



עליית מפלס הים התיכון

תחזית השפעה על אקוויפר החוף בישראל

בדיקה ראשונית

דו"ח מסכם

סבטלנה לומלסקי

יוני יצחק

יעקב לבשיץ

דוח השירות ההידרולוגי IHS/27/2024

אוקטובר 2024

תוכן עניינים

1	רקע ומטרה	5
2	גישת העבודה	5
2.1	מגבלות המודל	6
2.1.1	המבנה האנכי	6
2.1.2	הגדרת הגבול עם הים	6
2.1.3	המלצות לשיפור המודל	7
2.2	תרחישים לבדיקה	8
2.3	תקופת הרצות ונתונים דינמיים	9
3	ניתוח תוצאות הרצת תרחישים	9
3.1	השפעה של עליית גובה פני הים על מצב המפלסים ומשטר הזרימה באקוויפר החוף	10
3.1.1	ניתוח נקודתי	10
3.1.2	ניתוח מרחבי	17
3.2	תנועת הפן הביני	20
4	סיכום והמלצות	23
5	ספרות	25

רשימת תרשימים

2.1	איור : עדון אנכי של רשת המודל	6
2.2	איור : הגבול המערבי במודל המאוחד המקורי	7
2.3	איור : עדכון גבול עם הים	8
2.4	איור : הפרדה בין תת-הקרקע ואזור מי הים הפתוחים	8
3.1	איור : בחירת חתכים ונקודות לניתוח	10
3.2	איור : ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל" חתך נתניה (1-)	11
3.3	איור : ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל" חתך תל אביב (2-2)	12
3.4	איור : ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל"	13
3.5	איור : תרחיש 3 (Sc3) : עוצמה של תגובת האקוויפר לעליית פני הים (STR)	15
3.6	איור : מרחקי השפעה של תגובת האקוויפר לעליית פני הים	16
3.7	איור : מיפוי תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". תת אקוויפר AB, סוף 2100	18
3.8	איור : מיפוי תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". תת אקוויפר CD, סוף 2100	19
3.9	איור : מיקום פן הביני : חתך 1-1 – אזור נתניה	20
3.10	איור : מיקום פן הביני : חתך 2-2 – אזור חולון-בת ים	21
3.11	איור : מיקום פן הביני : חתך 3-3 – אזור אשדוד	21

רשימת טבלאות

2.1	טבלה : תרחישי הייחוס הרלוונטיים (קו הייחוס נמצא כ- 14.9 ס"מ מעל אפס האיזון הארצי)	8
2.2	טבלה : פירוט נתוני התרחישים	8
3.1	טבלה : סיכום עוצמות תגובת האקוויפר לעליית פני הים (STR) בשלושה חתכים כפונקציה של זמן ומרחק מחוף הים	13
3.2	טבלה : זמני השהייה (בשנים) של תגובת האקוויפר לעליית פני הים, ב-3 מרחקים מחוף הים	14

העבודה הנוכחית מהווה חלק מסדרת העבודות הנערכות באגף להידרולוגיה ברשות המים ועוסקות בבחינת השפעת שינוי אקלים על מקורות המים בישראל.

בעבודה הנוכחית בחנו את ההיבטים ההידרולוגיים של העלייה הצפויה במפלס מי ים על מקורות המים באקוויפר החוף. בשלב זה של העבודה השתמשנו בכלי שפותח עוד בשנת 2010 (מודל המאוחד של אקוויפר החוף, גרסה עם פותר SEAWAT המיועד להדמיית תלת-ממדית של זרימת מי תהום רוויים עם צפיפות משתנה) עם התאמות מינימאליות. ברור לנו שמגבלות המודל, שנבנה למטרה אחרת, אינם מאפשרים לתת תשובה כמותית מדויקת לכל השאלות ובמיוחד באזורים הסמוכים לחוף, המושפעים ביותר מעליית מפלס הים. עם זאת מאחר מדובר במודל מכויל ומאומת שנמצא בשימוש כבר הרבה שנים, אנו סבורים שהצלחנו לתאר בצורה מהימנה את התהליכים המתרחשים באקוויפר, להצביע על מגמות כלליות וגם לכמת אותם.

במסגרת עבודה הנוכחית נבחנו שלושה תרחישי עליית מפלס הים, כפי שנקבע ע"י מנהלת ההיערכות לשינויי אקלים של משרד להגנת הסביבה - סיכום מ-18.04.2023 (עליה של 0.57, 0.8 ו-0.91 מ' בשנת 2100 בהתאם לתרחיש). קצב העלייה נלקח מדו"ח המכון לחקר ימים ואגמים (חיא"ל). מספר HO4/4/2023 (טבלה 2.2 בדו"ח הנוכחי). מאחר ואירועי קיצון הם אירועי קצרי טווח ותגובת האקוויפר לשינוי מפלס מתרחשת באיטיות לא התייחסנו לאירועי קיצון.

תוצאות העבודה מצביעות באופן חד משמעי כי עליית מפלס מי הים תגרום לעליית מפלס מי התהום באקוויפר החוף. ככל שמתרחקים מקו החוף שיעור העלייה הולך ופוחת וזמן התגובה הולך ועולה. כך לדוגמא באחד התרחישים במרחק של 5 ק"מ מהחוף עליית המפלס בשנת 2050 צפויה להיות 50% מעליית מפלס הים, ב-2070 כ-62% וב-2100 כ-69%. במרחק של 14 ק"מ אחוז עליה תסתכם ב-8%, 20% ו-30% בהתאמה (איור 3.5).

לעליית מפלס מי הים השלכות משמעותיות על חדירת מי ים לתוך אקוויפר החוף שידרשו עדכון קווי תפעול באקוויפר.

מין הראוי להדגיש כי עליה הצפויה ברום (עומד) מי התהום באקוויפר החוף עלולה לגרום לבעיות הנדסיות רבות. אזורי הסיכון המשמעותיים ביותר הינם בקרבת החוף, באזורים בהם אזור בלתי רווי צר יחסית. במסגרת העבודה הנוכחית לא נכנסנו לניתוח השפעות אלו, אך הן עלולות להיות משמעותיות ביותר. כך לדוגמא עליית המפלס עלולה לגרום להצפת מערכות הניקוז העירונית ולהחמיר מאוד את תדירות ועוצמות ההצפות העירוניות בעתיד. (בהקשר זה אירועי הקיצון רלוונטיים ביותר כיוון שעליית המפלס באפיקים המתנקזים לים, כדוגמת הירקון או האילון, עתידה להיות מהירה ביותר). במקביל, עליית המפלסים עלולה לגרום לפגיעה פיזית במערכות אספקת מים ומערכות הביוב. חדירת מי תהום למערכות הביוב עלולה להוביל בסופו של דבר לקריסת מתקני טיהור שפכים (מט"שים). כך גם הצפת תשתיות חיוניות כגון חשמל ותקשורת עלולה לפגוע בהם. עליית מפלס עלולה לגרום גם לכניסת מי התהום למרתפים של המבנים שנבנו

או תוכננו בצורה לא מתאימה (תופעות שמתרחשות כבר היום). במרתפים/חניונים אטומים העליה בכוח העילוי עלולה לפגוע ביציבות מבנים.

סיכונים אלו נוגעים הן לתשתיות הקיימות והן לתשתיות מתוכננות (כגון המטרו) בהן יש להתחשב במסגרת התכנון העתידי הן מבחינת איטום המערכת והן מבחינת הלחצים הצפויים על המבנים.

כאמור, נושאים אלו לא נכנסו במסגרת העבודה הנוכחית. עם זאת אנו ממליצים למפות את הסכנות האפשריות וכן למפות בתלת ממד את המיקום של התשתיות החיוניות על מנת למנוע פגיעה בתשתיות אלו.

בשלב הבא של העבודה נתמקד בעדכון המודל בהתאם למתווה המוצג בפרק 2.1.3 להלן ונערוך בחינה כמותית מחודשת. במסגרת הבחינה המחודשת ניתן יהיה לתת תחזיות מדויקות יותר של עלית המפלס וחדירת מי הים לאקוויפר, במיוחד לגבי התופעות המתרחשות בקרבת החוף, באזורים בהם השפעת עליית המפלס על תשתיות הינה המשמעותית ביותר.

בברכה,

ד"ר יעקב ליבשיץ

מנהל אגף הידרוגיאולוגיה

רשות המים

1 רקע ומטרה

אחת ההשלכות של ההתחממות הגלובלית היא עלייה במפלס מי הים. מאז תחילת המאה ה-20 מפלס הים נמצא במגמת עלייה מתמדת. בין השנים 1900 עד 2016 עלה גובה פני הים ב-16 עד 21 ס"מ. נתונים מדויקים יותר שנאספו ממדידות של לוויין מראים עלייה מואצת של 7.5 ס"מ בין השנים 1993 ל-2017^[1].

לפי דוחות של המכון לחקר ימים ואגמים לישראל (חיא"ל) הים התיכון מראה שונות גדולה ביחס למגמות עליית מפלס הים הגלובלי. כך, לאורך תקופה מ-1992 ועד היום נמדדה בתחנת חדרה עלייה ממוצעת של 4.6 מ"מ בשנה, נתון הגבוה מקצב עליית מפלס הים הגלובלי לתקופה זו (כ- 3.2 מ"מ בשנה)^[2]^[3]. עליית מפלס הים התיכון בישראל עלולה לגרום נסיגה בקו החוף ופגיעה בחופים ובמבנים בקרבת החוף.

מבחינה הידרולוגית, הים התיכון הינו בסיס הניקוז של אקוויפר החוף. לכן לשינויים בגובה פני הים ישנה השפעה ישירה על משטר הזרימה באקוויפר, על מפלסי מי התהום ועל תנועת הפן הביני. החשש הוא שעליה כזו תגביר את חדירת הפן הביני והמלחת אקוויפר החוף ועקב כך תוביל להקטנת כמות המים שעומדת לרשות משק המים בישראל.

