



## פרק 5: התוואי האופקי

### תוכן עניינים

5-1.....	<b>מבוא</b>	<b>5.1</b>
5-1.....	<b>רדיוסים והגבהות בעקומים אופקיים</b>	<b>5.2</b>
5-1.....	הרדיוסים המזעריים בעקומים אופקיים.....	5.2.1
5-3.....	הקשר בין רדיוסים גדולים מהמזעריים וההגבהה המתאימה.....	5.2.2
5-4.....	הערך המזערי של הגבהה צידית אחידה בעקום האופקי.....	5.2.3
5-6.....	עקומים אופקיים בעלי קימור רוחבי רגיל.....	5.2.4
5-6.....	מגבלות לאורך העקום ולזווית.....	5.2.5
5-7.....	<b>מעבר שיפועים</b>	<b>5.3</b>
5-7.....	הגדרות.....	5.3.1
5-7.....	אורך מעבר השיפועים.....	5.3.2
5-8.....	5.3.2.1 מעבר ההגבהה.....	
5-12.....	5.3.2.2 מעבר המשיק.....	
5-13.....	אופן היישום וערכי תכן.....	5.3.3
5-14.....	שיטות לביצוע מעבר השיפועים בדרך דו-נתיבית.....	5.3.4
5-14.....	תכנון חתך אורכי רציף לקצות המיסעה.....	5.3.5
5-14.....	מעבר השיפועים בדרך דו-מסלולית עם מפרדה.....	5.3.6
5-15.....	<b>הרחבה בעקומים אופקיים</b>	<b>5.4</b>
5-15.....	מטרת ההרחבה.....	5.4.1
5-20.....	חישוב ההרחבה.....	5.4.2
5-22.....	ערכי תכן.....	5.4.3
5-23.....	אופן ביצוע ההרחבה.....	5.4.4
5-23.....	הגדרת רוחב הנתיב (W) לחישוב מעבר השיפועים.....	5.4.5
5-24.....	<b>עקום מעבר</b>	<b>5.5</b>
5-24.....	כללי.....	5.5.1
5-24.....	אורך עקום מעבר.....	5.5.2
5-25.....	אופן ביצוע עקום המעבר.....	5.5.3
5-28.....	שיקולי תכנון.....	5.5.4
5-28.....	עקום אופקי שאינו מחייב עקום מעבר.....	5.5.5

פרק 5 – התוואי האופקי



5-28.....	עיקרי תהליך התכנון של שילוב עקום מעבר בעקום אופקי.....	5.5.6
<b>5-29.....</b>	<b>הראות בעקום אופקי .....</b>	<b>5.6</b>
5-29.....	כללי .....	5.6.1
5-29.....	הראות בקשת המעגלית.....	5.6.2
<b>5-33.....</b>	<b>שילוב עקומים עוקבים בתוואי האופקי.....</b>	<b>5.7</b>
5-33.....	עקומים אופקיים לאותו כיוון .....	5.7.1
5-35.....	עקומים אופקיים מנוגדי כיוון.....	5.7.2
<b>5-37.....</b>	<b>עקלתונים.....</b>	<b>5.8</b>
5-37.....	הגדרה.....	5.8.1
5-38.....	הצדקים לשימוש בעקלתון .....	5.8.2
5-38.....	סיווג העקלתונים.....	5.8.3
5-39.....	התוואי הראשוני ובדיקתו.....	5.8.4
5-41.....	קריטריונים לתכן עקלתונים.....	5.8.5
5-46.....	בדיקות הכרחיות לתכנון התוואי הראשוני של העקלתון .....	5.8.6
<b>5-49.....</b>	<b>בקרה כללית לתוואי האופקי.....</b>	<b>5.9</b>



## פרק 5: התוואי האופקי

### 5.1 מבוא

התוואי האופקי של הדרך מורכב מרצף של קטעים ישרים ועקומים אופקיים. העקומים האופקיים הם בדרך-כלל צירופים שונים של קשתות מעגליות ועקומי מעבר, כאשר הקשתות המעגליות משמשות לשינוי כיוון התוואי, ועקומי המעבר מסדירים את המעבר מהקטעים הישרים לקשתות המעגליות מבחינת נוחות הנסיעה (דינמיות), בטיחות הנסיעה, וחזות התוואי (התאמה סביבתית). לתכנון התוואי האופקי השפעה רבה על גורמים אלה, אשר מושפעים הן מתכינת כל עקום בנפרד, והן על ידי תכן התוואי הכולל, והבקרה על תכנון העקומים ואופן הקשר שלהם לקטעים הישרים. העקביות בתכנון היא גורם חשוב בשני המרכיבים.

פרק התוואי האופקי שלפניכם מכיל שני חלקים בסיסיים: החלק הראשון (עד סעיף 5.5) עוסק בהנחיות לתכן המרכיבים השונים של העקום האופקי הבודד: (1) רדיוס והגבהה; (2) הרחבה; (3) מעבר שיפועים; (4) עקום מעבר.

החלק השני (החל מסעיף 5.6) עוסק באלמנטים משולבים: (1) ראות בעקומים אופקיים; (2) שילוב עקומים עוקבים בתוואי – עקומים מורכבים, עקומים לאותו כיוון, עקומים בעלי כיוון מנוגד ועקלתונים; (3) בקרת התוואי האופקי.

### 5.2 רדיוסים והגבהות בעקומים אופקיים

סעיף זה עוסק בנושאים להלן:

- א) קביעת הרדיוסים המזעריים למהירויות התכן השונות, והגורמים המשפיעים על קביעה זו.
- ב) קביעת הקשר בין הרדיוס להגבהה עבור רדיוסים הגדולים מהרדיוסים המזעריים.

#### 5.2.1 הרדיוסים המזעריים בעקומים אופקיים

##### א. שיווי המשקל בעקום האופקי

על רכב הנוסע בקשת מעגלית בתוואי האופקי פועל כוח צנטריפוגלי הדוחף את הרכב אל מחוץ לעקום. כוח זה גדל ככל שמהירות הרכב גדלה, וככל שרדיוס העקום קטן. הכוחות המאזנים את הכוח הצנטריפוגלי הם:

- כוח החיכוך הצידי בין הגלגלים למיסעה.
- רכיב כוח הכובד הפועל בכיוון מורד ההגבהה, אם קיימת (ההגבהה בקשת המעגלית היא השיפוע הרוחבי של הדרך שערכו בעקום אחיד, וכיוונו ירידה לפנים העקום).

משוואת שיווי משקל התאוצות בעקום אופקי:



$$g \cdot e + g \cdot f = \frac{V^2}{R}$$

כאשר:

- $g$  – תאוצת הכובד (מטר/שנייה<sup>2</sup>);
- $e$  – ההגבהה הצידיית בעקום (בשבר עשרוני);
- $f$  – גורם החיכוך הצידי (בשבר עשרוני);
- $V$  – מהירות הנסיעה (מטר/שנייה);
- $R$  – רדיוס העקום (מטר).

לפיכך, הפרמטרים התכנוניים העיקריים הקובעים את ערכי הרדיוסים המזעריים בעקום אופקי במהירות תכן נתונה, הינם החיכוך הצידי וההגבהה.

### ב. גורם החיכוך הצידי

גורם החיכוך הצידי מבטא את שיעור החיכוך המתפתח, אשר מנוצל על ידי הרכב בעת הנסיעה בעקום, והוא מהווה רכיב ממקדם החיכוך הצידי. ככל שהיחס בין גורם החיכוך למקדם החיכוך נמוך יותר, הסכנה להחלקה קטנה יותר. משיקולים בטיחותיים רצוי להקטין את ערכי התכן של גורם החיכוך הצידי עם העלייה במהירות.

טבלה 5.1 מרכזת את ערכי גורם החיכוך הצידי למהירויות התכן השונות. הערכים מבוססים על מדידות התאוצה הצידיית ( $g \cdot f$ ) המתאימה לרוב הנהגים.

### ג. ההגבהה הצידיית המרבית

ההגבהה הצידיית תורמת יחד עם מקדם החיכוך לאיזון הכוח הצנטריפוגלי בעת נסיעת הרכב בעקום אופקי. היחס  $e/(e+f)$  מבטא את התרומה היחסית של ההגבהה לאיזון עם הכוח הצנטריפוגלי. ככל שהיחס הזה גבוה יותר, קטן ניצול החיכוך, וגדלים נוחות הנסיעה ובטיחות הנסיעה בעקום.

במהירויות תכן נמוכות, הנגרמות עקב אילוצי תכנון בדרך כלל, וכאשר הדרך עוברת בטופוגרפיה הררית, רצוי מבחינה כלכלית לתכנן את העקומים האופקיים לרדיוסים קטנים, תוך שימוש בהגבהות צידיות תלולות ככל שניתן, עקב פילוג המהירויות הצר. במהירויות התכן הגבוהות יש לתכנן את העקום האופקי עם הגבהה צידית נמוכה יותר, על מנת לספק את דרישות הנוחות והבטיחות. זאת עקב המהירות של כלי רכב איטיים יותר, הנמוכה באופן משמעותי ממהירות התכן, שבה, עקב ההגבהה הגדולה, מתקזזת מרבית התאוצה הצנטריפוגלית על ידי ההגבהה, ללא הזדקקות לגורם החיכוך הצידי; מהירות זו ידועה כ"מהירות הנוחות", ומחושבת כ:

$$V_0 = \sqrt{R \cdot g \cdot e}$$

כאשר  $V_0$  היא מהירות הנוחות ב-מ'/שנ', והשאר כפי שפורט בנוסחה שבסעיף א' לעיל. על רכב הנוסע אף לאט יותר ממהירות זו, פועל כוח שקול לכיוון פנים העקום, שהנהג לא מצפה לו.

ההגבהה הצידיית המרבית,  $e_{max}$ , הינה בתחום שבין 0.10 למהירויות תכן 60-80 קמ"ש, המתאימות לדרכים חד-מסלוליות, לבין 0.08 למהירויות תכן של 90-120 קמ"ש, המתאימות לדרכים מחולקות. ערכי



ההגבהה הצידיית מובאים בטבלה 5.1 ומבוססים על יחסי  $e/(e+f)$  העולים מ-0.385 למהירות 60 קמ"ש, ועד 0.47 למהירות 120 קמ"ש.

#### ד. ערכי הרדיוסים המזעריים בעקום אופקי

הרדיוס המזערי נקבע בהתאם למהירות התכן, להגבהה הצידיית, ולגורם החיכוך הצידי, כפי שמוצג במשוואה שלהלן:

$$R_{\min} = \frac{V_d^2}{127 \cdot (e_{\max} + f)}$$

כאשר:

$R_{\min}$  – הרדיוס המזערי למהירות התכן (מטר);

$V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש);

$f$  – גורם החיכוך הצידי המתאים למהירות התכן (בשבר עשרוני), מטבלה 5.1;

$e_{\max}$  – ההגבהה הצידיית המרבית המתאימה למהירות התכן (בשבר עשרוני), מטבלה 5.1;

127 – מקדם המרת יחידות לרבות תאוצת הכובד.

ערכי התכן של הרדיוסים המזעריים מובאים בטבלה 5.1.

#### טבלה 5.1: ערכי תכן לפרמטרים הבסיסיים בעקום אופקי למהירויות התכן השונות

מהירות התכן (קמ"ש)							ערך התכן
120	110	100	90	80	70	60	
0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	הגבהה מרבית $e_{\max}$
0.09	0.09	0.10	0.11	0.13	0.13	0.16	גורם החיכוך הצידי $f^*$
670	565	440	340	220	170	110	רדיוס אופקי מזערי $R_{\min}$ (מ')

\* ערכים מתאימים לתערובות אספלטיות מסוג S ו-SMA.

#### 5.2.2 הקשר בין רדיוסים גדולים מהמזעריים וההגבהה המתאימה

בערכי הרדיוסים המזעריים שהוצגו בסעיף הקודם, מומלץ להשתמש רק כאשר קיימים אילוצים. ככלל, יש להעדיף רדיוסים גדולים מהרדיוסים המזעריים, במידה שהטופוגרפיה והסביבה מאפשרות.

ההגבהה הצידיית תורמת יחד עם מקדם החיכוך לאיזון הכוח הצנטריפוגלי בעת נסיעת הרכב בעקום אופקי. היחס  $e/(e+f)$  מבטא את התרומה היחסית של ההגבהה לאיזון הכוח הצנטריפוגלי. ככל שהיחס הזה גבוה יותר, קטנה ההסתמכות על החיכוך, וגדלים נוחות הנסיעה ובטיחות הנסיעה בעקום.

ככל שרדיוס העקום גדול מהרדיוס המזערי, קטנה התאוצה הצנטריפוגלית הפועלת על רכב הנוסע בעקום זה, לעומת התאוצה הפועלת על רכב הנוסע ברדיוס המזערי במהירות זהה. משיקולי איזון בין ההגבהה



לבין החיכוך הצידי והשפעתם על נוחיות הנסיעה, יש להגדיל את היחס  $e/(e+f)$  ככל שרדיוס העקום גדל במהירות תכן קבועה, כמפורט בסעיף 5.2.1 ג' לעיל.

הקשר בין הרדיוס וההגבהה, אשר עונה לדרישות התכנון, הוא:

$$e_c = \frac{1}{1+\gamma} \cdot \left( \frac{V_d^2}{127 \cdot R_c} - f_{\max} + e_{\max} \cdot \gamma \right)$$

כאשר:

- $e_c$  – ההגבהה הצידיית הדרושה בעקום בעל רדיוס  $R_c$  הגדול מהרדיוס המזערי (שבר עשרוני);
  - $R_c$  – הרדיוס הקיים בעקום (מטר);
  - $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש);
  - $\gamma$  – מקדם התלוי במדיניות ההגבהה המרבית, לפי טבלה 5.2;
  - $f_{\max}$  – גורם החיכוך הצידי המתאים להגבהה המרבית (בשבר עשרוני), מטבלה 5.1;
  - $e_{\max}$  – ההגבהה הצידיית המרבית המתאימה למהירות התכן (בשבר עשרוני), מטבלה 5.1.
- אופן השתנות ההגבהה עם הרדיוס למהירויות התכן השונות נתון בתרשים 5.1.

#### טבלה 5.2: ערכי המקדם $\gamma$ להגבהות מותרות

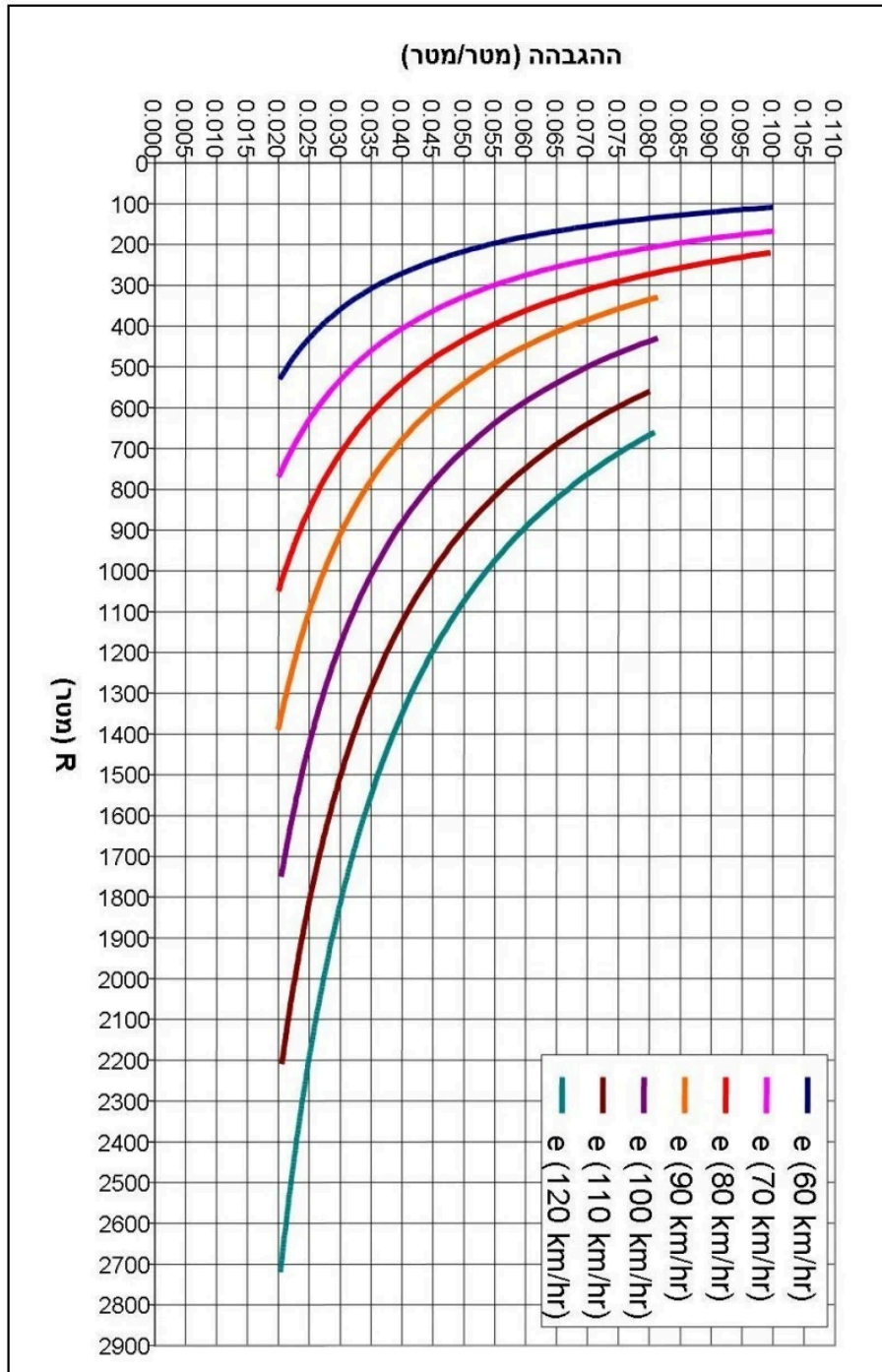
מהירות תכן (קמ"ש)							ערך התכן
120	110	100	90	80	70	60	
0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	$e_{\max}$ הגבהה מרבית
1.150	1.133	1.267	1.400	1.275	1.250	1.587	$\gamma$

#### 5.2.3 הערך המזערי של הגבהה צידיית אחידה בעקום האופקי

הערך המזערי של הגבהה צידיית אחידה היורדת בכיוון מרכז העקום האופקי הוא 2-2.5%. משיקולי ניקוז, אין לבצע הגבהה בעלת ערך קבוע הנמוך מזה (פרט למעברי שיפועים). הרדיוסים המתאימים להגבהה האחידה המזערית למהירויות התכן השונות מוצגים בטבלה 5.3.

#### טבלה 5.3: הרדיוסים הקטנים ביותר הניתנים ליישום להגבהה צידיית אחידה מזערית (2%)

120	110	100	90	80	70	60	מהירות תכן (קמ"ש)
2760	2270	1790	1390	1050	770	535	רדיוס אופקי להגבהה מזערית (מ')



**תרשים 5.1:** הקשר בין רדיוס העקום וההגבהה הצידיית למהירויות התכן השונות



#### 5.2.4 עקומים אופקיים בעלי קימור רוחבי רגיל

בעקומים בעלי רדיוסים גדולים, התאוצה הצנטריפוגלית נמוכה, ולא מחייבת הגבהה צידית לצורך איזונה, מאחר שגורם החיכוך הצידי אמור להספיק. בעקומים אלה ניתן לשמר את צורת הקימרון הרגיל (שיפוע דו-צדדי של 2-2.5%) לכל אורך העקום, ואין צורך במעבר שיפועים. התאוצה הצנטריפוגלית המרבית שאיננה מחייבת שינוי של ההגבהה הינה  $0.2 \text{ מ}^2/\text{שני}^2$ . הרדיוס האופקי אשר ברדיוסים הגדולים ממנו אין צורך בשינוי הקמרון הרגיל להגבהה אחידה נקרא  $R_N$ , וערכיו מוצגים בטבלה 5.4.

בעקומים אופקיים שרדיוסם קטן מהמוצג בטבלה 5.4 אך גדול מהערכים המוצגים בטבלה 5.3, יש לשמור על הגבהה אחידה בשיעור 2-2.5% לרוחב כל החתך.

ברדיוסים הגדולים מ- $R_N$  ובייחוד כאשר השיפוע האורכי קטן מ-1%, אין לשנות את הקמרון הרגיל לרוחב הדרך (2.5% למקרה של שיפוע אורכי הנמוך מ-1%, ראו פרק התוואי האנכי), למניעת בעיות ניקוז במעברי השיפועים.

