5. חישוב חתך בפעולת כוח אקסצנטרי

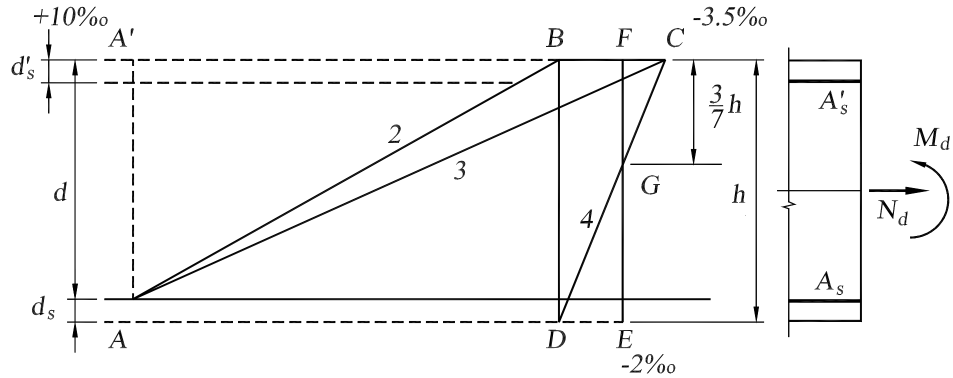
5.1 כללי

כפיפה טהורה הינה מקרה פרטי של פעולת כוח אקסצנטרי על חתך. הסכימה הסטטית המורכבת במבנים בהנדסה אזרחית מביאה לכך שבמיעוט המקרים קיימת כפיפה טהורה ובמרביתם הכפיפה מלווה בכוח צירי כל שהוא, מתיחה או לחיצה. גם פרק זה, כמו הפרק על כפיפה טהורה עוסק בחתכים בעלי ציר סימטריה אחד, כאשר קו פעולת הכוח הצירי נמצא במישור הסימטריה (למעט סעיף 5.5).

בציור מס׳ 5.1 נתון חתך עליו פועל מומנט כפיפה M_d מלווה בכוח צירי N_d הפועל לאורך הציר הגיאומטרי של החתך (אשר לצרכים מסוימים ניתן לכנות גם מרכז הכובד של החתך). מבלי להיכנס לפרוט סוגי חתכים וצרכי החתך, ניתן יהיה להכליל שבמרבית הגדולה של המקרים יהיה בחתך, פרט לזיון A_s באיזור המתוח, גם זיון כל שהוא A_s' באיזור הלחוץ. באופן כללי החתך יהיה בעל גובה כולל h ובעל גובה פעיל d , כאשר המרחקים ממרכז הכובד של הזיון המתוח A_s והלחוץ A_s' עד הסיב המתוח ביותר ועד הסיב הלחוץ ביותר יהיו d_s ו d_s' בהתאמה.

מאחר וישנם מספר אינסופי של צרופים בין כוח צירי ומומנט, יש צורך להצהיר כי אין מצב מובהק של צד מתוח וצד לחוץ, אלא יש מצב של צד מתוח או מתוח יותר או לחוץ פחות מול צד לחוץ, או מתוח פחות או לחוץ יותר. ציור מס׳ 5.1 מדגים את מיגוון האפשרויות האין סופי, אם נראה את צד שמאל כמתאר את העיבורים במתיחה וצד ימין בלחיצה.

על מנת לאפשר התייחסות למתואר בציור 5.1 יש לחזור לציורים 1.6 עבור הבטון וציור 1.15 עבור הפלדה. נאמר שם כי שני ציורים אלה מספקים תאור מקורב של התנהגות שני החומרים בחתך בכפיפה . לפי ציור 1.6 החל בעיבור 2‰ – הבטון מצוי במצב דמוי ״נזילה״ עד 3.5‰ – (כמו כן – תרומת הבטון למתיחה מוזנחת) . לגבי הפלדה הובהר מתוך ציור 1.16 כי ניתן להתייחס לתחום העיבורים ± 10‰ כתחום עיבורים ״שמיש״ עבור הפלדה. המרכאות עבור שני התאורים של הבטון והפלדה באים להדגיש כי מדובר במודלים של התנהגות ולא בתאור אמיתי של התנהגות החומרים, אולם פה, כמו גם שם, יודגש שוב כי השימוש במודלים אלה נעשה לנוחות החישוב וכי הם מוכיחים את עצמם גם כאן בכך שקירבת תוצאת החישוב המקורב באמצעות מודלים אלה אל הניסויים משביעת רצון.