לכל השינויים במצב האקוויפר יש השפעה ישירה על אופן תפעול האקוויפר ועל מתקנים הנדסיים תת קרקעים הן הקיימים והן המתוכננים.

לאור זאת, השירות ההידרולוגי יזם פרויקט **במטרה לחזות את תגובת האקוויפר לשינויים האלו**.

2 גישת העבודה

העבודה הנוכחית היא בחינה ראשונית של השפעת עליית מפלס הים התיכון על מצב אקוויפר החוף בישראל תוך התייחסות להיבטים הידרוגיאולוגיים בלבד, כגון השפעה על מפלסי מי התהום, תנועת פן הביני ושינויים באוגר.

לצורך העבודה נעשה שימוש בכלי קיים - **המודל המאוחד של אקוויפר החוף גרסה עם פותר SEAWAT**. תוכנת SEAWAT היא הגרסה המשולבת של MODFLOW ו-MT3DMS המיועדת להדמיית תלת-ממדית של זרימת מי תהום רוויים עם צפיפות משתנה המאפשרת סימולציה של תנועת הפן הביני. המודל המאוחד פותח ע"י תהל עבור השירות ההידרולוגי בשנת 2013^[5]. במרוצת השנים המודל עבר מספר עדכונים ומשמש את השירות כמודל תפעולי לאקוויפר החוף.

2.1 מגבלות המודל

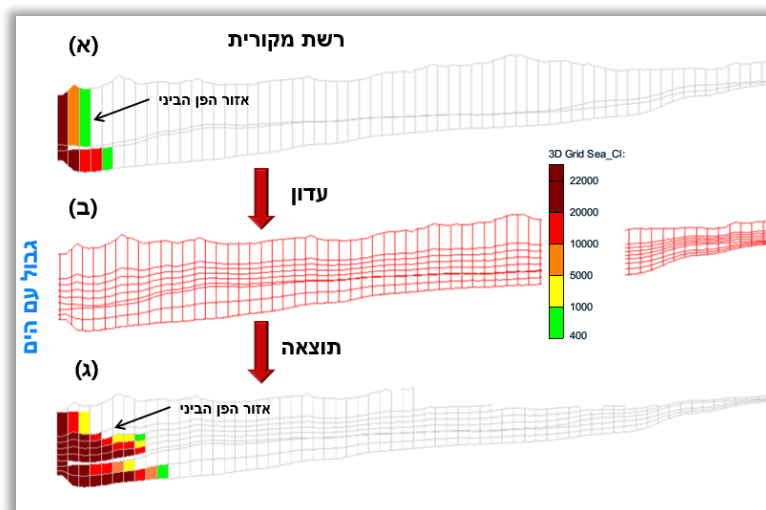
2.1.1 המבנה האנכי

המודל המאוחד המקורי מחולק ל-4 שכבות, כאשר שכבה 1 (העליונה) מייצגת את תת-אקוויפרים AB, שכבה 3 מייצגת את תת-אקוויפרים CD, שכבה 2 מייצגת את שכבת החרסית החוצצת ושכבה 4 מיועדת להגדרת תנאי גבול בתחתית האקוויפר, כפי שמופיע באיור 2.1 (א).

חלוקה אנכית כזו עונה על הצרכים הכלליים של ניהול אקוויפר החוף, אך במקרה של הדמיה של תנועת הפן הביני החלוקה ל-4 שכבות המודל אינה מסוגלת להציג את צורת החזית של פן הביני.

מהסיבות הנ"ל **כבר בשלב זה בוצע עדון אנכי של רשת המודל**, כאשר שכבה 1 חולקה ל-5 שכבות ושכבה 3 חולקה ל-2 שכבות. איור 2.1 (ב) מציג את הרשת המעודנת ואיור 2.1 (ג) מראה את השיפור בהצגת צורת הפן הביני.

איור 2.1: עדון אנכי של רשת המודל



2.1.2 הגדרת הגבול עם הים

במודל המאוחד המקורי, הגבול המערבי עובר לאורך קו החוף (איור 2.2) כך שהתאים המערביים ביותר של המודל מכסים את המרחק של 250 מטר מזרחית לקו החוף **באזור המעבר** בו המים השפירים מתנקזים לים מעל גוף המים המלוחים. בתאים אלו מוגדר תנאי גבול מסוג ראשון **וערכי העומד המוגדר כוילו בתנאי שגובה פני הים קבוע ואינו משתנה** (Specified Head - CHB) לאורך זמן.

איור 2.2: הגבול המערבי במודל המאוחד המקורי



במסגרת עבודה נוכחית המבנה של הגבול המערבי עם הים נשמר ללא שינוי. תנאי הגבול של עומד קבוע שווה לתנאי הגבול של עומד משתנה בזמן (Transient Specified Head - THB) ולצורך הבדיקה הראשונית הונח שהעומד הדינמי בתאי הגבול שווה למפלס הים.

יבהר שהתגלה כי המבנה הקיים של הגבול המערבי אינו מאפשר לקחת בחשבון **שינויים בעומד מי התהום באזור המעבר** הנובעים מאינטראקציה בין שני גופי מים דינמיים ובעלי צפיפות שונה.

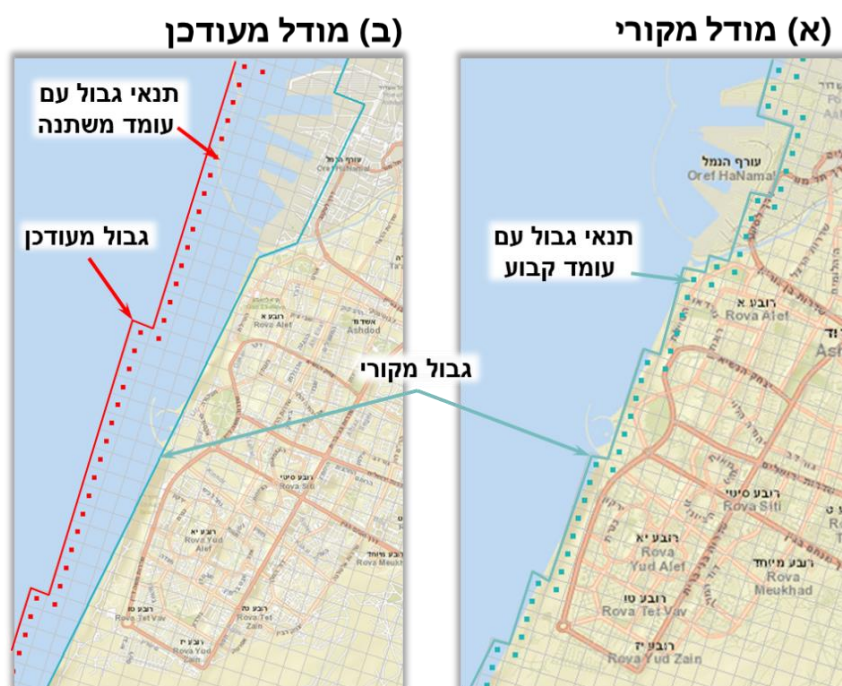
ברור שהנחה זו אינה מאפשרת קבלת תוצאה כמותית מדויקת, אך היא מאפשרת לחקור את תגובת האקוויפר לעליית פני הים ברמת דיוק סבירה, הגדרת גורמי השפעה מרכזיים ומציאת דרכים לשיפור המודל לשימושים עתידיים.

2.1.3 המלצות לשיפור המודל

כפי שצוין בפרק הקודם, כדי לדמות את עליית פני הים, יש לשנות את תנאי הגבול של עומד קבוע לתנאי הגבול של עומד משתנה בזמן בהתאם לשינוי מפלס פני הים (תנאי גבול דינמי). ואז נשאלת השאלה - מה יהיה העומד המשתנה בתאי הגבול שאינם ממוקמים בתוך הים, אלא באזור המעבר, שבו מתקיימת זרימת מי התהום מעבר לגוף של מי הים? השאלה אינה טריוויאלית כי אין קשר ליניארי בין שינוי בגובה פני הים לשינוי בגובה מי האקוויפר באזור המעבר.

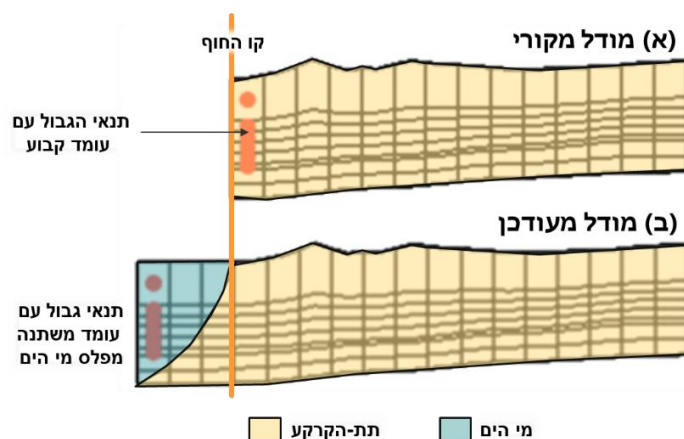
כדי למנוע אי וודאות בהגדרת תנאי גבול עם הים, נדרש להזיז את הגבול המערבי לתוך הים למרחק 500-1,000 מ' מקו החוף כפי שמוצג איור 2.3 (ב) במטרה למזער את השפעת האזור המעבר על קביעת תנאי הגבול. במקרה זה העומד יהיה זהה למפלס הים.

