

הנדון: חו"ד – השפעות קרינה אלמ"ג על מכשור מדעי במתחם אוניברסיטת בר אילן, מעל נתיב מטרו M2, החלופה הדרומית

סימוכין:

- (1) משרד התמ"ת, תקנה 5 לתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים), 1990
- (2) מפה מצבית של קמפוס אוניברסיטת בר אילן והחלופה הדרומית של המטרו M2.
- (3) תמצית פגיעה במעבדות המחקר וספי רגישות של מכשור באוניברסיטה, מסמך לשכת סמנכ"ל לתפעול בפקולטה למדעי החיים ומדעים מדויקים, 2020-13319 מיום 16.9.2020
- (4) מכתב בנושא ההשפעה הקשה של החלופה הדרומית של קו המטרו על אוניברסיטת בר אילן, לשכת נשיא האוניברסיטה פרופ' אריה צבן מיום 23.9.20
- (5) מסמך משה נצר (הח"מ) - חיזוי שטף השדה המגנטי בקו המטרו M2, 18 אוגוסט 2019

1. נתונים אדמיניסטרטיביים ותקציר מנהלים

1.1 מטרת המסמך

מתן מענה לחששות המובאות בסימוכין 3,4 באשר להפרעות אלקטרומגנטיות שתיגרמנה מהפעילות החשמלית של החלופה הדרומית של מטרו M2 שתעבור בסמוך לבנייני האוניברסיטה כמוצג במפה המצבית (סימוכין 2). המענה לחששות אוניברסיטת בר אילן, ניתן על פי תוצאות חיזוי שטף השדה המגנטי הסטטי והמשתנה בזמן מקו המטרו M2 שבוצע על ידי הח"מ (סימוכין 5). הנספח לחו"ד זו מציג את האומדנים התאורטיים של הפצת שטף שדה מגנטי סטטי וז"ח בזרם הנעה רגיל של המטרו ובזרם תקלה מרבי.

מזמינת חו"ד: גרונר ד.א.ל. מהנדסים בע"מ

1.2 מחבר המענה (מסמך זה)

אני נותן חוות דעתי זו במקום עדות בבית משפט ואני מצהיר בזאת כי ידוע לי היטב שלעניין הוראות החוק הפלילי בדבר עדות שקר, דין חוות דעת זו כשהיא חתומה על ידי, כדין עדות בשבועה שנתתי בבית המשפט.

אני מצהיר כי חוות דעת זו הוכנה על ידי לפי מיטב ידיעתי, הבנתי וניסיוני המקצועי ואין לי כל חלק או עניין בנכסים נשוא חוות דעת זו.

ואלה פרטי השכלתי וניסיוני המקצועי:

1. מוסמך הטכניון חיפה, בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה
2. עובד רפאל (א' מחקר בדירוג מחקר) כמהנדס תאימות אלקטרומגנטית, משנת 1976 עד 2011
3. אחראי בטיחות קרינה בלתי מייננת ברפאל במשך 33 שנה
4. יועץ קרינה בלתי מייננת עצמאי משנת 2011 עד הווה

1.3 תקציר מנהלים:

דוח זה מפרט את תוצאות האומדן התאורטי של צפיפות שטף השדה המגנטי הסטטי והמשתנה בזמן

במפלס הקרקע (at Grade) מעל ומצידי נתיב מטרו M2 המתוכנן. לכל בניין אשר רגישות המכשור שלו פורט במסמך סימוכין 3, ניתנה התייחסות ספציפית המסוכמת בטבלה להלן.

הערות	שטף שדה מגנטי משתנה בזמן (אדוות ז"ח) (1200Hz)	שטף שדה מגנטי סטטי מזרם קצר או עומס מרבי	שטף שדה מגנטי סטטי מזרם הנעה נורמלי	רגישות ציוד מדעי לשדות אלמ"ג	מרחק מהמטרו	בניין
	mG	mG	mG	mG	מ'	
לא נמצא במפה					לא ידוע	100
לא צפויה הפרעה	0.8μG	0.82	0.28	1-10mG ac אין נתוני dc	123	202
לא בוצעה השוואה – אין צורך	-	-	-	רגישות נמוכה	123	204
לא צפויה הפרעה	1μG	0.35	0.075	אין נתונים	111	205
לא צפויה הפרעה	5μG	3.7	1.0	10μG ac	49	206
אין ערך כמותי לא צפויה הפרעה	1.85μG	0.46	0.14	רגישות בינונית	82	207
	2.4μG	0.6	0.17	לא נתון	72	208
אין ערך כמותי תיתכן הפרעה	6.7μG	1.7	0.5	רגישות גבוהה	43	209
תיתכן הפרעה	7μG	1.8	0.52	1-10mG ac אין נתוני dc	42	211
לא בוצעה השוואה – אין צורך				רגישות נמוכה	5	212

לסיכום, לא צפויה הפרעה אלקטרומגנטית לציוד אלקטרוני מדעי רגיש בכל הבניינים למעט בניינים 209, 211, אשר לפי הנתונים מפעילים ציוד עם רגישות לשטף שדה מגנטי של 1-10μG (דורש בדיקה!).



איור 1: מפה מצבית של בנייני האוניברסיטה והמרחקים מקו המטרו

2. עמידה בשטף שדה מגנטי של ציוד אלקטרוני מדעי

מערכות אלקטרוניקה מדעיות ואלקטרוניקה בכלל אינן פגיעות לשדה מגנטי סטטי ולשדה מגנטי ELF שהם התוצרים העיקריים של החשמל המשמש להנעת המטרו. בעבר צגי מחשב מסוג שפופרת קרן קטודית היו רגישים לשטף שדה מגנטי גבה מ-5mG ונוצרה עקב כך תופעת ריצוד של המסך. עדיין יש מערכות מדעיות רגישות לשטף שדה מגנטי דוגמת מיקרוסקופ סורק אלקטרוני (SEM) היכול להיות רגיש לשטף שדה מגנטי נמוך כמו 2mG (rms). לפי סימוכין 3 הציוד המדעי באוניברסיטה רגיש לשטף שדה מגנטי נמוך מאוד עד כדי 1μG. ערך כה נמוך אינו סביר אלא אם כן הציוד הנדון מוגן בכלוב פאראדיי המונע משטף שדה מגנטי חיצוני רגיל שמקורו ממתקני החשמל וחווט החשמל של הבניין לחדור אל המכשיר. מאידך גיסא, אם קיים מיגון מגנטי על המכשור הרגיש אין כל סיבה לחשוש שהפעילות החשמלית של המטרו המפיצה שטף שדה מגנטי משתנה בזמן שאינו גבוה מ-7μG יצליח לשבש את הציוד המדעי שבוודאי כולל מעטפת הגנה מתאימה.

3. סיכום ומסקנות

חוו"ד זו מציגה את תוצאות החיזוי התאורטי של שטף השדה המגנטי במתחם המיועד למעבר של מטרו M2 בסמוך למבנים של האוניברסיטה בהם מופעל ציוד מדעי. צפיפות שטף השדה המגנטי הסטטי אינה יכול להוות גורם משבש ציוד שכן ערכו ביחס לשדה הסטטי הגיאומגנטי נמוך מ-1% ולכן אם הציוד המדעי לא רגיש לשדה הגיאומגנטי הוא בוודאי לא רגיש לשדה הסטטי שמקורו מהמטרו המוזן מזרם ישר. שטף השדה המגנטי המשתנה בזמן שמקורו מאדוות זרם של פחות מ-1% על גבי הזרם המיושר נמוך מאוד עקב מרחקו מהמקור. לבניינים 209, 211 שמרחקם מהיטל המטרו על הקרקע 42-43 מ' מגיע שטף שדה מגנטי מרבי ז"ח שהנו כ-7μG. שטף השדה המגנטי ברקע של כל בניין אורבני אינו נמוך מ-200μG, היינו אם הציוד רגיש לשטף שדה מגנטי של 1-10μG הוא בהכרח מוגן על ידי מיגון מגנטי ולכן גם מוגן בפני שטף השדה המגנטי המופץ מהמטרו. לחלק מהציוד יש נתון של רגישות לזרמים תועים. אין לכך משמעות מול נתוני המטרו שכן זרמים תועים הנוצרים בעומק של 17 מ' מתחת לקרקע אינם זורמים לגובה הקרקע. בנוסף, יש אופציה להניע את הרכבת עם פס רביעי המחזיר את כל זרם ההנעה של הרכבת דרך הפס הרביעי המבודד מהקרקע ולכן אין בעיית זרמים תועים (ראה נתונים נוספים בנספח א'-4).

