



כריית מחצבים
בראי אתגרים גלובליים
לתעשיות המים
דו"ח שני
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

כריית מחצבים בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים

**דו"ח שני
סקר ואתגרים**

**ד"ר גלעד פורטונה
שירי פרוינד-קורן**

מרץ 2012

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 המחברים ואינן משקפות בהכרח את דעת
מוסד שמואל נאמן

רשימת היועצים בפרויקט

ניר סהר - Veolia ישראל, יועץ טכני לכל הסקטורים
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
יצחק גורן - אהמסה ישראל
אורלי גרינברג - יועצת בתחום המכרות

מנהל הפרויקט : ד"ר גלעד פורטונה

עוזרת מחקר : שירי פרוינד-קורן

תוכן עניינים

עמוד

1	1.1	תקציר
4	2.2	הקדמה
5	2.1	כרייה
6	2.2	מים בתהליך הכרייה
7	2.3	שיטות כרייה
8	2.4	שיטות עיבוד
10	2.5	מחצבים - מתכתיים
11	2.6	מחצבים - לא מתכתיים
13	2.7	ARD
14	2.8	כמויות צריכת מים בכרייה
16	3.3	רגולציה בסקטור הכרייה
16	3.1	ביני"ל
17	3.2	ציילה
18	3.3	אוסטרליה
19	3.4	ארה"ב
19	3.5	דרא"פ
20	3.6	קנדה
21	4.4	טכנולוגיות הפקה ראשיות בדגש על מהלך המים - מחזור והפרדה
21	4.1	דיאגרמת מהלך המים בתעשיית המכרות
22	4.2	ניהול מים במכרה
23	4.3	הזנת מים, טיפול ושימוש מחדש במכרות
24	4.4	טיפול בשפכים ושחרור לסביבה

29	מחזור והשבה	4.5
30	אתגרים בתחום המכרות	.5
30	הבטחת אספקת המים	5.1
30	השבת מתכות וחומרים נוספים מהשפכים	5.2
31	מחזור	5.3
32	הקטנת פגיעה בסביבה	5.4
33	גיאוגרפיה	5.5
34	סיכום	.6
35	נספח - מילון מושגים	
36	מקורות	

רשימת תרשימים ודיאגרמות

- 14 תרשים 1 : צריכת מים בתהליכי כרייה והפרדה של מתכות
- 21 תרשים 2 : דיאגרמת מהלך המים בתעשיית המכרות
- 25 תרשים 3 : דיאגרמה של תהליך HDS בסיסי

דו"ח זה סוקר את תעשיית כריית המחצבים ועיבוד העפרה, במטרה לאתר את תפקיד המים בתהליכי הכרייה וההפרדה וצרכי הטיפול במים מבחינת חיסכון, ניהול נכון, השבה, מחזור ושחרור מורשה לסביבה.

זהו דו"ח שני במסגרת סקירת שימושי המים בשבעה סקטורים תעשייתיים גלובליים בהמשך לדו"ח הראשון הסוקר את תעשיית הפקת הנפט והגז¹.

העבודה נעשתה במטרה להעמיק את ההבנה של תפקיד המים בתעשיות הגלובליות 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 כריית המחצבים ועיבוד העפרה, תוך סקירת תהליכים עיקריים, תפקיד המים בתהליכים אלה וזיהוי אתגרים בשימושי המים שמהווים חסם לגידול בחלק מפעילויות כריית המחצבים.

אנו מתרכזים במספר סקטורים בתוך תעשיית זו - כריית מתכות, פחם וסלע סולפטי.

בפרק 2 אנו סוקרים את תעשיית המכרות - שיטות כרייה ועיבוד, סוגי מחצבים וכמויות צריכת מים, בפרק 3 סוקרים את הרגולציה הבין לאומית הרלוונטית, בפרק 4 מציגים את הטכנולוגיות העיקריות המשמשות בתחום המים בתעשייה זו ובפרק 5 ריכזנו את האתגרים העיקריים וכן התייחסנו לגאוגרפיה.

מסמך זה מהווה שלב ראשון, שמטרתו סקירת הסקטור התעשייתי והצבת האתגרים לתעשיית המים הישראלית, במקביל אנו פונים 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, מתוכן בהמשך ובאמצעותנו ננסה להאיר מקומות בהם מחקרים מדעיים אקדמיים עשויים לתת פתרונות חדשניים בטווח הארוך אותם התעשייה תוכל ליישם לשימוש מסחרי.

להלן ריכזו האתגרים לתעשייה הישראלית כפי שזוהו במהלך הכנת המסמך :

הבטחת אספקת המים :

- במקרים בהם יש התפלה במיקום מרוחק (למשל במקרים של מכרות בהרי האנדים), צריך לעיתים לשנע את המים למרחקים וגבהים גדולים, האתגר במקרה זה הוא משולש

– התפלה, משאבות, צנרת – ייעול הכדאיות הכלכלית של התהליך ושילוב מיטבי בין שלושת הגורמים.

- הגדלת יעילות תהליך ההתפלה באמצעות סילוק קלציום קרבונט תוך כדי התהליך.
- ניהול מיטבי של המים במכרה והגדלת כמויות המים המושבות לתהליך להפחתת התלות בהתפלה.
- קיימים מחקרים בנושא ממברנות hollow fiber למיצוי חומרים מ-ARD כלומר, האתגר: יישום פיתוח ממברנות UF (hollow fiber) לטיפול ב-ARD.
- פיתוח שיטות יעילות וכדאיות לטיפול ב-ARD ליישום במדינות בהן הרגולציות ו/או האכיפה משתנים בימים אלה או בעתיד הנראה לעין.

השבת מתכות וחומרים נוספים מהשפכים:

- מיצוי של חומרים בעלי ערך מהשפכים מצדיק השקעה בנושא והתאמת תהליכים שונים להשבת מתכות שונות.
- פיתוח תהליכי מיצוי "סגורים" להגדלת יעילותם, למשל: הפקת הפוספט בצורת שמישה, שימוש חוזר במים וכו'.
- מיצוי סולפט משפכים ללא שימוש בממברנות התפלה (למניעת תוצר לוואי של תמלחת מהתהליך).
- קיימות טכניקות חדשניות למיצוי Se, כרומטים, פוספטים, נחושת, שנחשבות יקרות, אך במידה ואין אפשרות לפלוט מים אלה לסביבה מבחינה רגולטיבית, הכדאיות שלהן עולה.
- פיתוח שיטות ספציפיות לניקוי סולפט, כספית וסלניום (בעקבות החמרת רגולציות ספציפיות לחומרים אלה), ובאופן כללי התאמת מכרות קיימים ופעילים לרגולציות הולכות ומחמירות.
- סידן במים יוצר גבס, כאשר נמצא יחד עם חומצה גופרתית. דבר זה אוטם את תהליך מיצוי הנחושת - יש צורך להוציא את הסידן בדרך מתוחכמת וזולה.
- השבת החומצות המשמשות לתהליכי העיכול, ובנוסף ניהול נכון של השימוש בחומצות למשל באמצעות הגדלת יעילות פיזור החומצה הגופרתית במטרה להקטין את אובדן החומר במהלך התהליך, כמו כן – קיצורו אם ניתן. הצנרת (טפטפות) צריכה להיות אמינה ועמידה- במקרה כזה תוכל לתפקד במספר שבבי הפקה, או אמינה וזולה ואז הצנרת ניתן להחליפה בכל סיבוב הפקה.
- שיטות לטיפול בשפכים המכילים ציאניד.
- הפרדת זרמים במכרה, מציאת הבעייתיות בכל זרם לגבי המרכיבים שלו ויישום פתרונות שונים בהתאם לתמיסות הספציפיות (אתגר הכולל בתוכו ניטור ובקרה).

- בנושא צמצום נפח התמלחת - מתבצע פיתוח תהליכי AOP, חמצון קטליטי וסיפוח שאם ישולבו עם ממברנות יוכלו להיות יעילים.

הקטנת הפגיעה בסביבה

- טיפול יעיל בתופעת ARD - ניהול אתר למניעת התפתחות ARD וטיפול למזעור/מיגור התופעה לאחר שכבר התפתחה, כולל במכרות שכבר אינם פועלים ומחוייבים לטפל בנזקים שנגרמו עקב פעולות הכריה.
- שיפור טכנולוגיות הטיפול בשפכי המכרות, במיוחד בשפכים חומציים המכילים מתכות.
- מגמה רגולטורית בולטת: מניעת אחסון תמלחת, ומכאן - פיתוח שיטות ברות קיימא כיוון שלא רק המתכות והחומרים הרעילים הנוספים מהווים בעיה בפליטה לסביבה, אלה גם המלחים, זהו אחד האתגרים החשובים שעומדים בפני תעשיית המכרות.
- פיתוח שיטות לייעול ניהול המים במכרה, במיוחד בנושא שימוש במים בתוך המכרה יקטינו את כמויות המים הנצרכות, יגדילו את האפשרות למחזור ויקטינו את הסכנה לזיהומים המחלחלים לקרקע ולמקורות המים באזור המכרה.
- מניעת דליפות חומצות ורעלים, גלישה וחלחול ממאגרי השפכים ותעלות ההולכה.
- דרושים פתרונות יעילים, תוך שימוש מצומצם באנרגיה לריקון מכרות ממים וטיפול במים אלה.
- בנושא הממברנות ניתן לפרט מספר אתגרים:
 - פיתוח ממברנות ננו-פילטרציה, יציבות לשימוש בסולבנטים ובתנאי PH קיצוניים.
 - שכלול טיפולי הכנה לטיפול בממברנות לשימור והארכת חייהן.
 - צמצום נפח התמלחת ו/או אלטרנטיבות ל-RO כך שהמלחים יכולים להיות תוצר, בשיטה יעילה מבחינה אנרגטית.
 - פיתוח מערכות בעלות נמוכה, ניידות וקלות לתחזוקה.
- יש צורך בפיתוח חומרים מספחים חדשים, שיאפשרו טיפול יעיל וזול בשפכי מכרות, באופן תחרותי לטיפולים קיימים.
- תעשיית המכרות היא תעשייה מאוד שמרנית, הטכנולוגיות המסורתיות אינן עומדות להעלם - לכן האתגר טמון בשילוב טכנולוגיות ספציפיות למתקני מכרה מסוים.
- בתחום סילוק הבוצה להטמנה - זירוז תהליך האיזוי של הנוזל או החלפתו בהליך יעיל יותר (ריכוז במקום איזוי או בנוסף) תוזיל ותפשט את ההליך.
- בתחום הכרייה בהמסה – בדיקה האם ניתן ליישם שיטה זו, במקומות בהם לא נעשה בה שימוש, או שנעשה שימוש אך לא בהצלחה, בהנחה שניתן לייעל תהליכי כרייה בדרך זו.

למים תפקיד חשוב ומרכזי בתעשיית המכרות. הם מעורבים בתהליכי הוצאת העפרה מהקרקע, עיבודה, ותהליכי ההפרדה המתבצעים לאחר מכן.

תעשיית המכרות הבין-לאומית עומדת בפני מספר אתגרים בנושאי התייעלות כלכלית ותפקוד ידידותי יותר לסביבה.

אתגרים אלה מהווים פוטנציאל לצמיחה עסקית לחברות הכרייה עצמן, אך גם לחברות הנותנות שירותים לסקטור זה.

עליית מחיר הסחורות מאפשרת לחברות הכרייה להמשיך ולהשקיע בתהליכים וטכנולוגיות חדשניים ויעילים יותר במכרות קיימים, שמגדילים את יכולת ההפקה מחד, ומאפשרים עמידה ברגולציות שהולכות ומתקשות עם הזמן, מאידך. חברות הכרייה נאלצות לנהוג מדיניות פרואקטיבית בתחום הפתרונות כמו גם צייתנות בנושא הרגולציות.

נקודות החיכוך בין חברות הכרייה לקהילות המקומיות, קשורות, בין היתר, להשפעת המכרה על עתודות המים באזור, במיוחד אם מדובר באזור הסובל ממחסור במים או כאשר קיימת דאגה למקורות המים המתוקים באזור – הן העיליים והן מי התהום.

במסגרת ההשפעות הסביבתיות של מכרות קיימות אפשרות להיווצרות תהליך הנקרא ARD (Acid Rock Drainage), במהלכו חומצה הנוצרת במכרה כתוצאה ממגע בין האוויר והמים לבין סלעים המכילים סולפיידים, מורידה את רמת ה-PH של המים ומגדילה את ריכוז המתכות הרעילות הנמצאות במי הניקוז של המכרה, מים אלה עלולים לזרום אל מחוץ למכרה – ולזהם את הסביבה או לזהם מי תהום. בנוסף, לגלישה של בוצה או שפכים המכילים חומרים רעילים כמו ציאניד השפעה חמורה על מקורות המים.

