



משרד האנרגיה  
המכון הגיאולוגי

# בדיקת היתכנות להמסת וסילוק המלח מקציר המלח של בריכה 5 לים המלח באמצעות המסה במי ים ומי רכז מהתפלה - קינטיקה של המסת הליט

איתי גבריאלי ואיתי רזניק



#### **תמונת שער:**

סוללת מלח מקציר המלח מכוסה בשכבת אבק דקה. הסוללה שגובהה כ-15 מטרים נערמה בתוך בריכה 5.  
A ~15 m high salt pile consisting of harvested salt from Pond 5 of ICL-DS. The pile is located on the eastern side of the Pond and is covered by a thin dust layer.

## תקציר

פרויקט קציר המלח המקודם על ידי מפעלי ים המלח מתוקף החלטת ממשלה משנת 2012 כולל את הובלת המלח הנקצר בבריכה 5 אל האגן הצפוני של ים המלח והטמנתו בים המלח. נפח המלח העתיד להיות מובל עומד על כ-16 מיליון קוב לשנה (16 מלמ"ש) במשקל המוערך על ידי המפעלים בכ-20 מיליון טון. שינוע נפחים כה גדולים של מלח דרך מיצרי לינץ, והטמנתם בעומק הים מעלים חששות כבדים בדבר הנראות וטביעת הרגל העצומה הצפויה לפרויקט על מיצרי לינץ' ודרום ים המלח. מפעלי ים המלח ערים לחששות אלו ופתוחים להצעות חלופיות להצעתם המקורית לשינוע המלח לאגן הצפוני באמצעות מסוע שיחצה את מיצרי לינץ' והטמנת המלח בדרום הים תוך סתימת מפרץ צאלים ובהמשך על ידי הובלת המלח בדוברות או כתרחיף צפונה יותר והטבעתו בלב ים.

העבודה הנוכחית בוחנת הצעה חלופית לסילוק המלח המשלבת בין פרויקט קציר המלח ופרויקט מובל ים סוף – ים המלח, אם וכאשר זה יוקם. ההצעה בוחנת את האפשרות כי המלח הנקצר יומס על ידי מי ים ו/או מי רכז ויובל צפונה במצב מומס ללא צורך בהקמת מסוע ותשתיות כבדות באגן הצפוני של ים המלח. חישובים וניסויים תרמודינמיים של המסת מלח שנאסף מסוללות קציר המלח מצביעים על פוטנציאל ההמסה הגבוה של שתי התמיסות הנדונות (מי ים ומי רכז). בנוסף, ניסויים קינטיים מראים כי בתנאי ערבוב מתמיד, התמיסות מגיעות לרוויה ולמיצוי מלוא פוטנציאל ההמסה שלהן בתוך שתיים וחצי דקות בלבד.

מימוש ההצעה הנדונה מותנה בהקמתו של פרויקט מובל ים סוף - ים המלח במתכונת הדומה לזו שהוצעה בסקר ההיתכנות של הבנק העולמי ב 2012 ואשר אושר עקרונית על ידי ממשלות ישראל וירדן. החישובים מראים כי בהינתן נפח הקציר ומגבלות ההזרמה לים המלח שהוצעו במסגרת סקר ההיתכנות לפרויקט (עד 400 מלמ"ש לשנה), אזי ניתן יהיה להמיס את כל המלח השנתי הנקצר על ידי מפעלי ים המלח והמפעלים הירדניים (המוערכים ביחד בכ-35 מלמ"ש) ועדיין לא למצות את מלוא פוטנציאל ההמסה של התמיסות. מימוש מלוא פוטנציאל ההמסה יאפשר הפנייה או הזרמה של רק כ-110 מלמ"ש מי ים או כ-125 מלמ"ש מי רכז לצורך המסת מלוא נפח הקציר השנתי של שני המפעלים. בתום תהליך הערבוב וההמסה, התמיסות עשירות המלח יוזרמו לים המלח. הערבוב של תמיסות אלו בים המלח צפוי להביא לשקיעת מלח במנגנון הדומה לזה המלווה את שקיעת המלח בעת ערבוב התמלחות הסופיות במי ים המלח ולהתפתחות דלתת המלח במוצא נחל ערבה.

העבודה אינה עוסקת בהיבטים הטכנו-הנדסיים והכלכליים של מימוש ההצעה.

## הקדמה

החלטת ממשלה מס' 4060 מתאריך 1-1-2012 קובעת כי יש לשמר את מפלס בריכה 5 של מפעלי ים המלח בגובה של עד 15.1+ ברשת מפעלי ים המלח וזאת באמצעות קציר המלח שבקרקעיתה. בריכה 5 היא הבריכה הראשונה במערך בריכות האידוי של המפעלים ובה שוקע ה"תפל" העיקרי של התעשייה, מלח בישול (הליט - NaCl), בקצב שנאמד על ידי המפעלים בכ-20 ס"מ בשנה. לאורך חופיה המערביים של הבריכה הוקמו מתחמי התיירות הגדולים של ים המלח – חמי זוהר ועין בוקק. הגורם המרכזי בגינו התקבלה החלטת הממשלה על קציר המלח היה עליית מפלס המים בבריכה בעקבות שקיעת המלח. עליית מפלס זו לוותה בעליית מפלס מי התהום אשר הביאה להצפות וערעור של היסודות והמבנים הקרובים ביותר לבריכה וחייבה שאיבת מים לצורך הנמכת מפלסים. הצפי היה כי המשך עליית מפלס הבריכה יביא גם להצפות ישירות של המלוות, ויחייב בניית סוללות הגנה אשר יפגעו בנראות ובאטרקטיביות של המקום (חלקן כבר הוקמו). שיקולים נוספים לקידום פרויקט קציר המלח היה החשש מהמשך הגבהה של הסוללות ומפריצתן בעקבות אירוע סייסמי. לכך נוספו גם שיקולים סביבתיים הנוגעים לכרייה מתמשכת של חומר ואדי שנדרש לצורך הגבהת הסוללות.

בהינתן כי שטח הבריכה הוא כ-80 קמ"ר ועל בסיס הערכת המפעלים לקצב הצטברות של כ-20 ס"מ בשנה, אדי נפח המלח השנתי שיש לקצור ולהוציא מהבריכה על מנת לשמר את מפלסה עומד על כ-16 מיליון קוב. מפעלי ים המלח מעריכים את משקל המלח שייקצר בכ-20 מיליון טון לשנה. ייזום, תכנון, קידום וביצוע קציר המלח הוטל על מפעלי ים המלח תחת הפיקוח של וועדות התכנון של המדינה ובראשם הוועדה לתשתיות לאומיות (הות"ל). היעד המתבקש והנכון לפינוי והטמנת המלח הוא האגן הצפוני של ים המלח, שכן זהו גם מקורו של המלח (Lensky et al., 2010). מאחר ותמלחת ים המלח רוויה להליט אדי המלח שיפונה צפוי לשקוע לקרקעיתו מבלי להשפיע על הרכב הים. הטמנה של 16 מיליון קוב זניחה יחסית מבחינת נפח ים המלח והיא שוות ערך לעליית מפלס של פחות מ-3 ס"מ, וזאת על רקע ירידת מפלס שנתית ממוצעת של 1.15 מטר בעשור האחרון.

