



## פרק 6: התוואי האנכי

### תוכן עניינים

6-1.....	מבוא	6.1
6-1.....	המרווח האנכי	6.2
6-2.....	שיפועים לאורך התוואי	6.3
6-2.....	שיפועים מרביים	6.3.1
6-4.....	שיפועים מזעריים	6.3.2
6-4.....	עקומים אנכיים	6.4
6-4.....	הגדרה ויעד	6.4.1
6-4.....	תכן עקום אנכי קמור	6.4.2
6-10.....	תכן עקום אנכי קעור	6.4.3
6-15.....	שינוי שיפוע מרבי ללא עקום אנכי	6.4.4
6-15.....	בקרים כלליים לתוואי האנכי	6.5
6-17.....	נספח לפרק 6 – כבשי מילוט	
6-17.....	מבוא	6.1.נ
6-17.....	עיקרון הפעולה	6.2.נ
6-17.....	הצדקים לכבש מילוט	6.3.נ
6-18.....	חומרים, גיאומטריה, מבנה ושילוט של כבש המילוט	6.5.נ

פרק 6 – התוואי האנכי



## פרק 6: התוואי האנכי

### 6.1 מבוא

התוואי האנכי של הדרך מורכב מרצף של עקומים אנכיים וקטעים ישרים. העקומים האנכיים הם קמורים או קעורים, בדרך-כלל בעלי צורת פרבולה, והם משיקים לקטעים ישרים אופקיים או בעלי שיפועים שונים. תכנון התוואי האנכי מבוסס על התאמה מיטבית של החתך לאורך הדרך עם החתך לאורך פני הקרקע. רצוי שתכנון זה יקיים את הקריטריונים הבאים: תכנון כלכלי של התוואי (התוואי האנכי קובע במידה רבה את כמות עבודות העפר הנדרשת לסלילת הדרך); התאמה לאילוצים טופוגרפיים ולאילוצי מכשולים טבעיים ומלאכותיים, כאחד; מעבר דרך נקודות בעלות רום מוכתב; שיקולי ניקוז / שמירה על החזות הסביבתית של התוואי; כל זאת, תוך הבטחת נוחות הנסיעה במתן דגש לבטיחות, וצמצום העיכובים במידה המאפשרת קיום רמת השירות ואיכות התפעול הנדרשת. גורמים אלה נקבעים הן על ידי תכינת כל שיפוע וכל עקום אנכי בנפרד, והן על ידי בקורות שונות של תכן העקומים האנכיים, ואופן הקשר שלהם לקטעים האופקיים והמשופעים.

תכנון התוואי האנכי כולל את התכן הגיאומטרי של המרכיבים הנפרדים של התוואי האנכי – ערכים מזעריים ומרביים לשיפועים, אורך קריטי, תכן עקומים אנכיים ובקרת התוואי האנכי. המרכיבים בעלי השפעה על התפעול התנועתי של התוואי הם אורך קריטי של שיפועים ותכן נתיבי זחילה. נושאי האורך הקריטי ונתיבי הזחילה נסקרו בסעיף 3.9.3 בפרק 3 לעיל – חתכי הרוחב, במסגרת חתכי הרוחב המיוחדים. בנוסף, כולל הפרק נספח העוסק בסוגיה הבטיחותית של כבשי מילוט.

התוואי האנכי אינו עומד בפני עצמו, אלא יש לו תלות בתוואי האופקי. פרק 7 להלן (שילוב תוואים) מציג את הכללים לשילוב נכון של התוואים האופקי והאנכי.

### 6.2 המרווח האנכי

המרווח האנכי הפנוי הוא אחד המרכיבים בסוגיית התוחמת (גבריט). בתכן התוואי האנכי יש לשמור בגשרים ובמעברים חדשים את מרווחי הגובה החופשי הבאים, המוצגים בטבלה 6.1:

א. מעל הדרך המתוכננת ומתחתיה במעברה מעל דרכים קיימות – 5.5 מטר, מעל כל הנתיבים וכן מעל לשוליים בשני הצדדים.

ב. מתחת גשר הולכי רגל מעל הדרך המתוכננת או מעל דרך קיימת – 6.0 מטר, מעל כל הנתיבים וכן מעל לשוליים בשני הצדדים.

המרווחים יישמרו כאמור מעל כל נקודה בחתך הרוחב של הכביש מתחת למבנה העילי, מעל כל הנתיבים, וכן מעל לשוליים ולמפרדה. בצירים אסטרטגיים (לפי קביעת משרד התחבורה וצה"ל), תידרש שמירת רצועה חופשית בגובה 6.0 מ' לרוחב של 4.5 מ' לפחות (אפשרי בכל מקום בחתך, לרבות בשול).



למטענים החורגים אף מעבר לכך (לרבות כלים הנדסיים: צמ"ה, ומובילי טנקים: רק"מ), יופנה המתכנן לנתוני מפת צירים ייעודית לביקושים למטען חורג (אגף תכנון, צה"ל); מפה שלא תפורסם לציבור.

ג. מעל מסילות ברזל, הגובה מרום פס המסילה עד לתחתית מבנה הגשר (לפי: הנחיות לתכנון מסילות ברזל למהירות עד 250 קמ"ש, חלק 1 מתוך 3, רכבת ישראל 2014):

6.0 מטר: במסילות שאינן מיועדות לחישמול.

6.5 מטר: במסילות המיועדות לחישמול כאשר רוחב הגשר שמעל המסילה – 15 מטר או פחות.

7.2 מטר: במסילות המיועדות לחישמול כאשר רוחב הגשר שמעל המסילה – יותר מ-15 מטר.

תכנון הסדרי התנועה בסביבות מכשולי הגובה יהיה בהתאם להנחיות האמורות לעיל להסדרי תנועה בסביבת מכשולי גובה (משה"ת 2006 או במהדורתן העדכנית).

### טבלה 6.1: סיפי גובה מומלצים לתכנון גשרים בדרכים בין-עירוניות

מיקום	סיפי גובה מזעריים לתכנון (מ')
מעל דרכים בין-עירוניות	15.50 <sup>(1)</sup>
מעל דרכים בין-עירוניות בצירים אסטרטגיים <sup>(2)</sup>	15.50 <sup>(1)</sup> ובנוסף צריך להתקיים מרווח פנוי של 6.00 לפחות מעל רצועה ברוחב 4.50 מ' לכל כיוון <sup>(3)</sup>
בגשרי הולכי-רגל מעל דרכים בין-עירוניות	16.00 <sup>(1)</sup>
מעל מסילת רכבת עירונית (רק"ל)	5.60
מעל מסילת רכבת שאינן מיועדות לחישמול	6.00
בגשר ברוחב עד 15 מ' שנמצא מעל מסילת רכבת עם חישמול, או בגשרים ברוחב מעל 15 מ' שנמצאים באזורים אורבניים מעל רכבת	16.50 <sup>(4)</sup>
באזורים שאינם אורבניים מבונים, בגשר ברוחב של מעל 15 מ' שנמצא מעל מסילת רכבת עם חישמול	17.20 <sup>(4)</sup>

- (1) מעל כל הנתיבים והשוליים
- (2) לביקושים למטען חורג לפי קביעת משרד התחבורה וצה"ל.
- (3) האזור שבו נדרש המרווח הפנוי של 6x4.5 יכול להיות בכל מקום לרוחב המסלול לרבות בשול הדרך.
- (4) במקומות שקיימת בעיה לספק את המרווח האנכי לטובת חישמול הרכבת יש לפנות לקבלת הקלה ממת"ח.

## 6.3 שיפועים לאורך התוואי

### 6.3.1 שיפועים מרביים

לשיפועים המרביים המותרים יש השפעה ניכרת על תפעול כלי הרכב הכבדים, בשני היבטים: האחד – ההיבט הבטיחותי, בעיקר בירידות, והשני – ההיבט התפעולי: מידת העיכוב הנגרמת לכלי-הרכב הכבדים ועקב כך לשאר התנועה, הן בעליות והן בירידות ארוכות. בנוסף לכך, מהווה השיפוע המרבי אמצעי חשוב

פרק 6 – התוואי האנכי

כרך 1 – 04/2018

הנחיות לתכנן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות



באפשרות להתאמת התוואי האנכי אל פני הקרקע, ועקב כך בקביעת החלופה הנבחרת, בהקטנת עלות הפרויקט, ובצמצום ההשפעה הסביבתית של התוואי.