בסקטור כריית המינרלים, תהליכים רבים מערבים כריית עפרה מתחת גובה רום מי התהום. בעקבות כרייה בעומקים כאלה, יש זרימה של מי תהום אל המכרה ויש צורך, לכן, בשאיבה של מים ממנו החוצה. לתהליך כזה יש השפעה על הצמחייה והמערכות האקולוגיות המקומיות.

תהליך השיקום של מכרות נטושים הוא ארוך ומורכב. יש צורך לשאוב ולטפל שוב ושוב במים בתוכו כדי למנוע זיהום של הקרקע ושל המים העיליים.

תכנון בר קיימא ארוך טווח בנוגע לסוגיות המים במכרות יאפשר לחברות הכרייה להמשיך ולהרחיב את הייצור, ובכך, יגדיל את היכולת להפקה יעילה של מתכות גם מעפרה שהולכת ויורדת בדרגתה, כלומר, מבלי שכמויות המים להפקה יגדלו באופן משמעותי.

חשוב לציין שאין אפשרות לבחור היכן למקם את פעולות הכרייה, ועובדה זו הופכת סקטור זה לתלוי מאד ופגיע יותר לשינויים הנובעים כתוצאה מזמינות מים באזור ומשיקולים הנובעים מעובדת המצאות קהילות מקומיות באזור.

גודלו של שוק תשתיות המים בתחום המכרות עמד ב-2011 על 7.7 מיליארד \$, לפי דו"ח של Global Water Intelligenceⁱⁱ, מתוכם ההוצאה על התשתיות היא כ-5.8 מיליארד \$ וההוצאה על ציוד, כולל משאבות כ-1.8 מיליארד \$, מתוכם ההוצאה על משאבות בלבד - 1 מיליארד \$.

גודל ההוצאה על תשתיות המים בתעשיית המכרות צפוי לעלות, ועשוי על פי הערכת GWI, להגיע עד 13.6 מיליארד \$ ב-2014.

המגמה של גידול צרכי המים נובעת, בין השאר, כיוון שמכרות חדשים רבים מוקמים באזורים צחיחים (אוסטרליה למשל). בין הסיבות הנוספות ניתן למנות את העובדה שחברות כרייה מחפשות אחר דרכים חדשניות, יעילות וכלכליות כדי להתאים עצמן לסטנדרטים גבוהים יותר בנושא הקיימות, את מגמת ההחמרה ברגולציות ובאכיפתן, את המחסור העולמי במים שהולך ומתפשט וכן רצון של חברות הכרייה ליישום (Global Best Practice) GBP. בנוסף, האחריות הכלכלית שמושתת על חברות אלה בנושא ה-ARD הופכת לסיכון כלכלי עצום ולאורך שנים רבות במידה ולא תהיה התייחסות מתאימה ובזמן לבעיה זו.

2.1 כרייה

בתהליך הכרייה מוציאים וממצים מינרלים או מתכות מהאדמה. הסלע הנכרה, נקרא עפרה. באתר כרייה עשויים להתבצע תהליכי קידוח וכרייה, עיבוד העפרה, שינוע וטיפול בתוצרי התהליך וטיפול ושינוע הקשורים לשפכי התהליך.

בעבודה זו נתמקד בתהליכים העיקריים עבור כרייה של מתכות ומינרלים נבחרים, המייצגים את מירב השוק של הכרייה וכן, את הסגמנטים בהם קיים שימוש גבוה במיוחד במים ו/או אתגרים סביבתיים הקשורים למים כתוצאה מפעולות הכרייה וההפקה

- נחושת
- אבץ
- ניקל
- זהב
- פלטינה
- ברזל
- פחם
- פוספט

2.2 מים בתהליך הכרייה

מים הם תשומה חשובה בכל תהליכי הכרייה. כרייה היא תהליך המערב שימוש מוגבר במים, ולעיתים קרובות מתרחש באזורים בהם אספקת המים המתוקים ותשתיות המים מוגבלות.

המים המזוהמים שנוצרים בעקבות פעולות הכרייה והטיפול בעפרה נקראים "מי מכרה" (mine water). מעבר לעצם ההזנה היזומה של מים למכרה, מי מכרה הם תוצאה של חלחול מים זורמים אל תוך המכרה (שיטפונות, גשמים) וכן ממאגרי מי תהום שמחלחלים למכרה, כאשר מים אלה נשאבים החוצה כל הזמן במהלך תהליכי הכרייה. כאשר מכרה תת קרקעי ננטש, בדרך כלל מופסקת פעולת השאיבה, אולם אז מים מזוהמים יכולים לחלחל דרך המחילות ודרך סדקים ולהגיע אל פני השטח או אל מאגרי מים תת-קרקעיים. כאשר מכרה על פני השטח ננטש, ובמידה ועומקו מגיע אל מתחת לגובה רום מי התהום, הוא מתמלא מים עד לגובה זה או שהמים מציפים את אדמת המכרה ומחלחלים דרכה.

מי מכרה שנשאבו מטופלים בדרך כלל באתר הכרייה עצמו, מסוננים או מתאדים בברכות ייעודיות, משמשים כמים לתהליך הכרייה או לצרכים אחרים באתר הכרייה, ו/או נפלטים למקור מים על פני השטח בהתאם לדרישות הרגולטוריות המתאימות.

המים משמשים כמעט בכל השלבים בתהליך הכרייה – בקידוח/חפירה לקירור המכונות, להפחתת אבק בכל שלבי מעבר עפרה יבשה ממקום למקום - שינוע העפרה נעשה ברוב המקרים במים, וכך גם תהליכי ההפרדה השונים.

מקור זיהום נוסף כתוצאה מפעולות הכרייה היא תופעת ה-ARD (Acid Rock Drainage). קשה לחזות היווצרות של ARD, אך תופעה זו נוצרת כאשר מינרליים גופרתיים נחשפים לחמצן ומים, ומתחמצנים כך שנוצרים חומצה גופרתית ויוני ברזל. יוני הברזל עוברים קטליזה ע"י בקטריה ומגיבים פעם נוספת עם חמצן ליצירת hydrated iron oxide הנקרא גם "yellowboy". שילוב חומרים אלה, בו נוצרים מים חומציים מאוד, עלול לזהם את הקרקע, מי התהום והמים העלילים בסביבת ה-ARD, במהלך פעולת הכרייה, ולאחר סיומה למשך שנים רבות.

טווח זמן בו תופעת ה-ARD משפיעה על הסביבה והחומרה של תופעה זו, יוצרות עניין רב באפשרויות לחיזוי, טיפול, ביטוח כלכלי וניטור על מנת להקטין את הנוק ממנה, בהמשך מסמך זה נרחיב על התופעה.

מי כרייה מכילים, לעיתים קרובות, רעלים, מתכות כבדות ומשקעים שונים שגם הם מזהמים את המים בסביבה במידה ונפלטים אליה, ובכך פוגעים גם בצמחיה סביב ובתוך המים ובעלי החיים המשתמשים במים אלה כמקור לשתייה. גם לצריכת בני האדם מים אלה (וכן דגים שחיו בהם) מזיקים.

במהלך תהליך הפקת המתכת מהעופרה, נעשים תהליכי שטיפה באמצעות חומצה שגם הם מהווים מקור לזיהום מים. בעקבות תהליכים אלה, נוצרים שפכים חומציים המכילים מתכות.

הנזקים הסביבתיים הנגרמים כתוצאה מכך, מתרחשים בעיקר בעקבות דליפות מחלקים שונים בציוד, גלישות ממאגרי שפכים לאחר זרימה לא מבוקרת אליהם, קרעים בצינורות וכשלים נוספים. לכן חשוב כל-כך שכל הציוד הנוגע לתהליך זה יהיה מבוקר ואטום.

2.3 שיטות כרייה

תהליך הכרייה מתבצע במספר שלבים. השלב הראשון כולל גילוי המחצב והגדרת תכונותיו הכימיות והפיזיקליות, כולל הערכות בנוגע לגודלו, מיקומו המדויק ודרגת העפרה אותה הוא מכיל, בשלב הבא נערכות בדיקות כדאיות ובסיומן מחליטה חברת הכרייה האם להמשיך בפרויקט או לנטוש אותו. במידה והוחלט על כריית המחצב מתחיל שלב פיתוח המכרה ולאחריו הכרייה הפעילה שנמשכת כל עוד חברת הכרייה רואה בה כדאיות כלכלית. משמסתיים שלב הכרייה מגיע שלב השיקום והנטישה שלאחריו על אזור המכרה להיות מתאים לשימושים עתידיים.

שיטות הכרייה נבחרות על פי עומק המרבץ, גודל וצורת העורק, טופוגרפיה ועלויות. כרייה על פני השטח מתבצעת כאשר המרבץ רדוד יחסית, פרוש על פני שטח גדול ושייך לדרגה נמוכה יותר, בעוד שכרייה תת קרקעית ניתנת לביצוע כאשר גוף המרבץ צר ועמוק.

2.3.1 כרייה על פני השטח

כרייה על פני השטח נפוצה יותר, ונעשית באמצעות הסרת שכבות הצמחייה, האדמה ושכבות סלעים נוספות לפי הצורך.

בין השיטות לכרייה על פני השטח ניתן למנות:

- כריית בור פתוח – הפקת מחצבים מבור פתוח על פני הקרקע.
- כרייה ברצועות – כריית המחצב באמצעות הסרת שכבות בבור הפתוח, מתקבלות טרסות בשולי הבור.
- Mountaintop removal – משמשת בדרך כלל לכריית פחם, קצה הר מוסר בפיצוץ במטרה להגיע למחצב בעומקו. שיטות נוספות כוללות כרייה לפי קווי מתאר וחציבה.

בכרייה על פני השטח הנושאים הבעייתיים מבחינת צריכת מים קשורים בצורך להפחית כמויות גדולות של אבק, בריקון המכרה ממים ובמניעת זרימת מים לשטחו.

2.3.2 כרייה תת קרקעית

כאשר מאפייני המיקום והגאולוגיה של המרבץ אינם מאפשרים כרייה כלכלית על פני השטח, מתבצעת כרייה תת קרקעית. מערכת מנהרות אופקיות, אנכיות ומשופעות מאפשרות לבצע את תהליך הכרייה והוצאת העפרה.

בין השיטות העיקריות לכרייה תת קרקעית אפשר למנות:

- Cut and fill – כרייה בבורות רדודים. בשיטה זו העפרה נכרת אופקית או במנהרות מעט משופעות. לאחר כל סיום כל שלב בכרייה, סותמים את המנהרות שנחפרו בפסולת הסלעים שנותרה ו/או בחול.
- Block caving – שיטה המשמשת בעיקר בכרייה של עפרות מדרגה נמוכה. מנהרות נחפרות מתחת לעורק המחצב, התקרה מעליהן נכרית בפיצוצים ונאספת בערמות על קרקעית המנהרה משם היא נאספת.
- כריית חדר – נעשית כאשר עורק המחצב שטוח יחסית. מנהרות בצורת חדרים נכרות כאשר עמודי סלע נשארים על כנם על מנת לתמוך בתקרה. בסוף התהליך העמודים, גם הם נכרים, החל ברחוק ביותר כך שהתקרה מעליהם קורסת.
- בנוסף ניתן למנות Longwall mining ו-Sublevel caving.

בכרייה תת קרקעית הנושאים הבעייתיים מבחינת צריכת מים קשורים להפחתת אבק ולשליטה על איכות האוויר בתוך המכרה, כמו גם לריקון המכרה. בנוסף, במכרות עמוקים מאוד יש צורך בקירור בגלל תופעות גיאותרמיות.

2.3.3 כרייה בהמסה (Solution Mining)

בשיטה זו נכרים מינרלים תת קרקעיים (למשל מגנזיום ופוספטים) באמצעות קידוח חורים בסלע המחצב, ביצוע תהליכי פיצוץ או שבירה הידראולית על מנת לאפשר זרימה חופשית של תמיסת הכרייה (מותאמת לסוג המחצב ומורכבת ברובה המוחלט ממים) ואז הזרקה אל האדמה.

התמיסה המכילה את המחצב המומס נשאבת החוצה מחור קידוח שני, במקביל לתהליך ההזרקה, ועוברת את תהליכי העיבוד מחוץ לאדמה.

לתהליך זה עלולות להיות השלכות סביבתיות הקשורות בזיהום מי תהום בסביבה ותנועה תת קרקעית של מתכות וחומצות. כמו כן הוא נפוץ פחות משיטות הכרייה האחרות ולכן הדגש בעבודה זו הושם על כרייה על פני השטח וכרייה תת קרקעית. עם זאת, יש אתגר בבדיקה – האם ניתן ליישם את שיטת הכרייה בהמסה, במקומות בהם לא נעשה בה שימוש, או שנעשה שימוש אך לא בהצלחה, בהנחה שניתן לייעל תהליכי כרייה בדרך זו. דווקא ההתנגדויות לשיטה זו מהפן הסביבתי מעודדות הצגת פתרונות חדשניים בתחום זה שיאפשרו בנוסף להתייעלות – הקטנת הפגיעה בסביבה, תוך כדי תהליך הכרייה.

