

14. פיתול

14.1 כללי

הטרחת פיתול טהור באלמנטים של מבנים, מכל חומר, ובפרט באלמנטים מבטון מזוין, נדירה מאד. במיעוט המקרים בהם נתקלים בפיתול הוא מלווה בכפיפה ובגזירה עקב כפיפה. כפי שיתברר בהמשך, כאשר המאמצים באלמנט עולים על חוזק המתיחה (וזה בשלב עמיסה נמוך מאד) הוא נסדק על פני כל המעטפת מאחר ומאמצי מתיחה ראשיים מתפתחים על פני מרביתה. כאשר האלמנט סדוק כולו (בניגוד לקורות או טבלות מתוחות בכיוון אחד בהם לא כל האיזורים נסדקים) הדפורמביליות גבוהה מאד ולכן הקשיחות נמוכה מאד (לרוב – החלק ה 15 עד 12 מהקשיחות הבלתי סדוקה [36]).

מסיבה זו בעיקר לא רצוי לתכנן אלמנטים להטרחת פיתול אלא בנסיבות בהן הפיתול הוא חלק ממערכת הסטטית הדרושה לקבלת העומסים. בכל מקרה בו ניתן להפעיל מערכת סטטית אלטרנטיבית יש להשתדל לעשות זאת. בפרק זה לא נדונה בעיית פיתול אלמנטים העשויים מדקי דופן בהם ההתנגדות לפיתול מתקבלת באמצעות warping resistance. נדונה רק בעיית הפיתול המכונה פיתול St. Venant, המתבטא במערכת מאמצי גזירה בחתך האלמנט הסובבים סביב מרכז גזירה. ההנחה היא כי הקורא מכיר את נושא הפיתול מתורת החוזק. התיאוריה המייצגת את התופעה ששמה פיתול בבטון מזוין כוללת כמה נדבכים אשר מתווספים לתפיסה מחשבתית המקבלת תוקף בגבוי ניסויי בלבד. נעשו ניסויים במשך השנים במקומות שונים בעולם אך לגבי מעט סוגי חתכים – בעיקר חתכים התואמים צורות אשר מתקבלות בתבניות המצויות בבטון מזוין [36], כלומר – מלבני, קמץ, עגול, טבעת, ארגז, וכו'. אין מידע ניסויי לגבי חתכים בעלי צורות מיוחדות או חריגות.

14.2 התנהגות מבנים מבטון מזוין כעשויים מחומר אלסטו-פלסטי

14.2.1 התנהגות אלסטית של אלמנטים מוטרחים בפיתול

לפי תורת החוזק, עבור גופים העשויים מחומר אלסטי הומוגני ואיזוטרופי, מאמצי הגזירה עקב פיתול נתונים על ידי:

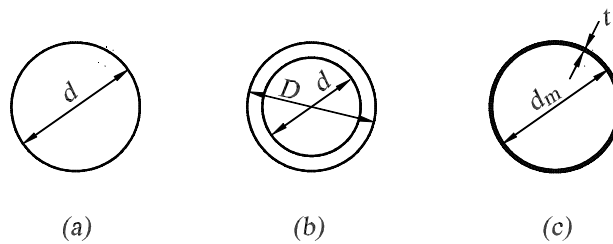
$$\tau_{td} = \frac{T_d}{I_t} r \quad (14.1)$$

* פרק זה מעודכן לחודש נובמבר 2010

בה: τ_{td} = מאמץ התכן (גזירה) בפיתול
 T_d = מומנט התכן בפיתול
 I_t = מומנט האינרציה הפולרי
 r = המרחק מציר האלמנט עד הסיב בו נקבע τ_{td}
 וניתן גם לבטא על ידי:

$$\tau_{td} = \frac{T_d}{W_t} \quad (14.2)$$

בה: W_t = מומנט ההתנגדות לפיתול. ברור כי למען קבלת מאמץ הגזירה המירבי יהיה: $W_{t,min} = I_t / r_{max}$



ציור 14.1

עבור שלושה חתכים פשוטים [28] – עיגול (ציור 14.1a), טבעת עבה (ציור 14.1b) וטבעת דקה (ציור 14.1c) הביטויים עבור מומנט האינרציה הפולרי (I_t), מומנט

טבלה מס' 14.1

| טבעת דקה | טבעת עבה | עיגול | |
|---------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| $\frac{\pi}{4} t d_m^3$ | $\frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$ | $\frac{\pi}{32} d^4$ | I_t |
| $\frac{\pi}{2} t d_m^2$ | $\frac{\pi (D^4 - d^4)}{16 D}$ | $\frac{\pi}{16} d^3$ | W_t |
| $\frac{T_d}{\pi t d_m^2}$ | $\frac{16 D}{\pi (D^4 - d^4)} T_d$ | $\frac{16 T_d}{\pi d^3}$ | $\tau_{td,max}$ |

ההתנגדות לפיתול (W_t) ומאמץ התכן המירבי – גזירה עקב פיתול ($\tau_{td,max}$) נתונים בטבלה מס' 14.1 (תורת האלסטיות, פיתול סן ונני):

עבור חתך מלבני, לפי אנלוגיה בועת הסבון של Prandtl (ציור 14.2) פרוס מאמצי הגזירה עקב פיתול הינו כמתואר בציור, כאשר המאמץ הגדול באמצע הדופן הארוכה d ובפינות המאמץ 0 כתוצאה מאי הרציפות שם. ניתן לבטא את I_t ו W_t לפי הנוסחאות (14.3) ו (14.4) להלן:

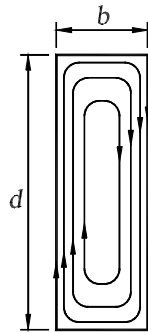
$$I_t = \alpha b^3 d \quad (14.3)$$

$$W_t = \beta b^2 d \quad (14.4)$$

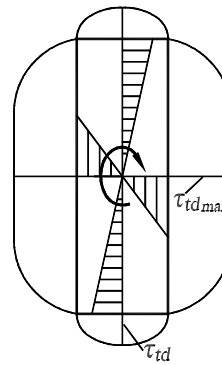
עבור $d \geq b$ ניתן לקבל את α ו β עבור קבוצת ערכים d/b (טבלה מס' 14.2):

טבלה מס' 14.2

| d/b | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 6.0 | ∞ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| α | 0.140 | 0.196 | 0.229 | 0.263 | 0.281 | 0.299 | 0.333 |
| β | 0.208 | 0.231 | 0.249 | 0.267 | 0.282 | 0.299 | 0.333 |



(a)



(b)

ציור 14.2

ערכו של מאמץ הגזירה המקסימלי בפיתול ייקבע לפי הנוסחה:

$$\tau_{td,max} = \frac{T_d}{\beta b^2 d} \quad (14.5)$$

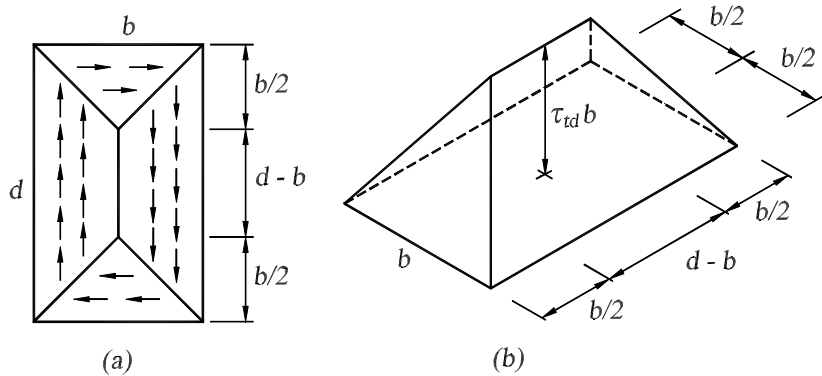
ניתן לראות כי הערך β נע בין 0.208 ל 0.333 כאשר באופן מעשי כבר החל בערך $d/b \geq 5$ אפשר להניח $\beta = 0.333$.

14.2.2 חתך מלבני – התנהגות פלסטית

לפי אנלוגיית "ערימת החול" של Nadai, בגבול הנוזילה, מאמץ הגזירה עקב פיתול שווה בערכו על פני כל השטח ופריסתו כמתואר בציור 14.3a (כזכור לפי התורה הפלסטית אין קומפטיביליות בין עיבורים ומאמצים ולכן ההנחה על פריסת מאמצים

כנייל הינה תקיפה). את מומנט הפיתול ניתן לסכם, לפי תורת "ערימת החול" בתור נפח הפירמידה הנתונה בציור 14.3b, בה גובה הפירמידה $\tau_{td} b$. סה"כ ניפחה נתון על ידי הנוסחה (14.6):

$$T_d = \frac{1}{2}(d-b)\tau_{td}b^2 + \frac{1}{3}b^2\tau_{td}b = \tau_{td}b^2d\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\frac{b}{d}\right) \quad (14.6)$$



ציור 14.3

מהנוסחה (14.6) נובע כי מומנט ההתנגדות לפי התנהגות פלסטית יהיה:

$$W_t = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\frac{b}{d}\right)b^2d = \psi b^2d \quad (14.7)$$

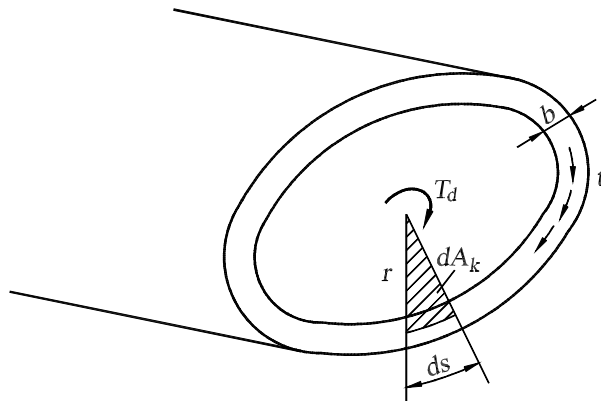
ברור איפוא כי עבור $\psi = 1/3$ $b = d$ ועבור $\psi = 1/2$ $d/b = \infty$

14.2.3 שילוב בין שתי התורות

הניסויים [36] (ואחרים) מצביעים על כך כי ניתן להניח עבור חתך מלבני ערכים קרובים ל: $W_t = 1/3 b^2 d$ ו $I_t = 1/3 b^3 d$, ערכים שהם $d/b = \infty$ בגישה אלסטית ו $d/b = 1$ בגישה פלסטית, ואם נוסיף את מה שייאמר בסעיף 14.3 לגבי תיאורית הזרימה, תהיה הצדקה לדבר על התנהגות אלסטו-פלסטית של הבטון המזוין בפעולת פיתול.