לאור זאת, השיפועים המרביים המותרים תלויים בגורמים הבאים:

- סיווג הדרך, כמפורט בטבלה 2.1 בפרק 2 לעיל.
- מהירויות הייעוד והתכן כפי שנקבעו ב-"הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים" של משרד התחבורה מאפריל 2010, ובאו לידי ביטוי בטבלאות 2.2, 2.3 בפרק 2 לעיל.
- סיווג המאפיינים הטופוגרפיים, או רמת הרגישות של הדרך, כמפורט ב-"תבחיני תכן למזעור הפגיעה בקרקע ובסביבה בדרכים בין-עירוניות" של משרד התחבורה ממרץ 2010.

### טבלה 6.2: ערכי השיפועים המרביים לאורך בדרכים השונות לפי סוג האזור

מהירות התכן (קמ"ש)							סוג הדרך
120	110	100	90	80	70	60	
שיפוע מרבי לאורך (%) <sup>(1)</sup>							
4 (מישורי)	5 (גבעי)	6 (הררי)	-	-	-	-	מהירה בין-עירונית
-	5 (מישורי)	6 (גבעי)	7 (הררי)	-	-	-	מעויירת מהירה וראשית ממוחלפת <sup>(2)</sup>
-	-	6 (מישורי)	7 (גבעי)	8 (הררי)	-	-	ראשית ואזורית דו-מסלולית <sup>(2)</sup>
-	-	-	-	7 (מישורי)	8 (גבעי)	9 (הררי)	ראשית ואזורית חד-מסלולית
-	-	-	-	8 (מישורי)	9 (גבעי)	10 (הררי)	מקומית וגישה <sup>(3)</sup>

#### הערות:

- תיתכן הגדלה של השיפוע ב-1% נוסף, בהתאם לרמת הרגישות הנופית והסביבתית – ראו "תבחיני תכן למזעור הפגיעה בקרקע ובסביבה בדרכים בין-עירוניות".
- כאשר מסלולי הדרך הם בתוואים נפרדים (למעט דרך מהירה), ניתן להגדיל במסלול היורד את השיפועים הנתונים בטבלה בשיעור של 1%.
- בדרך דלת-תנועה כהגדרתה בסעיף 2.1.3, ניתן להגדיל השיפועים בשיעור של 2% נוספים מעבר לערכי הטבלה.

מאחר שבכל סוגי הדרכים נקבעת מהירות התכן בהתאם לשילוב של סיווג הדרך עם רמת הרגישות הסביבתית והאורבנית, הכוללות בתוכם גם את ההתחשבות בהגדרת הטופוגרפיה, ניתן להציג את השיפוע המרבי לאורך בתלות בסוג הדרך ובמהירות התכן, כמפורט בטבלה 6.2, תוך ציון האזור הטופוגרפי המתאים לכל שיפוע. ביסוד הערכים המוצגים מצוייה ההנחה, כי רצוי להביא לאיזון כלכלי בין עלות ההקמה של הדרך לבין עלות המשתמשים בדרך.



עבור מרבית ערכי השיפועים הנתונים בטבלה, קיים אורך קריטי שמעבר לו יש לנקוט באמצעים שונים שנועדו להקל על זרימת התנועה ובטיחותה, כגון נתיבי זחילה. הנחיות מפורטות לנושא ניתנו בסעיף 3.9.3 לעיל.

### 6.3.2 שיפועים מזעריים

הקריטריון הקובע את השיפועים המזעריים לאורך התוואי, הוא ניקוז המים מפני המיסעה. בתנאים מסוימים, מתן שיפוע מזערי לאורך הוא הכרחי, למרות שהקימרון הרחבי של המיסעה מבטיח את ניקוז המים מחוץ למיסעה בחתך הרחבי הרגיל או בעקומים אופקיים.

לפי הנחיות הניקוז של נתיבי ישראל, השיפוע המזערי לאורך תוואי בחתך רחבי רגיל שאינו מצריך מערכת ניקוז אורכי, הוא 0.4%. במעבר שיפועים רצוי לעלות ל-0.7%. בשיפועים הקטנים מ-0.4%, נדרשת בהנחיות מערכת ניקוז אורכית. בקטעים בהם יש אבני שפה, וכן בתחום מעברי השיפועים, בקטעים בהם שיפועי הרחב קטנים מ-2% ומשתנה כיוון הזרימה לרוחב המיסעה, יש צורך בהקפדה מרבית על דיוק ביצוע הרומים המתוכננים והשיפועים (ראו הרחבה לגבי מעברי שיפועים בסעיף 5.3 לעיל). כאשר הדרך בחפירה, יש צורך בשיפוע מזערי לאורך להבטחת הזרימה בתעלות הניקוז. **בכל קטע בו השיפוע לאורך אינו עולה על 1%, יוגדל השיפוע הרחבי בחתך הנורמלי בקו ישר מ-2% ל-2.5%.**

## **6.4 עקומים אנכיים**

### 6.4.1 הגדרה ויעד

העקומים האנכיים הם המרכיב הגיאומטרי שבאמצעותו מבוצע שינוי השיפוע לאורך התוואי באופן הדרגתי ורציף. העקום האנכי הוא מטיפוס קמור או קעור, כשבכל אחד מהם שני סוגים, הנבדלים ביניהם בכך ששיפועי המשיקים הם באותו כיוון או בכיוונים הפוכים, כמתואר בתרשים 6.1. העקומים האנכיים הם מסוג פרבולה, שיתרונה בכך שעקמומיותה הינה בעלת ערך קבוע לכל אורכה. תכן הפרבולה מבוצע בהתאם לשיקולים הבאים:

- א. בטיחות הנסיעה, באמצעות קיום מרחקי הראות הנדרשים.
- ב. נוחות הנסיעה.
- ג. חזות התוואי והסביבה.
- ד. ניקוז הדרך.

### 6.4.2 תכן עקום אנכי קמור

#### **א. השיקול הבטיחותי**

תכן עקום אנכי קמור מבוצע בראש ובראשונה בהתאם לקריטריון הבטיחותי, לפיו העקום חייב לקיים, בכל נקודה לאורכו, את מרחק הראות לתכן. יישום מרחקי הראות השונים יהיה בהתאם למוגדר בטבלה 4.10 בפרק 4 – "מרחקי ראות", בהנחיות אלה. לכל עקום אנכי קמור יש לחשב את הרדיוס המזערי אשר

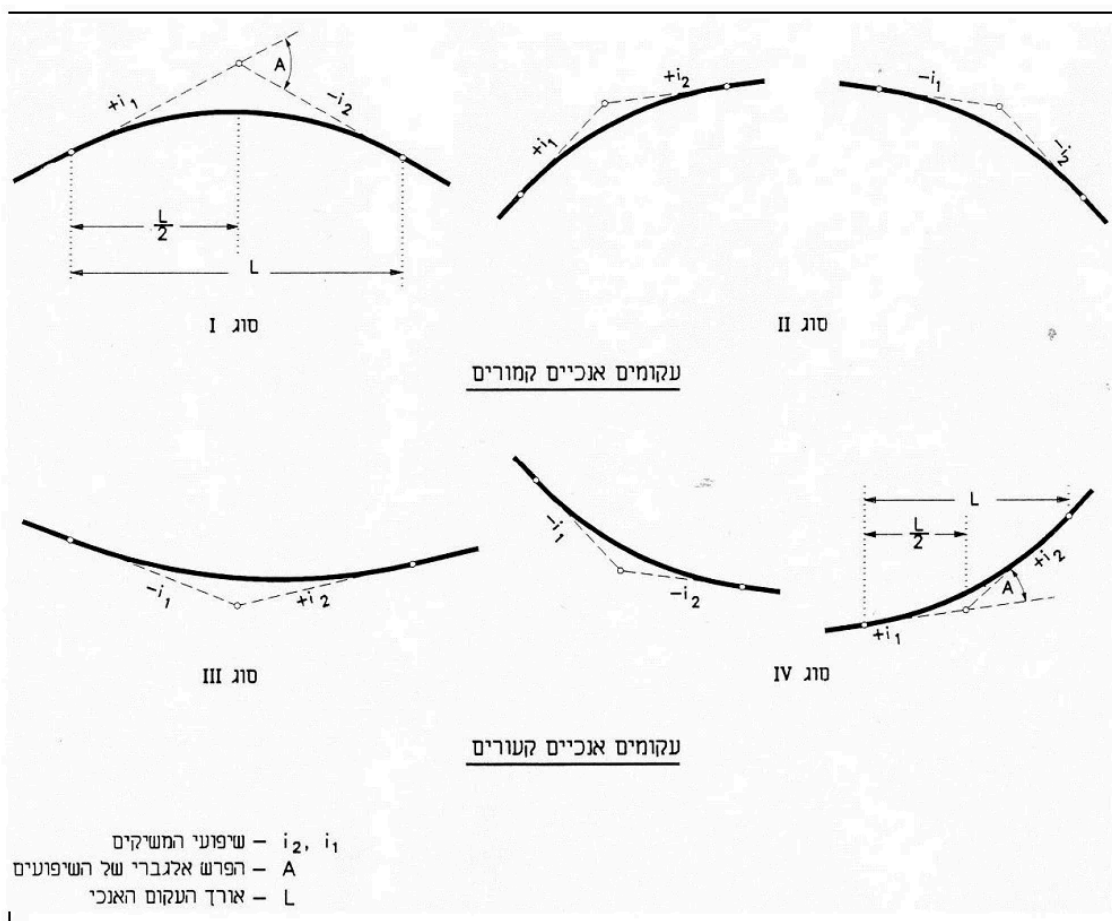


יקיים את מרחק הראות הדרוש. בחישוב אורך עקום אנכי קמור לפי שיקולי מרחק הראות, מבדילים בין שני המקרים הבאים:

(1) מרחק הראות לתכן ( $S_D$ ) נכלל באורך העקום ( $L$ ), לאמור:  $S_D \leq L$ .

(2) מרחק הראות לתכן ( $S_D$ ) גדול מאורך העקום ( $L$ ), לאמור:  $S_D > L$ .

הן מרחק הראות לתכן והן אורך העקום נמדדים בהיטל האופקי לאורך הדרך.



**תרשים 6.1: הסוגים השונים של עקומים אנכיים**



נוסחאות החישוב עבור הרדיוס המזערי לעקום האנכי הקמור, הן כדלקמן:

$$R = \frac{S_D^2}{2(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad \text{עבור } S_D \leq L$$

$$R = \frac{200S_D}{A} - \frac{20,000(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A^2} \quad \text{עבור } S_D > L$$

כאשר:

- R – רדיוס העקום האנכי, במטרים;
  - $S_D$  – מרחק הראות לתכן, במטרים, כמפורט בטבלאות 4.1-4.9;
  - $h_1$  – ערך התכן לגובה עין הנהג, כמפורט בסעיף 4.6 בהנחיות: 1.05 מטר למכונית נוסעים, 2.4 מטר למשאיות, 1.80 מטר לאוטובוס;
  - $h_2$  – ערך התכן לגובה קצהו השני של קו הראות במטרים, כמפורט בסעיף 4.6: 0.15 מטר לעצירה בחד-מסלולי ולהחלטה לפני צומת או מחלף, 0.6 מטר לעצירה בדו-מסלולי ולהחלטה בקטע, 1.05 מטר לעקיפה מלאה ודחוקה;
  - A – שינוי השיפוע האנכי בין שני קצות העקום, באחוזים, כמתואר בתרשים 6.1. שינוי שיפוע זה הוא הערך המוחלט של סכום ערכי השיפועים הנגדיים (סוג I או III) או הפרש ערכי השיפועים לאותו כיוון (סוג II או IV).
- עבור כל אחד מקריטריוני הראות לתכן, מתקבלים הרדיוסים המזעריים למהירויות התכן השונות. רדיוסים אלה מפורטים בטבלה 6.3.

### טבלה 6.3: רדיוסים מזעריים לתכן עקום אנכי קמור לפי מרחקי הראות השונים (מ')<sup>(1)</sup>

מהירות תכן (קמ"ש) <sup>(2)</sup>							סוג מרחק הראות
120	110	100	90	80	70	60	
–	–	*8,600	*6,000	4,000	2,500	1,400	לעצירה – חד-מסלולי
9,700	7,500	5,300	3,700	2,400	–	–	לעצירה – דו-מסלולי
20,000	16,300	13,000	10,000	7,500	5,600	4,000	להחלטה (בקטע)
–	–	*14,500	*12,200	10,000	8,050	5,750	לעקיפה דחוקה
–	–	*46,500	*38,000	31,000	24,600	18,600	לעקיפה

(1) הרדיוסים מתאימים לרכב נוסעים למקרה של  $S_D \leq L$  ולמשיקים הפוכי כיוון. כאשר  $S_D > L$  או שהמשיקים באותו כיוון, יש לחשב לפי הנוסחאות המדויקות.

(2) ערכים שאינם מופיעים בטבלה, אינם תואמים את מדרג המהירויות שנקבע בהנחיות.  
\* מהירויות אלה מיועדות רק למסלול ראשון מתוך שניים בדרך דו-מסלולית, אשר משיקולי שלביות נפתח בשלב ביניים דו-סיטרי – ראו סעיף 2.3.3.



אורך העקום האנכי הקמור ( $L$  בתרשים 6.1) מחושב לפי  $L = R \cdot A/100$ , לפי הסימונים לעיל. האורכים המתקבלים לעקום האנכי הקמור כתוצאה משיקולי הראות ומהפרש השיפועים לאורך העקום מוצגים לעצירה בתרשים 6.2, ולהחלטה – בתרשים 6.3, לרבות השפעת שיקולים נוספים לקביעת אורך העקום, כמפורט בסעיפים ב', ג' בהמשך.

### ב. שיקולי נוחות

קריטריון נוסף לקביעת הרדיוס המזערי לעקום אנכי קמור נובע משיקולי נוחות הנסיעה: בעקום אנכי פועלת על כלי הרכב תאוצה צנטריפוגלית שכיוונה אנכי. בעקום קמור כיוונה הפוך לכיוון כוח הכובד. הערך המרבי הרצוי לתאוצה זו הוא 0.3 מטר/שנייה<sup>2</sup>, ולכן הרדיוס המזערי של העקום, משיקולי נוחות, הוא:

$$R = 0.257 \cdot V_d^2$$

כאשר:

- $R$  – רדיוס אנכי מזערי משיקולי נוחות (מטר);
- $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש);
- 0.257 – מקדם הכולל הסדרת יחידות.

אורך העקום האנכי הקמור מחושב לפי  $L=R \cdot A/100$ , זאת בהתאם לסימונים לעיל. ככלל, הרדיוסים המזעריים המתקבלים משיקולי ראות בכל תחום המהירויות שבטבלה 6.3, גדולים מהרדיוסים המזעריים משיקולי נוחות, הנתונים בטבלה 6.4. כאשר העקום הקמור שטוח ואינו מגביל ראות, אורכו צריך לעמוד רק באורכים המזעריים לפי שיקולי נוחות וחזות.

### טבלה 6.4: רדיוסים מזעריים (ללא מגבלות ראות) לתכן עקום אנכי קמור או קעור משיקולי נוחות (מ')

מהירות תכן (קמ"ש)	60	70	80	90	100	110	120
רדיוס מזערי לפי נוחות*	950	1,250	1,650	2,100	2,600	3,100	3,700

\* יש לוודא שהאורך המתקבל אינו קצר מאורך המזערי לפי הקריטריון החזותי בסעיף ג'.