2.4 שיטות עיבוד

לאחר כריית העפרה, יש צורך לבצע תהליכי הפרדה על מנת להפיק את החומר הרצוי, תהליכי ההפרדה מתבצעים בדרך כלל באתר המכרה כיוון שבמקרים רבים האתר מרוחק מאזורי תעשייה.

בשלב הראשון, מתבצעת כתישה וטחינה לסלעים שנכרו כך שמתקבלים חלקיקים קטנים יותר ונוחים לעיבוד, בשלב הבא הפרדה לפי גדלים, והחלקיקים הגדולים יותר חוזרים לשלב הקודם שוב (כתישה). תהליכים אלה מתרחשים בדרך כלל בנוכחות מים. תהליכי ההפרדה שנקטים, תלויים בגאולוגיה ובהרכב המינרלי של הסלעים.

במסמך אתיחוס בעיקר לתהליכים שמערבים שימוש אינטנסיבי במים.

2.4.1 הפרדה פיסיקלית

הפרדה לפי תכונות פיסיקליות של החומר. בין שיטות ההפרדה הפיסיקליות ניתן למנות הפרדה גרביטציונית ושיטות נוספות המתבססות על הבדלי צפיפות בין חומרים שונים (ניפוי, Dense medium separation), הפרדות שעושות שימוש בתכונות המגנטיות של החומרים והפרדות המתבססות על תהליך Floatation.

בתהליך ה-Floatation, גרגרי העפרה, מים, וחומרים כימיים מקציפים מוכנסים למיכלי ערבוב גדולים, בועות אוויר שמוזרקות מתחתית המיכל סופחות אליהן חומרים רצויים ויוצרות קצף על פני השטח, אותו ניתן לאסוף. הפסולת נערמת בתחתית המיכל. בשלבים הבאים התוצר מרוכז ומיובש.

2.4.2 פירומטלורגיה (Pyrometallurgy)

Pyrometallurgy הוא תהליך הפרדה המיועד למתכות, במהלכו יש שימוש בתנאי טמפרטורות גבוהות כדי להפיק את המתכת.

בתהליכים הפירומטלורגיים עושים שימוש בכבשני התכה, מכונות קלייה מיוחדות, sinter plants ועוד. בסוף התהליך מתקבלים זרמי גז חמים ומזוהמים שצריך לקרר ולנקות.

2.4.3 הידרומטלורגיה (Hydrometallurgy)

Hydrometallurgy הוא תהליך הפרדה המיועד למתכות, במהלכו יש שימוש בתמיסות מימיות כדי להפיק את המתכות בתהליכי עיכול.

משתמשים בדרך כלל בחומצה גופרתית או באמוניה, אם כי בהפקה של זהב, משתמשים בציאניד. יש טכניקות שונות לביצוע תהליך העיכול, בהתאם לתנאי התהליך השונים ולדרגת העפרה המעובדת - תחת לחץ גבוה, ציאנידציה של זהב, in-situ (באורניום ונחושת), bioleaching ועוד.

2.4.4 אלקטרומטלורגיה (Electrometallurgy)

Electrometallurgy הוא תהליך זיקוק במהלך הפרדת המתכות, בו עושים שימוש בתכונות החשמליות של החומרים (Electro-winning, Electro-refining).

2.5 מחצבים - מתכתיים

2.5.1 נחושת

נחושת נמצאת במצבה הטבעי באדמה בצורת עפרת סולפיד (ב-80% מהמקרים) או כמשקע אוקסידי (20%).

עפרת סולפיד מעובדת באמצעים פירומטאלורגיים – זיקוק (smelting), בעוד עפרה אוקסידית מעובדת בתהליכים הידרומטאלורגיים – עיכול באמצעות חומצה גופרתית.

לצילה יש את עתודות הנחושת הגדולות בעולם (מוערך בכ-150 מליון טוןⁱⁱⁱ), צילה היא גם המפיקה המובילה בעולם, לפני פרו וסין.

2.5.2 זהב

זהב נמצא בצורתו היסודית בטבע יחד עם כסף. שיטות העיבוד של זהב שונות וכוללות עיכול בציאניד במקום בחומצה גופרתית. עפרה אוקסידית תטופל בשיטה זו, אך קיימת גם עפרה "עמידה", בה הזהב קשור למינרליים סולפידיים, במקרה זה, לפני תהליכי העיכול, יבוצעו תהליכי floatation וקליה (חמצון).

העיכול יתבצע בסיום, במכלים או בערמות – בהתאם לדרגת העפרה.

העתודות הגדולות של זהב נמצאות באוסטרליה (מוערך בכ-7300 טוןⁱⁱⁱ), אולם, סין היא היצרנית הגדולה בעולם של זהב, והפיקה ב-2010 345 טון זהב.

2.5.3 ניקל

ניקל נמצא כעפרה לטריטית או סולפידית. העפרה הסולפידית מעובדת באמצעות Floatation, התכה וזיקוק (Smelting), בהמשך מבוצעים תהליכי עיכול או קליה על מנת למצות את הניקל.

למיצוי ניקל מעפרה לטריטית דרוש תהליך מורכב יותר הכולל שני מסלולים שונים, בהתאם לסוג העפרה הלטריטית (saprolite, limonite) כאשר הראשונה מעובדת באמצעות הידרומטאלורגיים, והשנייה באמצעות תהליכים פירומטאלורגיים.

עתודות הניקל הגדולות נמצאות באוסטרליה (הערכה של 24 מליון טוןⁱⁱⁱ), המפיקה העיקרית בעולם היא רוסיה (265,000 טון ב-2010).

2.5.4 אבץ

אבץ נמצא בדרך כלל עם עופרת או נחושת, רוב האבץ נכרה בצורת עפרה סולפידית.

העפרה עוברת תהליך כתישה שלאחריו Floatation, התמיסה המכילה אבץ עוברת תהליך הידרומטאלורגי ובסופו מזוקקת בתהליך אלקטרוליטי.

העתודות הגדולות של האבץ נמצאות באוסטרליה (מוערך בכ- 53 מיליון טוןⁱⁱⁱ), סין היא היצרנית הגדולה בעולם של אבץ, והפיקה ב-2010 3.5 מיליון טון זהב.

2.5.5 פלטינה

פלטינה יכולה להופיע בכמה צורות. אפשר לכלול יחד עם הפלטינה קבוצה של מתכות נדירות בעלות תכונות כימיות ופיסיקליות דומות שלעיתים קרובות נמצאות איתה במרבץ כסגסוגת-platinum group metals (PGMws).

PGM מתחלקות לשתי קבוצות לפי הצפיפות שלהן: כבדות (פלטיניום, אירידיום, אוסמיום) וקלות (פלדיום, רודיום, רוטניום).

מתכות ה-PGS נמצאות יחד עם מרבצי נחושת או ניקל ולכן עוברות תהליכי הפרדה דומים – floatation, זיקוק, ואז תהליכי עיכול הידרומטאלורגיים. את תהליך ה-floatation יכולה להחליף הפרדה גרביטציונית ואחריה עיכול.

עתודות ה-PGM הגדולות נמצאות בדרם אפריקה (הערכה של 63 מיליון ק"גⁱⁱⁱ), והיא גם המפיקה העיקרית בעולם (138,000 ק"ג ב-2010).

2.5.6 ברזל

עפרות הברזל האוקסידייות מתחלקות ל-hematite בעלת תכולת הברזל גבוהה יותר ול-magnetite. עפרות הברזל מסווגות לשלושה סוגים בהתאם לגודל החלקיקים בעפרה: עפרה גבשושית (Lumpy/Fine), טבעית (Natural pellet) ו"אבק כחול" (Blue Dust).

תהליך העיבוד של ה-magnetite כולל כתישה והפרדה מגנטית לסילוק מינרלים לא רצויים, בעוד עיבוד hematite כולל כתישה ואז הפרדה לפי צפיפות, במטרה להפטר מהסיליקטים.

ברזיל היא המדינה בה קיימות עתודות הברזל הגדולות בעולם (16,000 מיליון טון תכולת ברזל) והיא גם יצרנית הברזל הגדולה בעולם.

2.6 מחצבים - לא מתכתיים

2.6.1 פחם

פחם הוא סלע משקע שנוצר במהלך מיליוני שנים. הוא נמצא בטבע בכמה צורות, במסמך זה נתייחס לפחם שחור ופחם חום, תצורות פחם בעלות איכות שונה האחת מהשנייה.

פחם שחור, או פחם ביטומני, הוא פחם איכותי מדרגה גבוהה. איכות הפחם נמדדת לפי כמות החום הניתנת להפקה ליחידת משקל של פחם. תכולת הפחמן בפחם זה גבוהה, ועומדת על 60-80%. הפחם השחור משמש כחומר בערה לחימום – לייצור חשמל וכחומר גלם לתעשיית הפלדה.

בעלת העתודות הגדולות ביותר של פחם שחור היא ארה"ב, אך יצרנית הפחם הגדולה בעולם היא סין (47% מייצור הפחם בעולם).

פחם חום, או lignite, הוא סלע צעיר יותר, ודרגתו נמוכה. יש בו רמות גבוהות של לחות ואפר. תכולת הפחמן בו נמוכה ועומדת על כ-25-35%. פחם זה משמש בעיקר לייצור חשמל.

אוסטרליה היא בעלת העתודות הגדולות ביותר של פחם חום, אך היצרנית העיקרית היא גרמניה (21% מייצור הפחם החום בעולם).

פחם שחור ראוי לשימוש ללא תהליכי עיבוד משמעותיים לאחר הכרייה, בעוד לפחם חום דרושים תהליכי עיבוד נוספים לשיפור איכותו.

תהליכי ההפרדה כוללים ריסוק, ניפוי ושטיפה, כאשר תהליכי שטיפת הפחם יכולים להתבצע בטכניקות שונות ובצריכות שונות של כמות המים.

בשלב הבא מוציאים את המים ומייבשים את הפחם. תהליך זה קובע את איכות הפחם, כיוון שתכולת לחות גבוהה, מקטינה את יכולת ההתלקחות של הפחם.

הוצאת המים מהפחם יכולה להתבצע בתהליכים של אידוי או בתהליכים הידרותרמיים. תהליכי אידוי יעילים בהורדת תכולת המים באופן משמעותי, אך מעלים את הסיכון להתלקחות ספונטנית. תהליכים הידרותרמיים ניתן לבצע בכמה אופנים - הוצאת המים מהפחם בטמפרטורה הנמוכה ביותר האפשרית, כדי להימנע מהשקעת האנרגיה הנדרשת לאידויים. המים המתקבלים מתהליך זה עלולים להיות מזוהמים בחומרים אנ-אורגניים מסיסים ופנולים.

2.6.2 סלע פוספטי

תהליך עיבוד הסלע הפוספטי כולל מספר שלבים במטרה להפריד את החומרים הלא רצויים בעפרה מהמחצב. השלב הראשון הוא שלב השטיפה, בו העפרה מופרדת לפי גדלים, כאשר החלקיקים הגדולים יותר, נשלחים לכתישה מחודשת ושוב ממוינים. בין כתישה למיון ולמיונים חוזרים, העפרה נשטפת בכמויות גדולות של מים לסילוק חומרים לא רצויים.

במידה ותוצר שלבי השטיפה כולל בתוכו יותר מאחוז אחד של MgO מתבצע שלב של Heavy Media Separation, בו מופרדים החלקיקים לשלוש קבוצות לפי גדלים, כאשר הגדולים מושלכים כפסולת, הבינוניים מועברים להפרדה בהידרוציקלון, והקטנים מועברים להפרדה בתהליך Floatation בשיטות שונות בהתאם לגודל וצורת החלקיקים. גם בשלב ה- Heavy Media Separation יש שימוש במים.

העתודות הגדולות של פוספטים בעולם נמצאות במרוקו ואזור הסהרה המערבית, בכמות המוערכת ב-50,000^{iv} מליון טון. היצרנית הגדולה בעולם של פוספטים היא סין, שהפיקה ב-2011 65 מליון טון.

ARD הוא תהליך בו מים חומציים ומזוהמים זורמים באזור מכרות, או מקומות אחרים בהם הייתה פגיעה בקנה מידה גדול בפני הקרקע.