ציור 5.1

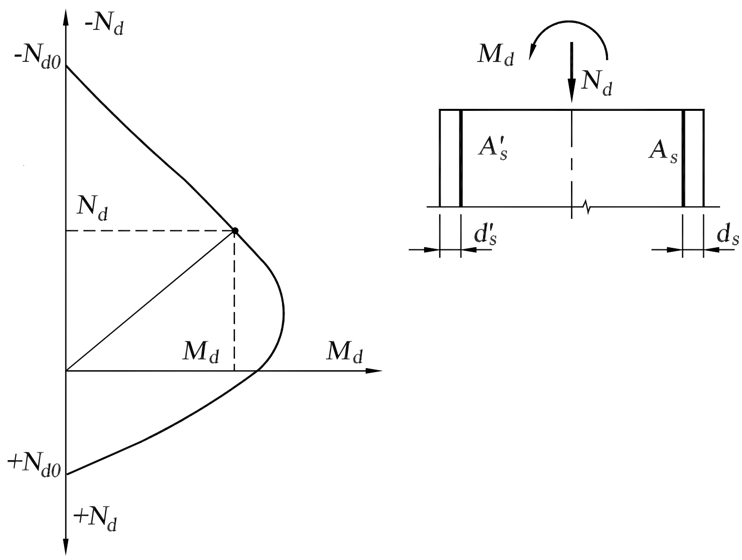
הקו CA בתאור העיבורים הציור 5.1 מתאר חתך המצוי בכפיפה וכמו כן - שני החומרים מנוצלים. ככל שנתקדם מנק׳ C אל הנק׳ B נעבור אל מצב בו האיזור הלחוץ מצטמצם, אבל האיזור המתוח נשאר מנוצל – מעבר הדרגתי אל מתיחה אקסצנטרית. לאורך הקו 2 - BA החתך מצוי לכאורה במתיחה אקסצנטרית מאחר וצד אחד מתוח והפן השני במצב אפס עיבורים. המעבר מ B אל 'A הינו מעבר הדרגתי ממתיחה אקסצנטרית אל מתיחה טהורה – הקו A'A (או כל קו אחר המקביל ל A'A ומצוי בתחום המתיחה אף בעיבורים קטנים מ ‰ 10 +).

לעומת זאת, במעבר מהקו 3 – CA אל הקו 4 CD עוברים באופן הדרגתי מכפיפה אל לחיצה אקסצנטרית. על הקו CD החתך מצוי בעיבור אפס מצד אחד ובעיבור לחיצה מירבי בצד השני. כאן אולם קורה הדבר הבא: החתך לא יכול להימצא במצב עיבורים ‰3.5 – לכל גובהו מפני שכבר בהגיעו לעיבור ‰2 – לכל גובהו הוא נימצא ב״נזילה״, אי לכך הקו FE מתאר חתך המצוי בלחיצה טהורה. המעבר מ CD ל FE הינו תוצאה של הגדרה: אם העיבור המירבי בבטון הוגדר ‰3.5 – ועיבור ה״נזילה״ כ ‰2 – הרי שהמעבר מ הקו CD אל הקו FE חייב להיות בסיבוב דרך נק׳ G הנמצאת במרחק 5/5.52. חלקים מגובה החתך כולו מהפן העליון.

פרופילי העיבורים בציור מס׳ 5.1 הינם כללי מסגרת <u>רעיוניים</u> עם הרבה מאד חריגים מהם, בדיוק כמו ש״פרבולת מדריד״ (ציור 1.6) או התיאור הסכימתי של התנהגות הפלדה (ציור 1.15). הציור מתאר באופן עקרוני בלבד את פרופיל עיבורי חתך

כל שהוא במעברים ממצב לחיצה טהורה או לחיצה אקסצנטרית דרך מתיחה אקסצנטרית ועד למתיחה טהורה.

ניתן להתייחס לבעיה זו גם דרך התאור בציור 5.2 . הציור, המכונה Interaction Diagram , מתאר אוסף כל המצבים בהם חתך נתון יכול להימצא החל בלחיצה טהורה, דרך לחיצה אקסצנטרית (עם כיוון השעון) עד לכפיפה טהורה (הציר האופקי) ודרך מתיחה אקסצנטרית ועד למתיחה טהורה (כלפי מטה).



<u>ציור 5.2</u>

תאור מהסוג הנתון ב 5.2 מקובל לבנות עבור חתך בעל מידות ידועות, עשוי מחומרים מוגדרים ובעל כמויות זיון מוגדרות בכל צד. קרן היוצאת מנקי 0 אל המעטפת החיצונית מתארת את תסבולת החתך המוגדר והנתון עבור צרוף של מומנט וכוח צירי. ניתן לבנות את הקו פרמטרי ולכלול בו מנות זיון שונות.

לסיכום – הציורים 5.1 ו 5.2 פותחים את מיגוון האפשרויות של תאור הטרחת חתך מבטון מזוין במצבים משתנים של צירופי כוח צירי עם מומנט כפיפה, כאשר כפיפה טהורה הינו רק מקרה פרטי מתוך המיגוון הזה.

הנאמר לעיל הוא פשטני לפחות במובן אחד: לא נאמר עד כה דבר ביחס לכמויות החומרים וצורת החתך, ובמיוחד לגבי כמות הזיון, שכן שני חתכים המצויים לכאורה במצב הטרחה דומה (מתואר על ידי אותו קו עיבורים בציור 5.1) יהיו במצב

תסבולת שונה אם באותו הצד של החתך תהיינה בכל אחד החתכים כמויות זיון שונות.

גם פה, כמו בכפיפה טהורה, קיים מצב של "תכנון חתך" תחת עומסים נתונים, או "בדיקת חתך" בעל מידות וחומרים נתונים. גם פה קיים חישוב "מדויק" וחישוב מקורב.