**טבלה 5.4:** ערכי הרדיוסים ( $R_N$ ) שהחל מהם ניתן לשמור על הקמרון הרגיל בחתך לרוחב

מהירות תכן (קמ"ש)	60	70	80	90	100	110	120
רדיוס אופקי $R_N$ (מ')	1400	1900	2500	3100	3800	4700	5500

#### 5.2.5 מגבלות לאורך העקום ולזווית

##### א. אורך מזערי לעקום האופקי

בספרות המקצועית נמצאות ההמלצות הבאות: האורך המזערי של כל עקום אופקי מעגלי במטרים הינו  $3 \cdot V_d$  (כאשר  $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש). בנוסף, עקום אופקי באורך קטן מדי עשוי להיראות כשבר בין קטעים ישרים כאשר מתקרבים אליו, לכן כאשר הזווית המרכזית של הקשת ( $\Delta$ ) קטנה מ-5°, העקום האופקי צריך להיות ארוך מ-150 מ'.

בניסיון בישראל נמצא שלא תמיד ניתן לעמוד בערכים אלה. בנוסף, כאשר כיוון הנסיעה לא משתנה (כגון בהכנסת עקום כדי לאפשר הרחבת המפרדה למיקום גשרים וכד'), אין משמעות להגבלות אלה.

##### ב. אורך מרבי לעקום האופקי

עקומים ארוכים מדי יוצרים תנאי נהיגה מאולצים הפוגעים בנוחות הנהיגה. אורכו המרבי של העקום האופקי לא יעלה על  $12 \cdot V_d$  (כאשר  $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש).

##### ג. זווית שלא מצריכה עקום אופקי

כאשר יש שינויים קלים בתוואי, לא מחויב להשתמש בעקום אופקי. זוויות הטיה מרביות שלא מחייבות עקום אופקי מוצגות בטבלה 5.5. יש להימנע מצירוף של שתי זוויות הטיה נמוכות עוקבות.



**טבלה 5.5:** זוויות הטיה מרביות שלא מצריכות עקום אופקי (במעלות)

מהירות תכן (קמ"ש)							סוג הדרך
120	110	100	90	80	70	60	
-	-	-	-	1	1	1	דו-נתיבי
0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	-	-	דו-מסלולי

### 5.3 מעבר שיפועים

#### 5.3.1 הגדרות

מעבר השיפועים הינו קטע הדרך (הכביש) בו מתרחש המעבר ההדרגתי של שיפוע צידי מהחתך הרחבי הרגיל (קימור של 2% בכיוונים מנוגדים לצורך ניקוז), לחתך הרחבי המוגבה בשיעור אחיד, הנדרש לאורך הקשת המעגלית.

מעבר השיפועים חשוב לנושאי בטיחות הנסיעה, נוחות הנסיעה, ושימור חזות נעימה של קצות המיסעה ללא עיוות פני הדרך.

מעבר השיפועים מורכב משני חלקים (תרשים 5.2):

#### א. מעבר ההגבהה ( $L_1$ ):

עבור הנתיב או הנתיבים החיצוניים: הקטע שלאורכו נעשה מעבר הדרגתי משיפוע צידי של 0% (מסוף מעבר המשיק, להלן), עד לשיפוע בהגבהה מרבית אחידה בעקום המעגלי (ותהליך הפוך ביציאה מהעקום).

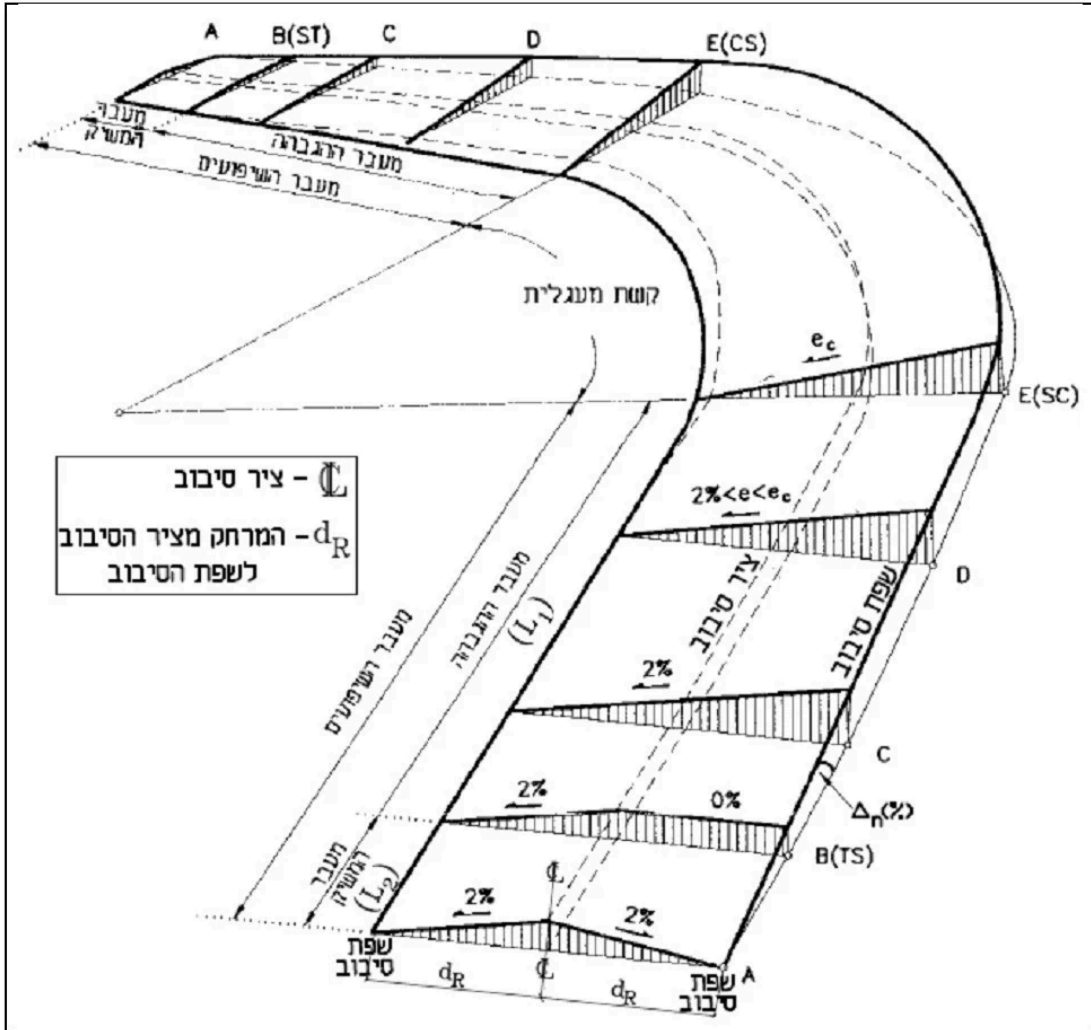
עבור הנתיב או הנתיבים הפנימיים מיושם חלק ממעבר השיפועים, ממצב של שיפוע רגיל (הגבהה 2%), עד להגבהה מרבית בעקום (ותהליך הפוך ביציאה מהעקום).

#### ב. מעבר המשיק ( $L_2$ ):

עבור הנתיב או הנתיבים החיצוניים בלבד: הקטע שלאורכו נעשה מעבר הדרגתי מהחתך הרחבי בעל הקימור הרגיל (2%), עד לחתך רחבי שבו השיפוע הצידי 0%, כאשר הנתיב או הנתיבים הפנימיים נשארים עדיין בקימור רגיל.

#### 5.3.2 אורך מעבר השיפועים

אורך מעבר השיפועים נקבע על פי הקצב המרבי בו ניתן לסובב את המיסעה סביב הציר האורכי של מעבר השיפועים. קצב זה מבוטא בעזרת השיעור המרבי של שינוי שיפוע שפות הדרך ביחס לציר,  $\Delta_n$ , (תרשים 5.2) כפי שנקבע משיקולי נוחות הנסיעה וחזות הנסיעה.



**תרשים 5.2:** מעבר השיפועים (לאורך עקום מעבר)

5.3.2.1 מעבר ההגבהה

האורך המזערי של מעבר ההגבהה מחושב לפי:

$$L_1 = \frac{(W \cdot n) \cdot e_c}{\Delta_n}$$

כאשר:

- $L_1$  – אורך מזערי למעבר ההגבהה (מטר);
- $W$  – רוחב נתיב הנסיעה (מטר): עבור קטע ישר, ייקבע רוחב נתיב הנסיעה בהתאם לסעיף 3.2 בפרק 3 לעיל (חתכים לרוחב), בדרך כלל רוחב סטנדרטי של 3.6 מטר. לרוחב נתיב עם הרחבה בעקום, ראו סעיף 5.4.5 להלן;



$e_c$  – ההגבהה הקיימת בקשת המעגלית (%);  
 $n$  – מספר הנתיבים המחושב בין ציר הסיבוב לבין שפת הסיבוב:  
 בדרך דו-נתיבית:  $n=1$  כאשר ציר הסיבוב סימטרי, אחרת יחושב כמו בדו-מסלולית להלן.  
 בדרך דו-מסלולית: הערך  $n$  מחושב ככפולה של רוחב הנתיב  $W$  (ערך  $n$  המתקבל לא חייב להיות מספר שלם, היות שזה לא בהכרח זהה למספר נתיבי הנסיעה לכיוון), כמוצג בנוסחה שלהלן;

$$n = \frac{d_R}{W}$$

כאשר:

$d_R$  – המרחק מציר הסיבוב לשפת הסיבוב (מטר). ציר הסיבוב הינו בדרך כלל ציר הדרך (מרכז המיסעה בדרך דו-נתיבית ומרכז המפרדה בדרך מחולקת). שפת הסיבוב הינה קצה הנתיב הימני.

$\Delta_n$  – שיעור שינוי השיפוע (maximum relative gradient) (%): ההפרש המרבי בין השיפוע לאורך השפה במעבר ההגבהה, לבין השיפוע לאורך בציר הסיבוב, כמוצג בתרשים 5.2.  
 ערכי  $\Delta_n$  הבסיסיים ( $n=1$ , דרך דו-נתיבית) מוצגים בטבלה 5.6.  
 בדרך רב-נתיבית (מחולקת), נדרש מקדם תיקון ( $\delta_w$ ) ל- $\Delta_n$ , כמפורט ב-א. להלן, וחישוב מחודש של  $\Delta_n$  כמפורט ב-ב. להלן.

בתרשים 5.3 מובאות מספר דוגמאות לחישוב  $d_R$  ו- $n$ , המבוססות על חתכים טיפוסיים של דרכים חד-מסלולית ודו-מסלוליות בשניים או שלושה נתיבים לכיוון, עם תאורה בצד (לפי תרשימים 3.1, 3.3, 3.5-3.7, 3.11-3.13 בפרק 3).

**א.  $\delta_w(n)$  – מקדם תיקון ל- $\Delta_n$  בדרך המכילה יותר מנתיב מסובב אחד ( $n > 1$ , דרך דו-מסלולית):**  
 כאשר מסובב מסלול שבו יותר מנתיב אחד לכיוון ( $n > 1$ , דרך מחולקת), מומלץ קיצור של מעבר ההגבהה, כדי להימנע ממעברי הגבהה ארוכים. הגדלת מספר הנתיבים המסובב ( $n$ ) לא תאריך את מעבר ההגבהה באופן יחסי, אלא באורך מופחת.

מקדם התיקון ( $\delta_w$ ) ל- $\Delta_n$  ייקבע בהתאם למספר הנתיבים המסובב  $n$  כמוצג בנוסחה שלהלן:

$$\delta_w(n) = \frac{1 + 0.5 \cdot (n - 1)}{n}$$

כאשר:

$\delta_w(n)$  – מקדם תיקון לקיצור מעבר השיפועים למסלול עם מספר נתיבים מסובב ( $n$ ) הגדול מ-1, כגון דרך מחולקת. ערכים אופייניים המבוססים על החתכים הטיפוסיים (פרק 3, חתך לרוחב) מובאים בטבלה 5.7;

$n$  – מספר הנתיבים המסובב למרחק  $d_R$  מציר הסיבוב לשפת המיסעה (ערכים אופייניים בטבלה 5.7).



דרך חד-מסלולית	דרך דו-מסלולית 4 נתיבית (תאורה בצד)
נתיב אחד מסובב	2.44 נתיבים מסובבים
<p>חתך נורמלי</p>	<p>חתך נורמלי</p>
<p>חתך מסובב</p>	<p>חתך מסובב</p>
דרך דו-מסלולית 6 נתיבית (תאורה בצד)	
3.44 נתיבים מסובבים	
<p>חתך נורמלי</p>	
<p>חתך מסובב</p>	

\* מספר הנתיבים המסובב (n) יכול להיות מספר לא שלם, כמתואר בדוגמאות של דרך דו-מסלולית בהן ציר הסיבוב עובר במרכז המפרדה

**תרשים 5.3:** דוגמאות לחישוב מספר הנתיבים המסובבים לצורך יישום מקדם התיקון ל-n בחישוב מעבר ההגבהה, כאשר ציר הסיבוב הוא ציר הדרך



**טבלה 5.6:** הפרש שיפוע מרבי מותר ( $\Delta_n$ ) בין ציר הדרך וקצות המיסעה בתלות במהירות התכן (%)

מהירות תכן (קמ"ש)							סוג דרך
120	110	100	90	80	70	60	
0.38	0.40	0.43	0.46	0.50	0.56	0.64	דו-נתיבית (וערך בסיסי לחישוב $\delta_w$ )
0.539	0.568	0.610	0.653	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.1)
0.550	0.578	0.622	0.665	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.3)
0.589	0.620	0.667	0.713	–	–	–	שש-נתיבית (כולל מעויירת מהירה), מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.5)
0.606	0.638	0.686	0.734	–	–	–	שש-נתיבית מהירה במהירות תכן 120 קמ"ש, מפרדה צרה, רוחב נתיב 3.6 מ' (חתך כדוגמת תרשים 3.7)*
0.595	0.627	0.673	0.720	–	–	–	שש-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.8)

\* עבור רוחב נתיב 3.7 מטר ערכי  $\Delta_n$  זהים לצרכי תכנון.

טבלה 5.7 מציגה את המרחקים מציר הסיבוב ( $d_R$ ) ואת מקדמי התיקון לקיצור מעבר השיפועים ( $\delta_w(n)$ ) כתלות בסוג הדרך, בהנחה שציר הסיבוב ממוקם במרכז המפרדה, ורוחב הנתיב הינו 3.6 מטר. ערכי  $\Delta_n$  הסופיים יחושבו כמפורט ב-ב. להלן.

**ב. ערכי  $\Delta_n$  סופיים לחישוב**

$n=1$ : ערכי ה- $\Delta_n$  הינם הערכים הבסיסיים לדרך דו-נתיבית כמוצג בטבלה 5.6.  
 $n>1$ : ה- $\Delta_n$  המתאים למסלול עם  $n>1$ , כלומר דרך דו-מסלולית (לפחות שני נתיבים לכיוון), מתקבל על ידי חלוקת ה- $\Delta_n$  המתאים לדרך חד-מסלולית דו-נתיבית ( $n=1$ ), במקדם התיקון  $\delta_w$  מטבלה 5.7.

$$\Delta_n(n > 1) = \frac{\Delta_n(n = 1)}{\delta_w(n)}$$

ערכי  $\Delta_n$  המחושבים עבור החתכים הטיפוסיים של דרך דו-מסלולית (פרק 3) מובאים בטבלה 5.6. לטבלה הוספו גם הערכים הבסיסיים של דרך דו-נתיבית.



### ג. מעבר הגבהה ( $L_1$ ): פישוט פרמטרים

אורך מעבר ההגבהה ( $L_1$ ) ניתן לביטוי לאחר פישוט פרמטרים באמצעות הנוסחה:

$$L_1 = \frac{(d_R + W) \cdot e_c (\%)}{2 \cdot \Delta_{n=1} (\%)}$$

כאשר ערכי  $\Delta_{n=1}$  הבסיסיים ( $n=1$ , דרך דו-נתיבית) מוצגים בטבלה 5.6. ערך  $d_R$  הינו פרמטר המאפיין את הדרך הדו-מסלולית כפי שהוצג בטבלה 5.7.

### טבלה 5.7: מקדמי התיקון $\delta_w(n)$ ל- $\Delta_n$ לחישוב אורך מעבר השיפועים

עבור החתכים הטיפוסיים לדרך דו-מסלולית ( $n > 1$ )

מקדם תיקון $\delta_w(n) \cdot L$	מספר נתיבים משוקלל $(n)$	מרחק מציר הסיבוב (אמצע המפרדה) $d_R$ (מ')	רוחב מפרדה (מ')	חתך דרך דו-מסלולית
0.705	2.444	8.8	3.2	ארבע-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.1)
0.691	2.611	9.4	4.4	ארבע-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.3)
0.645	3.444	12.4	3.2	שש-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.5)
0.627	3.944	14.2	6.80	שש-נתיבית מהירה במהירות תכן 120 קמ"ש, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.7)**
0.638	3.611	13.0	4.4	שש-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.8)

\* מבוסס על החתכים הטיפוסיים בפרק 3 – החתך לרוחב, בהנחה של רוחב נתיב אופייני 3.6 מ', ובהתאם לאופן החישוב המתואר בתרשים 5.3. לרוחב אחר יש לחשב לפי  $n$  מתאים.  
\*\* עבור רוחב נתיב 3.7 מטר ערכי  $\Delta_n$  זהים לצרכי תכנון.

### 5.3.2.2 מעבר המשיק

אורך מעבר המשיק ( $L_2$ ) מחושב לפי:

$$L_2 = \frac{(W \cdot n) \cdot 2\%}{\Delta_n (\%)}$$

כאשר  $W$  הוא רוחב הנתיב בקטע הישר, ושאר ההגדרות לפי ההסבר בסעיף 5.3.2.1 לעיל.



### מעבר משיק ( $L_2$ ): פישוט פרמטרים

אורך מעבר המשיק ( $L_2$ ) ניתן לביטוי לאחר פישוט פרמטרים באמצעות הנוסחה:

$$L_2 = \frac{(d_R + W) \cdot 2(\%)}{2 \cdot \Delta_{n=1}(\%)}$$

כאשר ערכי  $\Delta_{n=1}$  הבסיסיים ( $n=1$ , דרך דו-נתיבית) מוצגים בטבלה 5.6. ערך  $d_R$  הינו פרמטר המאפיין את הדרך הדו-מסלולית כפי שהוצג בטבלה 5.7.

### 5.3.3 אופן היישום וערכי תכנ

**אורך מעבר השיפועים** הינו הסכום של מעבר ההגבהה ( $L_1$ ) ומעבר המשיק ( $L_2$ ).

כאשר מתוכנן עקום מעבר, יאוחד אורכו עם מעבר ההגבהה, לפי הארוך מביניהם. לפיכך, מעבר המשיק יבוצע כולו בקטע הישר שלפני תחילת עקום המעבר, והחתך המוגבה (בשיעור הגבהה  $e_c$ ) יישאר קבוע רק לאורך העקום המעגלי כמוצג בתרשים 5.2.

כאשר מה שקובע הוא אורך עקום המעבר (ולא אורך מעבר ההגבהה), שיעור שינוי השיפוע ( $\Delta_n$ ) יהיה קטן יותר מהמומלץ בטבלאות 5.6 ו-5.7, ומעבר המשיק ( $L_2$ ) יחושב על-פיו לצורך עקביות התכנון.

כאשר לא מתוכנן עקום מעבר לפני הקשת המעגלית, יתווה 20-30% מאורך מעבר ההגבהה בתוך הקשת המעגלית, בהתאם למהירות התכן, ו-70-80% מאורך מעבר ההגבהה, וכן כל מעבר המשיק, יהיו על הקטע הישר שמחוץ לקשת המעגלית.

טבלה 5.8 מפרטת את החלוקה המומלצת של מעבר ההגבהה בין הקטע הישר לבין הקשת המעגלית ללא עקום מעבר.

#### טבלה 5.8: מיקום יחסי של מעבר ההגבהה כאשר לא מתוכנן עקום מעבר

החלק ממעבר ההגבהה בקשת המעגלית	החלק ממעבר ההגבהה בקטע הישר	מהירות תכנ (קמ"ש)
20%	80%	60-70
30%	70%	80-120

חלוקת אורך מעבר ההגבהה בין הקטע הישר לבין העקום המעגלי, מקטינה את התאוצה הצידיית המרבית ואת מקדם החיכוך הצידי המרבי. הגידול ההדרגתי בהגבהה לפני העקום, מפצה על הגידול בתאוצה הצידיית (מסלול הספירלה ה"טבעית"), ועוזר למנוע מעבר של הנהג לנתיב הסמוך כתוצאה מתאוצה צידיית גבוהה לכיוון חוץ המעגל.