כמות גדולה של סלעים המכילים מינרליים סולפידיים נחשפים לחמצן (אוויר) ומים ומתחמצנים, מיקרואורגניזמים שעשויים להיות נוכחים או להתפתח במים אלה, מאיצים את התהליך ליצירת Hydrated Iron Oxide. החשיפה נעשית כאשר מים זורמים לתוך המכרה, מי תהום או מים על פני השטח (גשמים, הפשרת שלגים, הצפות וכד'), או מים שזורמים באזורי הפסולת הסלעית של המכרה.

מים שזוהמו ב-ARD הם מים חומציים מאוד ומזוהמים במתכות ובחומרים רעילים אחרים הנמצאים במכרה ו/או בסביבותיו. ההשלכות הסביבתיות עלולות להיות תמורות וכוללות זיהום מקורות המים באזור ופגיעה בצמחיה, בבעלי החיים וכמובן בבני אדם.

גורמים המשפיעים על התפתחות ARD:

- 1) ההרכב המינרלי של הסלע (נוכחות מינרלים סולפידיים, נוכחות חומרים בסיסיים).
- 2) פיזור הגדלים של הפסולת הסלעית (חלקיקים קטנים יותר- שטח מגע גדול יותר עם מים ואוויר).
- 3) צורת אחסון הפסולת הסלעית (ערמות מהודקות או לא, מכוסות או לא, קרבה למקורות מים ונתיבי זרימה של מי גשמים).
- 4) אקלים (התופעה מחמירה באקלים חם ולח).

מכאן ניתן לגזור את דרכי המניעה האפשריות, כאשר בראש ובראשונה חשוב לשים דגש על הקטנת חשיפה אפשרית של הסלעים למים – הגבלת המגע בין מים לבין פסולת סלעית מהמכרה, וכמו כן טיפול במים שהיו במגע עם סלעים המכילים מינרלים סולפידיים.

אחסון נכון של הפסולת בסלעית – ערמות מהודקות, מכוסות כאשר מושם דגש על הקטנת מגע עם מים ואוויר ככל הניתן.

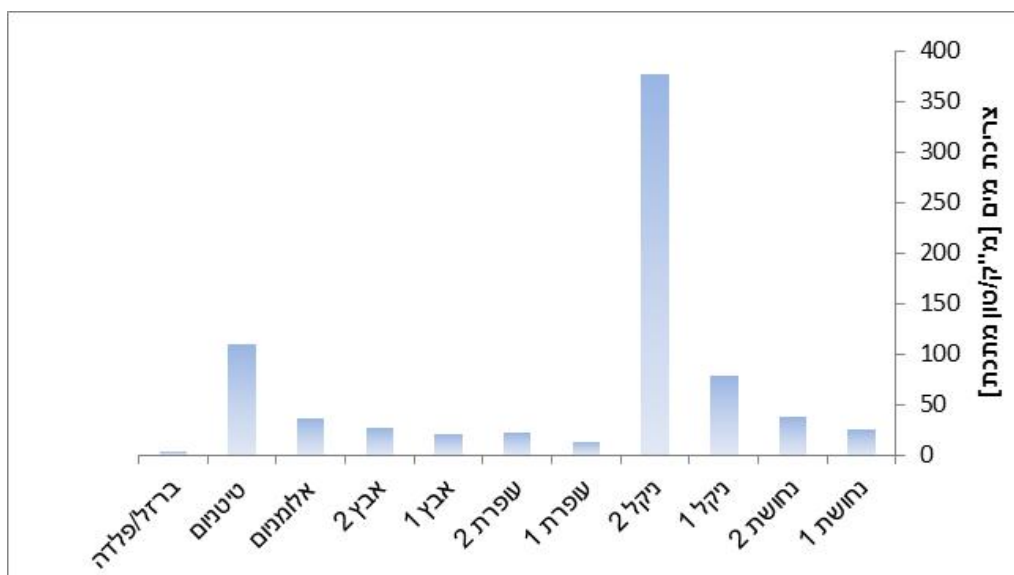
כאשר נעשה פיתוח של מערכות לשליטה ובקרה על מים באתר המכרה, חשוב לתת את הדעת לזרימת מי הגשמים באזור, ובנוסף להתייחס גם למי התהליך (שפכים הנוצרים תוך כדי שימוש המים בתהליך הכריה או כאשר מי תהום שחלחלו למכרה נשאבים החוצה). מים על פני השטח מובלים בתעלות הרחק מהמכרה לפני שבאו במגע עם מזהמים אופציונליים, ומים שכבר מכילים זיהומים, מופנים למאגרים לאידוי וטיפול.

CSRIO פרסמה מחקר בו חושבה צריכת המים בתהליכי כרייה והפרדה של מתכות שונות לפי שיטה שפותחה ששמה "Life Cycle Analysis (LCA)".
 תוצאות חישובים אלה מובאות בטבלה ובתרשים מס' 2, יש לשים לב שהמים הנדרשים ליצור אנרגיה נכללים גם הם בחישוב, לכן, ההערכה לגבי צריכת המים בתהליכים הצורכים חשמל באופן מסיבי כמו EW, גבוהה באופן חריג.

טבלה: צריכת מים בתהליכי כרייה והפקה של מתכות

צריכת מים [מ"ק מים לטון מתכת]	מתכת
25.9	נחושת
38.0	
79.0	ניקל
376.6	
12.6	עופרת
21.7	
21.2	אבץ
26.3	
35.9	אלומיניום
110	טיטניום
2.9	ברזל/פלדה
252087	זהב

תרשים 1: צריכת מים בתהליכי כרייה והפרדה של מתכות



ניתן לראות כי הצריכה בהפקת זהב גבוהה מאוד ביחס לאחרים (אינה מופיעה בתרשים מסיבה זו) ועומדת על 252,087 מ"ק לטון זהב, ניקל 2 הבאה אחריה, אם כי מדובר בהפקה בשיטת הצורכת אנרגיה חשמלית (SX/EW), ויש לקחת זאת בחשבון, עם 377 מ"ק לטון ניקל, הצריכה הנמוכה ביותר באה לידי ביטוי בהפקת ברזל לפלדה ועומדת על 2.9 מ"ק לטון.

דרגת העפרה שנכרתה משתקפת באופן בולט לפי חישובים אלה, ניתן לומר שיש יחס הפוך בין צריכת המים לדרגת העפרה. כלומר – ככל שרמת העפרה יורדת (אחוז המתכת בעפרה קטן), כמות העפרה הנדרשת להפקת כל טון מתכת גדלה ומכאן גם כמות המים לכל טון מתכת. **האתגר שעולה מנתונים אלה, הוא פיתוח שיטות חדשניות להפקת המתכת מעפרה מדרגה נמוכה יותר מבלי להגדיל את צריכת המים באופן משמעותי, או ממש להוריד את צריכת המים בשיטות ההפקה וההפרדה הקיימות.**

הרגולציה בנושא מתחלקת לשני תחומים עיקריים: השימוש במים מול צרכים אזוריים, וניטור איכות המים, כולל השפעות סביבתיות של זיהומים כתוצאה מפעולות הכרייה.

3.1 בינ"ל

קיימים מספר ארגונים בינלאומיים על בסיס התנדבותי העוסקים בנושאי מים בכרייה, ארגונים אלה מקדמים זיהוי ופיתוח סטנדרטים בינ"ל לתעשיית המכרות. הסטנדרטים מבוססים על תקינה במדינות בעלות מערכת תקינה מפותחת ומבוססת, ומטרתם, בין היתר, עידוד חקיקה דומה במדינות נוספות.

בין הארגונים ניתן למנות את:

The International Mine Water Association (INWA)^{vi} – נוסד ב-1979, ראשון מבין הארגונים.

The International Network for Acid Prevention (INAP)^{vii} – ארגון מתוך התעשייה, מאגד מידע בנושא ARD. בין חברי הארגון נמצאות גם חברות הכרייה המובילות. באמצעות INAP נכתב **The Global Acid Rock Drainage guide (GARD)** שנותן סקירה על דרכי ניהול המים האופטימליות והטכנולוגיות הזמינות לטיפול ומניעה ב-ARD.

The International Council on Mining and Metals (ICMM)^{viii} - גוף שהוקם ב-2001 במטרה לשפר את פיתוח תפיסת הקיימות בתעשיית המכרות. בארגון חברות 21 חברות כרייה.

Global Reporting Initiative (GRI) – סטנדרט הדיווח הנפוץ ביותר בשימוש בנושא קיימות, אומץ ע"י חברות הכרייה המובילות.

הדיווח נעשה במאמץ לעזור לחברות הכרייה לפתח שקיפות בנושאי המים.

The International Cyanide Management Code^{ix} – תכנית של התעשייה, במיוחד לתחום כריית הזהב, המקדמת ניהול אחראי של ציאניד סביב כריית הזהב.

המגמה הבינ"ל כיום היא החמרה ברגולציות הסביבתיות, במיוחד יצירת תאימות בין הרגולציות של המדינות המפותחות לאלו של המדינות המתפתחות, לא תמיד רמת האכיפה צועדת באותו קצב. בסין, מדינה בה יש רגולציות מתקדמות, האכיפה הולכת וגדלה במטרה להפוך את הרגולציות לאפקטיביות.

הרשויות הסביבתיות בעולם דורשות גם ממכרות קיימים להתאים עצמם לשינויים, ולשדרג את מערכות הטיפול שלהם במים בהתאם לרגולציות החדשות. מחיר הסחורות הגבוה מאפשר למכרות לעמוד בדרישות אלה.

אמנם רגולציות ומידת אכיפה משתנות ממקום למקום, אך חברות כרייה גדולות ובין לאומיות בדרך-כלל דורשות מאתרים שלהן ברחבי העולם, בין אם נמצאים בארצות הברית או באפריקה, את אותם סטנדרטיים.

3.2 צ'ילה

בצ'ילה מערכת רגולטורית מרכזית. הארגונים הממשלתיים העיקריים האחראים למדיניות בתחום המים בתחומים הקשורים למכרות הם:

The General Water Directorate (DGA) - מחלקה ב- **Public Works Ministry (MOP)** שעוסקת בתכנון פיתוח מקורות המים, הקצאת רישויים לשימוש במים, הגנה על מקורות המים ועוד.

National Environment Commission (CONAMA) - הייתה הרשות הכללית המנהלת את התחום הסביבתי, וכיום, לאחר פיצולה מנהלים את התחום הגופים הבאים-

- **Ministry of the Environment (MMA)**
- **Environment Evaluation Service (SEA)**

The Water Regulatory Agency (SISS) – אחראית על אכיפת חוקים בנוגע לפליטות שפכים לסביבה.

The National Initiative for Water Efficiency (INEH) – עוסקת בניסוח מדיניות בתחום המים במשותף עם מקבלי ההחלטות בסקטורים תעשייתיים שונים.

The Ministry of mining – עוסקת באכיפת חוקי המכרות והמים בנושאי המכרות.

The National Service of Geology and Mining (SERNAGEOMIN) – גוף טכני שמהווה חלק ממשרד המכרות עוסק בהערכת ההשפעות הסביבתיות של פעולות הכרייה.

The Chilean Copper Commission - גוף ציבורי טכני שמעריך ומפקח על ניהול חברות הכרייה הממשלתיות.

CODELCO – Chile National Copper Corporation – חברה אוטונומית, שייכת לממשלה, יצרנית הנחושת הגדולה בעולם.

General Directorate of Maritime Territory and Merchant Navy (DIRECTEMAR)

הקצאות מים לשימוש בצ'ילה מתבצעות בכפוף לחוק המים המקומי. ה- DGA מקציב זכויות לשימוש במים, בדומה לכל משאב סחיר. הערכת ההשפעות הסביבתיות של תהליך הכרייה מבוצעת בכפוף לחוק הסביבה (Ley de Bases del), שמפרט מהם התהליכים שצריכים להתבצע

על מנת להעריך השפעות אלה. לכל פרויקט כרייה דרוש אישור סביבתי, ולאחרונה נוהגים לדרוש מחברה לשקול אספקת מים חליפית כגון מים מהתפלה, כיוון שאין מספיק זכויות למי התהום.

בצילה קיימים סטנדרטים לפליטת חומרים שכיחים בתחום שפכי המכרות שתואמים למדינות מפותחות בהן קיימת פעילות מכרות ענפה. רמות מקסימליות מורשות לפליטה, רלוונטיות למכרות אפשר למצוא ב- Supreme Decree D.S.90/00.

החוקים בנושא פליטת שפכים לסביבה אינם צפויים להשתנות בעתיד הנראה לעין, אולם בשנים האחרונות נעשים מאמצים רבים בתחום הגברת האכיפה, כך שחוקים קיימים, שלא נאכפו עד היום, עומדים להפוך רלוונטיים. SISS צפויה לקבל תקציבים מוגדלים שיאפשרו את האכיפה המוגברת של הרגולציות הנ"ל.