### ג. שיקולים חזותיים

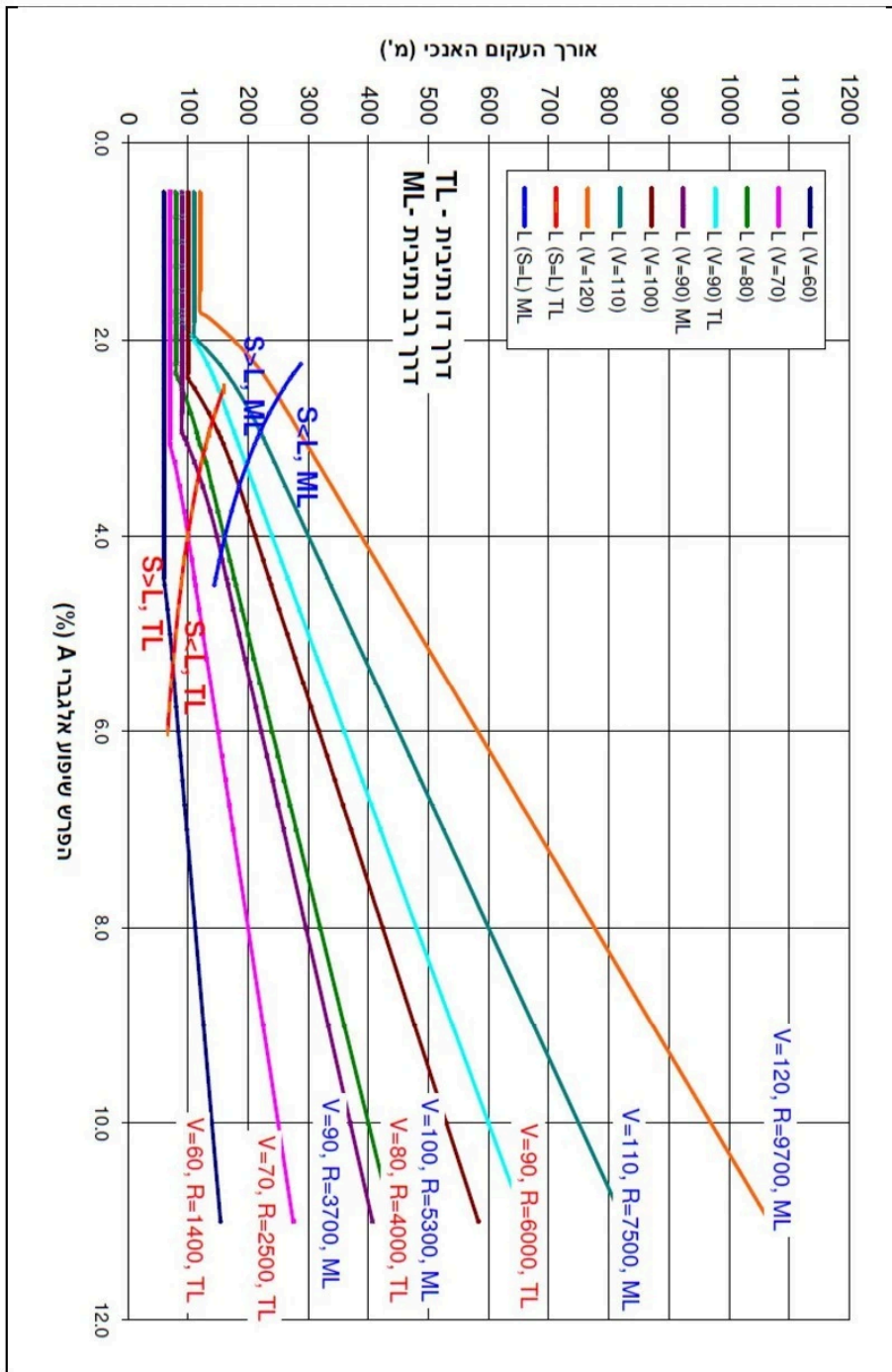
משיקולים חזותיים, אין לבצע עקום אנכי קצר מדי. האורך המזערי לעקום אנכי קמור משיקולים חזותיים הוא:

$$(1) \text{ בתוואי המתוכנן לפי מרחק ראות לעצירה: } L = 1.0 \cdot V_d$$

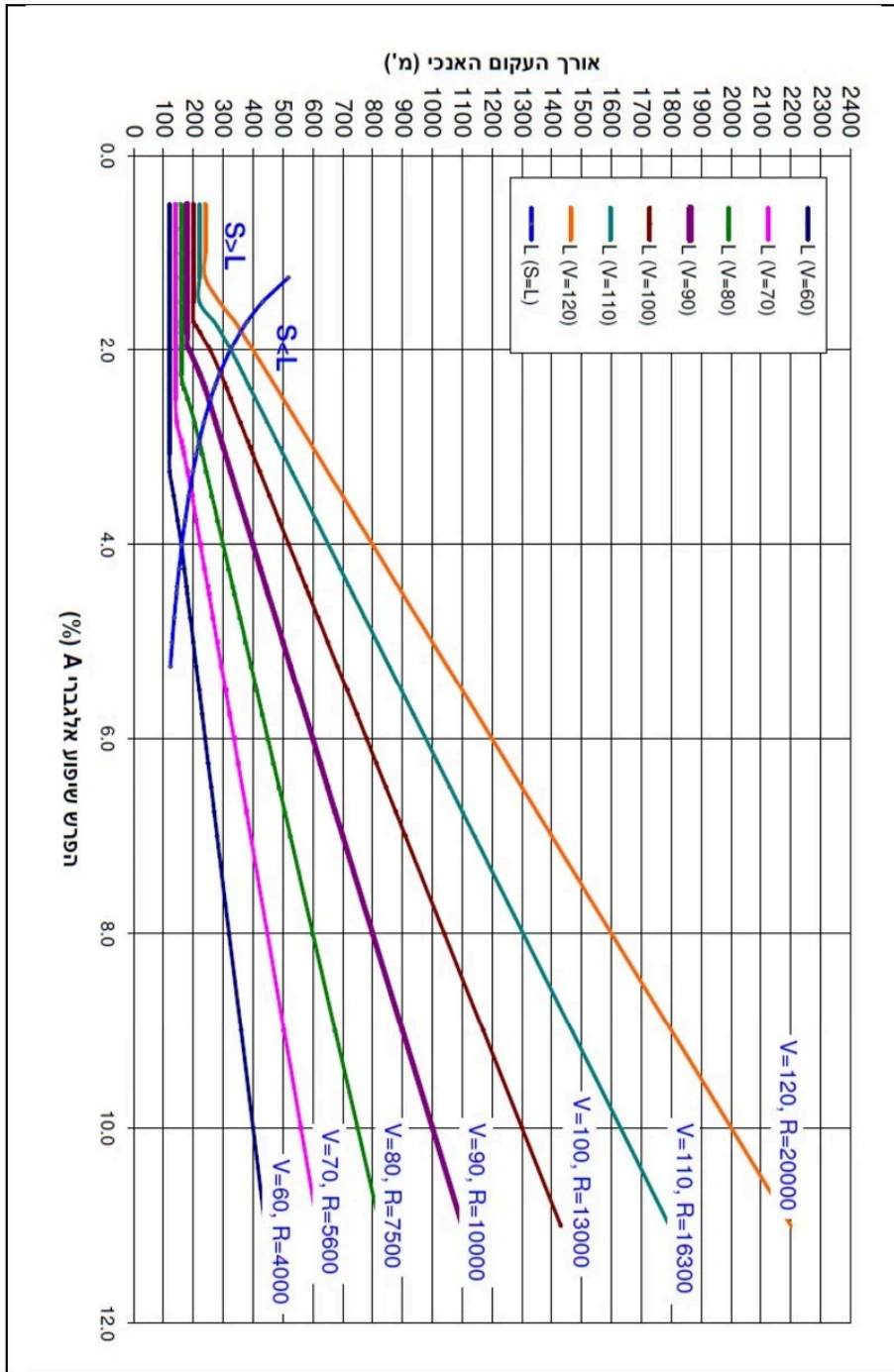
$$(2) \text{ בתוואי המתוכנן לפי מרחקי ראות להחלטה או לעקיפה: } L = 2.0 \cdot V_d$$

כאשר:

- $L$  – אורך מזערי לעקום (מטר);
- $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש).



**תרשים 6.2:** אורך מזערי לעקום אנכי קמור המתוכנן לפי מרחק ראות לעצירה



**תרשים 6.3:** אורך מזערי לעקום אנכי קמור המתוכנן לפי מרחק ראות להחלטה



בהפרשי שיפוע קטנים, ערכים אלה מהווים חסם תחתון לאורך העקום, כפי שניתן לראות בתרשימים 6.2 ו-6.3.

### 6.4.3 תכן עקום אנכי קעור

#### א. השיקול הבטיחותי

בדומה לעקום אנכי קמור, מבוצע גם תכן עקום אנכי קעור בראש ובראשונה לפי הקריטריון הבטיחותי. קריטריון זה הוא קיום מרחק הראות הדרוש בלילה. עבור קריטריון זה יש לקבוע רדיוס מזערי לעקום הקעור, כך שאלומת אורות הדרך של פנסי החזית של מכונית נוסעים תפגע במיסעה במרחק המספיק לעצירה או להחלטה, בהתאם לנסיבות המפורטות בטבלה 4.10. המרחק המרבי להבחנה בסימני דרך מחזירי אור הוא כ-300 מטר. בדומה לאופן החישוב עבור עקום אנכי קמור, מבדילים גם כאן בין שני מקרים:

- (1) מרחק הראות לתכן ( $S_D$ ) נכלל באורך העקום ( $S_D \leq L$ ).
- (2) מרחק הראות לתכן ( $S_D$ ) גדול מאורך העקום ( $S_D > L$ ).

