

תכנון וביצוע של מנהרת קקונדה מתחת לכביש 431: אתגרים הנדסיים ופתרונות יצירתיים

כריית מנהרת רכבת במקביל לכביש 431 הינה פרויקט הנדסי מורכב, הגיאולוגיה של תוואי המנהרה הינה של חול שפיך המתאפיין בחוסר יכולת לעמידה עצמית. חתך המנהרה הינו גדול מאוד וצפוי לאפשר מעבר של 2 רכבות. בנוסף, עובי הכיסוי והקרבה לכביש מהיר ופעיל יוצרים אתגרים רבים במהלך כריית המנהרה בתקציב ובזמן מוגדרים

מהנדס צורי אילת *

הקדמה

פרויקט מסילת 431 מראשל"צ ועד מודיעין (וחיבורה לקו המהיר לירושלים) הוא אחד מפרויקטי התשתית הגדולים והמורכבים שבוצעו במדינת ישראל. פרויקט זה כולל קו רכבת מתחנת משה דיין בראשל"צ ועד תחנת פאתי מודיעין, כולל פיצול לקו המהיר לירושלים. הקו כולל מספר רב של גשרים ומנהרות שיעבורו בתוואי.

לאורך ציר המתוכנן של קו הרכבת, באזור שכונת ג'ואריש ברמלה, שוכן בית קברות עתיק. בעת הקמת הכביש עקב שיקולים הלכתיים, הוגבה הכביש באמצעות פלטות כהנים כך שיעבור מעל הקברים. את מסילת הרכבת לא ניתן היה להרים בגלל הקריטריונים השמרניים לתכנון מסילות נוסעים (שיפוע אורכי מקסימלי 3%).

הפתרון שנבחר היה הפוך - להעמיק את המסילה כך שהיא תעבור תחתם באמצעות מנהרה כרויה. אורך מקטע המנהור הוא כ-260 מטר.

הגיאולוגיה באזור המנהרה הינה חול נקי לא קוהזיה (נושא זה יפורט בהמשך הכתבה).

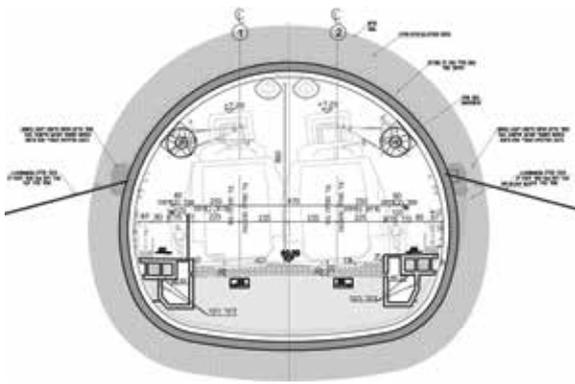
חתך המנהרה הינה דו-מסילתי דו-כיווני עבור רכבת ישראל ועל כן נדרש חתך גדול מאוד, כ-170 מ"ר (16 מ' רוחב, כ-13 מ' גובה), עובי הכיסוי הינו 4-6 מטרים (איור 1).

כדי לייצר חתך מנהרה במידות כאלה בעובי כיסוי רדוד, בסמוך לכביש מהיר פעיל אינו דבר שיש לו דוגמאות רבות מהעולם, אם בכלל.

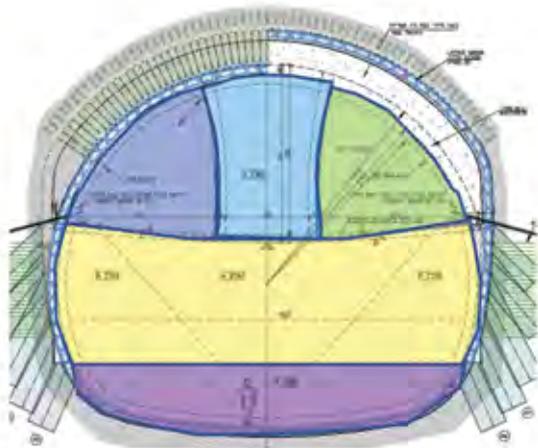
כתבה זו מתארת רק את שלבי ההעמקה של החפירה (שלבי ביצוע 4-7 באיור 2), את הסיכונים הגיאוטכניים הכלולים בביצוע חפירה שכזו, ואמצעי התמוך שבהם נעשה שימוש בסופו של התכנון.



מנהרת קקונדה במהלך הביצוע. צילום: דן צוקר



איור 1. מימין - מיקום המנהרה במרכז בין הנתיב הצפוני והדרומי של כביש 431. משמאל - חתך סופי של המנהרה, דו-מסלית דו-כיוונית.



איור 2. שלבי ביצוע

הסטאנד-אפ (stand-up time) של הקרקע היה אפסי; כלומר, בהיעדר אלמנט תמוך שתמוך בקרקע, היא כשלה באופן מיידי. בנוסף, הבנה מעמיקה של מאפייני הקרקע הייתה חיונית לתכנון ולביצוע המשך

נטה "לזרום" דרך מרווחים בין צינורות מטריית התמוך, מה שעלול להוביל לחזית כרייה לא יציבה. לחול נטייה לזרום לכיוון כלי כליה העבודה, דבר אשר עשוי לגרום לקבלן קושי בביצוע כרייה מבוקרת. זמן

כל העבודות המתוארות בכתבה זו בוצעו על ידי חברת **אלקטרה תשתיות** במהלך השנים 2021-2023.