נכון למועד כתיבת דוח זה קציר המלח כבר החל באמצעות קוצרת ייעודית והוא מוערך בתוך בריכה 5 כסוללות שביוון הכללי מזרח מערב, אורכן המצטבר של שתי הסוללות הוא כשלושה קילומטרים, רוחבן 140 מטרים וגובהן 15 מטרים והן נושקות לסוללה המזרחית של בריכה 5. הרמת הסוללות בשטח בריכה 5 פוגעת בייצור של המפעלים שכן היא מצמצמת במידת מה את שטח האידוי של תמיסת הגלם.

מפעלי ים המלח טרם הציעו לות"ל פתרון ארוך טווח לאופן שינוע והטמנת המלח מקציר המלח בים המלח. עם זאת המפעלים בוחנים ומקדמים בין השאר בניית מסוע להובלת המלח אשר יחצה את מיצרי לינץ ויסתיים בדרום ים המלח/מפרץ צאלים. מכאן קיימות מספר אלטרנטיבות להטמנת המלח וביניהן מילוי וסתימה של מפרץ צאלים הצפוי להתייבש ממילא בשל ירידת המפלס. בנוסף, המפעלים מקדמים כיום את תוכניתם ל"סדום הירוקה" במיצרי לינץ, תוכנית הכוללת בין השאר הערמה של מלח מקציר המלח בבסיס להצבת פאנלים סולאריים.

גם אם התוכניות המוזכרות לעיל יצאו לפועל הן נותנות מענה למלח קציר המלח רק לתקופה של עשור או שניים, אך אין בהן כדי לתת פתרון ארוך טווח לפעילות התעשייתית הצפויה בעשורים הקרובים. פתרון שכזה אשר הוצע בעבר על ידי מפעלי ים המלח עשוי לכלול הקמת נמל בדרום הים והשקה של ספינות/דוברות אשר יעמיסו את המלח שיגיע עם המסוע, יצאו ללב ים ושם ישחררו את מטענן. מהלך שכזה יהפוך את דרום ים המלח לאזור תעשייתי וישנה את מראהו מהקצה לקצה. החשש מההשפעה הסביבתית וטביעת הרגל העצומה הצפויה לפרוייקט קציר המלח על דרום ים המלח, מביא גורמים שונים להציע פתרונות יצירתיים אחרים לשינוע המלח לים המלח, מלבד המסוע והנמל שבקצהו.

מפעלי האשלג הירדניים- Arab Potash Co. – APC, קוצרים את המלח בבריכות האידוי שלהם ועורמים אותם שם כבר שנים רבות. אמנם APC אינה כפופה להנחיות סביבתיות מגבילות כפי שאלו קיימות בישראל אולם יש להניח כי כל פיתרון לסילוק המלח לאגן הצפוני שימצא ישים בישראל יאומץ גם על ידי הירדנים, במיוחד באם הפתרון יהיה מבוסס על משאבים משותפים לישראל ולירדן.

המסמך הנוכחי בוחן את הפוטנציאל של ההמסה של המלח מקציר המלח על ידי מי ים ו/או מי רכז מהתפלה והובלתו במצב מומס אל ים המלח, ללא צורך בבניית תשתיות כבדות לחופו של הים. פתרון זה יהיה ישים רק באם ממשלות ישראל וירדן יגיעו להסכמה על הקמת מובל ים סוף - ים המלח, במתווה דומה לזה שהוצע בסקר ההיתכנות של הבנק העולמי אשר הסתיים ב-2012. תוצאות בדיקת ההיתכנות תמכו בזמנו בשילוב של שאיבת מי ים מעומק מפרץ אילת, הזרמת מי הים בצינורות בצד הירדני של הערבה לכיוון ים המלח, הקמה של מספר תחנות הידרואלקטריות לאורך התוואי, הקמת מתקן התפלה אשר יספק מים מותפלים בעיקר לירדן והזרמת מי הרכז מההתפלה אל דרום מפרץ ליסן שבים המלח הירדני לצורך האטת קצב ירידת המפלס. בדיקת ההיתכנות כללה גם בדיקת ההשלכות של ערבוב מי ים במי המלח, ובעקבותיה נקבע כי הזרמה של עד 400 מיליון מטרים מעוקבים בשנה לים המלח אינה צפויה לשנות את תכונותיו באופן משמעותי (Gavrieli et al., 2011).

שילוב של פרויקט מובל ים סוף - ים המלח עם פתרון למלח של קציר המלח באמצעות המסתו והובלתו לים המלח ללא בניית תשתיות כבדות לחוף הים עשוי להיות גורם מדרבן לקידום פרויקט המובל ואף אולי מקור למימון חלקי שלו, זאת בכפוף לניתוח טכנו כלכלי של ההצעה הנבחנת בדו"ח הנוכחי.

## חומרים

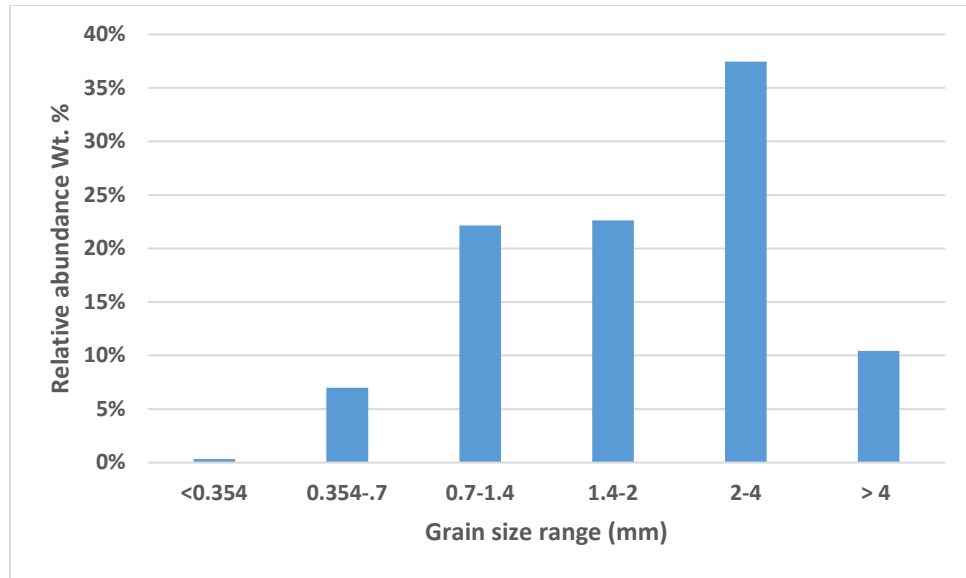
מלח מקציר המלח נדגם מסוללות בבריכה 5 בהן הוא נערם. הסוללות שנדגמו הן 154-4 ו-154-2 כאשר הראשונה היא סוללה שנקצרה חצי שנה עד שנה טרם הדיגום בעוד השנייה היא סוללה טרייה שהכילה מלח שנקצר במהלך החודש טרם הדיגום. בהתאם לכך, הסוללה הראשונה הייתה מכוסה בשכבה דקה של אבק שהוסרה טרם הדיגום.