14.3 תיאורית הזרימה בחתך סגור

נידבך נוסף לקראת ניסוח ההתנהגות של אלמנטים מבטון מזוין תחת השפעת פיתול הינה המודל של זרימת מאמצי גזירה עקב פיתול בחתך סגור. כאן נניח חתך דק דופן, סגור, בעל עובי דופן b , אשר אינו קבוע ושווה בהיקף החתך - ציור 14.4. נניח כי לחתך זה מרכז פיתול ובו פועל מומנט פיתול T_d . מומנט פיתול זה יוצר זרימת



ציור 14.4

מאמצי גזירה לאורך הדופן כך שבחתך הדופן מתפתח כוח גזירה קבוע ליחידת אורך d_s וגודלו t . עובי הדופן לא קבוע אך מניחים כי מאמץ הגזירה בו מחולק שווה – t/b .

$$t = \tau_{id} b \quad (14.8)$$

מומנט הפיתול T_d ניתן לבטא על ידי אינטגרל לאורך s (המקום הגיאומטרי של מרכזי הכובד של עובי הדופן b) של הכוח t פעמים המרחק ממנו עד מרכז הפיתול של החתך r . אולם לפי משפט Stocks הידוע אינטגרל של איזה שהוא ערך לאורך היקף חתך סגור שווה לפעמיים אותו ערך כפול בשטח החסום על ידי אותו ההיקף:

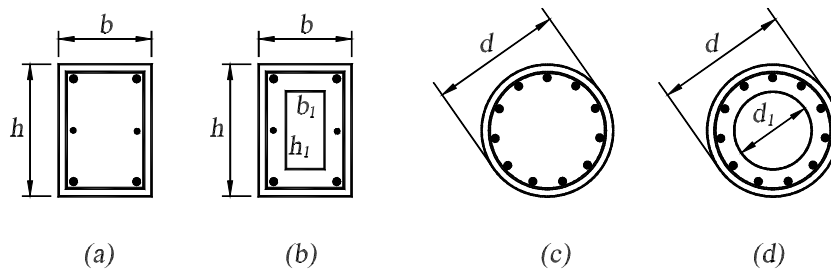
$$T_d = \int_s t r d_s = t 2 A_k \quad (14.9)$$

מכאן שלגבי כל קטע של החתך הסגור ניתן לבטא את מאמצי הגזירה על ידי:

$$\tau_{id} = \frac{T_d}{2 A_k b} \quad (14.10)$$

14.4 ניסויים לגבי התנהגות אלמנטים מבטון מזוין בפעולת פיתול

הנדבך האחרון אשר יש להציב על מנת להשלים את התמונה של מנגנון קבלת הטרחת הפיתול על ידי אלמנטים מבטון מזוין הם מסקנות מניסויים [28] [36]. הניסויים מלמדים דברים רבים ולמעשה שום הנחה לגבי מבנים מבטון מזוין לא תתקבל ללא גבוי נסויי, מינימלי לפחות. נושאים רבים, כגון חוזק הבטון, השפעת כמויות הזיון והפריסה שלו על הקשיחות וכן על שיפוע הסדקים ורוחבם וכו' – כל אלה מקבלים אישור באמצעות הניסויים. אולם, כאן הכוונה ללקח פשוט ובסיסי הרבה



ציור 14.5

יותר. בציור 14.5 נתונים שני חתכים. בציור 14.5a נתון חתך מלבני במידות b/h . בציור 14.5b נתון חתך בעל מידות חיצוניות זהות וכן בעל אותן כמויות זיון, בפריסה זהה. בחתך השני יש חלל פנימי במידות b_1/h_1 העושה את החתך – חתך ארגז. בציור 14.5c נתון חתך עגול בעל קוטר חיצוני d ובציור 14.5d נתון אותו החתך עם חור בקוטר d_1 . בשניהם אותה כמות זיון ובפריסה שווה.

הניסויים מצביעים על כך שכאשר כמויות הזיון ופריסתם שוות התסבולת לפיתול כמעט זהה לחלוטין בהשוואה בין חתך הטבעתי והעגול המלא וכן בהשוואה בין חתך הארגז והמלבן המלא (כל זאת כאשר עובי הדופן של הטבעת או של חתך הארגז לא דק מדי).

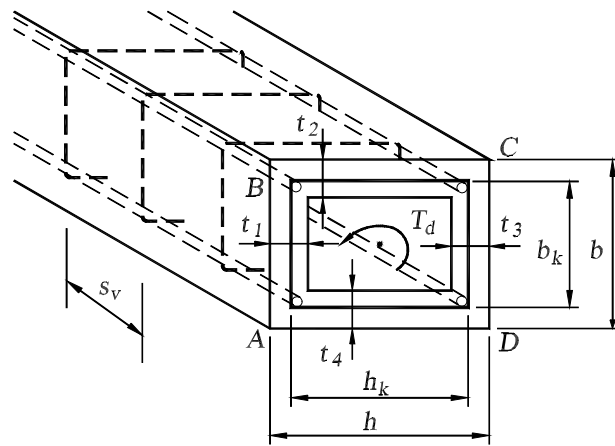
כאן הלקח העיקרי והוא שהתסבולת לפיתול בנויה על היקף פעיל כל שהוא המתרכז סביב הזיון בהיקף החתכים וכל היתר, בעיקר בסביבת מרכז החתך, אינו פעיל ואינו תורם לתסבולת האלמנט לפיתול.

הניסויים מאשרים את ההנחה הבסיסית שבהיקף האלמנט, סביב הזיון אשר ניתן שם, אורכי ורוחבי, נוצרת מערכת מסבכים, מרחבית וסגורה (בהיקף) אשר לאחר סדיקת האלמנט, היא היחידה הפועלת ומקנה את התסבולת לפיתול. הדגמת הפעולה של מסבך כזה ניתן לראות בסעיף 14.5.

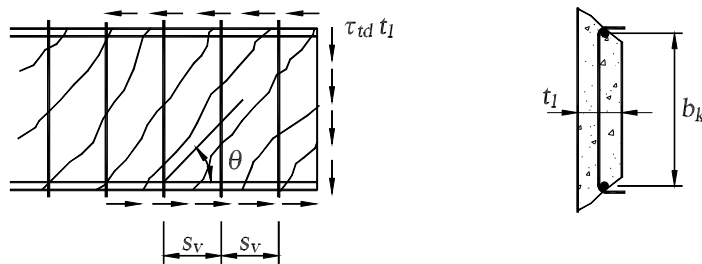
14.5 חתך ארגז מבטון מזוין

להדגמת מנגנון קבלת מומנט פיתול באלמנט מבטון מזוין באמצעות מסבך מרחבי בהיקפו, ניבחן את חתך הארגז הנתון בציור 14.6a. המידות החיצוניות של החתך הן b/h . בכל אחת מפינות החתך מוט זיון אורכי. הזיון האורכי מוקף חישוקים במרחקים s_v ביניהם. עובי הדפנות של חתך הארגז הוא כמסומן t_1 t_2 t_3 ו t_4 בהתאמה. נכנה את המרחק בין מרכזי המוטות האורכיים h_k בכיוון h ו b_k בכיוון b .

נניח כי פועל על החתך מומנט פיתול T_d ובעקבותיו, לפי תיאורית הזרימה בכל הדפנות מתפתח כוח גזירה בגודל t ליחידת אורך הדופן. לפי אותה התיאוריה יהיה המאמץ בדופן i נתון על ידי $\tau_{td} = t/t_i$ (ציור 14.6b). נפרוס את כל מעטפת חתך הארגז ונשקיף על ארבעת המיסבכים אשר נוצרים לפי ציור 14.7a. ניראה כי בכל המיסבכים מתפתחים כוחות אורכיים בזיון האורכי, כוחות בזיון ההיקפי (החישוקים) וכן מוטות לחיצה מבטון נטויים בזווית θ אל ציר האלמנט. בין המוטות הלחוצים מבטון קיימים סדקים אלכסוניים, באותה הזווית θ כמובן (14.6b). צפיפות הסדקים לא משפיעה על חוזק המוטות הלחוצים. היא תוצאה של תכנון הזיון ההיקפי.