איור 2.3: עדכון גבול המודל עם הים



בנוסף, בכל התאים הממוקמים ממערב לקו החוף נדרש להגדיר את קו הגבול האנכי בין תת הקרקע למי הים הפתוחים כפי שמוצג באיור 2.4 (ב). ניתן לבצע את ההפרדה באמצעות קביעת פרמטרים הידרולוגיים מיוחדים לאזור מי הים הפתוחים (לדוגמה, $K_{sea}=999$ $S_{sea}=0.99$).

איור 2.4: הפרדה בין תת-הקרקע ואזור מי הים הפתוחים



2.2 תרחישים לבדיקה

קביעת התרחישים התבססה על הנחיות של מנהל ההיערכות לשינויי אקלים של משרד להגנת הסביבה (סיכום מ-18.04.2023)^[3]. טבלה 2.1 מציגה את שלושת תרחישי הייחוס שהומלצו לבדיקה.

טבלה 2.1: תרחישי הייחוס הרלוונטיים (קו הייחוס נמצא כ- 14.9 ס"מ מעל אפס האיזון הארצי)

שם תרחיש	גובה ממוצע (שנת 2100)	אירועי קיצון לפי תדירות 1:100 (שנת 2100)
50% 4.5 medium	0.57 מ'	1.37 מ'
50% 8.5 medium	0.8 מ'	1.6 מ'
50% 4.5 low	0.91 מ'	1.71 מ'

עבור כל תרחיש התייחסות לשני קווי גובה:

גובה ממוצע - מעל קו הייחוס הממוצע (14.9 ס"מ מעל אפס האיזון הארצי) ואינו כולל גאות ועונתיות.

אירועי קיצון – מייצג את קו הגובה המקסימלי אליו עלולים להגיע לפי תדירות של 1:100 תוך התייחסות לעונתיות, גאות, היערמות מפלס בסערות.

מאחר שמטרת העבודה היא לחזות את תגובת האקוויפר לשינויים מתמשכים בגובה פני הים, אירועי הקיצון אינם רלוונטיים לבדיקה מכיוון שהאקוויפר אינו מספיק להגיב לאירועים קצרי טווח.

התחזיות של עליית פני הים הממוצעת מוצגות בדו"ח חיא"ל^[2] לשלוש נקודות זמן (2050, 2070 ו-2100). בין נקודות הזמן לעיל השינוי בגובה פני הים הוגדר כלינארי. טבלה 2.1 מסכמת נתונים עבור שלושה תרחישים מומלצים בתוספת תרחיש "עסקים כרגיל" שבו אין שינויים בגובה פני הים אשר ישמש כבסיס להשוואה.

טבלה 2.2: פירוט נתוני התרחישים

תרחישים		עליית מפלס הים [m]			רום מפלס הים [m.a.s.l.] (*)		
		2050	2070	2100	2050	2070	2100
Sc0	"עסקים כרגיל"	0.000	0.000	0.000	0.149	0.149	0.149
Sc1	medium 4.5 50%	0.230	0.360	0.570	0.379	0.509	0.719
Sc2	medium 8.5 50%	0.270	0.440	0.800	0.419	0.589	0.949
Sc3	low 8.5 50%	0.270	0.460	0.910	0.419	0.609	1.059

(*) - קו הייחוס נמצא כ- 14.9 ס"מ מעל אפס האיזון הארצי

2.3 תקופת הרצות ונתונים דינמיים

התרחישים הורצו לתקופת של 81 שנים (1/1/2020-1/1/2101). הנתונים הדינמיים (הפקות, מילוי חוזר וכנ"ל) זהים לכל התרחישים ונקבעו על בסיס תקופה של 10 שנים (2008-2017) והוכפלו לאורך תקופת ההרצה. שינויים של מפלס הים הוגדרו כתנאי גבול דינמי עם הים.

3 ניתוח תוצאות הרצת תרחישים

ניתוח תוצאות הרצת התרחישים מתמקד בשלושה נושאים העקרים:

1. השפעת עליית גובה פני הים על מצב המפלסים ומשטר זרימה באקוויפר החוף.
2. השפעה על תנועת פן הביני.
3. שינויים באוגר התפעולי של אקוויפר החוף

3.1 השפעה של עליית גובה פני הים על מצב המפלסים ומשטר הזרימה באקוויפר החוף

תגובת האקוויפר לעליית פני הים נותחה עבור כל תרחיש בנפרד והוגדרה כשינויים במפלסי מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". תוצאות הניתוח מוצגות בצורת הפרשי מפלסים המחושבים כמפלס בתרחיש "עליית מפלס הים" מינוס מפלס בתרחיש "עסקים כרגיל" זה נעשה עבור כל תא מודל ובכל נקודת הזמן.

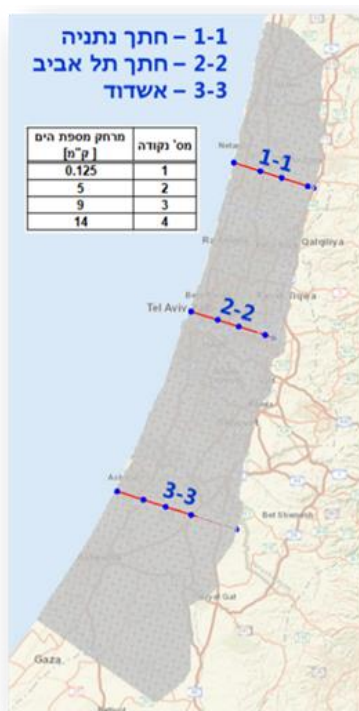
שינויים במצב מפלסי מי התהום נבחנו בשתי רמות: נקודתית ומרחבית.

3.1.1 ניתוח נקודתי

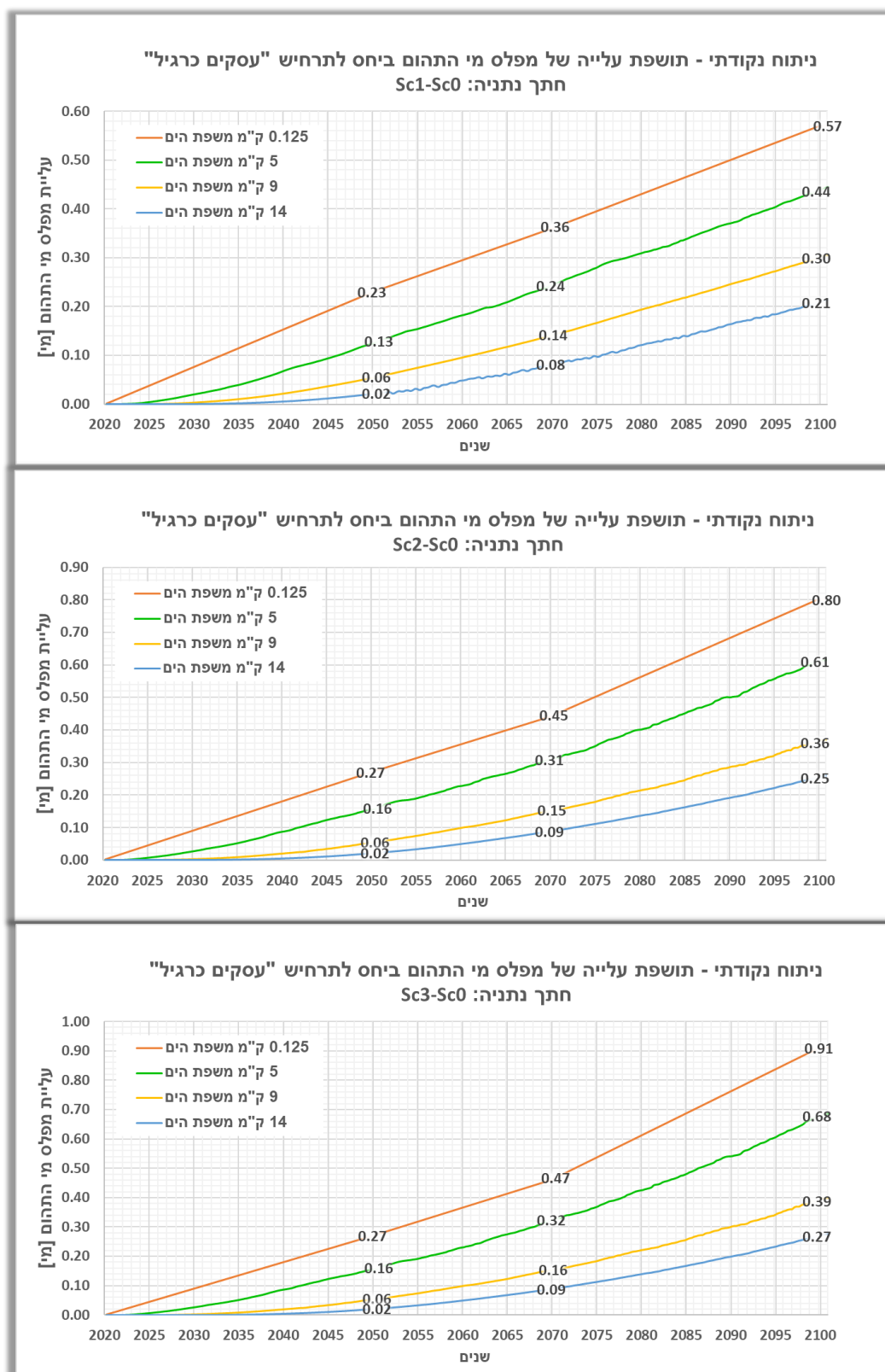
בוצע ניתוח נקודתי לשלושה חתכים המוצגים באיור 3.1, המייצגים את אזור הצפון (חתך נתניה), אזור המרכז (חתך תל אביב) והאזור הדרומי (חתך אשדוד) של אקוויפר החוף. בכל חתך נקבעו 4 נקודות במרחקים 0.125, 0.5, 9, ו-14 קילומטרים מחוף הים ונקודות האלו נבדקו מגמות הפרשי מפלסים הנובעות מעליית פני הים. מטרת הבדיקה היא לברר מהי תגובת האקוויפר האזורית לשינוי בגובה פני הים מבחינת עוצמת התגובה, זמני השהיה ומרחקי השפעה.