ב ב ר כ ה ,

משה נצר - NCE

מהנדס תאימות אלמ"ג ובטיחות קרינה

היתר המשרד להגנת הסביבה: 2050-01-4

נספח א': אומדן תאורטי של שטף השדה המגנטי אשר יופץ לגובה פני הקרקע ממנהרת המטרו M2

1.א. שדות אלמ"ג מתוואי המסילה

בפרק זה מוצג אפיון תיאורטי של בטיחות שדות אלקטרומגנטיים לאדם והשפעות על ציוד אלקטרוני כתוצאה מפליטת הפרעות אלמ"ג פוטנציאליות מעל לתשתית הרכבת בנתיב המטרו M2. נתוני הזרמים של קו המטרו סופקו על ידי חברת Sistra.

1.1.א. קריטריונים לחשיפת אדם לשדות אלמ"ג

טווחי הבטיחות והתאימות האלמ"ג, כוללים קביעה של רמות חשיפה והמרחקים נדרשים למניעת קונפליקטים עם הנחיות המשרד להגנת הסביבה ובהתאמה לתקן האירופאי CENELEC EN 50121-2 בנושא פליטה אלמ"ג מתשתית הרכבת ומהרכבת.

צפיפות שטף שדה מגנטי בזרם ישר

(א) המשרד להגנת הסביבה אינו מגביל חשיפה לשטף שדה מגנטי סטטי (זרם ישר). ארגון הבריאות העולמי העוסק בהגבלת חשיפה לקרינה בלתי מייננת, ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ממליץ כי חשיפת קוצבי לב לשטף שדה מגנטי סטטי תהא מתחת ל-5Gauss או 5000mGauss, וחשיפת הציבור תוגבל ל-400mT או 4000Gauss.

(ב) תקנות משרד העבודה האמריקאי (ACGIH) מאמצות את קריטריון ICNIRP לחשיפה המותרת לקוצבי לב לשטף שדה מגנטי בזרם ישר. עם זאת, יצוין כי על פי התקן המקביל באירופה (EN50061) רמת החשיפה המותרת גבוהה פי שתיים - 10 גאוס. תקן משרד העבודה לציבור מקצועי ACGIH¹ ממליץ על חשיפה מרבית של כל הגוף לשדות מגנטיים הנוצרים בסביבת מקורות זרם ישר שלא תעלה על 600 גאוס.

(ג) במסמך זה, נערכה התייחסות לתקינה האמריקאית לחשיפה לשדות מגנטיים מזרם ישר (הן לנושאי קוצב לב והן לציבור) המחמירה יותר: 5 גאוס לנושאי קוצב לב ו-600 גאוס לציבור.

צפיפות שטף שדה מגנטי בתדר חילופין

תשתית רכבת המטרו אינה משדרת גלים אלקטרומגנטיים מכוונים בתדר רדיו. הווה אומר עוצמת קרינה הרדיו הנפלטת מהתשתית ומהרכבת ביחס לשדה הקרינה הבטיחותי על פי הנחיות ICNIRP² (ראו פירוט בהמשך) הנה חלשה מאוד ואינה מסכנת אדם. עקב הזרם הגבוה המניע את הרכבת ייווצר שטף שדה מגנטי גבוה יחסית בזרם ישר (שדה מגנטי סטטי) והואיל וזרם זה מיושר מזרם חילופין בתדר 50 Hz ימצאו גם מרכיבי שדה מגנטי בתדרים מאוד נמוכים – 50Hz עד 1200 Hz. פרט לתדר

¹ תקן American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), רמות חשיפה מומלצות לציבור מקצועי.

² ICNIRP - Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300GHz), ICNIRP - International Council for Non-Ionizing Radiation Protection, 25 November 2010.

הבסיס – 50 Hz ולאדוות של 300-1200Hz על קווי הכח העיליים לרכבת המטרו, כל שאר התדרים מייצרים עוצמה זניחה של שטף שדה מגנטי.
הנחיות ICNIRP מתייחסות לחשיפה לשטף שדה מגנטי בתדר חילופין עד לתדר 1Hz, הקרוב לתדר אפס של השדה המגנטי. על פי הנחיות אלו החשיפה המותרת לכלל הציבור לשדה בתדר זה - 400 גאוס. החשיפה המרבית המומלצת לכלל הציבור בתדר הרשת (חילופין) – 50 Hz על פי ICNIRP הנה 2000 גאוס ללא ציון מגבלת זמן (משמע מתייחס לחשיפה ארוכה של 24 שעות ביממה) ולציבור מקצועי ההמלצה להגבלת החשיפה מתייחסת לשטף שדה מגנטי של 5000 גאוס במהלך יום עבודה. המשרד להג"ס³, בהמלצה מספטמבר 2013 לספי החשיפה לכלל הציבור, הקטין את סף החשיפה לז"ח בתדר 50Hz לכדי 0.2% מסף החשיפה לפי ICNIRP, היינו לכדי 4mG בממוצע ליממה ולאזורי תעסוקה לסף של 8mG. בהתאם, במסמך זה תינתן התייחסות לקריטריון המחמיר של המשרד להג"ס. יצוין כי סף החשיפה של 4mG (4 מיליגאוס) המומלץ על ידי המשרד להגנת הסביבה מתייחס לזרם חילופין והנו ממוצע יומי בתנאי עומס אופייני מקסימלי, טווח הבטיחות המחושב במסמך זה של 0 מ' מתייחס לתנועה של שתי רכבות בכיוונים מנוגדים על שתי מסילות עם מיצוע יומי בעתיד (במסמך זה ללא שום מיצוע).

א.2 מילון מונחים

פס שלישי: הקו המזין את כל צרכני רכבת המטרו, כולל: מנועי ההינע, תאורה, מיזוג אוויר, מערכות שונות אחרות. מאפייני הפס השלישי הם: מתח זרם ישר של 1500V; זרם אופייני הנצרך על ידי שלוש קרונות - 1500 אמפר, בהתאמה להספק האופייני של 3000kW. זרם מרבי בעומס לזמן קצר (כ- 2 דקות) - 5145A; זרם קצר 6000A.
פס רביעי (אופציונלי): הפס משמש להחזרת הזרם המניע את רכבת המטרו במקום החזרת הזרם דרך הפסים. היתרון בשיטה זו, העדר זרמים תועים דרך הקרקע העלולים לגרום לקורוזיה של תשתיות מתכתיות טמונות.
קו זרם חוזר: המסילה מחוברת למוליכים המחוברים אותה לצד השלילי של מוצא הספקת המתח הישר, היינו פסי הרכבת מחזירים את רוב הזרם הישר למיישרים וכ- 5% מהזרם עלול לדלוף לאדמה.
תחנת משנה: תחנת המשנה להספקת המתח מוזנת ממתח ז"ח 22kV של חברת חשמל. חלק מהאנרגיה נמסר לצרכנים (תחנות וציוד עזר לאורך המסילה) כמתח 400V ז"ח תלת פאזי. להזנת מערכות ההינע בקרונות הרכבת מיושר המתח במוצא השנאים לקבלת המאפיינים הנדרשים לקו המתח העילי.
פנטוגרף: התקן המחליק לאורך הפס השלישי והעשוי כאלקטרודה בודדת המחובר בין קרון הרכבת למערכת החשמל ומאפשר הזנת מערכות החשמל של הרכבת תוך כדי תנועה או עמידה.
זרם תועה: (Stray Current): זרם אשר אינו עובר במוליך ובתוואי אשר יועד עבורו.
קורוזיה: תהליך אלקטרו-כימי, אשר גורם לחמצון מתכת ולהרס התכונות של החומר.
מיצוע בזמן של קרינה בתדר רדיו: יחידת הזמן המשמשת למיצוע צפיפות הספק הקרינה, לצורך השוואה עם תקני בטיחות קרינה. יחידת הזמן המקובלת על פי התקן בארץ (ICNIRP) – 6 דקות.
חשיפה מצטברת: משך הזמן המצטבר של החשיפה עולה על משך יחידת הזמן המשמשת למיצוע רמת צפיפות הספק הקרינה.