סיום תהליך הכרייה נעשה בכפוף לחוק לבטיחות במכרות (Reglamento de Seguridad Minera)^x, החוק דורש הגשת תכנית מסודרת לתהליך סיום הכרייה לרשויות כבר בתהליך בקשת האישורים לכרייה.

3.3 אוסטרליה

באוסטרליה קיימת מערכת ממשל מבוזרת, כל מדינה אחראית על ניהול מקורות המים שלה, ואין חקיקה אחידה לכל המדינות. לעומת זאת, יש קווים מנחים שמתווים ע"י סוכנויות פדרליות כמו Department of Resources, Energy and Tourism.

ה- National Water Initiative (NWI) הוא מסמך מתווה מדיניות כזה, המהווה כיום מתווה עיקרי להסדרת נושא השימוש במים ברמה הארצית. מטרת ה- NWI לשמור על שוק תחרותי ומערכת המבוססת על תכנון מראש ורגולציה, לניהול מקורות המים העיליים ומי התהום, כל זאת, תוך שאיפה להגברת היעילות הכלכלית, הסביבתית והחברתית. מדינות שפועלות לפי הדירקטיבה של NWI זוכות בתמורה בסיוע כלכלי משמעותי.

ANZECC guidelines^{xi} מספקים מסגרת לרגולטורים לניטור ושליטה על איכות המים.

הקצאות ואישורים לשימוש במים - ממשל מקומי של כל מדינה מהווה את הרשות האחראית להקצאת מים למכרות. מערך של רישוי להקצאות מים משמש בכמה מהמדינות לניהול השימוש במים. זכויות לשימוש במים נותנות אפשרות מתמשכת לשימוש בעוד הקצאות ומאפשרות שימוש בכמות מוגבלת בעונה מסוימת. זכויות ניתנות לרשויות ספקיות המים, מועצות מקומיות ולצרכנים מסחריים (ביניהם מכרות).

Environment Impact Assessment (EIA) היא הרשות (ספציפית לכל מדינה) שיכולה לתת אישורי הפעלה למכרות.

רגולציות פליטת שפכים לסביבה - הממשל המקומי אחראי על חקיקה ואכיפה בנושא פליטת שפכים לסביבה. National Eater Quality Management Strategy guidelines (NWQMS) משמשים לקביעת קריטריונים לפליטת השפכים. על מפעילי מכרות להגיש בקשה לרשויות לקבלת אישור לפליטת פסולת לפי תקנות הממשל המקומי. רישיונות אלה כוללים דרישות נוספות מעבר לדרישות בהתאם ל- NWQMS ו- ANZECC (איכות המים) הנקבעות בהתאם לשימושים הצפויים לשפכים אלה, אם בכלל.

3.4 ארה"ב

בארצות הברית, חוקים ותקנות בנושאי המים נקבעים ונאכפים ברמה פדרלית וגם ברמה מקומית. בתחום הקצאות המים, הרגולציה היא ברמה המקומית, לכל מדינה יש את המערכת שלה בתחום זכויות השימוש במים.

רגולציות פליטת שפכים לסביבה - נהלי פליטת שפכים לסביבה נקבעים גם הם באופן מקומי בהתאם ל-Clean Water Act^{xii} ומספר מסמכי נהלים נוספים, ביניהם נהלים לתקנים בתחום שפכים תעשייתיים.

המשרד האמריקאי להגנת הסביבה (EPA) משמש כגוף מאשר, ותפקידו לנטר את הנהלים המקומיים על מנת לוודא שהם טובים דיים.

ההתייחסות לריכוז המזהמים בשפכים מתחלקת לשניים – ריכוזם האבסולוטי וכן כמות כללית של מתכות ביום (Total Maximum Daily Loud – TMDL). ב-EPA מפתחים את האשרות לניהול "מסחר זיהומים" במקור מים מסוים באמצעות TMDL, למשל בהקשר לסלניום וכספית וכן ניטרט (אמוניום ניטרט מגיע מחומרי הנפץ במכרות).

חקיקה עתידית תכלול הקטנת ריכוזי המזהמים המותרים ככל שיכולת הדטקציה (הזיהוי) עולה. כמו כן, מחקרים חדשים על החומרים הרעילים בשפכים חושפים עוד סכנות לבריאות הציבור שלא היו ידועות קודם לכן, (למשל לגבי תכונות של ארסן וסלניום במים בעלי PH נטרלי), שינויים אלה, יגרו בעקבותיהם עוד ועוד החמרות ברגולציות בארצות הברית, וכתוצאה מכך גם במקומות נוספים בעולם.

יש צפי לחקיקה חדשה בארה"ב במהלך 2012 שתוריד את ריכוז הסלניום המותר ל-5ppb. Veolia Water Solutions & Technology עושה מאמצים רבים בכוון פיתוח טכנולוגיות טיפול בסלניום.

3.5 דרום אפריקה

הגופים הרגולטוריים העיקריים בתחום המים כוללים את המחלקה לענייני מים (Department of Water Affairs), מקורות מינרלים (The Mineral Resources) והמחלקה לענייני סביבה (Department of Environmental affairs). המחלקה לענייני מים אחראית על כל האספקטים של החוק National Water Act (NWA)^{xiii}. חוק זה מאפשר הקצאת רישיונות לשימוש במים התלויים בזמינות המים באזורים שונים. בנוסף, NWA קובע מגבלות לאזורים שונים בנפרד, בנוגע לריכוז מקסימלי מותר של חומרים רעילים בשפכים.

בעתיד הנראה לעין נעשית עבודה בתחום פיתוח מערכת חיוב לפליטות פסולת הנותנת רישוי לפליטות של נפחים מסוימים המותאמים לאזור. החיוב ישתנה לפי מידת הרגישות לחומרים רעילים באזור מסוים.

יוזמות נוספות בנוגע לחקיקות בתחום המים כוללות חוקים בתחום סווג וניהול פסולת מסוכנת. חוקים אלה ישפיעו על ניהול המים בתעשיות הרלוונטיות ויגררו שינויים ושיפורים בתחום זה. אם בעבר הדגש היה על ניהול המים בלבד, תוך התעלמות מתמלחות ובוצה, כיום יש הכרה בחשיבות של התייחסות כוללת לניהול פסולת, בניגוד לניהול שפכים בלבד.

בנושא ARD, אין חקיקה ספציפית אלא רק דרך רגולציות שעוסקות באיכות המים. בדרא"פ אזוריים בהם קיימת בעיית ARD נמצאים קרוב לריכוזי אוכלוסייה. הבעיה בטיפול נובעת, בין היתר, מקושי לקבוע על מי מוטלת חובת המימון של טיפולים אלה. בנושא זה עומדת הצעה להטלת מס סביבתי, אך דרוש תהליך רגולטורי מורכב לפני שניתן יהיה ליישם הצעה כזו.

3.6 קנדה

בקנדה, האחריות לחקיקה ואכיפה של רגולציה בנושאי מים נחלקת בין הרשויות בכל הרמות – מוניציפלי, פרובינציאלי, פדרלי וכו'. הרשויות הרלוונטיות משתנות מטריטוריה לטריטוריה.

ברמה הפדרלית, יש ארבעה חוקים עיקריים שמשפיעים על תחום המים במכרות:

Canada Water Act^{xiv} - בנושא פליטת פסולת לסביבה.

Canadian – ניהול מקורות המים.

Environmental Protection Act^{xv} - אכיפת סטנדרטים סביבתיים להקטנת זיהומים במים והאוויר.

Fisheries Act^{xvi} – עוסק בניטור איכות השפכים

פליטת שפכים לסביבה נמצאת בתחום האחריות של Metal Mining Effluent Regulations (MMER), הסטנדרטים מבוססים על BAT (Best Available Technology).

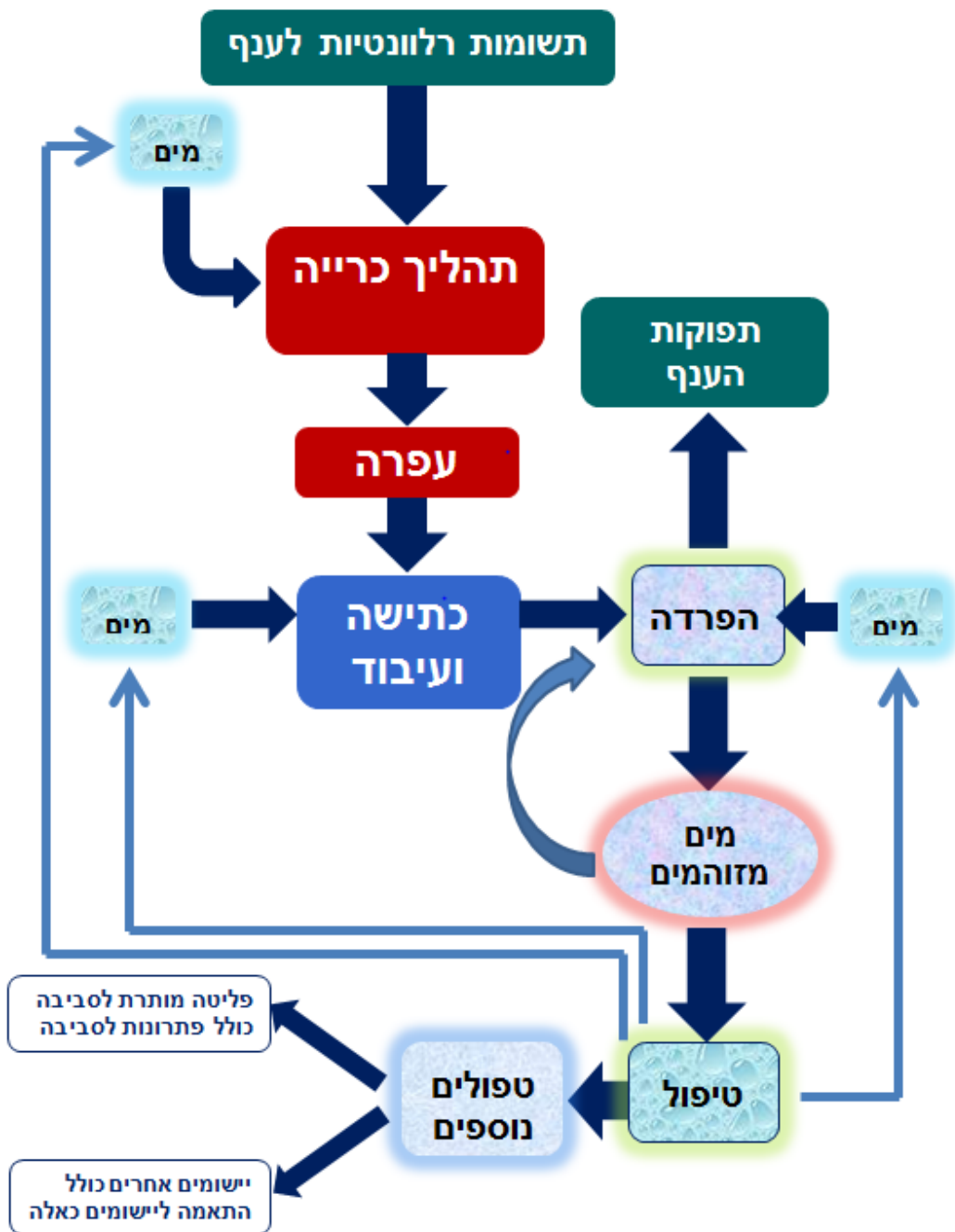
קנדה נחשבת מובילה בעולם בתחום טיפול בתופעת ARD, בזכות תכנית הנקראת Mine Environment Neutral Drainage (MEND). תכנית זו משותפת לחברות הכרייה ולרשויות מכל הדרגים, ומנוהלת ע"י Natural Resources Canada (NRC), ומטרתה קידום מחקר ויישום בטכנולוגיות חדשות ומניעה וטיפול ב-ARD.

מבחינת ההתמודדות עם רגולציה מקומית, יש חשיבות ליצירת קשר רציף עם האנשים המתאימים במדינות היעד בהם יש לחברה עניין, במטרה לדעת על שינויים מולים שרלוונטיים לתחום הפעילות של החברה, פירוש השינויים בתקנות וכו'.

4.1 דיאגרמת מהלך המים בתעשיית המכרות

הדיאגרמה הבאה (תרשים 2) מבטאת את מהלך המים בתעשיית כריית המינרלים, אנו ננסה לעקוב אחר מהלך זה על מנת להבהיר את הנקודות החשובות המהוות אתגר עבור תעשיית המים הישראלית.

תרשים 2: דיאגרמת מהלך המים בתעשיית המכרות



כאמור, מים משמשים בכל שלבי הכרייה וההפרדה של מתכות: בכרייה, בכתישה, בשינוע ובתהליכי המיצוי וההפרדה השונים. בנוסף, לניהול המים הקיימים באזור המכרה (מי תהום, נחלים, מי גשמים וכו') חשיבות גדולה מבחינת טביעת הרגל הסביבתית של תהליך הכרייה והשיקום שלאחריו.

