

# עקרונות תכנון מבנה תת-קרקעי עמוק באזור אורבני צפוף

אינג' ציון מטלון M.Sc. \*

## הקדמה

הצפיפות ההולכת וגדלה של כלי רכב פרטיים וציבוריים בערים המודרניות גוזלת זמן רב ומהווה מטרד אקולוגי חריף, כמו-כן ההגבלות בנוגע לשטחים עירוניים בשל צפיפות בניה בהווה ובעתיד מעלות את נושא התשתית התעבורתית למרכז סדר היום הציבורי. מערכת הסעה המונית המתבססת על רכבת תת-קרקעית מספקת את הפתרון התעבורתי המהיר והנוח ביותר שאינו תלוי בנעשה במצב התנועה בעיר.

הקמתה של מערכת תת-קרקעית בנוסף לעלויות הגבוהות כרוכה בעבודה בתוואי קרקע שבחלקו אינו ידוע עם מגבלות קשות המופיעות בדרך כלל בסמוך למתחם ביניים, מרתפים ויסודות. בימים אלו ימסרו הצעות שלוש קבוצות (קונסורציונים הבנויים ממספר חברות בינלאומיות) המתמודדות על תכנון, ביצוע ותפעול הקו האדום, הקו הראשון עבור הרכבת הקלה למטרופולין ת"א, באורך כ-22 ק"מ הכולל קטע של כ-10 ק"מ תת-קרקעי. הקו התת-קרקעי מונה 13 מתקנים תת-קרקעיים (רובם תחנות תת-קרקעיות) הממוקמות בצירים הראשיים כגון דרך בגין (ת"א) ודרך ז'בוטינסקי (רמת-גן ובני-ברק).

התחנות התת-קרקעיות תוכננו בשיטת ה-Cut & Cover. מאמר זה דן בביצוע מעטפת לתחנה תת-קרקעית ("קופסא") במידות 180 מ' באורך, 25 מ' רוחב וכ-25 מ' עומק (שטח כ-4000 מ"ר), הממוקמת באזור אורבני ומבוצעת בשיטת ה-C&C. תכנון המעטפת לתחנות בוצע במסגרת פרויקט ה"קופסאות" אשר תוכנן עבור נת"ע (נתיבי תנועה עירוניים), הגוף הממשלתי האחראי על תכנון וניהול הביצוע של הקו, ושל הרכבת הקלה ככלל.

## במאמר מוצגות עקרונות התכנון ללא כל התייחסות ספציפית לתחנה או מתקן תת-קרקעי לאורך התוואי.

ביצוע המעטפת ("קופסת תחנה") כולל ביצוע קירות דיפון (סלארי), יציקת רצפת בטון, חפירת ה"קופסא" תוך ביצוע תמיכות אופקיות (struts) בין הקירות וקירוי זמני הניתן עד גמר ביצוע המתקן התת-קרקעי (תחנה או מפלג חירום לרכבת).

ברצוני לציין כי קיימות שיטות נוספות לביצוע ה"קופסא" כגון כריה או דחיקה.

יתרונות השיטות הנוספות: הפרעה מינימלית לכלי רכב ואנשים, פגיעה מינימלית בתשתיות, שימוש בפירי כניסה ויציאה (מינימום פגיעה בפני השטח).

\* שותף בחברת ירון-שמעוני-שחם מהנדסים בע"מ

החסרונות בשיטות הנוספות: מחיר גבוהה, איטום מסוכן, חריגות מגבלות השטח עקב בעיות הנגזרות משיטת הביצוע.

## שיטת החפירה וכיסוי (Cut & Cover)

תכנון מבנה תת-קרקעי הממוקם על צירי הכבישים בצמוד למבנים קיימים בשיטת ה-C&C מצריך:

1. סקר מבנים סמוכים למתקן והערכת נזק צפוי עקב עבודות החפירה, כולל קווי השפעה ואביזרים לניטור תזוזות במבנים סמוכים.
2. דו"ח קרקע המבוסס על קידוחי ניסיון ודו"ח הידרולוגי.
3. תכנון קונסטרוקטיבי הכולל בנוסף לתכנון השלד נושאים כגון אזורי התארגנות לפי שלבי עבודה ופינוי חומר נחפר.
4. סקר תשתיות ומתן פתרונות לתשתיות באזור ה"קופסא", כולל העתקת תשתיות, תלית תשתיות מתחת לקירוי הזמני, ניתוק זמני של התשתיות וכו'.
5. פתרון תנועת אשר יכלול שינוי בכביש תוך התאמה לשלבי ביצוע המתקן.
6. פתרון לנושא השפלת מי תהום (תלוי בנתוני הדו"ח ההידרולוגי) וסילוקם למקום מאושר.