³ חשיפת האוכלוסייה לקרינה אלקטרומגנטית בתדר רשת החשמל, דף המשרד להג"ס באתר האינטרנט של המשרד, מתאריך 24.7.02.

גל אלמ"ג: הגל האלמ"ג מורכב משני רכיבים - רכיב השדה החשמלי ורכיב השדה המגנטי שני הרכיבים ניצבים זה לזה וניצבים לכוון התפשטות הגל. עוצמת הגל האלמ"ג נתונה ביחידות של צפיפות הספק שדה הקרינה (ראה להלן).
עוצמת שדה חשמלי (E): צפיפות השדה החשמלי מבוטאת ביחידות וולט למטר (V/m). עוצמת השדה החשמלי קטנה ביחס ישר להתרחקות הגל החשמלי מהמקור (האנטנה או המעגל המפיץ את השדה).
עוצמת שדה מגנטי (H): צפיפות השדה המגנטי מבוטאת ביחידות אמפר למטר (A/m). עוצמת השדה המגנטי קטנה ביחס ישר להתרחקות הגל המגנטי מהמקור (קו בודד המפיץ את השדה המגנטי). עוצמת השדה המגנטי יורדת ביחס הפוך למרחק בריבוע מלולאות כמו זו שבין קו ההזנה העילי והפסים המחזירים את הזרם בתשתית רכבת המטרו.
חשיפה לשדה קרינה: אדם נחשף לקרינה בתדר רדיו כאשר בגופו פוגע גל אלקטרומגנטי. חלק מהקרינה הפוגעת מוחזר (הגוף משמש כמראה), חלק נספג ברקמות הגוף וחלק מהקרינה עובר את הגוף בלא שיבלע ברקמות. כמות ההחזרה, הבליעה והמעבר של הקרינה תלויה בתדר הגל הפוגע ובזווית הפגיעה של הגל בגוף.
חשיפת כלל הציבור: חשיפת אדם לקרינת תדר רדיו באופן שאינו קשור באופן ישיר לתעסוקתו, כאשר האדם הנחשף אינו מודע לקיומה של הקרינה או אינו שולט על מקור השידור ואינו יכול לפיכך למנוע היחשפות לקרינה זו. במונח כלל הציבור כלולים תושבים, עובדים, מבקרים, המתגוררים או שוהים במסגרת פעילותם בסמוך לתשתית רכבת המטרו.
טווח בטיחות (בין המסילה לאדם): המרחק המזערי מהמסילה במטרים, על פני הקרקע בו רמת שדה הקרינה שווה או נמוכה מספי החשיפה המוגדרים בתקן בטיחות קרינה או על פי הנחיות המשרד להג"ס.
טווח השפעה על ציוד אלקטרוני: המרחק המזערי מהמסילה במטרים בו רמת שטף השדה המגנטי נמוכה מרמת הפגיעות הידועה של התקני קרן אלקטרוניים חופשיים וציוד אלקטרוני בכלל.

א.3. אומדן שטף השדה המגנטי הסטטי וזרם חילופין

א. כלים לביצוע אנליזה של שדות אלמ"ג

תוכנת מחשב MMI משמשת לניתוח שפיעת שטף השדה המגנטי מקווי כוח עיליים, שנאים, קווי צבירה חשמליים וארונות חשמל למקורות הספק חשמלי זרם ישר, זרם חילופין, חד פאזי ותלת פאזי. חבילת התוכנה הנה תוכנה בדוקה, אשר פותחה על ידי מהנדס אורן הרטל אשר ביצע יחד עם משה נצר תסקיר סביבה אלמ"ג לרכבת הקלה בירושלים, תל אביב, ונצרת וחשמול רכבת ישראל.

ב. מאפייני מערכות החשמל

המאפיינים החשמליים של המטרו נלקחו מתוך מסמך Feasibility Study של חברת Metro: Systra Network System Feasibility Study Report, FEA Traction Power Simulation - M3, Dated 20/12/2018

המאפיינים העיקריים של אספקת הכוח לרכבת המטרו ותשתית המסילה מפורטים להלן:

- פס שלישי (+): אספקת זרם ישר במתח של 1500 V.
- פס רביעי (-): הפס המחזיר את הזרם לתחנת המיישרים.
- זרם אופייני הנצרך על ידי שלוש קרונות - 1500 אמפר, בהתאמה להספק האופייני של 3000kW.
- זרם מרבי בעומס לזמן קצר (כ- 2 דקות) - 5145A.
- זרם קצר 6000A (מספר שניות).
- גובה הפס השלישי מעל למסילה - 0.5 מ'.
- רוחב הפסים - 1.52 מ'.
- מרחק בין שתי מערכות פסים מקבילים - 4.2 מ'.
- עומק מינימלי של פסי המסילה מתחת לקרקע 16 מ'. עומק זה נלקח כמייצג לכל אורך קו המטרו.

זרמי הרכבת:

- קטנרי: 100%
- פס ימני: 47.5%
- פס שמאלי: 47.5%
- זרמי אדמה: 5% (0% אם קיים פס רביעי)
- קו מחזיר עילי: 0%
- קו מתח גבוה תת קרקעי: 0%

חישוב שטף השדה המגנטי ממערכות הרכבת - מוצג באיורים א-2 עד א-7 בהמשך.

