

האם ים המלח יכול להתייבש בעקבות איוד?

בוריס קרומגאלז, ארטור הכט^א, אמיתי כץ ואברהם סטרינסקי

תקציר

המפולס הנוכחי (2019) של ים המלח הוא בערך 434 מטרים מתחת לפני הים, וקרקעיתו כ-720 מטרים מתחת לפני הים. על פי מחקרים מהשנים האחרונות, הלחות היחסית, שנמדדה בתחנה הממוקמת במרכז ים המלח, עולה בדרך כלל על 30%. היות שאידוי של גוף מים יכול להתקיים כאשר האקטיביות שלהם (היחס בין לחץ אדים של התמיסה לבין לחץ אדים של מים מתוקים באותה טמפרטורה) גבוהה יותר מהלחות היחסית של האוויר, תהליך האיוד של ים המלח יכול להתקיים כל זמן שהאקטיביות של המים שלו תהיה מעל 0.3. האקטיביות של גוף המים העיקרי של ים המלח עומדת כיום על 0.65, ולכן מי הים יכולים להתאדות רק בתקופות שהלחות היחסית שמעליהם נמוכה מ-65%. בלחות יחסית גבוהה יותר תהליך האיוד אינו יכול להתקיים, אלא להפך, יכול להתקיים תהליך של עיבוי.

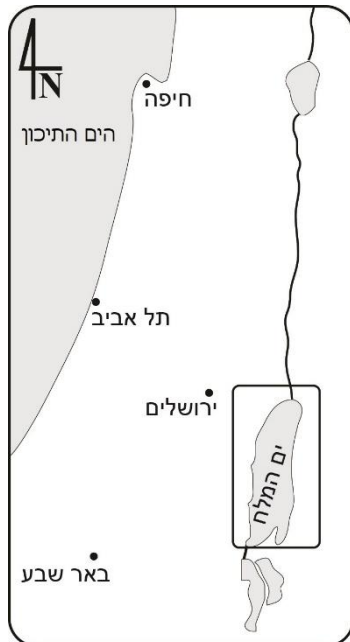
בתנאי הלחות של היום (מינימום 30%) האגם **איננו יכול להתייבש** בעקבות האיוד שיפסק במפולס של כ-550 מ' מתחת לפני הים. האיוד יכול להימשך אם יתרחש באזור שינוי אקלימי והלחות היחסית תרד אל מתחת ל-30%.

כיום מתגבשים ושוקעים בים המלח המינרלים ארגוניט, גבס והליט (מלח הבישול), וכאשר מי ים המלח יגיעו בעקבות איודם לאקטיביות של 0.5, יתחיל להתגבש ולשקוע המינרל קרנליט. בקידוח עמוק שנעשה בשנים האחרונות במרכז ים המלח, המייצג פרק זמן של כ-220 אלף שנים, לא נמצא קרנליט. היות שהרכב הכימי של ים המלח בתקופה ההיא היה דומה להרכבו כיום, המסקנה היא שרוב הזמן האקטיביות של המים הייתה מעל 0.5. אם קצב ירידת המפולס של הים יהיה בעתיד כפי שהוא היום, כמטר אחד בשנה, יתחיל האגם להשקיע קרנליט בעוד כ-70 שנה.

^א נפטר

1. הקדמה

ים המלח (איור 1) הוא האגם הנמוך ביותר על פני היבשות של כדור הארץ. מפלסו כיום (2019) הוא בערך 434 מטרים מתחת לפני הים, והוא הולך ויורד עם הזמן עקב סילוק מים על ידי איוד וניצול תעשייתי. מפעלי ים המלח הישראלי והירדני מסלקים מן הים 520 מיליון מ"ק ומחזירים