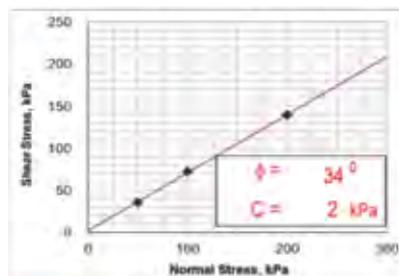
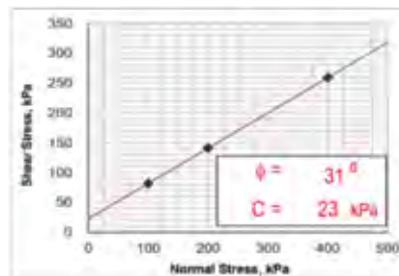
סיכונים גיאוכימיים בשלב ההעמקות

גיאולוגיה

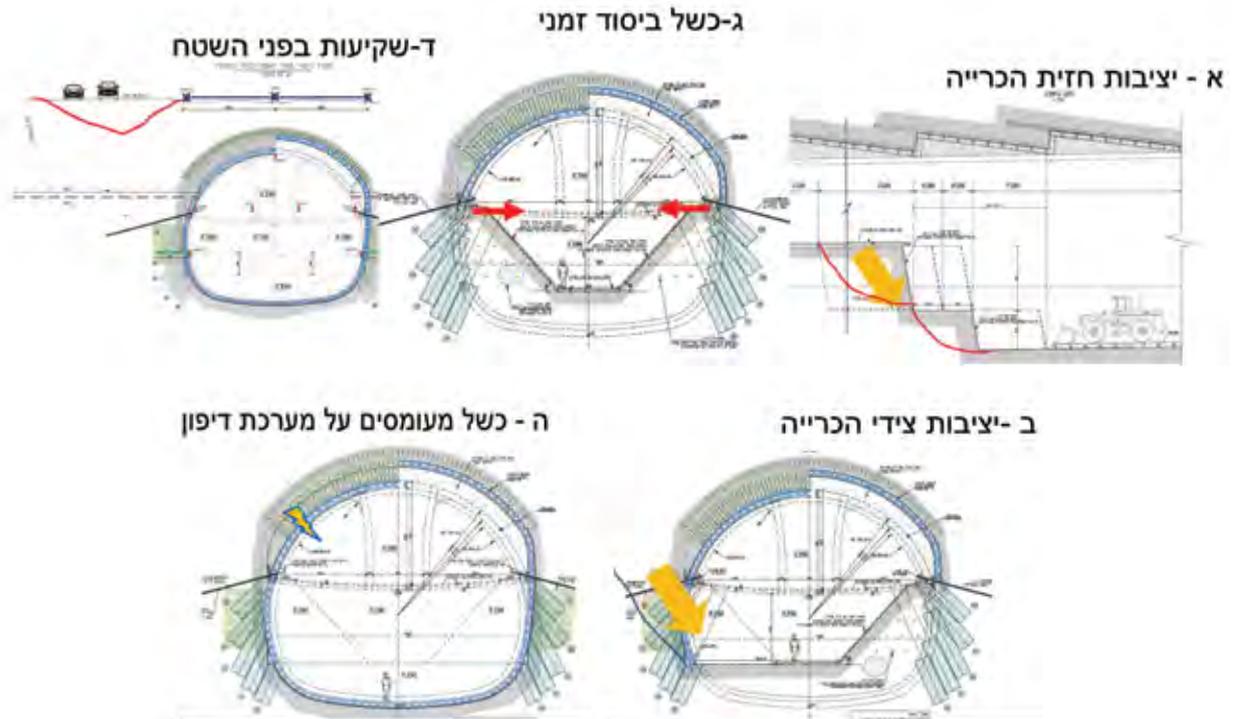
הגיאולוגיה לאורך ציר המנהרה מתאפיינת באחידות יחסית, כאשר הקרקע מורכבת בעיקרה מחול נקי המאופיין בקוהזיה נמוכה או כמעט אפסית. בחלק המזרחי של המנהרה, במהלך הכרייה של מנהרת החלוץ העליונה, נצפו מספר שכבות של חול חרסיתי.

המידע שהתקבל במהלך תכנון חפירות ההעמקה התבסס על מגוון בדיקות ומחקרים, ביניהם סיווג קרקעות, בדיקות גזירה מרחבית, בדיקות חזירה סטטית (CPT) וחפירה בשטח לצורך בדיקת הפרטלים ומנהרת החלוץ העליונה (איור 2).

מהמידע שנאסף ניתן היה להסיק כי החול לאורך המנהרה מאופיין בקוהזיה אפסית ובעל תכונות המזכירות חול דיונות. החול



איור 3 - בדיקת סיווג קרקעות - חול נקי, בדיקת גזירה מרחבית - קוהזיה אפסית זווית חיכוך 31-34 מעלות, חזית כרייה טיפוסית במהלך חפירת מנהרת החלוץ (שלב 1) - החול זורם כלפי המנהרה ולא ניתן לייצר חזית כרייה אנכית ומבוקרת.



שקיעות ושיפועים מותרים, קיים חשש שעבודות ההעמקה יגרמו לחריגה מערכי הסף המותרים. יש לנקוט באמצעים המתאימים כדי למנוע שקיעות בלתי מבוקרות שעלולות להשפיע על תשתיות סמוכות.

ה. כשל מעומסים על מערכת הדיפון: עקב פרמטרי החוזק של הקרקע וההבנה כי היא אינה תומכת את עצמה באופן עצמאי, כל המשקל העצמי של הקרקע פועל על מערכות הדיפון והתמוך. יש לתכנן את מערכות הדיפון כך שיוכלו לשאת בעומסים אלו ללא כשל. הבנת מנגנוני הכשל הללו והתייחסות

את העובדים ואת התשתיות השכנות. **ב. יציבות צידי הכרייה:** קיים חשש מזרימת חול כלפי פנים המנהרה במהלך עבודות ההעמקה ובשלב הזמניים עד התקנת מערכת התמוך. יש לטפל במצב זה במהירות וביעילות כדי למנוע קריסה אפשרית של דפנות המנהרה.

ג. כשל ביסוד זמני: הכוחות האופקיים הפועלים על היסוד מהחול הנמצא בצידי המנהרה מהווים סיכון נוסף. יש לתכנן את היסודות כך שיוכלו לעמוד בעומסים אלו, במיוחד בשלבים הזמניים של העבודה.