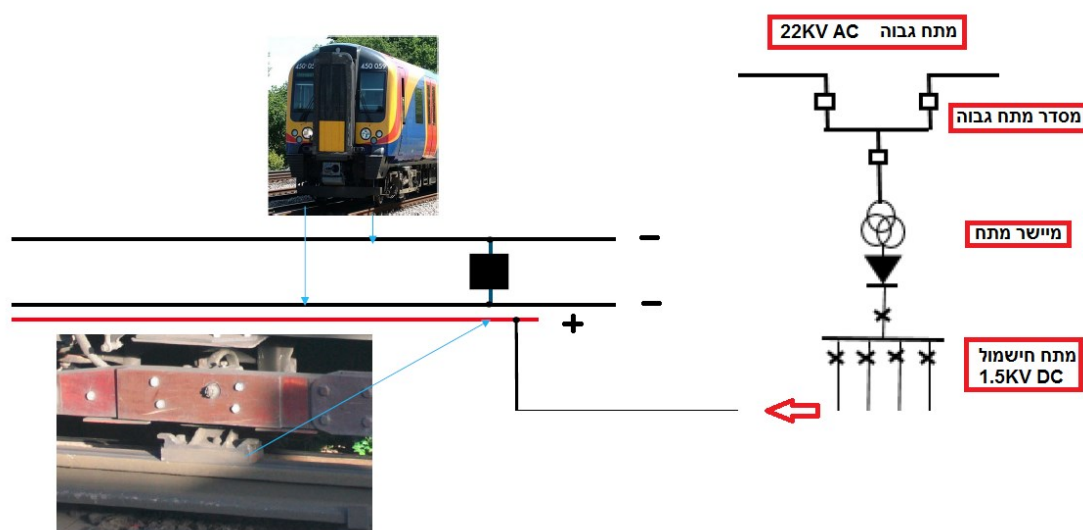
ג. תצורות של פעילות רכבת המטרו

רכבת המטרו מצויה בתת הקרקע בעומק של 17m

- שתי רכבות הנוסעות בכיוונים מנוגדים במנהרה (מצב שכיח)
- שטף שדה מגנטי סטטי אופייני
- שטף שדה מגנטי סטטי שיאי (כ- 2 דקות)
- שטף שדה מגנטי ז"ח אופייני (0.92% מהזרם הישר האופייני), היינו 13.8 אמפר.
- מאפייני הזרם נלקחו מתוך מסמך Systra. מאפיינים עיקריים:
 - זרם rms מרבי למשך דקה אחת: 1715A
 - זרם rms מרבי למשך שעתיים: 1494A
 - ההספק הנומינלי של המיישר הנו 3000kW והזרם הנומינלי בהתבסס על מתח של 1500V הנו 2000A.
 - בהתבסס על התקנים IEC 62590 ו- IEC 62695 זרמי היתר הצפויים:
 - זרם יתר למשך שעתיים למיישר VI שווה ל- 1.5 פעמים הזרם הנומינלי, היינו ל- 3000A
 - לפי הסימולציה של ביקוש הזרם על ידי המטרו הזרם המרבי לשעתיים הצפוי הנו 1494A, היינו מתחת לגבול של 3000A.
 - זרם היתר למשך דקה של מיישרים Class VI שווה ל- 3 פעמים הזרם הנומינלי, היינו ל- 6000A. עלפי הסימולציה זרם היתר המרבי rms למשך דקה הנו 1715A שהנו נמוך מהגבול העליון של 6000A.
 - אומדן זה בוצע למיישר עם הספק נומינלי של 3000kW.
- מצב תקלה בו יהיה קצר חשמלי למשך זמן קצר על קו מסילה בודד (מספר שניות) יכול להזרים בקטנרי זרם ישר של 6000A. חלוקת הזרם בין המוליכים, בצורה פשוטה, כאשר המסילה מבודדת מהקרקע, היא שהפס השלישי נושא את הזרם בכיוון מהתחמ"ש לרכבת והפסים מחזירים את הזרם ל TTR בחלוקה שווה בין פס ימין ושמאל. אחוזי הזרם בכל מעגל מוצגים בסעיף א לעיל. אם קיים פס רביעי, כל הזרם החוזר ל- TTR זורם דרכו.
- קו הזרם החוזר מתבסס על חיבור המסילה לקו החזרה (return) של מוצא אספקת המתח הישר בתחנת המשנה. במקביל לקו המסילה יש לעיתים עיבוי של שטח החתך של כבלי נחושת להקטנת ההתנגדות החשמלית של מסלול הזרם החוזר והקטנת הזרמים התועים.

ד. חשמל במתח נמוך לשירותי חשמל בתחנה

עבור חשמול רכבת חשמלית בהספק גדול יחסית (3MW) לתחנה, קיים צורך בחיבור חשמל (מקור הזנה) במתח גבוה.
עפ"י מידע בסיסי שנתקבל מחברת SYSTRA מטעם נת"ע, תכנון חיבור חשמל במתח גבוה יוזמן בשתי קטגוריות בלתי תלויות אחת בשנייה, אחת תהיה ייעודית לשירותי חשמל לתחנות והשנייה תהיה ייעודית לחשמול המטרו כמוצג באיור קווי להלן.
להלן תיאור כללי למערך חשמול המטרו מהזנה במתח גבוה עד לחיבור מתח חשמול 1.5KV DC לפסי המטרו:



ניתן לראות שמערך החשמול כולל:

- 1- מסדר מתח גבוה (מתח AC)
- 2- מיישרים (שנאי עם ליפוף כפול במוצא + דיודות יישור מתח)
- 3- לוחות חלוקה והזנה חשמלית במתח ישר
- 4- פסי הולכה וחשמול המטרו לאורך התוואי

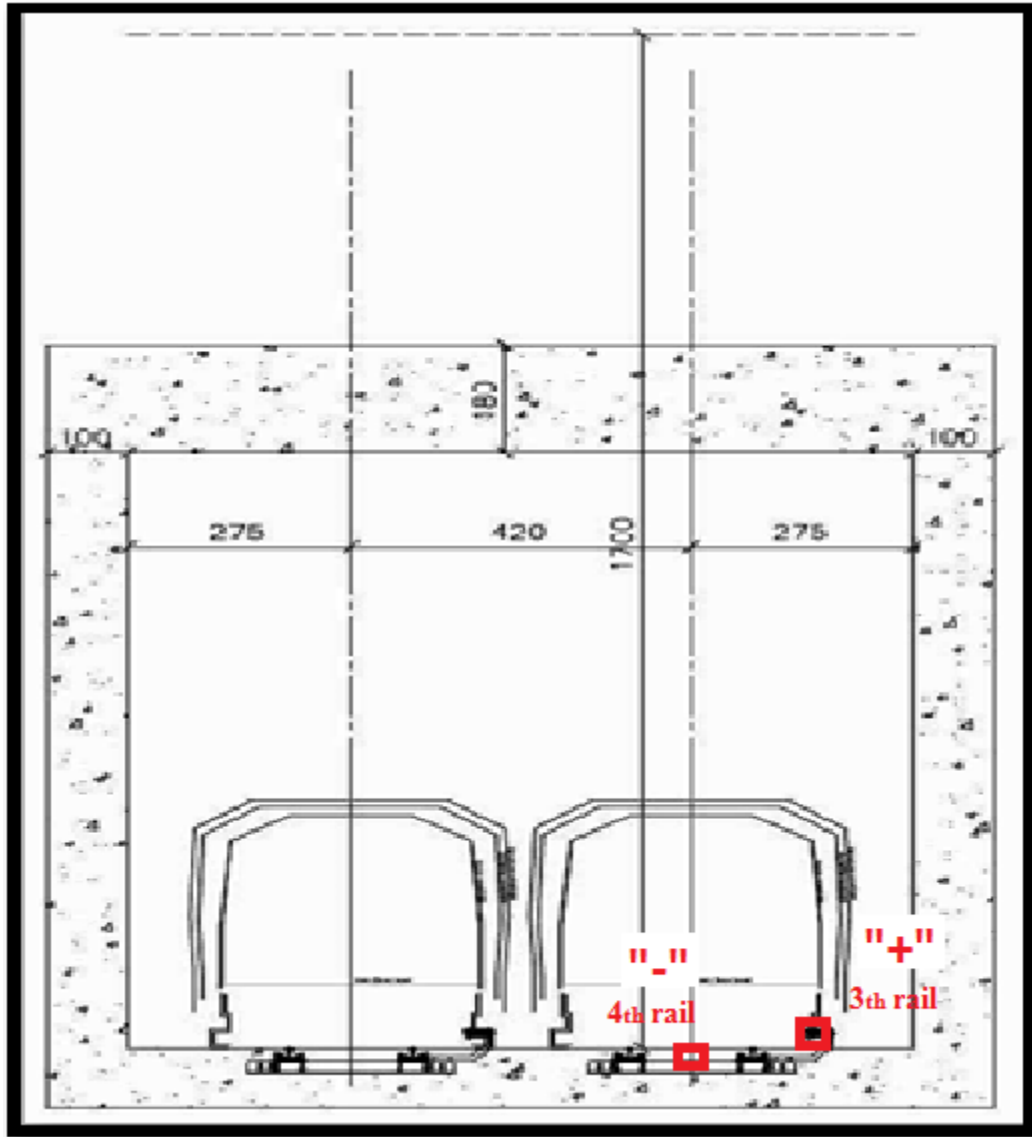
ה. מאפיינים גיאומטריים

איור א-1 מציג חתך סכמתי של רכבת המטרו בתת הקרקע. הנחת העבודה הינה שהעומק המזערי בין פני הקרקע למסילת הרכבת הינו 16 מ' (נמוך מהעומק המוצג באיור).

קיימות שתי אופציות להחזרת הזרם לתחנת היישור של המטרו:

מערכת 3 פסים: פס הזנה חיובי (+) ושני הפסים עליהם נעה רכבת המטרו המחזירים את הזרם לתחנת היישור 2 X (-)

מערכת 4 פסים: קיים פס רביעי מקביל לפס השלישי המיועד להחזרת הזרם לתחנת היישור.
הפסים עליהם נעה רכבת המטרו משמשים רק כמשטח הסעה ולא להחזרת הזרם.



