כיוון שאורך הרגליים שניתן להוריד לקרקעית הינו מוגבל. בג'ק אפ ריג פלטפורמת הקידוח נמצאת מעל פני הים ולכן בטוחה יותר לתפעול.

Submersible Rigs (3)

מתאימה למים רדודים יחסית, לאסדה יחידת ציפה שמתמלאת מים כשהאסדה מגיעה למקום הקידוח. יחידת הציפה יורדת אל קרקעית הים. בסיום התהליך, המים נשאבים החוצה מיחידת הציפה והאסדה שוב ניידת.

Semisubmersible Rigs (4)

אסדת הקידוח הנפוצה ביותר בים, מאפשרת קידוח במים עמוקים. פועלת באותו מנגנון שיקוע והצפה כמו ב-Submersible Rigs, ההבדל הוא שכאשר ממלאים את מתקן הציפה במים, הוא אינו יורד לקרקעית אלא שקוע חלקית. החלק התחתון, המלא במים מספק יציבות לאסדה. אסדה כזו מחוזקת במקומה באמצעות עוגני ענק המאפשרים לבצע קידוח יציב ובטיחותי או באמצעות מנועי ייצוב הנשלטים באמצעות מערכות מיקום אקוסטיות ו-GPS.

ספינות קידוח (Drillships) (5)

ספינה הבנויה כך שהיא יכולה לבצע קידוח באמצעות ציוד שהיא נושאת עליה – פלטפורמה ומגדל קידוח שיושבים באמצע הסיפון. בנוסף יש בה חור העובר מלמעלה למטה ומאפשר למיתר הקידוח לרדת אל המים. משתמשים בה בדרך כלל לקידוח במים עמוקים מאוד וסוערים.

2.4.2 הפקה ימית

לאחר שנקדחה באר ואושרה עובדת הימצאותו של מאגר נפט/גז, מתחיל שלב ההפקה. בשלב זה, אם מדובר במים רדודים, ניתן להצמיד את האסדה ישירות לקרקעית – כל זאת, כמובן, בהתאם לכדאיות כלכלית. אסדה כזו נקראת אסדה קבועה. (פרוט האסדות מומחש בציור בעמוד הבא).

רגלי האסדה נבנות מבטון או פלדה ומחוזקות לקרקעית, או שמוצמדות אליה מכוח משקלן. במים עמוקים מאוד, לא כלכלי או בלתי אפשרי טכנית להציב אסדות כאלה.

Compliant Towers (1)

אסדות דומות לאסדות קידוח. בנויות ממגדל צר הנמתח מהפלטפורמה ואל הקרקעית. חומרי הקיבוע של המגדל גמישים, כדי לאפשר לאסדה עמידות כנגד זרמים ורוחות וכן לאפשר הפעלתה במים עמוקים יחסית.

Seastar Platform, Tension Leg Platform & Subsea System (2)

האסדות אלה מכילות ציוד ציפה הדומה ל- Semisubmersible Rigs המתמלא מים בזמן הקידוח. בנוסף יש להן "רגל נמתחת" – מיתר חלול וגמיש הנשמר במתח קבוע ואינו מאפשר תנודות מעלה או מטה של הפלטפורמה אך כן מאפשר תנודות מסויימת לצדדים.

ב-Subsea System ראשי הבאר ממוקמים על קרקעית הים ולא על פני השטח והנפט/גז מופקים ביחידה הנמצאת בתוך המים, ומועברים באמצעות צינורות לעמדת הפקה סמוכה - דבר המאפשר הקמת עמדה אחת על פני מספר רב של בארות.

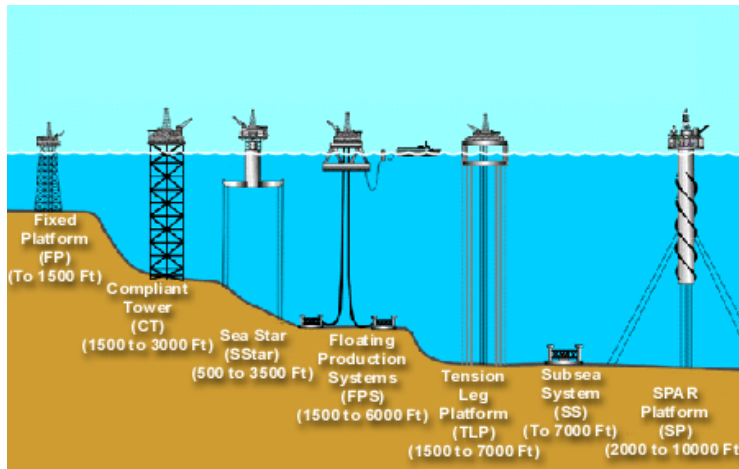
(Floating Production System) אסדות הפקה צפות (3)

אלו הן בעצם Semisubmersible Rigs שמכילות ציוד להפקת נפט/גז בנוסף לציוד הקידוח. האסדות מחזקות למקומן באמצעות עוגני ענק או מנועי ייצוב. ראש הבאר מחובר לקרקעית, במקרה זה, ולא לפלטפורמה.

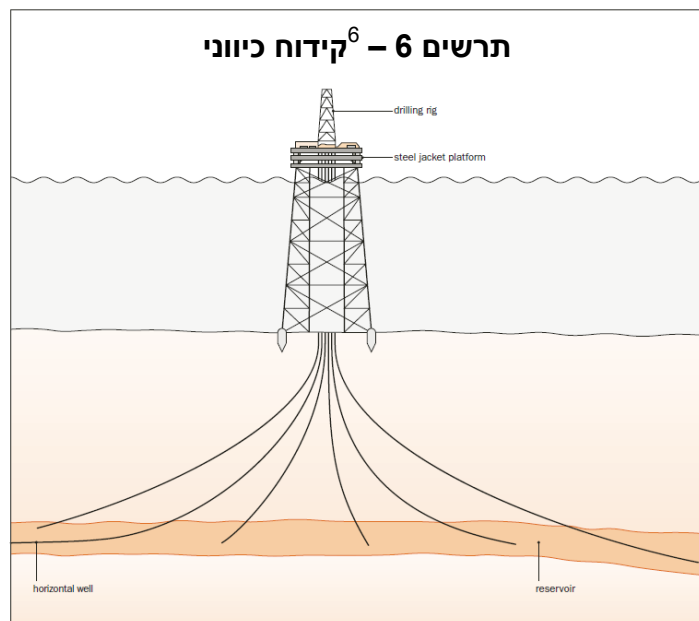
Spar Platforms (4)

מהגדולות שבאסדות הקידוח, מכילה גליל ענק המחובר אל הקרקעית באמצעות שורה של כבלים. קוטרו הגדול של הגליל מייצב את הפלטפורמה, אך עדיין מאפשר תנועה מספקת לעמידה בזרמים ורוחות.⁸

תרשים 5 – Offshore Drilling Platforms⁸



ההתפתחויות האחרונות בקידוח האופקי מאפשרות, בין היתר, ריכוז פעולות קידוח והפקה באתר אחד וצמצום 'טביעת הרגל' על הקרקע כמו גם צמצום מספר הפלטפורמות הממוקמות באזורים המרוחקים מהחוף.⁴



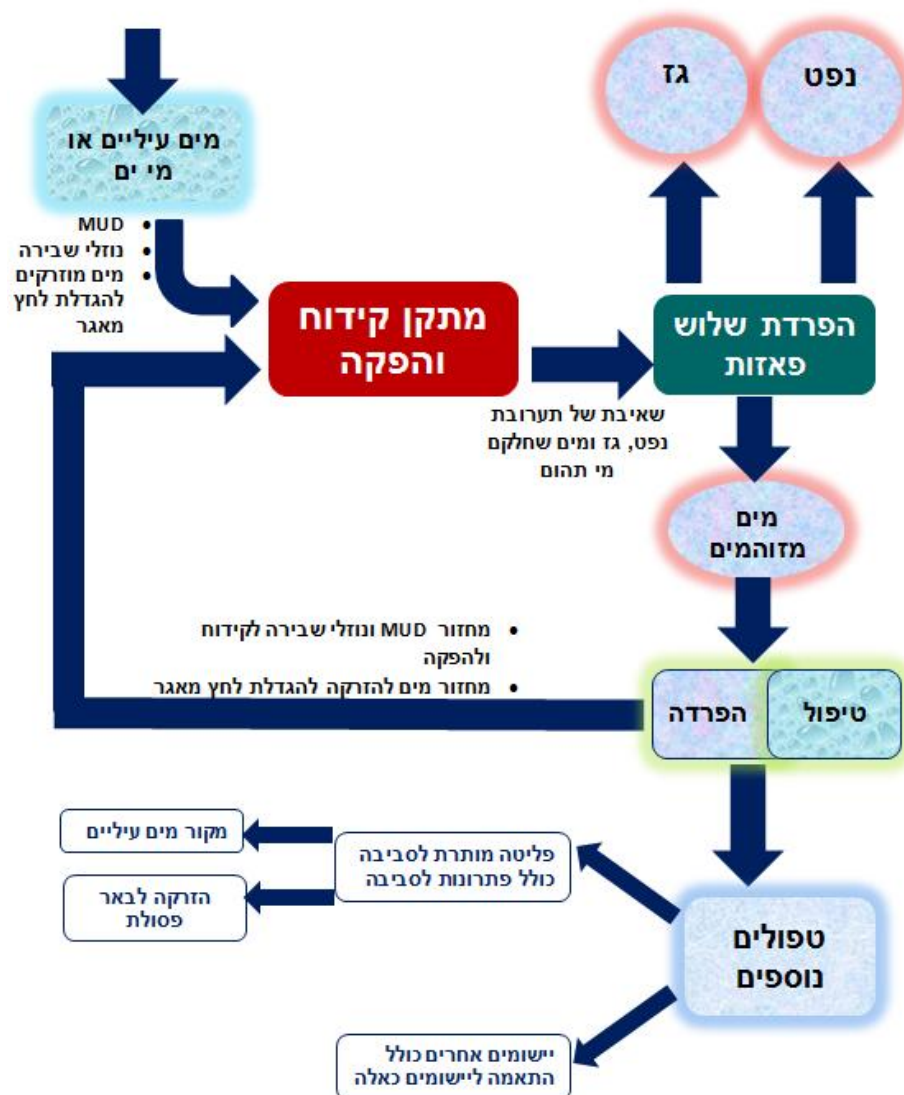
בנוסף, הקידוח האופקי מקטין את פני השטח הנמצאים בשימוש על ידי צמצום הצורך בבארות לוויין, מאפשר גמישות רבה יותר בבחירת אתר הקידוח, ותורם להקטנת הפגיעה בסביבה.

חשוב לזכור שגדולות ככל שתהיינה, השטח על אסדות הקידוח ואיזור ההפקה קטן וכל חלק בו יקר לאין ערוך מיחידת שטח ביבשה. מכאן ניתן להסיק שפיתוח אמצעים טכנולוגיים לאחסון וטיפול במים המופקים, המערבים צמצום והקטנה בגודל היחידות הטכנולוגיות, חיוני במציאת פתרונות חדשניים לתעשיית הקידוח וההפקה הימיים של גז/נפט.

3.1 דיאגרמת מהלך המים בתעשיית הגז והנפט

הדיאגרמה הבאה מבטאת את מהלך המים בתעשיית הגז והנפט, אנו ננסה לעקוב אחר מהלך זה על מנת להבהיר את הנקודות החשובות המהוות אתגר עבור תעשיית המים הישראלית.

תרשים 7 – דיאגרמת מהלך המים בתעשיית הגז והנפט



מים משמשים בכל שלבי היצור של נפט וגז: הפקה, ניקוי, עיבוד, אחסון והובלה.

נבדוק מהיכן מגיעים המים הנכנסים לתהליך, האם הם עוברים טיפולים מסוימים או מוסיפים להם חומרים נוספים. מה קורה להם בתהליך ההפקה, אילו טכנולוגיות משמשות לטיפול ההפרדה והניקוי להשבה, או לפני פליטה מותרת לסביבה, או המשך שימוש בתחומים אחרים (מיחזור).

