



משרד האנרגיה
המכון הגיאולוגי

בדיקות היתכנות להמסת וסילוק המלח מקצר המלח של בריכה 5 לים המלח באמצעות המסעה במים ומים רצץ מהתפלת - קינטיקה של המסעת הלית

איתו גבריאל ואיתו רזניק



תמונה שער:

סללה מלח קצר המלח מבוסה בשכבה אבק דקה. הסוללה שגובהה כ-15 מטרים נערמה בתחום 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 קצר המוקדם על ידי מפעילים המלח מתוקף החלטת ממשלה משנת 2012 כולל את הובלת המלח הנקי בבריכה 5 אל האגן הצפוני של ים המלח והטמנתו בים המלח. נפח המלח העתידי להיות מובל עמד על כ-16 מיליון קוב לשנה (16 מלמ"ש) במשקל המוערך על ידי המפעילים בכ-20 מיליון טון. שינוי נפחים בה גדולים של מלח דרך מצרי לינץ' והטמנתם בעומק הים מעלים חששות בדברים בדבר הנראות וטבעית הרgel העצומה הצפיה לפרויקט על מצרי לינץ' ודרכם ים המלח. מפעילים המלח ערים לחששות אלו ופתרונות להצעות החלופיות להצעות המקורית לשינויו המלח לאגן הצפוני באמצעות מסוע שיחצה את מצרי לינץ' והטמנת המלח בדרךם הים תוך סתיימת מפרץ צאלים ובהמשך על ידי הובלת המלח בדבורות או בתרחיף צפונה יותר והטבעתו בלב ים.

העובדת הנוכחית בוחנת הצעה חלופית לSİוק המלח המשלבת בין פרויקט קצר המלח ופרויקט מוביל ים סוף – ים המלח, אם ובאשר זה יוקם. ההצעה בוחנת את האפשרות כי המלח הנקי יומס על ידי ים /או מי רצויobil צפונה במצב מומס ללא צורך בהקמת מסוע ותשתיות בבדות באגן הצפוני של ים המלח. חישובים וניסויים תרמודינמיים של המסת מלח שנאוסף מסולות קצר המלח מצביים על פוטנציאלי ההמסה הגבוה של שתי התמייסות הנדרנות (מי ים ומי רצוי). בנוסף, ניסויים קינטיים מראים כי בתנאי ערבות מתמיד, התמייסות מגיעות לרוויה ולמצוי מלא פוטנציאלי ההמסה שלהן בתוך שתים וחצי דקות בלבד.

ミימוש ההצעה המדונה מותנה בהקמתו של פרויקט מוביל ים סוף – ים המלח בתוכנות הדומה לו שהוצאה בסקר היזכירות של הבנק העולמי ב 2012 ואשר אושר עקרונית על ידי ממשלות ישראל וירדן. החישובים מראים כי בהינתן נפח הקצר ומגבילות ההזרמה לממלח שהוצעו במסגרת סקר היזכירות לפרויקט (עד 400 מלמ"ש לשנה), אז ניתן יהיה להמיס את כל המלח השנתי הנקי על ידי מפעילים המלח והמפעילים הירדנים (המערכות ביחד), ועדין לא למצות את מלא פוטנציאלי ההמסה של התמייסות. מימוש מלא פוטנציאלי ביחס לכ-35 מלמ"ש) ועדין לא למצות את רק כ-110 מלמ"ש מי ים או כ-125 מלמ"ש מי רצוי לצורך המסת מלא נפח הקצר השנתי של שני המפעילים. בתום תהליך הערבות וההמסה, התמייסות שעירות המלח יוזרמו לממלח. הערבות של תמייסות אלו בים המלח צפוי להביא לשיקעת מליח במגנון הדומה לזה המלווה את שקיעת המלח בעת ערבות התמליחות הסופיות במימי המלח ולהתפתחות דלתת המלח במקומות נחל ערבה.

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

הקדמה

החלטת ממשלה מס' 4060 מtarיך 1-1-2012 קובעת כי יש לשמר את מפלס בירכה 5 של מפעלי ים המלח בגובה של עד 15.1+ בراتת מפעלי ים המלח וזאת באמצעות קציר המלח שבקרקעיתה. בירכה 5 היא הירכה הראשונה במערך בירכות האידוי של המפעלים ובها שוקע ה"תפל" העיקרי של התעשייה, מלך בישול (הלית - NaCl), בקצב שנאמד על ידי המפעלים בכ-20 ס"מ בשנה. לאורך חופיה המערביים של הירכה הוקמו מתחמי התעשייה הגדולים של ים המלח – חמי זוהר וein בוקק. הגורם המרכזי בוגינו התקבלה החלטת הממשלה על קציר המלח היה עליית מפלס המים בירכה בעקבות שיקעת המלח. עליית מפלס זו לוותה בעליית מפלס מי התהום אשר הביאה להצפות וערעור של היסודות והמבנים הקרובים ביותר לירכה וחיבתה שאיבת מים לצורך הנמקת מפלסים. הצפי היה כי המשך עליית מפלס הירכה יביא גם להצפות ישירות של המלונות, וחיבב בניית סוללות הגנה אשר יפגעו בונראות ובאטורקטיביות של המקום (חלקן בבר הוקמו). שיקולים נוספים לקידום פרויקט קציר המלח היה החשש מהמשך הגבהה של הסוללות ומפריצתן בעקבות אירוע סייסמי. אך בנוסף גם שיקולים סביבתיים הנוגעים לביריה מתמשכת של חומר ואדי שנדרש לצורך הגבהה הסוללות.