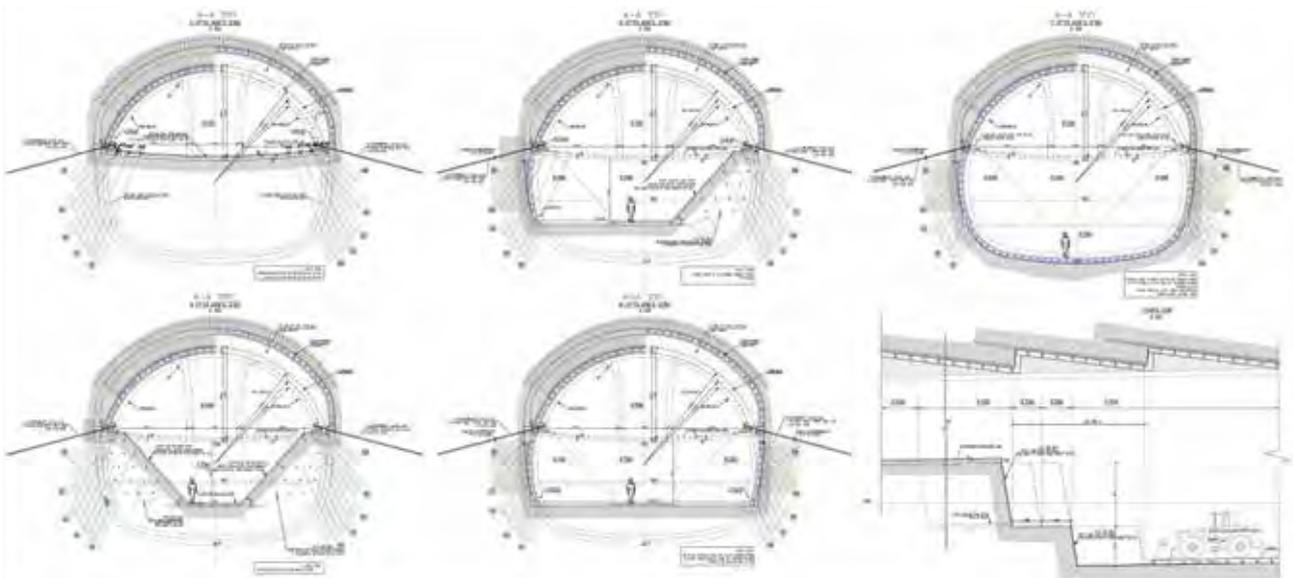
ד. שקיעות בפני השטח: בשל הקרבה לכביש פעיל והמגבלות המחמירות של

הפרויקט, כאשר כל מידע שנאסף שימש ליצירת אסטרטגיות יעילות להתמודדות עם האתגרים גיאוטכניים שהוצבו בפני המנהרה.

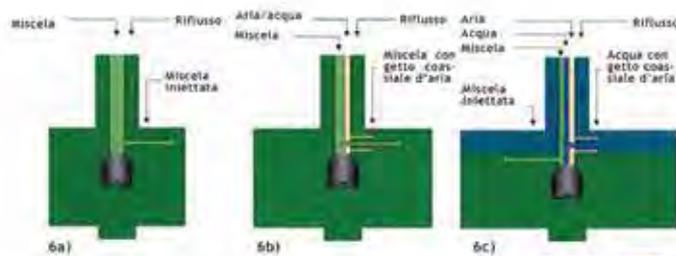
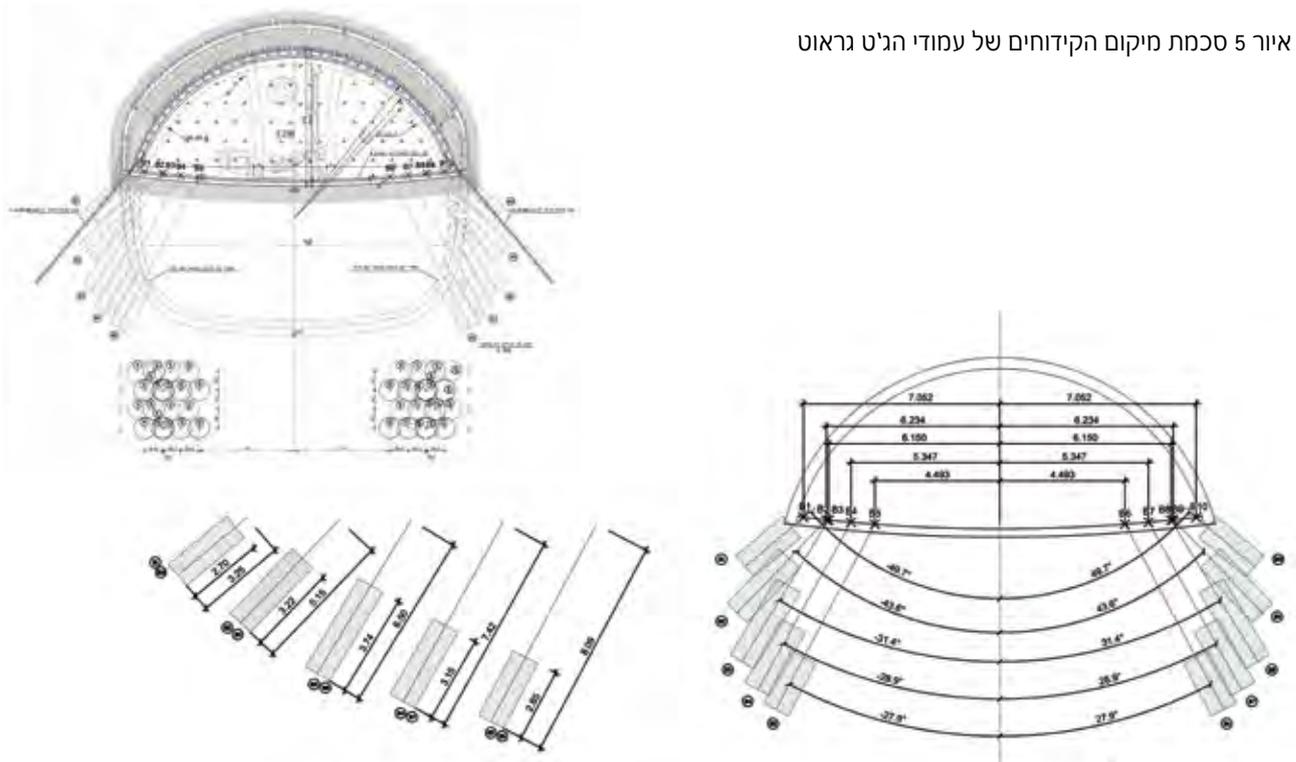
סיכונים גיאוטכניים