איור א-1: חתך סכמתי של רכבת המטרו בתת הקרקע (3 פסים ו- 4 פסים)

ו. אומדן שטף השדה המגנטי

החישוב נעשה בזרם ישר, לבחינת השפעה על קוצבי לב, של שדה מגנטי סטטי כאשר סף הרגישות של קוצבי לב המקובל לפי ACGIH הוא 5Gauss; האומדן לשטף שדה מגנטי שמקורו בזרם החילופין של אדוות היישור על גבי הזרם הישר הושווה להמלצות המשרד להגנת הסביבה לסף של 4mG (המתייחס לזרם חילופין) בממוצע ליממה. תדירות האדוות בהנחה של קיום מיישרים עם 24 דיודות הנו 1200Hz.

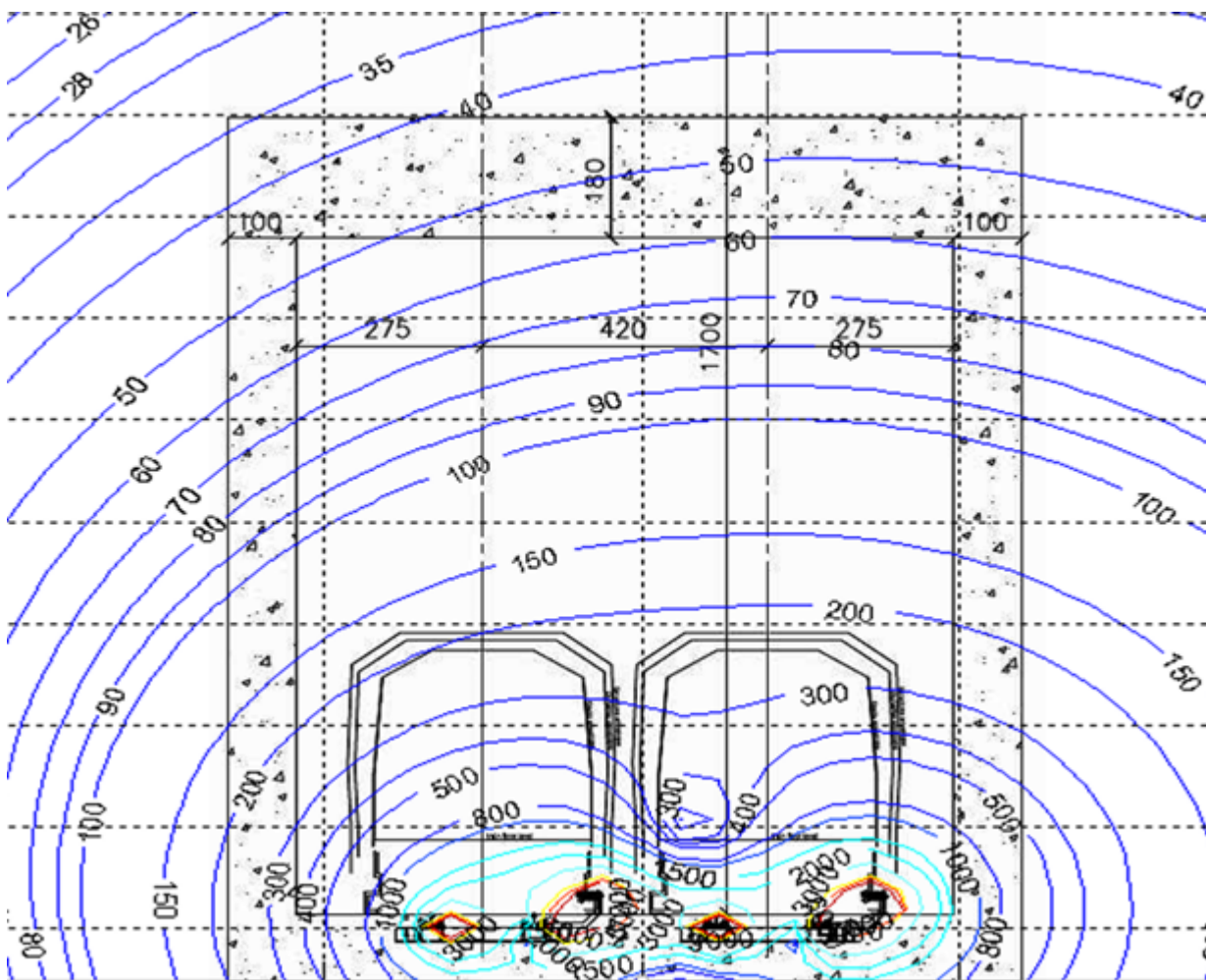
התחשיב של שטף השדה המגנטי מהמסילה נעשה לשתי רכבות, אחת בכל כיוון, על שתי המסילות המוצגות באיור א-1. האומדן של שטף השדה המגנטי נעשה ביחס לדרישות הגבלת חשיפת אדם לשטף זה, כרשום בחוק הקרינה הבלתי מייננת 2006. בחוק הקרינה אין, כיום, סף מחייב. סף החשיפה המומלץ בזרם מרבי ממוצע הנו 4mG ביממה.

היות והתחשיב, המוכוון להמלצות המשרד להגנת הסביבה, מתייחס לממוצע החשיפה ביממה, יש לחשב ממוצע זה מתוך תכנית ההיסעים הצפויה של רכבת המטרו שעדיין לא נמסרה לנו.

א.3.1 שטף השדה המגנטי המחושב למערכת של 3 פסים

א. איור א-2 מציג את שטף השדה המגנטי בזרם ישר של 1500A לשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים (מצב שכיח) על רקע חתך המנהרה. מתוך האיור ניתן לראות ששטף השדה המגנטי הסטטי המרבי – בגובה 1 מ' מעל פני הקרקע (17 מ' מעל המסילה): 40mG (40 מיליגאוס) כלומר, השדה המגנטי הסטטי המרבי עומד בקריטריון 5 גאוס לקוצבי לב.