הערכים האופייניים המתקבלים עבור אורך מעבר ההגבהה ואורך מעבר המשיק, על בסיס ערכי התכן של הפרש השיפוע המרבי המותר בין ציר הדרך לקצות המיסעה ( $\Delta_n$ , טבלה 5.6), מובאים בטבלה 5.9. ערכי מעבר ההגבהה מבוססים על ההגבהות המרביות המומלצות בהתאם לסעיף 5.2 – רדיוסים והגבהות, ועל רוחב נתיב מתוכנן של 3.6 מטר (ללא הרחבה בעקום).

אורך מעבר ההגבהה ללא עקום מעבר לא יפחת מהאורך המתאים לזמן נסיעה מזערי של 2 שניות במהירות התכן.

לטבלה נוספו גם אורכי עקום המעבר (קלוטואידה) הבסיסיים לדרך דו-נתיבית, משיקולי נוחות המבוססים על הרדיוסים המזעריים לתכנון (בהתאם לסעיף "עקומי מעבר" 5.5 להלן, וסעיף רדיוסים והגבהות לעיל).

#### 5.3.4 שיטות לביצוע מעבר השיפועים בדרך דו-נתיבית

מעבר השיפועים מתבצע על ידי סיבוב המיסעה סביב ציר כלשהוא. בדרך דו-נתיבית קיימים שלושה צירים אפשריים לביצוע מעבר השיפועים:

**א. ציר הכביש** – בשיטה זו נשאר השיפוע האורכי המתוכנן של ציר הכביש קבוע לכל אורך מעבר השיפועים. תהליך מעבר השיפועים הינו סימטרי משני צידי העקום האופקי (תרשים 5.4). ערכי טבלאות 5.6, 5.7, 5.9, 5.11 מתבססים על שיטה זו.

**ב. ציר השפה הפנימית של המיסעה** – השפה הפנימית נשארת ללא שינוי (תרשים 5.5). בקטע בו יש שינוי בהגבהה הצידי, השפה החיצונית מתרוממת בשיעור כפול מהנתון בטבלה 5.6, ביחס לשיפוע האורכי של הדרך. החזרה לקימור הרגיל מתבצעת באופן סימטרי (בדומה לשיטה א').

**ג. ציר השפה החיצונית של המיסעה** – מהווה מעין "תמונת ראי" של שיטה ב'.

שימוש בציר הכביש כציר הסיבוב (שיטה א') הינו המקובל ביותר, מאחר ששינוי שיפוע קצות המיסעה מתון יותר. שיטה ב' נחוצה כאשר צריך לשמור על גובה אחיד של השפה הפנימית מסיבות שונות כגון ניקוז. שיטה ג' עוזרת לשמור על רצף חזותי בשפה החיצונית.

#### 5.3.5 תכנון חתך אורכי רציף לקצות המיסעה

לפי תרשימים 5.4 ו-5.5, הנקודות A, C, E-ו מכילות "שבר" בשיפוע שפות המיסעה. על מנת לשמור על הרציפות הגיאומטרית של הכביש ולהגדיל את נוחות ובטיחות הנסיעה, מעוגלים שברים אלו בזמן התכנון כמתואר בפרט המצורף לתרשים 5.4. עיגול זו מיושם על ידי הכנסת עקום אנכי קצר, אשר אורכו המזערי הינו  $0.2 \cdot V_d$ , כאשר  $V_d$  בקמ"ש.

#### 5.3.6 מעבר השיפועים בדרך דו-מסלולית עם מפרדה

לתכנון מעבר השיפועים בדרך דו-מסלולית עם מפרדה, קיימות השיטות שלהלן:

- כל הדרך (שני המסלולים והמפרדה) מסתובבת סביב ציר המפרדה.
- כל מסלול מסתובב סביב הקצה הפנימי שלו (קצה השול השמאלי, כלומר שפת שטח ההפרדה).



השיטות מוצגות בצורה עקרונית בתרשימים 5.6 ו-5.7.

### יישומי השיטות

**שיטה א':** מיושמת בדרכים בהן יש מעקה בטיחות דו-צדדי באמצע המפרדה, ורוחב המפרדה בדרך כלל איננו עולה על 9 מטר. ציר הסיבוב הוא בדרך כלל נקודת המפגש של שיפועי המסלולים במרכז המפרדה (תרשים 5.6). בשיטה זו נמנעים משינויים בחתך לאורך המעקה, אך השיטה מחייבת תכנון וביצוע נאות של הניקוזים מתחת למעקה למניעת הצטברות מים במיסעה.

**שיטה ב':** מיושמת בדרכים בהן אין מעקה דו-צדדי יחיד במרכז המפרדה (מעקה דו-צדדי בצד אחד, או שניים חד-צדדיים נפרדים, בדרך כלל ברוחב מפרדה העולה על 9 מטר). בשיטה זו שני צירי הסיבוב ממוקמים בקצוות השמאליים של כל שול שמאלי (שפת שטח ההפרדה) כמוצג בתרשים 5.7. רומי הקצוות הפנימיים של שני מסלולי הנסיעה נשארים קבועים. לפיכך הבדל הרומים בין הקצוות הקיצוניים של הדרך מוגבל להבדל הנובע מהגבהת המסלולים כתוצאה ממעבר השיפועים. ציר המפרדה מחייב פתרון ניקוז.

כפי שצויין לעיל, הרוחב המשמש לחישוב אורך מעבר השיפועים ( $d_R$ ) הוא המרחק מציר הסיבוב לקצה הנתיב הימני, שפת הסיבוב. אורך מעברי השיפועים בטבלה 5.9 מחושב לפי מיקום ציר הסיבוב בציר הכביש לפי שיטה א'.

## 5.4 הרחבה בעקומים אופקיים

### 5.4.1 מטרת ההרחבה

הרחבת המיסעה בעקום האופקי נועדה לאפשר לרכב נסיעה בעקום בתנאי נוחות ובטיחות שאינם נחותים מהנסיעה בקטע הישר.

הסיבות לכך שהרוחב הדרוש בעקום האופקי גדול מהרוחב הדרוש בקטע הישר הינם:

- רוחב העיקבה של רכב הנוסע בקשת מעגלית גדול מרוחב העיקבה של רכב הנוסע בקטע ישר.
- בעת נסיעה בעקום, קשה לנהג לתמרן את רכבו לנסיעה במרכז הנתיב.

הרוחב הדרוש מורכב מהגורמים הבאים:

- רוחב העיקבה של הרכב לתכן בעקום.
- מרווח הבטיחות הדרוש בין שני כלי רכב הנוסעים זה מול זה או העוקפים זה את זה.
- מרווח הבטיחות בין כלי הרכב לבין שולי המיסעה.

רוחב העיקבה של הרכב בעקום תלוי בסוג הרכב וברדיוס העקום. ההרחבה הדרושה תהיה גדולה יותר כאשר:

- הרכב ארוך יותר, או שהמרחק בין הסרנים שלו גדול יותר, או שהשלוחה הקדמית ארוכה יותר.
- רדיוס העקום קטן יותר.

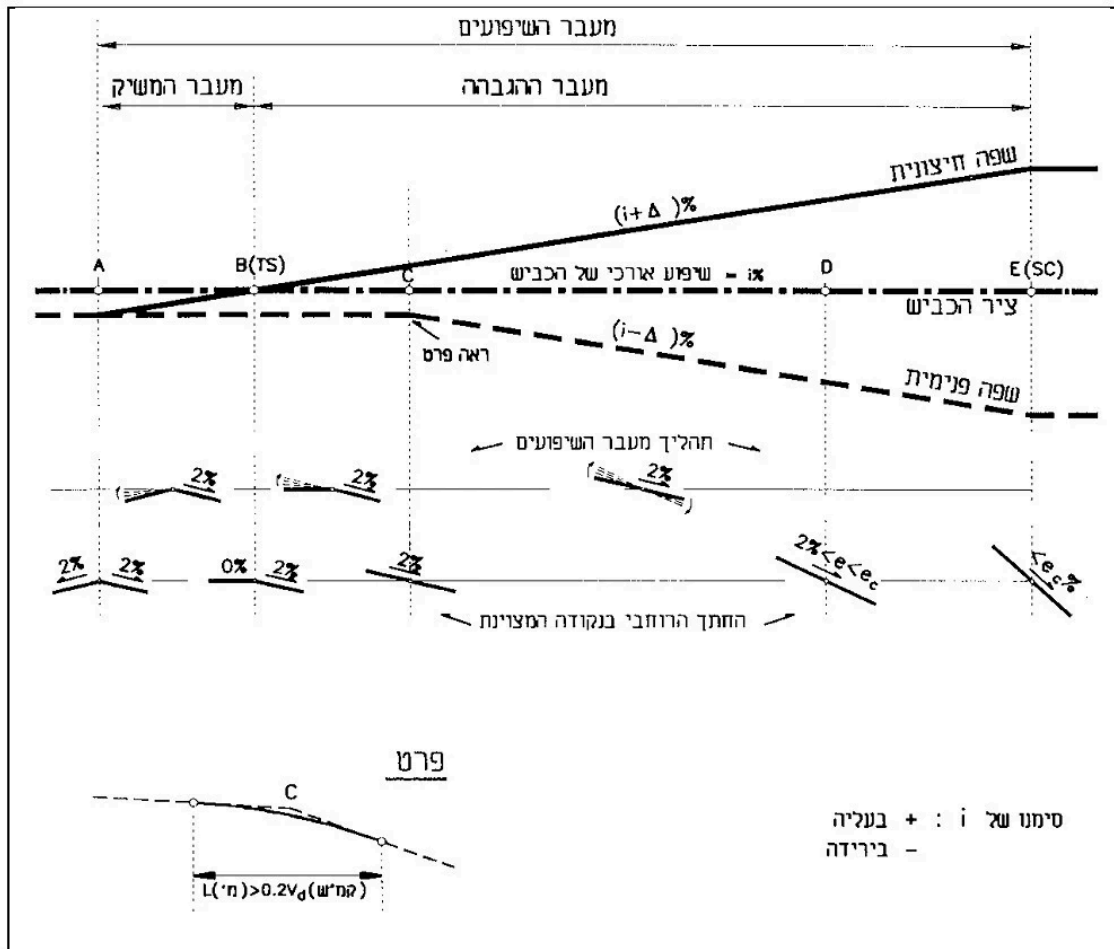


**טבלה 5.9:** ערכי אורך מעבר ההגבהה ( $L_1$ ) ומעבר המשיק ( $L_2$ ) בהגבהה המרבית (מ')

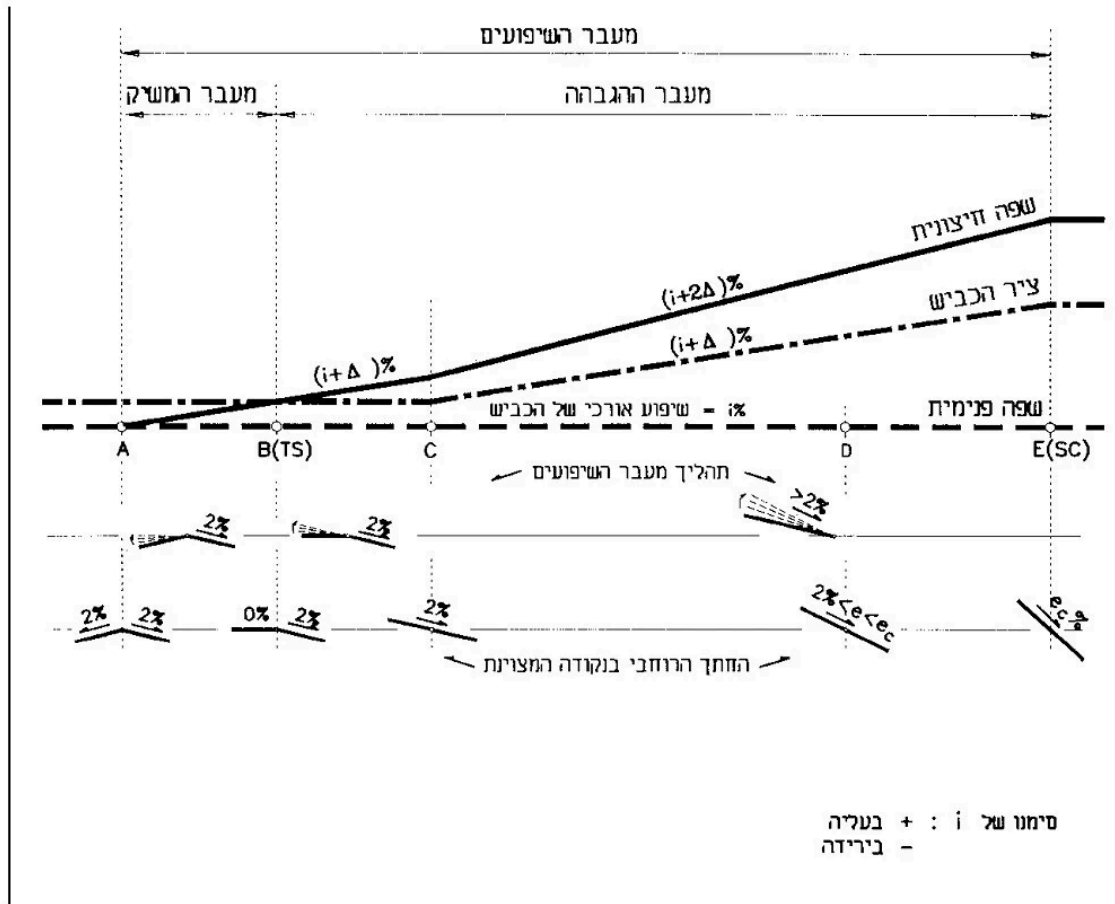
120	110	100	90	80	70	60	מהירות תכן (קמ"ש)
0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	מדיניות הגבהה מרבית ( $e_{max}$ )
<b>אורך מעבר ההגבהה (<math>L_1</math>)</b>							
–	–	*67	*63	72	65	57	דו-נתיבית
131	124	116	108	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.1)
137	130	121	114	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.3)
169	160	149	140	–	–	–	שש-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.5, כולל מעויירת מהירה).
188	178	166	155	–	–	–	שש-נתיבית מהירה במהירות תכן 120 קמ"ש, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.7)**
175	166	155	145	–	–	–	שש-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.8)
<b>אורך מעבר המשיק (<math>L_2</math>)</b>							
–	–	*17	*16	15	13	12	דו-נתיבית
33	31	29	27	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.1)
35	33	31	29	–	–	–	ארבע-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.3)
43	40	38	35	–	–	–	שש-נתיבית, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.5); כולל מעויירת מהירה.
47	45	42	39	–	–	–	שש-נתיבית מהירה במהירות תכן 120 קמ"ש, מפרדה צרה (חתך כדוגמת תרשים 3.7)**
44	42	39	37	–	–	–	שש-נתיבית, מפרדה רחבה (חתך כדוגמת תרשים 3.8)
111	87	74	62	60	48	43	<b>אורך עקום מעבר (בסיסי) לרדיוס מזערי משיקולי נוחות (מ')</b>

\* מהירויות תכן המיועדות רק למקרה של שלב ביניים של נסיעה דו-סטרית במסלול ראשון מתוך שניים של דרך מחולקת עתידית – ראו סעיף 2.3.3.

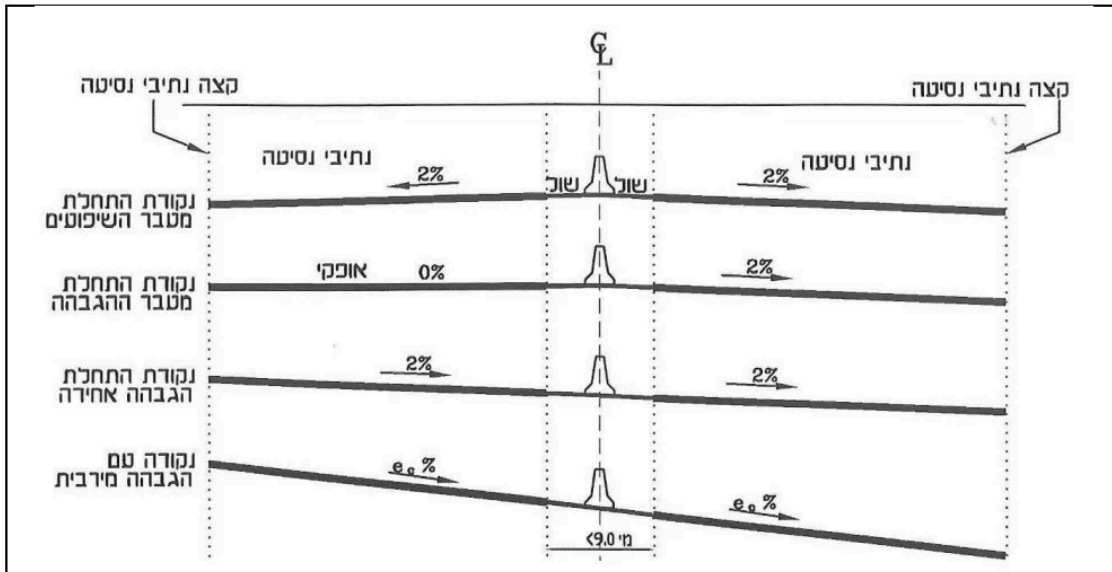
\*\* עבור רוחב נתיב 3.7 מטר ערכי  $L_2, L_1$  זהים לצרכי תכנון.



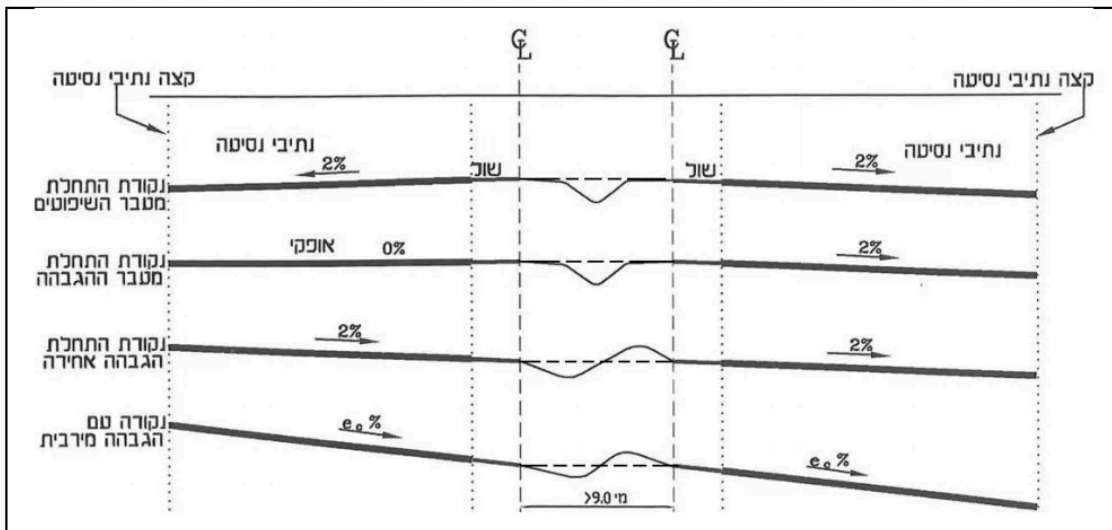
**תרשים 5.4:** חתך לאורך שפות דרך דו-נתיבית במעבר השיפועים, כאשר ציר הסיבוב הוא ציר הכביש (שיטה א' בסעיף 5.3.4)



**תרשים 5.5:** חתך לאורך שפות דרך דו-נתיבית במעבר השיפועים, כאשר ציר הסיבוב הוא השפה הפנימית של המיסעה (שיטה ב' בסעיף 5.3.4)



**תרשים 5.6:** מעבר השיפועים בדרך עם מפרדה, כאשר הדרך כולה מסתובבת סביב ציר המפרדה (שיטה א' בסעיף 5.3.6)



**תרשים 5.7:** מעבר השיפועים בדרך עם מפרדה, כאשר כל מסלול מסתובב סביב הקצה הפנימי שלו (שיטה ב' בסעיף 5.3.6)



## 5.4.2 חישוב ההרחבה

הרחבת המיסעה הנדרשת בעקום ( $w$ ) היא ההפרש בין רוחב המיסעה הדרוש בעקום לאחר יישום ההרחבה ( $W_C$ ), לבין רוחב המיסעה הקיים בקטע הישר ( $W_N$ ):

$$w = W_C - W_N$$

מרכיבי החישוב של ההרחבה בעקום האופקי מתוארים בתרשים 5.8. הרכב האופייני לתכנון ההרחבה הדרושה בעקום אופקי בדרך בין-עירונית הינו אוטובוס בין-עירוני באורך 12.2 מטר וברוחב 2.55 מטר, מרחק בין סרנים 6.10 מטר, ואורך שלוחה קדמית 2.75 מטר. במקרים יוצאי דופן בהם הדרך מוליכה לשימושי קרקע המצדיקים רכב לתכן מורכב או מחובר, יש לחשב במיוחד לפי התיקון ל- $L$  הרשום להלן. (אוטובוסים מפרקיים רבי קיבולת מתוכננים לנסוע בישראל בדרכים בין-עירוניות מחולקות בלבד, בדרך כלל במסלולי תח"צ יעודיים, ברדיוסים ובמהירויות שלא ידרשו הרחבה בקטעים, ולכן אינם מהווים רכב לתכן להרחבות).