מים לקירור ועיבוד התוצר, קירור הציוד, הכנת תמיסות, טעינה מחדש של utilization boilers, הפקת אדים ומי הזנה לטיפול בשפכים ובוצה.

בחיפוש נפט וגז, מים משמשים לקידוח ולתהליכי שבירה.

בהפקת נפט כלוא בחול (Tight Sand), השימוש במים מסיבי במיוחד, יש צורך בשניים עד חמישה מ"ק של מים כדי להפריד מ"ק אחד של נפט. הפקת נפט מפצלי שמן צורכת כמות דומה של מים.⁹

3.2 הזנות מים

למים המוזנים לתהליך הקידוח וההפקה שני תפקידים עיקריים, שימוש כנוזלי הקידוח (Mud) ולמטרת ביצוע תהליכי השבירה (Hydraulic Fracturing).

כפי שהזכרנו, נוזל הקידוח הוא תערובת מימית (WBM – Water Based Mud) של כימיקלים ומינרלים שתפקידה לקרר ולסכך את המקדח, ללכוד את שברי הסלעים ("מטחן"), להרים אותם אל פני הקרקע ולשלוט על הלחץ בבאר במהלך הקידוח. בתערובת נמצאים חומרים רבים, ביניהם אפשר למנות חומרים מעבי צמיגות, אמולסיפיירים, חומרים לאיזון PH, מלחים, חומרי סיכה, מעכבי קורוזיה, ביוציידים ועוד.

יש סוגים נוספים של נוזלי קידוח, למשל כאלה המבוססים על נפט (OBM – Oil based) Mud השמוש בהם נפוץ פחות ונעשה בעיקר בתנאים מורכבים של עומקים גדולים, זוויות חדות, קרקע דביקה וכדומה. (נתייחס לנושא זה בקצרה בסעיף 4)

נוזל השבירה מוחדר בתהליך השבירה (Hydraulic fracturing / fracking) בלחצים וטמפרטורות משתנות (הכל לפי תכנון מוקדם) במטרה ליצור סדקים בשכבת הסלע וכן להחזיר לתוכם גרגרי חומר כדי שישמרו פתוחים ויאפשרו לנפט או גז לזרום החוצה.

נוזל שבירה מבוסס בראש ובראשונה על מים, ומערבב עם תוספים המסייעים למים לשאת חלקיקי חול (sand proppants) לתוך השברים, על מנת לאפשר את זרימת הגז דרכם. מים וחול מרכיבים יותר מ-98% מנוזל השבירה, כאשר השאר מורכב מתוספים כימיים שונים המשפרים את האפקטיביות של פעולת השבירה, למשל, מצמצמי חיכוך, מקטיני צמיגות ועוד.

התוספת של מצמצמי החיכוך מאפשרת לנוזלי השבירה ולמזהמים להישאב לאזור היעד בקצב גבוה יותר, ובעזרת לחץ קטן יותר. בנוסף, תוספים אחרים כוללים: ביוציידים למניעת צמיחה של מיקרואורגניזמים,

חומרים למניעת הקורוזיה של צינורות המתכת; וחומצות לטיפול בבוץ הקידוח בסביבת פתח הקידוח עצמו.

בבארות קיימת בעיה של קורוזיה בצנרת, הנמצאת מתחת לאדמה, בצנרת מעל פני הקרקע, במערכות המווסתות לחץ ובמיכלי האחסון, מצב זה מוחרף כתוצאה מנוכחות גזים כמו CO_2 ו- H_2S .¹⁰ נפט מופק כשלעצמו אינו קורוסיבי, הקורוזיה תלויה בסביבת ההפקה, ותלויה, בין היתר בהפרדה שנעשית בין הנפט לגורמים הקורוסיביים (למשל הגזים שצוינו בשילוב עם מים). עוד גורמים לקורוזיה יכולים להיות פעילות מיקרוביאלית והצטברות של מוצקים.

חלק גדול בעלויות של הצנרת הפנימית נובע מהצורך בשימוש במעכבי קורוזיה, ניתן לשפר את יעילות מעכבים אלה באמצעות שימוש במערך מתקדם, כמו ניטור פעיל של מידת הקורוזיה שבעקבותיו גידול או הקטנה בפעולת משאבות, המשנות באופן מידי את כמויות נוגדי הקורוזיה שמוכנסות למערכת.¹⁰ יש כאן מקום לחדשנות עבור חברות המים הישראליות.

בארות בהן קיימת טמפרטורת תחתית באר גבוהה (BHT – Bottom Hole Temperature), סובלות מקורוזיה כתוצאה מהטמפרטורה ומכמויות גדולות של סולפט ומלחים אחרים. במקרים אלה, יש נסיונות להקטין את כמות הסולפט ע"י הפיכתו לסולפיד באמצעים ביולוגיים. אפשרות נוספת שהועלתה כוללת טיפול באמצעות ניטרט בכמויות מתאימות.¹¹

השימוש בחומרים עמידים לקורוזיה, מוגבל בגלל ההשקעה הראשונית הגדולה הנדרשת. פיתוח חומרים עמידים במחירים נמוכים יותר, במיוחד לשימוש בקידוחים ימיים, יהיה משמעותי מאוד עד לכדי הפחתת מחיר משמעותית בעלות הנפט המופק. על חומרים כאלה להיות חזקים, לא מתכתיים ובעלי עמידות בטמפרטורות ולחצים גבוהים.

3.2.1 שיטות טכנולוגיות נוספות המערבות שיפורים בתהליכי הקידוח וההפקה

(1) שבירה באמצעות תערובת CO_2 - חול

תערובת של חלקיקי חול ו- CO_2 נוזלי, נדחסת אל הבאר בלחץ, כך שהתערובת יוצרת שברים בסלעים. בסיום התהליך ה- CO_2 מתאדה ומותר מאחוריו את חלקיקי החול בתוך הסדקים באופן שיאפשר זרימה של הגז.¹² שבירה בשיטה זו מקטינה משמעותית את כמות המים והכימיקלים שנכנסים ויוצאים מהתהליך, ובאופן זה היא מקטינה את בעיית הטיפול בשפכים והסכנה לאקוויפרים.

עלותו של תהליך זה גבוהה מהעלות של תהליך השבירה באמצעות מים, אך עלויות אלה נחסכות כשמגיעים לשינוע וטיפול בשפכים. כמו כן יעילותו של התהליך מבחינת זרימת הגז גבוהה יותר.¹²

2) צנרת מפלדת פחם (coiled tubing)

השימוש בצנרת גמישה ועשויה ממקטעים ארוכים, יעיל במיוחד באזורים בהם נתיב הקידוח מפותל ולא יציב.

שיטה זו מקטינה את ההשפעה הסביבתית בגלל צריכה קטנה יותר לבוץ קידוח, "טביעת רגל סביבתית" קטנה יותר והפעלה שקטה יותר. כמו כן בגלל חוסן הצנרת, הסכנה לדליפות לקרקע קטנה.

ההתקנה של צנרת כזו היא חד פעמית, מקטינה את כמות אנשי הצוות הנדרשים לעבודה ומאפשרת שימוש נרחב יותר, בקידוח בשיטות מתקדמות.¹²

3.2.2 שיטות מתקדמות לקידוח

שיטות מתקדמות לקידוח מגדילות את תפוקת הבאר, מקטינות את טביעת הרגל הסביבתית והופכות הפקות ממקומות שבעבר נחשבו ללא כלכליים לכדאיות – ומכאן שמקטינות את מספר הקידוחים.

בתוך שיטות אלה ניתן למנות קידוח אופקי - מספק יותר חשיפה לתצורה גיאולוגית מאשר באר אנכית, קידוחים מרובים מחור כניסה לבאר אחת (לכוונים שונים וגם בעומקים שונים – לשכבות קרקע שונות), שיטות ניטור מתקדמות תוך כדי קידוח. קידוח בארות צרים ושימוש בתחליפים לבוץ הקידוח הרגיל – כמו קידוח פנאומטי או תחליפים סינטטיים לבוץ המבוסס מים.¹²

בבארות אופקיות, השימוש במשטחים המהווים פתח כניסה למספר בארות יכול לצמצם בצורה משמעותית את המספר הכולל של משטחי הבאר, את דרכי הגישה, את נתיבי הצנרת ואת מתקני הייצור הנדרשים ובכך לצמצם את ההפרעות לסביבת המגורים הטבעית, להשפעות על האוכלוסיה ול"טביעת הרגל" הכוללת על הסביבה.

בקידוח פנאומטי משתמשים באוויר או גז אחר במקום בוץ הקידוח. תהליך זה מתאים לסוגים מסוימים של מאגרים בלבד ועלול גם ליצור תהליכי פיצוץ לא מבוקרים בתוך הבאר, אך מבחינה סביבתית יש פחות נוזלים וכימיקלים לטיפול- עובדה המקוזת גם את עלויות הטיפול בפסולת.^{12 13}

אנו ממליצים לבדוק במגע עם מול חברות, אם נמצאות בתהליכי יישום של קידוח באמצעות גז לפני השקעות הפיתוח בטיפול במים.

3.3 מים מופקים (Produced Water)

במהלך הפקה של גז ונפט, מתקבלות כמויות גדולות של מים מופקים ושל שפכים תעשייתיים המכילים רכיבים אורגניים ואנאורגניים שונים. פליטה של מים אלה לסביבה תזהם את הקרקע ואת מקורות המים.¹⁴

מים מופקים מהווים את מקור השפכים הגדול ביותר בתעשיית הגז והנפט. מים מופקים מורכבים ממים שנמצאים באופן טבעי באזור המאגר התת קרקעי של הגז/נפט ומכילים תערובת של הידרוקרבונים נוזליים/גזיים, מוצקים מרחפים ומומסים, מוצקים מופקים כמו חול ותוספים שונים שהוזרקו יחד עם המים המוזרקים למאגר כתוצאה מתהליכי ההפקה.¹⁵ הרכב המים המופקים אינו קבוע. הוא משתנה לפי המיקום הגאוגרפי של הבאר, התצורות הגאולוגיות במאגר וסוג ההידרוקרבונים המופקים. ההרכב והכמות של המים המופקים משתנים אף במהלך זמן החיים של באר מסוימת, במיוחד אם נעשים תהליכים של הזרקת מים למאגר בקרבתה.

במאגרי גז פחות נפוצות הזרקות מים, לכן המים המופקים הם תערובת של מי מאגר ומים שהתעבו. החומציות שלהם גבוהה מזו של מים מופקים מאתר הפקת נפט והנפח שלהם קטן יותר. בהפקות גז משתמשים בכימיקלים כמו מתנול, אתילן גליקול ותריאתילן גליקול, חומרים אלה מגיעים, בחלקם, אל המים המופקים. כמו כן, מטבע הדברים, ריכוז החומרים הנדיפים גבוה יותר.¹⁶ לפני שהמים ממוחזרים או משוחררים לסביבה חובה לטפל בהם לניקוי הידרוקרבון, שמנים ומזהמים אחרים.

ככל שהבאר "בוגרת" יותר כמויות המים המוזרקות גדלות, על מנת להגדיל את תפוקת הבאר בעת שאיבת הנפט והגז ולכן, מתקבלים נפחים גדולים יותר של מים מופקים (חלקם מים מופקים שהיו במאגר עצמו, וחלקם מים שהוזרקו).

אם אין טיפול יעיל בכמויות ההולכות וגדלות של מים המופקים מהבאר, יכולה להגרם פגיעה באיכות מי השתייה בעקבות דליפות ממקומות בהם הוחדרו/הושלכו מי שפכים כמו גם פגיעות סביבתיות נוספות. מים אלה מנוהלים כיום באמצעות מנגנונים שונים, כולל הזרקה תת קרקעית, טיפול, מחזור ושחרור לסביבה.