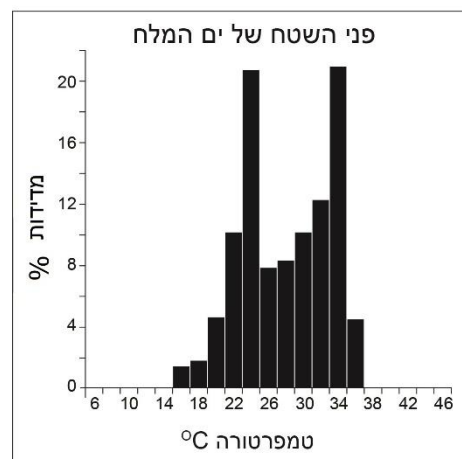
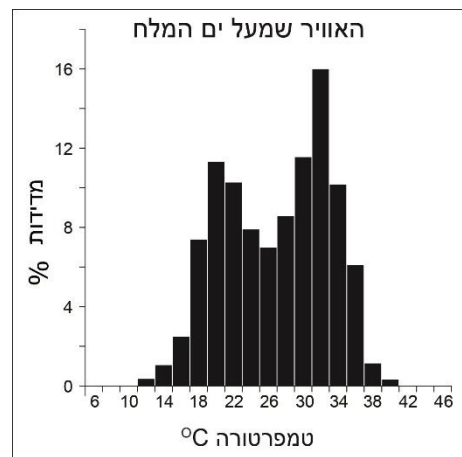


איור 1: מפת מיקום

כ-240 מיליון מ"ק כתמלחת סופית (תמלחת שאריתית לאחר שקיעת הקרנליט בבריכות האיוד), והדבר גורם לירידת מפלס של 30–40 ס"מ בשנה. ירידת המפלס הכוללת כיום היא כמטר אחד לשנה, ומליחות הים היא בערך 340 גרם בליטר תמיסה. בכך שונים מי ים המלח ממי אוקיינוס ממוצעים (שהם בעלי מליחות של כ-35 גרם בליטר תמיסה) לא רק במליחותם, אלא גם ביחס בין המרכיבים הכימיים שלהם. לדוגמה, מי ים המלח מועשרים, לעומת מי אוקיינוס, בריכוזי היסודות אשלגן, מגנזיום, סידן וברום יחסית ליסוד כלור, ומדולדלים בנתרן ובסולפט.

טמפרטורת האוויר מעל ים המלח היא בתחום $10-42^{\circ}\text{C}$, וטמפרטורת המים בפני השטח בתחום $14-36^{\circ}\text{C}$ (איור 2). בשני המקרים ההתנהגות ב-מודלית, כלומר מצביעה על שני שיאים של טמפרטורה. שני שיאי הטמפרטורה של האוויר מעל המים הם בערך 24°C ו- 34°C , ושני שיאי הטמפרטורה של מי הים הם 22°C ו- 32°C , דומים מאוד.

איור 2: ערכי טמפרטורה של מי ים המלח והאוויר שמעליו



במאמר הנוכחי ננסה לענות על השאלות: האם ים המלח יכול להיעלם (להתייבש) בעקבות איוד? ומה יודעים אנחנו על עברו?

המאמר קובע את המגבלות הפיזיקליות שתהליך האיוד תלוי בהן. הוא איננו עוסק בקצב האיוד, ולכן איננו מנבא מתי התהליך יכול להיעצר. חשוב לזכור שגופי מים בטבע יכולים להיעלם עקב תהליכים גיאולוגיים או הידרולוגיים אחדים, אבל הדגש במאמרנו זה הוא על תהליך האיוד בלבד. במסגרת שאלה זו נברר את הקשר בין האקלים ששורר באזור ים המלח לבין מידת ההתאדות האפשרית של מי האגם, מה יהיו ממדיו (מפלס, שטח או נפח) ומה אנחנו יודעים על הסלעים שייווצרו בעקבות איוד המים בכל שלב של האיוד.

2. תהליך האיוד של מי ים המלח

דרגת האיוד של מי ים המלח מוגדרת במאמר זה על פי היחס בין שני יסודות שלא נכנסו למינרלים השוקעים בתחום האיוד. לדוגמה, המינרל קרנליט מתחיל לשקוע ממי ים המלח כאשר ריכוז המגנזיום במים הוא 88.7 גרם בק"ג מים. ריכוז Mg במי ים המלח (בשנת 1982) היה 46.8 גרם בק"ג מים, ולפיכך אנחנו אומרים שקרנליט מתחיל לשקוע ממי ים המלח כאשר הם בדרגת איוד של 1.9 (הריכוזים מבוטאים ביחידות של גרם בק"ג מים).