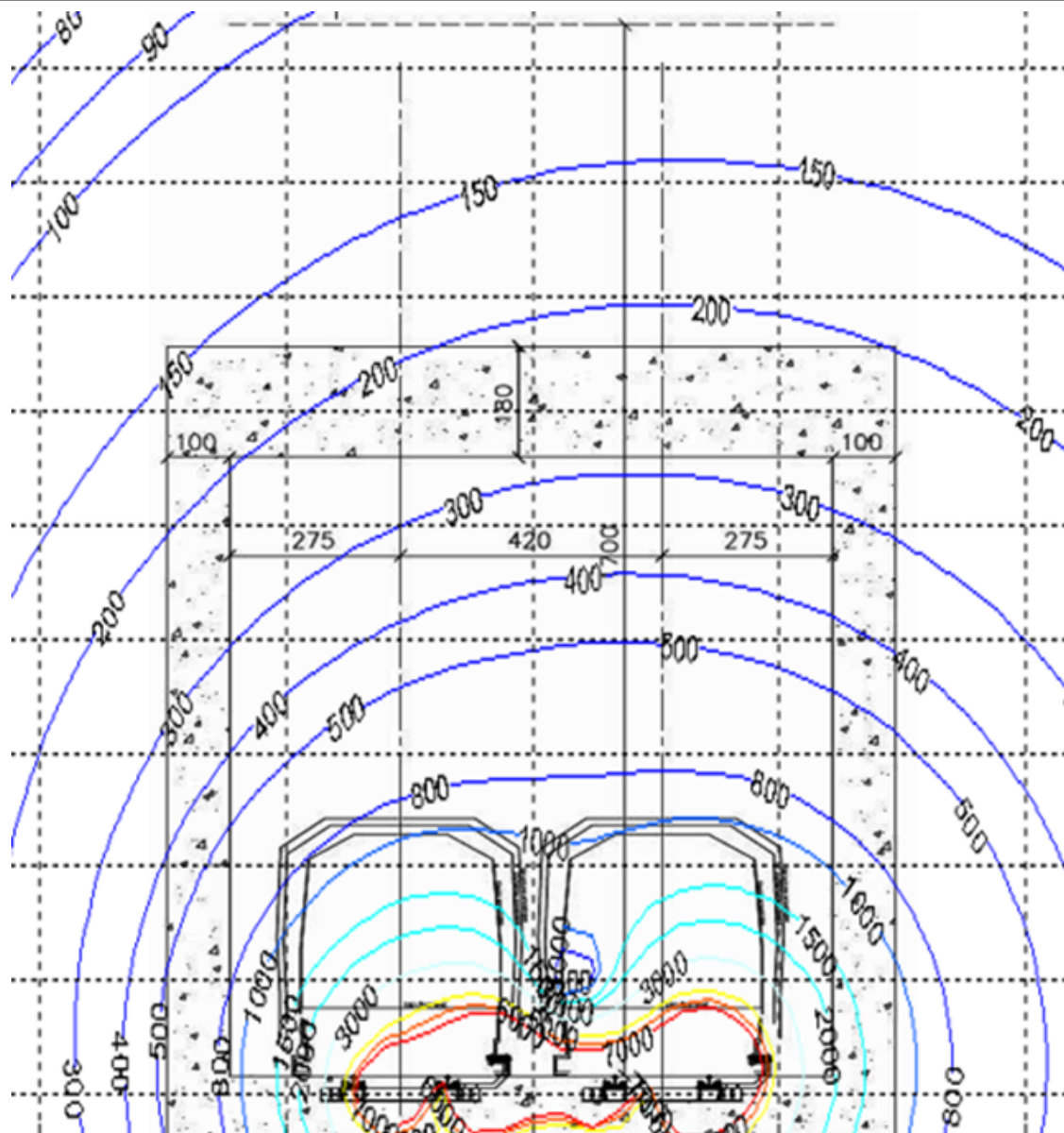
ב. שטף שדה מגנטי בזרם ישר של 1500A (מצב שכיח)



איור א-2: שטף השדה המגנטי בזרם ישר של 1500A על רקע חתך המנהרה

ג. שטף שדה מגנטי בזרם ישר שיאי של 5145A:

איור א-3 מציג את שטף השדה המגנטי בזרם ישר שיאי של 5145A לשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים על רקע חתך המנהרה. מתוך האוורים ניתן לראות ששטף השדה המגנטי מעל המנהרה הינו נמוך מסף החשיפה לקוצבי לב (5000mG), היינו אינו גבוה מ-200mGauss, בזרם קצר של 5145A.



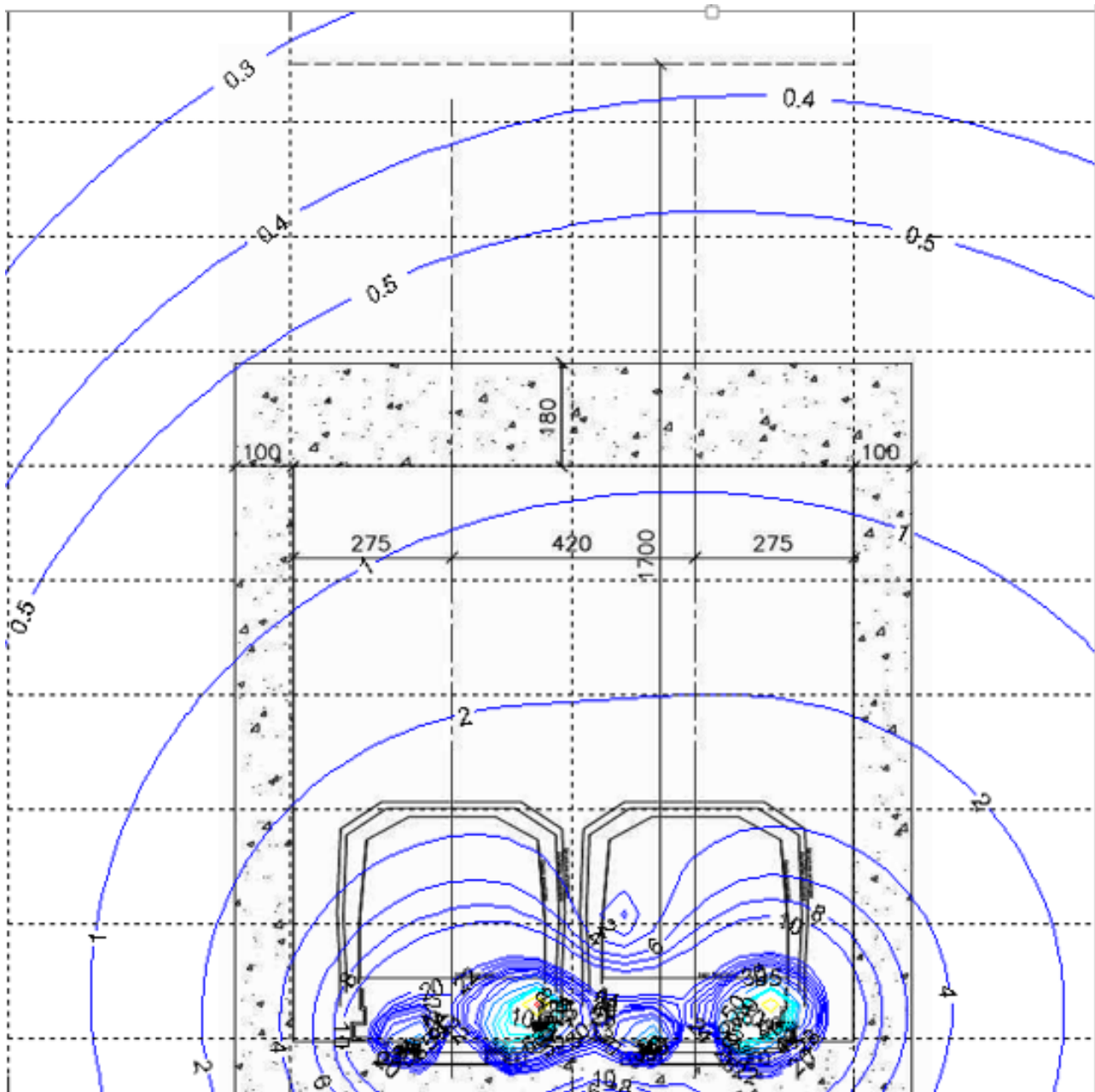
איור א-3: שטף השדה המגנטי בזרם ישר שיאי של 5145A על רקע חתך המנהרה

ד. שטף שדה מגנטי באדוות של זרם ישר של 1500A (ז"ח 13.8A):

איור א-4 מציג את שטף השדה המגנטי בממוצע יומי, בזרם אדוות של 13.8A בשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים, עם זרם של 1500A. מתוך האיור עולים הממצאים הבאים לגבי שטף השדה המגנטי מעל פני הקרקע:

השטף בפני הקרקע (מעל המסילה): הגובה מעל פלטפורמת המסילה בו התקבל שטף שדה מגנטי של 4mG הוא למעשה גובה גג המנהרה, כ- 8 מ' מתחת לפני הקרקע. אין צורך למפות את נתיב מסילת המטרו לצורך איתור קונפליקטים, שכן מעל פני הקרקע שטף השדה המגנטי יהיה נמוך מאוד ובקושי 0.1mG שהוא נמוך מאווירת הרקע האופיינית. רכבת המטרו תימצא בתנועה בעומס מירבי של 1500A במנהרה. בשטף שדה מגנטי זה לא צפויות הפרעות למערכות אלקטרוניות רגישות.

כאמור, שטף השדה המגנטי מצטמצם ל- 4mG בזרם ממוצע יומי כבר בתוך המנהרה של המטרו כ- 8 מ' מתחת לפני הקרקע, ועל כן, לא קיימות מגבלות כלשהן מעל פני הקרקע.