באופן מסורתי, הזרקה תת קרקעית הייתה אופציית הפליטה העיקרית לסביבה עבור מים מהפקות נפט וגז. תהליך זה כאמור, משתמש בבארות ייעודיות כדי להכניס את המים לתוך תצורות גיאולוגיות

העשויות מסלעים נקבוביים והמופרדות ממי התהום על ידי שכבות רבות של סלע בלתי חדיר שעובין אלפי מטרים. הזרקה תת קרקעית של המים המופקים איננה תמיד אפשרית, כי אזורים המתאימים להזרקה עלולים לא להיות זמינים. בדומה למאגר מפיק, חייבת להיות תצורה גיאולוגית נקבובית וחדירה המסוגלת לקבל את הנוזלים המוזרקים בסביבתה. אם הדבר איננו קיים במקום, ניתן להעביר את המים המופקים לאתר הזרקה רחוק יותר. באתרים עירוניים מפותחים היטב, הונחו צינורות להעברת המים המופקים לאתרים מיוחדים. כך ניתן לצמצם את הובלת המים במשאיות, את התנועה, את פליטות האגוזים ואת בלאי הכבישים המקומיים הנובעים מכך. בארות פסולת המיועדות להזרקה מותרות בכפוף לחוק הפדרלי האמריקאי בנושא בטיחות מי השתייה (SDWA) Safe Drinking Water Act - פירוט בסעיף 4.4). ההזרקה מתבצעת במסגרת תוכנית בקרה מיוחדת. תוכנית זו היא תהליך המורשה ומנוטר בקפדנות ומערב אמצעי בטיחות סביבתיים רבים במקום. איכות המים המוזרקים חשובה בכדי למנוע איכול (קורוזיה) של הצנרת המוליכה את המים וגם בכדי להגן על ה"סטרייליות" של המאגר ולמנוע החדרת אורגניזמים זרים לתוכו.

לפיכך כאשר משתמשים במי ים להזרקה למאגר כוללות הפרדה של החומר המוצק המרחף במים, בקטריה ויצורים ימיים אחרים. הטיפול בבקטריה נעשה בדרך כלל על ידי עירוב כלור והיפו-כלוריטים, כאשר העירוב נעשה בפי המשאבה המשמשת לשאיבת המים לשימושים השונים. הכלור הוא בדרך תוצר של אלקטרוליזה של מי ים. החומר המוצק מופרד על ידי סינון. בנוסף יש טפול בחמצן המומס במים. השיטה המקובלת היא אוורור בוואקום שבו המים עוברים שלבים שונים של וואקום כאשר החמצן נפלט מהמים, עד שכמות החמצן במים יורדת מ-8 מ"ג/ליטר לפחות מ-50 מיקרוגרם/ליטר.

בעיה נוספת הזקוקה לטיפול היא האפשרות של זיהום המים בבקטריות מיוחדות הגדלות במצע אנארובי (חסר חמצן). בקטריות אלה כוללות כאלו המחזרות סולפטים ועשויות לגרום לאיכול מהיר של צנרת פלדה ולדליפות משמעותיות מהמערכת. בכדי לנטרל בקטריות אלה מוצע להוסיף למים במינון שבועי תוספות כגון תרכובות אלדהידיות (פורמאלדהיד או גלוטאראלדהיד) במינון של 1000 מ"ג/ליטר למשך 1-2 שעות. צריך לשנות את המינון וזמן עירוב התוספים האלדהידים לפי תוצאות של ניטור הבדוק המצאות של פלנקטון ובקטריות הקשורות אליו.

קצב הזרימה וכמות המים הכללית המחייבת טיפול, מרכיבי המים המופקים, יעדי טיפול ודרישות למחזור המים או לפליטתם לסביבה, הם אלה שיקבעו את אופי מתקני המחזור באתר. במקרים מסוימים יהיה זה מעשי יותר לטפל במים עד לאיכות בה ניתן יהיה להשתמש בהם לתהליך השבירה ההיזראולית שיבוצע לאחר מכן, או לשימוש תעשייתי אחר, ולא לטפל בהם כך שניתן יהיה לשחררם לגוף של מים עיליים או לשימוש כמי שתייה ע"פ החוקים והתקנות.

מיחזור או שימוש מחדש במים מופקים, עשוי לצמצם את הביקוש למים ולספק משאבי מים נוספים עבור אזורים מוכי בצורת או צחיחים.

פיתוח תהליכי שבירה הידראולית או תוספי נוזל שיאפשרו את השימוש במים עם TDS גבוה (TDS – Total Dissolved Solids), ירחיב את אפשרויות הטיפול בשפכים ויקטין את השימוש במים.

כמויות מים מופקים משתנות באופן ניכר הן בהתאם לסוג הייצור (נפט או גז) והן במשך חיי השדה. ערכים טיפוסיים עבור שדות הנמצאים בים הצפוני נעים בין 2400-40000 מ"ק ליום עבור מתקני נפט ובהפקות הגז הערכים נמוכים הרבה יותר¹⁷. לעתים קרובות, כמויות המים קטנות יותר בשלב מוקדם של חיי הייצור של השדה, אך בחלוף הזמן, יותר מים מופקים מהמאגר והם עשויים להגיע ל-80 אחוזים או יותר מהחומר המופק כאשר מתקרבים לסוף חיי השדה.

התוצאה של זרמי פסולת מימיים אחרים כגון נזילות ופליטות של מי ניקוז עשויה להיות זיהום של מי תהום ושל מים עיליים (surface water). התוצאה של ההשפעות עשויה להיות מודגשת במיוחד במקומות בהם משתמשים במי תהום ובמים עיליים (water surface) למטרות משק בית או במקומות בהם מושפעים שטחי דיג או אזורים חשובים מבחינה אקולוגית.

3.3.1 מהלך המים

נחזור לדיאגרמה בעמוד 18, וננסה לעקוב אחר מהלך המים. נחלק את תהליכי הטיפול במים לשלושה חלקים, כאשר אנו מתייחסים לעובדה שהמים מכילים מוצקים מרחפים בגדלים שונים – חלקיקי חול ונפט וחומרים מומסים:

- 1) סינון המוצקים המרחפים כמו חול.
- 2) הוצאת טיפות הנפט שנתרו.
- 3) הוצאת חומרים שמומסים במים המופקים.

באופן כללי, מערכות הטיפול במים מורכבות בדרך כלל ממערך טורי של כמה מערכות, מתחילים בסינון החלקיקים הגדולים יותר ובהמשך נעים בכיוון הוצאת חלקיקים קטנים יותר ויותר עד לשימוש בשיטות ממברנליות.

בהמשך נביא טכנולוגיות חדשות ומתפתחות לטיפול בנושאים אלה.

3.3.2 הוצאת חלקיקי חול

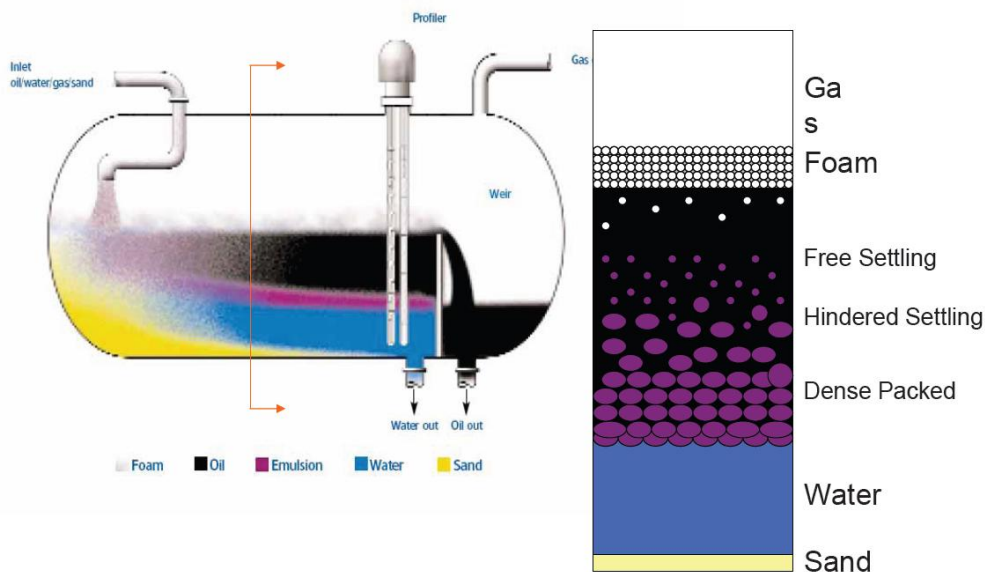
(1) הפרדה גרביטציונית (Gravity separation)

מסתמכת על הפרדה מתוך השוני בגודל ובצפיפות החלקיקים בפאזות השונות.

ההפרדה בין הפאזות השונות נעשית, כאשר מאפשרים לתערובת לעמוד ולהיות מושפעת מכוח הגרביטציה כך שהפאזה הצפופה/כבדה יותר שוקעת, וזו הקלה יותר צפה מעליה – כל זאת עם או בלי עזרת כימיקלים.

בשלב זה מטרת תהליך ההפרדה היא הפרדת המים מהתוצר הראשוני. בשלבים הבאים המים ממשיכים לעבור תהליכים שונים כדי להשביחם לשימוש חוזר או כדי לשחררם לסביבה.

תרשים 8 – הפרדה אופיינית ב-3 שלבים



Section Through Separator

(תרשים 8¹⁸)

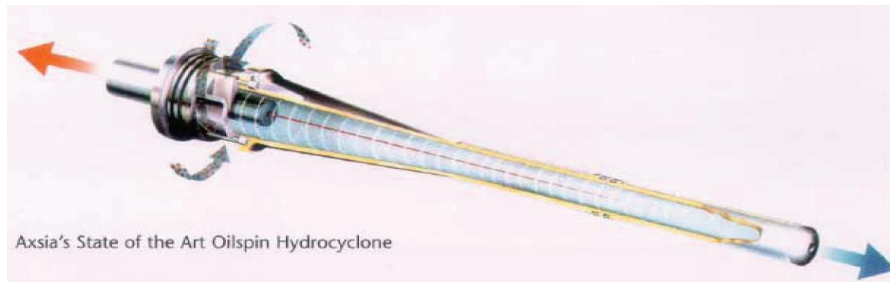
(2) הידרוציקלונים להפרדת חול-מים (De-Sanding (Solid/Liquid) Hydrocyclones

בהידרוציקלון יש שימוש בכוח צנטריפוגלי על מנת להפריד את המולקולות הקלות יותר מהמולקולות הכבדות יותר.

היתרונות: קטן וקומפקטי, יעיל, אינו תלוי תנועה, אין צורך בכימיקלים נוספים, קל לתחזוקה.

החסרונות: יש לחץ מינימלי לעבודה, זרימה רבה מידי או מועטה מידי מקטינות את היעילות, solids erosion.

תרשים 9 – הידרוציקלון



(תרשים 9¹⁸)

סינון (Media filtration (sand filter / dual media filter / deep bed filter) (3

מסנני חול, חוטים וכד'.

סליל קרמי לחסימת החלקיקים - (Physical barrier (cartridge / sock) (4

הפרדה באמצעות ממברנות (Membrane Separation (MF) (5

שיטות הפרדה בממברנות בלחץ גבוה כולל אולטראפילטראציה (UF) וננופילטראציה (NF) (לחלקיקים קטנים ומולקולות) וכן אוסמוזה הפוכה (RO) (מלחים) משמשות בטיפול בשפכי מים בעולם בתעשיות רבות ומגוונות.

הממברנות עשויות מחומרים שונים במיוחד פולימרים כמו צלולוז, ניילון, PTFE, וכן קיימות ממברנות קרמיות.

היתרונות בהן מגוונים וכוללים גודל קטן של המערכות, שליטה טובה על התהליך, תחזוקה קלה ומעורבות נמוכה של חומרים כימיים.

החסרונות קשורים בעמידות לשינויים בקצב הזרימה, באורך החיים של ההתקן, צורך בטיפולים מקדימים לטיהור קודם של המים המטופלים (פיתוח הממברנות הקרמיות מנסה לענות על חלק מהחסרונות אלה).