5.2 חישוב מדויק

חישוב מדויק, כהגדרתו, יתבסס על קיום שווי משקל בין מומנט חיצוני הפועל על החתך ומומנט פנימי – תוצאה של פריסת המאמצים בבטון ובכמויות הזיון בחתך, וקומפטיביליות של עיבורים. גם כאן הוא יכונה "מדויק", בדיוק מאותה הסיבה כמו בכפיפה טהורה - מאחר ונעשה שימוש בחוק קונסטיטוטיבי מקורב עבור הבטון ("פרבולת מדריד" – ציור 1.6) והפלדה. לגבי מחקר בלתי נימנע להשתמש בחוק קונסטיטוטיבי משוכלל עבור הפלדה – זה הנתון בציור 1.14 (הכולל את ענף ההתחזקות – strain hardening בתחום הפוסט-אלסטי) . לגבי תכן הנדסי רגיל, המספק את דרישות התקן, מספיק היחס המוצג בציור 1.15 – אלסטי ליניארי – פלסטי מושלם. כמעט כל הגרפים והטבלאות הנתונים בספרי עזר ולעתים אפילו בתקנים, בנויים על יחס זה. על מנת לבצע חישוב כזה דרושה תכנית תכנית מחשב לא מסובכת ותוכנות רבות קיימות ומבצעות חישוב כזה, כולל התוכנה ב [9] וכן תוכנת עתיר [28].

החישוב המדויק הינו בדרך כלל בדיקה, גם כאשר נרצה לתכנן חתך. יש הניח מידות חתך, סוג הבטון, סוג פלדת הזיון. חלק התוכנות תחשבנה את כמויות הזיון הדרושות עבור ההטרחה. תוכנות אחרות תבדוקנה בלבד אם התסבולת מתאימה לנדרשת. בתוכנה מתוחכמת – ניתן להניח מוטות זיון בכל מקום בחתך, כאשר בעיקר מענין זיון מפוזר על פני הגובה הפעיל $\boldsymbol{d}$. התוכנה מוודה שווי משקל פנימי וגם קומפטיביליות של עיבורים (strain compatibility). כל מצב שם הוא קביל מבחינת הקומפטיביליות. יכול המתכנן להחליט כי עליו לבצע שנויים בחתך: מידות, כמויות זיון וכו'. כל שנוי הינו מותר אם לאחר השנוי החתך ישוב ויימצא במשטר עיבורים המותר לפי ציור 5.1 .

<u>דוגמה:</u> הדוגמה להלן ערוכה לפי תכנית לחישוב חתך על ידי פרחאת [9]. על חתך במידות 200/400 ממ' כאשר ממ' $d_s = d_s' = 35$ פועל מומנט תכן $\boldsymbol{M_d}$ וכוח תכן צירי בלחיצה $\boldsymbol{N_d}$. החתך עשוי מבטון ב30 וזיון מצולע Φ . החתך ניבדק עבור מספר

צירופים של מומנט וכוח צירי אשר מרוכזים בטבלה 5.1 להלן. הזיון אשר מצוין עבור כל מקרה ניבדק בחישוב מקורב, מתאים לחלוטין לדרישות התקן [1]. בצד כל צמד כוחות צוינו העיבורים בסיב הבטון הלחוץ ביותר ובציר מרכז הכובד של הזיון המתוח (עבור העיבורים בגובה הזיון הלחוץ ניתן לעשות אינטרפולציה ליניארית, אך ברור כי בכל מקרה העיבור שם קטן מהעיבור בסיב הלחוץ ביותר הסמוך לו בבטון).

טבלה 5.1 – חישוב מקורב של חתך עם בדיקתו בחישוב מדויק לפי העיבורים

M_d (kNm)	N_d (kN)	A_s (mm^2)	A_s' (mm^2)	ε_s (‰)	ε_c (‰)	הערות :
18.45	0	133	0	+2.004	- 0.402	מומנט עקב זיון מינימלי לכפיפה
254.0	0	2346	1095	+1.755	-1.695	כפיפה טהורה
100	0	866	292*	+1.794	-1.025	כפיפה טהורה
60	600	292*	292*	+0.149	-0.894	לחץ אקסצנטרי
100	200	630	292*	+4.635	-1.889	לחץ אקסצנטרי
100	330	437	500	+1.816	-1.345	לחץ אקסצנטרי
100	330	508	292*	+1.678	-1.422	לחץ אקסצנטרי

* - זיון מינימלי לכפיפה (לחץ או מתיחה) בשיעור 0.4% .

5.3 חישוב מקורב של חתך בפעולת כוח אקסצנטרי

5.3.1 כללי

חישוב חתך בפעולת כוח אקסצנטרי נערך לפי השיטה הפלסטית (המתאימה למצב גבולי של הרס) אשר משמעותה – אין מביאים בחשבון קומפטיביליות של עיבורים. המאמצים בחומרים (הבטון והפלדה) הם חוזקי התכן. בחלק מהמקרים ניתן יהיה להצביע על קיום שווי משקל. בחלק אחר של המקרים הבטיחות תובטח לא על ידי שוויון בשווי המשקל אלא באי שוויון (פרוט בתת הסעיפים בהמשך).