לצורך הגדרת תנאי הגבול של הניסויים אופיינו ההליט המוצק ותמיסות הקצה:

רמת הניקיון של המלח נקבעה על ידי המסתו המלאה ובדיקת היונים המומסים במים. בדיקה זו הראתה כי המלח הנקצר הוא הליט בעל רמת ניקיון גבוהה מאוד ( $\text{NaCl} > 99.5\%$ ). התפלגות גודל הגרגר של המלח הנקצר נקבעה באמצעות סינון בנפות של דוגמאות מייצגות מכל ערמה. התוצאות מצביעות על טחינה יחסית הומוגנית לגודל גרגר שבין 0.354-4 מ"מ (איור 1).

מי ים נאספו מחוף הים של פלמחים. מי רכז מהתפלה (להלן מי רכז) התקבלו באדיבות מתקן ההתפלה של מקורות באשדוד.

האנליזות הכימיות של תמיסות הניסוי בוצעו במעבדות המכון הגיאולוגי.



**איור 1** התפלגות גודל גרגר של המלח מקציר המלח של בריכה 5 (ממוצע של שלושה ניפויים משתי ערמות מלח שונות)

## מהלך הניסויים ותוצאות

על מנת לתאר באופן כימי-כמותי את ריאקציית ההמסה של המלח מקציר המלח (להלן הליט) במי ים ובמי רכז, בוצעו ניסויים תרמודינמיים וקינטיים תוך השוואה לתוצאות ניסויי המסה במים מזוקקים. ניסויי ההמסה נערכו באופן מבוקר וביחסים שונים של מוצק (הליט) לתמיסה (טבלה 1). לאחר ההמסה המלאה של ההליט נמדדו הצפיפות והמוליכות החשמלית של התמיסה. כמו כן נערכו ניסויי המסה אשר במהלכם נמדדה המוליכות החשמלית באופן רציף לצורך ניתוח קצבי ההמסה. ניסויים אלו נערכו תוך כדי ערבוב אינטנסיבי של גרגרי המלח והתמיסה באמצעות סטירר מגנטי.

ההרכבים הכימיים של התמיסות בסוף ריאקציות ההמסה (טבלה 2) מודלו בתוכנת Phreeqc (Parkhurst and Appelo, 2013) לצורך חישוב דרגות הרוויה של התמיסה.

Exp. #	Grain size (mm)	Water type	Salt [C] (g/Kg initial solution)	EC (mS/cm)	T (°C)	pH	Leftover crystals?	Density (kg/L)	T (°C)
TD-1	Unsorted	DW	0	0.0106	23	7.45	No	0.9973	23.9
TD-2	Unsorted	DW	50	72.9	22.6	8.668	No	1.0307	23.9
TD-3	Unsorted	DW	100	128.3	22.4	7.02	No	1.0617	23.9
TD-4	Unsorted	DW	150	171.6	22.7	6.388	No	1.0914	24
TD-5	Unsorted	DW	200	203	22.6	6.04	No	1.1185	24
TD-6	Unsorted	DW	250	226	22.8	5.511	No	1.1448	24.1
TD-7	Unsorted	DW	300	241	22.9	5.5	No	1.1689	24.1
TD-8	Unsorted	DW	350	249	24.1	7.02	No	1.1923	24.5
TD-9	Unsorted	DW	400	250	24.1	7.16	Yes	1.1939	24.3
TD-10	Unsorted	SW	0	58.5	23	8.439	No	1.0270	23.8
TD-11	Unsorted	SW	50	117.9	23	8.416	No	1.0593	23.8
TD-12	Unsorted	SW	100	163.8	22.9	8.318	No	1.0903	23.8
TD-13	Unsorted	SW	150	197.9	23.1	8.288	No	1.1191	23.8
TD-14	Unsorted	SW	200	221	23	8.158	No	1.1453	23.9
TD-15	Unsorted	SW	250	237	23.3	8.038	No	1.1713	24
TD-16	Unsorted	SW	300	246	23.4	7.953	No	1.1968	24.2
TD-17	Unsorted	SW	350	247	24.1	7.88	Yes	1.1969	24.4
TD-18	Unsorted	RB	0	93	23.3	8.653	No	1.0479	23.8
TD-19	Unsorted	RB	50	145.2	22.8	8.539	No	1.0804	23.8
TD-20	Unsorted	RB	100	184.3	22.8	8.417	No	1.1106	23.8
TD-21	Unsorted	RB	150	212	22.8	8.32	No	1.1387	23.9
TD-22	Unsorted	RB	200	231	23.3	8.329	No	1.1659	24
TD-23	Unsorted	RB	250	241	23.4	8.146	No	1.1911	24.1
TD-24	Unsorted	RB	300	244	23.7	8.137	Yes	1.1980	24.2
K-1	1.4-2	DW	400	250	23.6	7.11	Yes	1.1983	24.4
K-2	1.4-2	SW	400	247	23.7	7.69	Yes	1.2018	24.4
K-3	1.4-2	RB	400	244	23.8	8.127	Yes	1.2034	24.7
K-4	2-4	DW	400	250	23.7	7.255	Yes	1.1987	24.5
K-5	2-4	SW	400	247	24.1	7.944	Yes	1.2011	24.9
K-6	2-4	RB	400	244	24.1	8.11	Yes	1.2031	25