במסגרת הבחינה המקיפה של הסיכונים הגיאוטכניים העומדים בפני הפרויקט, זוהו חמישה מנגנוני כשל עיקריים המחייבים התייחסות קפדנית:

א. יציבות חזית הכרייה: היציבות של החול במהלך עבודות ההעמקה לאורך המנהרה מהווה סיכון מרכזי. חשוב לוודא שהחול נשאר יציב במהלך הכרייה, כדי למנוע קריסה של חזית הכרייה אשר עלולה לסכן



איור 5 סכמת מיקום הקידוחים של עמודי הלט גראוט



(1)



(2)



$$E = 800 \cdot \left(\frac{R_c}{FR}\right)^{\frac{1}{2}} \quad | \quad c = \frac{R_c}{FR} (1 - \sin\varphi) \quad | \quad \sigma_t = 0,3 \cdot \left(\frac{R_c}{FR}\right)^{\frac{3}{5}}$$

Rc	FR	γ	φ	E Lab test	E CALCULATED	c	σ _t
חומר (חומר) מבדוק (Mpa)	מקדם גרמט (-)	ספיקל יחסי מבדוק (kN/m ³)	אזו ויכין סיל הגרמט / ריחון (deg)	המטון מבדוק התעודה (Qpa)	המטון המטון על פי המטון אמטרי (Mpa)	קונדה המטון המטון (kPa)	חזקת חזית המטון על פי המטון אמטרי (Mpa)
6.2	2	15.01	34	12.5	1408.5	824.1	0.6
8.2	2	15.47	34	13.4	1819.9	1090.0	0.7
5	2	12.54	31	14.3	1294.9	664.6	0.5
8.6	2	16.61	34	16.9	1658.9	1143.2	0.7
AVERAGE							
7.0	2.0	15.2	34.0	14.5	1488.3	930.5	0.6

איור 6 (1) - 3 שיטות של קידוח ג'ט גראוט (2) - ניסוי של עמודי ג'ט גראוט, ולאחריו ביצוע קידוחי גלעין ובדיקות מעבדה לקבלת פרמטרי חוזק של החומר המטוייב.

המוזרק לתוך הקרקע. סילון האנרגיה חודר לקרקע ויוצר ערבוב המשמיד את החיבור הטבעי בין חלקיקי הקרקע. התוצאה היא תערובת אחידה של אדמה טבעית ודיס צמנטי, בעלת תכונות מכניות והידראוליות משופרות בהשוואה לקרקע המקורית.

אמצעי תמוך

שלבי ביצוע מתוכננים להעמקות דיוס סילוני

דיוס סילוני, הידוע גם בשם ג'ט גראוט, הוא תהליך מבוסס על יצירת סילון אנרגיה קינטית גבוהה של דיס צמנטי,

אליהם בתכנון וביצוע הפרויקט היא קריטית להבטחת הבטיחות והיציבות של המנהרה ושל האזור הסובב אותה. כל אחד מהמנגונים דורש תכנון מוקפד, שימוש בטכנולוגיות מתקדמות ויישום אמצעי בקרה ופיקוח מחמירים.

כך שיתקבלו תוצאות הדומות ביותר לאלו שהתקבלו במערכת הניטור. לאורך ציר המנהרה לא התקבלו תוצאות אחידות, באזור המערבי התקבלו שקיעות גדולות יותר מאשר בצד המזרחי, בנוסף קיימות מערכות ניטור בתוך חלל המנהרה – תאי לחץ, פריזמות תלת מימד, סטריינג'ז. כיול המודל כך שיתאים ויתנהג באופן זהה לכלל תוצאות מערכות הניטור אינו מציאותי. ועל כן נבחר חתך שהערכים שהתקבלו בו, על-פיהם יבוצע כיול המודל הנומרי.

המודל הקונסטטיטויטיבי של החומר הוא מודל של הרדנינג סויל (Hardening Soil) חוק התנהגות זה מטיב לתאר התנהגות של קרקעות אשר מתקשות בתגובה להעמסתם. החומר מתנהג בצורה לא ליניארית ומושפע ממצב המאמצים הראשוני, פרמטרי החוזק של החומר ומצב המאמצים המתפתח עקב העומס המועבר אליו מהכרייה והתמוך. פרמטרים משמעותיים בהגדרת תכונות החומר הינם מקדמי האלסטיות של המצב המוקדש והמצב הראשוני.

לאחר בניית מודל בקרה, מכויל עבור שלבי הכרייה של מנהרת החלוף, ניתן היה להמשיך את שלבי המודל של העמקות (שלבי ביצוע 4-7 באיור 2). ולודא כי ההטרחות הפועלות על האלמנטים השונים במודל אינם חורגים מתחום התסבולת וכי השקיעות המתקבלות בפני השטח ובחלל המנהרה עומדים בדרישות התכנוניות השונות.