רוחב המיסעה הדרוש בעקום מחושב להלן:

$$W_C = 2 \cdot (U + C) + F_A + Z$$

כאשר:

$W_C$  – רוחב המיסעה הדרוש בעקום;

$U$  – רוחב עיקבות גלגלי רכב התכן (חוץ-חוץ) בעקום (מטר):

$$U = u + R_C - \sqrt{R_C^2 - L^2}$$

כאשר:

$u$  – רוחב רכב התכן (מטר);

$R_C$  – רדיוס העקום (מטר);

$L$  – המרחק בין סרני רכב התכן (מטר) (ברכב מפרקי הביטוי במקום  $L^2$  יהיה  $\sum L_i^2$ , כאשר  $L_i$  הם המרחקים בין סרני או מפרקי הרכב);

$C$  – מרווח בטיחות צידי, בתלות ברוחב הדרך בקטע הישר, לפי הקשר הבא בין  $W_N$  ל- $C$ :

7.20	6.60	6.00	$W_N$ – רוחב המיסעה בקטע ישר (מ')
0.90	0.75	0.60	$C$ – מרווח בטיחות (מ')

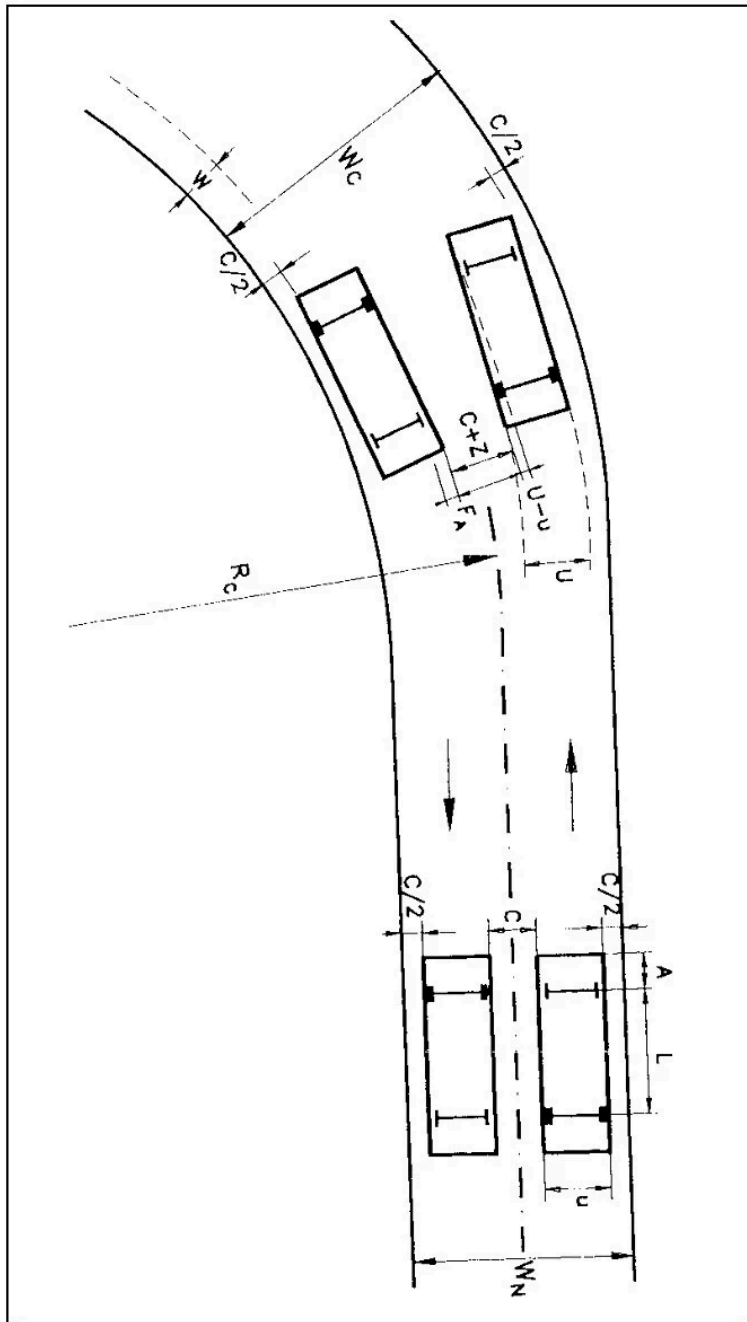
$F_A$  – בליטת חזית רכב התכן מעבר לציר הגלגל הקדמי החיצוני (מטר):

$$F_A = \sqrt{R_C^2 + A \cdot (2 \cdot L + A)} - R_C$$

כאשר:

$A$  – אורך השלוחה הקדמית של רכב התכן (מטר);

$Z$  – רוחב מיסעה נוסף הדרוש עקב קשיי הנהיגה בעקום (מטר):



**תרשים 5.8:** מרכיבי ההרחבה בעקום האופקי



$$Z = \frac{0.1 \cdot V_d}{\sqrt{R_c}}$$

כאשר:

$V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש).

### 5.4.3 ערכי תכן

טבלה 5.10 מציגה את ערכי ההרחבה  $w$  הנדרשת למיסעה דו-נתיבית (חד-מסלולית) בעקום אופקי, עבור תחום ערכי התכן של מהירות תכן, רוחב נתיב ורדיוס, כפי שהומלצו בפרקים ובסעיפים קודמים של הנחיות אלה. בדרך דו-מסלולית, נדרשת לכאורה הרחבה זו בכל מסלול לחוד, אם כי ביישום ערכי התכן המומלצים בהנחיות אלה לדרכים דו-מסלוליות, לא צפויה הרחבה במקרים הסטנדרטיים. במידה שבכל זאת נדרשת הרחבה בדרך דו-מסלולית עם מפרדה, ניתן להשתמש בערכי טבלה 5.11 לכל מסלול בנפרד (ערכי C אינם שונים לדרך דו-מסלולית).

אין צורך לבצע הרחבה כאשר רוחב ההרחבה הכולל הדרוש ל-2 נתיבים קטן מ-0.5 מטר.

**טבלה 5.10:** ערכי ההרחבה הדרושה למיסעה דו-נתיבית בעקום אופקי (מ')

רוחב המיסעה בקטע הישר									רדיוס העקום (מ')
7.2 מ'			6.6 מ'			6.0 מ'			
מהירות התכן (קמ"ש)									
80	70	60	80	70	60	80	70	60	
×	×	0	×	×	1.0	×	×	1.3	110
×	×	0	×	×	0.9	×	×	1.2	120
×	×	0	×	×	0.8	×	×	1.1	130-150
×	0	0	×	×	0.7	×	1.1	1.0	160-180
×	0	0	×	0.7	0.6	×	1.0	0.9	190-200
0	0	0	×	0.6	0.5	1.0	0.9	0.8	210-240
0	0	0	×	0.5	0	0.9	0.8	0.8	250-260
0	0	0	0	0	0	0.9	0.8	0.7	270-280
0	0	0	0	0	0	0.8	0.8	0.7	290-300
0	0	0	0	0	0	0.8	0.7	0.7	310-350
0	0	0	0	0	0	0.7	0.7	0.6	350-400

- הסימון "×" בטבלה משמעותו שאין להשתמש בהרכב זה של מהירות תכן ורדיוס, לפי טבלה 5.1.
- המספר "0" בטבלה משמעותו שאין צורך בהרחבה.
- במהירות תכן 90 קמ"ש ומעלה, רוחב הנתיב הבסיסי 3.6 מ' והרדיוס המזערי 340 מ', ולכן לא נדרשת הרחבה.

5-22

פרק 5 – התוואי האופקי

כרך 1 – 04/2018

הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות



בדרכים דלות-תנועה, בהן הנפח הכולל של משאיות ואוטובוסים החזוי לשעת שיא נמוך מ-15 כ"ר, והשוליים סלולים, לא נדרשת הרחבה, למעט בדרכים המובילות לאתר כגון בסיס צבאי או מחצבה, המתאפיינת בתנועת כלי רכב חריגים, שם ייבדק כל מקרה לגופו.

#### 5.4.4 אופן ביצוע ההרחבה

- הקטע שלאורכו מבוצעת ההרחבה ההדרגתית של המיסעה מתחילת יישומה ועד להרחבה הדרושה בעקום, נקרא "מעבר ההרחבה", ומבוצע באופן הבא:
- בעקום אופקי ללא עקום מעבר, כל ההרחבה הדרושה תינתן בנתיב הפנימי של הדרך. כל מעבר ההרחבה יבוצע לאורך מעבר ההגבהה (שהוסבר בסעיף 5.3.3.1 לעיל), כך שמעבר ההרחבה במלואו יבוצע לאורך הקטע הישר, ולאורך כל הקשת המעגלית תהיה הרחבה מלאה.
  - כאשר מתוכננים עקומי מעבר (כמוסבר בסעיף 5.5 להלן), יינתן מעבר ההרחבה לאורך עקום המעבר, כך שאורך מעבר ההרחבה זהה לאורך עקום המעבר. במקרה זה מועדף למקם את ההרחבה בחלוקה זהה בין הנתיבים.
  - ציר המיסעה יסומן בצבע באמצע המרחק בין קצות המיסעה הכוללת את ההרחבה.

#### 5.4.5 הגדרת רוחב הנתיב (W) לחישוב מעבר השיפועים

הגדרת רוחב הנתיב W למצב בו יש הרחבה, נדרש לצורך חישוב מעבר השיפועים (סעיף 5.3). טבלה 5.11 מציגה את ההגדרות לחישוב רוחב הנתיב למצבים: (1) ללא הרחבה, (2) עם הרחבה המחולקת שווה בשווה בין הנתיבים, (3) עם הרחבה כאשר כל ההרחבה בנתיב הפנימי.

**טבלה 5.11:** הגדרת רוחב הנתיב לחישוב מעבר ההגבהה או מעבר המשיק

רוחב הנתיב המוגדר W (מ')	דרך דו-נתיבית	דרך דו-מסלולית (2 נתיבים לכיוון)
כאשר אין הרחבה	$W_n/2$	$W_n/2$
כאשר ההרחבה מחולקת שווה בשווה בין הנתיבים	$^*W_c/2$	$^*W_c/2$
כאשר ההרחבה כולה בנתיב הפנימי	$\frac{1}{2}W_n + W_d$	$^*W_c/2$
הגדרות		
$W_n$	רוחב נתיבי הנסיעה בקטע ישר (7.2 מ' בד"כ)	רוחב נתיבי הנסיעה של מסלול הנסיעה בקטע ישר (7.2 מ' בד"כ)
$^*W_c$	רוחב נתיבי הנסיעה בעקום המעגלי	רוחב נתיבי הנסיעה של מסלול הנסיעה בעקום המעגלי
$^*W_d$	ההרחבה למיסעה	ההרחבה למסלול הנסיעה

\* מפורט בסעיף 5.4 – הרחבה בעקום המעגלי



## 5.5 עקום מעבר

### 5.5.1 כללי

עקום מעבר אופקי הינו עקום המאפשר מעבר הדרגתי מקטע דרך ישר אל הקשת המעגלית. לאורך עקום המעבר משתנה הרדיוס (או העקמומיות) באופן הדרגתי ורציף, מ-אינסוף בנקודת ההשקה לקטע הישר, עד לרדיוס הקשת המעגלית ( $R_c$ ) בנקודת ההשקה לקשת. מטרת השימוש בעקום מעבר הן:

- התפתחות הדרגתית של הכוח הצנטריפוגלי הפועל על הנהג והרכב.
- שינוי הדרגתי של ההגבהה הדרושה לאיזון הכוח הצנטריפוגלי בעקום, מחתך בקימור רגיל ועד לחתך בהגבהה אחידה בהשקה לקשת המעגלית.
- נוחות הנסיעה כך שהנהג יסובב את ההגה באופן הדרגתי לקראת העקום, באופן שיוכל לשמור על מסלול נסיעתו במרכז הנתיב.
- חזות תוואי טובה, ומניעת שבר חזותי בכניסה לעקום.

סוג עקום המעבר המועדף לשימוש הינו הקלוטואידה. עקום מסוג זה קרוב למסלול הטבעי שמבצע הרכב במעבר מקטע ישר לקטע מעגלי במהירות קבועה ובקצב סיבוב הגה קבוע. תכנון עקום המעבר בפרק זה מתייחס רק ליישומים למהירות תכן קבועה. לעקומי מעבר המשמשים גם להאטה, כגון בתכנון צמתים וברמפות מחלפים, ראו בכרכים המתאימים.

### 5.5.2 אורך עקום מעבר

לקלוטואידה תכונה מתמטית לפיה העקמומיות משתנה ביחס ישר לאורכה מתחילתו:

$$R(x) \cdot L(x) = A^2$$

כאשר בכל נקודה לאורך עקום המעבר  $R(x)$  הוא רדיוס העקום במרחק  $L(x)$  מתחילת העקום (נקודה TS, תרשים 5.9).

$$A = 0.1464 \sqrt{\frac{V_d^3}{C}}$$

האורך המזערי הדרוש לקלוטואידה מחושב לפי:

$$L_s = \frac{V_d^3}{3.6^3 \cdot C \cdot R_c}$$

כאשר:

- A – מודול הקלוטואידה (מטר);
- $V_d$  – מהירות התכן (קמ"ש);
- C – מקדם הנוחות (מ"שנ<sup>3</sup>) – הקצב המרבי של שינוי התאוצה הצנטריפוגלית לאורך עקום המעבר, קצב המהווה מדד לחוסר נוחות הנהג והנוסעים, ומשפיע על אורך הקלוטואידה;
- $L_s$  – אורך עקום המעבר (מטר);



$R_c$  – רדיוס הקשת המעגלית (מטר).

בטבלה 5.12 נתון האורך הדרוש לעקום המעבר משיקולי נוחות, כאשר הרדיוס של העקום האופקי הוא הרדיוס המזערי. משך זמן הנסיעה המזערי בעקום המעבר כך שיהיה יעיל הוא 2 שניות. בטבלה 5.12 נתון גם האורך המזערי לעקום המעבר לפי שיקול זה, במידה שהאורך המתקבל משיקולי נוחות (ברדיוסים גדולים יותר) הינו נמוך יותר.

הבסיס לטבלת ארכי עקום המעבר הינו רוחב נתיב בסיסי ( $w$ ) של 3.6 מטר. **אורך עקום המעבר יוגדל באופן יחסי עבור דרך דו-מסלולית** לפי מספר הנתיבים המשוקלל ( $n$ ) ומקדם התיקון ל- $\Delta_n$ :  $\delta_w$  לפי הכפלה של  $\delta_w \cdot n^*$  (ראו הגדרות בסעיף 5.3, מעבר השיפועים).

**טבלה 5.12:** ערכים גבוליים של מקדם הנוחות (C), מודול הקלוטואידה (A),

ואורך עקום המעבר למהירויות התכן השונות (מ')

מהירות תכן (קמ"ש)							מאפייני עקום המעבר
120	110	100	90	80	70	60	
0.500	0.583	0.667	0.750	0.833	0.917	1.000	מקדם הנוחות C (מ'/שנ"3) – ערך מרבי
670	565	440	340	220	170	110	רדיוס העקום המעגלי המזערי $R_{c,(min)}$ מטבלה 5.1
270	220	180	145	115	90	70	מודול הקלוטואידה A – ערך מזערי*
111	87	74	62	60	48	43	אורך נדרש לעקום המעבר משיקולי נוחות – לעקום אופקי ברדיוס מזערי
67	62	56	50	45	39	34	אורך מזערי לעקום מעבר – לפי זמן נסיעה 2 שני' ( $2 \cdot V_d / 3.6$ )

\* ערכי A בטבלה נקבעו לפי קריטריון הנוחות. כאשר אורך עקום המעבר נקבע משיקולים אחרים (כגון זמן נסיעה, או אורך מעבר השיפועים), ערך A יגדל, וייקבע לפי מקדם הנוחות האפקטיבי.

### 5.5.3 אופן ביצוע עקום המעבר

הכנסת עקום המעבר בין הקשת המעגלית לבין המשיקים מחייבת את הזזת הקשת המעגלית לכיוון המרכז (תרשים 5.9). TS היא נקודת ההשקה של עקום המעבר לקטע הישר, ו-SC היא נקודת ההשקה של עקום המעבר לקשת המעגלית.  $p$  הוא שיעור ההזזה בניצב לקשת, לביצוע עקום המעבר.

$$p = \frac{L_s^2}{24 \cdot R_c}$$

כאשר:

$p$  – הזזת הקשת (מטר);

$L_s$  – אורך עקום המעבר (מטר);

5-25

פרק 5 – התוואי האופקי

כרך 1 – 04/2018

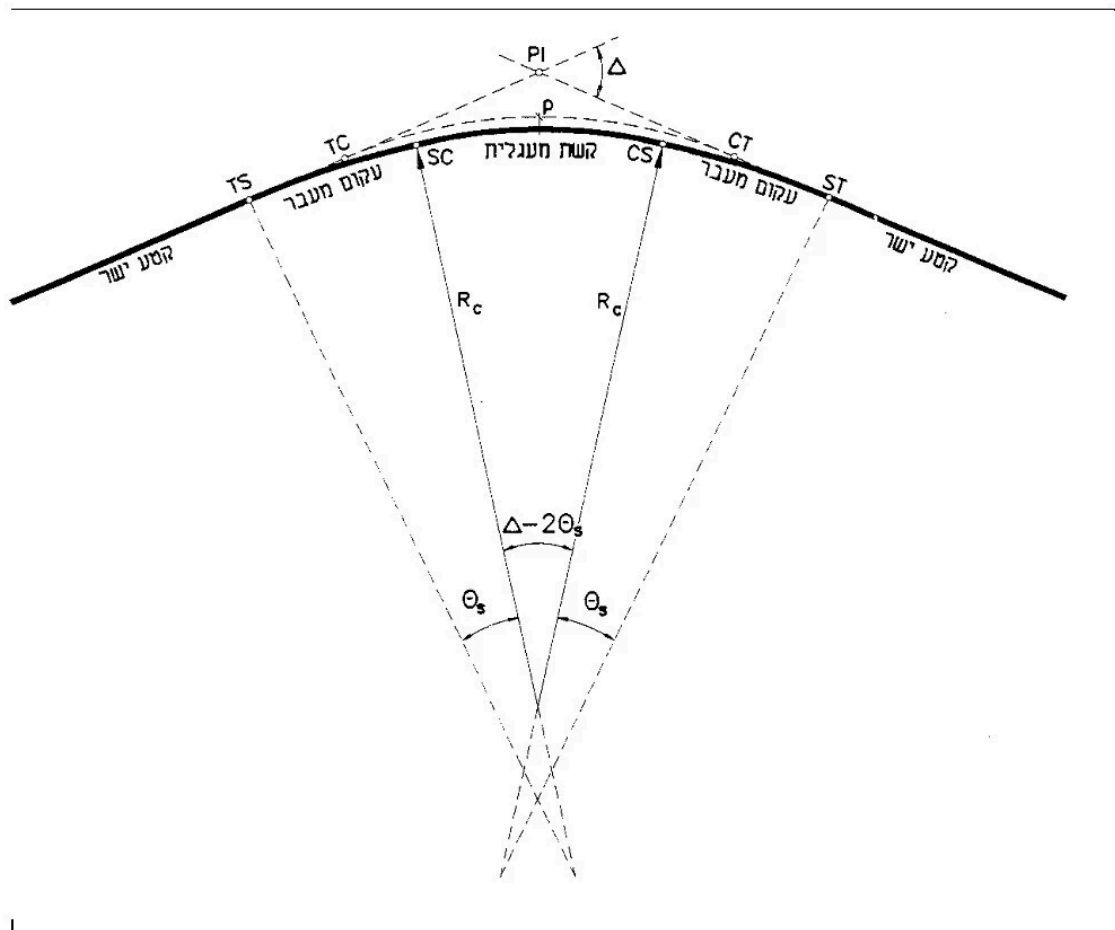
הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות



$R_c$  – רדיוס הקשת המעגלית (מטר);  
 $\theta_s$  – זווית הקלוטואידה ברדיאנים (הזווית בין המשיקים בשני קצות הקלוטואידה, כמתואר בתרשים 5.9).