בහינתנו כי שטח הירכה הוא כ-80 קמ"ר ועל בסיס הערכת המפעלים לקבע הצטברות של כ-20 ס"מ בשנה, אזי נפח המלח השנתי שיש לקציר ולהוציא מהירכה על מנת לשמר את מפלסה עומד על כ-16 מיליון קוב. מפעלי ים המלח מעריכים את משקל המלח שייקצר בכ-20 מיליון טון בשנה. ייזום, תכנון, קידום וביצוע קציר המלח הוטל על מפעלי ים המלח תחת הפיקוח של ועדות התבננו של המדינה ובראשם הוועדה לתשתיות לאומיות (הות"ל). היעד המתבקש והנכון לפינוי והטמנת המלח הוא האגן הצפוני של ים המלח, שכן זהו גם מקומו של המלח לאחר ותמלחת ים המלח רוויה להלית אדי המלח שיפונה צפוי לשקווע לקרקעינו מבלי להשפיע על הרכב הים. הטמנה של 16 מיליון קוב זינחה ייחוסית מבחינה נפח ים המלח והוא שות ערך לעליית מפלס של פחות מ 3 ס"מ, וזאת על רקע ירידת מפלס שנתית ממוצעת של 1.15 מטר בעשור האחרון.

נכון למועד בתיבת דוח זה קציר המלח כבר החל באמצעות קוצרת ייעודית והוא מוערם בתוך בירכה 5 בסוללות שכיוון הכללי מזרח מערב, אורכו המצטבר של שתי הסוללות הוא בשלושה קילומטרים, רוחבן 140 מטרים וגובהן 15 מטרים והן נשקנות לסוללה המזרחית של בירכה 5. הרמת הסוללות בשטח בירכה 5 פוגעת בייצור של המפעלים שכן היא מצמצמת במידה מה את שטח האידוי של תמיית הגלם.

מפעלי ים המלח טרם הציעו לות"ל פתרון ארוך טווח לאופן שינוי והטמנת המלח מקצר המלח בים המלח. עם זאת המפעלים בוחנים ומקדמים בין השאר בנויות מסוימות להובלת המלח אשר ייחה את מיצרי לנץ ויסתיים בדרום ים המלח/מפרץ צאלים. מכאן קיימות מספר אלטרנטיבות להטמנת המלח וביניהן مليילו וסתימה של מפרץ צאלים הצפוי להתיבש מילא בשל ירידת המפלס. בנוסף, המפעלים מקדמים ביום את תוכניותם ל"סdom הירקה" במיצרי לנץ, תוכנית הכוללת בין היתר הערמה של מלך מקצר המלח בסיס להצבת פאנלים סולאריים.

גם אם התוכניות המוזכרות לעיל יצאו לפועל הן נתונים מענה למלך קציר המלח רק לתקופה של עשור או שניים, אך אין בהן כדי לחת פתרון ארוך טווח לבעיות התעשייתית הצפוייה בעשור הקרובים. פתרון שכזה אשר הוצע בעבר על ידי מפעלי ים המלח עשוי לכלול הקמת נמל בדרום הים והשקה של ספינות/דבורות אשר יעמיסו את המלח שיגיע עם המסוע, יצאו ללב ים ושם ישחררו את מעען. מהלך שכזה יהפוך את דרום ים המלח לאזור תעשייתי וישנה את מראהו מהקצתה ל凱צה. החשש מההשפעה הסביבתית וטביעת הרgel העצומה הצפוייה לפרוייקט קציר המלח על דרום ים המלח, מביא גורמים שונים להציג פתרונות יצירתיים אחרים לשינוי המלח לים המלח, מלבד המסוע והנמל שבקצתה.