(a)



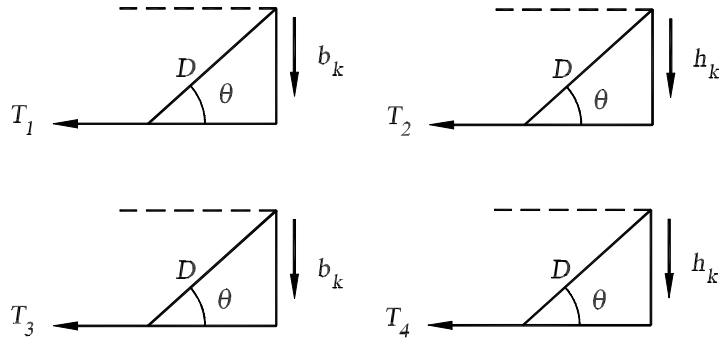
(b)

ציור 14.6

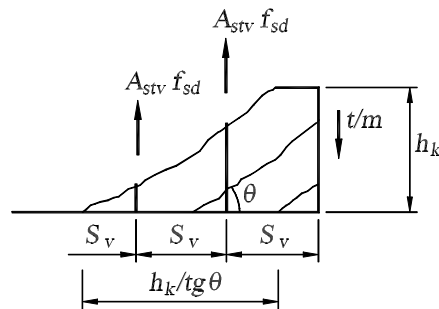
על מנת לבחון את הכוחות בזיון האורכי נעמיד משואות שווי משקל לכוחות אופקיים בכל ארבעת המיסבכים:

$$T_1 = D \cos \theta = \frac{t b_k}{\sin \theta} \cos \theta \quad (14.11a)$$

עבור המיסבך A-B



(a)



(b)

ציור 14.7

$$T_2 = D \cos \theta = \frac{t h_k}{\sin \theta} \cos \theta \quad (14.11b)$$

עבור המיסבך B-C

$$T_3 = D \cos \theta = \frac{t b_k}{\sin \theta} \cos \theta \quad (14.11c)$$

עבור המיסבך C-D

$$T_4 = D \cos \theta = \frac{t h_k}{\sin \theta} \cos \theta \quad (14.11d)$$

ואחרון עבור המיסבך D-A

כאשר נסכם את ארבעת המשואות (14.11) נקבל:

$$\sum T = \frac{t}{\sin \theta} (2b_k + 2h_k) \cos \theta \quad (14.12)$$

אולם סכום הכוח בזיון האורכי הינו סה"כ כוח התכן בזיון האורכי - $\Sigma T = A_{stl} f_{sd}$

$A_k = b_k h_k$ אינם אלא u_k אשר יכונה - היקף הגרעין ואם נסמן את $A_k = b_k h_k$

כאשר A_k יכונה שטח הגרעין בשימוש בנוסחה (14.9) נוכל לרשום:

$$A_{stl} = \frac{T_d u_k}{2 A_k f_{sd}} \cot \theta \quad (14.13)$$

הנוסחה (14.13) מבטאת את סה"כ הזיון האורכי הדרוש בחתך עליו פועל מומנט T_d .

היא מביאה בחשבון אפשרות של שנוי בזווית θ (וענין זה ילובן בהמשך).

על מנת לבחון את הכוחות בזיון ההיקפי (החישוקים) ניקח את אחד

המיסבכים ונפריד במקביל לסדקים הנטויים בזווית θ (ראה ציור 14.7b). החישוקים

חוצים את הסדק. אם ניבחן שווי משקל של כוחות בכיוון האנכי ניראה כי משתתפים

בו רק הכוחות בחישוקים והכוח האנכי t אשר הינו תולדה של תיאורית הזרימה עבור

מומנט הפיתול והוא מוכר לנו מנוסחה (14.9).

אם הסדק נטוי בזווית θ וגובה המיסבך בו דנים בציור 14.7b הינו h_k הרי

שההיטל האופקי של הסדק הינו $h_k / \tan \theta$. אם הכוח בחישוק בודד הינו $A_{stv} f_{sd}$ הרי

שהכוח בחישוקים ליחידת חישוק יהיה $A_{stv} f_{sd} / s_v$. שווי משקל של כוחות אנכיים

נתון איפוא במשוואה (14.14) להלן:

$$\frac{A_{stv} f_{sd} h_k}{s_v} \frac{1}{\tan \theta} = t h_k = \frac{T_d}{2 A_k} h_k \quad (14.14)$$

מכאן שסה"כ שטח חתך החישוקים הדרוש A_{stv} הניתן כל s_v יהיה:

$$A_{stv} = \frac{T_d s_v}{2 A_k f_{sd}} \tan \theta \quad (14.15)$$

בהנחה של $\theta = 45^\circ$ $\tan \theta = 1$ במשוואה לעיל וכן $\cot \theta$ במשוואה (14.13) מקבלים את הערך

1.0

14.6 חוזק המוטות הלחוצים במסבך לפיתול

ברוב מצבי ההטחה באלמנטים מבטון מזוין בהם התסבולת בנויה מחלקם של מוטות הפלדה בנושאים בכוחות המתיחה ומחלקו של הבטון בנושא במאמצי הלחיצה, האפשרות להוסיף כמויות פלדה ועל כן להגביר את היכולת של מרכיב המתיחה, מוגבלת כמעט באופן בלעדי רק מטעמי ביצוע. כתוצאה מכך התסבולת ללחיצה היא החוליה החלשה והמוגבלת, על כן בסופו של דבר היא תיקבע את התסבולת הסופית של האלמנט. יש אפילו תהליך "שוחק" נוסף על פיו ככל שמוסיפים יותר מוטות זיון החתך מתמלא בגופים זרים אשר מחלישים את החתכים הלחוצים. על כן – לא רק שהתסבולת של הבטון ללחיצה מוגבלת מטבעה אלא יש להבטיח גם נגד הפרעה שנגרמת לחתכים הלחוצים מבטון, אם יש כזאת.

בסעיף 14.5 ניתחנו את צרכי האלמנט מבחינת זיון, אורכי ורוחבי, על פני המעטפת שלו. נראה בסעיף זה את תסבולת המוטות הלחוצים ובאופן זה תתאפשר קביעת התסבולת הגבולית של חתך בשים לב לבטון.

נשוב לשם כך למערכת המסבכים אשר ראינו בציור מס' 14.7. לפי המודל אשר בציור 14.7a בדקנו את הכוח בזיון האורכי ולפי המודל אשר בציור 14.7b בדקנו את הכוח בזיון ההיקפי. נוכל להשתמש במודל אשר בציור 14.7a ולהעמיד שווי משקל של כוחות אנכיים.

לשם כך נניח כי הכוח החיצוני מטעם כוחות הגזירה עקב פיתול הינו $t h_k$ כאשר ידוע לנו המקור והקשר של t עם מומנט הפיתול מנוסחה (14.9). לעומתו יפעל מוט לחוץ אשר שטחו $t_e (h_k \cos \theta)$ והמאמץ בו σ_c . הינו חלק העובי בכיוון ניצב למעטפת אשר מותר לנו להניח כעובי הפעיל של המיסבך המרחבי. על כך יפורט להלן.

$$D \sin \theta = t h_k = \sigma_c t_e (h_k \cos \theta) \sin \theta = \frac{T_d}{2 A_k} h_k \quad (14.16)$$

מכאן נובע מומנט הפיתול מבוטא באמצעות המאמץ במוטות הלחוצים במסבך:

$$T_d = \sigma_c t_e A_k \sin 2\theta \quad (14.17)$$

EN2 [45] קובע בתור גבול עליון עבור σ_c את אותו הערך המשמש גם עבור כוח הגזירה המירבי $V_{Rd,max}$ אשר הינו כזכור הקריטריון להגדרת כוח הגזירה המקסימלי בחתך (ראה סעיף 11.4). הפירוט יינתן בסעיף 14.7 להלן. גם לגבי t_e יש הוראות אשר יפורטו בסעיף הבא.

14.7 הנחיות התקן הישראלי לפיתול לפי ת"י 466 [1] גליון תיקון 3

14.7.1 כללי

הערכים הסטטיים לחישוב מומנטי הפיתול יתקבלו מתוך חישוב סטטי אלסטי לינארי בלבד.

חתכי האלמנטים בהם ניתן לטפל הם: מלבן או צירופי מלבנים (קמץ או ריש בלבד), ארגז, עגול או טבעת עגולה, חתך מלא או חלול פוליגוני כגון משושה, וכו'.
 אין אלמנטים ללא זיון לפיתול. הזיון אשר יחושב בכל מקרה יהיה לא פחות מהזיון המינימלי לפיתול, כפי שמפורט להלן.
 התנהגות האלמנטים בהטרחת פיתול ניתן לראות לפי מודל של מסבך מרחבי כמתואר בסעיפים 14.5 ו 14.6. מותר להניח כי θ - זווית הנטייה של המוטות הלחוצים מוגדרת לפי $0.5 \leq \cot \theta \leq 2.5$ (או $0.5 \leq \cot \theta \leq 2.0$ בהנחה שמרנית). בכל מקרה בתכן של גזירה משולבת בפיתול יש לבחור באותה הזווית לאומדן התסבולת.