**טבלה 1** פירוט מערך ניסויי ההמסה התרמודינמיים והקינטיים. הטבלה מפרטת את מספר הניסוי, האם המלח מערמות המלח נופה ואם כן, לאיזה טווח של גודל גרגר, סוג התמיסה (DW - מים מזוקקים; SW - מי ים; RB - מי רכז מהתפלה), כמות המלח שהוספה לתמיסה (ביחידות של גרם מלח לקילוגרם תמיסה לפני ההמסה), המוליכות החשמלית והטמפרטורה שנמדדה בסוף הניסוי לאחר ההמסה, ערך הגבה, האם נותרו גבישים בתום הניסוי, וצפיפות והטמפרטורה של הנוזל בתום הניסוי. יש לקחת בחשבון שמכיוון שראקציית המסת המלח היא אנדותרמית קיימת משרעת טמפרטורות של 1.5 מעלות בין הטמפרטורה שנמדדה באמצעות חיישן המוליכות החשמלית בזמן אמת לבין הטמפרטורה של מד הצפיפות שנמדדה כשעה לאחר סיום התגובה.

mg/L	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TDS	kgw/kgs
TD-1	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	1.00
TD-2	20235	31	50	38	0.4	30321	30	119	50840	0.95
TD-3	37339	91	89	74	0.7	59071	44	159	96884	0.90
TD-4	57176	53	134	116	1.2	88395	54	191	146378	0.85
TD-5	75157	49	182	136	1.5	114636	67	315	190799	0.81
TD-6	91027	57	220	187	1.7	140712	80	331	232868	0.77
TD-7	106450	39	249	249	2.0	163286	94	403	271021	0.73
TD-8	120281	97	286	240	2.4	193452	76	450	315136	0.68
TD-9	122126	22	286	274	2.2	194748	101	479	318268	0.68
TD-10	12805	447	496	1562	8.2	24346	88	2865	42868	0.96
TD-11	32621	491	534	1574	8.4	55133	99	2953	93657	0.91
TD-12	51067	473	562	1585	9.1	82256	118	3329	139653	0.86
TD-13	71888	468	609	1592	9.2	112003	129	3381	190337	0.81
TD-14	87744	467	655	1633	9.4	136703	143	3287	230896	0.77
TD-15	99660	478	680	1547	9.4	162289	150	3250	268317	0.73
TD-16	117461	508	705	1642	9.8	188507	162	3348	312601	0.69
TD-17	120094	455	752	1694	10.2	194318	175	3517	321274	0.68
TD-18	21828	857	864	2800	15.0	40102	137	5615	72464	0.93
TD-19	42527	767	910	2733	15.2	71603	153	5743	124702	0.88
TD-20	60080	706	914	2682	14.9	98876	165	5620	169309	0.83
TD-21	81738	784	969	2760	15.5	128906	181	5772	221380	0.78
TD-22	100232	767	980	2665	15.3	154954	190	5635	265697	0.73
TD-23	111822	802	1027	2724	15.8	179824	198	5598	302270	0.70
TD-24	119563	783	1043	2714	15.6	194005	211	5654	324248	0.68
K-1	122150	19	296	284	2.3	196047	103	501	319656	0.68
K-2	120619	438	743	1669	9.9	194659	166	3570	322134	0.68
K-3	125237	838	1134	2951	16.9	198280	224	6130	335072	0.66
K-4	122103	26	276	265	2.1	193448	99	457	316880	0.68
K-5	127826	424	722	1613	9.8	194666	159	3387	329062	0.67
K-6	118665	813	1001	2618	15.3	192625	202	5552	321754	0.68

**טבלה 2** הרכב היונים העיקריים של התמיסות מהניסויים התרמודינמיים והקינטיים (ביחידות של מיליגרם לליטר) בגמר המסת ההליט. לצורך מעבר ליחידות משקליות מצוין גם ריכוז המים בתמלחות בגמר כל ניסוי (ביחידות של קילוגרם מים לקילוגרם תמיסה - kgw/kgs). הסטייה במאזן המטענים (RE – reaction error) בכל התמיסות אינו עולה על 2%±.

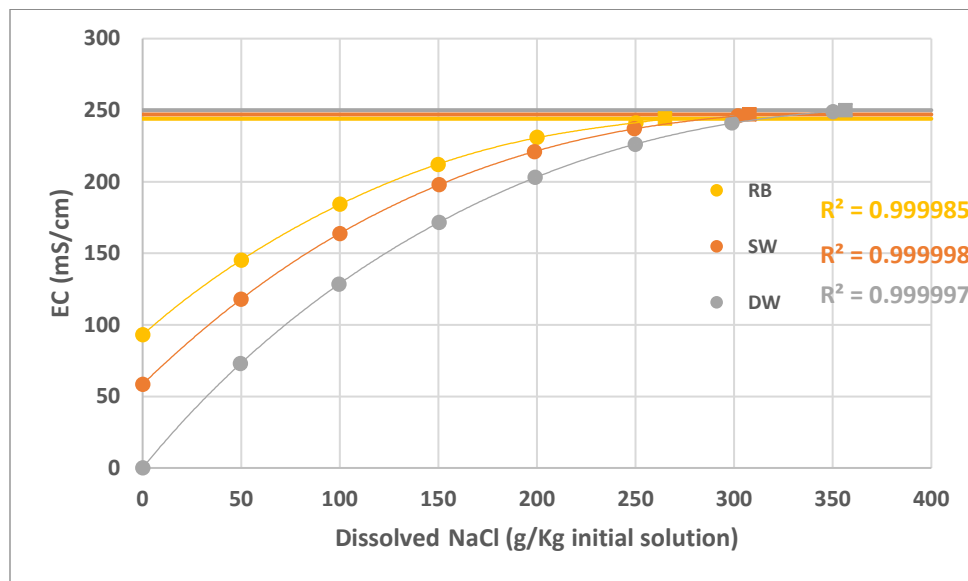


(א) ניסויים תרמודינמיים (TD):

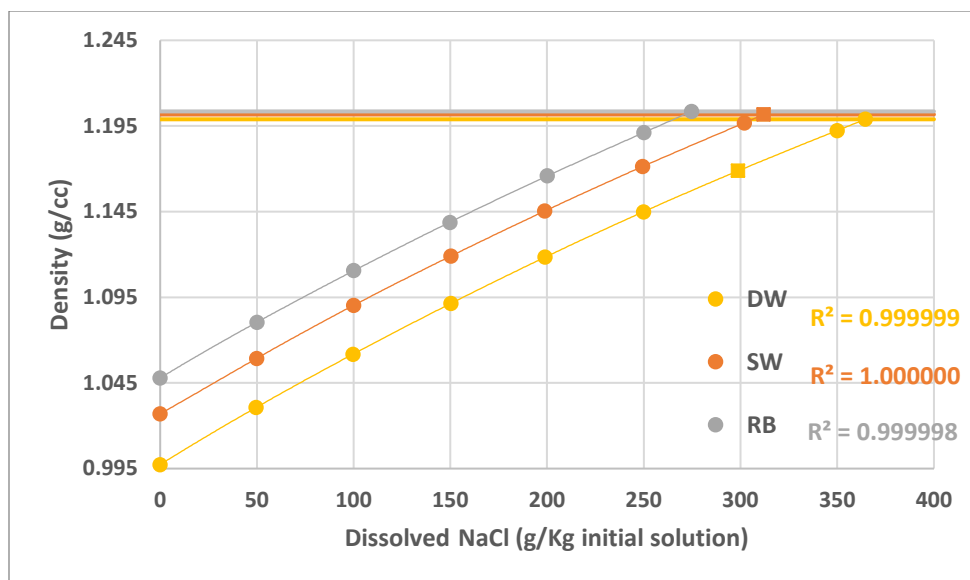
מטרת הניסויים התרמודינמיים היא לכייל את הקשר בין כמות המלח שהומסה למוליכות החשמלית, הצפיפות ודרגות הרוויה בכל אחת משלוש התמיסות שנבחנו (מים מזוקקים, מי ים ומי רכז).