מפעלי האשلغ הירדניים –Arab Potash Co. –APC, קוצרים את המלח בבריכות האידוי שלהם ועורמים אותם שם בבר שנים רבות. אمنם APC אינה כפופה להנחיות סביבתיות מגבלות כפי שאלה קיימות בישראל אלם יש להניח כי כל פיתרון לסילוק המלח לאגן הצפוני ישימצא 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 מקצר המלח על ידי ים ים /או מי רצץ מהתפלת והובלתו במצב מומס אלים המלח, ללא צורך בבנייה תשתיות לבדוקות לחופו של הים. פתרון זה יהיה ישים רק באם ממשלה ישראל וירדן יגיעו להסכמה על הקמת מוביל ים סוף - ים המלח, במתווה דומה לזה שהוצע בסקר ההייטכנות של הבנק העולמי אשר הסתיים ב-2012. תוצאות בדיקת הייטכנות תמכנו בזמננו בשילוב של שאייטת ים ים עמוק מפרץ אילת, הזרמת מי הים ביצירות בצד הירדני של הערבה לכיוון ים המלח, הקמה של מסדר תחנות הידראולקטריות לאורכו התוואי, הקמת מתקן התפלת אשר יספק מים מותפלים בערך לירדן והזרמת מי הרצץ מהתפלת אל דרום מפרץ ליסן שבים המלח הירدني לצורק האטת צב' ירידת המפלס. בדיקת הייטכנות כללה גם בדיקת ההשלכות של ערבות מי ים במאי המלח, ובעקבותיה נקבע כי הזרמה של עד 400 מיליון מטרים מעוקבים בשנה לים המלח אינה צפואה לשנות את תכונותיו באופן משמעותי (Gavrieli et al., 2011).

שילוב של פרויקט מוביל ים סוף - ים המלח עם פתרון למחלק קצר המלח באמצעות המסתה והובלתו לים המלח ללא בניית תשתיות לבדוקות לחוף הים עשוי להיות גורם מדרבן לקידום פרויקט המוביל ואך אולי מקור למימון חלקו, זאת בכפוף לניטוח טכני כלכלי של ההצעה הנבחנת בדו"ח הנוכחי.

חומרים

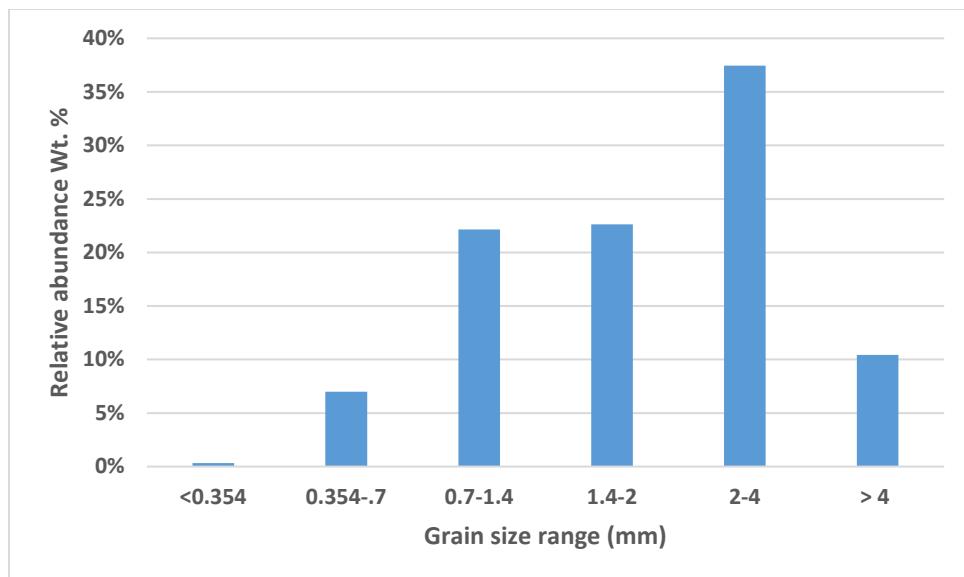
מלח מקצר המלח נדגם מסוללות בבריכה 5 בהן הוא נערם. הסוללות שנדגמו הן 154-2 ו-154-4 כאשר הראשונה היא סוללה שנקרה חצי שנה עד שנה טרם הדיגום בעוד השנייה היא סוללה טריביה שהכילה מלח שנקשר במהלך החודש טרם הדיגום. בהתאם לכך, הסוללה הראשונה הייתה מכוסה בשכבת דקה של אבק שהוסרה טרם הדיגום.

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

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

מי ים נאספו מחוף הים של פלמחים. מי רצץ מהתפלת (להלן מי רצץ) התקבלו באדיות מתקן התפלת של מקורות באשדוד.

האנליזות הכימיות של תמייסות הניסוי בוצעו במעבדות המכון הגיאולוגי.