תוצאות הניתוח המוצגות באיורים 3.2 - 3.4 מייצגות תהליך התפתחות של תוספת עליית מפלס מי התהום. כל איור מתייחס לחתך ספציפי ומציג תוצאות עבור שלושה תרחישים של עליית מפלס הים.

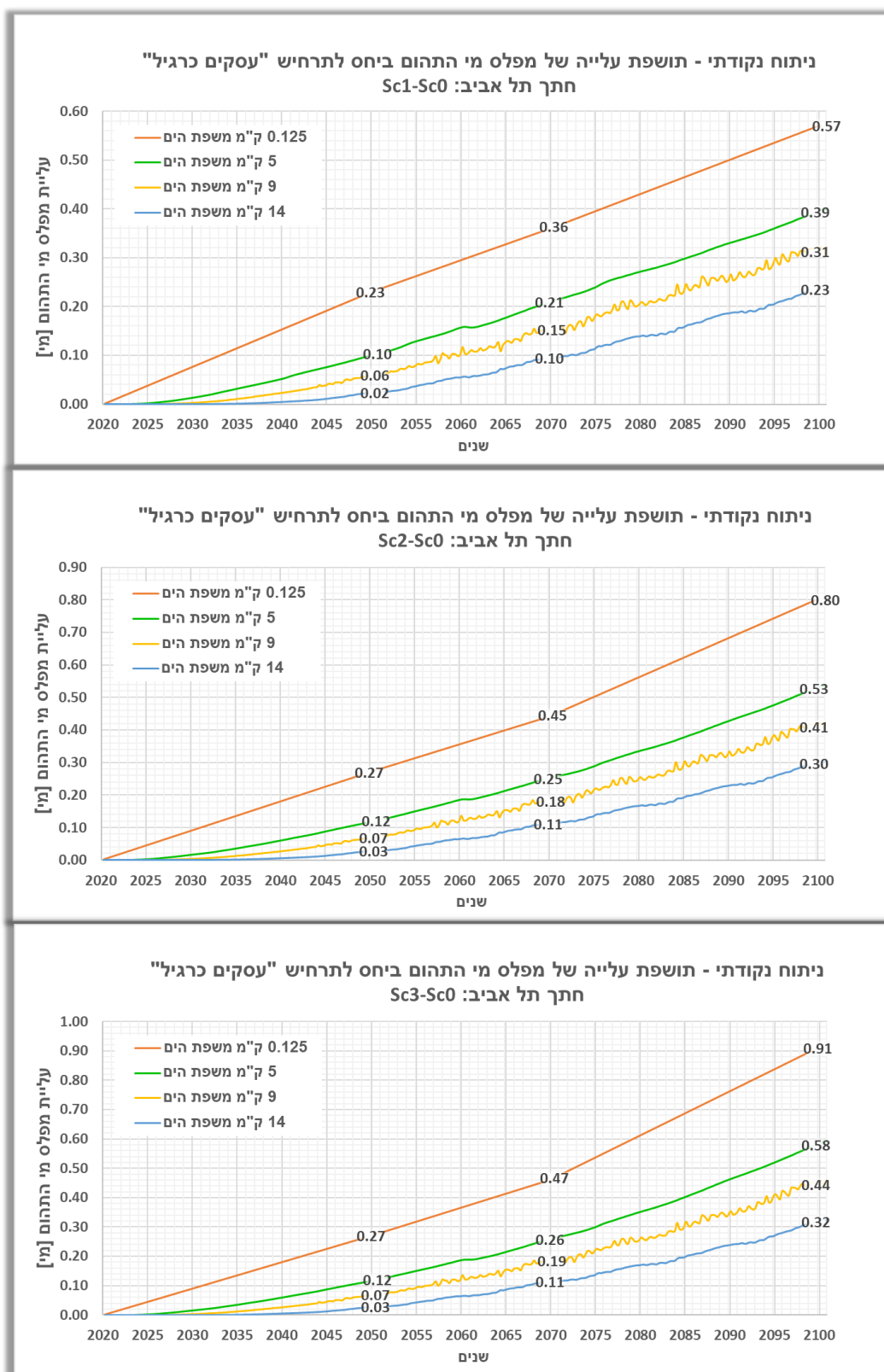
איור 3.1: בחירת חתכים ונקודות לניתוח



**איור 3.2: ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל"
חתך נתניה (1-1)**

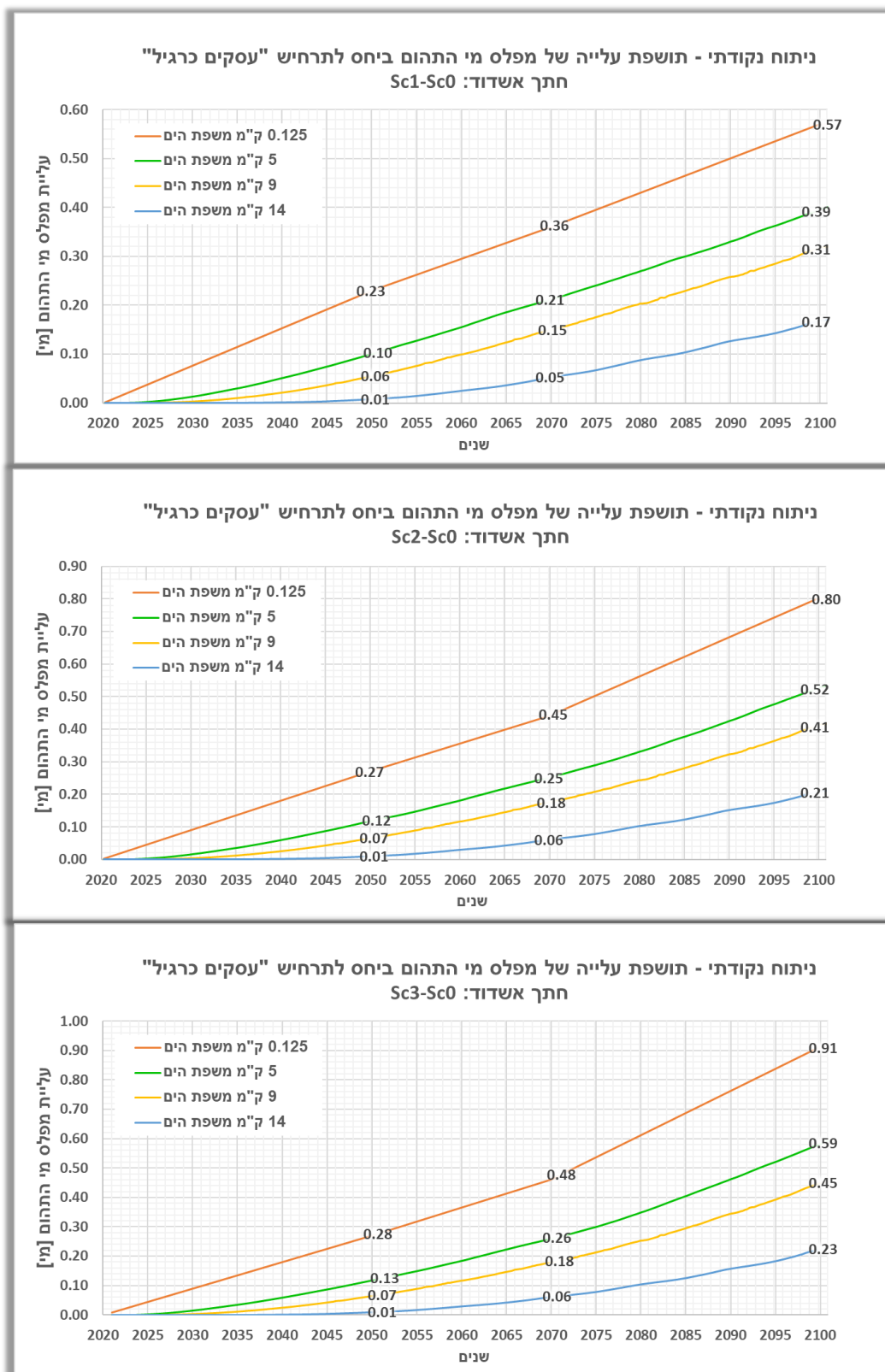


**איור 3.3: ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל"
חתך תל אביב (2-2)**



איור 3.4: ניתוח נקודתי - תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל"

חתך אשדוד (3-3)



סיכום תוצאות הניתוח הנקודתי

תגובות האקוויפר לשינוי בגובה פני הים, המוצגות באיורים 3.2 - 3.4, נותחו לפי שלושה מדדים: עוצמת התגובה, זמני השהית התגובה ומרחקי השפעה. להלן סיכום התוצאות:

1. **עוצמת תגובה** מוגדרת כיחס בין עליית פני הים לבין שינוי במצב מפלסי מי התהום בנקודות שונות של האקוויפר. לצורך הערכה כמותית של עוצמת התגובה הוגדר מדד עוצמת התגובה (STR) **כיחס באחוזים** בין עלייה כוללת של פני הים לבין תוספת עליית מפלס האקוויפר בנקודה ספציפית במרחב ובאותה נקודת הזמן.

טבלה 3.1 מסכמת את עוצמות תגובת האקוויפר לעליית פני הים עבור שלושה חתכים ובשלושה מרחקים מחוף הים בכל חתך (איור 3.1). התוצאות מוצגות לשלוש נקודות זמן (2050, 2070 ו-2100).

לדוגמה: בתרחיש 2 בשנת 2070 עליית פני הים הצפויה היא 0.589 מ'. בחתך נתניה, בשנת 2070 ובמרחק 5 ק"מ מחוף הים $STR=71\%$, לכן תוספת הצפויה של עליית מי התהום היא $0.42=0.71 \cdot 0.589$ מ'.