ניסויי ההמסה נערכו בסדרות של 7 מיכלים לכל תמיסה. כל סדרה כללה כמות גדלה והולכת של הליט בהפרשים של 50 גרם מלח לק"ג תמיסה. עם ההגעה להמסה מלאה נמדדו המוליכות החשמלית והצפיפות של התמיסה (איורים 2 ו-3, בהתאמה). פרמטרים אלו נמדדו גם לתמיסות הניסוי עצמן, ללא תוספת הליט. כמות המלח המקסימלית שהומסה בכל סדרת ניסויים (פוטנציאל ההמסה של כל תמיסה) חושבה על ידי אקסטרפולציה של רגרסיות פולינומיאליות שהותאמו בין המוליכות החשמלית לכמות המלח שהומסה ובין הצפיפות וכמות המלח שהומסה עד לערכים המקסימליים שנמדדו בניסויים בהם הוכנסה כמות מלח עודפת אשר לא התמוססה גם לאחר מספר שעות (ראו קווים אופקיים המייצגים את ערכי שיווי המשקל וקווי רגרסיה המבוססים על תוצאות הניסויים). על פי חישובים אלו הכמויות המקסימליות של הליט שהומסו במים מזוקקים, במי ים ובמי רכז הינם 356, 302 ו-266 גרם לקילוגרם תמיסה מקורית (לפני ההמסה), בהתאמה. ערכים אלו מתרגמים לפוטנציאל המסה של 355, 310 ו-279 גרם הליט לליטר תמיסה מקורית (לפני ההמסה) בעבור מים מזוקקים, מי ים ומי רכז, בהתאמה.

הבדלים אלו ממחישים את ההבדל בפוטנציאל ההמסה בין התמיסות, וכצפוי מצביעים על ירידה בפוטנציאל ההמסה עם העלייה במליחות.



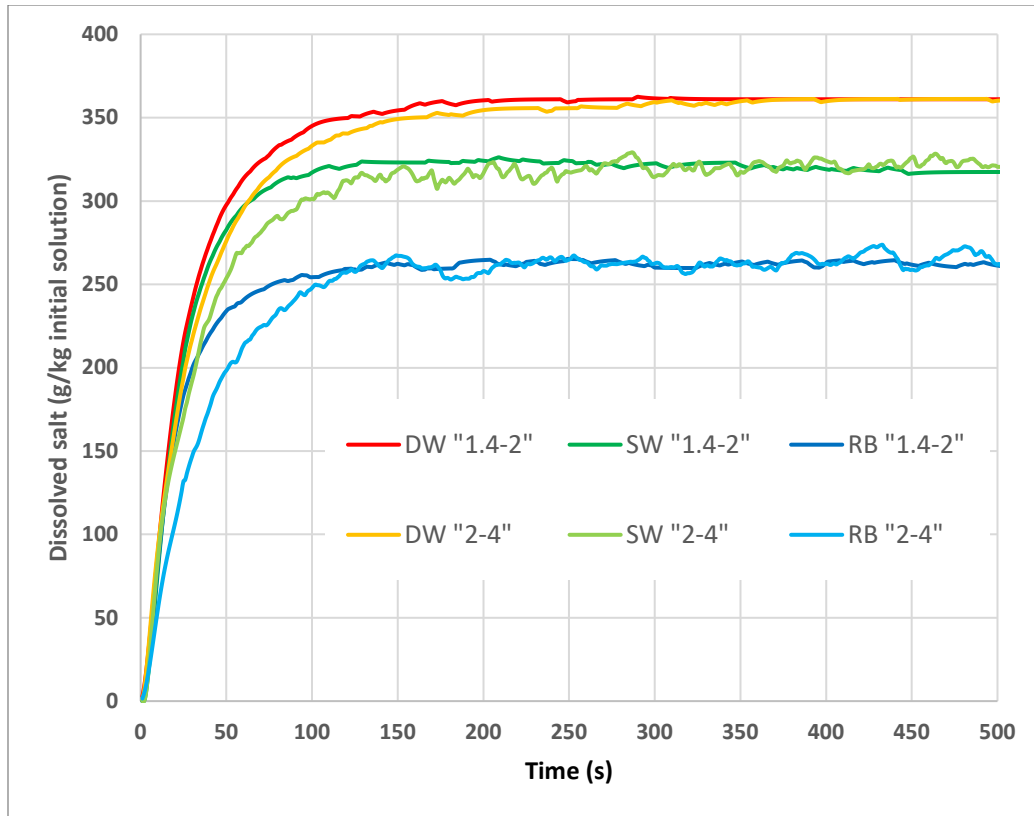
**איור 2** מוליכות חשמלית כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את ערכי המוליכות החשמלית המקסימלית בכל סדרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפולציה של הרגרסיות הפולינומיאליות שהותאמו לתוצאות הניסויים. DW - מים מזוקקים. SW - מי ים. RB - מי רכז מהתפלה.



**איור 3** צפיפות כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את הצפיפות המקסימלית שנמדדה בכל סדרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפולציה של הרגרסיות הפולינומיליות שהותאמו לתוצאות הניסויים. DW - מים מזוקקים, SW - מי ים, ו-RB - מי רכז מהתפלה.

(ב) ניסויים קינטיים (K):

ניסויים קינטיים בוצעו על כמות קבועה ועודפת של מלח (400 גרם מלח לקילוגרם תמיסה) שהוספו בבת אחת לתמיסות השונות (מים מזוקקים, מי ים ומי רכז) תוך שהן מעורבולות ומעורבבות באמצעות מגנט ובוחש מגנטי שנמצא בקרקעיתן. שתי סדרות של ניסויים בוצעו, האחת על מלח בגודל גרגר של 1.4-2 מ"מ, והשנייה על מלח בגודל גרגר של 2-4 מ"מ. המעקב אחר קינטיקת ההמסה התבצע באמצעות מדידה רציפה של המוליכות החשמלית של התמיסה בזמן, ברזולוציה של שניה, באמצעות חיישן מסוג WTW (Multi 3630). המוליכויות החשמליות שנמדדו במהלך הניסוי הומרו לכמות המלח שהומסה בכל רגע נתון על ידי שימוש בקשרים האמפיריים שנקבעו בניסויים התרמודינמיים (חלק א').