איור 1 התפלגות גודל גרגיר של המלח מקצר המלח של בריכה 5 (ממוצע של שלושה ניפויים משתי ערמותמלח שונות)

מהלך הניסויים ותוצאות

על מנת לתאר באופן כימי-כמומי את רاكצית ההמסה של המלח מקצר המלח (להלן הליט) במילימטר ובמי ים ובמי ריכוז בוצעו ניסויים תרמודינמיים וקינטטיים תוך השוואת תוצאות ניסוי המסה במים מזוקקים. ניסוי המסה נערכו באופן מבוקר וביחסים שונים של מזוקק (הליט) להתמיסה (טבלה 1). לאחר המסה המלאה של הליט נמדדו הצפיפות והמוליכות החשמדלית של התמיסה. כמו כן נערכו ניסויי המסה אשר במהלכם נמדדה המוליכות החשמדלית באופן רציף לצורך ניתוח קצביו המסה. ניסויים אלו נערכו תוך כדי ערבוב אינטנסיבי של גרגירי המלח והתמיסה באמצעות סטירר מגנטי.

הרכיבים הכימיים של התמיסות בסוף ריאקציות המסה (טבלה 2) מודלו בתוכנת CeqPhreeq (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 מערכ ניסויי ההמסה התרמודינמיים והקינטיים. הטבלה מפרטת את מספר הניסוי, האם המלח מערמות המלח נופה ואם כו, לאיזה טווח של גודל גרגר, סוג התמיסה (DW - מים מזוקקים; SW - מי ים; RB - מי רכז מהתפלת), במוות המלח שהוספה לתמיסה (ביחידות של גרם מלח לkilogram Tamisa lePeni hammasa), המוליכות החשמלית והטמפרטורה שנמדדה בסוף הניסוי לאחר הגבהה, האם נוثرו גבישים בתום הניסוי, צפיפות והטמפרטורה של הנוזל בתום הניסוי. יש לחתת בחשבון שמכיוון שוראקטוריית המסת המלח היא אנדוטרמיית קיימת משຽעת טמפרטורות של 1.5 מעלות בין הטמפרטורה שנמדדה באמצעות חיישן המוליכות החשמלית בזמן אמת לבין הטמפרטורה של מד הצפיפות שנמדדה בשעה לאחר סיום התגובה.

mg/L	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	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

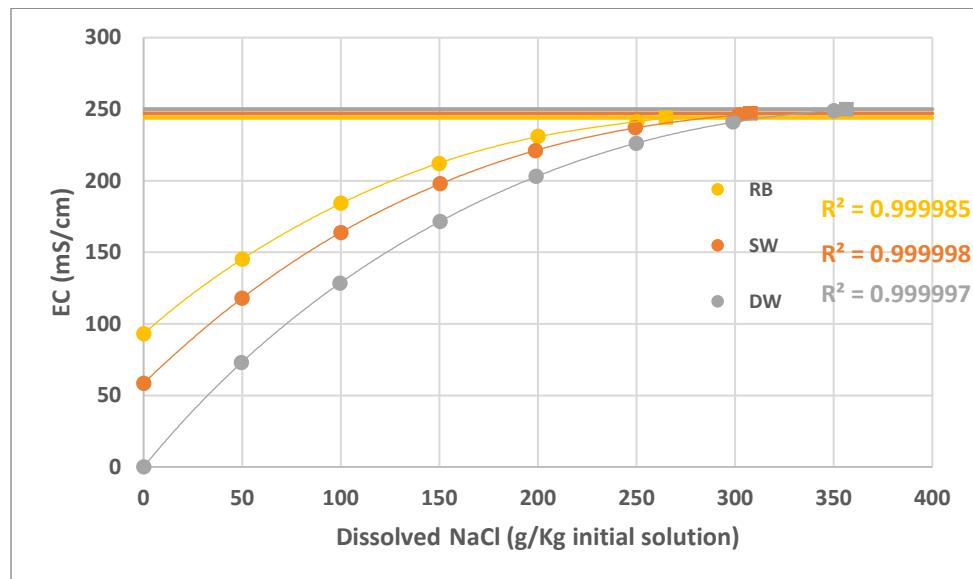
טבלה 2 הרכב הイונים העיקריים של התמיסות מהניסויים התרמודינמיים והקינטיים (ביחידות של מיליגרם לליטר) בוגמר המסת ההליט. לצורך מעבר ליחידות משקליות מצויין גם ריכוז המים בתמלחות בוגמר בלבד (ביחידות של קילוגרם מים ±2%). הסטייה במאזן המטענים (RE – reaction error) בכל התמיסות אינו עולה על 6%

(א) ניסויים תרמודינמיים (TD):