עמידות לעומסים חיצוניים

עמידותה של מערכת התמוך נבחנה בקפדנות על מנת להבטיח את יציבותה ואת יכולתה לעמוד בעומסים חיצוניים. הבדיקה בוצעה באמצעות שימוש בעקומי

מעגן את קירות המנהרה באמצעות קורה אורכית זמנית. המיניפייל מחוזק בצינור פלדה מחורר, וכל הקדח מדוייס לאורך כל אורכו, כך שהוא פועל בחיכוך עם החול הטבעי הקיים באתר. רק לאחר השלמת התקנת אלמנט זה, ניתן היה אישור להרוס את אינברט הבטון של מנהרת החלוף.

תוצאות מערכת הניטור, המבוססת על פריזמות תלת-ממד הממוקמות בתוך חלל המנהרה, לא הראו כל תזוזה אופקית בקירות המנהרה בעקבות החלפת אינברט הבטון לקורת המיניפייל. ממצאים אלו אישרו כי ניתן להמשיך לשלבי הביצוע הבאים בבטחה, בידיעה שמערכת התמוך החדשה עומדת בהצלחה בעומסים הפועלים עליה. מערכת הניטור הוכיחה את עצמה ככלי חשוב לוודא יציבות ובטיחות המנהרה במהלך תהליך ההעמקה.

בדיקות סטאטיות מודל נומרי

הבדיקות הסטאטיות שנדרשו לבצע עבור יציבות המערכת כללו שורה של נושאים ואלמנטים שונים שמתוארים בפרק זה, עקב שלביות העבודה המורכבת כל אלמנט נבדק לכלל השלבים ושילובי העומסים האפשריים.

כדי למדל את שלבי הביצוע ולאמת כי מערכת התמוך המתכוננת תדע לעמוד בכל דרישות התקן והמפרט בוצע מודל נומרי באמצעות תכנת פלאקסיס. לצורך ביצוע מודל מציאותי ככול הניתן היה צורך למצוא את פרמטרי החוזק של הקרקע באתר. לצורך כך השתמשנו בנתוני מערכת הניטור שהוקלטו במהלך כריית מנהרת החלוף (שלבי ביצוע 1/2/3 באיור 2), ועל בסיסם כויל המודל ופרמטרי החוזק של הקרקע

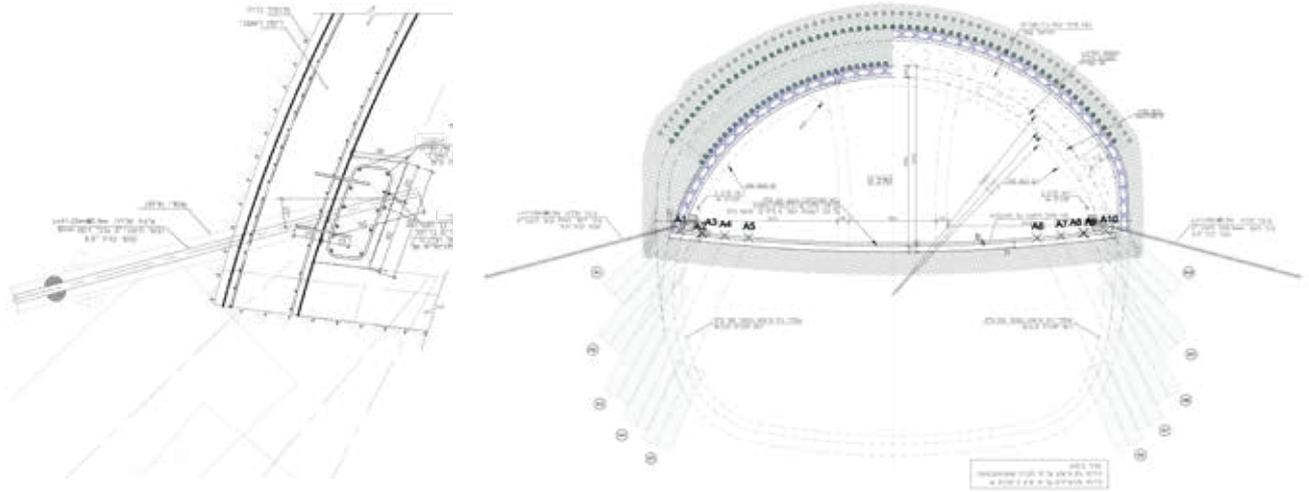
במהלך תהליך זה, לא מועבר לחץ לקרקע מחוץ לטווח סילון הדיס, מה שמבטיח יציבות ואי פגיעה בסביבה הקרובה.

בפרויקט הנוכחי, התהליך בוצע ממנהרת החלוף כלפי קירות ההעמקה, כאשר עמודי הגראוט הוצבו בחפיפה ליצירת חזית חפירה אחידה במהלך עבודות ההעמקה. בסך הכל, בוצעו בפרויקט כ-2,500 עמודי ג'ט גראוט, כאשר כל 10 עמודי גראוט בקוטר של מטר אחד (5 בכל צד) הוצבו במרווחים של 90 ס"מ לכל אורך המנהרה. תכנון זה נועד להבטיח יציבות מקסימלית של המנהרה והאדמה הסובבת אותה, ובכך להבטיח את הצלחת הפרויקט ובטיחותו. ראו איור 5 להמחשה גרפית של תהליך זה. פרמטרי החומר המטויב נבדקו בבדיקת מעבדה, כפי שניתן לראות איור 6 ערך הקוהיזה עלה מ-0 קפ"ס לכ-930 קפ"ס. זווית החיכוך נשארה זהה. ניתן לראות את עמוד החומר המטויב – חומר הומוגני, קשיח היודע להחזיק את עצמו (איור 6).