**איור 4** כמות המלח שהומסה כפונקציה של זמן בכל ניסוי. הניסויים מצביעים על הגעה לשיווי משקל בתוך שתיים וחצי דקות. ניתן לזהות בברור כי עבור כל תמיסה, קצב המסת המלח מהיר יותר כאשר גודל הגרגר קטן יותר.

## דין

איור 4 מצביע על שתי נקודות מוכרות מהתיאוריה של קינטיקה של המסה אך חשובות לציון:

1. קצב ההמסה קטן ככל שהתמיסה קרובה יותר לשיווי משקל.
2. ככל שגודל הגרגר קטן יותר (דהיינו שטח פנים זמין גדול יותר) קצב ההמסה מהיר יותר.

בנוסף, עד למיצוי של כ-80% מפוטנציאל ההמסה של המלח בכל תמיסה, קצב ההמסה נותר יחסית ליניארי ופחות תלוי בשטח הפנים הזמין ובקרבה לשיווי משקל. הגעה לשיווי משקל מתרחשת בתוך שתיים וחצי דקות בכל הניסויים למרות תנאי הניסוי השונים מבחינת גודל הגרגר והתמיסות השונות.

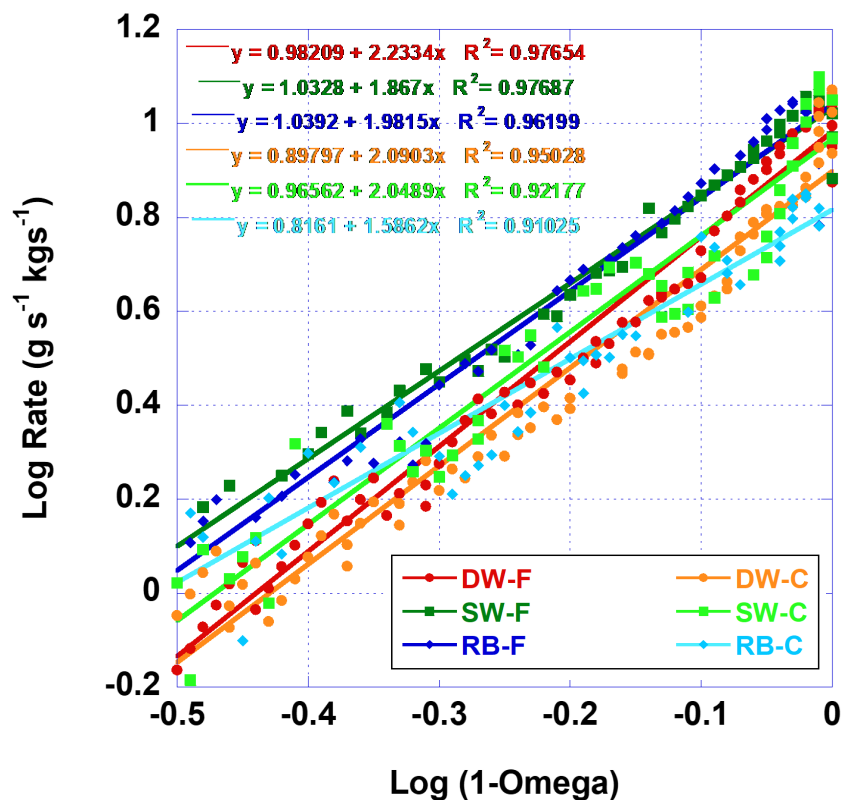
הניתוח הקינטי של הניסויים התבסס על המשוואה הבאה (Brantley, 2008):

$$\text{Eq. (1): } \log \text{ Rate (g halite kg solution}^{-1} \text{ s}^{-1}) = \log (k) + n \log (1-\Omega)$$

כאשר:  $n$  מהווה את סדר הריאקציה (ערך ממוצע של  $2 \pm 10\%$ ),  $k$  הוא הקבוע הקינטי (ערך ממוצע של  $0.95 \pm 10\%$ ) ו- $\Omega$  היא דרגת הרוויה המחושבת על ידי ה-PhreeqC.

איור 5 מתאר את תוצאות הניסויים על בסיס משוואה 1. הפיזור הנמוך המתקבל מחוק הקצב בין ניסוי לניסוי מראה שאין שוני מנגנוני כימי מובהק (אותו חוק קצב ליחידת מסה) בין התמיסות השונות וגודלי הגרגר השונים

שנבדקו בניסויים. עם זאת, שטח פנים גדול יותר ליחידת מסה כפי שמתקבל בניסויים בעלי גודל גרגר קטן יותר, גורם לעלייה בקצב הראקציה (איור 4).



**איור 5** קצב ההמסה ביחידות של גרם הליט לשנייה לקילוגרם תמיסה מול המרחק משיווי משקל בסקלת log-log. סקלה זו מאפשרת הוצאה של קבוע הקצב וסדר הראקציה בהתאם למשוואה 1. (F) - פרקציית גודל הגרגר הדקה (2-1.4 מ"מ), (C) - פרקציית גודל הגרגר הגסה (4-2 מ"מ). DW - מים מזוקקים, SW - מי ים, RB-ו - מי רכז מהתפלה.

## השלכות על פרויקט קציר המלח

ניתוח קינטי/תרמודינמי המבוסס על תוצאות הניסויים המתוארים מאפשר לקבוע את פוטנציאל ההמסה של המלח מקציר המלח במי ים או מי רכז מהתפלה אם וכאשר אלו יגיעו לדרום ים המלח במסגרת פרויקט מובל ים סוף ים המלח: יודגש כי הניתוח כאן אינו מביא בחשבון את האתגרים הטכניים-הנדסיים-כלכליים במימוש שיטה זו של סילוק המלח מהאגן הדרומי לאגן הצפוני.

על פי מפעלי ים המלח, בפרוייקט קציר המלח צפויים להיקצר כ-20 מיליון טון מלח לשנה. בהנחה והמפעלים בירדן (APC) קוצרים כ-15 מיליון טון בשנה (הערכה על בסיס יחסי שטחי האידוי), כמות המלח הכללית שיש להפטר ממנה היא כ-35 מיליון טון בשנה.