לעיתים קרובות מערכות ממברנליות הן מערכות משולבות כדוגמת המערכת המתוארת להלן:¹⁶



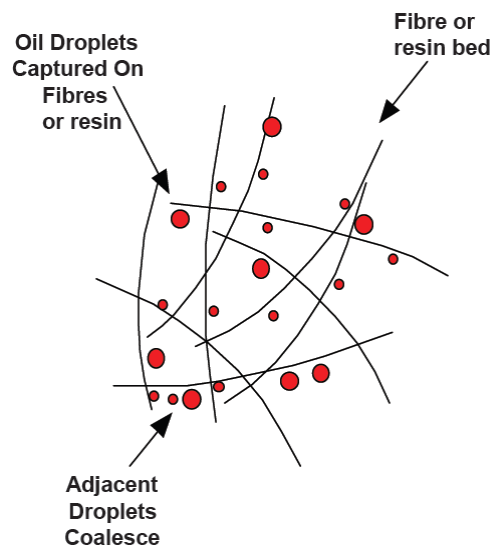
(6) להפרדת מים-נפט

(א) הפרדה גרביטציונית – כמו ב-3.3.2 בסעיף 1.

(ב) Coalescence enhanced gravity separation

מצע או אריזה מסודרת מעודדים התקבצות או היטמעות של טיפות קטנות בטיפות גדולות יותר בין הסיבים במצע. בין חסרונותיו של המצע ניתן למנות הרס כתוצאה מהידבקות מוצקים אליו, כלומר - דרוש סינון מקדים, כימיקלים פעילי שטח עלולים לעשות דאקטיבציה לפני השטח של ההתקן, וכן העובדה שהתקן כזה תלוי גודל טיפות – כלומר – מתאים לגדלים מסוימים בלבד.

תרשים 10 – Coalescence enhanced gravity separation



(תרשים 10¹⁸)

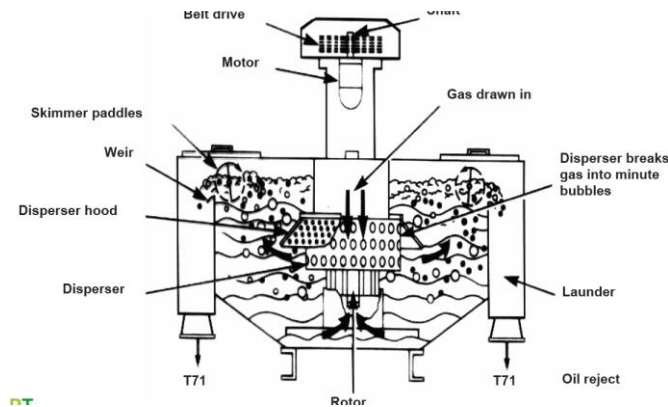
(ג) הידרוציקלוניזציה להפרדת מים-נפט (De-Oiling (Liquid/Liquid) Hydrocyclones – כמו בסעיף הקודם.

(ד) Gas Flotation

טיפות זעירות של שמן נצמדות לבועות הגז שמוזרקות באופן מכני (IGF), או ממוסות בלחץ גבוה ואז משוחררות (DGF), כאשר גודל בועות הגז קטן מגודל הטיפות, בשלב זה ניתן להסיר את שכבת השומן שצפה כקצף.

האפקטיביות של התהליך עולה, כאשר משלבים תוספות כימיות (למשל קואגולציה ופלוקולציה), באמצעים אלה מתאפשר ניקוי 70% מהמוצקים המומסים. חסרונות בשיטה קשורים ברגישות שלה לתנועות הפלטפורמה (במקרה של offshore), וכן בעובדה שהיחידות גדולות ומסורבלות.

תרשים 11 – ציוד לציפת גז – IGF מכני



(תרשים 11¹⁸)

(ה) ספיחה באמצעות פחם פעיל, אורגנופחם וכד' Absorption (organoclay, etc.)

ספיחה באמצעות חומרים מתכלים (עוד דוגמאות – שבבי עצים, קליפות קוקוס)^{19 20} Walnut Shell Media Filtration.

(ו) הפרדה באמצעות ממברנות (ceramic, vibrating)

UF היא שיטה אפקטיבית לטיפול במים מהולים בשמן, RO משמשת לטיפול ברכיבים מומסים ויוניים והשילוב ביניהן נותן מענה מסוים לטיפול במים מופקים.¹⁴

C-Tour הוא שיפור נוסף בתהליך ההידרוציקלונציה. ב-C-Tour משתמשים בגז דחוס לשיפור יעילות סילוק ההידרוקרבוניים. הגז הדחוס המוזרק מוצה החוצה הידרוקרבונים מומסים בפאזה המימית.²⁰

Steam stripping – אפליקטיבי גם בהפקות גז. בשיטה זו משתמשים בקיטור להוצאת ההידרוקרבוניים ממים דחוסים.²⁰

3.3.3 טיפול במומסים

- (1) ספיחה (Absorption (Activated Carbon, Organoclay, etc.)
 - (2) הרחפה ושיקוע (Aeration & sedimentation (for iron removal)
 - (3) Partitioning Manipulation (enticing soluble pollutants into oil phase prior to De-Oiling)
 - (4) מיצוי סולבנטים - Solvent Extraction
 - (5) טיפול ביולוגי (Biological treatment (membrane bio-reactor, fixed film, etc.)
- שיטה לטיפול בחומר אורגני. החיסרון העיקרי טמון בזמני ההמתנה הארוכים הדרושים לביצוע הפירוק הביולוגי. באסדה ימית עם תזרים מים גדול, לא יתאפשר תהליך כזה שכן יהיה צורך במקום אחסון גדול שיכיל את המים במהלך הטיפול הביולוגי.^{19 20}
- (6) חמצון Oxidation
 - (7) הפרדה ממברנלית (Membrane Separation (UF & NF) – כמו בסעיף הקודם.

3.3.4 טיפולים במלחים מומסים במים

- (1) הפרדה ממברנלית (RO) Membrane Separation (RO)
אוסמוזה הפוכה כטיפול שניוני במלחים במים מופקים.²⁰
 - (2) מחליפי יונים Ion Exchange
 - (3) אלקטרודיאליזה (ED) Electrodialysis (ED)
- הפעלה של אלקטרודות בעלות מטענים מנוגדים תגרום לסיפוח יונים חיוביים (על האלקטרודה השלילית) ויונים שליליים (על החיובית בהתאמה). ב- ED ממוקמת ממברנה בין האלקטרודות. ממברנה זו מאפשרת רק ליונים חיוביים או שליליים לעבור.^{16 20}
- (4) אידוי (Evaporation (Freeze/Thaw, ponds, etc.)
- Freeze-Thaw/Evaporation – בתהליך זה משתמשים בטמפרטורות טבעיות לאזור מסוים על מנת להקפיא ולהפשיר את המים המופקים, כך שהמים המתאדים הם נקיים

ונשאר תמיסה מרוכזת של המזהמים והמוצקים שהתגבשו. מכיוון שמנוצלות טמפרטורות טבעיות, לתהליך זה עלות נמוכה, וכן צריכה נמוכה יחסית של אנרגיה, בנוסף, אחד מתוצרי התהליך – מים – יכול לעבור הלאה לשימושים נוספים (למשל חקלאות).^{16 20}

5) זיקוק Thermal distillation

במים מופקים: מבצעים תהליכי הפרדה פיסיקליים וכימיים רבים באמצעות קואגולציה ואחר כך סינון.

מים מופקים מכילים לעיתים קרובות גזים כגון: CO_2 , O_2 , H_2S , CH_4 ויש צורך להשתמש בטכנולוגיות degasser.

לטיפול במתכות כבדות ובקולואידים משתמשים באלקטרוקואגולציה, שהיא אלטרנטיבה בעלות אפקטיבית לטיפול בזיהומי מים או כטיפול מכין להפרדה באמצעות ממברנות.

אם לא ניתן להיפטר מפסולת דרך מניעת זיהום, יש לבצע ניהול פסולת באמצעות צעדים אחרים – צמצום, שימוש מחדש, מיחזור, שאיבה, טיפול והשלכה באישורים מתאימים.

היות ומים מופקים באופן טבעי יחד עם הנפט, אין סיכויים רבים לביטול מוחלט של התופעה. אולם, יש התפתחות מסויימת בנושא של הגבלת שאיבת המים יחד עם הנפט. טכנולוגיות להאטת חלחול המים אל מאגר הנפט/גז, יכולה לספק דרך יעילה לטיפול הנדרש המטרה לצמצם את כמויות המים. הזרקה מחדש של מים מופקים, אם לתוך המאגר או לתוך תצורה גיאולוגית אחרת, יכולה לספק פתרון מעשי ואופטימלי, אם קיימות תצורות גיאולוגיות מתאימות.⁴

טכנולוגיות המיושמות במטרה להקטין שאיבת המים המופקים, מתחלקות לכאלה היוצרות הפרדה בתוך הבאר (באמצעות משאבות בעלות פעולה כפולה²¹, הידרוציקלונים והפרדות נוספות)¹⁵, וכאלה המונעות מהמים להגיע אל תוך הבאר באמצעות חסימות מים מכוניות בתוך הבאר (למשל, באמצעות מלט או חול לסתימת האזורים מהם מגיעים המים)¹⁵. בנוסף, אפשר לבצע חסימה כימית של המים באמצעות תמיסות המכילות לדוגמא ג'ל פולימרים כמו פוליאקרילאמידים שגם הן משמשות לחסימת סדקים ונקבוביות מהם זורמים מים לבאר.¹⁵

כיום, יש נסיונות לשימוש באגנים ירוקים כאפשרות נוספת לטיפול במים מופקים.

לאחר טיפול במים המופקים, הם יכולים להיות מושבים לתהליך (אם כמים לתהליכי הקידוח או כמים מוזרקים להגדלת הלחץ במאגר), במטרה לשפר את יעילות ההפקה, אפשר לשחררם לסביבה, בהתאם

לרגולציות המתאימות – אם באמצעות הזרקה לבארות פסולת מורשות או שחרור המים למקורות מים עיליים סמוכים – ים, נהרות אגמים וכו'.

מחקרים רבים נעשים על אפשרויות השימוש הנוסף במים מופקים לאחר טיפולים מתאימים. בנסיכות עמאן פועלת מערכת מסחרית ראשונה לטיפול במים מופקים בתהליך תלת שלבי הכולל – הפרדת מים/נפט, אגן ירוק ומתקן אידוי וגיבוש מינרלים לטיפול ב- 45000 מ"ק מים מופקים ליום. אגן ירוק הוא מערכת ביצות מלאכותיות שמטרתה חיקוי תהליכי הטיהור המתרחשים בביצה טבעית. יתרונות שיטה זו כוללים יצירת קולחין באיכות גבוהה לשימושים נוספים (חקלאות, שימושי גינון עירוניים והזרמה לנחלים), חסכון בהשקעת האנרגיה, יצירת סביבה עשירה בצמחיה ועוד. במסגרת החסרונות ניתן למנות את שטחי הקרקע הגדולים הנדרשים, בעיות ריח, תלות בתנאי מזג האוויר והקרקע ומשך ההקמה הארוך יחסית של מערכות כאלה.^{22 23}

חקלאות היא צרכן המים בגדול ביותר בעולם, כאמור, מעל 70% מצריכת המים הגלובלית. מים איכותיים להשקיה חיוניים לשמירה על תפוקת הקרקע, ולהגנה על הסביבה ועל בריאות הציבור. השקיה ארוכת טווח של קרקע במים עם אחוזים גבוהים של מליחות תגרום להרס התכונות הפיסיות והכימיות של האדמה כך שלא תהיה פורה לגידול איכותי של יבולים.¹⁴

על מנת לטפל במים מופקים, כך שיתאימו לשימוש חקלאי (חשוב במיוחד באזורים צחיחים או מועדים לבצורת) יש צורך בטכנולוגיות פשוטות וזולות במטרה להפוך את התהליך לעדיף על פני הזרקת המים.