נבדוק מהיכן מגיעים המים הנכנסים לתהליך, אילו טיפולים מקדימים הם עוברים, מה קורה להם בתהליכי הכרייה וההפרדה, אילו טכנולוגיות משמשות לטיפול בשפכי הכרייה למטרת השבה, לפני פליטה מותרת לסביבה, או להמשך שימוש בתחומים אחרים (מיחזור).

4.2 ניהול מים במכרה

אחת הדאגות הגדולות בנוגע לזרימה של מי שפכים ממכרה, היא החומציות שעלולה להיווצר והעובדה שהם מכילים מתכות ורעלים. מקורות למים מזוהמים שאינם תוצאה של תהליך הכרייה וההפקה עצמו יכולים להיות: דליפות מעבודות כריה תת קרקעיות, זרימה ממכרות נטושים, זרימת מים חומציים מאזור פסולת סלעית, מאגרי שפכים שעולים על גדותיהם במהלך גשמים כבדים או המסת שלגים, דליפות מאזורי אחסון של חומרים כימיים, זרימה מאזורי כרייה נטושים ודליפות מצנרת.

ניהול המים הנקרא גם BMP (Best Management Practice), מתייחס לתהליכים שמטרתם הפחתת כמות הזיהום החודרת למי התהום, או המים העיליים, לאוויר, או לאדמה. ניהול המים יכול להתבצע באמצעות תהליכים מסוימים, פעולות נדרשות או מבנה פיסי מותאם – נדגים בהמשך.

BMP כוללת דרישות טיפול ותהליכים מותאמים במטרה לשלוט על הזרימות הלא רצויות ו/או הדליפות באתר, על סילוק הפסולת והשפכים, כולל אבטחת שטחי האחסון והטיפול בהם.

דוגמאות לשיטות ניהול מים: ^{xvii}

- התקנת ציפוי פנימי כפול במאגרי השפכים וכן בניית שוליים מוגבהים למניעת גלישת שפכים במהלך הצפות.
- התקנת ציפוי פנימי כפול וגלאי דליפות בכל הציוד המעורב בתהליכי העיכול.
- ביצוע מדידות סדירות לאיתור בלאי/קורוזיה.
- הגנה על גדות נחלים למניעת פגיעה במרעה.
- ניתוב מחדש של מעיינות תת-קרקעיים באזור המכרה.
- ניקוז כל הזרמים מהסדנאות והמחסנים לתעלות מיוחדות הבנויות כך שלא יבואו במגע עם פסולת הסלעים – המאגרים המכילים תמיסות עיכול, מתוחכמים יותר, בגלל הסכנות הסביבתיות הברורות וכן בגלל הערך האופציונלי של שאריות מתכות בשפכים אלה.
- ניטור כל המשאבות והמאגרים לדליפות ובנוסף התקנת מערכות גיבוי מתאימות.

- המים העיליים מוגנים במערכות שאיבה במטרה לשלוט או להפחית את החלחולים התת קרקעיים של מים מזוהמים ממאגרי איסוף ופסולת.
- במקומות בהם מזהים תנועה של מי תהום, נחפרות בארות ומשאבות מפנות את המים למאגרים למניעת זיהומים.
- מערכות ניקוז תת קרקעיות משמשות גם הן לשליטה על דליפות באזורי כרייה.
- מחסומים תת קרקעיים מונעים ממים מזוהמים לחלחל ולבוא במגע עם אזורים בהם מתבצעים תהליכי כרייה (מלט וכד').

4.3 הזנת מים, טיפול ושימוש מחדש במכרות

מים מוזנים לתהליך ההפקה בתהליכי הכרייה, ההפרדה, המיצוי והשינוע.

מקורם של מים אלה תלוי בתנאים הגאוגרפיים, הגאולוגיים והאקלימיים של המכרה וכן ברגולציה המקומית בנושא הרשאות השימוש במים לתעשייה.

בין המקורות האופציונליים למים, ניתן למנות:

- מים עיליים
- מי תהום מתוקים/מליחים
- מי ים
- מים מותפלים
- מים מאספקה מוניציפלית
- מים מושבים מפעולות הכרייה

המחסור העולמי במים מערים קשיים על אספקת המים גם בסקטור הכרייה, במיוחד במדינות כמו אוסטרליה, דרום אפריקה, פרו וצ'ילה, בהן קיימים אזורים נרחבים הסובלים ממחסור חמור במים, ומאכלסים אתרי כרייה רבים וגדולים.

השימוש במים מותפלים או מי ים הופך אלטרנטיבה מועדפת על חלק מהמכרות באזורים אלה, גם אם לפעמים אינם נמצאים קרוב לים והמים המותפלים צריכים להיות משונעים למרחקים גדולים.

מספר גורמים, לוקחים חלק בבחירת מקור המים למכרה, לאחר בחינת המקורות הזמינים וקבלת ההרשאות וההקצאות המתאימות, ביניהם כמות המים הנדרשת, מהם התהליכים בהם אמורים המים לקחת חלק, מהן רגולציות הפליטה לסביבה ועוד.

תהליכים מסוימים דורשים מים באיכות ניקיון גבוהה (למשל – עיכול באמצעות ציאניד), לתהליכים אחרים איכות גבוהה של המים פחות משמעותית (למשל – floatation), שימוש במי ים, עלול לצור קורוזיה ובלאי של המערכת.

בתחום ההתפלה ההתקדמות הטכנולוגית הופכת התפלה באמצעות טכנולוגיית RO (ממברנות Reverse Osmosis) לכדאית, אולם עלויות שינוע המים עלולות להוות חיסרון.

כל הגורמים האלה ועוד גורמים ייחודיים למכרה עצמו נלקחים בחשבון בתהליכי ניהול המים במכרה.

4.4 טיפול בשפכים ושחרור לסביבה

בפרק זה יתוארו הטכנולוגיות העיקריות לטיפול בשפכי מכרות. קיימות טכנולוגיות רבות שעשויות לשמש בטיפול המים המזוהמים במכרות, כדי להכיר את אלה שנמצאות בשימוש כיום, ננסה למנות אותן בסקירה קצרה (ללא הסבר מפורט על כל טכנולוגיה) כאשר הן מחולקות לקבוצות בהתאם לתפקיד אותו הן ממלאות בטיפול בשפכים:

4.4.1 טכנולוגיות לנטרול השפכים:

שיטות אלה ננקטות במיוחד לפתרון בעיית מים חומציים כתוצאה מתופעת ARD שהתפתחה או שעלולה להתפתח. בבסיס שיטות הנטרול עומד הניסיון לסתור את חומציות המים באמצעות ראגנטים בסיסיים.

בין השיטות הנפוצות לנטרול ניתן למנות את הבאות:

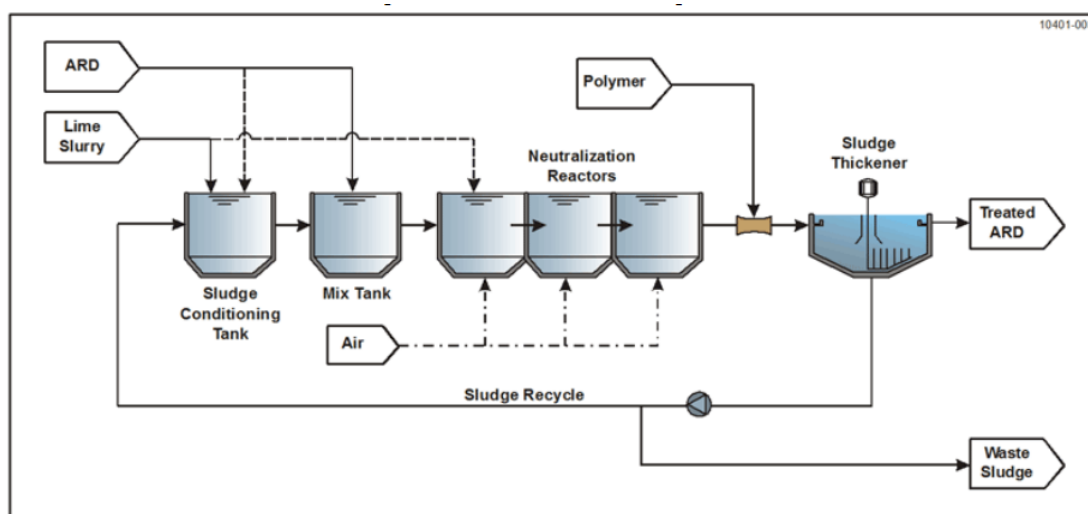
• Conventional lime neutralization^{xviii}

השפכים החומציים מוכנסים למיכל ערבוב יחד עם החומר המגיב – סיד (lime). לאחר מכן, מתבצעת פלוקולציה, והפרדת מוצק-נוזל ב – clarifier. בשלב הבא, הבוצה שנאספה בתחתית נאספת ומועברת לאגן אחסון, או – מסוננת בלחץ לפני שמועברת לטיפולים נוספים או פליטה מורשית לסביבה. המים, גם הם, נפלטים לסביבה או מועברים לטיפולים נוספים, בהתאם לצורך.

• High density sludge (HDS)^{xviii}

תהליך מתקדם יותר, נפח הבוצה בסוף התהליך קטן באופן משמעותי והצפיפות עולה.

תרשים 3: דיאגרמה של תהליך HDS בסיסי^{xix}



Limestone neutralization^{xix} •

תהליך המשמש במכרות פחם, עלותו נמוכה והבטיחות בהפעלתו גבוהה יותר יחסית לאחרים. התהליך כולל ניטרול ושיקוע המתכות במים החומציים – בייחוד ברזל ואלומיניום.

4.4.2 אגנים ירוקים

אגן ירוק (wetland) הינו מערכת של ביצות מלאכותיות. מטרת הקמת האגן הירוק היא חיקוי תהליכי הטיהור המתרחשים בביצות טבעיות. אגנים ירוקים פועלים כמסננים טבעיים של זיהומים שונים בשפכים כגון חומרים אורגניים, חומרים מוצקים מרחפים ומתכות כבדות, באמצעות חומרים אלמנטים טבעיים כמו אדמה, סלע, צמחיה, שבבי עץ וכד'.

יוני המתכת ממוצים מהשפכים באמצעות חימצון, קליטת ע"י צמחים, חילופי יונים עם חומרים אורגניים, שיקוע וסיפוח. קיימים אגנים ירוקים אירוביים ואנ-אירוביים. יעילות מוכחת של אגנים ירוקים, כמו גם שיטות נוספות לטיפול פסיבי בשפכים, בדרך כלל נכונה עבור זרימות נמוכות של פחות מ-1,000 קוב ליום, כאשר מערכת הטיפול הפסיבי הגדולה ביותר המתועדת, טיפלה בכ-6,500 קוב ליום מאז 1996.^{xx}

4.4.3 השבת מתכות

שיטות להוצאת מתכות משמשות למיצוי המתכות המומסות בשפכי המכרה. למיצוי המתכות עשויה להיות מטרה כפולה – ניקוי וטיהור השפכים ומיצוי לשם שימוש במתכות.

בחירת טכנולוגית הטיפול תלויה במאפייני השפכים ובמטרת הטיפול. ב-PH נמוך, מסיסותן של המתכות גבוהה, לכן שיטות הניטרול והפרדת מוצק/נוזל, יעילות גם למטרה זו. שיטות נוספות למיצוי מתכות כוללות:

- תהליך שיקוע סולפיד^{xxi}
יעיל למיצוי ארסן, קדמיום, נחושת, קובלט, עופרת, מנגן, ניקל, סלניום, אבץ, אנטימון, כספית ומנגן.
- תהליך שיקוע BioSulphide^{xxii}
תהליך ביולוגי המערב שימוש בגז מימן גופרתי המיוצר באופן ביולוגי ומשמש כמגיב בטיפול במי השפכים.
- תהליך שיקוע Chemsulphide^{xxii}
תהליך המערב שימוש בגז מימן גופרתי ממקור כימי.
- Biogenic sulfide precipitation – THIOTEQ^{xxiii}
בתהליך זה, מקור המימן הגופרתי הוא ביוגני.
- BIOMETEQ biological sulfide precipitation^{xxiii}
- Biological filters – ABMet^{xxiv}
- Fluidized bed reactor – METCLEAN^{xxv}

4.4.4 ממברנות

טכנולוגיות ממברנליות משמשות להוצאת חלקיקי חומר ומומסים ממי השפכים. מיקרופילטרציה ואולטרפילטרציה משמשות להוצאת חלקיקי חומר, ננופילטרציה, אוסמוזה הפוכה (Reverse Osmosis-RO) ואלקטרודיאליזה (Electrodialysis-ED) משמשות להוצאת מוצקים מומסים. באמצעות מחליפי היונים (Ion Exchange-IX) מטפלים ביונים ספציפיים ואלקטרודיאליזה ביפולרית (Bipolar Electrodialysis-BPED) מערבת שימוש בממברנה מחליפת יונים בתהליך אלקטרודיאליזה.