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \cdot R_c}$$

כאשר הסטת הקשת המעגלית (p) קטנה מ-0.20 מטר, מומלץ לבדוק האם עקום המעבר נדרש, דהיינו האם בהעדרו יש לנהגים מספיק מרחב בפועל לבצע את המסלול הטבעי, הדומה לעקום המעבר בגבולות נתיב הנסיעה שלהם (ראו סעיף 5.5.5 להלן).



**תרשים 5.9:** עקום מעבר עם הזזת הקשת המעגלית



כאשר קיים עקום מעבר, יש לאחד את אורך מעבר ההגבהה המחושב לפי סעיף 5.3.2 לעיל, עם אורך עקום המעבר, לפי הגדול מביניהם:

- אם מעבר ההגבהה ארוך מעקום המעבר, ישווה אורך עקום המעבר אליו, ומודול הקלוטואידה יהיה גדול מהערך המובא בטבלה 5.12.
- אם מעבר ההגבהה קצר מעקום המעבר, יוגדל אורך מעבר ההגבהה עד לאורך עקום המעבר.

מעבר המשיק יבוצע בקטע הישר לפני תחילת עקום המעבר (TS), ומעבר ההגבהה יבוצע לאורך עקום המעבר.

גם מעבר ההרחבה יבוצע כולו לאורך עקום המעבר (סעיף 5.4.4).

#### אורך מרבי לעקום מעבר

הגבלת האורך המרבי של עקום המעבר ( $L_{s,max}$ ) תפחית את הסיכוי להערכה מוטעית מצד הנהג של רדיוס העקום המתקרב, ותביא לכך שלא תהיה חריגה בעקביות של מסלול הנסיעה הטבעי של הנהג.

טבלה 5.12 א' מציגה את ערכי אורך עקום המעבר המרבי והפרמטרים הנגזרים ממנו: מקדם הנוחות  $C_{min}$ , מודול הקלוטואידה  $A_{max}$ , וזמן הנסיעה השקול לאורך עקום המעבר המרבי.

במידה שאורך מעבר ההגבהה עולה על ערכים אלו (לדרך דו מסלולית – ערכים משוקללים של  $L_{s,max}$ ), אז יש להגבילו ל  $L_{s,max}$ . גם מעבר ההרחבה לא יעלה על ערכי  $L_{s,max}$ . לפיכך ערכי  $L_{s,max}$  מהווים סף עליון לתכנון.

**טבלה 5.12 א':** אורך עקום המעבר המרבי משיקולי הסטה צידית למהירויות התכן השונות (מ'), וערכים נגזרים של מקדם הנוחות ( $C_{min}$ ), ומודול הקלוטואידה ( $A_{max}$ )

מהירות תכן (קמ"ש)							מאפייני עקום המעבר
120	110	100	90	80	70	60	
670	565	440	340	220	170	110	רדיוס העקום המעגלי המזערי $R_{c,(min)}$ מטבלה 5.1
127	117	103	91	73	64	51	אורך מרבי לעקום המעבר (מ'), $L_{s,max}$
0.44	0.43	0.47	0.51	0.69	0.68	0.82	מקדם הנוחות $C_{min}$ (מ"/שנ"3) – ערך מזערי יחסית לערכי טבלה 5.12
290	260	215	175	125	105	75	מודול הקלוטואידה $A_{max}$ – ערך מרבי
3.8	3.8	3.7	3.6	3.3	3.3	3.1	זמן נסיעה (שניות) במהירות התכן לאורך עקום המעבר המרבי



#### 5.5.4 שיקולי תכנון

- (א) רצוי לתכנן את עקום המעבר באופן סימטרי, כלומר שתי קלוטואידות היוצאות בצידי העקום המעגלי עד הקטעים הישרים, כאשר הרדיוס לתכנון הינו רדיוס העקום המעגלי.
- (ב) כאשר יש עקומים מעגליים עוקבים רצופים בעלי רדיוס שונה, רצוי שיהיו מקושרים באמצעות עקום מעבר. פרמטר הקלוטואידה (A) ייקבע בהתאם לרדיוס הקטן מבין רדיוסי העקומים המעגליים.
- (ג) על מנת להימנע מעקום שבור ("broken back curve"), רצוי לתכנן עקום מעבר בין שני עקומים מעגליים עוקבים שאינם רצופים, במקום לחברם בקטע ישר.
- (ד) עקום מעבר ארוך מדי (פרמטר A גדול) בשיפוע אורכי מתון עשוי להביא לבעיית ניקוז.

#### 5.5.5 עקום אופקי שאינו מחייב עקום מעבר

- בעקומים בעלי רדיוסים גדולים והגבהות נמוכות, מתפתחת תאוצה צנטריפוגלית נמוכה. תחום תאוצה מזערי אשר מתחתיו אין יתרון לשימוש בעקום מעבר מבחינה תפעולית ובטיחותית, הינו 0.65-0.85 מ"שנ<sup>2</sup>.
- לפיכך, כאשר התאוצה הצנטריפוגלית (a) נמוכה מ-0.6 מ"שנ<sup>2</sup>, אין צורך בעקום מעבר. השימוש בתחום ערכי התאוצה של 0.65-0.85 מ"שנ<sup>2</sup> (בהתאם למהירות התכן), מביא לערכי הרדיוסים  $R_{C(max)}$  שמעבר להם אין צורך בעקום מעבר:

$$R_{C(max)} = \frac{V_d^2}{a}$$

טבלה 5.13 מביאה את ערכי הרדיוסים שמעבר להם אין צורך לתכנן עקום מעבר.

**טבלה 5.13:** ערכי הרדיוסים המרביים המחייבים תכנון עקום מעבר

מהירות תכן (קמ"ש)	60	70	80	90	100	110	120
רדיוס מרבי לצורך עקום מעבר (מ')	460	630	820	1050	1300	1550	1850

#### 5.5.6 עיקרי תהליך התכנון של שילוב עקום מעבר בעקום אופקי

- (א) קביעת הרדיוס לפי קריטריוני תכן של עקום אופקי.
- (ב) אם הרדיוס קטן מערכי טבלה 5.13, יש לשקול תכנון עקום מעבר.
- (ג) קביעת אורך מעבר השיפועים ומעבר ההגבהה.
- (ד) שימוש בגדול מבין אורך עקום המעבר המזערי ( $L_s$ ) ואורך מעבר ההגבהה ( $L_1$ ) כאורך עקום המעבר לתכנון.
- (ה) חישוב ההסטה  $p = L_s^2 / (24 \cdot R)$ . אם  $p$  קטן מ-0.20 מטר, יש לבדוק האם נדרש עקום מעבר.



ו) חישוב נקודות לאורך עקום המעבר בשיפועי רוחב מוגדרים לאורך מעבר ההגבהה (רצוי ברמת העגלה של 5-10 מטר).

## 5.6 הראות בעקום אופקי

### 5.6.1 כללי

בעקומים אופקיים, ובמיוחד בעקומים ברדיוסים קטנים, קו הראות של הנהג הנע בנתיב הפנימי של העקום יוצא מתחומי הכביש, כמתואר בתרשים 5.10. מרחק הנסיעה בין שתי הנקודות שצריך לראות נמדד בכביש על ציר הנתיב הפנימי בין הנקודות A ו-B (תרשים 5.10), בעוד שקו הראות עצמו הוא לאורך המיתר. לכן, יש לתכנן בין המיתר לבין הנתיב הפנימי שדה ראייה פנוי מכל מכשול העלול להפריע לראות, כגון: עצים, עמודים, חפירות, מבנים, מעקות בטיחות קשיחים וכו'. סוג מרחק הראות לצרכי תכן הדרך יותאם לסוג הדרך, כמפורט בסעיף 4.7 לעיל.

### 5.6.2 הראות בקשת המעגלית

המרחק הצידי הפנוי הדרוש באמצע קו הראות בין ציר הנתיב הפנימי ובין קו הראות בקשת המעגלית הוא  $m$  (תרשים 5.10).

$$m = R_c \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{S_D}{2} \cdot R_c\right) \right]$$

כאשר:

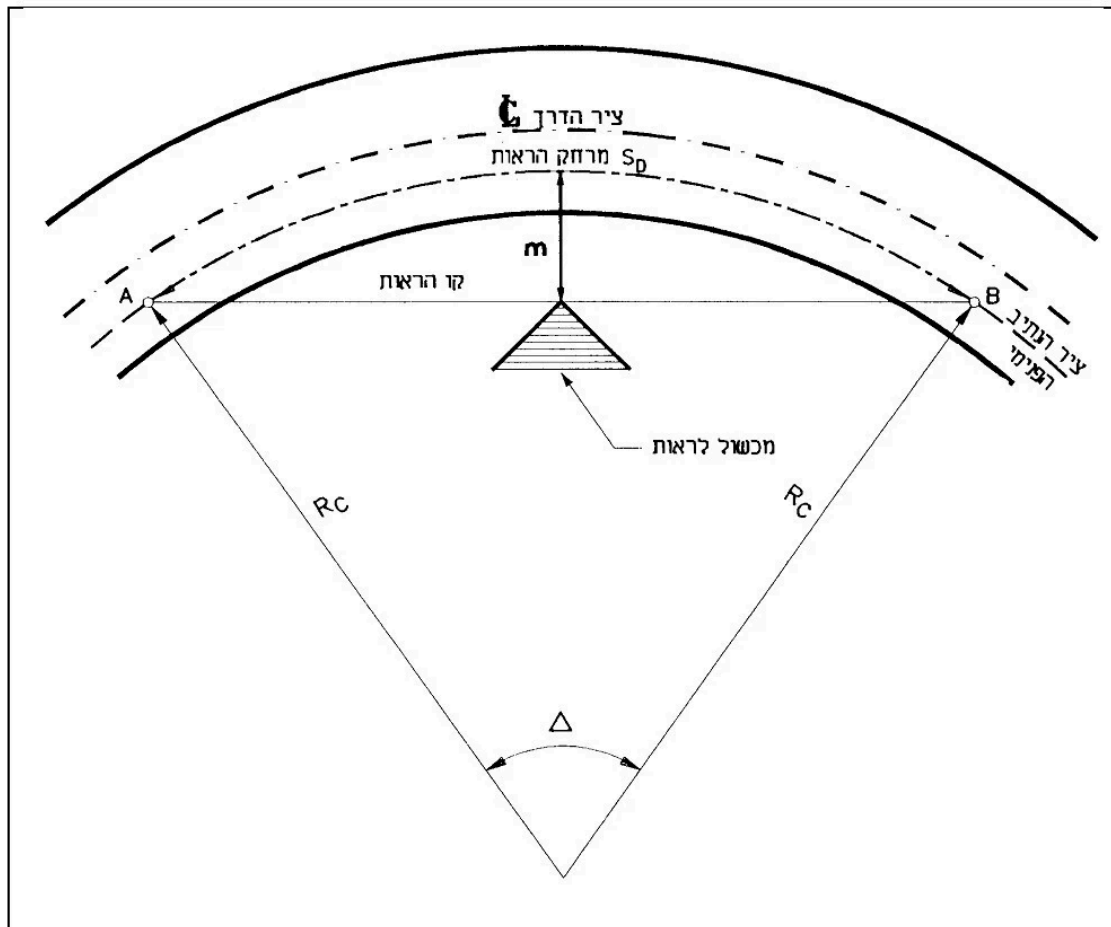
$R_c$  – הרדיוס בציר הנתיב הפנימי (מטר);

$S_D$  – מרחק הראות לאורך ציר הנתיב הפנימי, הנמדד כמרחק הנסיעה (מטר).

בעקומים אופקיים ברדיוסים הנהוגים בכבישים בין-עירוניים, אורך המיתר שווה בקירוב לאורך הקשת המעגלית אותה הוא כולא. אם מודדים את מרחק הראות לאורך קו הראות ולא לאורך ציר הנתיב הפנימי, יהיה אורך הקשת בציר הנתיב הפנימי גדול במעט ממרחק הראות הדרוש. לכן, משתמשים בנוסחה המקורבת הבאה לחישוב המרחק הצידי הדרוש  $m$  (כאשר אורך העקום גדול ממרחק הראות):

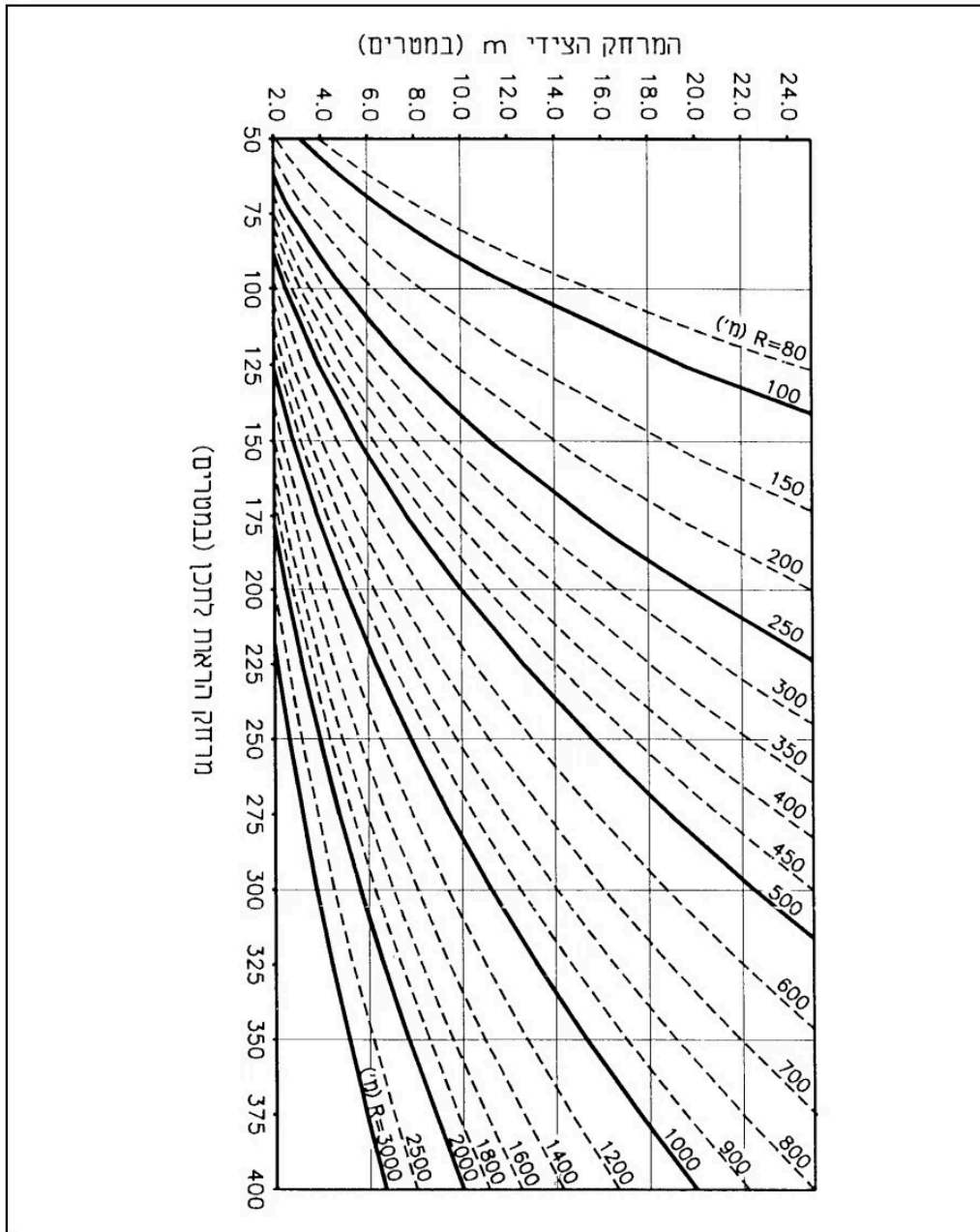
$$m = \frac{S_D^2}{8 \cdot R_c}$$

ביטוי גרפי לקשר המתמטי בין רדיוס העקום, מרחק הראות, והמרחק הצידי הפנוי  $m$ , מובא בתרשים 5.11. הערך  $m$  ממשוואה זו הוא המרחק הצידי הפנוי הדרוש בעקום. מתרשים 5.10 ניתן לראות כי ערכו של  $m$  משתנה לאורך קו הראות, והוא מגיע לערכו המרבי במרכזו לאורך הקשת המעגלית. בקרבת הקטעים הישרים, ובתוך עקומי המעבר, המרחק הצידי הפנוי הדרוש קטן יותר, ומגיע לעיתים לערך אפס. המרחק הצידי הדרוש בכל נקודה לאורך העקום מתקבל על ידי שרטוט קווי הראות, החל מהקטע הישר, ויצירת מעטפת ראות המשיקה לקווי הראות, כמתואר בתרשים 5.12.

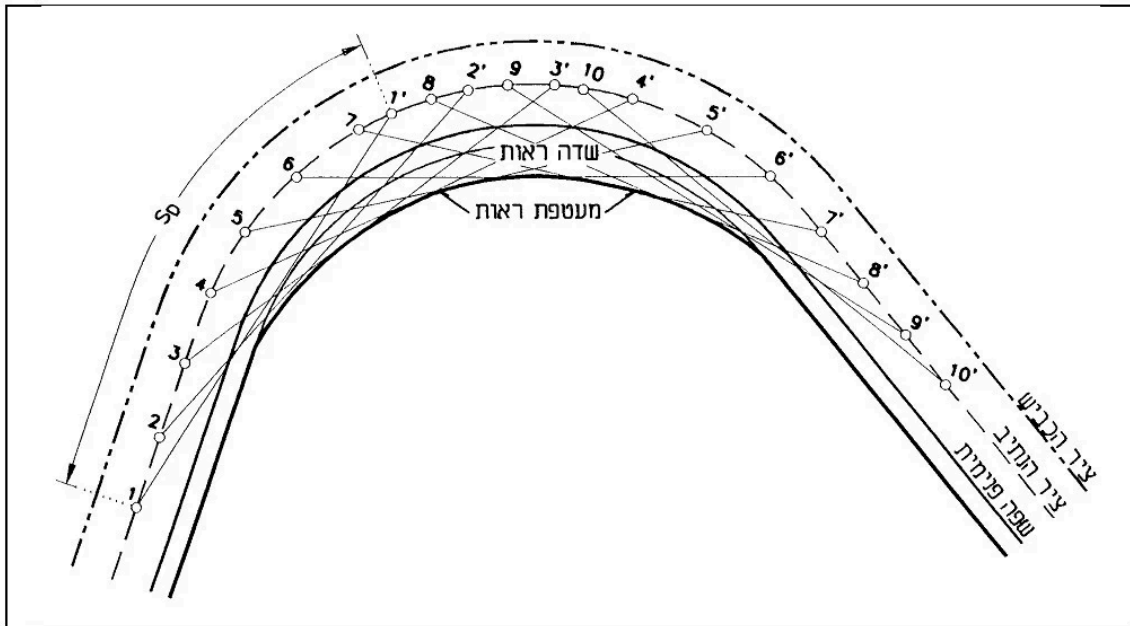


### תרשים 5.10: ראות בעקום האופקי

פתרון הראות בעקומים הקצרים ממרחק הראות, ייעשה בעזרת מעטפת הראות בלבד. הראות בצד הפנימי בעקום אופקי מוגבלת לעיתים על ידי מדרונות חפירה, קירות תמך, מבנים, ומכשולים אחרים. בדרכים מחולקות, הראות של הנהג בנתיב השמאלי בעקום שמאלה, מוגבלת על ידי מעקות הבטיחות במפרדה, שבדרך כלל יותר קרובים לנתיב השמאלי מאשר מכשולים שמעבר לשול הימני. מאחר שבעיית הראות היא תלת-מימדית, יש לקבוע לאורך העקום האופקי את הגבהים לתכן בשני קצוות קו הראות (גובה עיני נהג וגובה עצם), לפי סוג מרחק הראות לתכן (פרק 4, מרחקי ראות, סעיף 4.6).



**תרשים 5.11:** המרחק הצידי הפנוי הדרוש בעקום אופקי בתלות במרחק הראות לתכן וברדיוס העקום



**תרשים 5.12: מעטפת הראות בעקום אופקי**

מאחר שהערך המרבי של מרווח הבטיחות הצידי (m), שיכול להגיע אל מחוץ לתחום המיסעה) הינו באמצע קו הראות, המשמעות היא שהגובה המרבי המשוער למכשול רציף (לדוגמא: גובה מפרדה בדרך דו-מסלולית) להבטחת ראות בתוך מעטפת הראות, הוא בקירוב ממוצע הגבהים של קצוות קו הראות. מעל לגובה מרבי זה, העצם לתכנון לא יראה על ידי הנהג (מוסתר ע"י המכשול). העמודה השמאלית בטבלה 5.14 מציגה את הגבהים המרביים המותרים למכשול הנ"ל לפי סוג מרחק הראות (מרחק ראות לעצירה לדרך חד-מסלולית ולדרך דו-מסלולית, מרחק ראות להחלטה, ומרחק ראות לעקיפה מלאה ולעקיפה דחוקה), ובהתאם לגבהים לתכן בשני קצוות קו הראות.