4. התייחסות לנושא הרגולציה בגז ונפט

השווקים המתפתחים במהירות הגדולה ביותר בעולם נמצאים במזרח אסיה, באמריקה הלטינית ובאפריקה, אולם בטווח הקצר, שוק היעד הראשי של תעשיית המים הוא, באופן טבעי, העולם המערבי.

לכן, חיוני לדעת ולהבין מהי הרגולציה המתאימה בעולם המערבי שמובילה בעקבותיה את הרגולציה המתפתחת המזרחי..

השווקים הגדולים בעולם המערבי נמצאים באירופה במדינות כמו נורבגיה ורוסיה, וכמובן בארה"ב.

אם כן, חשוב להבין מהי הרגולציה **הקשיחה** (בניגוד לרגולציה מזדמנת שנוטה להשתנות מידי פעם), ומהי המגמה שלה, כיוון שזו מכתיבה את גודל ההשקעה של חברות בקניית טכנולוגיה חדשה. חברה תשקיע רק באם הטכנולוגיה תואמת רגולציה ברורה בעניין.

כמו כן, צריך לשים לב למידת האכיפה, למשל, בסין, כפי שהבאנו בדוגמא בסעיף 4.1, עד לאחרונה הייתה אמנם חקיקה מתקדמת מאוד אך לא הייתה אכיפה, דבר שביטל את אפקטיביות הרגולציה.

נסקור בקצרה את הרגולציה הרלוונטית בארה"ב – קידוח והפקה של נפט וגז בארה"ב נמצאים תחת מערכת מורכבת של חוקים פדרליים, מדינתיים ומקומיים, המתייחסים לכל פן בתהליך הקידוח וההפקה.

הרגולטור הראשוני הוא **BLM (Bureau of Land Management)** – סוכנות הנמצאת תחת משרד הפנים האמריקאי (**United States Department of the Interior**) ותפקידה מתן זכויות על הקרקע. BLM עורכת מכרזים באמצעותם נקבעת תכנית מתאר לחפירות ביבשה. הזכיון הספציפי לכל באר ניתן ע"י המדינה עצמה באמצעות Oil and Gas Comition מקומי. האישורים לבארות כוללים את מיקומן, המבנה שלהן, דרך ההפעלה, אופן הנטישה, ניהול המים והפסולת, הזרקות תת קרקעיות ועוד.

ל- **BLM** מקבילה העוסקת בקידוחי Offshore – **BSEE(Bureau of Safty and Invironmelat – Offshore Informent)**

לאחר הגילוי והפיתוח הראשוניים, על שלב התפעול, אחראי הרגולטור המשני, ה-**EPA (Environmental Protection Agency)** – הסוכנות האמריקאית להגנה על הסביבה מפקחת על רוב החוקים הפדרליים בעניין זה.

רגולטור שלישי הוא **FERC (Federal Energy Regulatory Comission)**. FERC היא סוכנות אמריקאית בלתי תלויה בתוך המחלקה האמריקאית לאנרגיה (**USDE – United State Department of Energy**) והיא רגולטור ההולכה והמכירה, תפקיד הכולל בתוכו טיפול במים וזיהום אוויר כתוצאה מההולכה.

חוקים פדרליים רבים מיושמים ע"י המדינות תחת הסכמים ותוכניות שנערכים באישור הסוכנות הפדרלית המתאימה.

סדרת החוקים הפדרליים כוללת את החוקים הבאים כאשר כל החוקים, התקנות והרישיונות המתייחסים לקידוח והפקה של נפט וגז טבעי, נכונים גם לקידוח והפקת גז מפצלים.

CWA (Clean Water Act) - מתייחס לשחרור מים על פני השטח במטרה להגן על מקורות המים העיליים מפני זיהום מעבר למותר.

SDWA (Safe Drinking Water Act) – מתייחס לבטיחות המים לשתיה, ומתוך כך להזרקות המים במטרה להגן על מי התהום.

(Oil Pollution Act) OPA – מתייחס להקטנת הנזק הסביבתי כתוצאה מדליפות נפט.

אפשר לציין גם את:

(National Environmental Policy Act) NEPA – שם קידוחים והפקות הנערכים על קרקעות פדרליות תחת פיקוח מחמיר למניעת פגיעה סביבתית.

(Resources Conservation and Recovery Act) RCRA – מטרתו שמירה על בריאות הציבור, הסביבה ומתייחס לניהול פסולת מסוכנת. (מים המופקים בסקטור הגז והנפט פטורים בדרך כלל מרוב דרישות חוק זה, אך יש מגמה של שינוי בעניין זה)⁶

אם יעלה הצורך, נוכל להיות לעזר לחברות בפירוש החוקים הרלוונטיים והבנת הרלוונטיות שלהם בנושא מסוים.

5. אתגרים לחברות מים בדגש על חברות ישראליות

5.1 הגנה על הסביבה

עם התגברות המודעות הסביבתית ובהתאמה, ההתפתחות ברגולציות ובאכיפה בתחום הסביבתי, תעשיית הגז והנפט נאלצת לשנות ולשפר, חדשות לבקרים, את תהליכי העבודה והטכנולוגיות הרלוונטיות, על מנת לעמוד בחוקים המתקשחים באופן שיהיה כלכלי מבחינתה להמשיך ולהפיק גז ונפט.

הדבר בולט במיוחד במדינות כמו אמריקה הלטינית ורוסיה, בהן לא היה דגש על ההשפעות הסביבתיות בעבר, וכיום יש אכיפה מוגברת של הקהיליה הבין לאומית המאלצת אותן לבצע שינויים מרחיקי לכת על מנת לעמוד בתנאים הבינלאומיים.

עוד דוגמא מעניינת אפשר למצוא בסין, בעבר הפרובינציות היו בדילמה בין הצורך לעמוד ברגולציה של הרשויות המרכזיות, לבין שימור התעסוקה, דבר שהוביל לאי סדרים בפרובינציות המרוחקות. בשלוש השנים האחרונות השלטון המרכזי החל לאכוף את החוקים הסביבתיים בצורה אפקטיבית, ושולח יחידות בקרה של הסוכנות הסביבתית לבדוק את הרשויות של הפרובינציות. אם בעבר הפרובינציות היו מאשרות חריגות מתוך הבנה שבשתיקה עם הרשויות המרכזיות, היום הן אינן יכולות לעשות זאת כיוון שיש פיקוח ואכיפה.

בהודו מתקיימת אכיפת החוקים הסביבתיים במדינות המפותחות יותר כדוגמת גוג'ראט.

כמעט כל החדשנות הטכנולוגית שנובעת מהרצון לייעל את תהליכי הקידוח וההפקה ולשפר את כלכליותם, מאמצת להגנה על הסביבה, או ששמירה של הסביבה היא תוצאת לוואי שלה. זאת מכיוון שתהליכים יהיו כדאיים כלכלית רק בתנאי שהם עונים לרגולציות סביבתיות. כמו כן, בשל העובדה שחסכון בזמן, אנרגיה, מים וכו', (גורמים המגדילים יעילות כלכלית של תהליך), גם באותו אופן מקטינים את הפגיעה שלו בסביבה.

כדוגמה אפשר להביא פיתוח של SBM (Synthetic Based Mud) כתחליף ל-OBM. OBM משמש במקומות בהם לא ניתן להשתמש ב-WBM בגלל סיבות של טמפרטורות גבוהות, זוויות קידוח חדות, עומק גדול של באר ועוד. SBM מפותח במטרה להחליף את ה-OBM שמהווה זיהום סביבתי בעייתי לטיפול. תכנון כימי נכון יאפשר הגדלת מהירות הקידוח וכן קידוח למרחקים גדולים יותר, עלויות נמוכות יותר של טיפול בפסולת והבטחת פסולת רעילה פחות.

נוזלים סינטטיים המשמשים להרכבת ה-SBM יכולים להיות למשל – linear, poly alpha olefines, fatty acid esters, internal olefins, alpha olefins ואחרים.¹²

בנוסף, מכיוון שאחת מהבעיות החמורות מבחינה סביבתית קשורה בחלחול חומרים רעילים למי התהום, אנו סבורים שמחקר ייעודי הבודק אפשרויות פיסיות להגנה על מי התהום (יצירת חיץ), בנוסף להגנות הקיימות על צינורות ההפקה כיום עשוי להוות דיסציפלינה פיתוחית מעניינת ורלוונטית לנושא זה.

עם התקרבות ההפקות למוקדי אוכלוסייה, חלות החמרות בחוקים והתקנות המאפשרים הזרקות מים לאדמה, דבר המגביר את הצורך במציאת פתרונות לטיפול במים המופקים, כפי שיפורט בסעיף הבא.

5.2 סינון, הפרדה וטיפולים נוספים במים

המוטיבציה לשיפור תהליכי הסינון וההפרדה נובעת, כמובן, מהרצון לייעל ולהוזיל תהליכים תעשייתיים. היא קשורה בקשר הדוק לסעיף הקודם המדבר על ההגנה על הסביבה, שכן, ייעול תהליכים אלה מגדיל את היכולת למחזר מים בתהליך, להפנותם לשימושים נוספים או לפלוט אותם לסביבה תוך מזעור הנזק הסביבתי. אם ניתן למחזר ולהשתמש בכמויות גדולות יותר של מים המופקים בתהליכי הקידוח וההפקה של גז ונפט, אזי קטן השימוש במים נקיים.

בפרק 3 פרטנו שיטות מגוונות לטיפול במים הקשורים בקידוח והפקה של גז ונפט. חלקן טכנולוגיות מסורתיות, חלקן חדשות. הצבענו על נקודות תורפה בטכנולוגיות השונות ואנו מאמינים כי יש מקום לחדשנות בשיפור הטכנולוגיות הקיימות – כל אחת כשלעצמה וכן, מכיוון שטיפול במים מופקים,

כאמור, נעשה באמצעות מערכת המורכבת ממספר אלמנטים, אנו רואים אתגר לחדשנות גם כאן, ביצירת מערכות יעילות יותר וכדאיות יותר מבחינה כלכלית.

בנוסף יש מקום בולט מאוד לחדשנות בתחום הממברנות, כאשר ברור שממברנות איכותיות יותר, בעלות זמן חיים ארוך יותר וכאלה שהן עמידות בתנאי לחץ וטמפרטורה שונים, עשויות להיות מעניינות בהקשר של תעשיית הקידוח וההפקה של הגז והנפט. כחלק מהאתגרים בתחום הממברנות ניתן למנות:²⁴

5.2.1 הוצאת מינרלים המבוססת על שימוש בממברנות להקטנת נפח התמלחת.

5.2.2 פיתוח תהליכים להגנת הממברנות כולל שכלול תהליכי אפיון לגבי הרכב המים המדויק שאפשר להעביר הלאה לטיפול ממברנלי מבלי להרוס את הממברנה.

5.2.3 הארכת זמן חיי הממברנות.

5.2.4 שכלול מערכות אוטומציה לניהול ובקרה on line וכן מערכות מידע מרכזיות הקשורות אליהן בתחום ניהול המים.

בחלק מהמקרים פתרון הטיפול במים לא נעשה במקום, מסיבות שונות, והטיפול מועבר למקומות מרכזיים, דבר שבטווח הארוך לא מאפשר לאתר לגדול. אחד האתגרים הוא לפתח מערכות מתאימות להפעלה במקום הקידוח.

נקודה נוספת, לתשומת לב חברות העוסקות בכימיקלים – פיתוח ביוציידים וכימיקלים לטיפול במים הנכנסים לתהליך (נוזל הקירור והסיכוך של המקדח, נוזלי השבירה), כולל חומרים למניעת קורוזיה.

בנושא מניעת הקורוזיה יש צורך אמיתי בפיתוח חומרים עמידים, חזקים, לא מתכתיים ובעלי עמידות בטמפרטורות ולחצים גבוהים במחירים נמוכים יותר, במיוחד לשימוש בקידוחים ימיים.