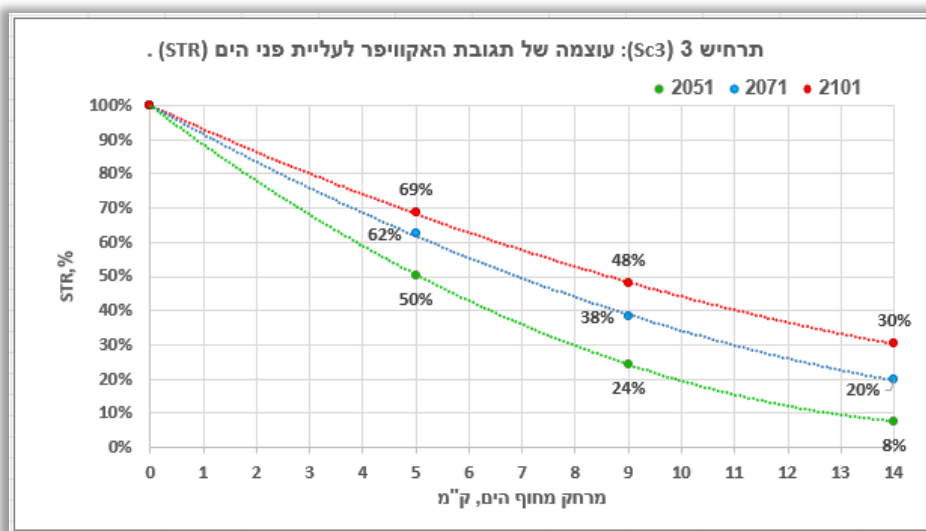
טבלה 3.1: סיכום עוצמות תגובת האקוויפר לעליית פני הים (STR) בשלושה חתכים כפונקציה של זמן ומרחק מחוף הים

חתך נתניה									
נקודת זמן, שנים	Sc1			Sc2			Sc3		
	מרחק מחוף הים בקילומטרים								
	5	9	14	5	9	14	5	9	14
2050	57%	25%	10%	60%	21%	8%	60%	21%	8%
2070	69%	40%	24%	71%	35%	21%	72%	35%	20%
2100	78%	54%	38%	77%	46%	32%	75%	44%	30%
חתך תל אביב									
נקודת זמן, שנים	Sc1			Sc2			Sc3		
	מרחק מחוף הים בקילומטרים								
	5	9	14	5	9	14	5	9	14
2050	45%	27%	11%	45%	27%	10%	45%	27%	10%
2070	60%	42%	27%	59%	41%	26%	58%	40%	25%
2100	70%	56%	42%	67%	53%	38%	65%	50%	36%
חתך אשדוד									
נקודת זמן, שנים	Sc1			Sc2			Sc3		
	מרחק מחוף הים בקילומטרים								
	5	9	14	5	9	14	5	9	14
2050	46%	25%	4%	46%	25%	4%	46%	25%	4%
2070	60%	43%	15%	59%	41%	15%	58%	40%	14%
2100	70%	56%	30%	67%	52%	26%	65%	50%	25%

איור 3.5 מציג את מגמות עוצמת התגובה כפונקציה של מרחק מהחוף בתרחיש 3 לשלוש נקודות זמן - 2050, 2070 ו-2100. תרחיש 3 נבחר כתרחיש הקיצוני ביותר ועוצמת התגובה מוצגת על ידי מדד STR המחושב כממוצע בין תוצאות של שלושת החתכים (איור 3.1). מהגרפים מתקבל שבתחילת עליית פני הים עוצמת התגובה המרבית היא באזור הסמוך לחוף הים ועם הזמן קצב התגובה פוחת באזור המערבי ועובר מאזור המערב לכיוון הגבול

המזרחי. זה מאפיין את תהליך האיזון של האקוויפר בהשפעה מתמשכת של הגבול הדינמי עם הים.

איור 3.5: תרחיש 3 (Sc3) - עוצמה של תגובת האקוויפר לעליית פני הים (STR)



2. **זמני תגובה:** זמן ההשהיה של תגובת האקוויפר לעליית פני הים מוגדר כמרווח בין תחילת עליית פני הים לבין הגעת השינוי במפלס מי התהום ל-1 ס"מ. טבלה 3.2 מסכמת את זמני ההשהיה המחושבים בשלושה חתכים (איור 3.1) ובשלושה מרחקים מחוף הים. באופן עקרוני, אין הבדלים דרמטיים בין התוצאות. כך, באזור החוף (מרחק של 5 ק"מ מחוף הים) זמן ההשהיה של תגובת האקוויפר הוא 6-9 שנים ובאזור המרכז (מרחק של 9 ק"מ מחוף הים) זמן ההשהיה של תגובת האקוויפר הוא 14-15.5 שנים. גם באזור המזרחי (מרחק של 14 ק"מ מחוף הים) חתכי תל אביב ונתניה התקבלו תוצאות דומות של 23.5-24.5 שנים של ההשהיה. ורק באזור המזרחי של חתך אשדוד התקבל זמן ההשהיה ארוך יותר של 30.3-32 שנים, וזה בשל גודל השטח ומרחק גדול יותר לגבול המזרחי של האקוויפר.

טבלה 3.2: זמני ההשהיה (בשנים) של תגובת האקוויפר לעליית פני הים, ב-3 מרחקים מחוף הים.

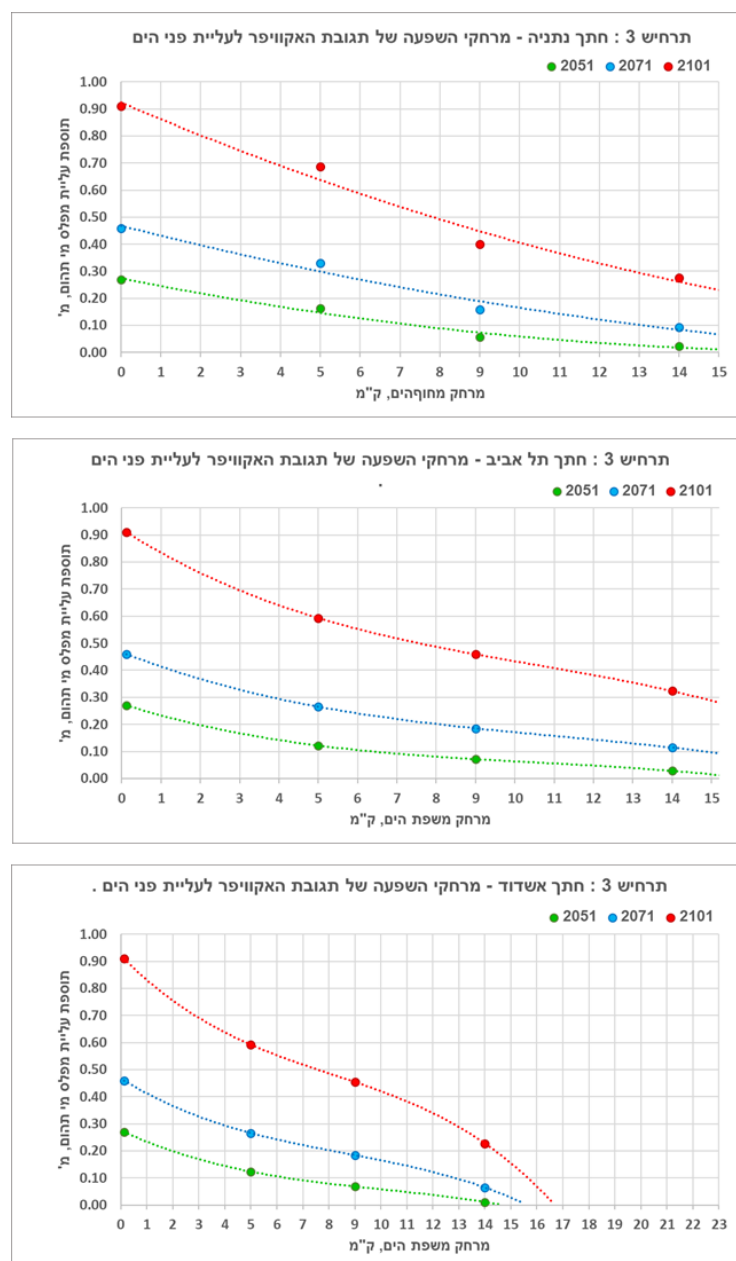
מרחק מחוף הים, ק"מ	חתך נתניה			חתך תל אביב			חתך אשדוד		
	Sc1	Sc2	Sc3	Sc1	Sc2	Sc3	Sc1	Sc2	Sc3
5	7.0	6.0	6.0	9.0	8.3	8.3	8.8	8.3	8.3
9	14.8	15.5	15.5	14.8	14.0	14.0	14.8	14.0	14.0
14	23.8	24.3	24.3	24.5	23.5	23.5	32.0	30.3	30.3

3. **מרחקי השפעה:** אחד משאלות שעולות בהקשר לעליית מפלס הים היא "מה מרחק השפעה של עליית פני הים?". איור 3.6 מציג את התפשטות תוספת עליית מפלס מי התהום לאורך שלושה חתכים (איור 3.1) ובשלוש נקודות זמן - 2050, 2070 ו-2100. התוצאות מוצגות עבור תרחיש 3 שנבחר כתרחיש הקיצוני ביותר.

