

בטיחות במנהרות רכבת

איג' יעקב פרידמן

מהנדס בטיחות אש M.S.F.P.E

פרידמן הנדסת בטיחות אש בע"מ

מבוא

בתקן ת"י 5435 אשר הינו אימוץ של תקן NFPA 130 (מהדורת 2000) האמריקאי, הוספו שינויים: חלקם במטרה להתאימו למערכת התקנים הנלווים האחרים החלים בישראל, חלקם על מנת להמציא פתרונות לסעיפים שבהם היה לרשות המוסמכת בתקן האמריקאי סמכות לקבוע את הפתרון וחלקם תוספות במטרה לשפר את מערך הבטיחות. ייחודו של התקן הנו ברמת הירידה לפרטים: כיסוי מכלול התחומים הכלולים במערכת רכבתית לרבות חציית הדיסציפלינות לרוחב, שיטות חישובי המילוט המדעיות המתקדמות והמוכחות (אשר אינן מופיעות בתקנים אחרים) והדרישה לשימוש בכלים חישוביים מדעיים כדוגמת CFD (Computational Fluids Dynamics) לסימולציות שריפות להוכחת הימצאות תנאי סף למילוט עצמי. כל אלה הופכים את התקן למתקדם ביותר מבין כל התקנים בתחום הבטיחות במבנים והגנה נגד אש.

על אף ולמרות ייחודו של התקן, מוצבים בפני מהנדס בטיחות האש אתגרים ביישומו בפרויקטי מנהור, להשגת רמת בטיחות מתאימה יותר לפרויקט מאשר רמת המינימום שהתקן מגדיר.

היבטים תכנוניים עיקריים לניתוח הנדסי



1. קביעת תצורת המנהרה

תקן ת"י 5435 לא קובע את תצורת המנהרה. חתך המנהרה צריך להיקבע כחלק מניתוח הנדסי מקיף של צוות התכנון לרבות מהיבטי בטיחות. קונפיגורציות המנהור העיקריות הן:

א. מנהרה כפולה

שתי מנהרות מקבילות שבהן מסילה אחת בכל מנהרה וביניהן פרוזדורי מילוט במרווחים של עד 250 מ'.



יתרונות:

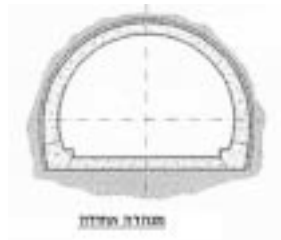
- אין אירועים המערבים שתי רכבות נגדיות.
- ברוב המקרים ישנה אפשרות יציאה למדרכות מילוט משני צידי הרכבת ועקב כך שיפור בזמן המילוט מהרכבת (מקום השריפה בד"כ).
- מילוט אופקי נח למנהרה מקבילה שמשמשת כמקום בטוח.
- ניתן ליישם בתוואי שאינו מאפשר גישה דרך יציאות חירום כל 380 מ'.

חסרונות:

- איגום לעשן קטן יחסית מעל לגובה 2.5 מ', עובדה אשר יכולה להשפיע לרעה בדקות הראשונות עד כניסת מערכת השליטה בעשן להספק מלא.
- חוסר גישה לכבאים מכיוון שאין יציאות חירום לחוץ, עובדה המחייבת מתן נגישות לרכבי חירום וכיבוי במנהרות שבקצותיהן יש פורטלים או התקנת פלטפורמות מסילתיות בקצוות רציפי התחנה ליד הכניסה למנהרות שבקצותיהן תחנה.

ב. מנהרה אחודה

מנהרה אחת הכוללת 2 מסילות ויציאות חירום החוצה במרווחים שאינם עולים על 380 מ'.



יתרונות:

- שטח חתך מנהרה גדול יחסית יוצר נפח איגום לעשן גדול יחסית מעל לגובה 2.5 מ', עובדה אשר יכולה להשפיע לטובה בדקות הראשונות עד לכניסת מערכת השליטה בעשן להספק מלא.
- גישה ישירה למנהרה מהחוץ דרך יציאות החירום עבור הכבאים.
- אין צורך בנגישות רכבים על גבי מיסעת הרכבת.