5.3 פצלים

הפקת גז מפצלים היא תחום שאנו רואים בו פוטנציאל גדול מאוד לחדשנות. זהו תחום שהתפתח מאוד בשנים האחרונות, הוא דינמי מאוד ולא מקובע. יש שימוש אינטנסיבי במים לתהליכי ההפקה של הגז מהפצלים, מחזור מוגבל בגלל הרכב המים ושפכים רעילים בכמות גדולה היוצאים מהתהליך.

השימוש בגז טבעי כשלעצמו עשוי במקומות מסוימים להוות תחליף לשימוש בפחם ואף באנרגיה גרעינית, להקטין פליטות גזי חממה ובמובן הזה – להועיל לשימור הסביבה.

הפיתוחים הטכנולוגיים שהגיעו קדימה את שוק הגז מהפצלים בשנים האחרונות הם- שבירה הידראולית וקידוחים אופקיים ורב שכבתיים. אולם פיתוחים אלה, במיוחד השבירה ההידראולית העלו איתם גם סוגיות סביבתיות כפי שתיארנו, במיוחד לאור העובדה שמאגרי גז מפצלים מנוצלים בקרבה הולכת וגדלה לאוכלוסייה (למשל- מאגר הפצלים העצום בצפון מזרח ארה"ב Marcellus Shale). דבר זה מעורר התנגדות שהולכת וגוברת, לשימוש בשיטת השבירה ההידראולית בקידוחי בארות הגז, הנובעת מהחשש לזיהום מקורות מים בכימיקלים בהם משתמשים בעת הקידוח, התנגדות אשר כבר הביאה לאיסור השימוש בשיטת השבירה ההידראולית במדינת ניו ג'רסי, לקריאה לאיסור השימוש בשיטה בכל מדינת ניו יורק לאחר שהתגלו עקבות מתאן במי התהום²⁵ (הוסר באחד עשר ביולי 2011), לצעדים דומים בקוויבק²⁶ ולמחאה רשמית במדינת קליפורניה, מחאה שמטרתה למנוע החכרת אדמות בעלות "רגישות סביבתית" במחוזות מונטריי ופרסנו למטרת קידוחי נפט וגז²⁷.

התנגדות נוספת לקידוחים ולהפקת גז טבעי מפצלים בשבירה הידראולית נובעת מהצורך בשימוש בכמויות מים גדולות, ביחוד באזורים צחיחים, או בעת בצורת, כאשר החשש הוא שיגרם מחסור במים לצרכים חיוניים אחרים²⁸.

השימוש ההכרחי במים לשם קידוח והפקת גז ממצבורי פצלי השמן מציב כאמור אתגרים שונים אשר העיקריים שבהם:

1. הבטחת כמות המים הנדרשת לפעולות קידוח אופקיות בשיטת השבירה ההידראולית.

הכמות הנדרשת לקידוח באר גז אופקית אחת בשבירה הידראולית ולהפקתה עשויה לנוע בין 7,600-19,000 מ"ק²⁹ ולהגיע עד לכ- 28,000 מטרים מעוקבים³⁰ ויותר. כמות המים המשוערת בה משתמשים בקידוחי גז טבעי בשבירה הידראולית בארה"ב עשויה להגיע לכ-300 מיליון מ"ק³¹ בשנה. כמות מים ענקית זו מסופקת ממקורות שונים ביניהם מקורות עיליים כגון נהרות, אגמים ומקווי מים, ממי תהום, ממאגרי מים עירוניים וממי שפכים מטוהרים וכן ממים מופקים מטוהרים.

במקרים רבים חייבת חברת הקידוח להביא את המים ממרחקים גדולים ולאכסנם במיכלים בקרבת אתר הקידוח. האמצעי האידיאלי להבאת מים לאתר הקידוח הוא שאיבתם ממקורות שונים והובלתם בצנרת על פני הקרקע לאתר. דרך אחרת להבאת מים לאתר הקידוח היא באמצעות משאיות מיכל. אולם, הובלת מים בכמויות הגדולות הנחוצות לפעולות הקידוח וההפקה באמצעות משאיות במערכת כבישים ציבוריים עלולה לגרום לנזק לכבישים, להוסיף לגודש התנועה, לזיהום אוויר וכן לסיכוני בטיחות³².

2. בניית בארות מושכלת להפקת גז יעילה, לבלימת דליפות ולמזעור הגירה של מזהמים (כימיקלים) הנגרמת כתוצאה מפעולות הקידוח, וכן להגנה על מי תהום ועל אספקת המים הציבורית.

חוק האנרגיה האמריקאי משנת 2005³³ פטר את חברות הגז מהצורך לגלות ולדווח על הכימיקלים בנוזל הקידוח. חוק זה גרם, לחשדנות בקרב חלקים נרחבים בציבור בנוגע לסכנות הבריאותיות וההשפעה על הסביבה הנגרמות כתוצאה מכימיקלים אלה³⁴. שתי מדינות בארה"ב, טקסס וקולורדו, הוציאו רק לאחרונה (ב-13 בדצמבר 2011) תקנות המחייבות את חברות הגז להצהיר על הכימיקלים בהם הן משתמשות בקידוחי גז טבעי בשבירה הידראולית³⁵.

יש הטוענים שקיימת אפשרות להגירת כימיקלים אלו וכימיקלים מסוכנים אחרים (כקדמיום, ארסניק, כספית, עופרת ואף חומרים רדיואקטיביים טבעיים) המופקים בעת הקידוח והעלולים לחזור למאגרי מי שתייה תת-קרקעיים³⁶. אפשרות זו, כאמור, איננה סבירה שכן נוזל הקידוח מוזרק לעומק של כ-1,830 – 2,100 מטר מתחת לפני הקרקע בעוד שמי שתייה נשאבים בדרך כלל ממאגרים רדודים שעומקם כ-30 – 60 מטר מתחת לפני הקרקע בלבד. אולם, ועל אף האמור לעיל, גז טבעי עלול עדיין לחזור למאגרי מים מתוקים באם הבאר לא נכרכת במעטפת פלדה ובשכבת מלט כפי שנדרש.

לאחרונה פרסם גם מכון הנפט האמריקאי סדרה מחודשת של תקנים למניעת חדירה של נוזלים מתהליך השבירה ההידראולית למי התהום ולמים עיליים³⁷. תוצאות ראשוניות של מחקר שזה עתה פורסם מצביעות על כך שלא הוכח כל קשר בין קידוחי גז טבעי בשבירה הידראולית לבין זיהום מאגרי מים תת-קרקעיים³⁸. לפי מחקר זה, בעיות זיהום מי התהום נובעות לא מהשבירה ההידראולית עצמה כי אם מנזילות על פני הקרקע ומטיפול וסילוק לא נכון של מי שפכים.

3. ניהול, טיהור, סילוק ושימוש חוזר במים מופקים וטיפול הולם וסילוק של מים מושבים ובהם כימיקלים שהוחדרו לשם הגברת יעילות השבירה ההידראולית.

כפי שכבר צוין, הובלת מים מתוקים, בנפחים הגדולים הנדרשים, לאתר הקידוח, או באמצעות צנרת או באמצעות משאיות מיכל, ואחסונם במיכלים באתר היא הדרך המקובלת אך היקרה. אי לכך מנסות חברות הגז למצוא פתרונות לטיהור, למחזור ולשימוש חוזר הן במי הקידוח המושבים והן במים המופקים וזאת גם בכדי להגן על הסביבה וגם בכדי להמעיט ככל האפשר בהובלת כמויות מים נוספות, ביחוד במשאיות, לאתר הקידוח.

מספר חברות משתמשות בטכנולוגיות שונות לטיהור ולמחזור מים מופקים ומים מושבים, לשם שימוש חוזר בהם לדוגמא:

Fountain Quail Water Management מטקסס משתמשת במתקני מחזור ניידים המאפשרים, לאחר מחזור, לכ-80% מהמים המושבים מפעולת השבירה ההידראולית ויותר לשוב לשימוש חוזר. מים המוזרקים אל תוך הבאר בעת קידוח בשבירה הידראולית והחוזרים אל פני השטח אינם ניתנים לשימוש חוזר באופן מידי, עקב הימצאות כמות גבוהה של מלחים בתוכם. מתקני הזיקוק הניידים של החברה הנמצאים באתר הקידוח מפרידים את המלחים שבמים המוחזרים למלח מרוכז המסולק,

בדרך כלל אל תוך באר סילוק מורשית, ולכמות גדולה של מים מזוקקים בהם כאמור אפשר להשתמש בקידוחים נוספים באתר. יש להדגיש כי הגז הטבעי המופק באתר עצמו משמש לבערה במתקני זיקוק ניידים אלו³⁹. ראוי לציין כי נכון לאוקטובר 2010, חברה זו "עיבדה" כ-12.7 מיליון חביות מים מושבים משבירה הידראולית באתר באגן 'פורט וורט' בטקסס והפיקה למעלה מ-9.9 מיליון חביות של מים מזוקקים מוכנים לשימוש חוזר.

Ecosphere Technologies מפלורידה ערכה פרויקט נסיוני באגן 'ברנט' בשימוש בתהליך מחזור מים מושבים עם ממברנות מתקדמות. החברה גם מספקת שירותי פילטרציה ניידים, טיפול ומיחזור מים מושבים ומים מופקים. התהליך בו הם משתמשים כולל חימצון מתקדם ותהליך ממברנלי במתקנים ניידים באתר הקידוח⁴⁰.

212 Resources מיוטה משתמשת במתקן זיקוק ואידוי מים טרמי נייד הכולל גם טכנולוגיות סוניות ותאורה אולטרה סגולה מתקדמת. המתקן יכול לעבד מי שבירה הידראולית מושבים וכן מים מופקים באתר הקידוח ולהפכם למים באיכות מי שתיה. השיטה מפרידה את הגז הטבעי המעובה ממתנול העשוי להמצא במים והמלחים שבו ומפיקה, כאמור, מים מזוקקים בהם אפשר לעשות שימוש חוזר בקידוחים או לשפוך אותם אל תוך מקווי מים רגישים כנהרות וכדו'⁴¹.

Texas A&M University Global Petroleum Research Institute (GPRI)/GeoPure

מכון המחקר של האוניברסיטה בשיתוף קבוצת חברות דלק וחברות שירותים פיתחה שיטה לטיפול מקדים ולאוסמוזה הפוכה, מיוחדת לטיהור שפכים משדות נפט. הטיפול המקדים מפחית את כמות המוצקים, המתכות והמלחים במים לרמה בה יכולה טכנולוגית ההתפלה של שותפתם 'ג'או פיור' לטפל⁴².

Casella Waste System, Inc. (VT) & Altela, Inc. (NM) חברו יחד לפתור את בעיית המים המליחים המופקים בקידוחי הגז הטבעי מאגן מרסלוס. שותפות זו תמחזר את המים המליחים ואת השפכים הנובעים מקידוחי הגז הטבעי ותהפכם למים מזוקקים לשימוש חוזר בתעשיית קידוחי הגז. מים אלה אמורים להגיע לרמת איכות של מי גשם. פרט למידע שחברת 'אלטלה' משתמשת באנרגיה טרמית נמוכה בעת זיקוק המים (שיטה שלדבריהם 'מחקה' את הדרך בה הטבע יוצר גשם), וזאת ללא חשמל וללא לחץ שמניעים את התהליך, אין מידע נגיש אחר⁴³.

Layne Christensen Co. / Integra Disk Filtration System סינון מים מושבים מקידוחים בשבירה הידראולית המכילים בתוכם מוצקים הקורעים את שקי הסינון, החברה החלה להשתמש במסנן דיסק. שיטה זו מסוגלת לסנן מים עם תכולת מוצקים גבוהה ולהפרידם. שיטת 'אינטגרה' פועלת בזרמים גבוהים ויכולה לעבד כמויות מים גדולות ביום⁴⁴.