## סקר מבנים

הנזק הצפוי למבנה קיים עקב שקיעות קרקע כתוצאה מחפירות למבנה תת-קרקעי תלוי במספר גורמים:

- סוג הכלים המיועדים לחפירה
  - צורת מעקב השקיעה (סוג הקרקע)
  - תכונות המבנה הסמוך (קשיחות)
  - מצבו הקיים של המבנה (חומרי בניה, סדקים קיימים)
- קריטריון הנזק הצפוי למבנים הסמוכים על מגוון השפעותיו, ניתן לקבל מקריטריוני נזק המקובלים באנגליה ובארצות אירופאיות ובתקן ישראלי 940 החדש.
- בדרך כלל מקובל לחלק את הנזק ל-5 קטגוריות (הלקוחות מעבודתו של Burland) - **ראה טבלה מס' 1** - טבלת קריטריוני נזק. האמצעים בהם ניתן לנקוט בזמן ביצוע המתקן התת-קרקעי כוללים:
- תיעוד בזמן הביצוע (צילומים)
  - אמצעי מגן
  - מדידות מעקב (Monitoring) בזמן הביצוע
  - אמצעי מגן/מניעה המקובלים עשויים לכלול:
  - דיוס מונע
  - דיוס מתקן (Compensation Grout)
  - קירות מגן
  - עוגנים
  - חיזוק/הקשת המבנה הסמוך

מערכות המכשור המיועדות לבצע מעקב אכן מחייבות להיות מתוכננות מראש על פי דרגת הסיכון המוערכת למבנה. המערכת תמדוד בזמן הביצוע ותסתיים זמן מה לאחר גמר מילוי השטח החפור (עד החדרת הכביש לקדמותו).

מערכות המכשור ימדדו: שקיעות מוחלטות, דיפרנציאליות, סיבוב וזאת ע"י אינקלינומטרים ומכשירי תזוזה.

בזמן תכנון המתקן בוצעו אנליזות מחשב אשר סיפקו את קווי ההשפעה מסביב למתקן עבור כל שלב ושלב של החפירה. קווי ההשפעה סיפקו אינפורמציה לגבי שקיעות ורטיקליות ואופקיות כפונקציה של מרחק מהחפירה.

**טבלה מס 1 - טבלת קריטריוני נזק**

קטגוריה	רמת הנזק	עיבור מכסימלי ב-%	תאור
0	זניח	מתחת ל-0.05	סדקי שעה ברוחב 0.1 מ"מ
1	קל מאד	0.05 ÷ 0.075	סדקים שקל לתקן בתהליך שפוף (במקור: דקורציה) שגרת. עיקר הסידוק בתגמיר הפנימי. מעט סידוק בבלוקים או לבנים. רוחב סדקים עד 1 מ"מ.
2	קל	0.075 ÷ 15.0	סדקים שקל למלא. יחייבו שפוף, סידוק בבלוקים יחייב, לעיתים, אטימה נגד גשם, דלתות או חלונות עלולים ל"היתקע" קלות, רוחב סדקים עד 5 מ"מ.
3	בינוני	0.15 ÷ 0.3	סדקים שיחייבו תיקון ע"י בנאי. דלתות או חלונות עלולים ל"היתקע" במקומם, רוחב בין 5 ל- 15 מ"מ.
4	חמור	מעל - 0.3	סדקים המחייבים תקון רציני, כולל החלפת קטעים שנפגעו. רוחב סדק בתחום 15 עד 20 מ"מ.
5	חמור מאד	-	נזק המחייב עבודת תיקון משמעותית, לרבות בנייה מחדש של חלקי מבנה. רוחב סדק מעל 25 מ"מ.

ה"קופסא" בעובי 120÷60 ס"מ (עובי בהתאם לתנאי הקרקע, מי תהום ועומק המחפורת), מספר שורות תמיכה אופקיים (struts) וקורות שפה (wales), רצפת בטון לקופסא המשמשת כתמיכה זמנית למחפורת בחלק התחתון וקירוי זמני (Temporary Deck) המשמש בנוסף להיותו אלמנט גישור כתמיכה אופקית עליונה.