חסרונות:

- יציאה לצד אחד בלבד (מהרכבת למדרכה הקרובה) - מאט את זמן המילוט מהרכבת.
- יתכן אירוע המערב שתי רכבות נגדיות.
- מילוט כלפי מעלה.

ג. מנהרה בעלת קיר הפרדת אש במרכזה

שתי מנהרות מקבילות שבהן מסילה אחת בכל מנהרה וביניהן פרוזדורי מילוט במרווחים של עד 250 מ'.



- ניתן להתקין קיר אש להפרדה של 2 המסילות ולמניעת אירוע של 2 רכבות נגדיות.

- חסרונות:

- יציאה לצד אחד בלבד (מהרכבת למדרכה הקרובה)- מאט את זמן המילוט מהרכבת.
- יתכן אירוע המערב שתי רכבות נגדיות.

ה. מנהרה כפולה ומנהרת שירות וחילוץ מקבילה

מנהרה כפולה ומעברי מילוט במרווחים של עד 250 מ' למנהרה מקבילה שמשמשת לנסיעת רכבי חילוץ והצלה.



- יתרונות:

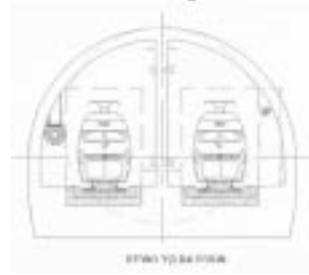
- אין אירועים המערבים שתי רכבות נגדיות.
- ברוב המקרים ישנה אפשרות יציאה למדרכות מילוט משני צידי הרכבת ועקב כך שיפור בזמן פינוי הרכבת (מקום השריפה בד"כ).
- מילוט אופקי נח למנהרה מקבילה שמשמשת כמקום בטוח.
- ניתן ליישום בתוואי שאינו מאפשר גישה דרך יציאות חירום כל 380 מ'.
- גישה ישירה למנהרת החילוץ עבור הכבאים והגעה מהירה יחסית למקום האירוע.
- אין צורך בנגישות רכבים על גבי מיסעת הרכבת.
- מילוט אופקי נח למנהרה מקבילה שמשמשת כמקום בטוח.
- ניתן ליישום בתוואי שאינו מאפשר נגישות רכבי כיבוי ע"ג מיסעת הרכבת, או במנהרות ארוכות מאד.

- חסרונות:

- איגום לעשן קטן יחסית מעל לגובה 2.5 מ', עובדה אשר יכולה להשפיע לרעה בדקות הראשונות עד לכניסת מערכת השליטה בעשן להספק מלא.

2. מילוט

קביעת תצורת המנהרות בפרויקט אינה סוף פסוק בקביעת סידורי המילוט אלא נקודת התחלה בנייתו ההנדסי הכולל חישובי מילוט. התקן ישראלי ת"י 5435 אינו מחייב ניתוח זה ומסתפק בקביעת מרווחי המקסימום של היציאות בהתאם לקונפיגורציה שנבחרה. התקן קובע דרישות מינימום או מקסימום ולא תמיד מתאים לכל מקרה ומקרה ולפיכך מהנדס בטיחות האש צריך לבדוק את מידת ההתאמה לפרויקט ספציפי. כיום עדיין לא הוכנסו לתקנים כלשהן זמני מילוט מקסימליים מהמנהרה למוצא בטוח, אך מקובל בעולם לבצע חישובים לעמידה בזמני מילוט של 10-15 דקות (סדר גודל). נוסחאות החישוב הינן אותן הנוסחאות המיושמות בחישובי המילוט לתחנות.