על אף שיש חברות רבות המשתמשות בטכנולוגיות מגוונות לטיפול בנושאי מחזור מים, זיהום הקרקע והסביבה, זיהום הימים ונושאים אחרים הנוגעים לקידוחי נפט וגז, הקרקע עדיין פוריה לחידושים ולטכנולוגיות חדשות.

נראה שהפוטנציאל להפקת גז מהפצלים ענקי, בארה"ב ובעוד מקומות בעולם- אבל העדר פתרון לבעיית המים מגביל את התרחבות הסקטור ואפילו מעודד החמרת רגולציה, כל אלה עלולים להקטין את האטרקטיביות של פצלי השמן.

מכיוון שלא נראה היום שישנו פתרון אחד שיהיה תקף לכל אתרי פצלי השמן כפתרון גנרי, יהיה צורך ללמוד לעומק אתרים גדולים יותר, ולהציע פתרון למים המופקים בכל אתר באופן ספציפי.

5.4 אתגרים במקטע הנפט והגז בים

בשני העשורים האחרונים הייתה התפתחות משמעותית של טכנולוגיות למיפוי, קידוח, והפקה של נפט וגז ממאגרים עמוקים ואף עמוקים ביותר (המוגדרים כאלו שבעומק מים העולה על 1500 מטרים) בימים ובאוקיינוסים. בין השנים 2006-2009 למעלה מ-50% מהתגליות החדשות של מאגרי נפט וגז ברחבי העולם היו במים עמוקים ביותר⁴⁵.

מאגרים ימיים אלה חשובים להמשך אספקת נפט וגז ברחבי העולם ויחד עם עליה תלולה בתפוקה ממאגרים אלה יש צורך בשיפור שיטות להפחתה, מחזור וטיפול בשפכים שונים כגון מים מופקים בכדי למזער פגיעות סביבתיות.

החקיקה והרגולציה הדנה בהגנת הסביבה הימית אינה אחידה בין מדינות העולם. מספר גופים בינלאומיים, העובדים בשיתוף עם מדינות שבהן יש פעילות של נפט וגז בים, לקחו על עצמם לקבוע מטרות בנושא איכות מים וריכוזים מרביים של מרכיבים כימיקליים הנדרשים בטרם יינתן אישור לפלוט את המים המופקים, מי התפעול של האסדה ובוצי הקידוח לים.

למשל, האמנה להגנת הסביבה הימית בצפון-מזרח האוקיינוס האטלנטי נחתמה ב-2001 ועליה חתומים האיחוד האירופאי וגם בלגיה, דנמרק, פינלנד, צרפת, גרמניה, איסלנד, אירלנד, לוקסמבורג, הולנד, נורווגיה, פורטוגל, שוודיה, בריטניה, וספרד. באמצעות אמנה זו מיושמים תקנים, נהלים ומעקב שנתי על ביצועי המדינות החברות⁴⁶, כאשר המטרה העיקרית של אמנה זו היא למנוע זיהום של הים על ידי שאריות נפט או תרכובות שומניות וטוקסיות אחרות העלולות להמצא במים המוזרקים לתוך הים.

במקטע הימי האתגרים הם בתחום טיפול במים המופקים במטרה להפחית ריכוז שאריות נפט וכימיקלים כמו כן הפחתת ריכוז חומרים בעלי רעילות אקוטית וטוקסינים ארוכי טווח במים המושבים לים, ניטור טמפרטורת המים המושבים לים ובנוסף – השבת המים המופקים למטרות שימוש חוזר וטיפולים לפני הזרקה.

לפי האמנה של מפיקות הנפט בצפון מזרח האוקיינוס האטלנטי בשנת 2001 הגיעו להסכמה לאמץ סטנדרט של ריכוז של נפט במים שאינו עולה על 40 מ"ג/ליטר בממוצע שנתי עד לשנת 2007. בסוף שנת 2006 הוסכם על יעד מחמיר יותר של 30 מ"ג/ליטר בממוצע שנתי. באזור צפון מזרח האוקיינוס האטלנטי מספר האסדות המשיבות את המים המופקים לים עלה מקרוב ל-490 בשנת 2000 ל-730 בשנת 2007. למרות עלייה של כ-50% במספר האסדות הפעילות באזור, הרי שכמות המים המושבים לים נשארה יציבה, בסביבות 1.2 מיליון מ"ק ליום. ניתן להסביר זאת על ידי כך שבאותה תקופה כמות המים המוזרקות חזרה לבאות עלתה פי שלוש.

מבחינה גלובלית, חברת המימון הבינלאומית של הבנק העולמי התוותה הנחיות מחייבות עבור פרויקטים אשר להם הם נותנים מימון⁴⁷. פרויקטים אלה חייבים לפעול בהתאם לרשימת פרמטרים ואינדיקטורים, שביניהם המחויבות שריכוז שאריות הנפט במים מופקים המושבים לים לא יכול לעלות על מקסימום של 42 מ"ג/ליטר ביום או 29 מ"ג/ליטר בממוצע חודשי.

גם בנושא הכימיקלים, הנחיות חברת המימון הבינלאומית של הבנק העולמי קובעות אינדיקטור לריכוז מזהמים ומתכות כבדות במים המושבים לים. למשל, ריכוז מתכות כבדות כגון כספית או קדמיום אינו יכול לעלות על ריכוז של 1 מ"ג/ק"ג ו-3 מ"ג/ק"ג, בהתאמה. כמו כן רמת החומציות של המים צריכה להמדד כ- $\text{pH} \geq 5.0$.

ריכוז הכלוריד המירבי המורשה במים המושבים לים הוא פחות מפי ארבע מהריכוז הממוצע בסביבה הימית שבה המים מושבים.

בנוסף לריכוזי הכימיקלים השונים טמפרטורת המים המושבים, במיוחד זו של מי הקירור, חייבת להיות פחותה ב-³ צלסיוס מטמפרטורת מי הים באזור שבו צפוי לחול הדילול הראשוני. באם איזור זה אינו מוגדר הרי שנקודת היחוס למדידת הפרש הטמפרטורות יהיה 100 מטרים מנקודת השבת המים.

החומרים התורמים לרעילות אקוטית של המים המופקים הם תרכובות ארומטיות ובמיוחד פנול. בנוסף לתרכובות המומסות במים כתוצאה משהשאיבה מהמאגר שבו מופק הנפט או הגז ישנן גם תוספות שמכניסים למים המופקים בכדי לשפר את הפרדת שאריות הנפט כנדרש בתקנים.

רוב אתרי התפעול של אסדות בים דורשים ניטור של הרעלנים במים המושבים לים, ושל אלו המוזרקים לבאות עמוקות בחזרה למאגר. השבת מים איכותיים למאגר חשובה מאוד היות והמאגרים הם

"סטרייליים" ויש לוודא שהם לא מזדהמים בחומרים טוקסיים או בבקטריה שמקורם לא במאגר אלא נובעים מתהליכי ההפקה וההפרדה.

עבור קידוחים במפרץ מקסיקו שבארה"ב הסוכנות להגנת הסביבה מפיקה היתר תפעול כללי המחייב את כל החברות הפעילות באיזור מסוים. לדוגמא, תנאי תפעול עבור אסדות בחוף שמול מדינות לואיזיאנה וטקסס נכנסו לתוקף בשנת 2007 והם יחודשו כעבור 5 שנים⁴⁸.

בנושא מיחזור המים המופקים לשימוש חוזר, אחת הבעיות העיקריות קשורה בשטח המצומצם על האסדות שלא מאפשר אחסון מים מופקים במיכלים/ברכות גדולים וכן הצבת מפעלי טיפול גדולים על האסדה, כמו כן, יש קושי בתחום המיומנות הטכנית הנדרשת להפעיל מערכות מי שפכים וכן בנושא העלות של הטיפול במים באתרי הקידוח כגון באסדות בים.

בעיה נוספת הזקוקה לטיפול היא, כאמור, האפשרות של זיהום המים המוזרקים חזרה בבקטריות הגדלות במצע אירובי וכן כאלה הגדלות במצע אנארובי (חסר חמצן).

ישנן היום מספר תוכנות המאפשרות לחברות לבקר את תהליכי הטיפול של המים המושבים וטיהור מי הים בכדי לאפשר וויסות של שיטות הטיפול והזרקה החומרים השונים. זהו שטח חשוב שבו יש מקום לחידושים שיעזרו לתחזק את מערכת הטיפול וההזרקה בצורה יעילה וחסכונית.

6. ריכוז האתגרים העיקריים לחברות המים בסקטור קידוח והפקת גז ונפט

- 6.1 הבטחת כמות המים הנדרשת לפעולות קידוח אופקיות בשיטת השבירה ההידראולית.
- 6.2 ביצוע מחקר ופיתוח במטרה לפתח הגנות פיסיות על מי התהום (יצירת חיץ), בנוסף להגנות הקיימות על צינורות ההפקה כיום. כמו כן, שכלול אפשרויות לחישה ובקרה, במטרה לקבל התרעה בזמן אמת על דליפות אפשריות למי התהום. בימים אלה (American Petroleum Intitute) API עוסקת בניסוח סטנדרטים למניעת זיהום/דליפה. הכוונה היא להגדיר את המושג Well Integrity, וחשוב, אם כך, לחברה שמעוניינת לפעול בנושא, להתעדכן בסטנדרטים המוגדרים לפני תחילת העבודה.
- 6.3 בנוסף לסעיף הקודם – בניית בארות מושכלת להפקה, לבלימת **דליפות** למזעור הגירה של מזהמים (כימיקלים) הנגרמת כתוצאה מפעולת הקידוח.
- 6.4 בתחום הממברנות להפרדה: פיתוח ממברנות איכותיות יותר, בעלות זמן חיים ארוך יותר וכאלה שהן עמידות בתנאי לחץ וטמפרטורה שונים. כחלק מהאתגרים בתחום הממברנות ניתן למנות:
 - 6.4.1 הוצאת מינרלים המבוססת על שימוש בממברנות להקטנת נפח התמלחת.
 - 6.4.2 פיתוח תהליכים להגנת הממברנות, כולל שכלול תהליכי אפיון, לגבי ההרכב המדויק של המים אותם אפשר להעביר הלאה לטיפול ממברנלי מבלי להרוס את הממברנה.
 - 6.4.3 הארכת זמן חיי הממברנות.