מיניפייל

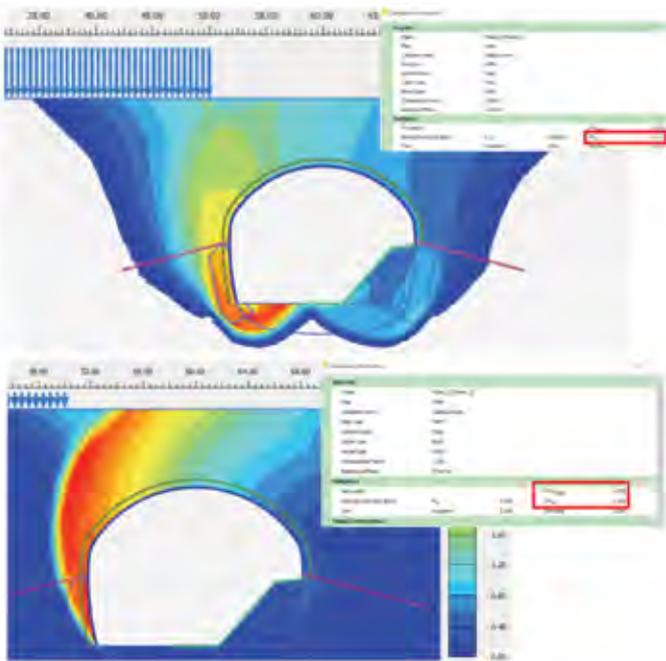
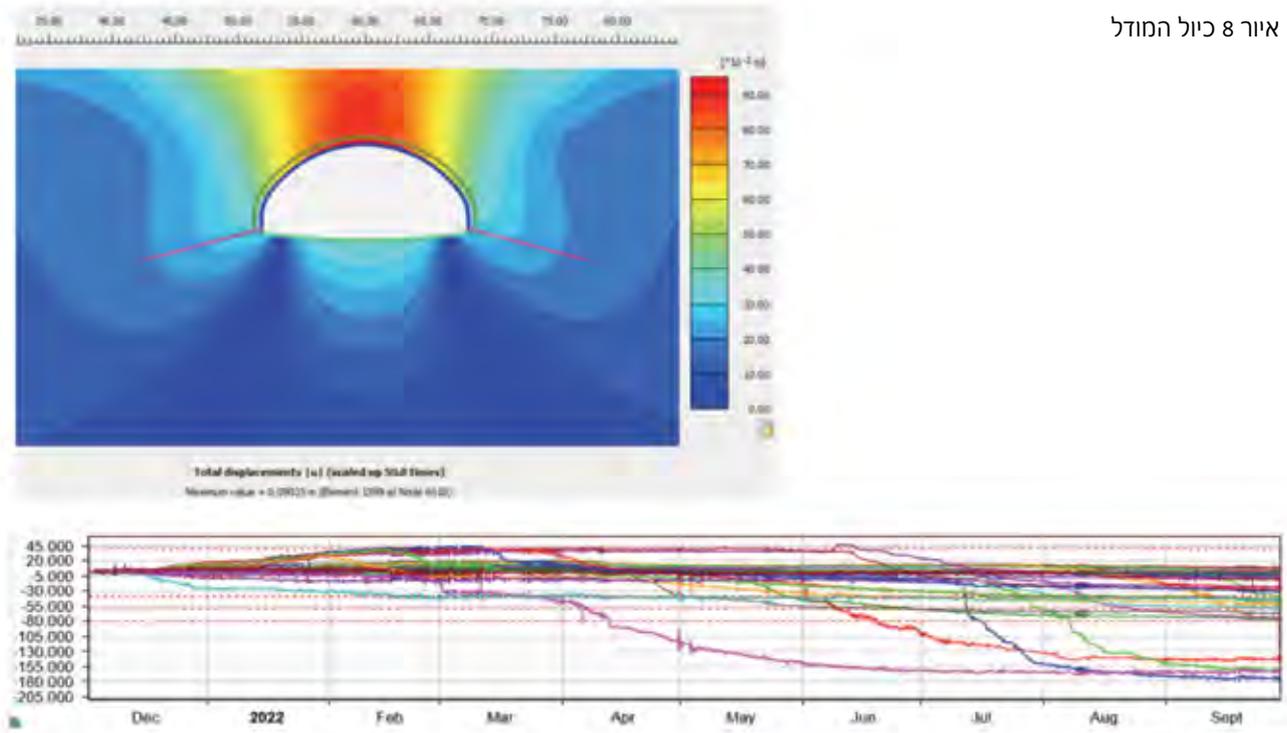
האינברט של מנהרת החלוף העליונה בנוי מבטון בעובי של 30 ס"מ. אלמנט זה ממלא תפקיד מרכזי כבסיס אופקי לרגלי המנהרה, המאזן את הכוחות האופקיים הפועלים בשל הנטייה של החול לגלוש כלפי פנים המנהרה. במסגרת שלבי ההעמקה, היה צורך לשבור את רצפת הבטון הקיימת, ולכן התערור הצורך למצוא פתרון חלופי שיוכל להתמודד עם הכוחות הפועלים ולהוות בסיס אופקי יציב לרגלי מערכת התמוך של המנהרה.

האלמנט שנבחר לשם כך הוא המיניפייל, המותקן בזווית של 15 מעלות ובמרווחים של 50 ס"מ לכל אורך המנהרה. מיניפייל זה