- יתרונות:

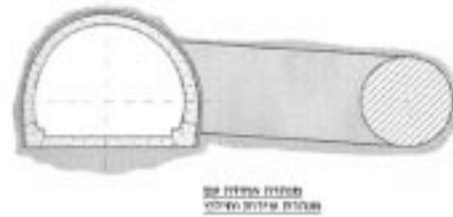
- אין אירועים המערבים שתי רכבות נגדיות.
- ברוב המקרים ישנה אפשרות יציאה למדרכות מילוט משני צידי הרכבת ועקב כך שיפור בזמן המילוט מהרכבת (מקום השריפה בד"כ)
- מילוט אופקי נח למנהרה מקבילה שמשמשת כמקום בטוח.
- ניתן ליישום בתוואי שאינו מאפשר גישה דרך יציאות חירום כל 380 מ'.
- ניתן למקם את דלתות המילוט למנהרה השנייה במרווחים קצרים יותר (50 מ'), ועל ידי כך לחסוך בזמן המילוט למקום בטוח.

- חסרונות:

- איגום לעשן קטן יחסית מעל לגובה 2.5 מ', עובדה אשר יכולה להשפיע לרעה בדקות הראשונות עד לכניסת מערכת השליטה בעשן להספק מלא.
- חוסר גישה לכבאים מכיוון שאין יציאות חירום לחוץ, עובדה המחייבת מתן נגישות לרכבי חירום וכיבוי במנהרות שבקצותיהן יש פורטלים או התקנת פלטפורמות מסילתיות בקצוות רציפי התחנה ליד הכניסה למנהרות שבקצותיהן תחנה. יש רק דלת הפרדה אחת בין המנהרות.

ד. מנהרה אחודה ומנהרת שירות וחילוץ מקבילה

מנהרה אחודה ומעברי מילוט במרווחים של עד 380 מ' למנהרה מקבילה, שמשמשת גם לנסיעת רכבי חירום והצלה.



- יתרונות:

- שטח חתך מנהרה גדול יחסית יוצר נפח איגום לעשן גדול יחסית מעל לגובה 2.5 מ'. עובדה שיכולה להשפיע לטובה בדקות הראשונות עד לכניסת מערכת השליטה בעשן להספק מלא.
- גישה ישירה למנהרת החילוץ עבור הכבאים והגעה מהירה יחסית למקום האירוע.
- אין צורך בנגישות רכבים על גבי מיסעת הרכבת.
- מילוט אופקי נח למנהרה מקבילה שמשמשת כמקום בטוח.
- ניתן ליישום בתוואי שאינו מאפשר גישה דרך יציאות חירום כל 380 מ'.



בקביעת חישובי המילוט יש צורך בפרמטרים הבאים:

א. מספר הנוסעים ברכבת

- מספר הנוסעים המקסימלי שיכול להיות ברכבת נקבע לפי מספר מקומות הישיבה + חישוב מספר האנשים לשטח מ"ר של עמידה אפשרית (4-5 אנשים למ"ר).
- בשיטה "הגסה": 100 אנשים לכל 10 מ' אורך רכבת (ללא קטר).
- במידה שהרשות שמפעילה את הרכבת שולטת על מספר הנוסעים באמצעות הגבלת מספר הכרטיסים, אזי ניתן להסתמך על מספר זה (רלוונטי לרכבות נוסעים כבדות בעיקר).

ב. תצורת הקרונות

הסידור הפנימי בקרון הכולל מעברים ודלתות מילוט החוצה נדרש למציאת זמן הפינוי מהרכבת.

ג. רוחב ומספר מדרכות המילוט

רוחב מדרכות המילוט ומספרן (בצד אחד או בשני צדדים) קובע למעשה את צוואר הבקבוק של המילוט יחד עם מספר הנוסעים ברכבת ותצורת הקרונות.