הנוסחאות לחישוב הרדיוס המזערי לעקום האנכי הקעור הן:

$$R = \frac{S_D^2}{2(0.6 + S_D \cdot \tan 1^\circ)} \quad \text{עבור } S_D \leq L$$

$$R = \frac{200S_D}{A} - \frac{20,000(0.6 + S_D \cdot \tan 1^\circ)}{A^2} \quad \text{עבור } S_D > L$$

כאשר:

- R – רדיוס העקום האנכי הקעור (מטר);
  - $S_D$  – מרחק הראות לתכן, במטרים, כמפורט בטבלאות 4.1-4.9;
  - 0.6 – גובה הפנס הקדמי של מכונית נוסעים מפני הכביש (מטר);
  - $1^\circ$  – זווית הפיזור של אלומת אור הדרך של הרכב;
  - A – שינוי השיפוע האנכי בין שני קצות העקום, באחוזים (ההפרש האלגברי כמתואר בתרשימים 6.1). הרדיוסים המזעריים המתקבלים עבור מהירויות התכן השונות מפורטים בטבלה 6.5.
- אורך העקום הקעור (L בתרשימים 6.1) מחושב לפי  $L=R \cdot A/100$ , לפי הסימונים לעיל.
- בתרשימים 6.4 ו-6.5 מוצגים האורכים המתקבלים לעקום האנכי הקעור, לפי מרחקי הראות לעצירה ולהחלטה והפרש השיפועים לאורך העקום. כאמור, אורך שמעל ל-300 מטר הינו תיאורטי, מאחר שלא מעשי להבחין בסימונים בלילה ממרחק גדול יותר.



### טבלה 6.5: רדיוסים מזעריים לתכן עקום אנכי קעור למרחקי הראות השונים (מ')

מהירות תכן (קמ"ש)							סוג מרחק הראות
120	110	100	90	80	70	60	
6,300	5,500	4,500	3,700	2,800	2,200	1,500	לעצירה
9,400	8,400	7,500	6,500	5,500	4,600	3,800	להחלטה

- (1) הרדיוסים מתאימים למקרה של  $S_0 \leq L$  ולמשיקים הפוכי כיוון. כאשר  $S_0 > L$  או שהמשיקים באותו כיוון, יש לחשב לפי הנוסחאות המדויקות.
- (2) כאשר העקום הקעור אינו מגביל ראות בלילה, הרדיוס המזערי יכול להיקבע רק משיקולי נוחות לפי טבלה 6.3.

#### ב. שיקולי נוחות

בדומה לעקום אנכי קמור, גם בעקום הקעור קיים קריטריון לקביעת הרדיוס המזערי משיקולי נוחות הנסיעה: בעקום אנכי פועלת על כלי הרכב תאוצה צנטריפוגלית שכיוונה אנכי. בעקום קעור כיוונה כמו כיוון כוח הכובד. הערך המרבי הרצוי לתאוצה זו הוא  $0.3 \text{ מ/ש}^2$ , ולכן הרדיוס המזערי של העקום, משיקולי נוחות, הוא:

$$R = 0.257 \cdot V_d^2$$

כאשר:

- R – רדיוס אנכי מזערי משיקולי נוחות (מטר);  
 $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש);  
 0.257 – מקדם הכולל הסדרת יחידות.

ככלל, הרדיוסים המזעריים המתקבלים משיקולי ראות בכל תחום המהירויות שבטבלה 6.4, גדולים מהרדיוסים המזעריים משיקולי נוחות, הנתונים בטבלה 6.3. כאשר העקום הקעור אינו מגביל ראות בלילה, כגון באזורים מוארים, אורכו צריך לעמוד רק באורכים המזעריים לפי שיקולי נוחות וחזות.

#### ג. שיקולים חזותיים

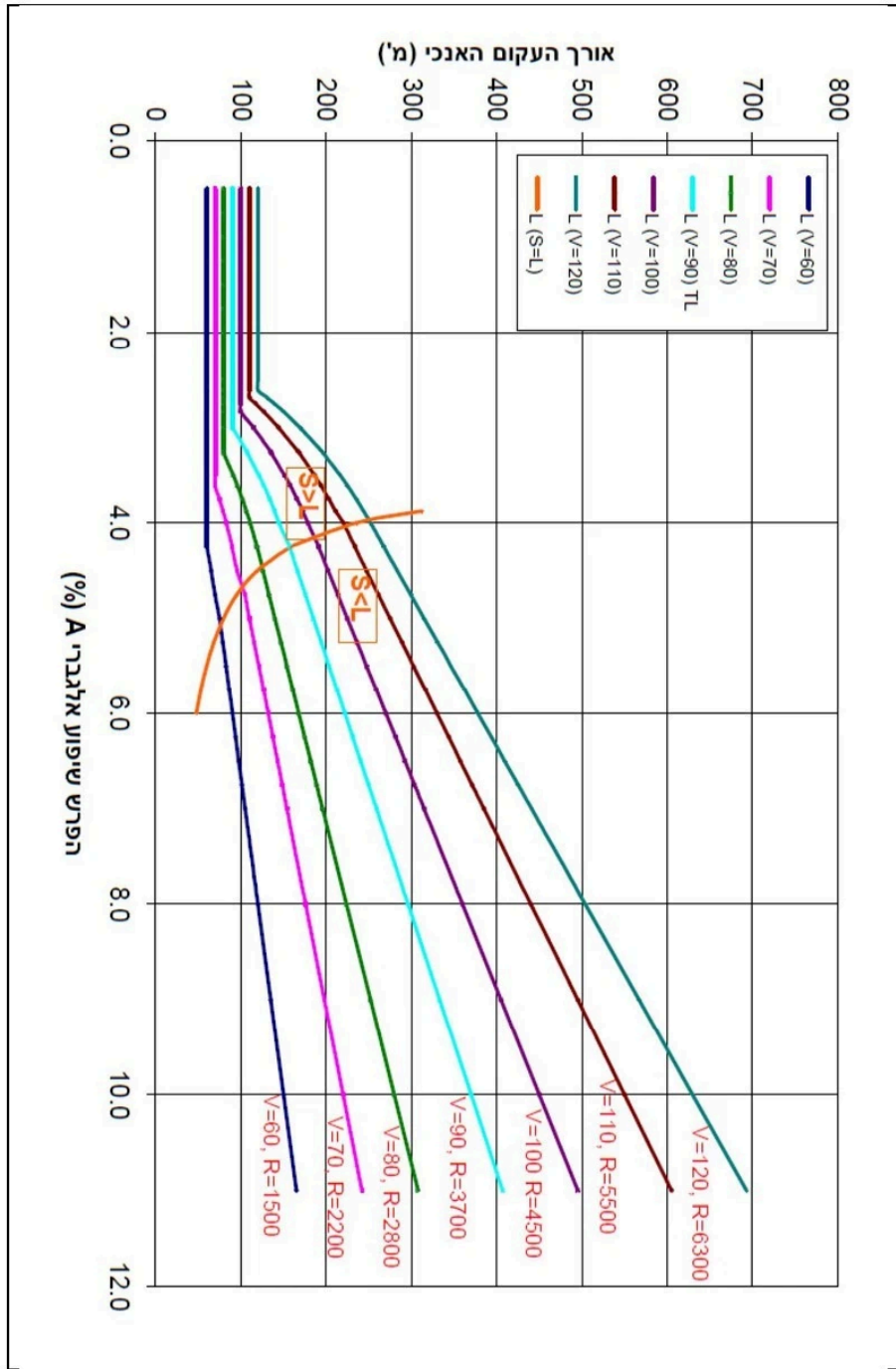
משיקולים חזותיים, אין לבצע עקום אנכי קצר מדי. האורך המזערי לעקום אנכי קעור משיקולים חזותיים הוא:

- (1) בתוואי המתוכנן לפי מרחק ראות לעצירה:  $L = 1.0 \cdot V_d$   
 (2) בתוואי המתוכנן לפי מרחק ראות להחלטה:  $L = 2.0 \cdot V_d$