הניתוח מעלה את התוצאות הבאות :

- ✓ לאחר 80 שנה של עליית פני הים, אזור ההשפעה מגיע עד כ-17 ק"מ מהחוף.
- ✓ באזורים של נתניה ותל אביב אקוויפר החוף הינו צר יחסית (מרחק מהחוף ועד גבולות שכבת הכורכר הוא כ-14-15 ק"מ), לכן כבר בשנת ה-2050 ההשפעה של עליית מפלס הים מגיעה עד לגבולו המזרחי של האקוויפר.
- ✓ באזור אשדוד אקוויפר החוף הדרומי הוא גדול ורחב (המרחק מהחוף ועד גבולות הכורכר הוא כ-23-28 ק"מ) לכן בשנת ה-2100 ההשפעה של עליית מפלס הים מגיעה למרחק כ-14 ק"מ מקו החוף.

איור 3.6: מרחקי השפעה של תגובת האקוויפר לעליית פני הים



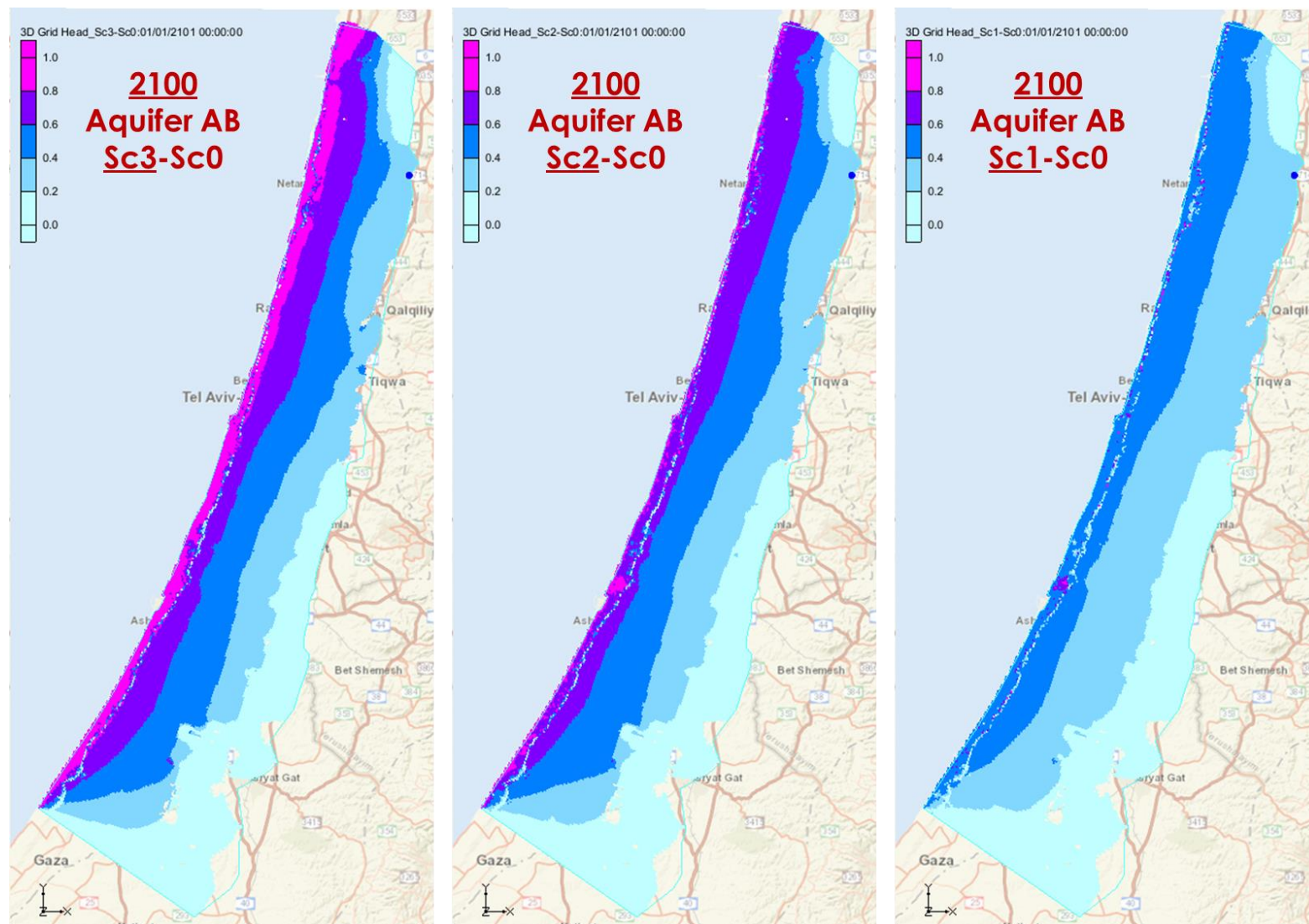
3.1.2 ניתוח מרחבי

במסגרת הניתוח המרחבי, נבנו מפות הפרשי מפלסי מי התהום עבור כל שטח אקוויפר החוף. ההפרשים חושבו כמפלסי מי התהום שהתקבלו בכל תרחיש עליית פני הים בניכוי מפלס מי התהום שהתקבל בתרחיש "עסקים כרגיל". הפרשים אלו מייצגים את התוספת עלייה במפלס מי התהום הנובעת מעליית פני הים.

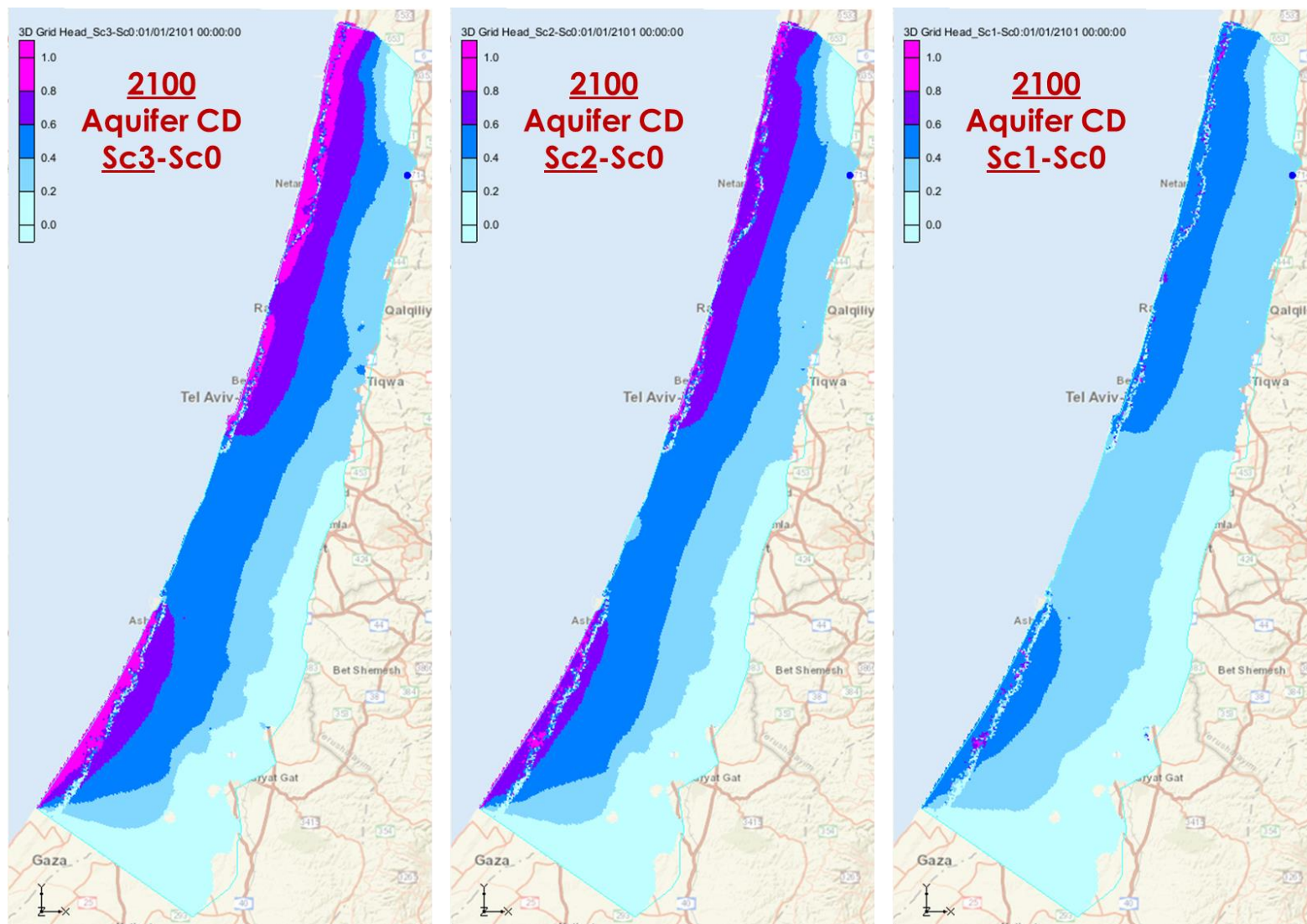
איורים 3.7 ו-3.8 מציגים מפות הפרשים של מפלסי מי התהום עבור שלושה תרחישי עליית פני הים, כאשר איור 3.7 מתייחס לתת-אקוויפר AB בסוף שנת 2100 ואיור 3.8 מתייחס לתת-אקוויפר CD בסוף שנת 2100.

תוצאות הניתוח המרחבי תואמות את תוצאות הניתוח הנקודתי ומראות שעלייה הדרגתית בגובה פני הים גורמת לעלייה הדרגתית של מפלס מי התהום באקוויפר החוף, כאשר העלייה המרבית מתקבלת במישור החוף המערבי ליד הים. כמו כן ניתן לראות כי השפעת עליית פני הים פוחתת מזרחה.

איור 3.7: מיפוי תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". תת אקוויפר AB, סוף 2100.



איור 3.8: מיפוי תוספת עלייה של מפלס מי התהום ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". תת אקוויפר CD, סוף 2100.