**טבלה 5.14: גבהים מרביים למכשול להבטחת ראות במעטפת הראות (מ')**

מרחק ראות	גובה עיני נהג רכב פרטי	גובה עצם שיש לראות	גובה מרבי למכשול להבטחת הראות*
עצירה: דרך חד-מסלולית דו-נתיבית	1.05	0.15	$(1.05+0.15)/2 = 0.60$
	1.05	0.60	$(1.05+0.60)/2 = 0.825 \sim 0.80$ (לאחר העגלה למטה)
החלטה בקטע	1.05	0.60	$(1.05+0.60)/2 = 0.825 \sim 0.80$ (לאחר העגלה למטה)
עקיפה מלאה ועקיפה דחוקה	1.05	1.05	$(1.05+1.05)/2 = 1.05$

\* מעל גובה מרבי זה (לדוגמא במפרדה) העצם לתכנון לא יראה על ידי הנהג (מוסתר).



בכל נקודה בציוד הפנימי של העקום האופקי, ומעבר לה בתחום מעטפת הראות (עד למרחק  $m$  מציר הנתיב הפנימי), מומלץ כי לא יהיה מכשול המפריע לראות. במידה שכן קיים מכשול כזה, מומלץ כי גובהו מעל פני הדרך לא יעלה על הגבהים הנתונים לעיל. כאשר התוואי האורכי בשיפוע, יש להיעזר בחתך לאורך קו הראות.

אם הרדיוס האופקי המתוכנן לא עומד בדרישות מרחק הראות למהירות התכן עקב מכשול מקומי כלשהוא (צמחייה, מדרון, קיר תומך, מעקה בטיחות במפרדה), שגובהו מעל פני הדרך עולה על הגבהים הנתונים לעיל, יש לשקול הגדלת הרדיוס או הרחבת השול מקומית (במידת האפשר), אך לא מומלץ להפחית את מהירות הייעוד רק בעקום זה.

כאשר יש בחלקו הפנימי של העקום מכשול נמשך כגון קיר, ומתקבל מהחישוב כי קיימת הפרעה ניכרת לראות, יש לבצע חישוב מפורט יותר המסתמך על מיקומו המדויק של הנהג בחתך הרוחב, כמפורט בסעיף 3.8.6.2 בהנחיות לתכנון מנהרות, המתפרסמות במקביל להנחיות שלפניכם.

## 5.7 שילוב עקומים עוקבים בתוואי האופקי

### 5.7.1 עקומים אופקיים לאותו כיוון

#### א. עקומים מרוכבים

עקומים מרוכבים הם רצף של שניים או שלושה עקומים אופקיים לאותו כיוון, המשיקים זה לזה בקצותיהם (למשל: עקום תלת-מרכזי). כאשר יש שלושה עקומים, הרדיוס הקטן נמצא בין שני רדיוסים גדולים ממנו.

מטרת השימוש בעקומים מרוכבים היא לאפשר גמישות בתכנון תוואי רציף תוך התאמה לאילוצים טופוגרפיים וגיאומטריים, כגון התחברות לקטע ישר או לרדיוס קטן קיימים, או להתאמה לתוואי גשר. פתרון זה עדיף על עקומים עוקבים כמתואר ב-ב' להלן. עם זאת, מומלץ להגביל את השימוש בתכנון עקומים מעגליים מרוכבים לתכן צמתים ומחלפים, ולא להשתמש בהם לתכן קטעי דרך בין-עירונית, מאחר שנהגים אינם מצפים לשינוי ברדיוס במהלך נסיעה בעקום אופקי, אם אינו כרוך בשינוי נוסף בכיוון הנסיעה או במהירות – עדיף להשתמש בקלוטואידות כתחליף לעקומים מרוכבים בקטעי דרך.

במקרים מאולצים מבחינת טופוגרפיה וזכויות דרך, תכנון עקום מרוכב צריך לקיים את התנאים הבאים:

- (1) הגבלת ההפרש בין רדיוסי העקומים, כך שהיחס בין רדיוסי עקומים עוקבים בעקום אופקי לא יעלה על 1:1.5, אם כי היחס המומלץ הוא 1:1.25. יחס זה מביא להפרש שלא יעלה על 10 קמ"ש בין מהירויות התכן של עקומים עוקבים. הרדיוס הקטן ביותר יקבע את מהירות התכן.
- (2) שימוש בעקום מעבר יוגבל למקרים בהם לא ניתן לשמור על היחסים לעיל, ואז יוכנס עקום המעבר בין שתי הקשתות.

#### ב. עקומים עוקבים לאותו כיוון

עקומים אופקיים קרובים לאותו כיוון ("broken back") אינם רצויים, משיקולי בטיחות הנסיעה ומשיקולים חזותיים. בדרכים שאינן טבעתיות, הנהגים לא מצפים לשני עקומים עוקבים לאותו הכיוון. במידת האפשר



רצוי לתכנן עקום יחיד. הן עקומים מרוכבים והן עקומים עוקבים עשויים להקשות על יציבות משאיות ואופנועים.

כאשר האילוצים מצריכים תכנון עקומים עוקבים לאותו כיוון, רצוי לקיים את התנאי הבא: אורך קטע ישר מזערי של  $5 \cdot V_d$  בין שני העקומים ( $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש).

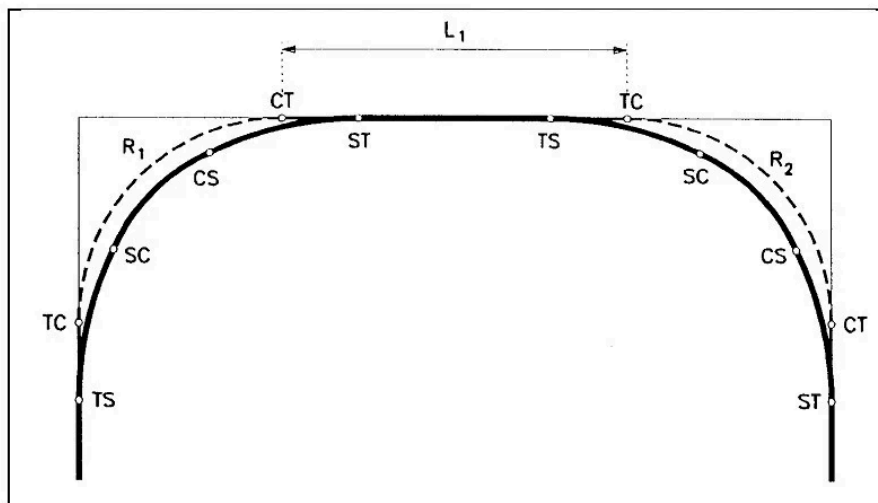
#### ביצוע מעבר השיפועים בין עקומים עוקבים:

מעבר השיפועים בין העקומים העוקבים תלוי באורך הקטע הישר שביניהם,  $L_1$  (נמדד בין נקודות ההשקה של הקשתות המעגליות לפני הכנסת עקום מעבר, תרשים 5.13):

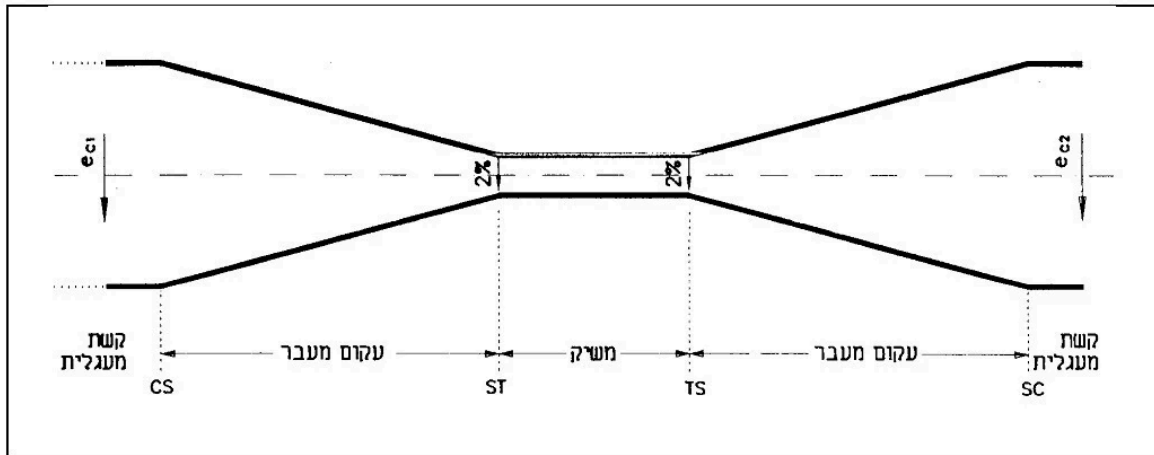
(1) כאשר אורך הקטע הישר (מטר) גדול מ- $3 \cdot V_d$  ( $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש), מעבר השיפועים יבוצע לכל עקום בנפרד באופן בלתי תלוי.

(2) כאשר אורך הקטע הישר (מטר) הינו בין  $V_d$  ל- $3 \cdot V_d$  ( $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש), יבוצעו מעברי ההגבהה (בכל עקום) עד להגבהה אחידה של 2%. בין קצות מעבר ההגבהה לאורך הקטע הישר תישמר ההגבהה האחידה של 2% (תרשים 5.14).

(3) כאשר אורך הקטע הישר (מטר) קטן מ- $V_d$ , יבוצע לכל אורך הקטע הישר שינוי הגבהה באופן רציף לצורך התאמה של הפרשי ההגבהה בין שני העקומים.



**תרשים 5.13:** המרחק בין עקומים אופקיים עוקבים לאותו כיוון



**תרשים 5.14:** חתך לאורך השפות במעבר השיפועים בעקומים אופקיים עוקבים לאותו כיוון כאשר  $V_d < L_1 < 3 \cdot V_d$  ( $V_d$  בקמ"ש)

### 5.7.2 עקומים אופקיים מנוגדי כיוון

עקומים אופקיים מנוגדי כיוון חשובים בהתאמת התוואי לטופוגרפיה. רצוי להימנע משינויי כיוון פתאומיים המקשים על הנהג לשמור על נתיב נסיעתו.

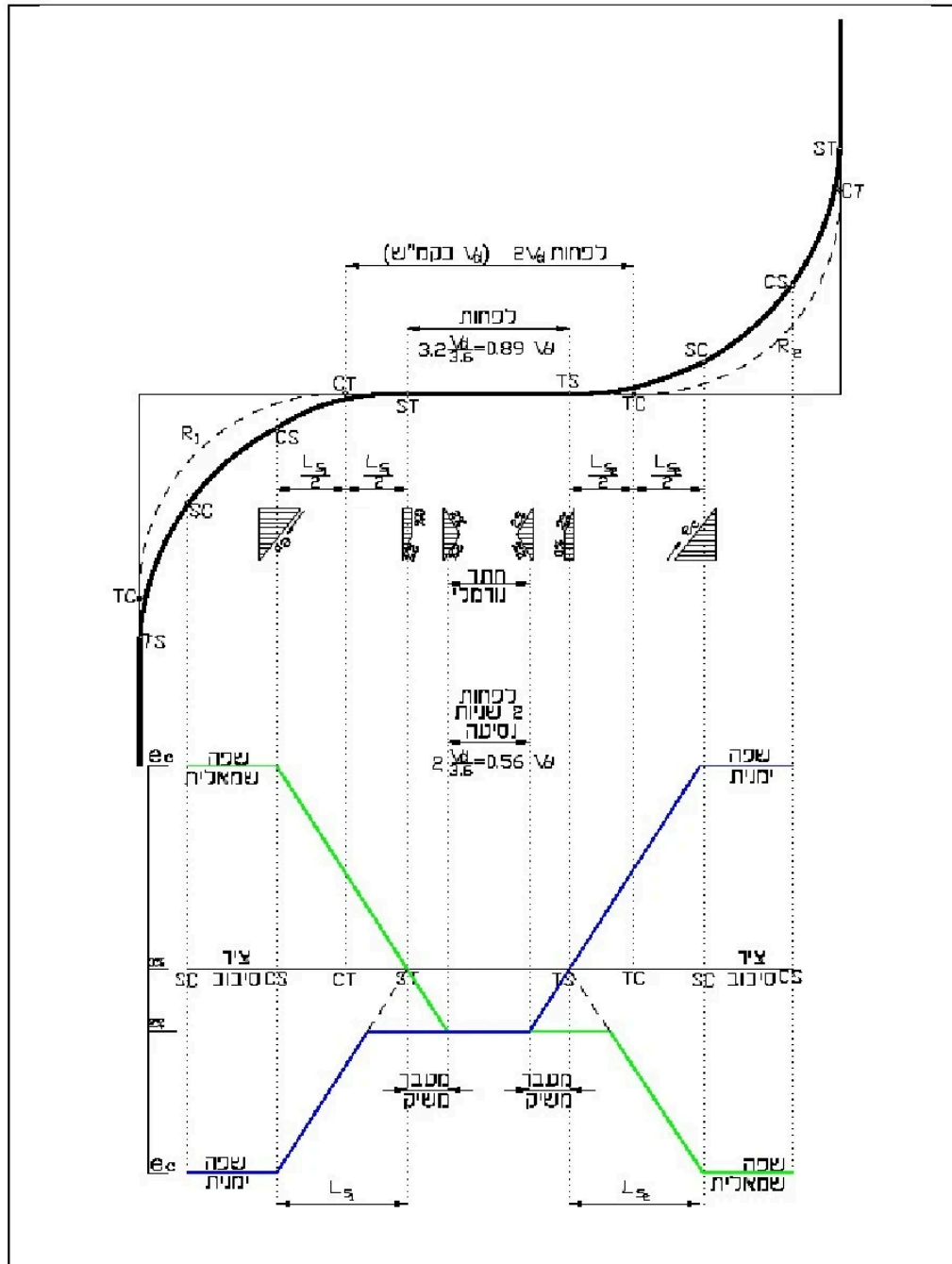
בתכנון עקומים אופקיים מנוגדי כיוון, יש לשמור על מעברי שיפועים מספקים להסדרת שינוי כיוון השיפוע הצידי. לפיכך, המרחק המזערי בין קצות העקומים בכיוונים מנוגדים נקבע לפי אורך מעברי השיפועים בשני העקומים, ובתוספת קטע ישר אשר לאורכו מתקיים חתך נורמלי בין קצות שני מעברי המשיק הסמוכים (תרשים 5.15).

האורך המזערי המומלץ של הקטע הישר בין הקשתות המעגליות המנוגדות כיוון (במטרים) הינו  $2 \cdot V_d$  (תרשים 5.15). יש אורך מזערי גם לקטע הישר שנותר בין עקומי המעבר, כמתואר בתרשים. כאשר התוואי מאולץ, ניתן להסתפק בכך שעקומי המעבר בכיוונים מנוגדים ישיקו זה לזה, ללא קטע ישר ביניהם.

מעברי השיפועים בין עקומים מנוגדי כיוון יבוצעו כדלהלן:

(1) כאשר יש קטע ישר באורך מספיק ביניהם, יבוצעו מעברי השיפועים בכל עקום מעבר כמקובל, כאשר ביניהם קיים קטע ישר בקימור הרחבי הרגיל באורך 2 שניות נסיעה במהירות התכן לפחות (תרשים 5.15).

(2) כאשר האורך לביצוע מעבר השיפועים בשיטה הרגילה מוגבל, יבוצע מעבר השיפועים באופן מאולץ לאורך עקומי המעבר, כך שבתחילת עקום המעבר (ST, TS) יהיה קימור רגיל, אשר יעבור לאורך עקום המעבר להגבהה מלאה.



**תרשים 5.15:** מעבר השיפועים בעקומים אופקיים מנוגדי כיוון



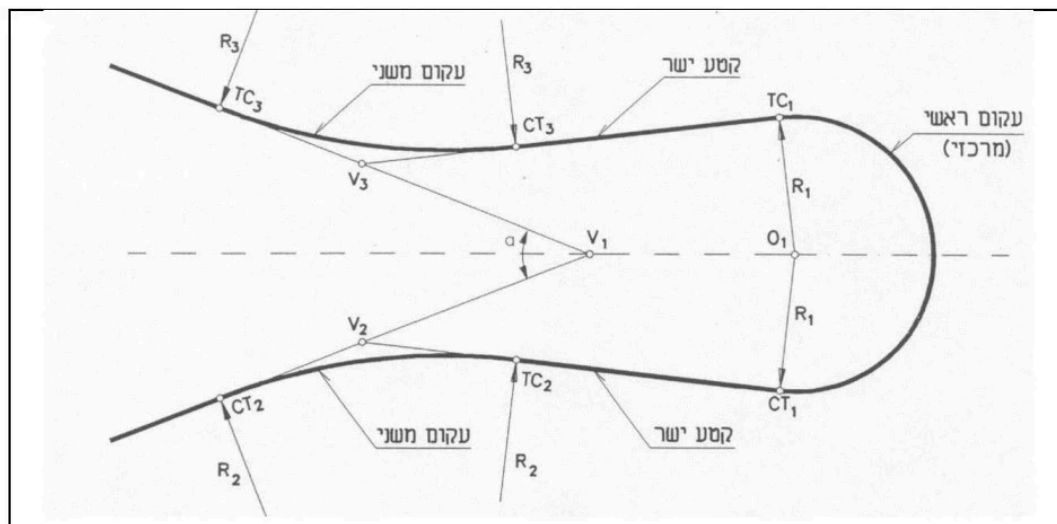
(3) כאשר שני עקומי המעבר משיקים ללא קטע ישר ביניהם, יבוצע מעבר השיפועים באופן מאולץ לאורך עקומי המעבר על ידי סיבוב השפות בקצב אחיד וסימטרי, כך שבנקודת ההשקה של עקומי המעבר זה לזה תהיה המיסעה אופקית לרוחב (בנקודות ST, TS אשר מהוות אותה נקודה). אין להכניס עקום מעגלי נוסף שיהפוך את העקום למרוכב.

(4) פרמטרי הקלוטואידות משני צידי הקטע הישר יהיו בסדר גודל זהה.

## 5.8 עקלתונים

### 5.8.1 הגדרה

העקלתון הוא קטע לאורך הדרך אשר התוואי האופקי שלו מורכב מעקומים (מעגליים ועקומי מעבר) וקווים ישרים משיקים, כך שהעקום הראשי (המרכזי) מצוי מחוץ לנקודת החיתוך של המשיקים המקוריים, לעיתים באופן חלקי בלבד (תרשים 5.16).



**תרשים 5.16: מרכיבי העקלתון**

עקלתון מלא כולל את המרכיבים הבאים:

- א. עקום אופקי ראשי (מרכזי), בעזרתו מבצע התוואי תפנית בסדר גודל של  $180^\circ$ .
- ב. שני עקומים משניים, המשיקים לקווים הישרים המרכיבים את העקלתון. תפקידם לאפשר את ביצוע העקום הראשי מחוץ לישרים המשיקים, ולהקטין באופן הדרגתי את המהירות לאורך העקלתון.
- ג. קטעים ישרים בין העקום הראשי לעקומים המשניים, אשר משיקים בקצה האחד לעקום הראשי ובקצה השני לאחד העקומים המשניים. הקטעים הישרים מאפשרים את ביצוע מעבר השיפועים, ומקנים גמישות בבחירת המיקום של מרכז העקום הראשי ביחס למשיקים המקוריים.



## 5.8.2 הצדקים לשימוש בעקלתון

### א. יישום

יישום של העקלתון הוא באזורים הרריים קשים, כאשר בתכנון עקום אופקי יחיד בין המשיקים מתקבל שילוב מסוכן של: (i) עקום אופקי ברדיוס קטן ובהגבהה צידית בשיעור גבוה, (ii) עקום הממוקם בקטע בעל שיפוע אורכי תלול, וכאשר שיפור העקום בדרך המקובלת של הגדלת הרדיוס איננו ניתן לביצוע מהסיבות הבאות:

- (1) הגדלת הרדיוס מרחיקה את העקום מנקודת מפגש המשיקים לכיוון פנים הזווית, וממקמת אותו במקום בו השטח עשוי להיות בלתי זמין או בעל טופוגרפיה קשה מאשר במיקום המקורי.
- (2) הרחקת העקום ממפגש המשיקים מקצרת את התוואי ומגדילה עקב כך את השיפוע לאורך.