תהליך האיוד יכול להתקיים כל זמן שהאקטיביות של מי האגם בפני השטח גבוהה יותר מהאקטיביות של המים בשכבת האוויר שמעליהם. תנאי זה מוצג במשוואה הבאה:

$$a_{H_2O}^{DSW} > a_{H_2O}^{air}$$

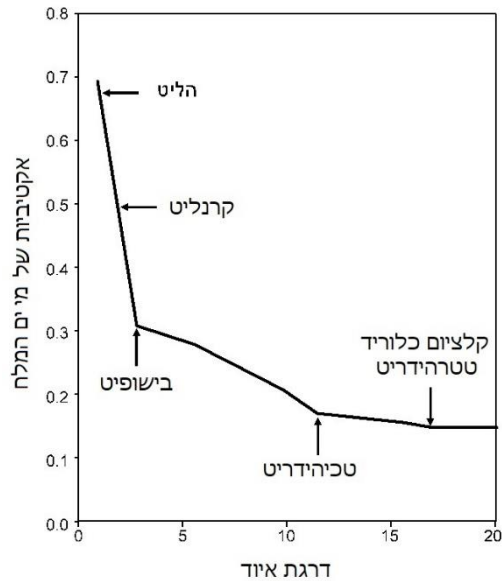
$$a_{H_2O}^{air} = \frac{P^{air}}{P_0^{air}} \quad \text{האקטיביות של המים באוויר מוגדרת כ-}$$

כאשר P^{air} הוא לחץ אדי המים באוויר בטמפרטורה נתונה ו- P_0^{air} הוא לחץ אדי המים באותה טמפרטורה במצב של רוויה (ראו מסגרת). על פי הגדרה זו אקטיביות המים באוויר היא הלחות היחסית.

ים המלח הוא אגם סופי (אגם ללא מוצא). מפלס המים שלו מוכתב בעיקר על ידי המאזן בין מים הנכנסים אליו כנגר עילי או דרך נביעות מתת-הקרקע, לעומת מים המסולקים מן האגם על ידי איוד ובשנים האחרונות גם על ידי המפעלים להפקת אשלג. (Krumgalz et al. 2000). הראו בחישוב שכאשר מאדים את מי ים המלח עד יובש מתקבל חתך גיאולוגי עמודי בעובי של 80–90 מטרים (החתך מתואר במאמרם באיור 6, ונמצא גם בחוברת מלח הארץ 1 במאמר 'ים המלח – הנביעה הגדולה בעולם'). יחידת המלח, הראשונה לשקוע, היא בת כ-12 מטרים.

הקשר בין האקטיביות של מי ים המלח (ראו מסגרת) לדרגת האיוד שלו בזמן שקיעת המינרלים נתון באיור 3. ככל שמי הים מתאדים יותר, האקטיביות של המים יורדת.

האקטיביות של המים בתמיסה מחושבת על פי משוואות מתחום הכימיה הפיזיקלית (לדוגמה, על פי המודל של Pitzer). על פי ההרכב הכימי שלהם כיום, האקטיביות של מי ים המלח היא 0.65. כדי לחשב את ההתנהגות הצפויה של ים המלח בתהליך האיוד אנחנו מניחים שהאקלים באזור וההרכב הכימי של שכבת פני השטח של האגם אחידים בכל שטחו.



איור 3: הקשר בין אקטיביות המים בתהליך האיוד של מי ים המלח (בטמפרטורה של 25 מעלות צלסיוס) למינרלים הנוצרים בתהליך.

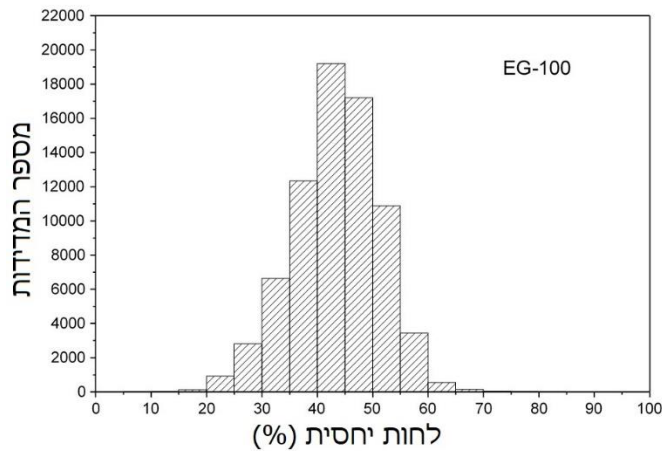
3. אקטיביות המים במי ים המלח ובאטמוספירה שמעליו

החל בשנת 1992 ערכו חוקרים במכון לחקר ימים ואגמים בחיפה מדידות של לחות יחסית (ראו מסגרת) מעל פני ים המלח. המדידות נעשות בתנאים הסטנדרטיים, בגובה של 3 מטרים מעל פני האגם. מכשיר המדידה הוצב על גבי רפסודה צפה במרכז האגם, ומדד את הלחות היחסית, את טמפרטורת האוויר ואת טמפרטורת המים.