- 6.4.4 שכלול מערכות אוטומציה לניהול ובקרה on line, וכן מערכות מידע מרכזיות הקשורות אליהן בתחום ניהול המים.
- 6.5 פיתוח טכנולוגיות לחסימת חדירת המים לבאר או להקטנה בכמות המים הנשאבים אם באמצעות הפרדה בתוך הבאר, או באמצעות חסימות מים מכניות או כימיות בתוך הבאר.
- 6.6 כיום יש נסיונות לשימוש באגנים ירוקים כאפשרות נוספת לטיפול במים מופקים במיוחד בנושא האצת הפעילות של אגנים ירוקים.
- 6.7 שכלול תהליכי Fracturing שנעשים באמצעות אוויר או באמצעות תערובת CO₂ וחול.
- 6.8 פיתוח פורמולציות חדשות לטיפול במים הנכנסים לתהליך (נוזל הקירור והסיכוך של המקדח, נוזלי השבירה), וכן חומצות לטיפול בבוץ הקידוח בסביבת פתח הקידוח עצמו.
- 6.9 פיתוח של (Synthetic Based Mud) SBM (כתחליף ל-OBM (Oil Based Mud), ואולי אפשר לשלב בין הסעיף הקודם לזה הנוכחי, באמצעות יצירת שיתוף פעולה בין חברה שמייצרת אלמנטים כמו מקדחים מתוחכמים לחברה המייצרת כימיקלים, במטרה ליצור מערך המשלב מקדח ונוזל קירור וסיכה.
- 6.10 פיתוח תהליכי שבירה הידראולית או תוספי נוזל שיאפשרו את השימוש במים עם TDS גבוה (Total Dissolved Solids).
- 6.11 פיתוח מתקנים רב – שלביים למשל: אגן ירוק ומתקן אידוי וגיבוש מינרלים לטיפול במים מופקים.
- 6.12 פיתוח חומרים מתוחכמים וכדאיים מבחינה כלכלית למניעת קורוזיה, כמו כן פיתוח מערך מתקדם לניטור פעיל של מידת הקורוזיה שבעקבותיו יבוא שינוי ON LINE של פעולת המשאבות.
- 6.13 דבר נוסף: פיתוח חומרים עמידים לקורוזיה במחירים נמוכים יותר, במיוחד לשימוש בקידוחים ימיים.
- 6.14 צנרת מפלדת פחם – פיתוח ושכלול המערכות הקיימות.
- 6.15 שכלול ופיתוח שיטות מתקדמות לקידוח במיוחד בתחום הקידוח האופקי ובשיטות ניטור מתקדמות תוך כדי קידוח.
- 6.16 מכיוון שטיפול במים מופקים ("Produced Water"), כאמור, נעשה באמצעות מערכת המורכבת ממספר אלמנטים, אנו רואים אתגר לחדשנות המשלבת מספר פתרונות גם כאן, ביצירת מערכות יעילות יותר וכדאיות יותר מבחינה כלכלית.
- 6.17 פיתוח של מערכות קומפקטיות של סינון והפרדה לצורך פעילות הנעשית על אסדות ימיות.
- 6.18 מכיוון שכיום לא נראה שישנו פתרון אחד שיהיה תקף לכל אתרי הפקת הגז והנפט מפצלים כפתרון גנרי, יש צורך ללמוד לעומק את האתרים הגדולים יותר, ולהציע פתרונות ספציפיים עבור המים המופקים מאתרים גדולים.

סיכום

מטרת עבודה זו היא לחדד את נושא האתגרים של ניהול מושכל של מים בתעשיית הנפט והגז הן במקטע היבשתי והן במקטע הימי. ניהול משאבי מים במגזר זה הוא נושא מורכב ביותר כפי שמובא בקצרה לעיל. הנושא בכללותו הוא מאד דינמי וצפויות התפתחויות רבות נוספות בשנים הקרובות. יש כיום דגש רב יותר גם מצד הרגולטור, כמו משרד האנרגיה האמריקאי⁴⁹, גם מצד הסוכנות להגנת הסביבה בארה"ב⁵⁰, וגם מצד התעשייה, על הצורך לשפר תקנים ולקדם טכנולוגיות אשר יאפשרו המשך הפקה של הנפט והגז ממקורות לא קונבציונאליים תוך מזעור ההשפעה על הסביבה ועל בריאות הציבור.

גל הפעילות הנוכחי, במיוחד בארה"ב, ואף באירופה, מצביע על הזדמנויות רבות שבהן טכנולוגיות מים מישראל עשויות להציע פתרונות לקידום הנושא בעולם.

נספח - מילון מושגים

מושג	הסבר
Bcmd	Billion cubic meter per day
Bit	מקדה
BOP	Blow Out Preventer
Christmas tree	מערך של צינורות, מתאמים, ושסתומים לניטור והובלת הנפט
CWA	- Clean Water Act
DGF	Dissolved gas flotation
EIA	U.S. Energy Information Administration
EPA	Environmental Protection Agency
Exploration drills	בארות בדיקה
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
Hydraulic fracturing	שבירה הידראולית
IGF	Induced gas flotation
Injection well	באר הזרקה
Marcellus Shale	מאגר הפצלים העצום בצפון מזרח ארה"ב
Mud	נוזל הקירור והסיכה של המקדה
NEPA	National Environmental Policy Act
OBM	Oil Based Mud
OPA	Oil Pollution Act
Pad	משטה
Produced water	מים מופקים
RCRA	Resources Conservation and Recovery Act
SBM	Synthetic Based Mud
SDWA	Safe Drinking Water Act
Tcm	Trillion cubic meter
TDS	Total Dissolved Solids
WBM	Water Based Mud
מטחן	שברי סלע

- ¹ World Oil Outlook, OPEC 2010.
- ² OPEC לפי הגדרת.
- ³ Source: Tachlit Research, CIA.
- ⁴ E&P Forum / UNEP, *Environmental Management in Oil and Gas Exploration and production, an Overview of Issues and Management Approaches*, UNEP-IE/PAC Technical Report Series - No. 37, E&P Forum Report No. 2.72/254, London, Paris, 1997.
- ⁵ www.naturalgas.org/index.asp
- ⁶ U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, NETL, *Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer*, April 2009.
- ⁷ www.naturalgas.org/overview/overview.asp
- ⁸ www.naturalgas.org
- ⁹ Shirley Morgan-Knot, Jolie Hudson, Hubert Jeaneau, "Water Risks to Business", *UBS Investment Business*, April 2011.
- ¹⁰ Gregory R. Ruschau, Ph.D. and Mohamed A. Al-Anezi, *Oil and Gas Exploration and Production*, <http://www.corrosioncost.com/pdf/oilgas.pdf>.
- ¹¹ G. Voordouw, A. Agrawal, H.S. Park, L.M. Gieg, T.R. Jack, A. Cavallaro, T. Granli Yara and K. Miner, "Souring Treatment with Nitrate in Fields from which Oil is Produced by Produced Water Reinjection", *SPE international*, April 2011.
- ¹² USDE, OFE, *Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Exploration and Production Technology*, 1999.
- ¹³ Madan M. Singh, Robert J. Goodwin, "Mechanism of Drilling Wells with Air as the Drilling Fluid", *Society of Petroleum Engineers of AIME*, 1965.
- ¹⁴ Angela Szep and Robert Kohlheb, "Water Treatment Technology for Produced Water", *Water Science & Technology - WST*, 62.10, 2010.
- ¹⁵ John A. Veil, Markus G. Puder, Deborah Elcock and Robert J. Redweik Jr., *A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane*, USDE, NETL, January 2004.
- ¹⁶ Fakhru'l-Razi Ahmadun, Alireza Pendashteh, Luqman Chuah Abdullah, Dayang Radiah Awang Biak, Sayed Siavash Madaeni, Zurina Zainal Abidin, "Review of Technologies for Oil and Gas Produced Water Treatment", *J. of Hazardous Materials*, 2009.
- ¹⁷ E&P Forum, *North Sea Produced Water: Fate and Effects in the Marine Environment*, E&P Forum Report No. 2. 62/204, May 1994.

-
- ¹⁸ James C. Robinson, "Afternoon Wrap-Up: An Overview on Produced Water Treatment Technologies", *Exploration & Production Technology, Delivering Breakthrough Solutions*, November 8, 2007.
- ¹⁹ Reza Mastouri, Farhad Nadim, *2010: A Time to Review The Produced Water Treatment Technologies, A Time to Look Forward for New Management Policies*,
<http://ipec.utulsa.edu/Conf2010/Powerpoint%20presentations%20and%20papers%20received/Mastouri.pdf>, 2010
- ²⁰ OEER, *A Preliminary Review of Existing Technologies and their Mitigative Potential in Offshore Petroleum Developments*, June 2010.
- ²¹ L. Jin and A.K. Wajtanowicz, *Minimum Produced Water From Oil Wells With Water Coning Control and Water-Loop Installations*, March 2011.
- ²² R.S. Breuer, T. Schlicht and Bauer Nimr, "Produced Water Management Using Wetlands: A Progress on the Installation of the First Commercial Wetland Application in the Oil and Gas Industry", *SPE*, March 2011.
- ²³ Roman Breuer, Ernst Grisseemann and Bauer Nimr LLC, "Produced Water treatment using Wetlands – Reducing The Environmental Impact of Oilfield Operations", *SPE*, February 2011.
- ²⁴ Tom Hayes and Dan Arthur, "Overview of Emerging Produced Water Treatment Technologies", The 11th Annual International Petroleum Environmental Conference, Albuquerque Hilton Hotel, Albuquerque, NM, October 12-15, 2004.
- ²⁵ http://money.cnn.com/2011/07/01/news/economy/fracking_new_york/index.htm
- ²⁶ <http://business.financialpost.com/2011/07/01/quebec-moratorium-leaves-shale-gas-drillers-staggering/>
- ²⁷ IBT Times, "Challenges to Natural Gas Fracking Escalate", October 2011
- ²⁸ The Geological Society of America, "Marcellus Shale Water Resources and Natural Gas Production", 12/8/2011
- ²⁹ J. Daniel Arthur, "Prudent and Sustainable Water Management and Disposal Alternatives Applicable to Shale Gas Development", *All Consulting, presented at The Ground Water Protection Council*, January 2009.
- ³⁰ U.S. DOE, "Annual Plan: Ultra-Deepwater and Unconventional Natural Gas and Other Petroleum Resources Research and Development Program", Report to Congress, August 2011
- ³¹ Food & Water Watch, November 2011
- ³² A.W. Gaudlip et.al., "Marcellus Shale Water Management Challenges in Pennsylvania", *SPE International*, 2008
- ³³ Energy Policy Act of 2005, Public Law 109-58, 109th Congress

-
- ³⁴ Stanford News, “*Extracting natural gas from shale can be done in an environmentally responsible way, says Stanford researcher on government panel*”.
<http://news.stanford.edu/news/2011/august/zoback-fracking-qanda-083011.html>
- ³⁵ Texas joins Colorado in passing rule for fracking disclosure. See:
<http://www.platts.com/RSSFeedDetailedNews/RSSFeed/NaturalGas>
- ³⁶ ³⁶ New York State Water Resources Institute at Cornell University. See:
http://wri.eas.cornell.edu/gas_wells_waste.html
- ³⁷ ³⁷ American Petroleum Institute (API), “*Overview of Industry Guidance/Best Practices on Hydraulic Fracturing (HF)*”, Washington DC, October 21, 2011; www.api.org
- ³⁸ ³⁸ The University of Texas at Austin. See:
http://utexas.edu/news/2011/11/09/energy_fracing, November 9, 2011
- ³⁹ Basin Oil & Gas, “*The Future of Water Recycling*”, Issue No. 34, January 2011
- ⁴⁰ Ibid
- ⁴¹ Ibid
- ⁴² Ibid
- ⁴³ Ibid
- ⁴⁴ Filtration for Fracking. See: <http://www.wwdmag.com/channel/casestudies/filtration-fracking>
- ⁴⁵ U.S. DOE, “*Annual Plan: Ultra-Deepwater and Unconventional Natural Gas and Other Petroleum Resources Research and Development Program*”, Report to Congress, August 2011
- ⁴⁶ OSPAR Commission, “*Overview assessment of the implementation of OSPAR Recommendation 2001/1 for the management of produced water from offshore installations*”, 2010
- ⁴⁷ International Finance Corporation (IFC), World Bank Group, “*Environmental, Health, and Safety Guidelines: Offshore Oil and Gas Development*”, Washington DC, April 30, 2007.
- ⁴⁸ U.S. EPA, Region 6, “*NPDES General Permit for discharges from the Offshore Subcategory of the Oil and Gas Extraction Category for the Western Portion of the Outer Continental Shelf of the Gulf of Mexico off the coasts of Louisiana and Texas*”, Effective October 1, 2007 Expires midnight September 30, 2012; 72 FR 31575, June 2007;
<http://www.epa.gov/region6/6en/w/offshore/permit10012007.pdf>
- ⁴⁹ Secretary of Energy Advisory Board, “*Shale Gas Production Subcommittee: 2nd 90-days Report*”, November 18, 2011, Washington, DC;
http://www.shalegas.energy.gov/resources/111811_final_report.pdf
- ⁵⁰ U.S. EPA, “*Plan to Study the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources*”, EPA/600/R-11/122, November 2011, Washington, DC;
http://www.epa.gov/hfstudy/HF_Study_Plan_110211_FINAL_508.pdf

12/001



מוסד שמואל נאמן

למחקר מדיניות לאומית

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

טל. 04-8292329, פקס. 04-8231889

קרית הטכניון, חיפה 32000

www.neaman.org.il