החלפת העקום האופקי בעקום הראשי של העקלתון הוא פתרון מאולץ לשילוב של הגדלת הרדיוס עם הקטנת השיפוע לאורך, ולכן יש ליישמו רק באזורים הרריים קשים, בעלי מהירות תכן נמוכה. פיתרון מאולץ זה יתאים כאשר חלופות אחרות נפסלות מסיבות גיאומטריות או טופוגרפיות, או שהן בלתי כלכליות.

### ב. יתרונות וחסרונות לשימוש בעקלתון

#### (1) יתרונות העקלתון ביחס לעקום אופקי יחיד:

- הצורה הגיאומטרית של העקלתון על מרכיביו השונים מאפשרת הפחתה הדרגתית ומבוקרת של מהירות התכן, ממהירות התכן האופיינית לתוואי, למהירות התכן של העקום המרכזי.
- בטיחות התוואי הכולל עקלתון, גבוהה מבטיחות התוואי הכולל עקום אופקי יחיד.
- מרכיבי העקלתון מאפשרים גמישות בשילוב הצורות השונות, לקבלת התאמה טובה יותר של התוואי למגבלות הטופוגרפיות ולמהירות התכן, על ידי הקפת או עקיפת מכשולים.
- עקלתון מאפשר ביצוע רדיוסים קטנים יותר מאשר עקום אופקי יחיד.
- השיפועים לאורך בעקלתון מתונים לעומת עקום אופקי – לאותו תוואי אנכי.

#### (2) חסרונות העקלתון ביחס לעקום אופקי יחיד:

- העקלתון מחייב מהירויות נמוכות יותר מאשר עקום אופקי יחיד.
- אורך העקלתון גדול יותר.
- העקלתון מחייב ביצוע הרחבות גדולות יותר עקב הרדיוסים הקטנים.

## 5.8.3 סיווג העקלתונים

### א. קטגוריות העקלתון

קטגוריות העקלתון מסווגות בהתאם למיקומם של מרכזי העקומים המשניים ביחס לדרך:

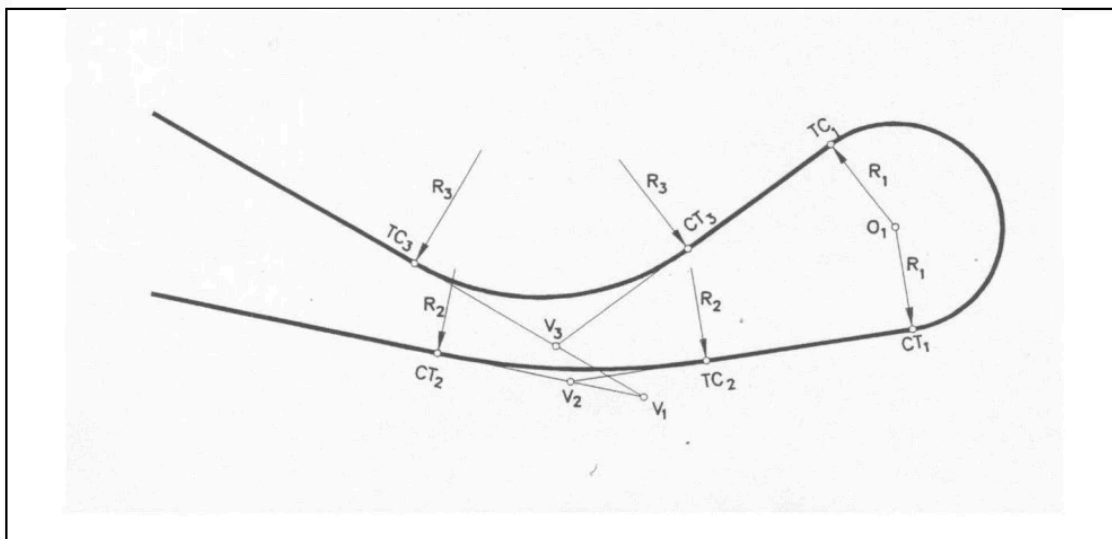
#### (1) קטגוריה 1

מרכזי העקומים המשניים שלו מצויים מאותו צד של הדרך ביחס לנהג הנוסע לאורך העקלתון (תרשימים 5.17 ו-5.18).

## 2) קטגוריה 2

מרכזי העקומים המשניים שלו מצויים מצדדים שונים של הדרך ביחס לנהג הנוסע לאורך העקלתון (תרשים 5.17).

השימוש בעקלתון מקטגוריה 2 נעשה כאשר בכיוון נקודת החיתוך של שני המשיקים הראשיים קיים מכשול המקשה על מיקום העקום המרכזי. במקרה זה עקלתון המתאים לקטגוריה 1 (בו העקום הראשי חייב לחתוך את חוצה הזווית הראשית או את המשכו) לא יוכל לעקוף את המכשול, מה שיחייב עבודות חפירה/ חציבה ומילוי. עקלתון מקטגוריה 2 מאפשר גמישות רבה יותר במיקום העקום הראשי.



**תרשים 5.17:** עקלתון מקטגוריה מס' 2

### ב. סימטריה וא-סימטריה

עקלתון הוא סימטרי (תרשים 5.18) כאשר הרדיוסים של העקומים המשניים שווים זה לזה, ושני הקטעים הישרים שבתוך העקלתון שווים באורכם. עקום סימטרי שייך בהכרח שייך לקטגוריה 1. כאשר אחד משני תנאי השוויון איננו מתקיים, העקום הינו א-סימטרי (תרשים 5.19).

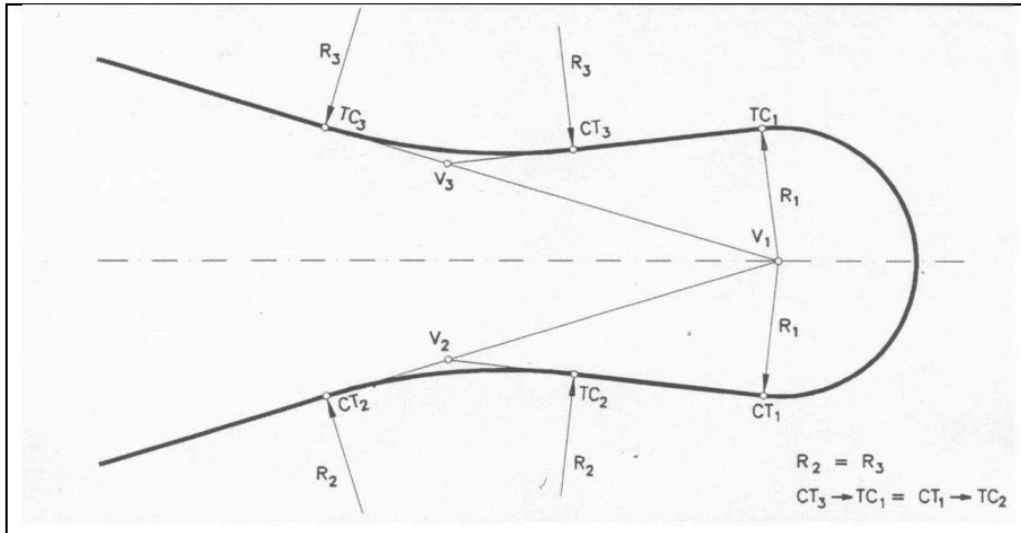
עקום א-סימטרי יכול להיות מקטגוריה 1 או מקטגוריה 2. עקום א-סימטרי בו חסר אחד העקומים המשניים, משיקולי התאמה לשטח, מכונה סמי-עקלתון (תרשים 5.20).

### 5.8.4 התוואי הראשוני ובדיקתו

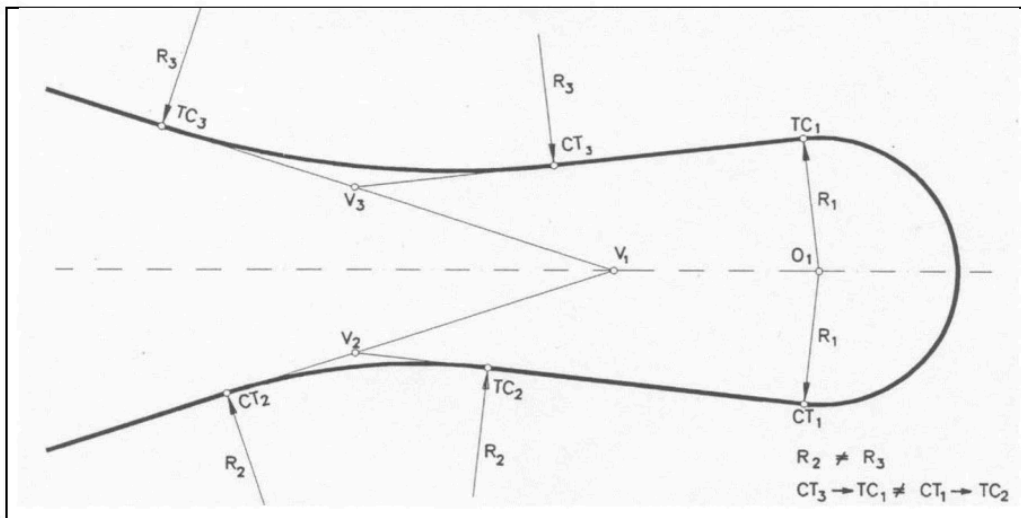
התכנון הראשוני של התוואי באזור העקלתונים מבוצע במספר חלופות. התכנון חייב להיות צריך להיות מדויק, מאחר ששינויים קטנים יחסית בציר הכביש יכולים לגרום להפרשים גדולים בכמות החציבה.



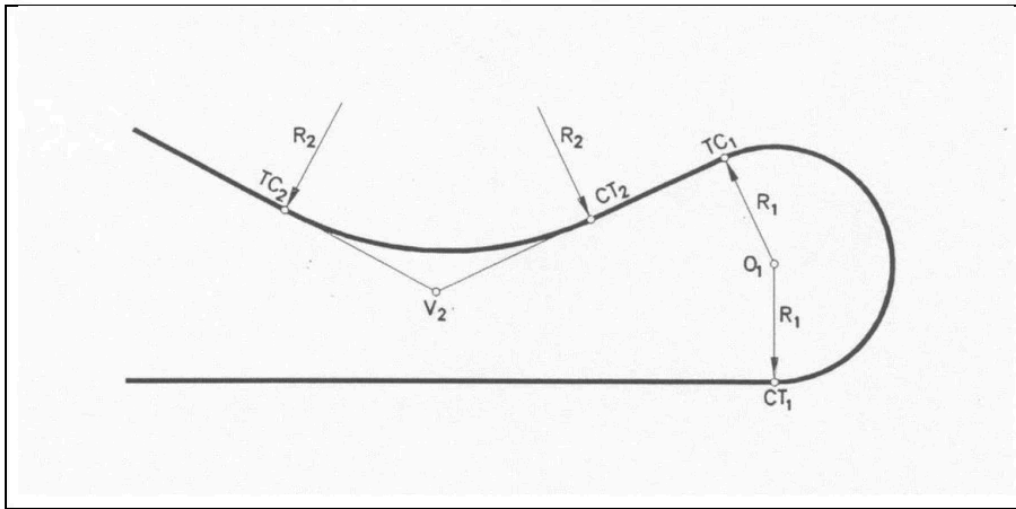
הרדיוס הקטן וזווית הפנייה החדה, גורמים לכך שהעקום הראשי הוא המקום הרגיש ביותר להבטחת השיפוע הרצוי לאורך, תוך שמירה על כמות עבודות עפר סבירה.



**תרשים 5.18:** עקלתון מקטגוריה מס' 1: סימטרי



**תרשים 5.19:** עקלתון מקטגוריה מס' 1: א-סימטרי



**תרשים 5.20:** סמי-עקלתון

השלב הראשון של תכנון העקלתון הינו מיקום העקום הראשי. רצוי שהשיפוע הצידי של הקרקע הטבעית באזור העקום הראשי לא יעלה על 15%. לאחר קביעת המיקום והרדיוס של העקום הראשי, מתוכננים הקווים הישרים והעקומים המשניים בהתאם לטופוגרפיה.

תכנון התוואי הראשוני מצריך מספר בדיקות הכרחיות שיפורטו בהמשך:

- התאמת הקו האדום להפרש הגובה בין הנקודות התוחמות את העקלתון.
- בדיקת המרחק הקרוב ביותר בין שני הענפים.
- בדיקת אורך קווי הביניים הישרים.
- כמות עבודות העפר.

### 5.8.5 קריטריונים לתכן עקלתונים

#### א. מהירות התכן

מהירות התכן משתנה באופן הדרגתי לאורך העקלתון. הצורה הגיאומטרית של העקלתון נועדה להפחית באופן הדרגתי את המהירות, ממהירות התכן האופיינית לדרך, למהירות התכן המתאימה לעקום המרכזי. הפרש גדול של מהירויות איננו בטיחותי. קיימות לאורך העקום שלוש מהירויות תכן כדלקמן:

- מהירות התכן בגישה לעקלתון –  $V_d$
- מהירות התכן המתאימה לעקום המשני –  $V_r$
- מהירות התכן המתאימה לעקום הראשי –  $V'_r$

היחס המומלץ בין כל שתי מהירויות עוקבות לעיל לא יעלה על 1:1.5. טבלה 5.15 מציגה את הערכים המומלצים של מהירויות התכן לאורך העקלתון. מהירות התכן בגישה לעקלתון היא מהירות התכן המתאימה לתוואי כמפורט בטבלה 2.4, עם אפשרויות להפחתה נוספת של 10 קמ"ש בדרכים דלות תנועה.



**טבלה 5.15:** מהירויות תכן מומלצות לאורך העקלתון (קמ"ש)

מהירות תכן בגישה לעקלתון $V_d$ (קמ"ש)				מהירות תכן
80	70	60	50	
50	45	40	35	בעקום המשני $V_r$
35	35	30	25	בעקום הראשי $V_r'$

**ב. הגבהה צידית מרבית**

בתכנון עקלתון באזור מושלג ההגבהה הצידית המרבית הינה 6%. ביתר האזורים ההגבהה המרבית הינה 10%.

**ג. רדיוסים מזעריים**

בהתאם להגבהה המרבית המותרת ולשינוי ההדרגתי של מהירות התכן לאורך העקלתון, נקבעים הרדיוסים המזעריים בעקומים המשניים ובעקום הראשי, כמוצג בטבלה 5.16.

**טבלה 5.16:** רדיוסים מזעריים בעקומים משניים ובעקום הראשי בעקלתון (מ')

מהירות תכן בגישה לעקלתון $V_d$ (קמ"ש)				רדיוס מזערי
80	70	60	50	
85	70	55	40	בעקומים המשניים
40	35	30	25	בעקום הראשי

**ד. שיפועים מרביים בעקום הראשי**

בעקום הראשי קיים שיפוע שקול המתקבל על בסיס הרכיבים הניצבים של השיפוע לאורך הדרך והשיפוע לרוחב המיסעה.

רדיוס השפה הפנימית של העקום הראשי קטן באופן משמעותי מרדיוס הציר (ברדיוס ציר של 25 מטר עשוי רדיוס השפה הפנימית להיות 19 מטר בלבד).

הרדיוסים הקטנים וזוויות הפנייה החדות של העקום הראשי גורמים לכך שהתוואי לאורך השפה הפנימית קצר במידה ניכרת מהתוואי לאורך ציר העקום. מכאן יוצא שהשיפוע לאורך השפה הפנימית עשוי להיות גדול במידה ניכרת מהשיפוע לאורך ציר העקום הראשי.

ההגבלות המומלצות לשיפוע המרבי לאורך בציר העקום הראשי מוצגות בטבלה 5.17. שיפוע זה יישמר במחצית הקטע הישר הסמוך לעקום הראשי.

בשאר התוואי השיפועים המרביים יהיו כמפורט בפרק התוואי האנכי להלן.



**טבלה 5.17:** השיפוע המרבי לאורך (%) בעקום הראשי בעקלתון

מהירות תכן בגישה לעקלתון $V_d$ (קמ"ש)			השיפוע (%)
80	60-70	50	
4.0	3.5	3.0	לאורך הציר
4.3	3.9	3.7	לאורך השפה הפנימית

**ה. הרחבה**

הרדיוסים הקטנים של הקשתות בעקום העקלתון מחייבים מתן הרחבות ניכרות. נושא ההרחבה מפורט בסעיף 5.4 לעיל. טבלה 5.18 מציגה את ערכי ההרחבה הדרושה למיסעה בעקלתון כתלות ברדיוס. רצוי לבצע את ההרחבה בציוד החיצוני של העקום, כדי לא להקטין עוד יותר את רדיוס השפה הפנימית. אופי הביצוע המדויק של ההרחבה בעקלתון ייקבע בהתאם לאפשרויות הטופוגרפיות.

**טבלה 5.18:** ערכי ההרחבה הדרושה למיסעה בעקלתון (מ') בתלות ברדיוס העקום

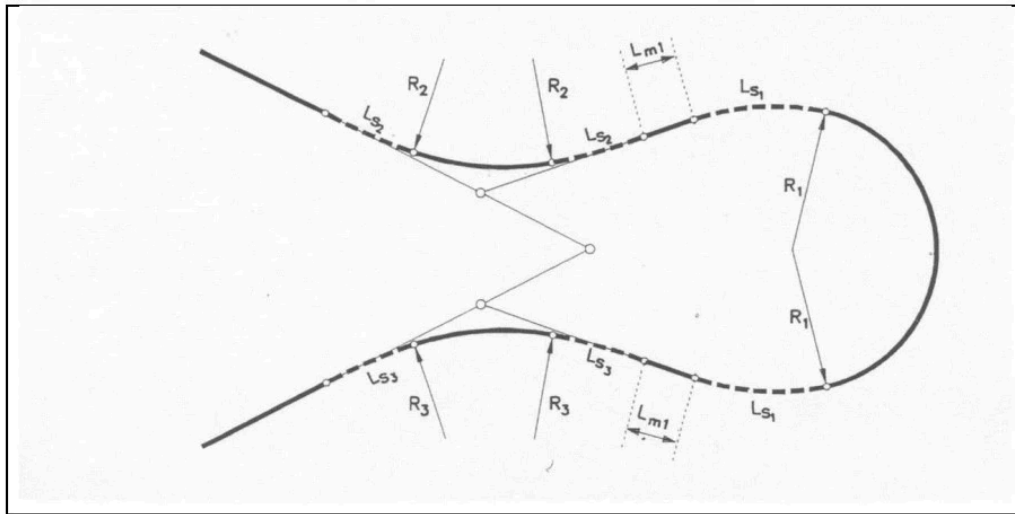
עבור מיסעה ברוחב 6.0 מ' בקטע הישר

מהירות התכן של העקום הראשי או המשני ( $V_r, V_r'$ ) (קמ"ש)			רדיוס העקום (מ')
50	35-40	20-30	
×	×	3.0	25
×	×	2.5	30
×	2.1	2.0	40
×	1.8	1.7	50
×	1.6	1.5	60
×	1.4	1.3	70
1.4	1.3	1.2	80
1.3	1.2	1.1	90
1.2	1.1	1.0	100

הסימון "×" משמעותו שאין להשתמש בשילוב זה של רדיוס ומהירות תכן.

**ו. עקומי מעבר ומעברי שיפועים**

השימוש בעקומי מעבר מומלץ בעקלתונים הן בעקום הראשי והן בעקומים המשניים, שכן השימוש בהם משפר בהרבה את כושר התימרון של הנהג לאורך העקלתון. שימוש זה מוצג בתרשים 5.21.



**תרשים 5.21:** עקלתון עם עקומי מעבר

החישוב המשולב של אורך עקומי המעבר ומעברי השיפועים בכל העקומות שבעקלתון יבוצע לפי קריטריוני תכנון עקום מעבר בעקום האופקי.

האורך המזערי של מעבר ההגבהה ושל עקומי המעבר (במטרים) הינו  $2 \cdot V_d$ , כאשר מהירות התכן  $V_d$  הינה בקמ"ש. מקדמי הנוחות של הקלוטואידה (C במ"שנ<sup>3</sup>) והפרש השיפוע לאורך בין השפה לציר ( $\Delta$  ב-%) המומלצים לתכנון עקלתונים מובאים בטבלה 5.19. פרמטרי הקלוטואידות של העקומים המשני והראשי צריכים להיות דומים.