**בתרשים מס' 1** ניתן לראות שני שלבים לביצוע ה"קופסא":

שלב 1: שלוש שורות תמיכות אופקיות (struts) עד לגמר יציקת רצפת בטון

שלב 2: לאחר גמר יציקת רצפת בטון תחתונה הכוללת עוגני קרקע (כנגד לחץ הידרוסטטי) הורדת שורת תמיכה שלישית.

החישוב באלמנטים סופיים בוצע בשלוש תוכנות מחשב: PLAXIS, LARIX, STRAP

החישובים בוצעו בהתאם לשלבי החפירה כאשר בכל שלב ושלב נעשתה אינטרציה בהתאם לתוצאות שלב קודם וזאת על מנת לאזן את כוחות לחץ הקרקע, כוחות ב-STRUTS ודפורמציות בקיר הסלארי.

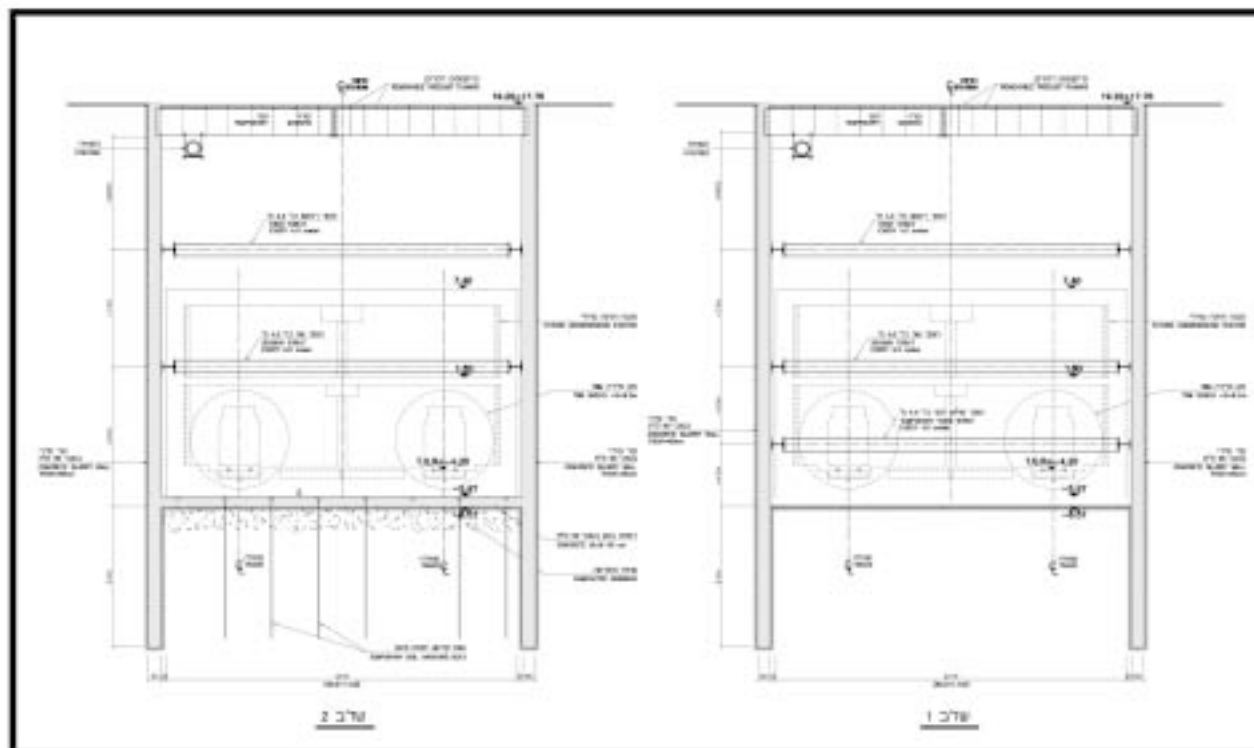
על מנת לחסוך בחומר נדרכו התמיכות האופקיות. רצפת ה"קופסא" תוכננה לעומסים הידרוסטטים (באזורים בהם קיים עומד מים) ולעומסים

סטטיים של ראש מכונת הקידוח TBM. רצפת הקופסא משמשת כתמיכה אופקית תחתונה.