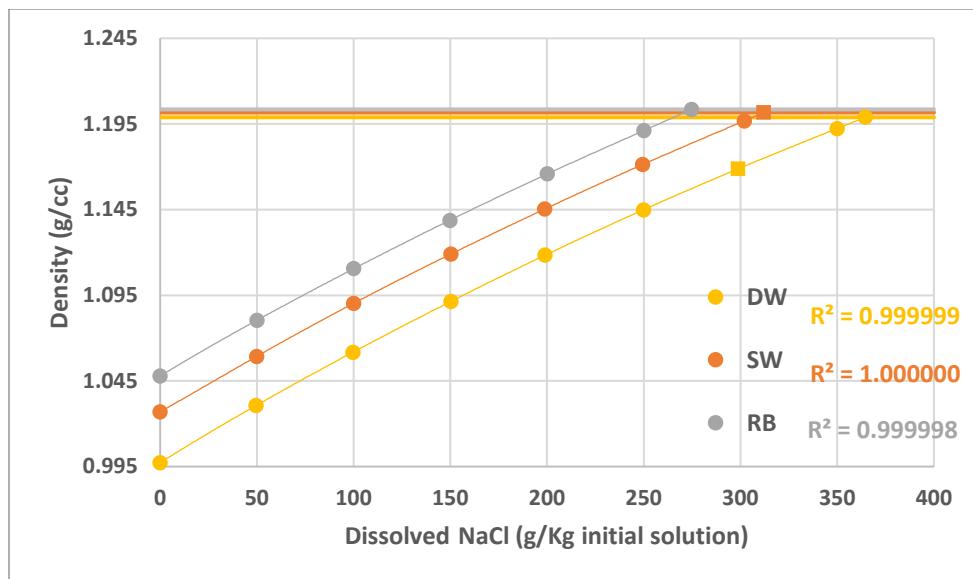
מטרת הניסויים התרמודינמיים היא לבייל את הקשר בין כמות המלח שהומסה למוליכות החשמלית, הצפיפות ודרגות הרויה בכל אחת משלוש התמיסות שנבחנו (מים מזוקקים, מי ים ומי רצץ).

ניסויי ההמסה נערכו בסדרות של 7 מיכלים לכל תמיישה. כל סדרה כללת כמות גדולה והולכת של הליט בהפרשים של 50 גרם מלח לק"ג תמיישה. עם הגיעו להמסה מלאה נמדדזו המוליכות החשמלית והצפיפות של התמיישה (איורים 2 ו- 3, בהתאם). פרמטרים אלו נמדדו גם לתמיסות הניסוי עצמן, ללא תוספת ההליט. בכמות המלח המקסימלית שהומסה בכל סידרת ניסויים (פוטנציאלי ההמסה של כל תמיישה) חושבה על ידי אקסטרפולציה של גרגסיות פולינומייאליות שהותאמו בין המוליכות החשמלית ככמות המלח שהומסה ובין הצפיפות וככמות המלח שהומסה עד לערכיהם המקסימליים שנמדדזו בניסויים בהם הוכנסה כמות מלח עודפת אשר לא התמיסה גם לאחר מספר שעות (ראו קווים אופקיים המייצגים את ערכי שיווי המשקל וקווי גרגסיה המבוססים על תוצאות הניסויים). על פי חישובים אלו הב�ויות המקסימליות של הליט שהומסו במים מזוקקים, במי ים ובמי רצץ הינן הניסויים). על 302 ו-266 גרם לקילוגרם תמיישה מקורית (לפני ההמסה), בהתאם. ערכים אלו מתרגמים לפוטנציאלי המסה של 310, 355, 350, 279 גרם הליט לליטר תמיישה מקורית (לפני ההמסה) בעבר מים מזוקקים, מי ים ומי רצץ, בהתאם.

הבדלים אלו ממחישים את ההבדל בפוטנציאלי המסה בין התמיסות, וכצפוי מצבעים על ירידה בפוטנציאלי ההמסה עם העלייה במליחות.