**טבלה 5.19:** מקדמים לחישוב אורך עקומי מעבר ומעברי שיפועים בעקלתון

50	40	30 ומטה	מהירות התכן של העקום הראשי או המשני ( $V_r$ , קמ"ש)
1.05	1.1	1.15	מקדם הנוחות C (מ"שנ <sup>3</sup> )
0.67	0.70	0.75	הפרש השיפוע לאורך בין השפה לציר $\Delta$ (%)

**ז. אורך מזערי לקטעים הישרים**

1) האורך המזערי לקטע הישר בין עקומים מנוגדי כיוון (reverse curves) שני הקטעים הישרים שבין העקום הראשי לעקומים המשניים בעקלתון המסווג לקטגוריה 1, וכן אחד משני הקטעים בעקלתון המסווג לקטגוריה 2, מהווים קטע ישר בין עקומים מנוגדי כיוון. יש לשמור על אורך מזערי של הקטעים הישרים כך, שיתאפשר לנהג להסתגל לשינוי הכיוון תוך מעבר הדרגתי בין שני מעברי השיפועים הסמוכים.



האורך המזערי של הקטע הישר תלוי אם הוא מחבר בין עקומי מעבר, או שמחבר את הקשתות המעגליות ללא עקום מעבר.

**כאשר יש עקום מעבר (תרשים 5.21):**

$$L_{m1} = 0.02 \cdot b \cdot \left( \frac{100}{\Delta_1} + \frac{100}{\Delta_2} + \frac{L_{s1} + L_{s2}}{4} \right)$$

**כאשר:**

- $L_{m1}$  – אורך הקטע הישר הנמדד בין נקודות ההשקה של עקומי המעבר לישר (מטר);
  - $b$  – רוחב הנתיב בקטע הישר (מטר);
  - $\Delta_1, \Delta_2$  – הפרשי השיפוע לאורך בין ציר הדרך והשפות בשני מעברי השיפועים שבקצות הקטע הישר (%);
  - $L_{s1}, L_{s2}$  – אורך עקומי המעבר בשני העקומים בהתאמה (מטר), המחושב בהתאם לסעיף 5.5 לעיל ומקדמי טבלה 5.19.
- באורך הדרוש כלולים מעברי המשיק הדרושים לשני העקומים והקטע בו השיפוע לרוחב הינו נורמלי.

**כאשר אין עקום מעבר:**

$$L_{m2} = \frac{2}{3} \cdot (L_1 + L_2) + 0.02 \cdot b \cdot \left( \frac{100}{\Delta_1} + \frac{100}{\Delta_2} \right) + \frac{L_{s1} + L_{s2}}{4}$$

**כאשר:**

- $L_{m2}$  – אורך הקטע הישר הנמדד בין נקודות ההשקה של הקשתות המעגליות שמשני צידי הקטע הישר;
  - $L_1, L_2$  – אורך מעברי ההגבהה לשני העקומים בהתאמה (מטר);
  - $b$  – רוחב הנתיב בקטע הישר (מטר);
  - $\Delta_1, \Delta_2$  – הפרשי השיפוע לאורך בין ציר הדרך והשפות בשני מעברי השיפועים שבקצות הקטע הישר (%);
  - $L_{s1}, L_{s2}$  – אורך עקומי המעבר (שהיו נדרשים בתנאים אלו) בשני העקומים בהתאמה (מטר), המחושב בהתאם לסעיף 5.5 לעיל ומקדמי טבלה 5.19.
- בשני המקרים יש לוודא שאורך הקטע הישר לא יפחת מהאורך המתאים ל-2 שניות נסיעה במהירות התכן של הדרך.

2) האורך המזערי לקטע הישר בין עקומים לאותו כיוון (broken back curves) אחד משני הקטעים הישרים בעקלתון המסווג כקטגוריה 2, מחבר בין עקום ראשי לעקום משני לאותו הכיוון.

האורך המזערי של הקטע הישר יחושב לפי האורך המזערי שבין עקומים מנוגדים (מקום מצומצם בתוואי העקלתון בשני המקרים).



מעברי ההגבהה של כל עקום (לאותו כיוון) יבוצעו בהתאם לסעיף הדין בעקומים אופקיים לאותו כיוון בסעיף שילוב עקומים בתוואי האופקי.

#### ח. מרחק בין עקלתונים סמוכים

המרחק בין עקלתונים סמוכים נקבע בעיקר על ידי המיקום האופטימלי של העקומים הראשיים. בנוסף רצוי להתחשב בהנחיות הבאות בקביעת מיקום עקלתונים סמוכים:

(1) רצוי שעקלתונים עוקבים יהיו לכיוונים מנוגדים. האורך המזערי של הקטע הישר המזערי הרצוי ביניהם הוא  $1 \cdot V_d$ , כאשר  $V_d$  הינה מהירות התכן (קמ"ש) בגישה לעקלתון.

(2) המרחק המרבי בין עקלתונים סמוכים ייקבע כך, שלא יגרום לעלייה מופרזת במהירות הנסיעה בירידה.

### 5.8.6 בדיקות הכרחיות לתכנון התוואי הראשוני של העקלתון

#### א. התאמה בין הקו האדום להפרש הגובה בקרקע בין הנקודות התוחמות את העקלתון

הבדיקה מתייחסת להשוואה בין  $\Delta H$  (ההפרש ברום פני הקרקע בין נקודות קצות העקלתון) לבין  $\Delta H_{ef}$  (הפרש הגובה במטר בין הנקודות התוחמות את העקלתון כתוצאה של תכנון "קו אדום"). תצוגה גרפית של הפרמטרים מובאת בתרשים 5.22.

$$\Delta H_{ef} = X_1 \cdot i_{a1} + X_2 \cdot i_{red}$$

כאשר:

- $i_{a1}$  – שיפוע אופייני של התוואי המתקרב לעקלתון;
- $X_1$  – אורכו של השיפוע  $i_{a1}$ , ששווה לסכום האורכים של שני העקומים המשניים בתוספת מחצית מאורכם של שני קווי הביניים הישרים (מטר);
- $i_{red}$  – שיפוע מוקטן לאורך העקום הראשי (טבלה 5.17), מבוטא כשבר עשרוני;
- $X_2$  – אורך מזערי של השיפוע המוקטן  $i_{red}$ , ששווה לאורך העקום הראשי, בתוספת מחצית האורך של קווי הביניים הישרים (מטר).

אם  $\Delta H_{ef} < \Delta H$ , יש להאריך את העקלתון עד לקבלת הפרש הגובה הדרוש.  
אם  $\Delta H_{ef} > \Delta H$ , ניתן לשפר את העקלתון על ידי הקטנת השיפוע לאורך, או להאריך את הקטע בו השיפוע מוקטן.

רצוי שהפרש הרומים בין הקו האדום לקרקע הטבעית בציר הכביש ולאורך העקלתון לא יעלה על 3-4 מטר.

#### ב. בדיקת המרחק הקרוב ביותר (F) בין שני הענפים

הבדיקה מתייחסת להשוואה בין המרחק האפקטיבי ( $F_{ef}$ ) שניתן לחשב מתוך התנוחה הגיאומטרית, לבין המרחק המזערי הרצוי ( $F_{des}$ ) (תרשים 5.23).

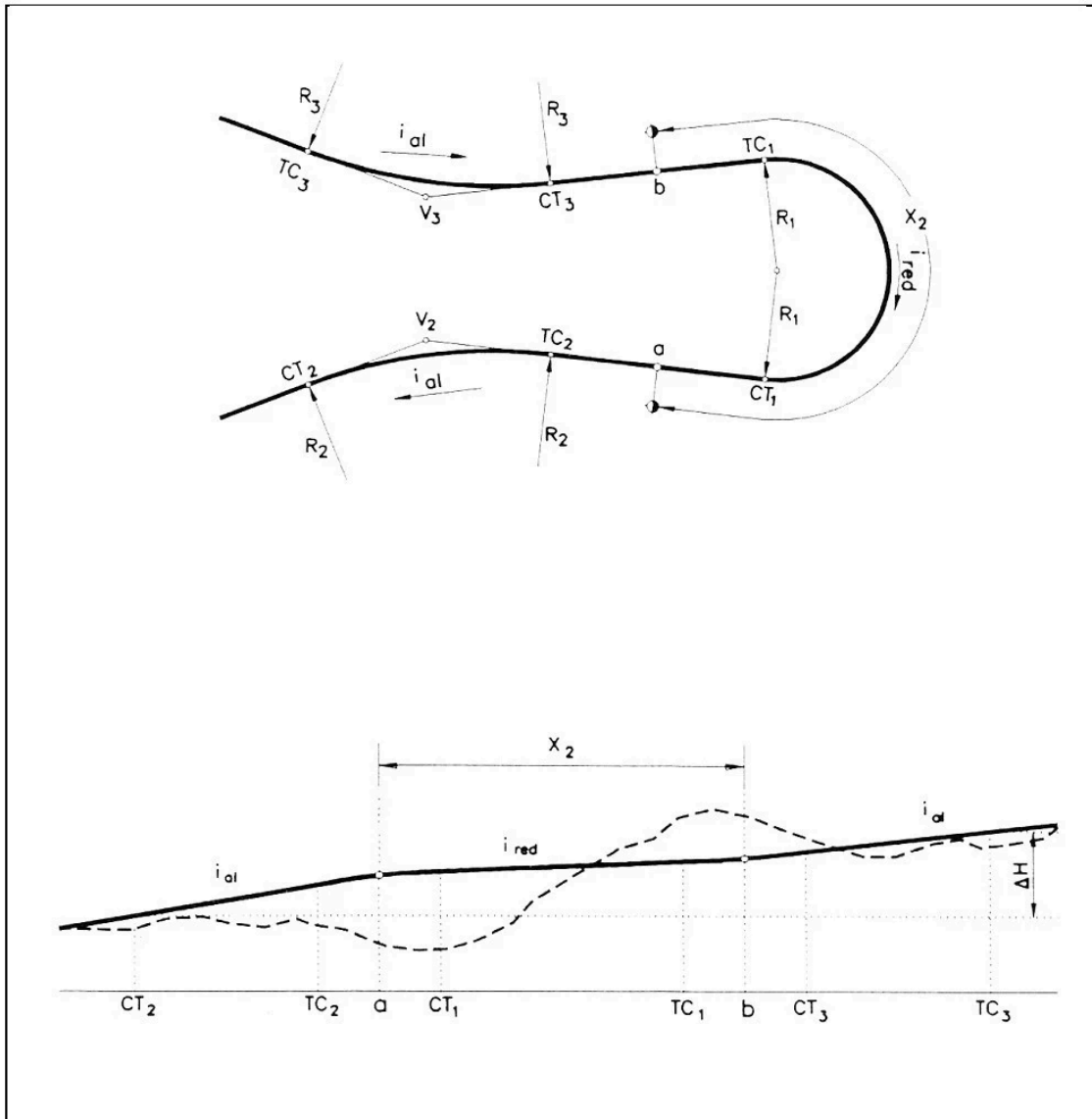
$F_{ef}$  נמדד בין הנקודות  $B_2$  ל- $B_3$ , וכולל את אורכי הביסקטור של העקומים המשניים.

5-46

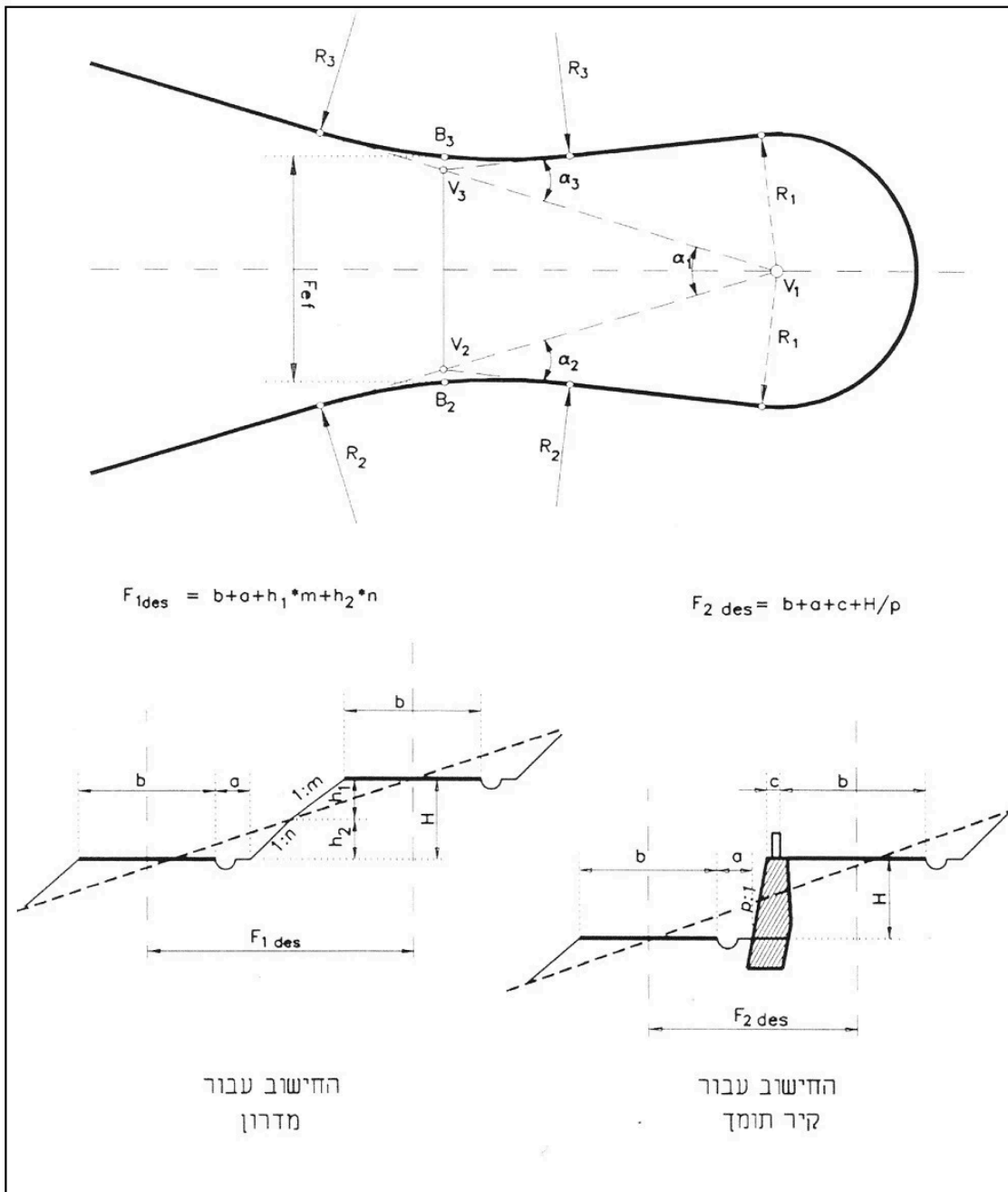
פרק 5 – התוואי האופקי

כרך 1 – 04/2018

הנחיות לתכן גיאומטרי של דרכים בין-עירוניות



**תרשים 5.22:** כללי תכנון ה"קו האדום" בעקלתונים



**תרשים 5.23:** המרחק הקרוב ביותר בין שני ענפי העקלתון



המרחק המזערי הרצוי בין הצירים של שני הענפים:

עבור מדרונות:

$$F_{1des} = b + a + h_1 \cdot m + h_2 \cdot n$$

עבור קירות תומכים:

$$F_{2des} = b + a + c + \frac{H}{p}$$

אם  $F_{ef} < F_{1des}$  יהיה צורך להשתמש בקיר תומך במקום תכנון המדרון.

אם  $F_{ef} < F_{2des}$  יהיה צורך להזיז את נקודת החיתוך  $V_2, V_3$  (כלומר להגדיל את רדיוסי העקומים המשניים) כדי להגדיל את המרחק  $F_{ef}$ .

### ג. בדיקת אורך קווי הביניים הישרים

הקווים הישרים בין העקומים המשניים לבין העקום הראשי מיועדים לאפשר את:

(1) הכנסת עקומי המעבר;

(2) ביצוע מעבר השיפועים;

(3) שינוי השיפוע האורכי.

האורך המזערי של הקטעים הישרים  $(L_{m2}, L_{m1})$  נתון בסעיף הקריטריונים לתכן באמצעות הנוסחאות הרלוונטיות של  $L_{m2-1}, L_{m1}$ .

### ד. כמות עבודות העפר

על מנת להקטין את כמות עבודות העפר, יש לדאוג שהפרש הרומים בין הקו האדום לקרקע הטבעית בציר הכביש ולאורך העקלתון לא יעלה על 3-4 מטר.

## 5.9 בקרה כללית לתוואי האופקי

להלן מספר קריטריונים כלליים לבקרת תכנון התוואי האופקי:

א. התוואי האופקי צריך להיות מכוון באופן כללי בין נקודת המוצא לנקודת היעד, אם כי רצוי שיתאים לטופוגרפיה במידת האפשר. תוואי מתמשך ורציף המותאם כללית לתוואי הקרקע, עדיף על פני תוואי עם קטעים ישרים ארוכים ה"חותך" את פני הקרקע באופן קיצוני. קטעים ישרים ארוכים מדי אינם רצויים, מהטעמים הנקובים להלן.

ב. אורך מרבי במטרים של קטע ישר בין עקומים הוא  $20 \cdot V_d$  ( $V_d$  מהירות התכן בקמ"ש). מומלץ להגביל אורך זה ל- $10 \cdot V_d$  ככל שניתן. רצוי לשלב עקומים אופקיים בהתאם לכך, כדי למנוע אורך מוגזם של תוואי ישר, אשר גורם לקושי בהערכת מהירות ומרחק, למהירויות גבוהות, לסנוור ולחוסר עירנות.

ג. בטופוגרפיה מישורית, רצוי למקם את הקטעים הישרים כך שמשתני נוף כגון כפרים, מגדלי מים, יערות, וכו' יהיו רבים ככל האפשר, על מנת להפחית עייפות ומונטונויות אשר עשויים לגרום לתאונות דרכים. מצד שני, כאשר התוואי מפותל עם עקומות תדירות, יורדת רמת הבטיחות.



- ד. תכן הדרך חייב להיות עקבי. לא רצוי לתכנן קטעים ישרים קצרים המותווים בין עקומים ארוכים, או להיפך: עקומות קצרות בין קטעים ישרים ארוכים.
- היבט בטיחותי: עקומות חדות המופיעות לאחר קטעים ישרים גורמות לסכנה בטיחותית חמורה, שכן הן מאלצות את הנהג להפחית בפתאומיות את מהירות הנסיעה.**
- ה. השימוש ברדיוס המזערי מוגבל למקרים אשר אינם מאפשרים פתרון אחר. רצוי לתכנן לעקומים אופקיים ברדיוסים הגדולים ככל שניתן במסגרת האילוצים הקיימים (טופוגרפיה, גיאומטריה). העקומים צריכים להיות באורך מספק (לא קצרים מדי), על מנת למנוע את התופעה של "שבר" (הימצאות עקומה קצרה לאורך קטע ישר ארוך). מצד שני, אין לתכנן עקומים מעגליים ארוכים מדי, מפני שלא רצוי שהנהגים יסעו לאורך העקומים זמן רב מדי. האורכים המזעריים והמרביים פורטו בסעיף 5.2.5 לעיל.
- ו. הנהגים נוטים להעריך את רדיוס העקומה בהתקרבות אליה בהתאם לחזות הסביבתית, ולהתאים את מהירות נסיעתם בהתאם להערכה זו. ההערכה מבוססת יותר על העקמומיות מאשר על ההגבהה. יש חשיבות לעובדה שבהתקרבות לעקום האופקי ניתן יהיה לראות את פני הדרך ממרחק מספיק לצורך ההערכה, בעיקר בלילה.
- ז. כאשר הדרך נמצאת כולה במילוי גבוה, יש להימנע משימוש בעקומות חדות. העדר "קו מנחה" בקצה הדרך (חפירה, עצים, שיחים, וכו'), מקשה על הנהג להעריך את מידת העקמומיות, ולהתאים את כיוון רכבו ומהירותו בהתאם.
- ח. יש לתאם את בקרת התוואי האופקי עם בקרת התוואי האנכי, למניעת בעיות ראות ושיפור חזות התוואי ושיפור הבטיחות. בדרכים דו-נתיביות יש להבטיח אורך קטעים שיאפשרו עקיפה – ראו סעיף מרחקי הראות לעקיפה והצדקים לנתיבי עקיפה בפרקים הקודמים.
- ט. עקביות בתכן התוואי – במדינות שונות ובישראל נמצאים בשלבי פיתוח וכיול מודלים שונים לניתוח עקביות התכן של התוואי. בישראל כוילו עד כה מודלים לעקביות התוואי האופקי בדרכים דו-נתיביות ורב-נתיביות (ראו פירוט בנספח ג' – "הבטחת עקביות והדרגתיות בתכן הדרך" בתוך "הנחיות לקביעת מהירויות ברשת הדרכים" של משרד התחבורה, יולי 2010. בנספח ניתן לראות דוגמה לשימוש במודלים אלה).