בבדיקת ההיתכנות לפרוייקט ים סוף - ים המלח שנעשתה עבור הבנק העולמי על ידי המכון הגיאולוגי ותה"ל (Gavrieli et al., 2011), נקבע כי הזרמה של עד 400 מלמ"ש מי ים/מי רכז לא צפויה לשנות באופן מהותי את אופיו של הים.

על פי מספרים אלו, במידה ופרוייקט המובל ימומש ויכלול בשלב ראשון הזרמה של הרף העליון של 400 מלמ"ש, אזי די בהמסה של כ-0.088 טון הליט למטר קוב (מ"ק) תמיסה (88 גר' לליטר תמיסה) כדי לסלק את מלוא משקל קציר המלח של שני המפעלים.

בפועל, פוטנציאל ההמסה של מי ים ושל מי רכז מהתפלה גבוהים משמעותית מ-0.088 טון הליט למ"ק תמיסה ועומדים על 0.310 ו-0.279 טון הליט למ"ק, בהתאמה. דהיינו, המסה של 0.088 טון הליט למ"ק תמיסה ממצה רק 28% ו-32% מפוטנציאל ההמסה של מי ים ומי רכז, בהתאמה. לכן, במידה וימצא הפתרון ההנדסי לשמר יחס קבוע של ערבוב מלח ותמיסה במתקני ערבוב/סחרור מתאימים, ותוזרם כמות מי ים ו/או מי רכז בנפח של 400 מלמ"ש, פוטנציאל המסה רב לא ימוצה וקצב ההמסה צפוי להיות מהיר מאד (פחות מ-20 שניות). בהתאם לכך, זמן השהות הנדרש של התערובת תמיסה-מלח במתקן הערבוב צפוי להיות קצר ביותר.

לחילופין, מכיוון שכמות המלח הפוטנציאלית שניתן לסלק בהמסה על פי החישובים הנ"ל עולה משמעותית על הכמות השנתית של המלח הנקצר על ידי שני המפעלים, הרי ניתן יהיה להמיס את כל מלח הקציר משני המפעלים גם בנפחים קטנים מ-400 מלמ"ש. בהנחה כי תמצא הדרך להביא את התמיסות לרוויה בקצב שנצפה במעבדה (כשתי דקות וחצי), אזי הנפח השנתי של מי הים הנדרשים לסילוק מלוא המלח עומד על:

$$35 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite} \div \frac{0.31 \text{ Ton Halite}}{m^3 SW} = \sim 110 \cdot 10^6 m^3 SW$$

ובמי רכז:

$$35 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite} \div \frac{0.28 \text{ Ton Halite}}{m^3 RB} = \sim 125 \cdot 10^6 m^3 RB$$

יש להניח כי גם לאחר שיוסכם עליו בין הצדדים, יעבור זמן רב עד להוצאתו לפועל של פרוייקט ים סוף ים המלח. מאידך אימוץ הפתרון של המסת מלח הקציר באמצעות מי הים מאפשר אגירה זמנית של המלח בבריכות תוך ידיעה כי עם הקמת הפרויקט ניתן יהיה בתוך שנים ספורות להמיס ולסלק את כל נפח המלח שהצטבר עד אז. כמות המלח השנתית שניתן יהיה לסלק תוך הבאת מי הים לרוויה בהזרמה של 400 מלמ"ש עומדת על:

$$400 \cdot 10^6 m^3 SW \cdot \frac{0.31 \text{ Ton Halite}}{m^3 SW} = \sim 125 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite}$$

ובמי רכז:

$$400 \cdot 10^6 m^3 RB \cdot \frac{0.28 \text{ Ton Halite}}{m^3 RB} = \sim 110 \cdot 10^6 \text{ Ton Halite}$$

כמויות אלו גבוהות פי 3-3.5 מכמות המלח השוקעת בשנה במפעלים הישראליים והירדניים יחדיו.

כאמור, זמן השהות הנדרש על פי ניסויי המעבדה להגעה למיצוי פוטנציאל ההמסה והגעה לשיווי משקל עומד על כשתי דקות וחצי. במידת הצורך ניתן יהיה לצמצם את זמן השהות הנ"ל באמצעות טחינת גרגירי המלח לגודל גרגר דק יותר מהנעשה כיום על ידי הדוברות על מנת להאיץ את קצב ההמסה.

נקודה נוספת שיש לקחת בחשבון היא שסביר שבמידה ובכל זאת יישאר מלח דק גרגר שלא עבר המסה מלאה ניתן יהיה לסלקו בתרחיף אגב המסתו, לכיוון האגן הצפוני ובכך אף להגדיל יותר את כמות המלח הפוטנציאלית שניתן יהיה לשנע לאגן הצפוני.

כמתואר בהקדמה, המלצת הבנק העולמי, אשר אומצה בזמנו על ידי כל הגורמים המעורבים, הייתה להקים את מובל ים סוף-ים המלח כולו בירדן ולשחרר את מי הים ו/או מי הרכז במפרץ ליסן שבדרום מזרח ים המלח, גם הוא בתחום ממלכת ירדן. מכאן שבכדי לממש את הרעיון המועלה כאן יהיה צורך להוביל את המלח מקציר המלח של מפעלי ים המלח לתחום ירדן ומשם לבצע את הערבוב עם מי המובל, או לחילופין, למשוך חלק מנפח המים של המובל לכיוון המפעלים ושם לבצע את ההמסה. עם זאת יש לשקול בקפידה באם יהיה נכון לשחרר תמיסות אלו, לאחר ההמסה, בזרימה חופשית דרך נחל ערבה, בין הסוללות של מפעלי ים המלח ו-APC שכן תמיסות אלו יהיו עדיין בעלות פוטנציאל המסה ולכן הן עשויות להמס חלקים של הסוללות הבנויים מהליט. כמו כן, עולה החשש להגברת ההתחתרות בנחל הערבה שעלולה לסכן את הבריכות גם כן. מאחר וכך, גם אם ההמסה של המלח מקציר המלח של מפעלי ים המלח יתבצע בשטח המפעלים הישראליים, עדיין יהיה צורך להזרים חזרה את התמיסות לממלכת ירדן לצורך שחרורם במפרץ ליסן, בהתאם להצעת הבנק העולמי.

מלבד השאלה הטכנו כלכלית יש עוד לבחון את ההשלכות של ערבוב של מי הים ומי הרכז אשר המיסו כמויות גדולות של מלח, עם ים המלח. חישובים תרמודינמיים ראשוניים מצביעים על כך כי ערבוב שכזה יהיה מלווה ב-*outsalting* של מלח, בדומה למתרחש בדלתת המלח (Beyth, M., 1998, Gavrieli et al., 1989, Gavrieli et al., 1997). זאת בנוסף לשקיעת הגבס הצפויה ממילא בעת ערבוב של מי ים ומי רכז בים המלח, (Reznik et al., 2009, Reznik et al., 2010, Reznik et al., 2012, Reiss et al., 2021). נושאים אלו יבחנו בעבודות נפרדות.