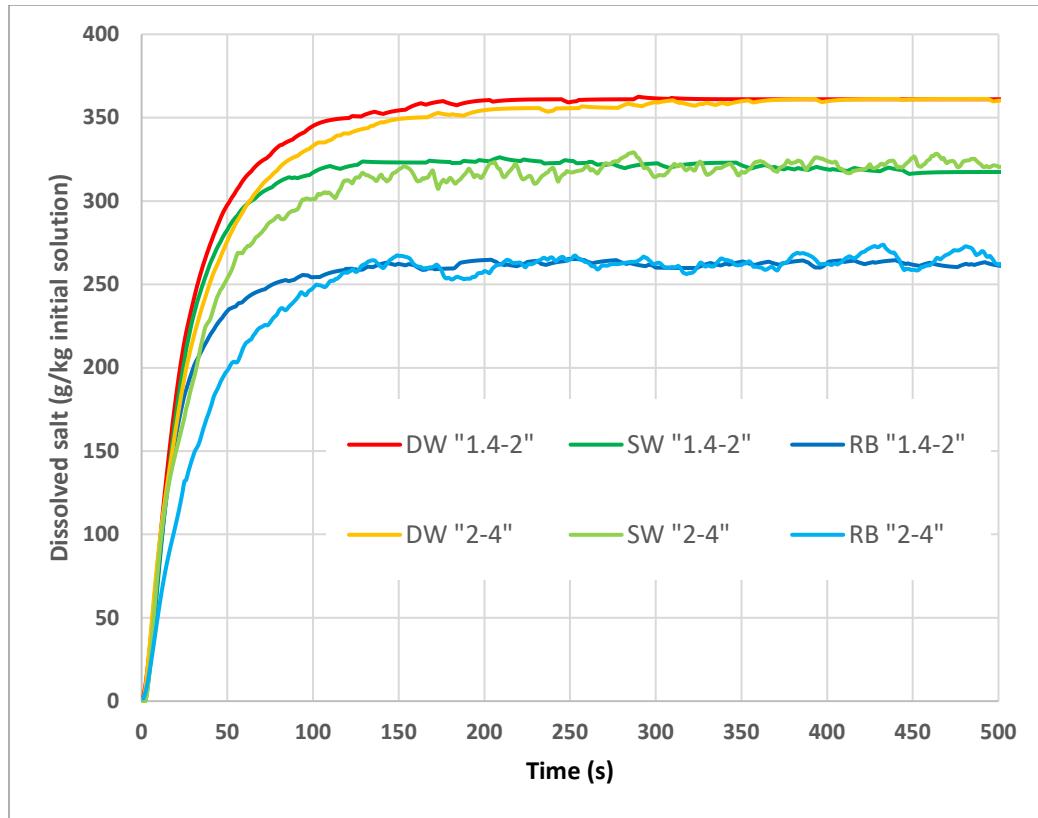
איור 2 מוליכות חשמלית כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את ערכי המוליכות החשמלית המקסימלית בכל סידרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפולציה של הרגסיות הפולינומייאליות שהותאמו לתוצאות הניסויים. DW - מים מזוקקים. SW - מי ים. RB - מי רצץ מהתפלת.



איור 3 צפיפות כנגד כמות המלח שהומסה בכל ניסוי. הקווים האופקיים מייצגים את הצפיפות המקסימלית שנמדדה בכל סדרת ניסויים אשר אליהם בוצעה האקסטרפלציה של הרגression הפולינומיאלית שהותאמו לنتائج הניסויים. DW - מים מזוקקים, SW - מים ים, RB - מי רכז מהתפלת.

(ב) ניסויים קינטיים (K):

ניסויים קינטיים בוצעו על כמות קבועה ועודפת של מלח (400 גרם מלח לkilוגרם תמיסה) שהוספו בבת אחת לתמיסות השונות (מים מזוקקים, מי יםomi רcz) תוך שהן מעורבות ומעורבות ב_amp;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 4-2 מ"מ. המעקב אחר קינטיקת ההמסה התבצע באמצעות מדידה רציפה של המוליכות החשמלית של התמיסה בזמן, ברחולציה של שנייה, באמצעות חיישן מסוג WW Multi 3630 (Multi 3630). המוליכות החשמליתות שנמדדו במהלך הניסוי הומרו לכמות המלח שהומסה בכל רגע נתון על ידי שימוש בקשרים האמפיריים שנקבעו בניסויים התרמודינמיים (חלק א').



איור 4 במתה המלח שהומסה בפונקציה של זמן בכל ניסוי. הניסויים מצביעים על הגעה לשינוי משקל בתוך שתים וחצי דקות. ניתן להוות בברור כי עברו כל תמיישה, קצב המסת המלח מהיר יותר מאשר גודל הגרגר קטן יותר.

דיון

איור 4 מצביע על שתי נקודות מוכחות מהתייאוריה של קינטיקה של המסה אף חשובות לציוויל:

1. קצב המסה קטן בכל שהתמיישה קרובה יותר לשינוי משקל.
2. ככל שגודל הגרגר קטן יותר (דהיינו שטח פנים זמין גדול יותר) קצב המסה מהיר יותר.

בנוסף, עד למיצוי של כ-80% מפוטנציאלי המסה של המלח בכל תמיישה, קצב המסה נותר יחסית ליניארי ופחות תלוי בשטח הפנים הקיים ובלרבה לשינוי משקל. הגעה לשינוי משקל מתרכשת בתוך שתים וחצי דקות בכל הניסויים למחרת תנאי הניסוי השונים מבוחנת גודל הגרגר וההתמיישות השונות.