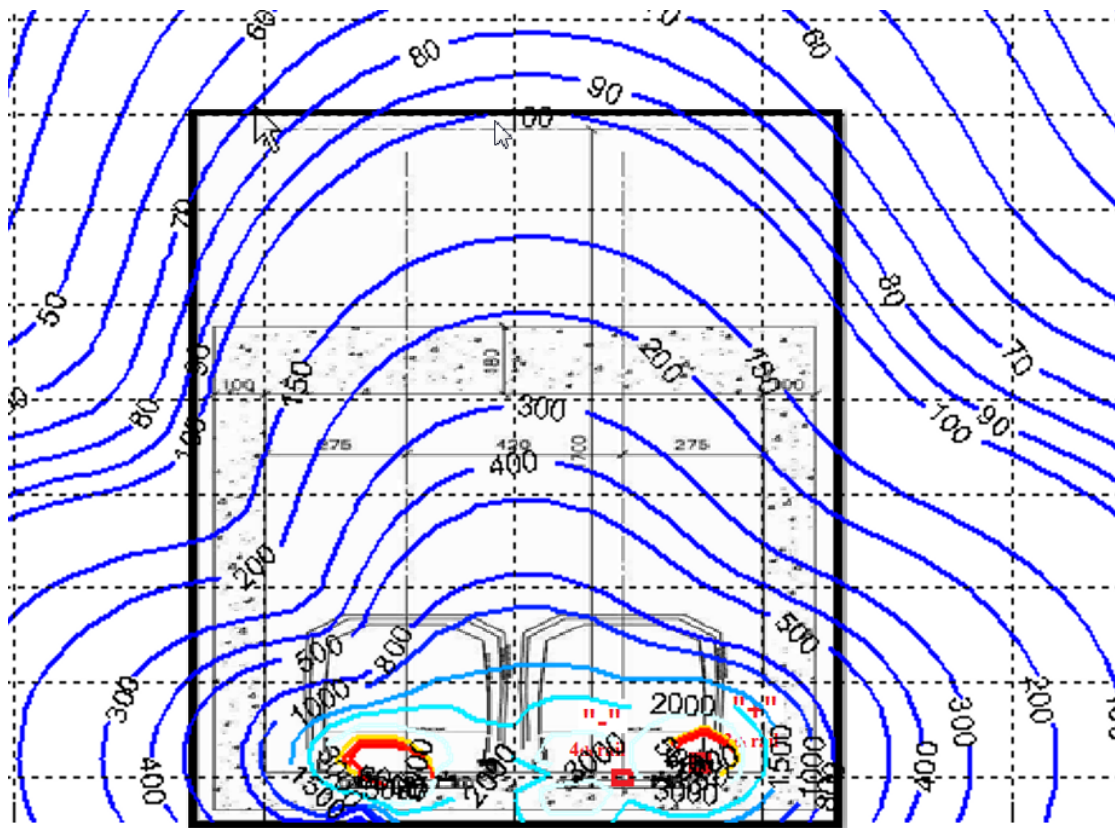


איור א-4: שטף השדה המגנטי בזרם חילופין על רקע המנהרה

א' 2-3: שטף השדה המגנטי המחושב למערכת מטרו של 4 פסים

(א) שטף שדה מגנטי בזרם ישר של 1500A (מצב שכיח):

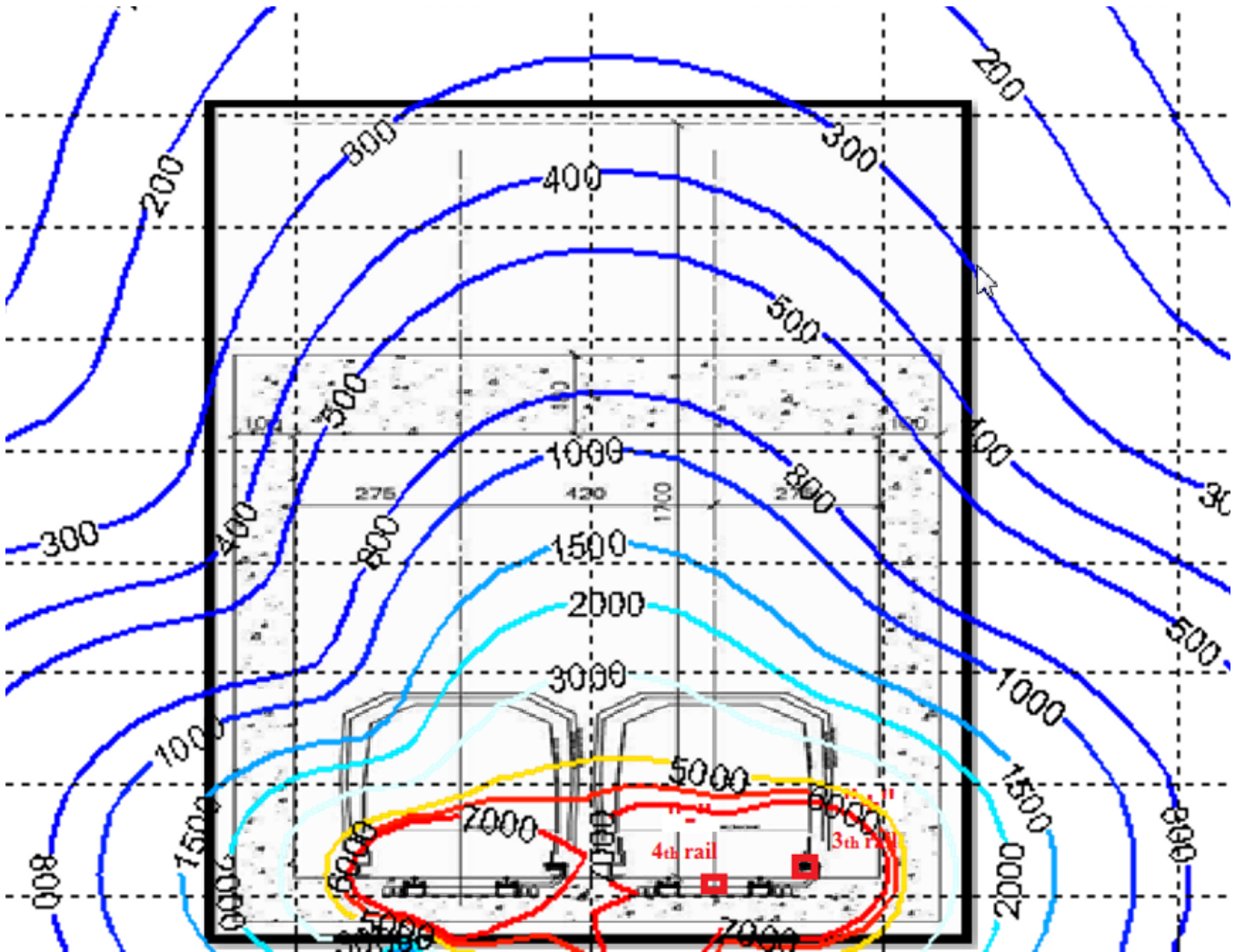
איור א-5 מציג את שטף השדה המגנטי בזרם ישר של 1500A לשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים (מצב שכיח) על רקע חתך המנהרה. מתוך האיור ניתן לראות ששטף השדה המגנטי הסטטי המרבי – בגובה 1 מ' מעל פני הקרקע (17 מ' מעל המסילה): 90mG (90 מיליגאוס), היינו שטף שדה המגנטי הסטטי המרבי עומד בקריטריון 5 גאוס



איור א-5: שטף השדה המגנטי בזרם ישר אופייני (4 פסים) על רקע המנהרה

(ב) שטף שדה מגנטי בזרם ישר שיאי של 5145A:

איור א-6 מציג את שטף השדה המגנטי בזרם ישר שיאי של 5145A לשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים, על רקע חתך המנהרה. מתוך האיור ניתן לראות ששטף השדה המגנטי הסטטי בכל מקום מעל המנהרה אינו גבוה מסף החשיפה לקוצבי לב (5000mG); שטף השדה המגנטי הסטטי אינו גבוה מ-300mGauss, בזרם קצר של 5145A.