## תודות

לגב' שמיים שריקי ממפעלי ים המלח אשר הדריכה אותנו וסייעה באיסוף מלח הקציר מהסוללות, למר גל אפרתי מחברת מקורות- מתקן התפלה אשדוד על הסיוע באיסוף מי רכז לניסויים, לגב' נאיפה סובח אשר סייע בעבודת הניפוי ולצוות הגיאוכימיות והגיאוכימאים במעבדות המכון הגיאולוגי אשר קבעו את הרכב המלח.

## ביבליוגרפיה

Beyth, M., Katz, O., Gavrieli, I., 1998. Propagation and retrogradation of the Salt Delta in the Southern Dead Sea: 1985 – 1992. *Isr. J. Earth Sci.* 46, 95 – 106.

Brantley, S.L., 2008. Kinetics of mineral dissolution. In *Kinetics of water-rock interaction* (pp. 151-210). Springer, New York, NY.

Gavrieli, I., Starinsky, A., Bein, A., 1989. The solubility of halite as a function of temperature in the highly saline Dead Sea brine system. *Limnol. Oceanogr.* 34(7), 1224-1234.

Gavrieli, I., 1997. Halite deposition from the Dead Sea 1960-1993. In: *The Dead Sea: the lake and its setting* (eds. T. Niemi, Z. Ben-Avraham, J.R. Gat) chap. 14, p.161-170. Oxford University Press

Gavrieli, I., Lensky, N., Abelson, M., Ganor, J., Oren, A., Brenner, S., Lensky, I., Shalev, E., Yechieli, Y., Dvorkin, Y., Gertman, I., Wells, S., Simon, E., Rosentraub, Z., Reznik, I., Elias, E., (2011). Dead Sea Study. Final Report. *Isr. Geol. Surv., Rep. GSI/10/2011 and TAHAL Rep. IL-201280-R11-218* (Submitted to the World Bank)

Lensky, N., Gertman, I., Rosentraub, Z., Lensky, I., Gavrieli, I., Katz, O. (2010). Alternative dumping sites in the Dead Sea for harvested salt from pond 5. *Rep. GSI/05/2010*.

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3 – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. In: *Modeling and Techniques*. In: U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, vol. 6. U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.

Reiss, A.G.; Gavrieli, I.; Rosenberg, Y.O.; Reznik, I.J.; Luttge, A.; Emmanuel, S.; Ganor, J. (2021). Gypsum Precipitation under Saline Conditions: Thermodynamics, Kinetics, Morphology, and Size Distribution. *Minerals*, 11, 141.

Reznik, I. J., Gal, A., Ganor, J., and Gavrieli, I., (2009). Gypsum saturation degrees and precipitation potential from Dead Sea-Seawater mixtures. *Environmental Chemistry*, 6 (5), 416-423.

Reznik, I. J., Antler, G., Gavrieli, I., and Ganor, J., (2010). Kinetics of gypsum crystal growth from high ionic strength solutions; case study of Dead Sea- seawater mixtures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 2187-2199.

Reznik, I. J., Gruber, C., Ganor, J., and Gavrieli, I (2012). Towards the establishment of a general rate law for gypsum nucleation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 85, 75-87.

## Abstract

The annual volume of salt (halite- NaCl) that accumulates in Pond 5 of the Israel Chemicals LTD, Dead Sea (ICL-DS; formerly known as the Dead Sea Works -DSW) is estimated by the industry to be 16 million cubic meters (MCM) or about 20 million tons of salt. Until recently, this accumulation lead to a continuous rise in the water level of the Pond. However, in 2012 the Government of Israel decided that in order to stop this trend and maintain a constant water level in Pond 5, ICL-DS is to plan and execute the Salt Harvesting project. The said project includes harvesting of salt from the bottom of the Pond, its conveyance northwards across Lynch Strait to the southern shores of the Dead Sea and the disposal of the salt in the Dead Sea. Dredging of the salt began in 2020 and the salt is temporarily being accumulated on dams within Pond 5. The details of the rest of the project are still undecided and under discussion whereas the tentative plans include the construction and operation of a long conveyance belt across the Lynch Strait. The salt that will be conveyed will first be used to fill the Ze'elim Bay and as space runs out, it will need to be conveyed as slurry or by large vessels to the deeper parts of the lake, where it will be released and sunk. Consequently, there is a growing concern that the project will have a significant environmental and visual impact on the Lynch Strait and the Southern Dead Sea. ICL-DS is aware of these concerns and is willing to consider alternatives to their tentative plans.

Here we present and examine an alternative suggestion for the transport and disposal of the harvested salt, which integrates the Salt Harvesting project with the Red Sea – Dead Sea Conveyance Project (RSDSP), if and when the latter will be constructed. We investigate the potential for the dissolution and transport (in dissolved state) of the harvested salt from the industrial complex to the Dead Sea by seawater (SW) or reject brine (RB) from desalination, that will be available through the RSDSP, thereby eliminating the need for the construction of large infrastructures in the Lynch Strait and along the shores of the Southern Dead Sea.

Thermodynamic calculations and laboratory experiments confirm the high solubility values/dissolution potential by the two stock solutions (SW and RB), whereas kinetic experiments with samples of the harvested salt show that under constant stirring and with enough available salt, dissolution to full saturation requires no more than 2.5 minutes.

The realization of the described transport and disposal solution for the harvested salt depends on the construction of the RSDSP as outlined by the World Bank and approved in principle by Israel and Jordan. Given the constraints on the volume of solution that may be discharged to the Dead Sea in the first phase of the project (400 MCM/yr) it is possible to dissolve the entire volume of salt that is harvested by both the DSW and its Jordanian counterpart, the Arab Potash Company (APC) (estimated together as 35 million tons annually). Under these conditions, the SW/RB will still remain undersaturated. Furthermore, if the solutions were to attain full saturation, the volumes required to dissolve the entire amount of harvested salt (35 million tons) is much smaller: 110 MCM/yr of SW or 125 MCM/yr of RB. The mixing of either of the solutions with the Dead Sea brine would lead to salt precipitation, under a chemical mechanism that is similar to the mechanism responsible for the precipitation of salt upon mixing of the Industries' end brines in the Southern Dead Sea and the development of the Salt Delta.

The work does not investigate the techno-industrial-economic aspects of the proposed solution for the harvested salt.







Ministry of Energy  
Geological Survey of Israel

# **Feasibility study for the dissolution and disposal of the harvested salt from Pond 5 to the Dead Sea by seawater or reject brine from desalination: Halite dissolution kinetics**

Ittai Gavrieli and Itay Reznik