4.4.5 Evaporators, Concentrators, Crystallizers

במסגרת הטכנולוגיות להוצאת מים, קיימות שיטות מתקדמות בסופן מתקבלים מים ברמת ניקיון גבוהה וכמות מוצקים נמוכה מאוד. יש צורך בטיפולים מקדימים לשפכים לפני יישום טכנולוגיות אלה ובנוסף, הן צורכות כמויות גדולות של אנרגיה.

- **צמצום נפח התמלחת**^{xxvi}
שיטות המשמשות להקטנת נפח הנוזל הנדחה בעקבות טיפול בממברנות RO. התמלחת המרוכזת הנותרת לאחר התהליך, יכולה לעבור תהליך גיבוש המוצקים (ב) – Crystallizers) והפרדה למים בדרגת ניקיון גבוהה ומוצקים יבשים.

- **Crystallizers^{xxvi}**

כשיש צורך להתקרב לרמת ZLD (Zero Liquid Discharge), משתמשים ב-Crystallizers.

- **מאיידים**

VCD^{xxvii} (Vapor Compression Distillation) מערב דחיסה מכנית של פאזת האדים כדי לספק את האנרגיה הדרושה לאידוי. זיקוק בתהליך MED (Multi Effect Distillation) האדים. בתהליך זה נצרכת כמות גדולה של אנרגיה, לכן, מבצעים אותו במספר שלבי חימום ובתת לחץ במטרה להגדיל את יעילותו.

4.4.6 טכנולוגיות להוצאת מים

Dewatering technologies משמשות להפחתת נפח המים בשפכי המכרה, ולניקוי מים אלה. בתהליך Dewatering משתמשים בפלוקולנטים משקעים להוצאת חומרים מזהמים מהתמיסה.

- **Clarifiers**

טיפול בשפכים באמצעות Clarifiers, כולל שימוש בפלוקולנטים לשיקוע בוצה, אותה ניתן להעביר להידרו ציקלון לטיפול הפרדה נוספים.

- **Dissolved air floatation (DAF)**

ב-DAF מתבצע תהליך הפרדה שמתבסס על הזרקת אוויר בלחץ למיכל השפכים, במטרה לצור בועיות קטנות שסופחות אל פני השטח שלהן מוצקים במי השפכים. שכבת הקצף צפה על פני שכבת המים ומוסרת באופן מכני.

Clarifier – ו DAF שמשלבת ITT Leopold Clari-DAF.

4.4.7 סינון

מערכות סינון משמשות להפרדה בין המוצק לנוזל, ברמה שמפחיתה את כמות המים הנותרת בבוצה, אם כי כמובן שנדרשים טיפולים נוספים להקטנת נפח הבוצה לפני הפליטה לסביבה. בטיפול בשפכי מכרות משתמשים במסנני חול, מסנני ואקום קרמי ומסנני לחץ.

4.4.8 טכנולוגיות טיפול בחומרים ספציפיים

- **שיטות לסילוק סלניום**

סלניום, בצורתו היסודית, אינו מסיס בתמיסה מימית ואיננו פעיל ביולוגית. הסלניום שמתקבל בשפכי מכרות בעקבות תהליכי הכרייה, נמצא בצורתו המסיסה כ-Selenite (SeO_3) ו-Selenate (SeO_4).

יש מספר שיטות לסילוק הסלניום מהשפכים, אולם, חשוב לציין שכיום אין פתרון מוחלט לבעיית הסלניום בשפכים, ומכאן **שיש בתחום זה מקום לחדשנות מדעית וטכנולוגית, במיוחד כיוון שהרגולציות הסביבתיות בעולם לגבי כמויות סלניום מותרות במים הנפלטים לסביבה הולכת ומחמירה ממש בימים אלה.**

אחת השיטות כוללת שימוש בברזל בערכיות 0 – ZVI (Zero Valente Iron)^{xxviii}, שיכול לתפקד כמחזור למספר מזהמים במים, ביניהם סלניום, הברזל סופח את הסלניום אל פני השטח שלו. בתהליך הניקוי המים מסוננים במסנן חול, מנוטרלים ל- PH מעט חומצי ומוכנסים ליחידת הטיפול הכוללת מערכת טיפול בסלניום.ⁱⁱ

סלניום מסיס במים ב- PH גבוה, לכן, כאשר מנטרלים מי שפכים חומציים, מעלים גם את המובילות של הסלניום במים, ומחמירים את הבעיה במובן זה. שיטות נוספות לסילוק סלניום כוללות שיטות כימיות, פיסיקליות וביולוגיות שונות.^{xxix}

• שיטות לטיפול בציאניד

השימוש בציאניד קיים כמעט אך ורק בתעשיית כריית הזהב, אך החשיבות של יעילות הטיפול בשפכים לסילוקו גדולה מפאת רעילותו הגבוהה. יש מספר שיטות אפשריות לטיפול בציאניד, כשבדרך כלל, הן פועלות במנגנון בו ראגנט מוכנס למערכת במטרה להגיב עם הציאניד כך שתוצרי התגובה יכללו צורה פחות רעילה של החומר (למשל: cyanate).

○ Alkaline Chlorination

שימוש ב- Chlorine לחמצון הציאניד לציאנט (OCN).

○ International Nickel Company's process (INCO)

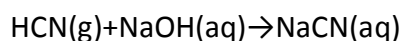
שימוש בסולפור (SO₂) לחמצון הציאניד לציאנט (OCN).

○ Hydrogen peroxide process

חמצון ציאניד לציאנט באמצעות מי חמצן (H₂O₂).

○ Acidification Volatilization Recovery (AVR)

לתהליך זה ייתרון כפול – לצד הוצאת הציאניד מהשפכים, ניתן למחזר אותו ולהשתמש בו שוב. על מנת לבצע את תהליך ה- AVR יש צורך ב- PH נמוך של מי השפכים על מנת לאפשר יצירת גז HCN, שבשלב הבא, נספג אל תמיסת NaOH והופך למלח בתגובה הבאה:



את המלח ניתן למחזר לשימוש חוזר בציאניד בתהליכי העיכול. עוד תהליך שמטרתו מיצוי הציאניד למטרת מחזור נקרא SART - (Sulphidisation, Acidification, Recycling and Thickening process), תהליך זה מערב גם מיצוי עופרת במהלכו.

○ סילוק ציאניד בשיטות ביולוגיות

שימוש בפעילות מיקרוביאלית כדי להפוך ציאניד לאמוניה בקצב מהיר. יוני המתכת מסתפחים על פני הביומסה. יחידת טיפול נוספת ממירה את האמוניה לניטרט (NO_3^-).

שיטות נוספות קיימות גם לטיפול בארסן ובחומרים רדיואקטיביים במים.

4.5 מחזור והשבה

כאמור, תעשיית המכרות זקוקה לאספקה מהימנה של מים מתאימים לתהליכי הכרייה וההפקה של המחצבים.

האתגרים המרכזיים נמצאים בתחום המחזור במים ואיכות השפכים, כאשר בינתיים המדיניות הסביבתית הולכת ומחמירה, הסטנדרטים התעשייתיים הולכים ועולים ורגולציות הפליטה לסביבה הולכות ומתקשחות.

במונח השבה, או שימוש מחדש אנו מתייחסים למים שעוברים מפעילות אחת לשנייה באתר המכרה, בעוד במונח מחזור, אנו מתייחסים למים מטופלים שמועברים לשימושים נוספים – לעיתים מחוץ לתחומי המכרה (חקלאות, השקיה וכו').

השבת מים, כאמור, אינה תמיד דורשת טיפול במים אולם יש לקחת בחשבון שבחלוף הזמן, ריכוז החומרים המזהמים במים ילך ויגדל. אפשרות זו איננה טובה למים שמזוהמים בצורה חמורה, כך ששימוש מחדש בהם ישפיע לרעה על תוצאות התהליכים בהם הם נמצאים בשימוש.

מחזור כולל טיפול במים. טיפול זה תלוי בשימוש אליו יופנו המים וכן במסגרת הרגולטורית המקומית בתחום. הנושאים הרלוונטיים בתחום איכות השפכים כוללים תרכובות אורגניות ואנ-אורגניות במים, מוצקים מרחפים, תרכובות ביולוגיות, גזים וריחות. הבחירה בשיטת הטיפול תלויה בחומרים הנמצאים במים, כמו גם בעלויות, יעילות, וכמות התחזוקה הנדרשת.

באזורים צחיחים במיוחד, יש אפשרות למחזר את המים לשימוש מחוץ למכרה, להשקיה, משק חי, מיהול מאגרי מים וכדומה. מים באיכות מתאימה יכולים להמכר לתעשיות אחרות הצורכות מים.

ניתן לחלק את האתגרים בתחום לארבעה אתגרים ראשיים: הבטחת אספקת מים באזורים צחיחים, השבת מתכות וחומרים נוספים מהשפכים, מחזור והקטנת הפגיעה בסביבה, כאשר חלק מהאתגרים גורים לסקטורים נוספים וחלקם ייחודיים לתחום המכרות.

5.1 **הבטחת אספקת המים**

הבטחת אספקת המים גנרית לכל הסקטורים, אם כי בתחומי המכרות והגז והנפט היא בולטת במיוחד כיוון שאין חופש בסקטורים אלה בבחירת האתר התעשייתי.

הבטחת אספקת המים למכרה נעשית במספר דרכים בהתאם לתנאים באתר (פרוט בפרק 4.3), לעיתים קרובות המים מופקים באמצעות התפלה – של מי ים, מי תהום מליחים והמים המרוקנים מהמכרה.

במקרים בהם יש התפלה במיקום מרוחק (למשל במקרים של מכרות בהרי האנדים), צריך לעיתים לשנע את המים למרחקים וגבהים גדולים, האתגר במקרה זה הוא משולש – התפלה, משאבות, צנרת – ייעול הכדאיות הכלכלית של התהליך ושילוב מיטבי בין שלושת הגורמים, בנוסף הגדלת יעילות תהליך ההתפלה באמצעות סילוק קלציום קרבונט תוך כדי התהליך.

בנושא הבטחת אספקת המים ניתן גם למנות פעילויות שמפחיתות את התלות בהתפלה, באמצעות ניהול מיטבי של המים במכרה והגדלת כמויות המים המושבות לתהליך.

קיימים מחקרים בנושא ממברנות hollow fiber למיצוי חומרים מ-ARD כלומר, האתגר: פיתוח UF לטיפול ב-ARD, ובנוסף: פיתוח שיטות יעילות וכדאיות לטיפול ב-ARD ליישום במדינות בהן הרגולציות ו/או האכיפה משתנים בימים אלה או בעתיד הנראה לעין. מיצוי והשבה של המים האלה, גם אם לא נדרש כרגע במקומות מסוימים ע"י הרגולציות, יכול להפחית חלק מהצורך בהתפלה במקומות צחיחים.

5.2 **השבת מתכות וחומרים נוספים מהשפכים**

מחירי הסחורות הגבוהים והביקושים הגדולים מחד, מעלים את מחירי המתכות והופכים דרכים למיצוי השאריות שלהן מהשפכים לכדאיות מבחינה כלכלית, במיוחד עבור מתכות שהביקוש להן גדל (מנגן, מתכות נדירות, ליתיום וכו'), מאידך, הרגולציה המחמירה והאכיפה הגוברת, מחייבות שכלול ופיתוח השיטות למניעת זיהום והוצאת חומרים מזיקים מהשפכים.

קיימת מגמה של התייחסות לטיפול בשפכים כאל אפשרות נוספת לכרייה – שפכי המכרה מכילים חומרים רבים שחלקם ניתן למצות והם בעלי ערך כלכלי כמו גם מזהמים, כך שיש בכך תועלת כפולה. למשל: מתכות, סולפט וכו' - המיצוי של חומרים בעלי ערך מהשפכים בהתחשב בכך

שחלק נכבד מהוצאות הכרייה כבר הושקע, מצדיק השקעה בנושא והתאמת תהליכים שונים להשבת מתכות שונות.

קיימת טכניקה לסילוק פוספט אך היא יקרה, פיתוח תהליכי מיצוי "סגורים" יגדיל את יעילותם. למשל: הפקת הפוספט בצורת שמישה, שימוש חוזר במים וכו'.

אתגר נוסף: מיצוי סולפט משפכים ללא שימוש בממברנות התפלה (למניעת תוצר לוואי של תמלחת מהתהליך).