14.7.2 תכן חתך לפיתול

כאשר מתכננים חתך יש לחשב את כמויות הזיון הדרושות ויש לוודא כי מומנט התכן לא עולה על התסבולת (של המוטות הלחוצים). כל הזיון יהיה מסוג Φ .
 לצורך חישוב הזיון יוגדרו A_k שטח הגרעין ו u_k היקף הגרעין. u_k הינו היקף העובר דרך אמצע העובי הפעיל השקיל של החתך (או דרך מרכזי מוטות הזיון האורכי A_{stl} - ראה בהמשך). A_k הוא כל השטח החסום ב u_k .
 הזיון לפיתול יכול זיון אורכי אשר שטחו הכולל יהיה A_{stl} וחוזק התכן שלו f_{sdl} (ניתנת האפשרות לסוג זיון אורכי שונה מהרוחבי ולכן האבחנה בין חוזקי התכן).
 הזיון האורכי יפוזר לאורך מעטפת האלמנט החיצונית במרחקים שלא עולים על 300 מ"מ ואולם יהיה מוט אורכי בכל פינה או בכל מקום בו יש שנוי כיוון במעטפת.
 הזיון האורכי יחושב לפי (14.18) המתאימה בכל ופותחה לפי (14.13):

$$A_{stl} = \frac{T_d u_k}{2 A_k f_{sdl}} \cot \theta \geq A_{stl, min} \quad (14.18)$$

הזיון הרוחבי יכול חישובים בלבד, ניצבים לציר האלמנט בלבד, בעלי שטח חתך של A_{stv} וחוזק תכן f_{sdv} אשר ינתנו במרחקים s_v . s_v לא יעלה על הקטן מבין $u_k / 8$ או 300 מ"מ. (רצוי שכאשר $T_d \geq \frac{2}{3} T_{Rd, max}$ לא יעלה גם על 200 מ"מ).
 הזיון הרוחבי יחושב לפי (14.19) המתאימה בכל ל (14.15) ופותחה לפיה:

$$A_{stv} = \frac{T_d s_v}{2 A_k f_{sdv}} \tan \theta \geq A_{stv, min} \quad (14.19)$$

A_{stv} כאן הינו שטח החיפוק (שטח ענף בודד).

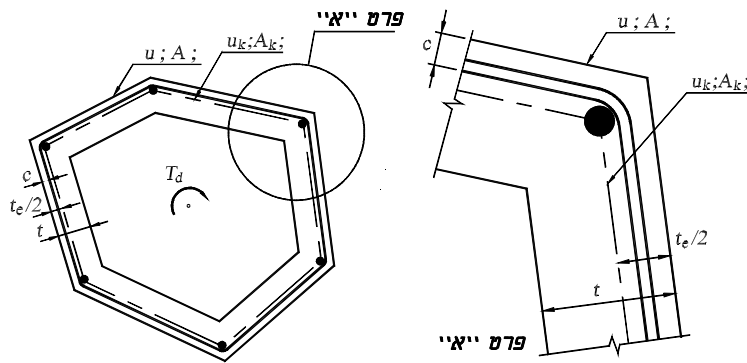
כל הזיון לפיתול יהיה מסוג מצולע Φ (לפי ת"י 4466 חלק 3).

מומנט התכן T_d לא יעלה על $T_{Rd, max}$, התסבולת המירבית של החתך לפיתול (תסבולת המוטות הלחוצים) המחושבת ופותחה לפי (14.17):

$$T_d \leq T_{Rd, max} = 0.64 \left[1 - \frac{0.7 f_{ck}}{250} \right] \alpha_{cw} f_{cd} A_k t_e \sin 2\theta \quad (14.20)$$

בבטוי זה: $\alpha_{cw} = 1$ עבור בטון מזוין.

t_e – העובי הפעיל השקיל נקבע, כמתואר בציורים 14.8a ו 14.8b: בתור אומדן הוא נקבע כ A / u – שטח החתך ברוטו מחולק בהיקף החתך ברוטו, ויהיה בדרך כלל מחצית העובי השקיל t_r ; אך בנוסף: $t_e \geq 2c$ כאשר c הינו המרחק מההיקף החיצוני u ועד מרכז מוט הזיון האורכי, ואחרון: $t_e \leq t$ כאשר t הינו עובי הדופן. בדרך כלל נכון יהיה להניח כי במעטפת החיצונית של החתך נוצר מסבך סביב הזיון העוטף – האורכי והרוחבי ולכן $t_e \geq 2c$ הוא אומדן טוב ובו בדרך כלל תהיה האיטראקציה עם הגזירה עקב כפיפה.



ציור 14.8

14.7.3 בדיקת חתך נתון

כאשר בודקים חתך נתון יש לוודא מה מומנט התסבולת (של המוטות הלחוצים) ומה התסבולת כפונקציה של כמויות הזיון שניתנו. יש להביא בחשבון כי לא תמיד יש איזון בין הזיון האורכי לרוחבי (כפי שניתן לצפות לו תוכנן על ידנו). מאחר והזווית θ משפיעה גם על $T_{Rd,max}$ יש קודם לבדוק אותה. כזכור היא מושפעת משתי כמויות הזיון – A_{stl} (כל הזיון האורכי לפיתול) ו A_{stv} (שטח ענף בודד של החישוק לפיתול). אם נחלץ את הזווית θ מתוך הנוסחאות (14.18) ו (14.19) נקבל:

$$tg \theta = \sqrt{\frac{A_{stv} f_{sdv} u_k}{A_{stl} f_{sdl} s_v}} \quad (14.21)$$

עם θ כמחושב מתוך (14.21) נוכל לחשב את תסבולת החתך הנתון בשים לב לכמויות הזיון בו לפי הנוסחה (14.22) להלן (וזה כמובן בתנאי שרצינו לנצל נצול מלא את שתי כמויות הזיון ולכן מצאנו את ה θ המתאימה):

$$T_d = 2 A_k \sqrt{\frac{A_{stv}}{s_v} f_{sdv} \frac{A_{stl}}{u_k} f_{sdl}} \quad (14.22)$$

יש ב (14.22) התחשבות בשתי כמויות הזיון והן מבטאות גם את θ . $T_{Rd,max}$ ייבדק לפי נוסחה (14.20) תוך שימוש ב θ כפי שניתקבלה ב (14.21). כמובן שכל הנ"ל אינו אלא בדיקת חוזק החתכים לפי הזיון ולפי סוג הבטון ובעקבות זאת יש לשים לב לפרטי הזיון, למשל – אם יש עיגון מתאים, וכו'. כל המתואר בסעיף זה נכון לבדיקה תחת הטרחה של פיתול טהור בלבד.

14.7.4 זיון מינימלי לפיתול

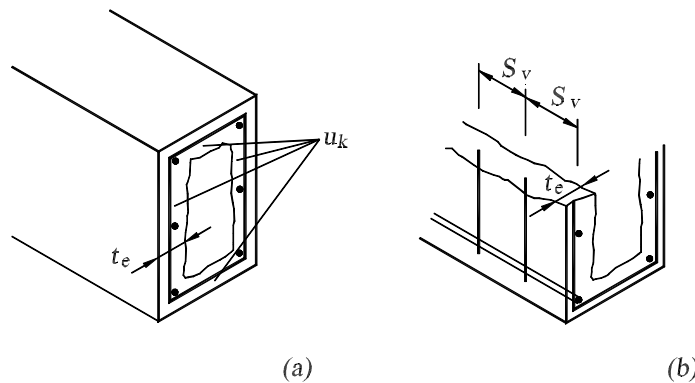
זיון מינימלי לפיתול יש לתת כאשר מומנט הפיתול קטן עד כדי שהחתך לא סדוק. הקריטריון לחתך לא בדוק יהיה כאשר מציבים במקום מאמץ הגזירה את המאמץ הראשי במתיחה ($f_{ctd} = f_{ctk}/1.5$) כך ש:

$$T_d \leq T_{Rd,c} = t_e f_{ctd} 2 A_k \quad (14.23)$$

אולם במקרה של הטרחה משולבת של פיתול וגזירה עקב כפיפה, יש לעמוד גם בתנאי:

$$\left(\frac{V_d}{V_{Rd,c}} \right) + \left(\frac{T_d}{T_{Rd,c}} \right) \leq 1 \quad (14.24)$$

בו: עבור $V_{Rd,c}$ ראה פרק 11 ו $T_{Rd,c}$ לפי (14.23).



ציור 14.9

דרישת המינימום בתקן הישראלי בנויה לפי מודל המפורט בציור 14.9. בציור 14.9a נתון חתך אנכי ובו רואים את השטח הפעיל המהווה את המסבך האורכי והוא

בעל היקף u_k ובעובי t_e . זהו למעשה שטח ההשפעה עבור הזיון האורכי A_{stl} אי לכך זיון זה צריך להיקבע כאחוזים משטח זה.

$$\rho_l = \frac{A_{stl}}{t_e u_k} \geq \rho_{l,min} = \eta \quad (11.25)$$

בציור 14.9b נתון חתך אורכי באלמנט, ניצב לחתך אשר בציור 14.9a, ובו רואים את סדרת החישוקים המקיפה את אלמנט הנתון לפיתול. שטח ההשפעה של ענף חישוק בידד A_{stv} הינו במידות s_v בכיוון אורך האלמנט ו t_e בכיוון עובי המסבך הפנימי, אי לכך מנת זיון החישוקים תהיה:

$$\rho_v = \frac{A_{stv}}{t_e s_v} \geq \rho_{v,min} = \eta \quad (14.26)$$

בשתי הנוסחאות – (14.25) ו (14.24) f_{sd} נתון ב MPa וערכו של η נתון על ידי:

$$\eta = 0.25\% \text{ עבור בטונים ב20 ו ב25}$$

$$\eta = 0.35\% \text{ עבור בטונים ב30 ו ב40}$$

$$\eta = 0.45\% \text{ עבור בטונים ב50 ו ב60}$$

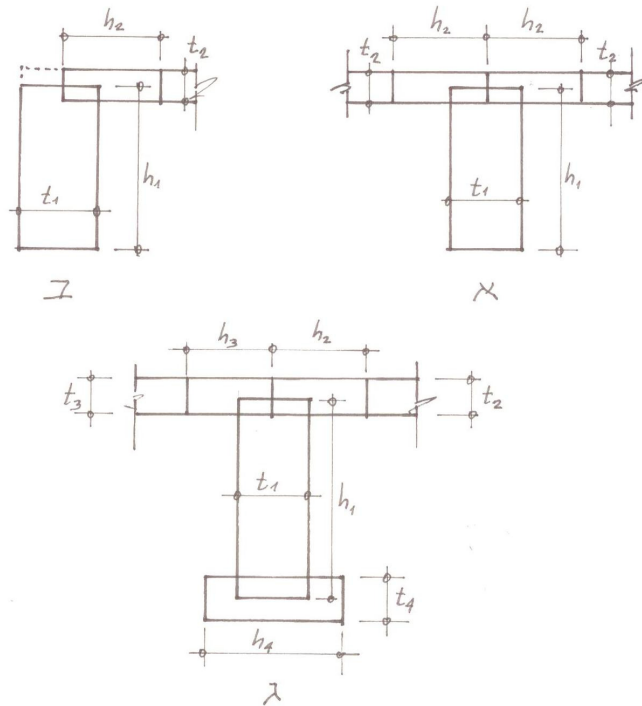
חשוב לציין כי זיון מינימלי זה מתייחס להטרחת פיתול בלבד ואינו מכסה בעיה של הטרחות משולבות.