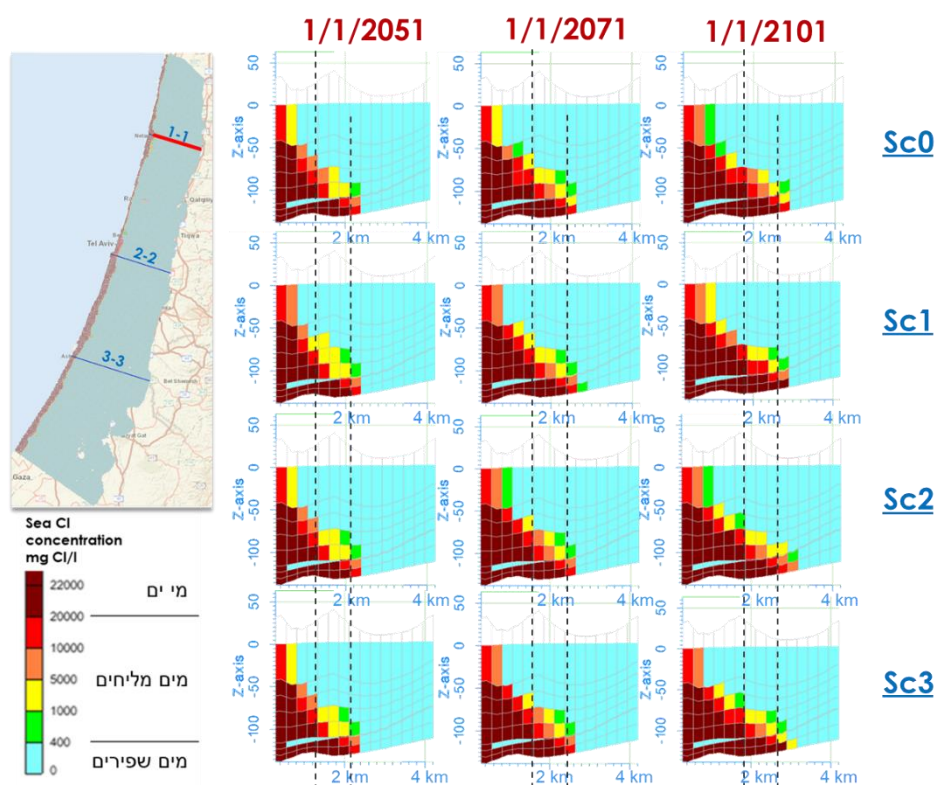
3.2 תנועת הפן הביני

נושא נוסף בעל השלכות משמעותיות על משק המים הוא השפעת עליית פני הים הוא חדירת מי הים לאקוויפר החוף (תנועת הפן הביני) וכתוצאה מכך המלחת האזור המערבי של אקוויפר החוף והקטנת האוגר התפעולי.

במסגרת העבודה וכחלק מהרצת התרחישים בוצעה סימולציה של תנועת הפן הביני. תוצאות הסימולציה מוצגות באיורים 3.9 - 3.11. כל איור מציג תוצאות עבור חתך הספציפי, כאשר החתכים "1-1" ו-"3-3" תואמים את החתכים באיור 3.1, וחתך "2-2" הוזה 2 ק"מ דרומה לאזור חולון-בת ים, בו יש כניסה מאסיבית של מי הים. בכל איור, החלק המערבי של החתך מוצג עם מיפוי של פרופילי הכלורידים האנכיים בצורת מטריצה, כאשר כל שורה מציגה את התרחיש והעמודות מציגות את נקודות הזמן. הצבעים מתייחסים לריכוזי כלורידים, כאשר צבע תכלת מייצג את המים השפירים ($\text{mg Cl/l} > 400$), צבע אדום כהה – מי הים ($\text{mg Cl/l} < 20,000$) ויתר הצבעים מייצגים את אזור המעבר. בכל עמודה יש שני קווים מקווקוים המסמנים את מיקום חזית הפן הביני בתרחיש "עסקים כרגיל" (הקו השמאלי משויך לתת-אקוויפר AB והימני - לתת-אקוויפר CD). הקווים משמשים כקווי ייחוס לזיהוי שינויים ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל".

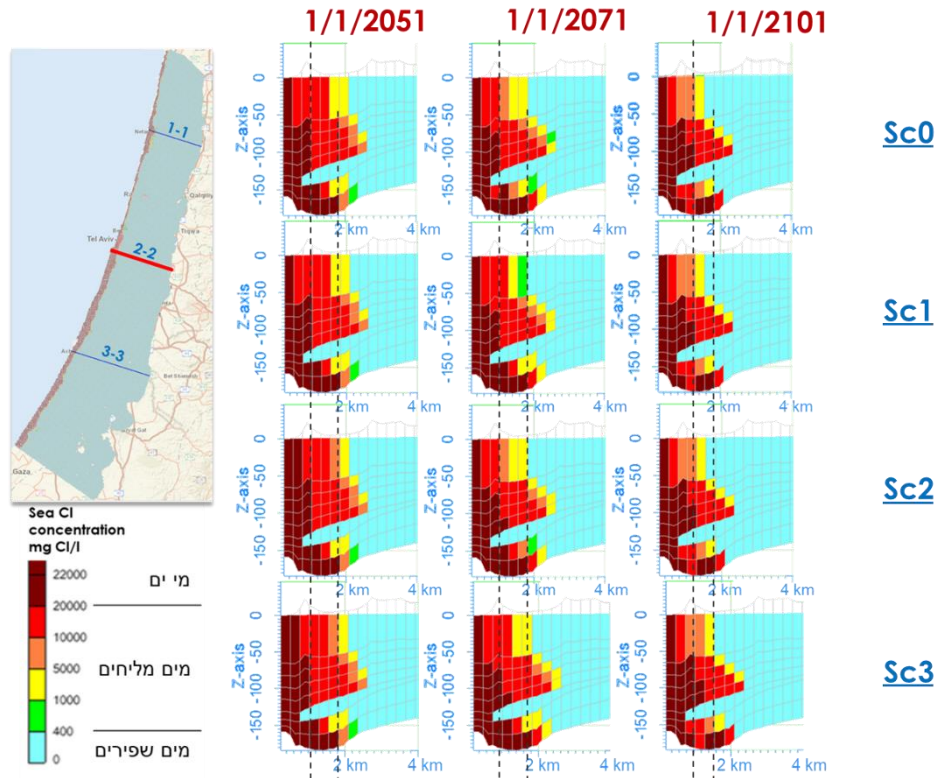
איור 3.9: מיקום פן הביני: חתך 1-1 – אזור נתניה

חתך 1-1 – אזור נתניה



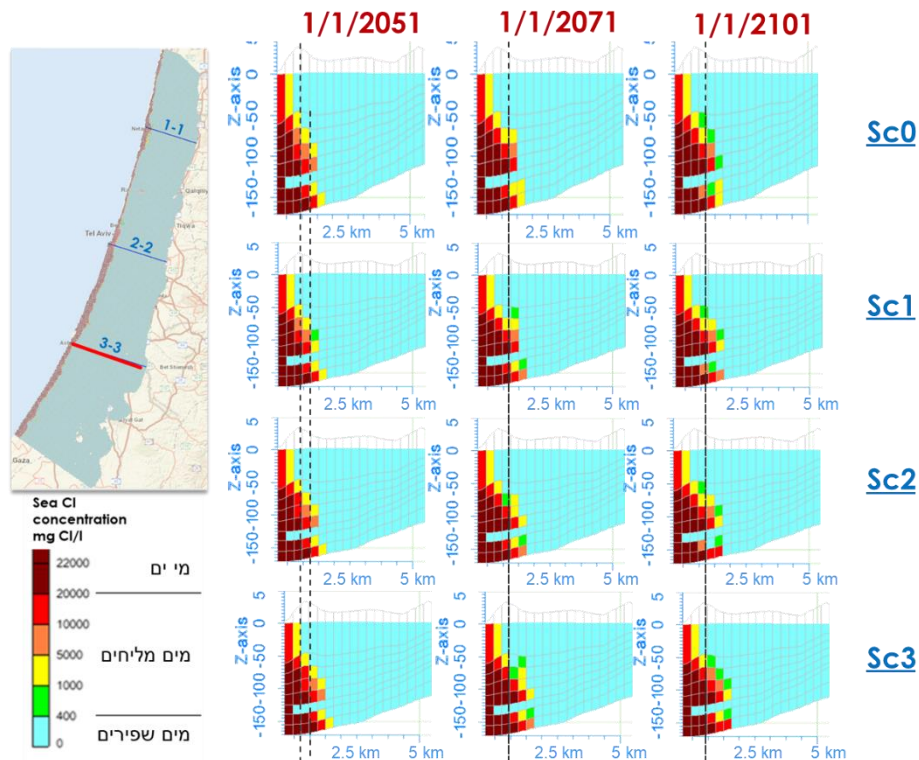
איור 3.10: מיקום פנ הביני: חתך 2-2 – אזור חולון-בת ים

חתך 2-2 – אזור חולון-בת ים



איור 3.11: מיקום פנ הביני: חתך 3-3 – אזור אשדוד

חתך 3-3 – אזור אשדוד



ניתוח של הפרופילים מעלה את הנקודות הבאות:

- ✓ בחתך 1-1 – אזור נתניה: ישנם שינויים קלים בריכוזי הכלורידים באזור המעבר. בתת-אקוויפר AB אין תוספת התקדמות של פן הביני ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל" ובתת-אקוויפר CD נצפתה תוספת התקדמות של כ-250 מ' בשנת 2100 בתרחישים 1 ו-3 בלבד.
- ✓ בחתך 2-2 – אזור חולון-בת ים: בתת-אקוויפר AB אין שינויים בריכוזי הכלורידים באזור המעבר ואין תוספת התקדמות של פן הביני ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל". בתת-אקוויפר CD נצפתה תוספת התקדמות של כ-250 מ' בשנת 2100 בתרחיש 3 בלבד.
- ✓ בחתך 3-3 – אזור אשדוד: ישנם שינויים קלים בריכוזי כלורידים באזור המעבר. בשני תתי-האקוויפר AB ו-CD הייתה תוספת התקדמות של כ-250 מ' משנת 2050 בתרחיש 3 בלבד.