נקודה אחרת חשובה לתשומת לב: החישוב הפלסטי הוא חישוב להרס כלומר – החתכים מגיעים למצב הרס המכונה גם ultimate . אנחנו עורכים את החישובים

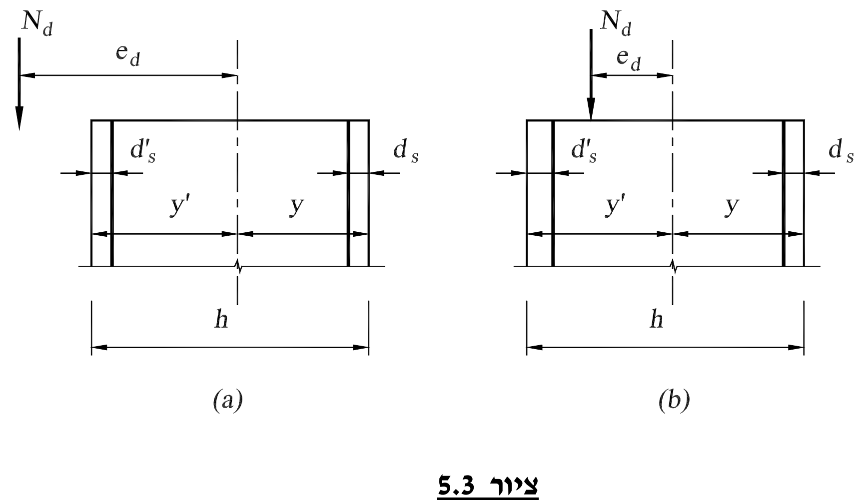
בשיטה המקורבת במצב "תכן" שאינו הרס אלא הרס היפותטי לצורך ניסוח מצב גבולי של הרס.

החישובים בסעיף זה תקפים לגבי חתכים בעלי ציר סימטריה אחד (למעט סעיף 5.5) כאשר קו פעולת הכוח האקסצנטרי נמצא במישור הסימטריה. חתך מלבני ייחשב מקרה פרטי של חתך בעל ציר סימטריה אחד.

המרכז הגיאומטרי של החתך ייחשב כמרכז החתך כלפיו תיוחס האקסצנטריות. מרכז זה ייחשב גם מרכז הכובד של החתך. סדקים לא ייחשבו לצורך קביעת מרכז הכובד, או המרכז הגיאומטרי ("המרכזית" בשפה המודרנית). בדרך כלל הבדלים לא מהותיים בכמויות הזיון לא יובאו בחשבון לצורך קביעת ציר החתך. כאשר נערך חישוב סטטי ציר האלמנט בחישוב הסטטי הוא מרכז הכובד של החתך ולכן התוצאות של החישוב הסטטי – מומנט וכוח צירי, מיוחסות אל ציר זה.

המרחק בין מרכז הכובד של החתך לסיב המתוח ביותר מכונה y ועד הסיב הלחוץ ביותר - y'. משתמע מכאן ש: $y + y' = h$.

מבחינים בין אקסצנטריות גדולה וקטנה. באקסצנטריות גדולה קו פעולת הכוח מחוץ לתחום בין צירי חתכי הזיון בחתך – הלחוץ והמתוח (ציור 5.3a). באקסצנטריות קטנה קו פעולת הכוח בין מרכזי הכובד של הזיון, המתוח והלחוץ – ציור 5.3b. יש מקרי גבול בהם מיטשטשים ההבדלים בין אקסצנטריות גדולה וקטנה, בעיקר כאשר הכוח קרוב לציר מרכז הכובד של אחת מכמויות הזיון, ברם, עדיין הדרך הנוחה היא לסווג ביניהן בצורה שנקבעה לעיל.



<u>ציור 5.3</u>

פרק זה עוסק בחישוב או בדיקת חתך. בכל חתך דרוש להבטיח כמויות זיון מינימליות כל שהן בצד המתוח ובצד הלחוץ. כמויות זיון אלו ניקבעות מצרכי האלמנט ולא משיקולי חתך. מאחר והפרק לא עוסק באלמנטים, כל כמויות הזיון המינימליות (והמקסימליות, אם ניתנו) הן לדוגמה . מידע על כמויות הזיון המינימליות יש לשאוב מהפרקים הדנים באלמנטים – בדרך כלל בחלקים 2-5 של חוקת הבטון.

5.3.2 חתך בלחיצה באקסצנטריות גדולה

<u>**חתך כללי**</u>

בציור 5.4a נתון חתך עליו פועל כוח לחיצה N_d באקסצנטריות e_d המביאה את קו פעולת הכוח אל מחוץ לתחום בין A_s ו A_s' . המקרה שקול לפעולת כוח N_d לאורך ציר מרכז הכובד של החתך מלווה במומנט תכן $M_d\ (= N_d\ e_d)$.