14.7.5 חתך קמץ או ריש או קמץ כפול

חתך קמץ או קמץ כפול או ריש נחשב לחתך המורכב ממלבנים צמודים. יש לחלק את המומנטים בין חלקי חתך המרכיבים אותו לפי יחסי הקשיחויות שלהם לפיתול, לפי הנוסחה:

$$T_{di} = T_d \frac{\frac{1}{3} h_i t_i^3}{\sum_j \frac{1}{3} h_j t_j^3} \quad (11.27)$$

הנוסחה מקצה את חלקו של מלבן i במומנט הפיתול בין j מלבנים משתתפים. הכלל לגבי המלבנים המשתתפים הוא שיש לקחת בתור מלבן ראשי את הגדול ביותר ולצרף אליו מלבנים צמודים לו וחופפים לו. כאשר הקשיחות של המלבנים הקטנים קטנה עד זניחה ביחס למלבן הגדול יש להזניח אותם ולהתחשב אך ורק במלבן הגדול. בגליון תיקון 3 [45] נקבע כי כאשר קשיחות המלבן הגדול היא 92% ויותר מכלל הקשיחות לפי (11.27) – יש להזניח את קשיחותם. משתפים את המלבנים הקטנים החלוקה ביניהם תיעשה לפי הדוגמאות בציור 14.10, לפיהן במלבנים הצמודים למלבן הגדול, צלעם הארוכה לא תעלה על 3 פעמים רוחב צלעם הקטנה ($3t_i$).



ציור 14.10

בכל חלק במלבן המשני הנוגע בראשי וצלעו הגדולה גדולה מ- $3t_i$ יש להזניח בחישוב לפיתול את חלק הצלע העולה על $3t_i$. הדבר אופייני בתקררות מקשיות בהן יוצקים את התקרה יחד עם הקורות ובחתיכי קמץ כפול בעלי אגפים גדולים.

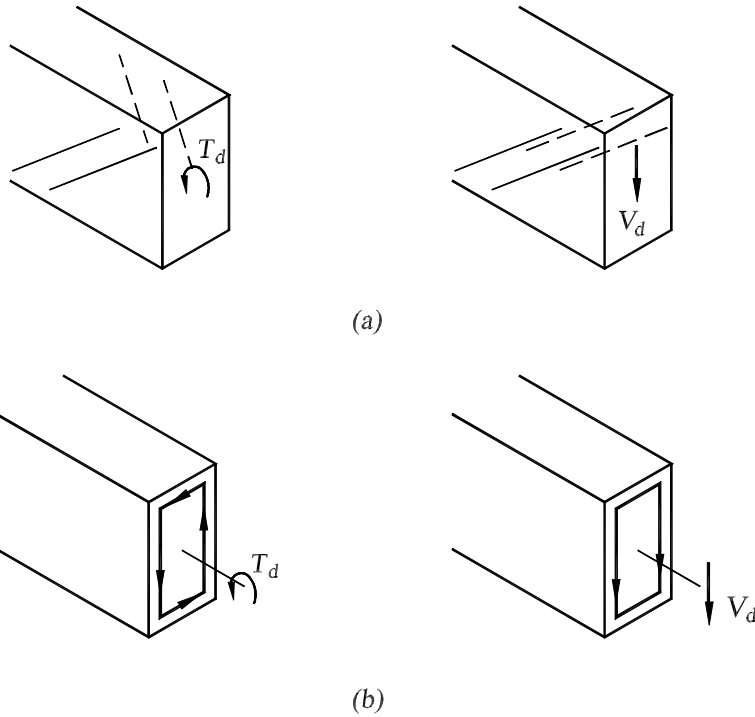
14.7.6 פעולה משולבת של פיתול עם כפיפה וגזירה עקב כפיפה

בפעולה משולבת של גזירה עקב כפיפה ופיתול, בשל היות החתכים סדוקים במלוא היקפם אין להביא בחשבון את תרומת הבטון לקבלת גזירה. מאחר והחישוקים יהיו ניצבים (ראה סעיף 14.7) מותר לשנות את זווית השיפוע θ של המוטות הלחוצים מבטון במסבך המקיף את החתך. התנאי החשוב הוא כי הזווית θ תהיה אותה הזווית בחישוב לגזירה עקב כפיפה ובחישוב לפיתול. מקרה פרטי הוא בחירת $\theta = 45^\circ$ אולם הקביעה הזאת אינה כלכלית (ראה פרק 11 – גזירה).

בגלל הצורה הסיבובית (סביב ציר האלמנט) של המסבך המרחבי בפיתול, לעומת המסבך האחיד לקבלת כוחות גזירה עקב כפיפה, מתקבל מצב בו על פן אחד, בלבד, של האלמנט יש הצטברות כוחות לחיצה במוטות הלחיצה הנטויים בזווית θ ועל כן יש לצרף את הכוחות אחד אל השני (ציור 14.11a) אבל התסבולת של מוטות אלה

לא עולה כתוצאה מעליית ההטרחה עליהם ולכן יש גבול לתסבולתם המשותפת, מבוסס על ידי הביטוי (14.28):

$$\left(\frac{V_d}{V_{Rd,max}} \right) + \left(\frac{T_d}{T_{Rd,max}} \right) \leq 1 \quad (11.28)$$



ציור 14.11

בשל אותה סיבה בדיוק, הכוח בזיון החישוקים מטעם הפיתול זורם סביב החתך אולם בגזירה עקב כפיפה הכוח זורם בשני ענפי החישוקים באותו הכיוון (ראה ציור 14.11b). מאחר והחישוק הוא אחד אין ברירה אלא לתכנן אותו לפי הכוח המצטבר בו, דבר הקורה רק על פני אחת מדפנות החתך. החישוקים ישאו בכל כוחות המתיחה עקב פיתול וגזירה בסופרפוזיציה ליניארית. כוחות המתיחה עקב כפיפה נוספים אל כוחות המתיחה בזיון האורכי לפיתול. כמות הזיון המחושבת לכפיפה מצורפת לחלק כמות הזיון המחושבת לפיתול בפניות החתך בפן העליון או התחתון שלו (ראה דוגמת חישוב).

14.7.7 בדיקת חתך תחת הטרחה משולבת

בדיקת חתך של אלמנט (בדרך כלל קורה) הנתון להטרחה משולבת של כפיפה, גזירה עקב כפיפה עם פיתול, הינה בדיקה הכוללת מספר שלבים. יש להבחין בין בדיקת תסבולת הבטון לבין התסבולת לפי הזיון. תסבולת המוטות הלחוצים בבטון תיעשה לפי נוסחה (14.28), אולם בדרך כלל בסוף התהליך בלבד.

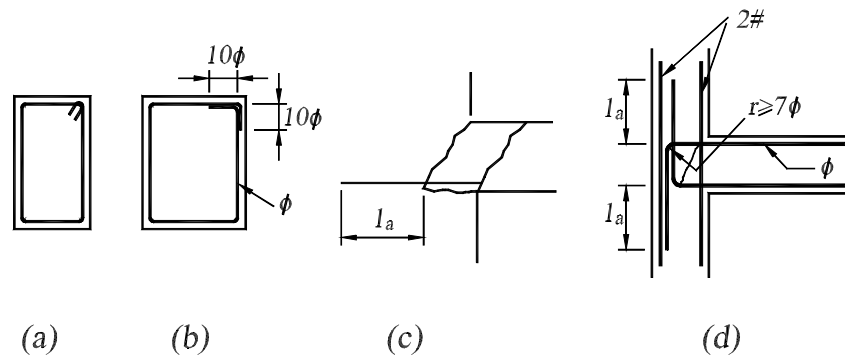
בדיקת התסבולת של הזיון כוללת אף היא שני מרכיבים: הזיון האורכי והזיון הרוחבי. בזיון האורכי יש לבדוק את הזיון לפעולה המשולבת של פיתול וכפיפה. בחלק מהיקף החתך הזיון יהיה פונקציה של הטרחת הפיתול בלבד ובחלק אחר הזיון יהיה תוצאה של שילוב ההטרחה - כפיפה ופיתול (למשל בפן העליון של הקורה באיזור המומנט השלילי או בפן התחתון של הקורה באיזור המומנט החיובי בשדה). זיון החישוקים אף הוא הינו נושא להטרחה משולבת - פיתול וגזירה. יש לבדוק להטרחה המשולבת ויש לזכור כי הטרחה משולבת זו מסתכמת על ענף אחד של החישוק לגזירה (מתוך שניים) וכמובן לענף אחד בפיתול (פעולתו הרי סיבובית).