נתוני הלחות היחסית שהתקבלו מוצגים בהיסטוגרמה באיור 4. מן ההיסטוגרמה אנחנו לומדים שתחום הלחות היחסית ב-95% מן הזמן הוא בין 30%-ל-60%. לחות יחסית מתחת ל-30% או מעל ל-60% נמצאה רק בפחות מחמישה אחוזים של המדידות. כלומר: איוד של מי ים המלח בהרכבם הנוכחי (אקטיביות מיים מסביב ל-0.65) בתנאי לחות יחסית מעל 30% יכול להביא לשקיעה של המינרל קרבליט, (איור 3) בתנאי הלחות של היום יפסק האיוד במפלס של כ-550 מ' מתחת לפני הים.

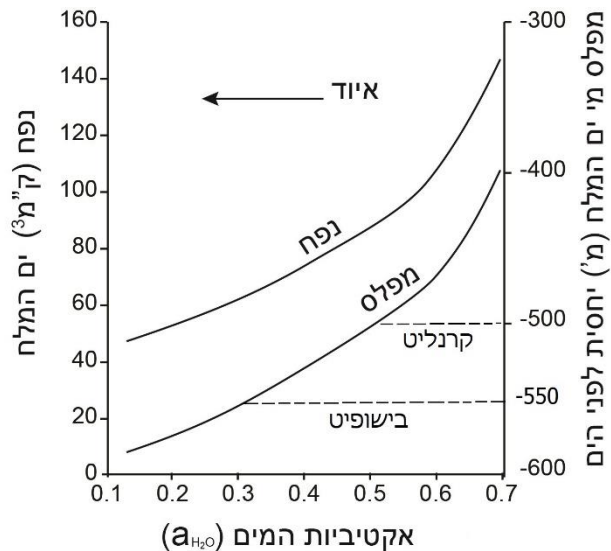
כפי שקורה בבריכות האיוד של מפעלי ים המלח.

על סמך כל מה שנאמר עד כה, אנחנו מבינים שאין מי ים המלח יכולים להתאדות עד יובש, כי האידוי שלהם ייפסק כאשר האקטיביות שלהם תשתווה ללחות היחסית של האוויר שמעליהם.



איור 4: הלחות היחסית באוויר שמעל ים המלח במרכז האגם

הקשר בין השתנות הנפח של ים המלח, המפלס שלו ושטחו עם התקדמות תהליך האידוי, חושב כבר לפני שנים רבות על ידי ג'ון הול ודוד ניב מהמכון הגיאולוגי הישראלי. אם נוסף לקשר גם את השתנות האקטיביות של המים, נוכל לתאר בכל שלב של ההתאדות את ממדי האגם בתנאי לחות יחסית שונים. היות שאנחנו מכירים כבר את הקשר בין מידת האידוי של ים המלח והאקטיביות של המים, נוכל לצרף אותו לגרף הקשר של הול וניב ונקבל את איור 5, המתאר את האקטיביות של המים בתחום 0.1-0.7.



איור 5: הקשר בין אקטיביות המים לנפח ים המלח ומפלסו בתהליך האידוד. קרנליט יתחיל לשקוע כאשר המפלס יהיה 500 מטרים מתחת לפני הים ובישופיט ישקע ב-550 מטרים מתחת לפני הים.

כפי שכבר נאמר, הלחות היחסית שנמדדה מעל אמצע ים המלח היא בדרך כלל מעל 30%, והאקטיביות המינימלית שמי ים המלח יוכלו להגיע אליה על ידי אידוד היא 0.3.

בתנאים אלה מפלס האגם יהיה בערך 550 מטרים מתחת לפני הים, נפחו 60 ק"מ מעוקבים (כ-40% מנפחו בסוף שנות השבעים) ושטחו 526 קמ"ר (כ-65% משטחו בסוף שנות השבעים).