אין שום אפשרות להפריד בין פעולת המומנט והכוח הצירי ולאחר מכן לעשות חיבור בין התוצאות. הדרך המעשית היחידה היא לנהוג בדרך הבאה:

מעתיקים את קו פעולת הכוח אל ציר הזיון המתוח A_s . עקב כך משתנה המומנט הפועל על החתך והוא יכונה M_{sd} :

$$M_{sd} = N_d\,[\,e_d + (y - d_s)\,] \tag{5.1}$$

משמעות הטרנספורמציה היא כלהלן: החתך יחושב לכפיפה בפעולת המומנט M_{sd} . תחושב כמות הזיון ללחיצה ולמתיחה. הכוח (לחיצה) מצוי על ציר הזיון המתוח ועל כן ינוכה מכוח המתיחה בזיון A_s כוח הלחיצה המפעיל הכוח N_d אשר הועתק אליו. ללא קיום קומפטיביליות ובמצב גבולי של הרס מותר להעמיד תנאי שווי משקל בלבד.

א. אם המומנט M_{sd} גדול מ $M_{cd,max}$ – דרוש זיון ללחיצה באיזור הלחוץ.

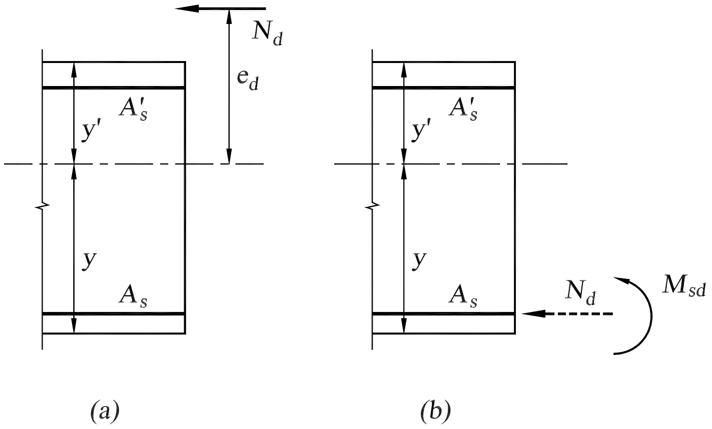
$$\Delta M_d = M_{sd} - M_{cd,max} \tag{5.2}$$

$$A_s' = \frac{\Delta M_d}{(d - d_s')\,f_{sd}} \geq A_s'{}_{min} \tag{5.3}$$

הזיון המתוח יחושב על ידי:

$$A_s = A_s' + \frac{M_{cd,max}}{z_{min}\,f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \tag{5.4}$$

z_{min} היא הזרוע הפנימית המתאימה ל $M_{cd,max}$.



<u>ציור 5.4</u>

ב. אם המומנט M_{sd} לא גדול מ $M_{cd,max}$ ובכל זאת יש לתת זיון מינימלי באיזור הלחוץ $A_s'_{min}$, זיון זה מקבל מומנט :

$$\Delta M_d = A_s'_{min} f_{sd} (d - d_s') \tag{5.5}$$

יתרת המומנט המתקבל על ידי הבטון היא :

$$M_{cd} = M_{sd} - \Delta M_d \tag{5.6}$$

עבור M_{cd} יש לחשב את הזרוע הפנימית z על מנת לחשב את הזיון A_s :

$$A_s = A_s'_{min} + \frac{M_{cd}}{z\, f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \tag{5.7}$$

כמו בכפיפה טהורה, לצורך חישוב z יש לחשב את ω . אם $\omega < 2d_s'/d$ קימות שתי אפשרויות : א. להניח כי הזרוע הפנימית $z = d - d_s'$. ב. להזניח את השתתפות הזיון הלחוץ $A_s'_{min}$ כלל. לחשב את ω בהנחה כי $M_{cd} = M_{sd}$. לחשב את A_s לפי נוסחה (5.7) בהזנחת $A_s'_{min}$. אפשרות ב׳ הינה שמרנית יותר ובדרך כלל אפשרות א׳ בטוחה מספיק.

<u>חתך מלבני</u>

כל הנ"ל נכון גם עבור חתך מלבני. מאחר והבטוי עבור M_{cd} ו $M_{cd,max}$ ועבור z מפורש ניתן לבטא את כל הנוסחאות בצורה מפורשת להלן. מתוך פרק 4 :

$$M_{cd} = \omega\,(1 - 0.5\omega)\; b\, d^2 f_{cd} \qquad M_{cd,max} = 0.32\; b\, d^2 f_{cd}$$

$z = (\,1 - 0.5\omega)\; d$ וכמו כן אפשר להניח כי : $y = y' = h/2$

בשים לב לכך, כאשר $M_{sd} > M_{cd,max}$ נוסחה (5.3) נשארת בתוקף ונוסחה (5.4) תהיה :

$$A_s = A_s' + \frac{\omega_{max}\, b\, d\, f_{cd}}{f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.8)$$

כאשר $M_{sd} \leq M_{cd,max}$ יהיה A_s מחושב לפי נוסחה (5.9) במקום לפי (5.7) :

$$A_s = A_s'{}_{min} + \frac{\omega\, b\, d\, f_{cd}}{f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.9)$$

<u>שווי משקל בחתך</u>

כאשר כמויות הזיון המחושבות והניתנות בפועל לא קטנות מכמויות הזיון המינימליות ניתן להציב משואות שווי משקל של כוחות ושל מומנטים בחתך :