14.8 עיגון הזיון

עיגון זיון הפיתול מהווה משימה מיוחדת במינה אשר קשה לתת לה כסוי בתקן ולכן ברוב התקנים אינה זוכה לתשומת לב מספקת. יחד עם זאת – הבעיה כה קריטית עד שניתן בוודאות לומר כי באין עיגון מספיק – אין חוזק לפיתול, מאחר וכל מנגנון קבלת מומנט הפיתול תלוי באותה מערכת מסבכים מרחבית הנוצרת בהיקף האלמנט וכוחות המתיחה בזיון זה צריכים להיות מובטחים.

מאחר ודובר על שני סוגי זיון – אורכי ורוחבי, גם הבעיה תידון בנפרד עבור כל אחד מהם.

הזיון הרוחבי, הוא זיון החישוקים, מעביר כוחות רצופים בהיקפו, אי לכך האפשרות של העברת כוח לכל אורכו צריכה להישמר. הסיום הרגיל של חישוק על ידי וו או אוזן רגילים אשר מספיק לגזירה (ראה ציור 14.12a) אינו מתאים לפיתול. יש לתת וו אשר ממשיך בעוד 10 קטרים לכל כיוון מעבר לקשת הכיפוף על מנת להבטיח את עיגונו בכל הנסיבות בהן הוא עשוי להימצא (איזור לחוץ, מתוח וכו') – ציור 14.12b. בנוסף – רצוי מאד לא לעלות בקוטר זיון החישוקים מעל 12 מ"מ (במקורות אחדים מומלץ לא לעלות על 14 מ"מ) מאחר וקוטר הכיפוף הלא גדול של החישוק מביא להפרעה בהעברת הכוח לאורכו ומקרב את הכיפוף למצב של עיגון וו או אוזן תיקנית.



ציור 14.12

בעיה קריטית יותר היא הזיון האורכי. צריך להביא בחשבון כי הכשל בפיתול עשוי להתרחש כאשר נעקר חלק מן הקורה בכיוון משוער של הסדקים, כלומר בזווית θ , ובהתאם לכך צריך לראות את צרכי העיגון. נראה את שני המקרים הקיצוניים:

בציור 14.12c ניתן לראות את השבר הפוטנציאלי של אלמנט בפיתול הנסמך בגוש בטון גדול. יש אפשרות שהשבר יהיה לפי מישור שאינו ניכנס לעומק הסמך והאפשרות השניה היא כי השבר יהיה עמוק בתוך הסמך. אין אפשרות להעריך בוודאות היכן יהיה השבר ולכן כדאי להיערך למקרה הקיצוני שמביא בחשבון את האפשרות מרחיקת הלכת יותר – עיגון אל מעבר למישור השבר הפנימי.

בציור 14.12d רואים אלמנט הפועל לפיתול אשר חייב להישען על סמך צר, למשל קיר. כאן ברור כי האפשרות של החתך הנעקר ניכנס לתוך הסמך היא המעשית בכל מקרה, אולם אין לזיון עומק כניסה מספיק, לכן יש להביא אותו אל קצה הקיר הרחוק ולכופף אותו שם. הכיפוף של המוט בתוך הקיר אל הדופן החיצונית שלו צריך להיות בקוטר כיפוף המאפשר את זרימת הכוח במוט אל החלק המכופף, אם העיגון בוו רגיל לא מספיק. בנוסף חייבים לתת שתי רשתות זיון, בפן החיצוני והפנימי של הקיר, אשר יקבלו את ריכוזי מאמצי המתיחה הגדולים הנוצרים במקומות עיגון הזיון האורכי.

14.9 דוגמת חישוב

נתונה הקורה אשר בציור 14.13a, נשענת על שלושה קירות קשיחים, בת שני מיפתחים. עובי הקירות 300 מ"מ והמיפתחים נטו 6.0 מ' כ"א. הקורה עשויה מבטון ב-30 ומוטות זיון מצולעים Φ . החתך העיקרי של הקורה הינו מלבן 300/700 מ"מ, אולם ממלבן זה יוצאים שני זיזים – קצר וארוך יותר: בשדה AB לפי חתך א-א הנתון

בציור 14.13b ובשדה BC לפי חתך ב-ב הנתון בציור 14.13c . בשדה BC שני הזיזים מגיעים עד הקירות ואילו בשדה AB הם לא מגיעים עד הקירות אלא קיימת הפרדה ביניהם ובין הקירות ברוחב 200 מ"מ .
פרט למשקל העצמי של המבנה פועל עליו עומס שימושי על כל ההיטל האופקי בשיעור $q_k = 4 \text{ kN/m}^2$. יש לתכנן את המבנה .

פתרון :

1. העומסים : - נחלק את המשקל העצמי לשלושה חלקים לפי ציור 14.14 :

$$g_{k1} = 0.12 \cdot 1.5 \cdot 24 = 4.32 \text{ kN/m}$$

$$g_{k2} = 0.3 \cdot 0.7 \cdot 24 = 5.04 \text{ kN/m}$$

$$g_{k3} = 0.12 \cdot 0.6 \cdot 24 = 1.73 \text{ kN/m} \quad \Sigma g_k = 11.09 \text{ kN/m}$$

$$q_k = (1.5 + 0.3 + 0.6) \cdot 4.0 = 9.6 \text{ kN/m}$$

$$F_{dmax} = 11.09 \cdot 1.4 + 9.60 \cdot 1.6 = 30.90 \text{ kN/m} \quad \text{- לכפיפה}$$

לפיתול - הנחה כי הכל עמוס וכי כל המערכת תיבדק למצב עמיסה אחד – הכל עמוס ב F_{dmax} לכל האורך. העומס הגורם לפיתול הינו יתרת ה 0.9 מ' (על העומס העצמי שלה ועם העומס השימושי עליה) מתוך הזיז הארוך יותר - 1.5 מ' לעומת 0.6 מ' בצד השני. חלק עומס זה לבדו, הגורם לפיתול בהנחה שלעיל הינו :

$$g_k = 0.12 \cdot 0.9 \cdot 24 = 2.59 \text{ kN/m}$$

$$q_k = 0.9 \cdot 4.0 = 3.6 \text{ kN/m}$$

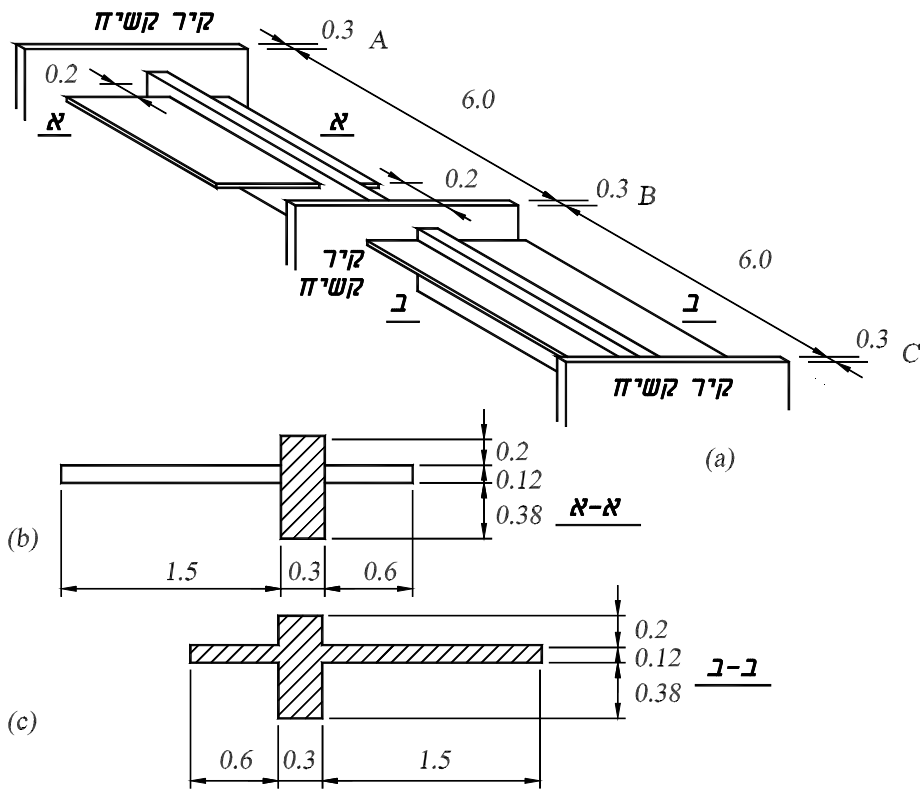
מומנט הפיתול ליחידת אורך כל אחד משני השדות יהיה :

$$m_{td} = (2.59 \cdot 1.4 + 3.6 \cdot 1.6) \cdot (0.15+0.60+0.45) = 11.27 \text{ kNm/m}$$

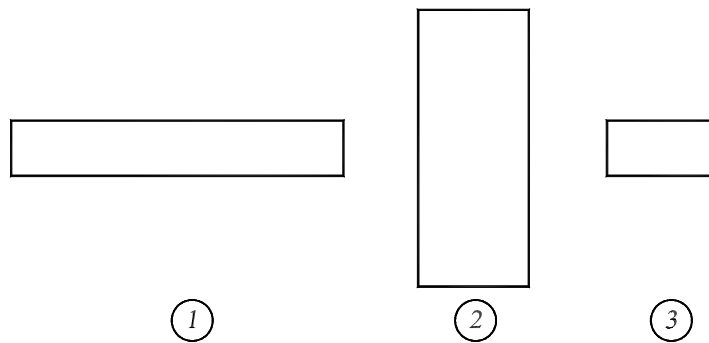
2. החישוב הסטטי : -

החישוב הסטטי כולל את המרכיבים לכפיפה, גזירה עקב כפיפה ופיתול. בציור 11.15 מרוכזות כל התוצאות :

לכפיפה וגזירה : הסכימה הסטטית הינה 2 שדות כאשר בין מרכזי הסמכים 6.3 מ' . מומנטי הכפיפה לפני רדיסטריבוציה נתונים בציור 14.15a . ניתן להפחית את המומנט בסמך המרכזי B . לאחר הפחתה של 20% מהלך המומנטים לתכן נתון בציור 14.15b . מהלך כוחות הגזירה על סמך מהלך המומנטים לאחר רדיסטריבוציה הינו כנתון לפי ציור 14.15c . הכוח הקובע לצרכי תכנון הגזירה הינו במרחק $(0.5b+d)$ מציר הסמכים וכוח זה נתון גם כן בציור 14.15c .