4. השתנות ממדי ים המלח בעקבות שינוי אקלימי אפשרי

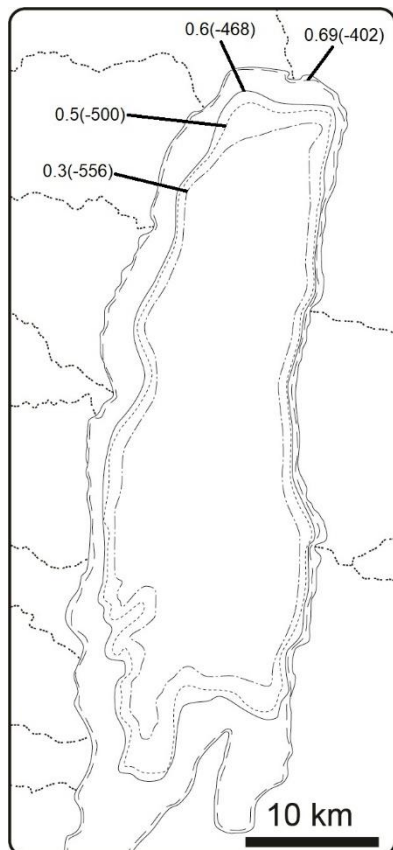
בתקופה של אקלים יבש יותר, כאשר הלחות היחסית תהיה נמוכה יותר ותגיע למשל לערך מינימלי של כ-20% לחות, ההתאדות יכולה להימשך עד לאקטיביות מים של 0.2, מה שמתאים, לפי איור 5, למפלס של כ-580 מטרים מתחת לפני הים.

אם תהליך האיוד אכן יימשך, הרי בעומק של כ-500 מטרים (כ-70 מטרים עמוק יותר מהיום) יתחיל להיווצר קרנליט, ולא יהיה צורך יותר בבריכות איוד, כי ים המלח יהיה כולו "בריכת איוד". עובי גוף המים יהיה כ-220 מטרים לעומת כ-300 מטרים כיום.

אם מניחים שקצב ירידת המפלס של מי ים המלח בעתיד יהיה כפי שהוא כיום (כמטר אחד לשנה), ושקיעת קרנליט אכן תתחיל במפלס נמוך יותר ב-70 מטרים יחסית להיום, תתחיל שקיעת הקרנליט בעוד 70 שנה.

בתקופה של אקלים לח יותר, לדוגמה כאשר הלחות היחסית המינימלית תהיה גבוהה יותר ותגיע לערך של 60%, האקטיביות של המים יכולה להיות מעל 0.6 והמפלס יהיה כ-460–470 מטרים מתחת לפני הים.

הקשר בין שטח ים המלח לעומק המים והאקטיביות שלהם בעקבות האיוד נתון באיור 6. בקידוח לעומק של כ-450 מטרים שנקדח במרכז ים המלח לפני שנים אחדות נמצא חתך



גיאולוגי המיצג תקופה של כ-220 אלף שנה. כרבע מן החתך בנוי מסלעים אוופוריטיים, סלעים שנוצרו מהתאדות גוף המים של ים המלח הקדום.

על סמך תוצאות מן הקידוח נמצא שהסלעים האוופוריטיים שנמצאו הם, ארגוניט, גבס ומלח (הליט). לא נמצאו מינרלים מאוחרים יותר (איור 3), כמו קרנליט או בישופיט. היות שההרכב של מי ים המלח הקדום בפרק הזמן של כ-220 אלף השנים האחרונות היה דומה להרכבם כיום, אפשר להסיק שהאקטיביות של מי הים הייתה גבוהה מ-0.5.

איור 6: השטח המחושב של ים המלח בדרגות איוד שונות. קווי החוף מציינים את השטח של האגם בשלבים

שונים של התהליך. המספרים מציינים את אקטיביות המים והמספרים בסוגריים את מפלס האגם.

5. מסקנות

- א. ממדי ים המלח שיתקבלו כתוצאה מאידוי המרבי בתנאי האקלים של היום (לחות יחסית שמעל 30%) הם מפלס בגובה של כ-550 מטרים מתחת לפני הים, על שטח של כ-500–550 קמ"ר ונפח של 60 ק"מ מעוקבים.
- ב. על פי חתך הסלעים בקידוח עמוק במרכז ים המלח, האקטיביות של מי האגם בפרק הזמן של 220 אלף השנים האחרונות הייתה מעל 0.5.
- ג. בהנחה שקצב ירידת מפלס הים בעקבות האיוד יהיה דומה לזה של היום (כמטר אחד בשנה) יתחיל הים להשקיע קרנליט, כמו בבריכת האיוד של מפעלי ים המלח, בעוד כשבעים שנה.