שווי משקל של כוחות במקרה של חתך מלבני :

$$N_d \;=\; \omega\, bd\, f_{cd} + A_s' f_{sd} - A_s f_{sd} \qquad (5.10)$$

שווי משקל של מומנטים (סביב ציר הזיון המתוח) במקרה של חתך מלבני :

$$N_d\,[\, e_d + (h/2 - d_s)\,] = \omega\,(1\text{-}\omega/2)\; bd^2 f_{cd} + A_s' f_{sd}\,(d - d_s') \qquad (5.11)$$

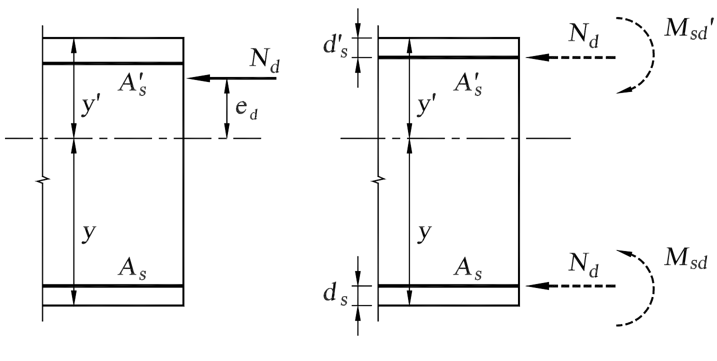
כאשר כמויות הזיון אשר חושבו קטנות מהמינימליות וניתנו המינימליות, או כאשר מסיבה אחרת ניתנו כמויות זיון גדולות מן המחושב, לא ניתן להעמיד משואות שווי משקל כגון (5.10) ו (5.11) הכתובות במונחים של חוזקי תכן. החתך המחושב עם עודף זיון יהיה בטוח לחלוטין וכן המאמצים בו יהיו קטנים מחוזקי התכן, אולם שיטת החישוב המקורב אינה יכולה לספק את התשובה מה הוא גודל המאמצים. ניתן לחשב את המאמצים רק בשיטה המדויקת.

5.3.3 חתך בלחיצה באקסצנטריות קטנה

<u>חתך כללי</u>

כפי שהוגדר בסעיף 5.3.1 קו פעולת הכוח הפועל על החתך באקסצנטריות קטנה מצוי בין מרכזי הכובד של הזיון בצד המתוח ובצד הלחוץ. בפעול כוח בלחיצה באקסצנטריות גדולה על החתך נוצר מצב ברור של לחיצה בצד אחד (הקרוב לקו

פעולת הכוח) ומתיחה בחתך בצד הנגדי. אי לכך שם היה מצב ברור של זיון הפועל בלחיצה וזיון הפועל במתיחה. במקרה שלפנינו זה לא כל כך ברור. בכל המקרים הצד הקרוב לקו פעולת הכוח יהיה לחוץ וגם הזיון באותו צד יהיה לחוץ. הזיון בצד הרחוק מקו פעולת הכוח יכול להיות במתיחה, או במתיחה אולם במאמץ נמוך מאד, הרחק מחוזק התכן במתיחה. הוא יכול להיות גם לחוץ – פחות מאשר הצד הנגדי, אולם לחוץ. הכל תלוי במקום היחסי של הכוח ביחס למרכז הכובד של החתך. בציור 5.5a נתון חתך עליו פועל כוח לחיצה באקסצנטריות קטנה.



(a) (b)

<u>ציור 5.5</u>

הגישה לפתרון זהה לזו של החתך בפעולת כוח באקסצנטריות גדולה: כוח הלחיצה יועתק אל ציר מרכז הכובד של הזיון בצד המתוח – ראה ציור 5.5b. כתוצאה מכך – הכוח פועל לאורך ציר מרכז כובד של הזיון המתוח ועל החתך פועל מומנט (כפי שהוגדר ב 5.3.2):

$$M_{sd} = N_d [e_d + (y - d_s)] \qquad (5.1)$$

א. אם המומנט M_{sd} גדול מ $M_{cd,max}$ – דרוש זיון ללחיצה באיזור הלחוץ.

$$\Delta M_d = M_{sd} - M_{cd,max} \qquad (5.2)$$

$$A_s' = \frac{\Delta M_d}{(d - d_s')\, f_{sd}} \geq A_s'_{min} \qquad (5.3)$$

כהנחת פתיחה הזיון המתוח יחושב על ידי נוסחה (5.4) ומשמעות הנחה זו היא כי צד זה מתוח:

$$A_s = A_s' + \frac{M_{cd,max}}{z_{min}\, f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.4)$$

אם תוצאת החישוב לעיל מצביעה על כך כי התקבלה כמות זיון כל שהיא (אפילו קטנה מהמינימום) ההנחה כי הצד מצוי במתיחה נכונה. אם תוצאת החישוב לפי (5.4) הינה מספר שלילי – יש מקום להניח כי צד זה אינו מתוח. יש לבחון את האפשרות כי הוא לחוץ.

ב. על מנת לבחון אם החתך לחוץ באותו צד אשר אמור היה להיות מתוח יש לנקוט בטכניקה אשר נינקטה לחישוב הזיון בצד הלחוץ: קו פעולת הכוח יועבר אל ציר מרכז הכובד של הזיון הלחוץ – ציור 5.5b.