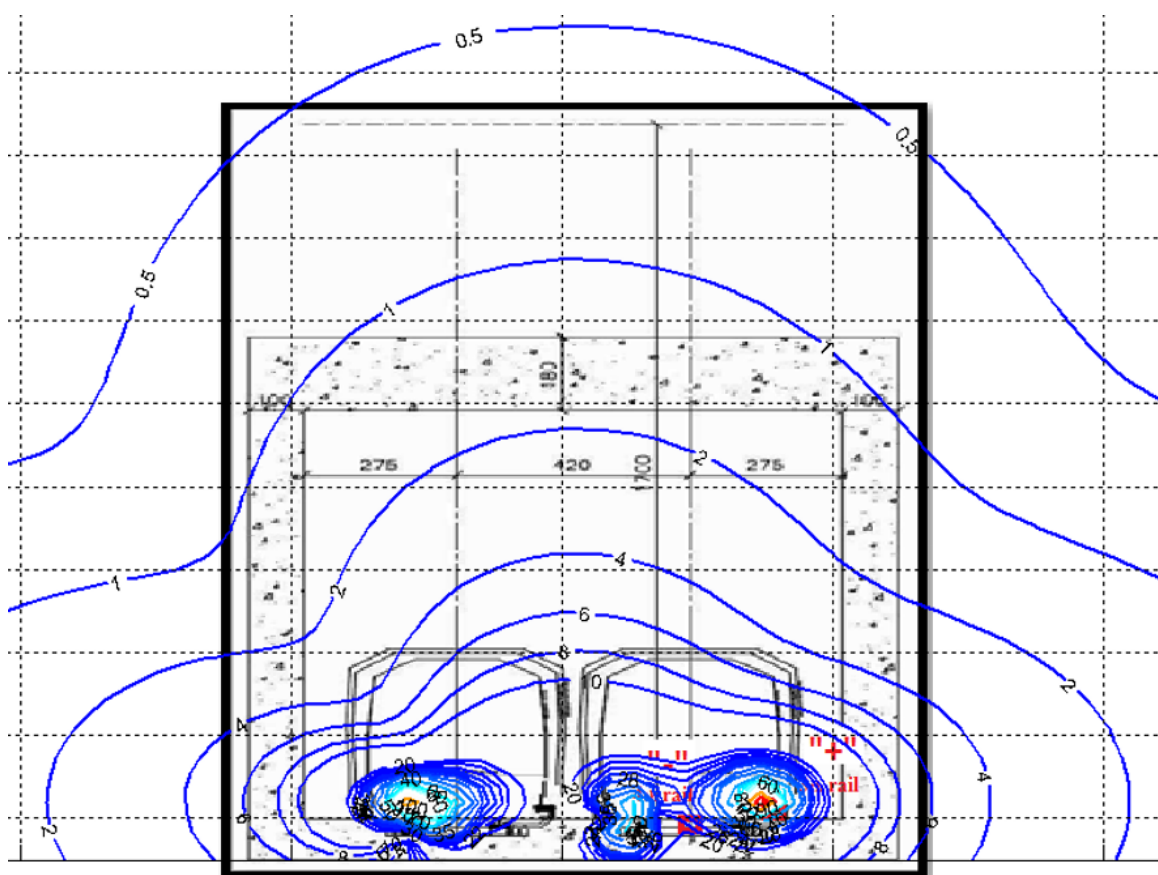


איור א-6: שטף השדה המגנטי בזרם קצר ישר, 4 פסים, על רקע המנהרה

ג) שטף שדה מגנטי באדוות זרם ישר של 1500A (ז"ח 13.8A) במערכת של 4 פסים:

איור א-7 מציג את שטף השדה המגנטי בממוצע יומי, בזרם אדוות של 13.8A בשתי רכבות הנעות בכיוונים מנוגדים, עם זרם של 1500A במערכת של 4 פסים. מתוך האיור עולים הממצאים הבאים לגבי שטף השדה המגנטי מעל המנהרה על פני הקרקע:

השטף בפני הקרקע (מעל המסילה): הגובה מעל פלטפורמת המסילה בו התקבל שטף שדה מגנטי של 4mG הוא כ- 8 מ' מתחת לפני הקרקע. אין צורך למפות את נתיב מסילת המטרו לצורך איתור קונפליקטים, שכן מעל פני הקרקע שטף השדה המגנטי יהיה נמוך מאוד ובקושי 1mG שהוא נמוך מאווירת הרקע האופיינית. רכבת המטרו תימצא בתנועה בעומס מירבי של 1500A במנהרה.



איור א-7: שטף השדה המגנטי בזרם אדוות במערכת של 4 פסים, על רקע המנהרה של המטרו

א'-4 סיכום ומסקנות

(א) מערכת המבוססת על 3 פסים

- שטף שדה מגנטי בזרם חילופין- טווח הבטיחות מעל הקרקע הוא 0 מ' לכן אין שום מגבלות. לא צפויות הפרעות למערכות אלקטרוניות במרכז המדעי.

- שטף שדה מגנטי ישר- שטף השדה המגנטי מעל הקרקע נמוך מ- 35mG ואין לו שום השפעה על אדם וציוד.

(ב) מערכת המבוססת על 4 פסים

- שטף שדה מגנטי בזרם חילופין- טווח הבטיחות מעל הקרקע הוא 0 מ' לכן אין שום מגבלות. לא צפויות הפרעות למערכות אלקטרוניות במרכז המדעי.

- שטף שדה מגנטי ישר- שטף השדה המגנטי מעל הקרקע נמוך מ- 90mG ואין לו שום השפעה על אדם וציוד.

(ג) זרמים תועים

זרמים תועים (Stray Currents) הינם זרמים הנגרמים כאשר ההספק החשמלי הנוצר להזנת קווי המטרו זולג לקרקע ולכל מבנה מתכתי בסביבתו, במקום לחזור לשנאי דרך פסי הרכבת או הפס הרביעי המיועדים לשמש כמוליכי זרם חוזר למקור ההזה עפ"י התכנון. שימוש בפס הרביעי ימנע לחלוטין את תופעת הזרמים התועים.

זרמים תועים עשויים לייצר קורוזיה מואצת בתשתיות מתכת הסמוכות לקווי המטרו. התופעה מוכרת בעולם בפרוייקטים מסוג המטרו, שכן קווי המטרו עוברים בסמוך למבנים המכילים קונסטרוקציה מפלדה ומערכות מתכתיות נוספות: צנרת מים, מיכלי מתכת ועוד.

המסילה המתוכננת ומערכות המטרו תהיינה במנהרת בטון המבודדת בהיבט החשמלי (כך שזרמים חוזרים עוברים בתוך חלל המנהרה כמתוכנן). למרות זאת, קיימת אפשרות לקליטת ופליטת זרמים לא מבוקרת (זרמים תועים) לפלדת מבנים/מערכות מתכתיות הנמצאים בצמידות/קרבה גבוהה (עשרות מ' או פחות) למוליכי הזרם, דבר העשוי ליצור קורוזיה מואצת של תשתיות סמוכות אלו. על מנת למנוע אפשרות של פגיעת זרמים תועים ינקטו הפעולות הבאות (אמצעים עקרוניים – האמצעים בפועל יקבעו בתכנון המפורט לאחר השלמת נתוני תכנון נדרשים, כמקובל):

תכנון שכבה של רשת השוואה פוטנציאלית (Stray current collection rebars in track slab) מתחת לפסי הרכבת, אשר תהווה העדפה לכל זרם שמתפתח במסלול החזרה לנקודת ההזנה (כלומר תקלוט זרמים טרם הגעתם לתשתית מתכתית סמוכה), ובפרט לזרמים תועים, ולאחר מכן תעביר אותם לנקודת הארקה או פתרון אחר.