ד. מיקום היציאות, רוחבן ותצורתן

קטע המילוט מהדלת הקרובה ביותר ברכבת עד ליציאה הינו קטע המילוט הקל יחסית מכיוון שהמילוט הינו הומוגני ומהיר באופן יחסי (לא צפויות הפרעות לזרימה). במידה שהמילוט הינו למנהרה מקבילה (מילוט אופקי), לא צפויות הפרעות למילוט.

במידה שהמילוט הינו לחדר מדרגות או לכבש < 4% (רמפה) לכיוון מעלה אזי מהירות המילוט הנמוכה יחסית לכיוון מעלה, יכולה ליצור גל תור שמתקדם לאחור ואשר יכול להשפיע אל הגישה ליציאה מכיוון המנהרה.

תקן ת"י 5435 לא קובע את רוחב היציאות ולכן חישובי המילוט הכרחיים לקביעת הרוחב הנדרש (כפי שנדרש בכל מבנה אחר). בתקנות התכנון והבניה הקיימות כיום, נדרשים במקומות התקהלות מודולים רוחביים בחדרי מדרגות ברוחב של 55 ס"מ לכל 60 אנשים. בתקנות החדשות שיושמו בעתיד, החישוב יהיה לפי 8 מ"מ לאדם למדרגות ו-5 מ"מ לאדם לדלת ומעבר אופקי. שיטות חישוב אלו מיושמות עקב פשטותן, למרות שהן לא מחשבות את רכיב זמן המילוט.

בפרויקטים רכבתיים הנוסחאות משקפות בתוכן גם יצירת תורים ומחשבות את זמני המילוט ולמעשה הן הנכונות ביותר לחישוב רוחב מדרגות נדרש, עקב עמידה בפרמטר הזמן.

דוגמא - לפי כמות נוסעים של 1,000 אנשים הנמלטים למנהרה מקבילה בנתיב אופקי היו נדרשים כיום פרודורי מילוט ברוחב 9.35 מ' ובעתיד 5 מ' כאשר למעשה מספיק רוחב של 2.2 מ' ברוב המקרים (עקב המילוט ההומוגני שלאחר צוואר הבקבוק), או רוחב גבוה יותר באם המילוט הינו לרמפה < 4% או לחדרי מדרגות.

סימולציות מילוט ממוחשבות

קיימות מספר תוכנות סימולציית מילוט ממוחשבות 2D ו-3D שבהן ניתן להשתמש על מנת להמחיש למפעיל הרכבת ולמתכנן הראשי היכן הבעיות במערך המילוט. היבט ההמחשה חשוב למרות שניתן לבצע את החישובים על סמך הנוסחאות ולקבל את אותן התוצאות. בתוכנות אלו, ניתן להכניס פרמטרים כגון סוג האנשים (רוחב גוף

שונה) לפי גברים, נשים ילדים, תצורת המילוט הפיסי ואת הרכבת. התוכנה מראה את המילוט של כל אדם כפונקציה של הזמן, ממחישה את צווארי הבקבוק ועוזרת לשנות את התכנון בצווארי הבקבוק.

3. סימולציות שריפות באמצעות תוכנת CFD

התקן ת"י 5435 מחייב ביצוע סימולציות באמצעות תוכנת CFD למנהרות באורכים שבין 300-60 מ', לקביעת הצורך במערכת שליטה בעשן אקטיבית (במידה ולא רוצים להתקין מערכת אקטיבית). בנוסף, ישנם מצבים המצריכים ביצוע סימולציה זו עקב מורכבות יתר כגון: מנהרה שבסופה ישנה תחנה תת-קרקעית סופית, מערכת להסעת המונים תת-קרקעית המורכבת מתחנות וביניהן מנהרות וכד'.

פרמטרים נדרשים לביצוע הסימולציה:

א. קביעת תרחישי השריפה

קביעה זו הינה קריטית וצריכה לקחת בחשבון את מיקום תחילת השריפה ברכבת. מיקום הרכבת בעת עצירתה בתוך המנהרה, אופן התפתחות השריפה ועצמתה (שיכולה להיות ידועה אם זאת שריפה באחת המערכות ברכבת אך בלתי ידועה בעת אירוע הצתה מכונן).