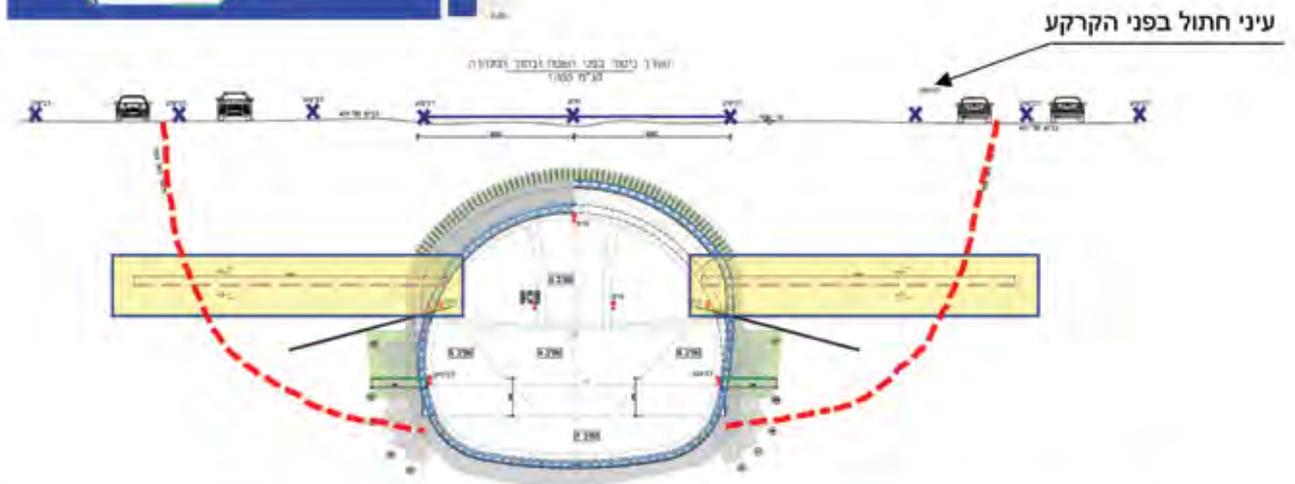


איור 7 מימין - מיקום המיניפייל בייחס למנהרה משמאל - פרט החיבור בין המיניפייל לקורת הבטון הזמנית ולקיר הבטון של המנהרה.

איור 8 כיול המודל



איור 10 למעלה - בדיקה למצב עם ביצוע עמודי ג'יט-גראוט. מרכז - מצב ללא ביצוע עמודי ג'יט-גראוט. למטה - מערכת הניטור - קו אינקלינומטרים החוצה את מישור הכשל הצפוי (באדום) על פי המודל הנומרי.



אינטראקציה M-N ו-V-N, המהווים כלים מרכזיים להערכת העומסים הפועלים על מערכת התמוך. השימוש בעקומים אלו מאפשר להעריך את הקשר בין מומנטים (Moments) וכוחות נורמליים (Normal Forces), וכן בין כוחות גזירה (Shear Forces) ונורמליים.

הגישה התכנונית שנבחרה לבדיקת עמידות המערכת היא גישה 2 של היורו-קוד. גישה זו מתאפיינת בכך שהחישוב הנומרי מבוצע עם מקדם של 1.0 על פרמטרי החוזק של הקרקע, מקדם של 1.0 על פרמטרי החוזק של מערכות התמוך, ומקדם של 1.0 על הכוחות החיצוניים הפועלים על המערכת. גישה זו נועדה להבטיח דיוק מרבי בחישוב ההטרדות הפועלות על מערכת התמוך.

לאחר קבלת תוצאות החישוב הראשוני, מבוצע חישוב נוסף לצורך קביעת המצב הגבולי של הרס. בתהליך זה, ההטרדות המתקבלות מהחישוב הראשוני מוכפלות במקדם של 1.45. מקדם זה מיועד להבטיח מרווח בטחון נוסף, תוך הבאה בחשבון של אי-ודאויות שונות שיכולות להשפיע על התנהגות המערכת בפועל.

באמצעות גישה זו, ניתן לוודא כי מערכת התמוך מתוכננת לעמוד בעומסים החיצוניים באופן בטוח ויציב, ולמנוע כשלים אפשריים במהלך חיי הפרויקט. בדיקות אלו מדגישות את חשיבותו של תכנון מדויק והקפדה על סטנדרטים מחמירים, אשר מבטיחים את ביטחון המבנה ועמידותו לאורך זמן.

יציבות כללית

בוצעה בדיקה בשיטת SSR לבחינת מקדם הבטחון לכשל כללי, בבדיקה זו התכנה מפחיתה בצורה הדרגתית את פרמטרי החוזק של הקרקע עד אשר מתקבל מצב גבולי בו נוצר כשל במודל. ערכי c ו ϕ הינם הערכים המינימליים אשר בה היציבות הכללית נשמרת. הבדיקה שמוצגת הינה עבור שלב ביצוע 5 (איור 2), בוצע מודל בדיקה עבור התכנון המקורי בו לא תוכנן ביצוע עמודי ג'ט באופן המתואר פה, מקדם הבטחון לכשל במצב זה קטן מ-1.0. כלומר צפוי כשל וגלישה של הקרקע במהלך ביצוע עבודות העמקה, ועל כן ברור כי ביצוע עמודי הג'ט הינו מחוייב המציאות כדי לבצע את העמקה בבטחה, במיוחד עקב כך ש צורת הכשל עולה לכיוון נתיבי התנועה של כביש 431. מקדם הבטחון למצב עם עמודי הג'ט-גראוט כפי שתוכנן ומוצג בכתבה זו הוא 1.63.

לצורך ניטור ווידוא כי אין חריגות במהלך הביצוע מן תוצאות החישובים שהתקבלו עבור מנגנון כשל זה, הותקנה מערכת ניטור המערכת מבוססת על קו אינקלינומטרים במרווחים של 1 מטר החוצה את מישור הכשל הצפוי. באמצעות מנגנון זה יש למתכנן והקבלן התראה על התפתחות של מישור אי יציבות במהלך עבודות חפירת העמקה. איור 9. האינקלינומטר יודע להתריע איך מגיבה כל נקודה בדופן מהנהרה והאם מתפתחות הזזות אשר יוצרות היווצרות של מישור כשל.