הקירוי הזמני תוכנן מקורות ראשיות מפלדה ופריקסטי בטון טרומי הנשענות על הקורות בצורה פירקית כך שתתאפשר נוחות וגמישות לפתיחה בכל איזור ע"ג הקירוי, בהתאם לצרכי הוצאת והכנסת חומר למחפורת. מרחק בין צירי הקורות נקבע כ-4 מ', הנותן פתח

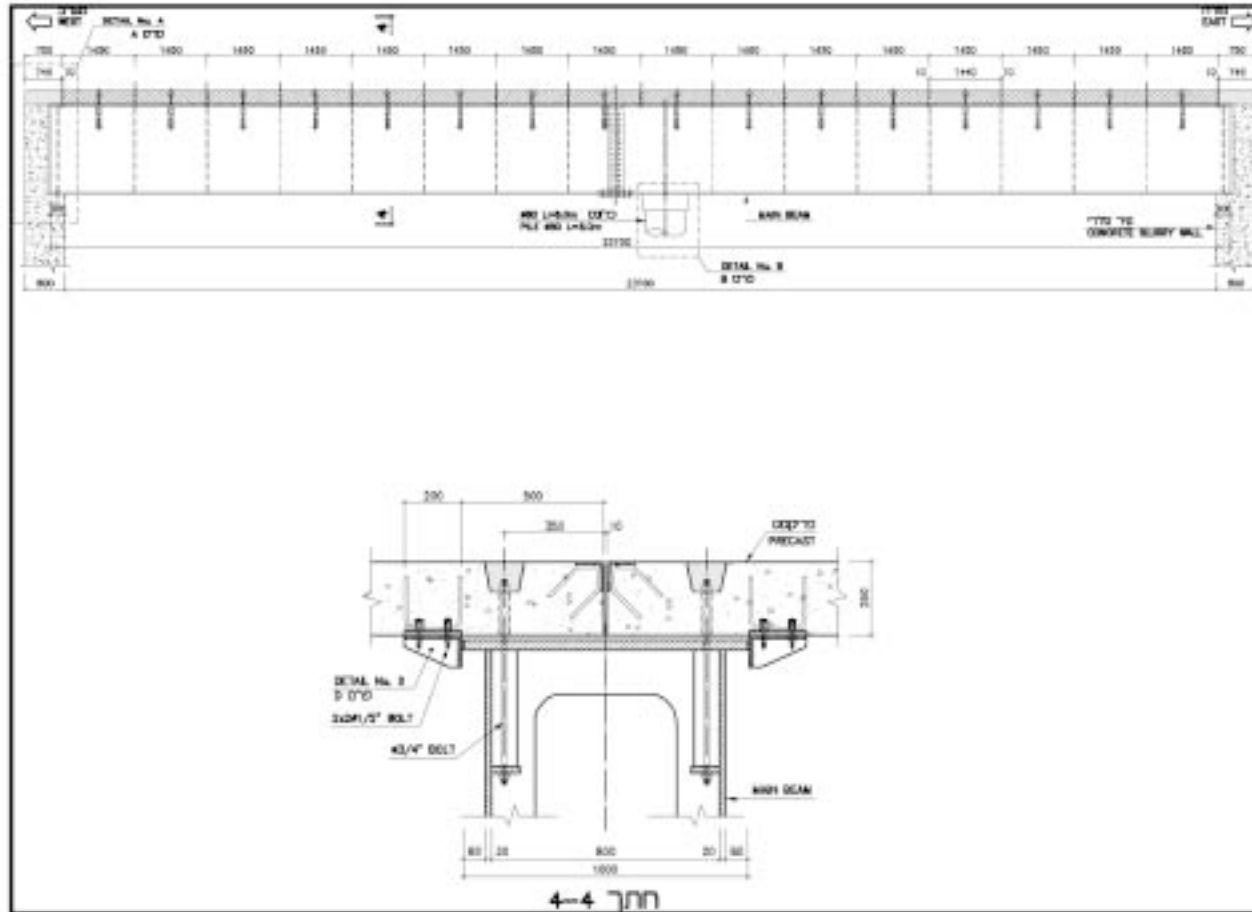
**תכנון קונסטרוקטיבי**

תכנון קונסטרוקטיבי למתקן התת-קרקעי ("קופסא") בוצע ע"י תוכנות מחשב בשיטת האלמנטים הסופיים, התכנון התבסס על נתוני קרקע, רום מי תהום וחדירות הקרקע (permeability). המערכת השלדית ל"קופסא" כללה קירות סלארי התוחמת את גבולות



תרשים מס 1 : שלב 1 & 2 לביצוע הקופסא.