ב. קביעת פרמטרים נדרשים

הפרמטרים הנדרשים הינם: תנאי סף, מיקומי פתחים, מיקומי מפוחים, ספיקתם ומועד פתיחתם (בזמן מסוים או בטמפרטורה מסוימת), הימצאות רוחות ומהירותן. החומר שנשרף, תצורת הרכבת והאם החלונות שבה נשברו או לא. שיפוע המנהרה, חתך המנהרה, עצמת השריפה, לחצים שונים, טמפרטורות שונות וכד'.

כאשר מבצעים סימולציה למנהרה אשר בקצוותיה פורטל/ים, אזי פרמטר הרוח יכול להיות קריטי. כיוון הרוח ומהירותה יכולים להשתנות עם עונות השנה, חודשי השנה וגם במהלך שעות היממה השונות. לכן, יש לבחון בהירות איוו מהירות מכניסים לתוכנה ולהציג את הנחות היסוד בבחירתה.

תוצאות

תוצאות עיקריות שהתוכנה נדרשת להוציא כוללות:

- טמפי בנקודות מדידה.
- פחמן חד חמצני בנקודות מדידה.
- ראות בנקודות מדידה.
- שטף קרינת חום בשטח מסוים.
- רצוי להמחיש את התוצאות בסרט המראה זרימת העשן.

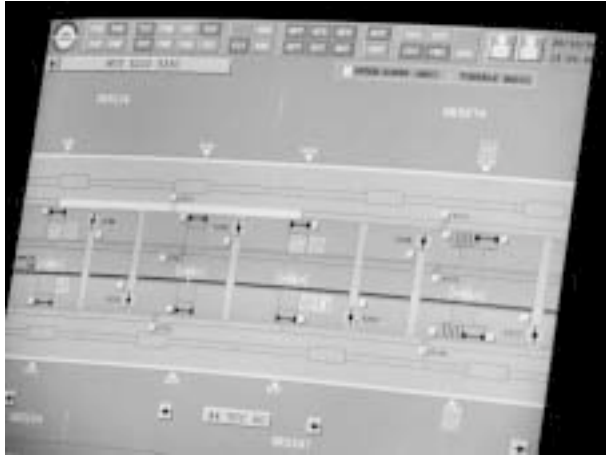
תקן NFPA 130 כולל נספחים. הנספחים בתקני ה-NFPA לא מחייבים אלא רק מנחים ומסבירים את כוונת גוף התקן. אחד מהנספחים (נספח B) מנחה לגבי תנאי סף למילוט עצמי - Tenability.

דווקא משום שהנספח מנחה, מומלץ להסתמך על הנספח של המהדורה האחרונה והעדכנית של תקן NFPA 130 עקב עדכונים והבהרות שונות: לדוגמא במהדורה האחרונה, מדגישים שקריטריוני הסף למדידה הם בגובה 2.5 מ' מעל משטח המילוט, ושיש למדוד אותם מחוץ לגבולות השריפה מכיוון שליד השריפה התוצאות לא מעשיות וכד'.

ההמלצות הן לעמידה בתנאי סף מקסימליים וממוצעים של פחמן חד חמצני, טמפרטורה, ראות ושטף קרינת חום.