מומנט התכן הפועל על החתך יהיה כעת M_{sd}' :

$$M_{sd}' = N_d\,[(y' - d_s') - e_d] \qquad (5.12)$$

מומנט זה פועל כך שהצד של A_s עשוי להיות לחוץ. אי לכך יש לחשב את תסבולת החתך לכפיפה מטעם הבטון כאשר צד זה לחוץ - $M_{cd}'_{max}$.

כעת יש לבדוק מה גודלו של M_{sd}' ביחס ל M_{cd}' :

אם : $M_{sd}' > M_{cd}'_{max}$

$$\Delta M_d' = M_{sd}' - M_{cd}'_{max} \qquad (5.13)$$

ואז הזיון A_s יחושב כאילו היה לחוץ לפי:

$$A_s = \frac{\Delta M_d'}{(d - d_s')\, f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.14)$$

התוצאה עבור A_s לפי (5.14) לעיל כמעט תמיד תהיה שלילית, כלומר לא דרוש זיון לחוץ בצד זה. ברם, יש לזכור כי הגענו לבחון את החתך לפי (5.13) ו (5.14) כאשר הגענו למסקנה כי הזיון באותו הצד אינו מתוח. לסיכום – איננו יודעים במתכונת החישוב הפלסטי מה המאמצים בצד ה"מתוח" או ה"פחות לחוץ". ברור רק דבר אחד – כל כמות זיון מינימלית אשר תסופק שם מספקת בטחון לחתך גם אם אין בהירות ביחס למאמצים שם. חתך במצב הטרחה כזה אפשר לבדוק בצורה אמיתית רק בשיטת החישוב המדויק אולם אפשר בהחלט לתכנן בבטיחות מספקת בשיטת החישוב המקורבת.

ברור מן הנאמר לעיל כי שווי משקל בחתך ניתן להראות רק בשיטה המדויקת או כאשר כמויות הזיון המחושבת עולות על המינימליות כך ששני החומרים – הבטון והפלדה, המאמצים בהם הם חוזקי התכן.

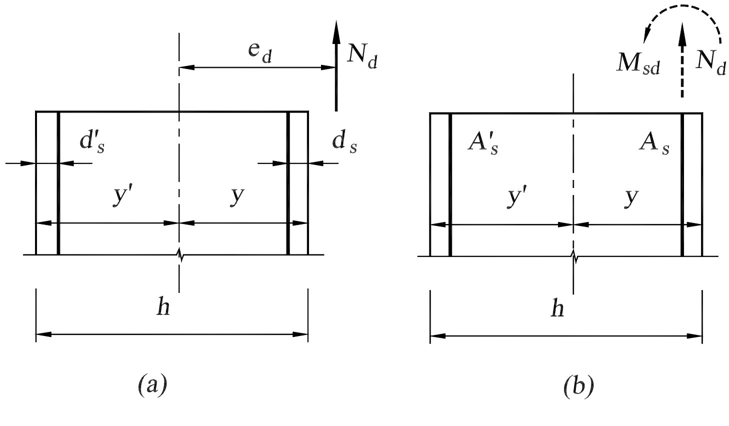
חתך מלבני

כמו בחתך מלבני עליו פועל כוח עם אקסצנטריות גדולה, הזיון A_s המחושב עבור חתך כללי לפי (5.4) יחושב לפי (5.8). אם התקבל בחישוב כי $\omega < \omega_{max}$ הזיון אשר חושב לפי (5.7) יחושב לפי (5.9). כל ההבדל בין חתך כללי וחתך מלבני הוא ביכולת לפרט את M_{cd} ואת z .

5.3.4 חתך בפעולת כוח מתיחה באקסצנטריות גדולה

חתך כללי

ההנחה היא כי בפעולת כוח מתיחה באקסצנטריות גדולה על החתך ייווצר איזור לחוץ בצד אחד של החתך וקיים דמיון בין לחיצה ומתיחה באקסצנטריות גדולה, אי לכך החישוב נערך במתכונת זהה לזה של חתך בלחיצה באקסצנטריות גדולה. ברור כי במספר מקרי גבול, בעיקר כאשר כוח המתיחה סמוך מאד לציר מרכז הזיון המתוח תהיה סטייה מסוימת מן הנאמר לעיל.



ציור 5.6

בציור 5.6a נתון חתך כללי עליו פועל כוח מתיחה N_d באקסצנטריות e_d כך שקו פעולת הכוח מחוץ לתחום בין מרכזי הכובד של הזיון המתוח והלחוץ ובצד הזיון המתוח A_s . לפי אותו קו ניתוח התנהגות החתך במצב גבולי של הרס נעביר את קו פעולת הקו אל מרכז הזיון המתוח A_s . המעבר יהיה כרוך בתוספת מומנט M_{sd} :

$$M_{sd} = N_d [\, e_d - (y - d_s) \,] \qquad (5.15)$$

כעת ניתן לחשב את החתך לכפיפה בפעולת המומנט M_{sd} . כמות הזיון בצד הלחוץ A_s' אינה מושפעת מכוח המתיחה.