קיימות טכניקות חדשניות למיצוי Se, כרומטים, פוספטים, נחושת שנחשבות יקרות, אך במידה ואין אפשרות לפלוט מים אלה לסביבה מבחינה רגולטיבית, הכדאיות שלהן עולה.

כאמור, בעקבות החמרת הרגולציה בנושא כמויות מותרות של סולפט, כספית וסלניום לפליטה לסביבה, יש אתגר בפיתוח שיטות ספציפיות לניקוי חומרים אלה, ובאופן כללי התאמת מכרות קיימים ופעילים לרגולציות הולכות ומחמירות.

סידן במים יוצר גבס, כאשר נמצא יחד עם חומצה גופרתית. דבר זה אוטם את תהליך מיצוי הנחושת - יש צורך להוציא את הסידן בדרך מתוחכמת וזולה.

השבת החומצות המשמשות לתהליכי העיכול גם היא מהווה אתגר, ובנוסף ניהול נכון של השימוש בחומצות למשל באמצעות הגדלת יעילות פיזור החומצה הגופרתית במטרה להקטין את אובדן החומר במהלך התהליך, כמו כן – קיצורו אם ניתן. הצנרת (טפטפות) צריכה להיות אמינה ועמידה- במקרה כזה תוכל לתפקד במספר סבבי הפקה, או אמינה וזולה ואז הצנרת ניתן להחליפה בכל סיבוב הפקה.

הרגולציות בנושא הציאניד יוצרות מחסום המקשה על כריית הזהב – שיטות לטיפול בשפכים המכילים ציאניד נדרשות בתחום זה.

באופן כללי, מתוך מטרה להשיב חומרים בצורה יעילה מהשפכים, יש צורך בהפרדת זרמים במכרה, מציאת הבעייתיות בכל זרם לגבי המרכיבים שלו ויישום פתרונות שונים בהתאם לתמיסות הספציפיות (אתגר זה כולל בתוכו את תחום הניטור והבקרה).

5.3 מחזור

האתגרים בתחום המחזור קשורים בקשר הדוק לכל שאר התחומים: מחזור יעיל מקטין את הצורך באספקת נוספת של מים, השבת מתכות וחומרים נוספים מאפשרים את מחזור המים, וכמובן – מחזור המים מסייע להקטנת הפגיעה בסביבה.

גלל הנטייה ההולכת וגוברת למחזור מים במכרה, יש חשיבות בניהול נכון של המים וכן הבנה לגבי ההרכב המדויק של המים לאן ניתן להפנות אותם לשימוש חוזר זאת באמצעות הפרדת זרמים, כפי שהזכרנו בסעיף הקודם.

בנושא צמצום נפח התמלחת – מתבצע פיתוח תהליכי AOP - חמצון קטליטי וסיפוח שאם ישולבו עם ממברנות יוכלו להיות יעילים.

5.4 הקטנת פגיעה בסביבה

הרגולציה והאכיפה ההולכות ומחמירות בעולם ודעת הקהל המתעוררת בנושאי הגנת הסביבה, הזיהומים הסביבתיים שנוצרים והסכנות העלולות להיות טמונות בהם לבריאות הציבור, מאלצים את חברות הכרייה לבצע שינויים רבים בכיוון של פעילות ידידותית יותר לסביבה. מחסור במתכות בעולם בגין התפתחות מדינות emerging market מחייב כרייה עמוקה יותר ובאתרים בריכוזים נמוכים יותר המחייבים שימוש ביותר מים ויוצרים יותר בעיות סביבה.

אחת מההשלכות החמורות ביותר שעלולות לקרות כתוצאה מפעולות הכרייה היר תופעת ה-ARD שהזכרנו במסמך זה.

תחום זה בהחלט מהווה אתגר הכולל טיפול יעיל בתופעת ARD – ניהול אתר למניעת התפתחות ARD וטיפול למזעור/מיגור התופעה לאחר שכבר התפתחה, כולל במכרות שכבר אינם פועלים ומחוייבים לטפל בנוזקים שנגרמו עקב פעולות הכרייה.

עוד תחום מאתגר נמצא בשיפור טכנולוגיות הטיפול בשפכי המכרות, במיוחד בשפכים חומציים המכילים מתכות.

כפי שציינו במהלך המסמך, קיימת מגמה רגולטורית בולטת: מניעת אחסון תמלחת, דבר המדגיש את הצורך בפיתוח שיטות ברות קיימא כיוון שלא רק המתכות והחומרים הרעילים הנוספים מהווים בעיה בפליטה לסביבה, אלא גם המלחים, זהו אחד האתגרים החשובים שעומדים בפני תעשיית המכרות.

כמו כן פיתוח שיטות לייעול ניהול המים במכרה, במיוחד בנושא שימוש במים בתוך המכרה יקטינו את כמויות המים הנצרכות, יגדילו את האפשרות למחזור ויקטינו את הסכנה לזיהומים המחלחלים לקרקע ולמקורות המים באזור המכרה.

תהליכי הכרייה וההפקה מערבים שימוש נרחב בחומצות וחומרים רעילים – מניעת דליפות, גלישה וחלחול ממאגרי השפכים ותעלות ההולכה מהווה אתגר נוסף.

בנוסף דרושים פתרונות יעילים, תוך שימוש מצומצם באנרגיה לריקון מכרות ממים וטיפול במים אלה.

בנושא הממברנות ניתן לפרט מספר אתגרים:

- פיתוח ממברנות ננו-פילטריציה, יציבות לשימוש בסולבנטים ובתנאי PH קיצוניים.
- שכלול טיפולי הכנה לטיפול בממברנות לשימור והארכת חייהן.

- צמצום נפח התמלחת ו/או אלטרנטיבות ל-RO כך שהמלחים יכולים להיות תוצר, בשיטה יעילה מבחינה אנרגטית.

- פיתוח מערכות בעלות נמוכה, ניידות וקלות לתחזוקה.

יש צורך בפיתוח חומרים מספחים חדשים, שיאפשרו טיפול יעיל וזול בשפכי מכרות, באופן תחרותי לטיפולים קיימים.

כאמור, תעשיית המכרות היא תעשייה מאוד שמרנית, הטכנולוגיות המסורתיות אינן עומדות להעלם – לכן האתגר טמון בשילוב טכנולוגיות ספציפיות למתקני מכרה מסוים.

בתחום סילוק הבוצה להטמנה – זירוז תהליך האיזוי של הנוזל או החלפתו בהליך יעיל יותר (ריכוז במקום איזוי או בנוסף) תוזיל ותפשט את ההליך.

וכן, בתחום הכרייה בהמסה – בדיקה האם ניתן ליישם שיטה זו, במקומות בהם לא נעשה בה שימוש, או שנעשה שימוש אך לא בהצלחה, בהנחה שניתן לייצל תהליכי כרייה בדרך זו.

5.5 גיאוגרפיה

ניתן למנות כעשר מדינות יעד בסקטור המכרות, במדינות אלה מתרכז 80% משוק תשתיות המים למכרות. ניתן לחלקן לארבע קבוצות לפי גודל השוק בכל מדינה, כפי שנין לראות בטבלה הבאה:

טבלה: שוק תשתיות המים למכרות לפי גיאוגרפיותⁱⁱ

שוק תשתיות המים למכרות	מדינה	
1.5 B\$	אוסטרליה	קבוצה מס' 1
~ 800 M\$	צ'ילה קנדה פרו	קבוצה מס' 2
400-500 M\$	דרום אפריקה רוסיה ארה"ב	קבוצה מס' 3
~ 200 M\$	סין אינדונזיה	קבוצה מס' 4*

* קבוצה בגידול

אנו ממליצים, כמובן, להתרכז בשווקים הגדולים ביותר, ככל שניתן. במקומות בהם קיימות תשתיות ענק למכרות, חדשנות תוכל להחיות מכרות ישנים ולייעל הקמת מכרות חדשים.

6 סיכום

עבודה זו נעשתה במטרה לסקור את תעשיית המכרות מנקודת המבט של שימושי המים, הטיפול בשפכים והשמירה על הסביבה, בכרייה של מתכות, פוספטים ופחם.

כל זאת תוך חידוד האתגרים העשויים להיפתר על ידי חברות מים ישראליות - הן אלה שמציעות פתרון כולל, חלקים ממנו או טכנולוגיה חדשנית מסוימת.

תעשיית המכרות היא תעשייה הנמצאת במגמת גידול, וכפי שראינו, השימוש במים במכרות הוא רב, ניהול המים והטיפול בשפכים יחד עם ההחמרה ברגולציה העולמית, העלייה במחירי הסחורות והירידה בדרגת העפרות מציבים בפני חברות הכרייה אתגרים המאלצים אותן להתייעל ולחפש אחר פתרונות חדשים.

כל אלה מצדיקים מאמץ של תעשיות המים הישראליות בתחום.

נספח - מילון מושגים

מושג	הסבר
ARD	Acid Rock Drainage
Mine Water	מי כרייה
Open pit mining	כריית בור פתוח
Strip mining	כרייה ברצועות
Mountaintop removal	קצה הר מוסר בפיצוץ במטרה להגיע למחצב בעומקו
Cut and fill	כרייה בבורות רדודים
Block caving	מנהרות נחפרות מתחת לעורק המחצב, התקרה מעליהן נכרית בפיצוץ ונאספת בערמות על קרקעית המנהרה משם היא נאספת
Room and pillar mining	מנהרות בצורת חדרים נכרות כאשר עמודי סלע נשארים על כנס על מנת לתמוך בתקרה
Solution mining	כרייה בהמסה
Pyrometallurgy	תהליך הפרדה, במהלכו יש שימוש בתנאי טמפרטורות גבוהות כדי להפיק את המתכת
Hydrometallurgy	תהליך הפרדה, במהלכו יש שימוש בתמיסות מימיות כדי להפיק את המתכות בתהליכי עיכול
Electrometallurgy	תהליך זיקוק במהלך הפרדת המתכות, בו עושים שימוש בתכונות החשמליות של החומרים
PGMs	platinum group metals
INWA	The International Mine Water Association
INAP	The International Network for Acid Prevention
ICMM	The International Council on Mining and Metals
GRI	Global Reporting Initiative

ⁱ שירי פרוינד קורן, ד"ר גלעד פורטונה, הפקת גז ונפט בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים, מוסד שמואל נאמן למחקר - דצמבר 2011 Israel NewTech2011 למדעיניו לאומי ו-

ⁱⁱ Global Water Intelligence, Water for Mining, 2011

ⁱⁱⁱ <http://minerals.usgs.gov>

^{iv} <http://www.usgs.gov/>

^v T.E. Norgate and R.R. Lovel – CSIRO, Water Use in Metal Production: A Life Cycle Perspective, sep 2004

^{vi} <http://www.imwa.info/>

^{vii} <http://www.inap.com.au/>

^{viii} <http://www.icmm.com/>

^{ix} <http://www.cyanidecode.org/>

^x REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA DECRETO SUPREMO N° 132 MINISTERIO DE MINEIA , Publicado en el Diario Oficial el 07 de febrero de 2004

^{xi}

http://www.mincos.gov.au/publications/australian_and_new_zealand_guidelines_for_fresh_and_marine_water_quality

^{xii} http://cfpub.epa.gov/npdes/cwa.cfm?program_id=45

^{xiii} <http://www.info.gov.za/view/DownloadFileAction?id=70693>

^{xiv} <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/C-11/>

^{xv} <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=En&n=D44ED61E-1>

^{xvi} <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/F-14/>

^{xvii} EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, Profile of the Metal Mining Industry, sep 1995

^{xviii} Bernard Aubé, P. Eng., M.A.Sc. Enviraubé, **The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents**, aube@enviraube.com

^{xix} http://www.gardguide.com/index.php/Chapter_7

^{xx} Gusek et al, 2000;2007

^{xxi} **EPA and Hardrock Mining: A Source Book for Industry in the Northwest and Alaska, APPENDIX E - WASTEWATER MANAGEMENT**, January 2003

^{xxii} <http://bioteq.ca/water-treatment/>

^{xxiii} <http://www.paques.nl/>

^{xxiv} <http://www.ecomagination.com/>

^{xxv} <http://www.veoliawaterst.com/>

^{xxvi} <http://www.gewater.com/index.jsp>

^{xxvii} Stephan B. Sears, **Vapor Compression Distillation** Adding High Tech Understanding to Nature's Process, **Water Conditioning & Purification** NOVEMBER 2006

^{xxviii} <http://libertyhydro.net/>

^{xxix} Lucas Moore, Amir Mahmoudkhani, Methods for Removing Selenium from Aqueous Systems, Kemira Oil and Mining, Atlanta USA, NOV 2011

12/009



מוסד שמואל נאמן

למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

טל. 04-8292329, פקס. 04-8231889

קרית הטכניון, חיפה 32000

www.neaman.org.il