ציור 14.13



ציור 14.14

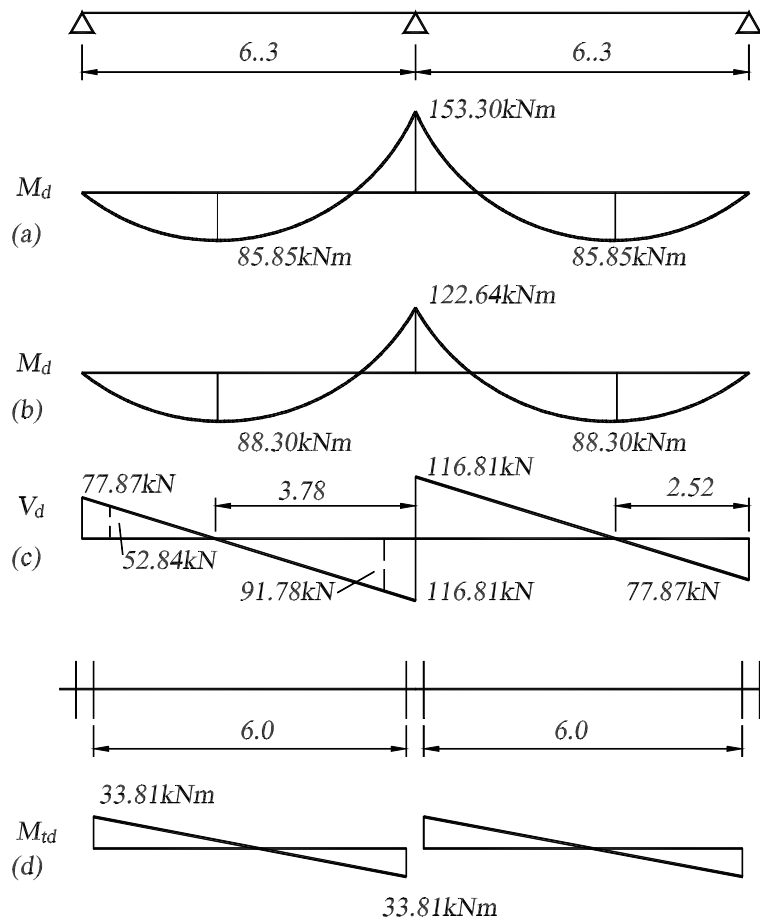
לפיתול: הסכימה הסטטית הינה שני שדות בני 6.0 מ' מיפתח נקי כל אחד. הקירות הקשיחים משמשים סמך נגד סיבוב ולכן הם מהווים סמך לפיתול. אין המשכיות ליפול

ואין איזון (הסמך המרכזי לא מסתובב!) ולכן מהלך מומנטי הפיתול M_{td} פשוט ונתון עבור כל אחד משני השדות בציור 14.15d .

3. הזיון לכפיפה: $d = 0.66 \text{ m}$ $h = 0.7 \text{ m}$. בדיקה תוכיח כי $\omega_{\max} < 0.10$ ולכן מתוך $z_{\max} = 0.95d = 0.627 \text{ m}$ ו $z_{\max} = d - d_s' = 0.62 \text{ m}$ ניבחר באחרון. לפיכך הזיון המחושב בשלושת המקומות הקובעים יהיה:

$$565 \text{ mm}^2$$

$$\begin{array}{c} \Delta \text{-----} \Delta \\ \text{A} \qquad \qquad \qquad \text{B} \\ 407 \text{ mm}^2 \\ Z_A = R_A v/d = 0.5 R_A = 38.9 \text{ kN} \quad A_{sA} = 111 \text{ mm}^2 \end{array}$$



ציור 14.15

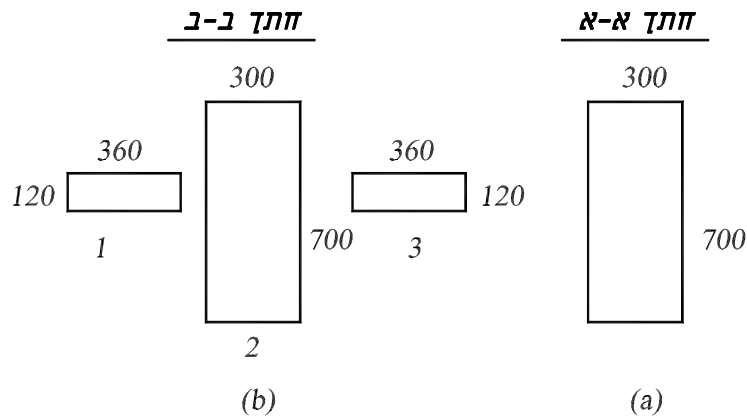
4. החישוב לפיתול: - שני הזיזים בחתך א-א אינם מגיעים עד הקירות הקשיחים ולכן אינם יכולים להוות חלק מהחתך התורם לפיתול. אי לכך – החתך הפעיל לפיתול, הינו לפי חתך א-א (ציור 14.16a) מלבן אחד. לעומת זאת – בחתך ב-ב ניתן לבדוד עוד שני מלבנים צרים בעלי צלע ארוכה של 360 ממי מתוך כלל הזיז (צלע ארוכה של המלבן לא עולה על 3 פעמים העובי) ולכן יש שם שלושה מלבנים, לפי ציור 14.16b.

בחתך א-א המלבן היחידי מקבל את כל המומנט ואילו בחתך ב-ב המומנט מתחלק בין שלושת המלבנים לפי היחסים בין מומנטי האינרציה לפיתול:

$$M_{id2} = 33.81 \frac{1/3 300^3 700}{1/3 300^3 700 + 2 \cdot 1/3 120^3 360} = 31.72 \text{ kNm}$$

$$M_{id1} = M_{id3} = 1.045 \text{ kNm}$$

נביא בחשבון את חלקם של המלבנים הקטנים אף כי התקן ממליץ להטיל את הכול על המלבן הגדול.



ציור 14.16

שטחי הגרעין והיקפי הגרעין עבור המלבן בגדול והמלבנים הקטנים הם כדלקמן:

$$t_e = 40 \text{ mm} \text{ מלבן הקטן } t_e = 30 \text{ mm} \text{ במלבנים הקטנים}$$

$$A_k = 220 \cdot 620 = 136400 \text{ mm}^2 \text{ במלבן הגדול}$$

$$u_k = 2 (220 + 620) = 1680 \text{ mm}^2$$

$$A_k = 60 \cdot 300 = 18000 \text{ mm}^2 \text{ - במלבן הקטן -}$$

$$u_k = 2 (60 + 300) = 720 \text{ mm}^2$$

חישוב הזיון לפיתול:

בחתך א-א :

$$A_{stl} = \frac{33.81 \cdot 10^6 \cdot 1680}{2 \cdot 136400 \cdot 350} = 595 \text{ mm}^2 \text{ - הזיון האורכי -}$$

$$A_{stv} = \frac{33.81 \cdot 10^6 \cdot s_v}{2 \cdot 136400 \cdot 350} = 0.354 s_v \text{ - זיון החישוקים -}$$

בחתך ב-ב :

במלבן הגדול :

$$A_{stl2} = \frac{31.72 \cdot 10^6 \cdot 1680}{2 \cdot 136400 \cdot 350} = 558 \text{ mm}^2 \text{ - הזיון האורכי -}$$

$$A_{stv2} = \frac{31.72 \cdot 10^6 \cdot s_v}{2 \cdot 136400 \cdot 350} = 0.332 s_v \text{ - זיון החישוקים -}$$

במלבנים הקטנים :

$$A_{stl1} = \frac{1.045 \cdot 10^6 \cdot 720}{2 \cdot 18000 \cdot 350} = 60 \text{ mm}^2 \text{ - הזיון האורכי -}$$

$$A_{stv1} = \frac{1.045 \cdot 10^6 \cdot s_v}{2 \cdot 18000 \cdot 350} = 0.083 s_v \text{ - זיון החישוקים -}$$

זיון החישוקים עקב פיתול יצורף לזיון החישוקים עבור גזירה עקב כפיפה ורק אז תיקבע הכמות הסופית.