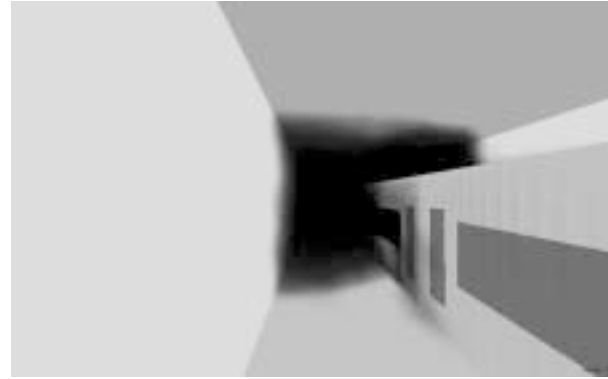
השליטה במנהרה שנפגעה, עקב נזק רב יותר מתועלת. ייתכן כי עדיף רק לבצע אל לחץ במנהרה הבטוחה או ביציאות החירום. תרחישי השריפה האפשריים צריכים להיות מוכנסים לתוכנות השליטה במערכת השליטה בעשן כך שלבקר בתחנת הפיקוח המרכזית יהיו פעולות מינימאליות לבצע בחירום והן תסתכמנה בהכנסת מיקום האירוע לתוכנה וקביעת כיוון פינוי העשן. התוכנה תבצע את השאר (אי הפעלת מפוחים קרובים למיקום השריפה וכד').



מסקנות

- נושא הבטיחות במנהרות רכבת הינו נושא שעדיין עובר תהליכי שינוי ומחקר בכל העולם, עובדה הבאה לידי ביטוי בשינוי תקני הבטיחות במנהרות בארצות רבות וביישום שיטות הנדסיות אשר עדיין לא מופיעות בתקנים אך מוצגות כ-State of the Art.
- תקן ישראלי ת"י 5435 הינו בסיס לנקודת מוצא לניתוח הנדסי מקיף.
- תכנון דיסציפלינת הבטיחות במנהרות רכבת הינו נושא מורכב עם דגש רב על הנדסת בטיחות אש.
- מהנדס בטיחות האש צריך לבצע ניתוח הנדסי מקיף המשלב ביצוע סימולציות CFD (במידת הצורך) וביצוע חישובי מילוט, ליישום היבטי הבטיחות ההכרחיים לאבטחת בטיחות הנוסעים ברכבת העוברת במנהרה.

במידה שמתבצעת שליטה בעשן ע"י יצירת מהירות קריטית שבולמת את התפשטות העשן לצד מסוים, אזי קל יותר להוכיח זאת. אם כי עדיין יתכן שהמילוט בפועל יהיה לשני הצדדים ולכן בכל זאת רצוי להציג נתונים אלו, גם בצד שאליה מתפנה העשן. במידה שהעשן מתפשט ל-2 הצדדים לאורך המנהרה אזי יש חשיבות רבה למדידת תנאי הסף בנקודות הנדרשות בשני הצדדים לאורך המנהרה.



4. השליטה באירוע

תחנת הפיקוח המרכזית ששולטת על המנהרה, שולטת גם על מספר גדול של קווים ועל כן על מספר מנהרות אחרות. בזמן שגרה, תחנת הפיקוח המרכזית משמשת להפעלת רכבות אך בזמן חירום תפקיד תחנת הפיקוח המרכזית כולל קשר אלחוטי עם נהג הרכבת לקבלת פרטי אירוע החירום, קבלת נתונים מהמערכות במנהרה (לחצני אזעקה, טלפונים, מצלמות, גלאי חום וכד') והחלטה לגבי מועד וכיוון הפעלת מערכת השליטה בעשן בתאום עם נהג הרכבת. אירוע השריפה ה"אידיאלי" הינו אירוע המתחיל בקצה רכבת אשר הינו במיקום הגבוה ביותר (עקב שיפוע המנהרה), באירוע זה העשן יעלה לכיוון העלייה של המנהרה עוד לפני הפעלת המערכת וכיוון המילוט יהיה מנוגד לכיוון פינוי העשן. הגישה של שליטה בעשן ע"י פינוי לכיוון המנוגד לכיוון מילוט האנשים במנהרה יכולה להיכשל במצב של אירוע שריפה במרכז הרכבת, כאשר הנוסעים או חלקם ישבשו את המילוט לכיוון אחד כדי לא להימלט דרך אזור השריפה לכיוון המיועד. במצב זה לא בטוח שהבקר בתחנת הפיקוח המרכזית צריך להפעיל את מערכת