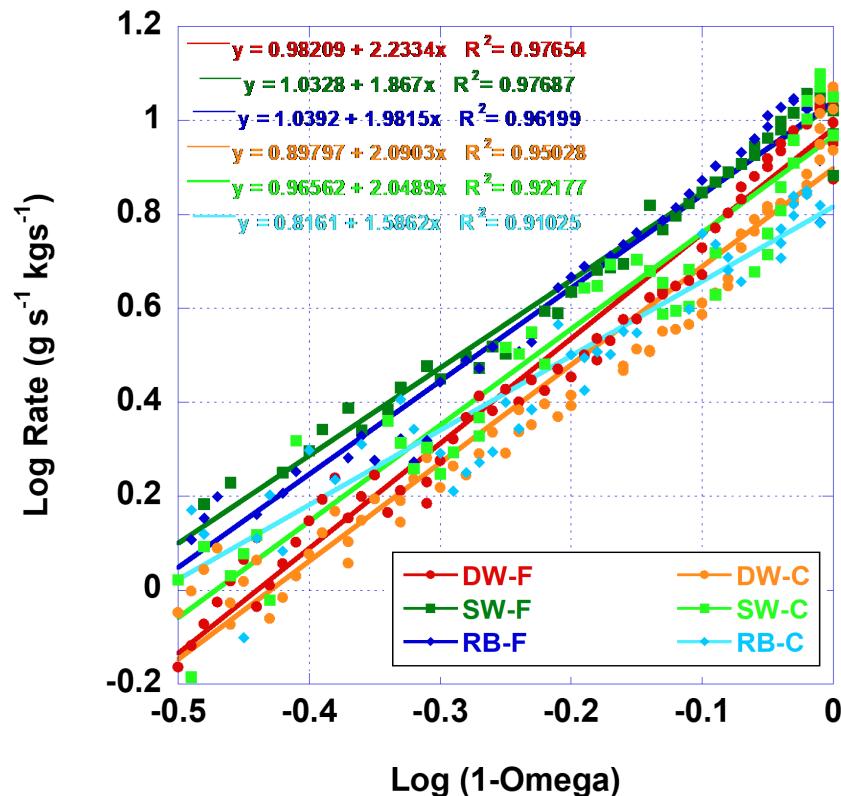
הניתוח הקינטי של הניסויים התבסס על המשוואה הבאה (Brantley, 2008)

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

כאשר: Ω מהווה את סדר הריאקציה (ערך ממוצע של 10 ± 2), k הוא הקבוע הקינטי (ערך ממוצע של $0.95 \pm 10\%$) ו- Ω היא דרגת הרויה המחשבת על ידי PhreeqC.

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

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



איור 5 קצב ההמסה ביחסות של גרט הליט לשנייה לkilוגרם תמיisa מול המרחק משווי משקל בסקלת log-log. סקלה זו מאפשרת הוצאה של קבוע הקצב וסדר הראקציה בהתאם למשווה 1. F - פרקציית גודל הגגר הדקה (מ"מ), C - פרקציית גודל הגגר הגסה (מ"מ). W - מים מזוקקים, SW - מי ים, RB - מי רכד מהתפליה.

השלכות על פרויקט קצ'יר המלח

ניתוח קינטטי/טרמודינמי המבוסס על תוצאות הניסויים המתוארים מאפשר לקבוע את פוטנציאל המסה של המלח מקצר המלח במילימטר או מילימטר אחד וכך מהתפלת אטום ואשר אלו יגיעו לדромים ים המלח במסגרת פרויקט מוביל 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, בפרויקט קצ'יר המלח צפויים להיקצר כ-20 מיליון טון מלח לשנה. בהנחה והמפעלים בידן (APC) קוצרים כ- 15 מיליון טון בשנה (הערכתה על בסיס יחס שטחי האידוי), בmouth המלח הכללית שיש להפטר ממנה היא כ-35 מיליון טון בשנה.

בדיקת היתכנות לפרויקט ים סוף - ים המלח שנעשתה עבור הבנק העולמי על ידי המכון הגיאולוגי והתה"ל (Gavrieli et al., 2011), נקבע כי הזרמה של עד 400 מלם"ש מי ים/מי רצד לא צפואה לשנות באופן מהותי את אופיו של הים.

על פי מספרים אלו, במידה ופרויקט המוביל ימומש ויכלול בשלב ראשון הזרמה של הרף העליון של 400 מלם"ש, אז די בהמסה של כ-0.088 טון הליט למטר קוב (מ"ק) תמיסה (88 גראם לליטר תמיסה) כדי לסלק את מלא משקל קצ'יר המלח של שני המפעלים.

בפועל, פוטנציאל המסה של מי ים ושל מי רצד מהתפללה גבויים ממשמעותית מ- 0.088 טון הליט למ"ק תמיסה ועומדים על 0.310 ו-0.279 טון הליט למ"ק, בהתאם. דהיינו, המסה של 0.088 טון הליט למ"ק תמיסה מ坐着 רק 28% או 32% מפוטנציאל המסה של מי ים ומירצד, בהתאם. לבן, במידה וימצא הפתרון ההנדסי לשמר יחס קבוע של ערבות מלח ותמיסה במתකני ערבות/שחרור מתאים, ותזוזם בmouth מי ים /או מי רצד בנפח של 400 מלם"ש, פוטנציאל המסה רב לא ימושה וקצב המסה צפוי להיות מהיר מאד (פחות מ-20 שניות). בהתאם לכך, זמן השהות הנדרש של התurbidity תמיסה-מלח במתיקן הערבות צפוי להיות קצר ביותר.