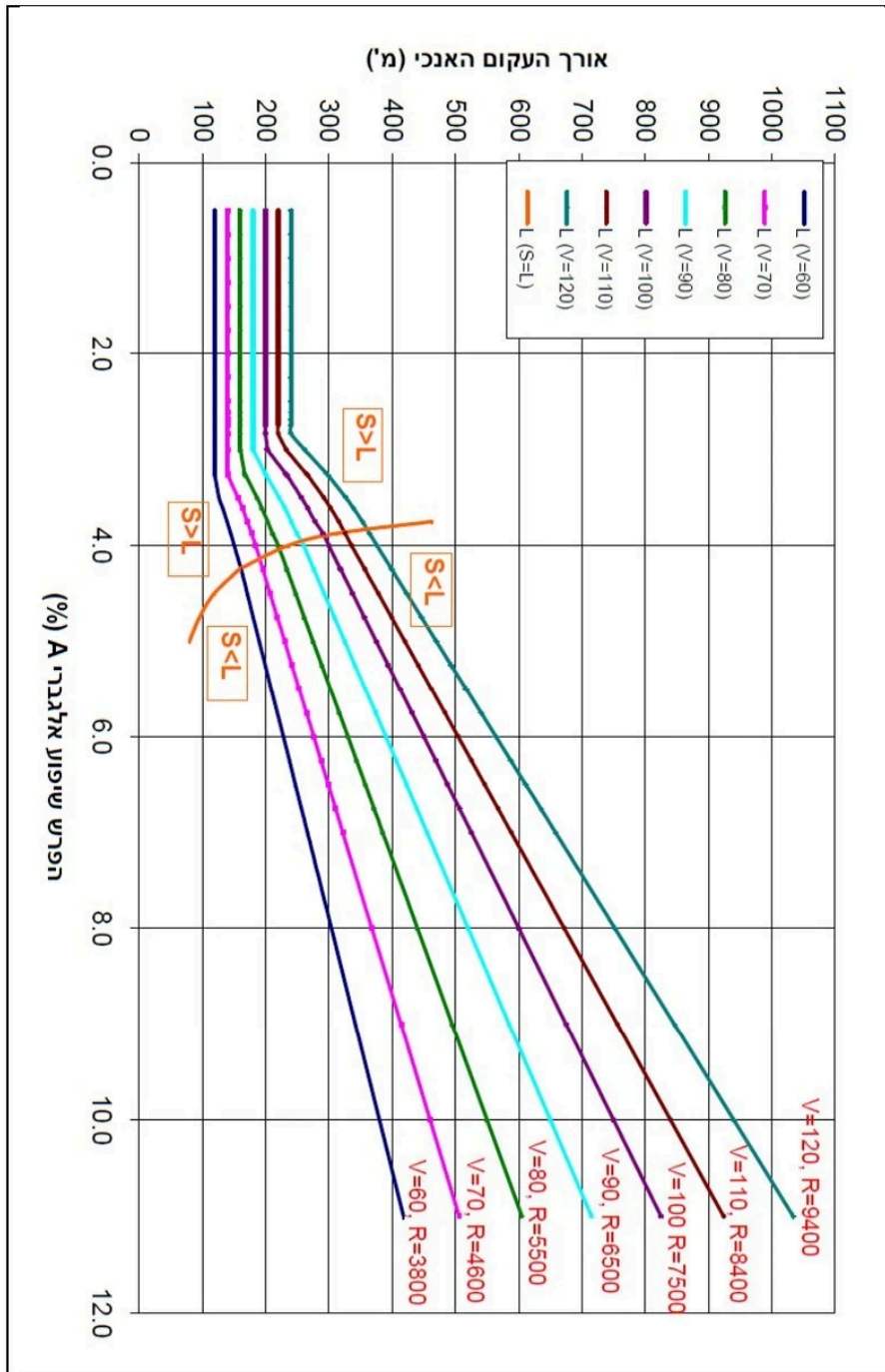
כאשר:

- L – אורך מזערי לעקום (מטר);  
 $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש).

בהפרשי שיפוע קטנים, ערכים אלה מהווים חסם תחתון לאורך העקום, כפי שניתן לראות בתרשימים 6.4 ו-6.5.



**תרשים 6.4:** אורך מזערי לעקום אנכי קעור המתוכנן לפי מרחק ראות לעצירה



**תרשים 6.5:** אורך מזערי לעקום אנכי קעור המתוכנן לפי מרחק ראות להחלטה



#### ד. שיקולי ניקוז

לעקום קעור המחבר שני שיפועים בעלי כיוונים מנוגדים יש נקודת מינימום. באזור הסמוך לנקודה זו השיפוע האורכי קרוב לאפס, וניקוז פני הדרך מתאפשר אך ורק על ידי השיפועים לרוחב הדרך. לפי הנחיות לתכנון ניקוז של נתיבי ישראל, נדרשת מערכת ניקוז אורכי לקטעים בעלי שיפוע אורכי קטן מ-0.3%, או לקטעים בעלי שיפוע אורכי קטן מ-0.4% וארוכים מ-20 מטר. בכל עקום קעור ששיפועי משיקיו בכיוונים הפוכים, קיים אזור סביב נקודת המינימום בו השיפועים קטנים יותר מהנקוב לעיל, ויש לתכנן את הניקוז בהתאם להנחיות המתאימות, במיוחד בקטעים עם אבני שפה. כמו כן אין למקם באזור זה מעברי שיפועים של עקום אופקי.

#### ה. רדיוס מזערי במכשולים גבוהים

במקרה של עקום מתחת למכשול, עלולה להיווצר בעיה של הגבלת מרחק הראות עקב הימצאות המכשול העילי, כמתואר בתרשים 6.6. המקרה החמור יותר הוא של ראות לנהג משאית, הן בשל גובה העין הגדול יותר שלו, והן בשל מרחק הראות הגדול יותר לעצירה לו הוא נזקק. המגבלה גדולה אפילו יותר כאשר הנהג צריך להבחין בשילוט עילי המותקן מעבר למכשול, שכן אז גם המכשול מגבילו יותר, וגם מרחק הראות הדרוש גדול יותר (להחלטה ולא לעצירה במקרה של שלט הדרכה).

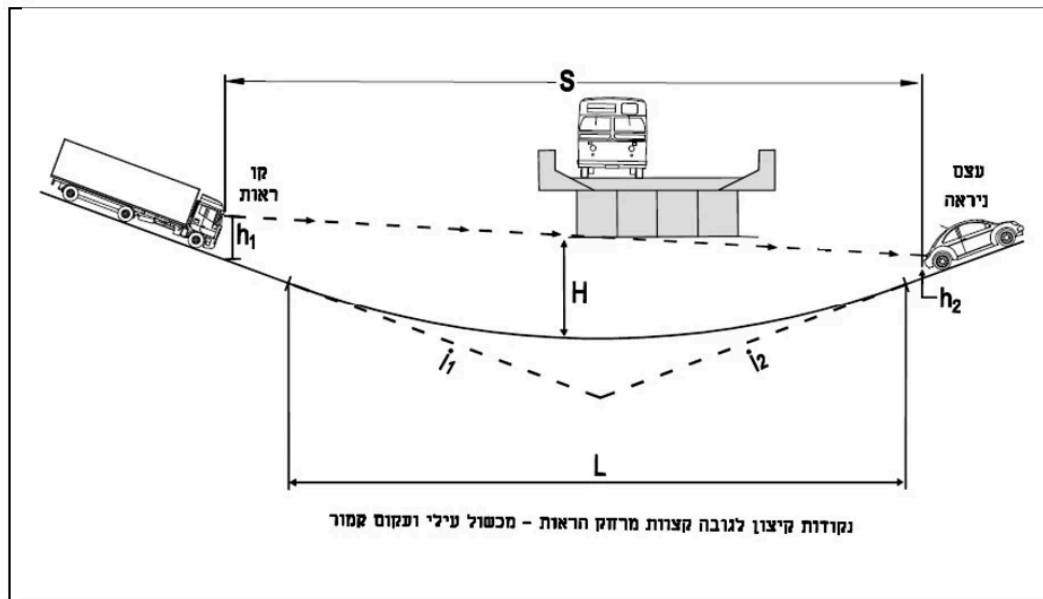
הנוסחאות לחישוב הרדיוס המזערי לעקום הקעור במקרה של מכשול גבוה, הן:

$$L = \frac{A \cdot S_D^2}{800 \left( H - \frac{h_1 + h_2}{2} \right)} \quad \text{עבור } S_D \leq L$$

$$L = 2 \cdot S_D - \frac{800}{A} \left( H - \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \quad \text{עבור } S_D > L$$

כאשר:

- $L$  – אורך העקום האנכי הקעור (מטר);
- $S_D$  – מרחק הראות לתכן במטרים עבור משאית, כמפורט בטבלאות 4.2 ו-4.7;
- $h_1$  – ערך התכן לגובה עין הנהג כמפורט בסעיף 4.6 (למשאית 2.4 מטר);
- $h_2$  – ערך התכן לגובה קצה השני של קו הראות במטרים – 0.6 מטר לעצירה ולהחלטה בקטע, או גובה ראש השלט, בהתאם לנסיבות;
- $H$  – גובה המכשול מפני הכביש בנקודת ההסתרה;
- $A$  – שינוי השיפוע האנכי בין שני קצות העקום, באחוזים (ההפרש האלגברי כמתואר בתרשים 6.1).