5. הזיון הדרוש לגזירה עקב כפיפה :

כל כוח הגזירה מתקבל באמצעות זיון לגזירה. כוח הגזירה מחושב לפי השיטה הסטנדרטית, בהנחת $\theta = 45^\circ$ ולכן גם $\cot\theta = 1$.

$$V_d = V_{sdv} = 2a_s/s_v \cdot 350 \cdot 0.9 \cdot 660$$

$$a_s/s_v = 0.127 \quad 2a_s/s_v \cdot 350 \cdot 0.9 \cdot 660 \quad V_d = 52.84 \text{ kN} \text{ עבור}$$

$$a_s/s_v = 0.221 \quad 2a_s/s_v \cdot 350 \cdot 0.9 \cdot 660 \quad V_d = 91.78 \text{ kN} \text{ עבור}$$

6. סיכום זיון החישוקים הינו :

| Δ | Δ | Δ | Δ |
|-----------------|-----------------|----------|-----------------|
| A | B | | C |
| 0.127 | 0.221 | 0.221 | 0.127 |
| 0.354 | 0.354 | 0.332 | 0.332 |
| $a_s/s_v=0.481$ | $a_s/s_v=0.575$ | 0.553 | $a_s/s_v=0.459$ |

לפי החשבון הנ"ל החישוקים הדרושים הם (במעוגל):

$\Phi 8@100$ $\Phi 8@90$ $\Phi 8@90$ $\Phi 8@110$
 $\Phi 8@200$ באמצע בתור מינימום $\Phi 8@200$

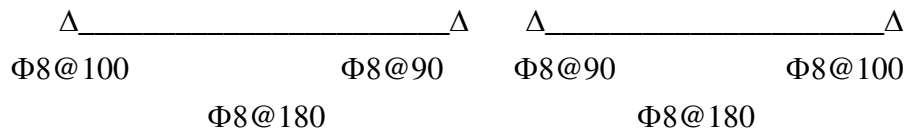
מנת הזיון המינימלית עבור זיון החישוקים מטעמי פיתול תהיה:

$$A_{stv,min} / s_v = 0.0035 \cdot 40 = 0.140 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

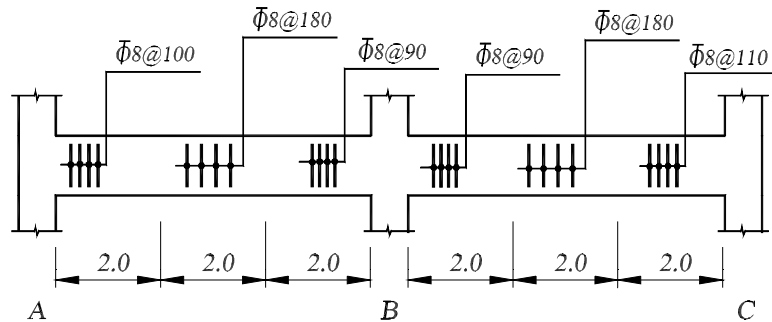
מנת הזיון המינימלית עבור זיון החישוקים מטעמי גזירה תהיה:

$$2a_{stv,min} / s_v = 0.001 \cdot 300 = 0.150 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

ברור כי בכל מקום מנת הזיון הכוללת המחושבת גדולה מהמינימלית ולכן גם למען הפשטות הזיון בשני השדות יסודר כדלקמן:



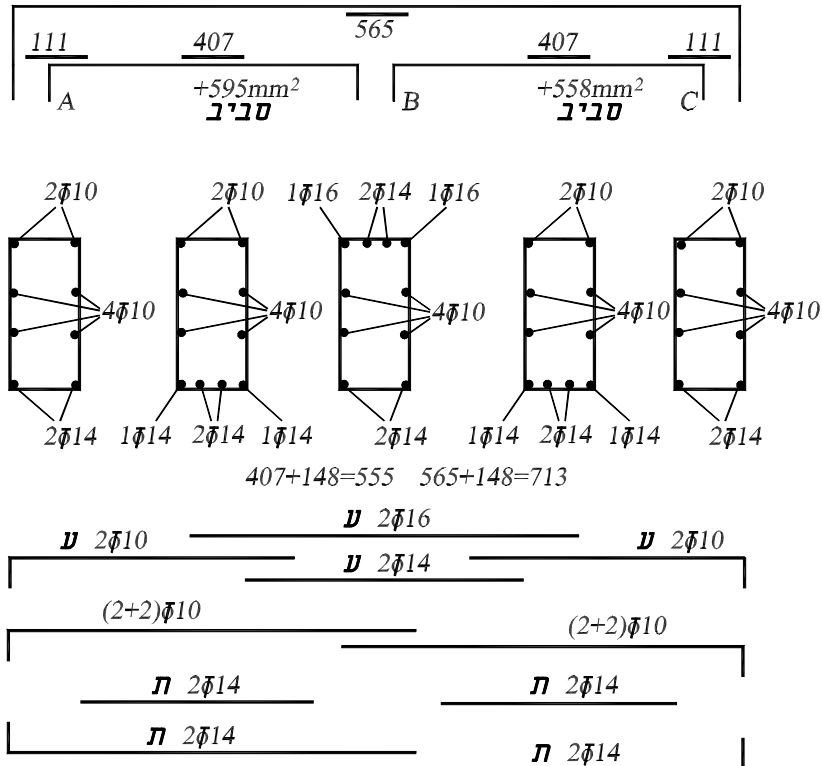
תכנית החישוקים במלבן העיקרי נתונה בציור 14.17:



ציור 14.17

7. הזיון הראשי לכפיפה ולפיתול נתון בציור מס' 14.18:

הזיון לכפיפה מסומן במסגרת הקורה ומתחתיו בכל שדה נתון הזיון האורכי הדרוש לפיתול בכל אחד משני השדות. לפיתול דרושים 595 mm^2 בשדה AB ו 558 mm^2 בשדה BC. זיון זה מחולק ל 8 מוטות: $4 \Phi 10$ עוברים לכל אורך הקורה באמצע אך הכמויות העליונות והתחתונות מצטרפות לזיון לכפיפה. התוצאה נתונה ב 5 החתכים ובפריסת מוטות הזיון מתחתיהם.



ציור 14.18

8. בדיקת הפעולה המשותפת לגזירה ופיתול (מוטות לחוצים):

$$V_{d,max} = 91.78 \text{ kN} \quad T_{d,max} = 33.81 \text{ kNm}$$

$$T_{Rd,max} = 0.64[1-(0.7 \cdot 30)/250]13 \cdot 40 \cdot 136400 \cdot 10^{-6} = 41.58 \text{ kNm}$$

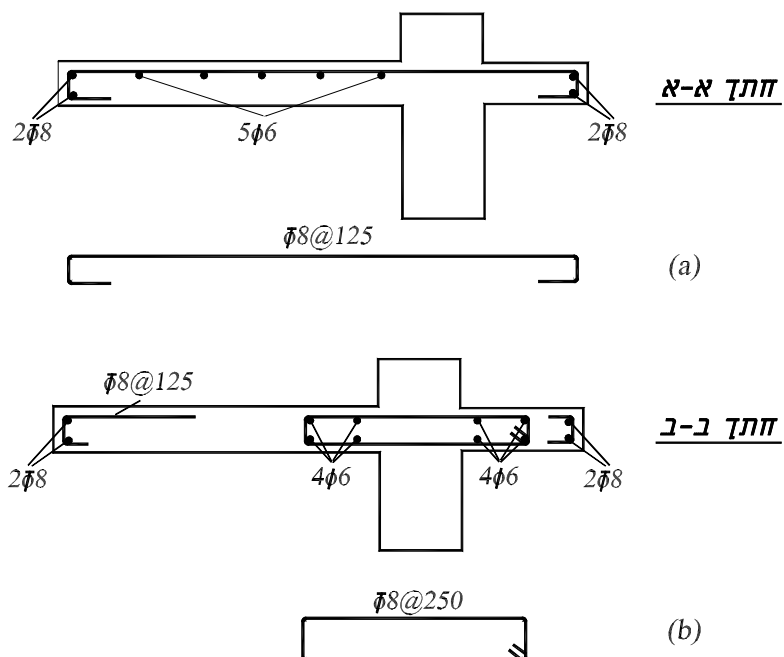
$$V_{Rd,max} = 0.32[1-(0.7 \cdot 30)/250]13 \cdot 300 \cdot 0.9 \cdot 660 \cdot 10^{-3} = 679.04 \text{ kN}$$

התנאי הדרוש במלבן הגדול מתקיים:

$$\left(\frac{V_{d,max}}{V_{Rd,max}} \right) + \left(\frac{T_{d,max}}{T_{Rd,max}} \right) = \left(\frac{91.78}{679.04} \right) + \left(\frac{33.81}{41.58} \right) < 1$$

9. המישטחים האופקיים:

המישטח בחתך א-א (שדה AB) נתון בציור 14.19a ובו רואים את זיון הכפיפה הדרוש בחתך זה מפני שכזכור בגלל הפרדה בקצוות המיפתח שום חלק מהזיזים לא משתתף בתסבולת לפיתול.



ציור 14.19

המישטח בחתך ב-ב (שדה BC) נתון בציור 14.19b ובו רואים בנוסף לזיון הכפיפה שניתן בדיוק כמו בחתך א-א גם תוספת זיון לפיתול: $\Phi 8 @ 250$ אשר מקיף את שני המלבנים הקטנים (120/360) המשתתפים בקבלת הפיתול, ונוסף להם זיון אורכי מבחינת כמויות זיון – גם זיון החישוקים וגם הזיון האורכי הינם מעל הכמות המחושבת, אולם מעשית קשה לתת כמות קטנה מזאת.