על בסיס הניתוח מתקבל כי לעליית פני הים השפעה יחסית קטנה על **תנועת הפן הביני**. זאת כיוון שעלייה זו הדרגתית ולכן האקוויפר מסוגל להגיב ולאזן את העומד כך שלא נוצר כוח נוסף שמניע את פן הביני.

יחד עם זאת, באזור חזית הפן הביני מתמשכים תהליכי המלחה הנובעים הן מתהליכי ערבוב באזור המעבר והן מכניסת מי הים. מהניתוח עולה כי כ-65% מתהליכי ההמלחה מצטברים באזור המעבר/אזור המים המליחים ושאר ההמלחה (כ-35%) עקב כניסת הפן הביני. ביחס לתרחיש "עסקים כרגיל" מתקבלת תוספת המים המליחים בשיור של כ- $6 \div 4$ מלמ"ק בשנה ותוספת המים המלוחים/מי הים מגיעה לכ- $2 \div 4$ מלמ"ק בשנה (הערך הנמוך מתקבל בתרחיש 1 והגבוהה – בתרחיש 3).

אמנם שינויים בנפחי המים המליחים והמים המלוחים/מי הים מהווים אחוז קטן מההמלחה המתקבלת בתרחיש "עסקים כרגיל" (כ- $0.02 \div 0.03\%$ בשנה - תוספת של מים מליחים וכ- $0.05-0.08\%$ בשנה- תוספת של מים מלוחים/מי הים) הם מצביעים על קיומם של תהליכי המלחה כתוצאה ישירה מעליית פני הים ונוכחות **שיווי משקל דינאמי** בין ים למי התהום.

כידוע, הגורם העיקרי לתנועת פן הביני והמלחה באזור החופי הוא ההפקה בקידוחים. עד היום, שיורי ההפקה באקוויפר החוף מוגדרים לפי הקווים התפעוליים שנקבעו על בסיס תנאי **שיווי משקל סטטי** בין הים למי התהום. העלייה ההדרגתית של פני הים משנה את תנאי הגבול עם הים לכן נדרש עדכן קווי התפעול בהתאם. אחרת, חדירת מי הים תהיה הרבה יותר משמעותית מהמוערך במסגרת עבודה זו.

- ✓ במסגרת העבודה בוצעה **בחינה ראשונית** של השפעת עליית מפלס הים התיכון על מצב אקוויפר החוף בישראל תוך **התייחסות להיבטים הידרוגיאולוגיים בלבד** כגון **השפעה על מפלסי מי התהום, תנועת פן הביני ושינויים באוגר**.
- ✓ לצורך העבודה נעשה שימוש בכלי הקיים באגף הידרוגיאולוגיה (המודל המאוחד של אקוויפר החוף), גרסה עם פותר SEAWAT המיועד להדמיית תלת-ממדית של זרימת מי תהום רוויים עם צפיפות משתנה. תוך התאמתו לצורכי העבודה הנוכחית. עם זאת הכלי הקיים לבנה למטרה אחרת ולא מתאים באופן מלא למטרות העבודה הנוכחית. בהתאם לכך, למרות שהשימוש בכלי הקיים מאפשר לבצע הערכה ראשונית, על מנת לקבל הערכות המדויקות, יש לשדרגו.
- ✓ רשת המודל המאוחד המקורי מחולקת לארבע שכבות ועונה על הצרכים הכלליים של ניהול אקוויפר החוף, אך במקרה של הדמיית תנועת הפן הביני החלוקה ל-4 שכבות המודל אינה מסוגלת להציג את צורת החזית של הפן הביני. מסיבות הנ"ל **בוצע עידון אנכי של רשת המודל עד ל-9 שכבות**.
- ✓ במודל המאוחד הגבול המערבי תואם את קו החוף, והתאים המערביים ביותר של המודל מכסים את המרחק של 250 מטר מזרחית לקו החוף. מבנה זה מתאים למקרה של גבול בעל עומד קבוע (פני הים סטטיים). **בשלב הבדיקה הראשונית, המבנה המרחבי של המודל המאוחד המקורי נשמר ללא שינוי**. הרצות תרחישים של עליית מפלס הים העלו כי המבנה הקיים של הגבול המערבי אינו מאפשר לקחת בחשבון את **שינויי העומד באזור המעבר**, שבו מתנקזים המים המתוקים לים מעל גוף המים המלוחים. מתוכנן שהנושא יטופל בשלב הבא של העבודה (ראה פרק 2.1.2 העבודה לעיל).
- ✓ ניתוח תוצאות הרצת התרחישים מתייחס לשני נושאים: השפעה של עליית גובה פני הים על מצב מפלסים באקוויפר החוף ועל תנועת הפן הביני. להלן סיכום ממצאי הניתוח לפי שני הנושאים:
 - העלייה הדרגתית של פני הים גורמת לעלייה הדרגתית של מפלס מי התהום באקוויפר החוף, כאשר העלייה המרבית מתקבלת במישור החוף המערבי הסמוך לקו הים והשפעת עליית פני הים פוחתת מזרחה. תגובות האקוויפר לשינוי בגובה פני הים נותחו לפי שלושה מדדים:
 - א. **עוצמת תגובה (STR)** - יחס באחוזים בין עלייה כוללת של פני הים לבין תוספת עליית מפלס האקוויפר בנקודה ספציפית במרחב ובאותה נקודת הזמן.
 - ב. **זמן תגובה** - זמן שהייה (בשנים) של תגובת האקוויפר לעליית פני הים, במרחקים שונים מהחוף.

ג. **מרחקי השפעה** – מייצגים את התפשטות תוספת עליית מפלס מי התהום לאורך זמן.

למרות שהמודל אינו מותאם במלואו לביצוע הערכה מסוג זה, אנו ממליצים להשתמש במדדים אלו לצורך **הערכה ראשונית** של תגובת האקוויפר לעליית פני הים.

- לעליית פני הים השפעה יחסית קטנה על **תנועת הפן הביני**. זאת כיוון שעלייה זו הדרגתית ולכן האקוויפר מסוגל להגיב ולאזן את העומד כך שלא נוצר כוח נוסף שמניע את פן הביני.

- באזור חזית הפן הביני מתמשכים תהליכי המלחה הנובעים הן מתהליכי ערבוב באזור המעבר והן מכניסת מי הים. מהניתוח עולה כי כ-65% מתהליכי ההמלחה מצטברים באזור המעבר/אזור המים המליחים ושאר ההמלחה (כ-35%) עקב כניסת הפן הביני.

- שינויים בנפחי המים המליחים והמים המלוחים/מי הים מהווים אחוז קטן מההמלחה המתקבלת בתרחיש "עסקים כרגיל" (כ-0.03%-0.02 בשנה - תוספת של מים מליחים וכ-0.08%-0.05 בשנה - תוספת של מים מלוחים/מי הים) הם מצביעים על קיומם של תהליכי המלחה כתוצאה ישירה מעליית פני הים ונוכחות **שיווי משקל דינאמי** בין ים למי התהום.

- עד היום, שיורי ההפקה באקוויפר החוף מוגדרים לפי הקווים התפעוליים שנקבעו על בסיס תנאי **שיווי משקל סטטי** בין הים למי התהום. העלייה ההדרגתית של פני הים משנה את תנאי הגבול עם הים לכן **נדרש עדכן קווי התפעול בהתאם**. אחרת, חדירת מי הים תהיה הרבה יותר משמעותית מהמוערך במסגרת עבודה זו.

✓ מנקודת מבט הידרולוגית נטו, המתייחסת לאקוויפר החוף אחד ממקורות המים העיקריים של מדינת ישראל, לא נראה שיש סכנה לאקוויפר החוף.

המלצות

1. לנושא השפעת עליית פני הים על מצב אקוויפר החוף חשיבות רבה הן מבחינת משק המים הישראלי והן מבחינת ההשלכות ההנדסיות ביחס לתשתיות הקיימות ולתכנון עתידי. כגון, מערכות ניקוז, מערכות ביוב, יסודות מבנים וחדירות מים למרתפים, המטרו ונוספים.

2. כבר בשלב זה יש צורך להכין סל כלים שיאפשר בהמשך לתת תשובות ברמת דיוק מספקת ובזמן סביר לשאלות האופרטיביות. אחד הכלים הללו הוא המודל המאוחד של אקוויפר החוף.

3. לאור האמור קודם, יש צורך להתאים את המודל המאוחד של אקוויפר החוף לצרכי העבודות העתידיות. מדובר בעיקר בעדכונים של הגבול עם הים. המלצות לשיפור המודל מפורטות בפרק 2.1.3 העבודה לעיל.

4. נדרש לעדכן את קווי התפעול של אקוויפר החוף.

1. WCRP Global Sea Level Budget Group (2018). "Global sea-level budget 1993–present". Earth System Science Data. 10 (3): 1551–1590. doi:10.5194/essd-10-1551-2018.
2. דו"ח ניטור לאומי, חקר ימים ואגמים לישראל, שנת 2021-2022.
3. תרחישי ייחוס לשינוי אקלים. עליית מפלס ים. דו"ח חיא"ל HO4/4/2023, 2023.
4. סיכום ישיבת מנהלת היערכות לשינויי אקלים – 18.04.2023
5. איחוד מודלים באקוויפר החוף למודל אחד, שלב ה' – דו"ח סופי. תהל 236. ד.08.110720, 2013