שקיעות ושיפועים בפני השטח

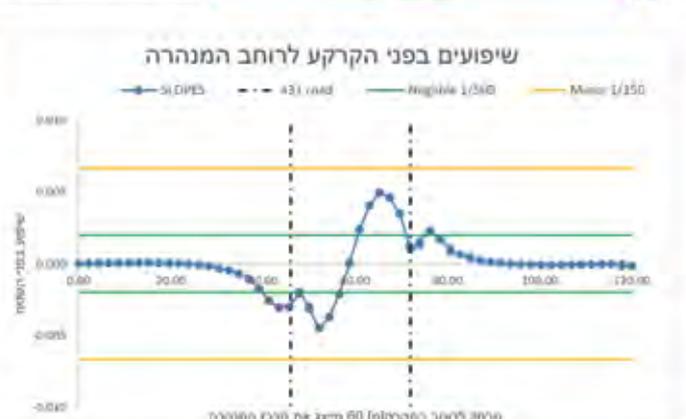
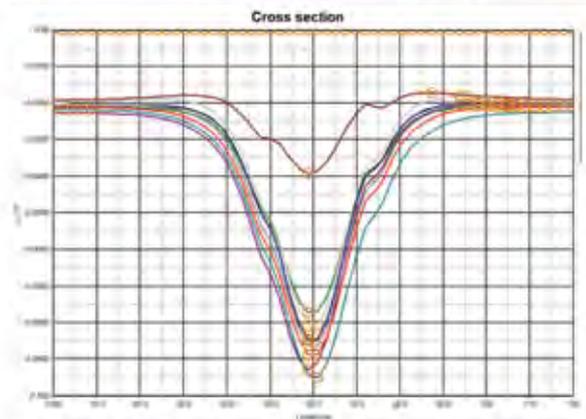
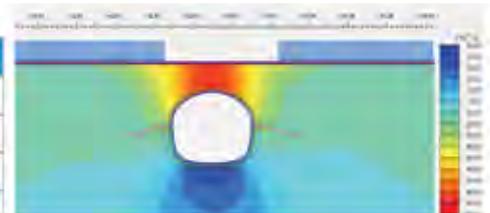
התכנון הגביל את השקיעות המתקבלות בפני השטח ובמיוחד בכביש הסמוך, כביש 431 הינו כביש מהיר פעיל, ההגבלות על הדפורמציות בכביש הינם של שקיעות ובמיוחד של שיפועים. כפי שמוצג באיור 10, לצורך ניטור בזמן אמת של התנהגות הדפורמציות בכביש במהלך עבודות העמקה הותקנה מערכת ATS המבצעת קריאות אוטומטיות של מטרות עיני חתול שהותקנו על הכביש (איור 9 למטה), המערכת יודעת להתריע על חריגה מגבולות שהוגדרו לה עבור שקיעות אבסולוטיות וכן עבור שיפועים בין נקודות מדידה סמוכות. המערכת משדרת את הנתונים לשרת אינטרנטי הפתוח לגישה של כל המעורבים בפרוייקט, המערכת מתריעה בהתאם לערכי הסף שהוגדרו במהלך התכנון. ערכים אלו נקבעו על פי הערכים הצפויים בהתאם לסימולציות הממוחשבות ובהתאם לערכים שהוגדרו ככאלו שמקרבים את לרמה מסוכנת לתנועה בטוחה בכביש הסמוך.

סיכום

בשלב זה, כריית המנהרה הושלמה בהצלחה ובבטחה, תוך עמידה בכל היעדים ההנדסיים והבטיחותיים שהוגדרו. עבודות העמקה שתוארו בכתבה זו הסתיימו אף הן ללא כשלים משמעותיים או תקריות בטיחות, דבר המעיד על תכנון קפדני וביצוע מדויק.

Table 5.8 Impact ratings for road pavements*, kerbs and footpaths (Hudson-Smith & Clivary)

Professional impact rating	Maximum single and settlement (mm)	Maximum induced strain (mm/m)	Potential damage (multi-day)
Negligible	< 1/500 and 10 mm	5 mm/m	Negligible effects, superficial damage unlikely
Minor	1/500 to 1/150 and 15 mm	10 mm/m	Superficial damage possible, structural damage unlikely
Moderate	1/150 to 1/50 and 25 mm	20 mm/m	Superficial damage likely, structural damage possible
Severe	> 1/50 and 50 mm	50 mm/m	Expected structural damage



איור 11 - ערכי הסף לשקיעות ושיפועים בכביש. תוצאות המודל הנומרי לשקיעות בפני השטח והשיפועים שהתקבלו במודל.



ומדגישה את החשיבות של תכנון מדויק, הערכת סיכונים מתקדמת, ויישום קפדני של שיטות הביצוע החדשניות. יתר על כן, הניסיון שנצבר במהלך הפרויקט מהווה בסיס ידע חשוב שניתן יהיה להיעזר בו בעתיד בפרויקטים הנדסיים דומים, לשיפור התהליכים והבטיחות בעבודות מנהור מורכבות.

***צורי אילת - חבר איגוד, תא מנהור, מהנדס בחברת פיני סוויס ישראל.** צורי הינו מהנדס וגיאולוג המתמחה ב-4 שנים האחרונות בתכנון ופיקוח על עבודות מנהור בתחום התחבורה והתשתיות.

פיני סוויס ישראל - הינה חברת תכנון המתמחה בעבודות מנהור ומהווה שותפות בין גרושקו מהנדסי מבנים לבין קבוצת פיני השוויצרית (Pini Group).



מנהרת קקונדה בשלבי הביצוע. צילום: דן צוקר

את יעילותן, אלא גם מספקות שיעור חשוב לכלל החברות והמהנדסים העוסקים בעבודות מנהור באזור מישור החוף ובפרויקטים דומים ברחבי הארץ. ההצלחה של פרויקט זה מחזקת את המוניטין של הקבלן ושל צוות המהנדסים,

פרויקט המנהרה היווה אתגר הנדסי רב-ממדים עבור כל המעורבים בו. המורכבות הגיאולוגית והקרבה לכביש מהיר פעיל דרשו פתרונות יצירתיים וחדשניים. השיטות והטכניקות שבהן נעשה שימוש במהלך התכנון והביצוע לא רק שהוכיחו