**תרשים 6.6:** הסתרת קו ראות לרכב גבוה בעקום קעור עקב מכשול עילי

**6.4.4 שינוי שיפוע מרבי ללא עקום אנכי**

בהפרשי שיפוע קטנים בין המשיקים בתוואי האנכי, לא נדרש תכנון של עקום אנכי – אפשרית "החלקה" של התוואי במהלך הביצוע לקבלת תוואי רציף מבחינת הנוחות והחזות. בטבלה 6.6 נתונים הפרשי השיפוע שאינם מחייבים עקומים אנכיים, כל עוד המרחק המזערי בין שברי שיפוע עוקבים אינו עולה על 2 שניות נסיעה במהירות התכן.

**טבלה 6.6:** הפרשי השיפוע המרביים ללא צורך בעקום אנכי

120	110	100	90	80	70	60	מהירות תכן (קמ"ש)
0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	הפרש השיפוע בין המשיקים (%)

**6.5 בקרים כלליים לתוואי האנכי**

בנוסף לבקרים המיוחדים לעקומים האנכיים (סעיף 6.4 לעיל), קיימים מספר בקרים לתוואי האנכי בכללותו:

א. מנימוקים של הופעה חזותית ונוחות הנסיעה, יש לשאוף להגיע לתוואי שבו יהיו קטעים משופעים ארוכים יחסית, ועקומים אנכיים בעלי רדיוס גדול, ולא קטעים קצרים ו"שבורים" המורכבים ממשיקים קצרים בין עקומים ברדיוס קטן. יחד עם זאת, אפשר "לשבור" שיפוע "חריף" וארוך ע"י קטעים קצרים ומתונים יותר.



- ב. בשיפועים ארוכים בהם אפשר לתכנן שני שיעורי שיפוע, רצוי למקם את השיפוע המתון יותר בראש המורד והשיפוע התלול יותר לקראת תחתיתו. בצורה כזו, תתאפשר הנסיעה "במהירות הזחילה" על גבי השיפוע המתון יותר דווקא.
- ג. יש להימנע מיצירת "תוואי גלי" שבו תדירות גבוהה של עקומים אנכיים קצרים ומנוגדים – קמור וקעור לסירוגין. תופעה זו גורמת לאפקט חזותי שלילי וכן לסכנה בטיחותית, שכן בתכנון מעין זה קיימים "אזורים מתים" בהם אין הנהג רואה קטעים מהדרך שלפניו, ונראה לו שהיא פנויה לעקיפה. אפשר לשפר תוואי כזה ע"י תכנון עקומים אנכיים ארוכים יותר.
- ד. אין לתכנן שיפוע אורכי מתון לאורך ניכר, ובמיוחד לא לפני שיפוע מנוגד לכיוון הפוך, שכן משאיות מנצלות שיפוע כזה לצרכי האצה לפני העלייה. נוצר מצב שבו המשאיות נוסעות מהר יותר מהמכוניות הפרטיות תוך היווצרות "חיכוכים" ביניהם ומצב המהווה סכנה מרובה.
- ה. המצב של תוואי אנכי מסוג "גב שבור" (broken back) – שני עקומים אנכיים עוקבים לאותו כיוון, המופרדים ע"י קטע ישר קצר) אינו רצוי – ובמיוחד לא כאשר העקומים הם קעורים, שכן נוצר אפקט חזותי שלילי.
- ו. במקרים בהם נפגשים שני עקומים אנכיים בכיוונים מנוגדים, השינוי בתאוצה הצנטריפוגלית האנכית גדול יותר מאשר במקרה שבו העקום האנכי משיק לקו ישר. רצוי, שהסכום האלגברי של שינוי התאוצות האנכיות לא יעבור 0.3 מ'/שנ<sup>2</sup>. כאשר לא מתקיים כלל זה, יש לתכנן בין העקומים קטע בשיפוע אחיד באורך של 3 שניות נסיעה במהירות התכן, דהיינו  $L=0.8V_d$ , כאשר  $V_d$  היא מהירות התכן בקמ"ש.
- ז. כדי להבטיח חזות נעימה לתוואי במקרה של שני עקומים אנכיים עוקבים, ולמנוע חפיפה ביניהם, יש להרחיק את מפגשי המשיקים שבמרכזם של שני עקומים אנכיים סמוכים למרחק של  $3V_d$ , כאשר  $V_d$  היא מהירות התכן בקמ"ש.



## נספח לפרק 6 – כבשי מילוט (emergency escape lanes / ramps)

### נ.6.1 מבוא

בדרך העוברת בטופוגרפייה קשה, הכביש עשוי לכלול קטעים משופעים תלולים וארוכים. בקטעים אלה, התפעול של משאיות עמוסות בכיוון הירידה עלול לגרום לחוסר יכולת לבלום באופן הדרגתי, עקב המהירות הגבוהה ושימוש יתר בבלמים. משאית עשויה לצאת מכלל שליטה, להתנגש במכונות אחרות ובעצמים לאורך הדרך, או להתהפך. כבש מילוט מהווה פתרון לבעיה. הוא מתוכנן כנתיב יציאה מהדרך הראשית, ומיועד לבלימת רכב כבד באופן הדרגתי ללא גרימת נזק לעצמו ולסביבה. הניסיון בנושא כבש (נתיב) המילוט בעולם מועט יחסית, ובארץ מועט מאוד, ולכן הנספח מהווה המלצה ולא הנחייה, עד לצבירת ניסיון נוסף בתפקוד או באמצעות ביצוע ניסויים בשטח.

### נ.6.2 עיקרון הפעולה

כבש המילוט מסתעף מצד הדרך בצד ימין בזווית קטנה (תרשים 6א'). נהג המשאית שאיבד את כושר הבלימה, יכול לכוון את רכבו לתוך כבש זה. הכבש מצופה בחומר גרוס חד-גרגרי ולא מהודק (שפיר). מקדם החיכוך של חומר זה לגלגול, גבוה בהרבה מזה של מיסעה אספלטית. כתוצאה מההתנגדות לגלגול, מומרת האנרגיה הקינטית של הרכב המאט לאנרגיית חיכוך של החומר הבולם. ההאטה מבוצעת בהדרגתית ולא בחזקה, כך שממוזער הנזק לרכב ולסביבה. בנוסף, החומר הגרגרי מונע הידרדרות של המשאית קדימה או אחורה בהתאם לשיפוע.

הכבש יכול להיות בשיפוע יורד, ללא שיפוע, או בשיפוע עולה. במידה שהטופוגרפיה מאפשרת, עדיף לסלול את כבש המילוט בשיפוע עלייה (הפוך לשיפוע הדרך), כך שכוח החיכוך וכוח הכובד הפועלים באותו כיוון יאפשרו בניית כבש מילוט באורך קצר יותר.

### נ.6.3 הצדקים לכבש מילוט

מדדי ההצדק לכבש מילוט (צריכים להתקיים בו זמנית) הינם:  
 א. ירידה תלולה (בשיפוע העולה על 6%).  
 ב. ירידה ארוכה (מעל 1000 מטר).

בנוסף לשני המדדים צריך להתקיים אחד התנאים הבאים:

- לאחר קטע ארוך של ירידה, יש עקום אופקי ששילוב הרדיוס וההגבהה בו לא מאפשר מהירות תכן העולה על 120 קמ"ש.
- בתחתית הירידה מצויה תהום בעומק 5 מטר לפחות.
- לאורך הירידה או בתחתיתה קיים שטח בנוי.
- לאורך הירידה או בתחתיתה מצוי גורם קבוע המחייב עצירה, או היוצר תורים בזרימת התנועה כגון: רמזור, צומת, מפגש מסילתי חד-מפלסי, וכו'.