תרשים מס 2: חתך רוחבי של הקירוי הזמני ופרט חיבור בין קורת פלדה ראשית

- ולאחר בניית הקירות תלית התשתיות אל תחתית הקירוי הזמני.
- תשתיות אשר נדרשות לתפקוד בכל זמן בניית הסלארי והעתקתם אינה אפשרית לתשתיות האלה תינתן הגנה בזמן ביצוע הקופסא ותליה אל תחתית הקירוי בזמן ביצוע החפירה.
  - העתקת תשתיות כאשר חלקם יועתק בזמן העבודות המקדימות.

#### סיכום

המאמר דן בתכנון מבנה תת קרקעי עמוק באזור אורבני צפוף (תחנה תת קרקעית), אשר בוצע במסגרת פרויקט ה"קופסאות" עבור מתקנים תת קרקעיים שלאורך התוואי התת קרקעי של הקו האדום, במסגרת פרויקט הרק"ל מטרופולין ת"א.

**במאמר זה הוצגו עקרונות תכנון כלליים, ללא כל התייחסות ספציפית לתחנה/קופסא מסוימת הממוקמת לאורך הקו המתוכנן וזאת עקב העובדה שפרוייקט זה נמצא בשלבי מכרז.**

התכנון הסופי לפרוייקט הקופסאות נמשך למעלה משנה ונמצא בימים אלו בהליך אישור סטטוטורי (הרשאה/היתר).

ראוי לציין כי עבור כל קופסא ניתן תכנון שונה עקב תנאי קרקע שונים, סביבה שונה, תשתיות שונות ומפלס מי תהום שונה.

עובי קירות הדיפון (הסלארי), עומקם, כמות התמיכות, צורת הקירוי ואופן ביצועו שונים ממתקן למתקן.

פרוייקט הקופסאות תוכנן על ידי מספר משרדי תכנון ובשיתוף צמוד של מנהלת הפרוייקט - חברת מסילות ובעזרת צוות מהנדסים מקבוצת "גדיש".

על מנת לבצע את הקירוי הזמני. תוך כדי מינימום סגירה של נתיבי הכביש.

**בתרשים מס' 3** ניתן לראות את שלבי הביצוע עד לגמר ביצוע המחפורת.

כפי שניתן לראות בשלב 1 בוצע כחצי קירוי המושען על קיר סלארי של ה"קופסא" מצד אחד ובצד השני על גבי יסודות זמניים (כלונסאות), בשלב זה נסגר קטע ברוחב כ-14 מ' מהכביש.

שלב 2 בוצע הצד השני של הקירוי לאחר הסטת התנועה.

שלב 3-8 הינם שלבי ביצוע המחפורת תוך כדי תמיכה אופקית בצניורות פלדה (struts) וקורות שפה (Wales), השפלת מי תהום וביצוע רצפת בטון (הכוללת עוגני קרקע באם נדרש על מנת להתגבר על לחץ מי התהום). תחתית החפירה בשלבים מבוצעת כ-1 מ' מתחת לתמיכות האופקיות.

חשוב לציין כי ביצוע המתקן התת קרקעי - "קופסא" כולל תאורה זמנית ותכנון הכביש בהתאם לשלבי הביצוע.

#### תשתיות

תכנון תשתיות עבור ביצוע מבנה תת קרקעי באזור אורבני צפוף מחייב תאום מערכות רטובות ויבשות בהתאם לשלבי התנועה והביצוע של ה"קופסא".

תכנון התשתיות נעשה על פי ארבע אופנים:

- תשתיות אשר ניתן לבטלן עד גמר ביצוע המתקן (כגון ניקוז כביש), תשתיות אלו יפורקו לפני ביצוע המתקן ויונחו מחדש לאחר גמר ביצוע הקירוי הזמני.
- תשתיות אשר באופן זמני יבוטלו בזמן ביצוע קירות הדיפון