6. חומר לקריאה

Krumgalz, B.S., Magdal, E., and Starinsky, A. (2002) The evolution of a chloride sedimentary sequence – simulated evaporation of the Dead Sea. *Israel Journal of Earth Sciences*, 51(3-4), 253-268

Krumgalz, B.S., Hecht, A., Starinsky, A., and Katz, A. (2000) Thermodynamic constraints on Dead Sea evaporation: can the Dead Sea dry up? *Chemical Geology*, 165, 1-11

Zilberman, T., Gavrieli, I., Yechieli, Y. Gertman, I., and Katz, A. (2017) Constraints on evaporation and dilution of terminal, hypersaline lakes under negative water balance: The Dead Sea, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 217, 384-398

סטרינסקי, א. (2005) ים המלח – הנביעה הגדולה בעולם. מלח הארץ 1, הוצאת מאגנס. עמוד 35.

במסגרת מוסברים מושגים שנעשה בהם שימוש במאמר זה

לחץ אדים של תמיסה – כאשר שמים מים בכלי פתוח הם מתאדים. חלקיקים נעים מהסביבה הנוזלית אל מחוץ לכלי ובחזרה. כאשר שמים את הכלי עם המים במכל סגור מתרחשים שני תהליכים הפוכים בו-זמנית: (1) איוד: הנוזל הופך לגז; (2) עיבוי: הגז הופך לנוזל. כאשר עובר מספיק זמן, כמות האדים במכל הסגור נשארת קבועה. במצב זה הלחץ שנוצר על דפנות הכלי על ידי אדי המים נקרא לחץ אדים. גודל זה משתנה עם הטמפרטורה. לדוגמה, למים בטמפרטורה של 25 מעלות יש לחץ אדים השווה ל-23.8 מ"מ כספית, ובטמפרטורה של 100 מעלות הוא 760 מ"מ כספית. לחץ אדי המים בתמיסה מוכתב על ידי מליחותה והרכבה. במושג 'הרכב' הכוונה ליחס בין המרכיבים הכימיים.

לחות יחסית (relative humidity) – לחות יחסית היא גודל המתאר את ריכוז אדי המים באוויר. ריכוז אדי המים משתנה על פני כדור הארץ בהתאם לתנאים הגיאוגרפיים ובעיקר בהתאם למרחק מגופי מים על פני השטח. ישנה כמות מרבית של אדי מים שהאוויר יכול להכיל. כאשר הוא מכיל כמות כזו, אומרים שהאוויר רווי באדי מים או שהאוויר במצב של רוויה. הכמות הזו תלויה בטמפרטורה של האוויר. לדוגמה, בטמפרטורה של 20 מעלות צלסיוס יכול קילוגרם אוויר להכיל כ-15 גרם אדי מים, ובטמפרטורה של 40 מעלות הוא יכול להכיל כ-50 גרם אדי מים.

הנוסחה לחישוב לחות יחסית (RH) היא:

$$\text{לחות יחסית (באחוזים)} = 100 \times \frac{P^{air}}{P_0^{air}} \text{ כאשר } RH = 100 \times \frac{P^{air}}{P_0^{air}}$$

P^{air} - לחץ אדי המים באוויר בטמפרטורה מסוימת

P_0^{air} - לחץ אדי המים באוויר במצב של רוויה באותה טמפרטורה

אקטיביות של מים בתמיסה (a_{H_2O}) – האקטיביות של המים היא היחס בין לחץ אדים של התמיסה לבין לחץ אדים של מים מתוקים באותה טמפרטורה.

$$a_{H_2O} = \frac{P^{H_2O}}{P_0^{H_2O}} \text{ אם } P \text{ הוא לחץ האדים הרי: אקטיביות של מים בתמיסה היא}$$

כאשר, P^{H_2O} - לחץ אדי המים בתמיסה בטמפרטורה מסוימת

$P_0^{H_2O}$ - לחץ אדי המים המתוקים באותה טמפרטורה

בתמיסה מימית אקטיביות של מים נמדדת בסקלה שבין 0 ל-1. לדוגמה, אקטיביות של מים מזוקקים היא 1, האקטיביות של מים במי ים היא 0.98, במי ים מאוידים פי שלושה (בתחילת שקיעת גבס) היא 0.93, ובמי ים מאוידים פי עשרה (בתחילת שקיעת הליט) היא 0.75.