### נ.6.4 מיקום ותצורה של כבשי המילוט

מיקום כבשי המילוט נקבע לפי שיקול הנדסי ובהתאם להצדק למתן כבש זה כדלהלן:



- א. בירידות הקצרות מ-5 ק"מ, ימוקם כבש המילוט בתחתית הירידה.
- ב. בירידות ארוכות מ-5 ק"מ, רצוי לתכנן שני כבשי מילוט או יותר. כבש המילוט האחרון ימוקם בתחתית הירידה, בדומה לסעיף הקודם. שאר כבשי המילוט ימוקמו כך, שהמרחק ביניהם לא יעלה על 2.5-3.0 ק"מ. כאשר יש שני כבשי מילוט (למשל באורך ירידה של 5.0-6.0 ק"מ), רצוי למקם כבש מילוט אחד במחצית הירידה, ואת השני בתחתיתה. המיקום המדויק והסופי ייקבע בהתאמה לטופוגרפיה.
- ג. כבש המילוט יהיה בעל תוואי אופקי ישר ללא מכשולים. רצויה עקמומיות אנכית מזערית. הכבש צריך להיראות לכל אורכו לנהג המשאית המתקרבת העשויה להשתמש בו. בצורה זו יוכל הנהג להיות דרוך לקראת היציאה מהדרך הראשית והכניסה לכבש המילוט. רצוי לאפשר הבחנה בכבש המילוט ממרחק של 350 מטר לפני הכניסה אליו.
- ד. במידה שלאורך הירידה קיים גורם מסכן כגון עקום אופקי, צומת וכו', ימוקם כבש המילוט לפניו. כאשר יש עקום אופקי, לא ימוקם כבש המילוט על המשיק בסיום העקום, מחשש שהדבר יטעה את הנהגים בין כבש המילוט לבין המשך תוואי הדרך הראשית.

### נ.6.5 חומרים, גיאומטריה, מבנה ושילוט של כבש המילוט

#### א. החומר הבולם

- (1) כדי לבלום את מהירות המשאית בצורה הדרגתית ובמרחק קצר ככל שניתן, יש לסלול בכבש המילוט "אמבטיה" (arrester bed) הממולאת בחומר גרנולרי העונה על התנאים הבאים: חומר גרנולרי שפיך, גרוס, חד-גרגירי. החומר יהיה תוצר גריסה מנופה של אבן גיר, דולומיט או בזלת, אשר עובר נפה 1/2" ומשתייר על נפה מס' 4 ("עדס"). תכונות נוספות של החומר הינן: (1) אחוז שחיקה מרבי לפי בדיקת לוס אנג'לס – 32%; (2) אינדקס פחיסות מרבי – 30%; (3) אינדקס אלונגציה מרבי – 45%. תכונות אלה נועדו להבטיח שהחומר יהיה בעל עמידות גבוהה, בעל אחוז חלל גבוה, לא מתהדק, בעל תכונות ניקוז טובות, ומקדם חיכוך גבוה לגלגול (לפחות  $f=0.20$ ). לחילופין מומלצות אבנים מעוגלות (חלוקי נחל) בקוטר 12-20 מ"מ.
- (2) העומק המרבי של החומר הבולם ינוע בין 45 ס"מ ל-60 ס"מ. עומק החומר הבולם בכניסה לכבש המילוט יהיה 10 ס"מ. העומק יעלה בהדרגה ל-45 ס"מ לאחר 30 מטר, ול-60 ס"מ לאחר 45 מטר. התאווה המוערכת היא 3.0 מ/שנ"2 לעומק 35 ס"מ, 3.7 מ/שנ"2 לעומק 45 ס"מ.
- (3) פיזור ויישור החומר יהיה באמצעות מפלסת ללא כבישה.

#### ב. אורך כבש המילוט

אורך כבש המילוט (מטר) יחושב לפי הנוסחה:

$$L = \frac{V^2}{250 \cdot (f \pm i)}$$

כאשר:

- L – אורך כבש המילוט (מטר);  
 V – מהירות המשאית המידרדרת בתחילת הנתב (120 קמ"ש);  
 f – מקדם החיכוך של החומר הבולם (שבר עשרוני);



i – שיפוע כבש המילוט בשבר עשרוני; כאשר הכבש עולה – הסימן חיובי, וכאשר הוא יורד – הסימן שלילי;

250 – מקדם הסדרת יחידות MKS (לרבות תאוצת הכובד).

אורך כבש המילוט בשיפועים שונים עבור מקדם חיכוך  $f=0.2$  מוצג בטבלה 6א'.

**טבלה 6א': אורך כבש המילוט בהתאם לשיפוע לאורכו (ל-0.2=f)**

שיפוע כבש המילוט (%)	-5	0	5	10	15	20
אורך כבש המילוט (מ')	380	290	230	190	160	140

### ג. רוחב כבש המילוט

רוחב כבש המילוט המצופה בחומר הגרנולרי הינו 4.0 מטר. במקביל לכבש המילוט יש לסלול בצד הסמוך לכביש הקיים נתיב שירות, המיועד לתחזוקת כבש המילוט ולצרכי חילוץ. נתיב השירות יהיה ברוחב 3.5 מטר ויהיה מצופה אספלט. בסוף כבש המילוט תתוכנן סובה (מצופה אספלט) שתאפשר את סיבוב המשאית ללא נסיעה לאחור.

### ד. התחברות לדרך הקיימת

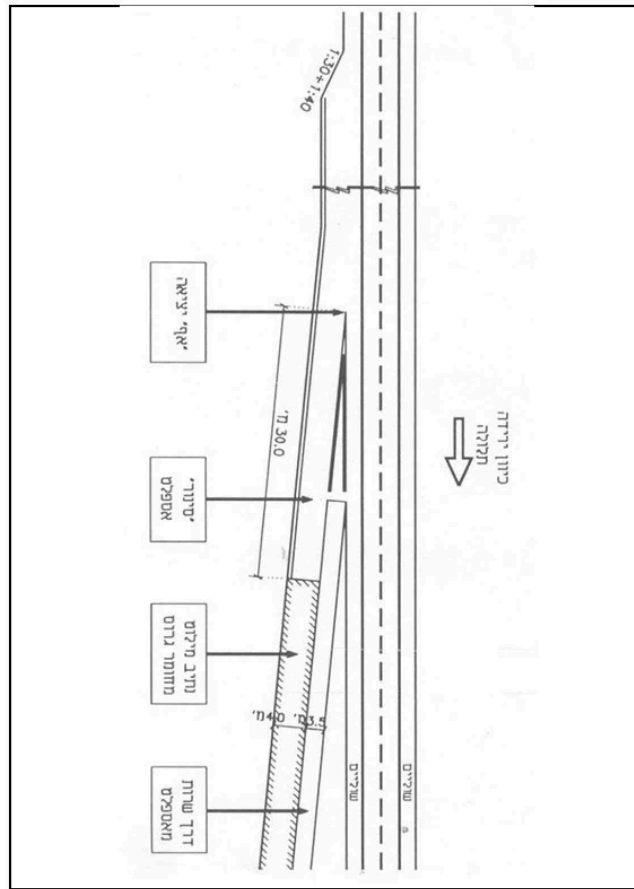
כבש המילוט יסתעף מהדרך הקיימת בלכנסן בזווית קטנה לימין (1:30-1:40). יציאת כבש המילוט מהדרך הקיימת תעשה באמצעות הרחבת המיסעה לפני כבש המילוט, והמשכת מבנה המיסעה הקיימת מעבר ל"אף" היציאה, לתוך כבש המילוט בצורת "סינור". "סינור" זה מצריך אורך מזערי כדי שהמשאית תתיישר לאורך כבש המילוט, והציר הקדמי יגיע לאזור הגרנולרי בזווית הניצבת לכיוון כבש המילוט. ה"סינור" גם מונע את התזת החומר הגרנולרי של כבש המילוט על הדרך הקיימת. ה"סינור" מאפשר את ביצוע העקום האנכי הנדרש בכבש המילוט. אורכו המזערי 30 מטר כמוצג בתרשים 6א'.

### ה. שילוט

תפעול יעיל של כבש המילוט יחייב שילוט מקדים מתחילת הירידה, המזהיר מפני שימוש יתר בבלמים, תוך ציון המרחק לכבש המילוט. בכניסה לכבש המילוט עצמו מתחייב שילוט המסביר את מהותו, ואוסר כניסה אליו וחנייה בו לכל סוגי הרכב. בהעדר תמרור יעודי המורה על כבש מילוט, ניתן להציב תמרור הכוונה לנתיבים 619, בו חץ ישר לכיוון הנסיעה וחץ בכיוון למעלה וימינה (המסמן את כבש המילוט). ניתן לצרף אליו גם תמרור 623 (כביש ללא מוצא) ואת המילים "כבש מילוט".

### ג.6.6 אחזקת כבש המילוט

את כבש המילוט יש לתחזק כך שיהיה שמיש בכל עת. לאחר כל שימוש יש ליישר את כבש המילוט באמצעות מפלסת. מידי שנה יש ליישר את משטח החומר הבולם, לבדוק מחדש את תכונותיו, ולהוסיף ולהחליף חומר במידת הצורך.



**תרשים 6א':** תנוחה של כבש מילוט (סכימתי ללא קנ"מ)