לחילופין, מכיוון שבמאות המלח הפוטנציאלית שניתן לסלק בהמסה על פי החישובים הנ"ל עולה ממשמעותית על הכמות השנתית של המלח הנकוצר על ידי שני המפעלים, הרי ניתן יהיה להמיס את כל מלח הקצר משני המפעלים גם בנפחם קטנים מ 400 מלם"ש. בהנחה כי תמצא הדרך להביא את התמייסות לרויה בקצב שנצהפה במעבדה (בשתי דקוטות וחצי), אז הנפח השנתי של מי הים הנדרשים לסילוק מלא 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 רצד:

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

יש להניח כי גם לאחר שיעורם עליון בין הצדדים, עבר זמן רב עד להזאתו לפועל של פרוייקט ים סוף ים המלח. מאידך אימוץ הפתרון של המסת מלך הקצר באמצעות מי הים מאפשר אגירה זמנית של המלח בבריכות תוך ידעה כי עם הקמת הפרויקט ניתן יהיה בתוך שנים ספורות להמיס ולסלק את כל נפח המלח שהצטבר עד אז. במות המלח השנתית שנייתו יהיה לסלק תוך הבאת מי הים לרוויה בהרומה של 400 מיל"ש עומדת על:

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

ובמי רכד:

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

במויות אלו גובהות פי 3.5 מכמות המלח השקעת בשנה במפעלים הישראלים והירדניים יחדיו.

באמור, זמן השהות הנדרש על פי ניסוי המudy להגעה למיצוי פוטנציאלי המסה והגעה לשינוי משקל לעמוד על בשתי דקות וחצי. במידת הצורך ניתן לצמצם את זמן השהות הנ"ל באמצעות טחינת גרגירי המלח לגודל גרגיר דק יותר מהנעשה ביום על ידי הדוברות על מנת להאיץ את קצב המסה.

בקודה נוספת יש לקחת בחשבון היא שסביר שבמידה ובכל זאת ישאר מלך דק גרגיר שלא עבר המסה מלאה ניתן יהיה לסלקו בתרחיף אגב המסתו, לכיוון האגן הצפוני ובכך אף להגדיל יותר את במות המלח הפוטנציאלית שנייתו יהיה לשנע לאגן הצפוני.

בהתואר בהקדמה, המלצת הבנק העולמי, אשר אומצה בדמננו על ידי כל הגורמים המעורבים, הייתה להקים את מובל ים סופי-ים המלח בולו בירדן ולחזרו את מי הים /או מי הרcz במרחב ליסן שבدرום מזרחה ים המלח, גם הוא בתחום מלכת ירדן. מכאן שבכדי למש את הרעיון המועלה באן יהיה צורך להוביל את המלח מקשר המלח של מפעל ים המלח לתוך ירדן ומשם לבצע את הערבוב עם מי המובל, או לחילופין, למשוך חלק מנפח המים של המובל לכיוון המפעלים ושם לבצע את המסה. עם זאת יש לשקל בקיידה באם יהיה נכון לשחרר תמייסות אלו והוא לאחר המסה, בזרימה חופשית דרך נחל ערבה, בין הסוללות של מפעלי ים המלח I – APC שכן תמייסות אלו יהיו עדין בעלות פוטנציאלי המסה וכן הן עשויות להמס חלקיים של הסוללות הבנויים מהליט. כמו כן, עליה החשש להגברת התחרותות בנחל הערבה שעולה לסכן את הבריכות גם כן. מאחר וכך, גם אם המסה של המלח מקשר המלח של מפעלי ים המלח יבוצע בשיטה המפעלים הישראלים, עדין יהיה צורך להזרים חזרה את התמייסות לממלכת ירדן לצורך שחרורם במרחב ליסן, בהתאם להצעת הבנק העולמי.

מלבד השאלה הטכנית כלכלית יש עוד לבחון את ההשלכות של ערבות של מי הים וממי הרcz אשר המיסו במויות גדולות של מלך, עם ים המלח. חישובים תרמודינמיים ראשוניים מצבעים על כך כי ערבות שכזה יהיה מלאה ב- *outsalting* של מלך, בדומה למתרחש בדלתת המלח (Beyth, M., 1998, Gavrieli et al., 1989, Gavrieli et al., 1997). זאת בנוסף לשકיעת הגבס הצפוני ממילא בעת ערבות של מי ים וממי רcz בים המלח (Reznik et al., 2009, Reznik et al., 2010, Reznik et al., 2012, Reiss et al., 2021).

תודות

לגב' שמיים שרים מפעילים המלח אשר הדריכה אותנו וסייעה באיסוףמלח הקצר מהסללות, למרא גל אפרתי מחברת מקורות- מתן התפליה אשוד על הסיע באליסוף מי רצץ לניטרים, לגב' נאייה סובח אשר סייע בעבודת הניפוי ולצאות 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., Yechiel, 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