א. כאשר $M_{sd} > M_{cd,max}$ יהיה :

$$\Delta M_d = M_{sd} - M_{cd,max} \qquad (5.16)$$

והזיון בצד הלחוץ יהיה :

$$A_s' = \frac{\Delta M_d}{(d - d_s`)\, f_{sd}} \geq A_s'_{min} \qquad (5.17)$$

הזיון בצד המתוח יצטרך לשאת בנוסף לחלקו בכוח המתיחה עקב מומנט כפיפה גם את כוח המתיחה החיצוני N_d אשר הועתק אליו, לכן :

$$A_s = A_s' + \frac{M_{cd,max}}{z_{min}\, f_{sd}} + \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.18)$$

ב. אם $M_{sd} \leq M_{cd,max}$ יהיה צורך כנראה לתת זיון מינימלי $A_s'_{min}$. תרומתו למומנט הכפיפה תהיה :

$$\Delta M_d = A_s'_{min}\, f_{sd}\, (d - d_s') \qquad (5.19)$$

המומנט אשר הבטון יקבל יהיה :

$$M_{cd} = M_{sd} - \Delta M_d \qquad (5.20)$$

הזיון בצד המתוח יחושב בפעולת M_{cd} במקום $M_{cd,max}$ (עם חישוב z המתאים) :

$$A_s = A_s'_{min} + \frac{M_{cd}}{z\, f_{sd}} + \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.21)$$

<u>חתך מלבני</u>

על מנת להתאים את הנוסחאות (5.15) עד (5.21) לחתך מלבני יש להמיר את הביטויים הכללים שם ב :

$$z = (1 - 0.5\omega)\, d \qquad y = y' = h/2$$

$$M_{cd} = \omega (1 - 0.5\omega)\, bd^2 f_{cd} \qquad M_{cd,max} = 0.32\, bd^2 f_{cd}$$

שווי משקל בחתך

בכל המקרים בהם כמויות הזיון שניתנו הן המחושבות והן לא קטנות מהמינימליות ניתן להעמיד שווי משקל של כוחות ושל מומנטים בחתך, כפי שזה נעשה במקרה של חתך בלחיצה באקסצנטריות גדולה :

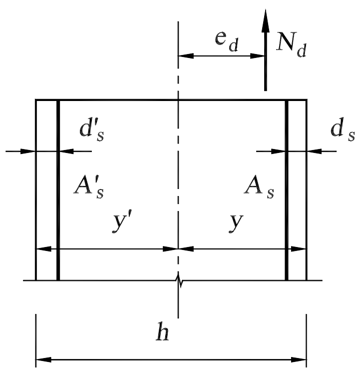
(5.22) $N_d = \omega\, bd\, f_{cd} - A_s f_{sd} + A_s' f_{sd}$ שווי משקל של כוחות

ושווי משקל של מומנטים (במקרה של חתך מלבני) ביחס לציר מרכז הזיון המתוח :

(5.23) $N_d\,[\,e_d - (h/2 - d_s)] = \omega\,(1 - 0.5\omega)\, bd^2 f_{cd} + A_s' f_{sd}\,(d - d_s')$

5.3.5 חתך בפעולת כוח מתיחה באקסצנטריות קטנה

אין בחישוב כאן כל הבדל בין חתך כללי לבין חתך מלבני בכלל מן הטעם הבא : החישוב אינו מועיד כל תפקיד לבטון. ההנחה היא כי קירבת הכוח למרכז הכובד של החתך מביאה את הזיון בשני צידי החתך במצב גבולי של הרס לעיבורים גדולים הרחק מהעיבורים בהם הבטון נסדק ועל כן כל החתך סדוק.



ציור 5.7

מאחר וכל החתך סדוק והכוח מתקבל על ידי הזיון בלבד, במילא נוצר מצב בו, במצב גבולי של הרס, כל הזיון מצוי במצב מאמצים של חוזק תכן, אי לכך הביטוי לאקסצנטריות נימצא בכמויות הזיון בלבד (ציור 5.7) : כמויות הזיון מקבלות את חלקן בכוח ביחס הפוך למרחק קו פעולת הכוח מציר הזיון :

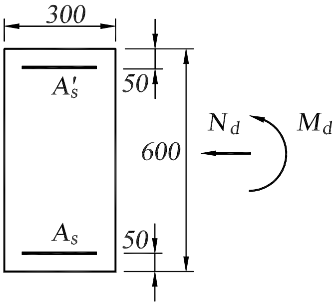
$$A_s = \frac{(y' - d_s') + e_d}{(d - d_s')} \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \qquad (5.24)$$

$$A_s' = \frac{(y - d_s) - e_d}{(d - d_s')} \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_s'_{min} \qquad (5.25)$$

<u>דוגמאות חישוב א'</u>

<u>דוגמה 5.1</u>

נתון חתך במידות 300/600 mm, עשוי בטון ב30 ופלדה מצולעת Φ . על החתך פועל כוח תכן בלחיצה 1000 kN , באקסצנטריות 0.5 m . מנת הזיון המינימלית היא $\rho'_{min} = \rho_{min} = 0.004$. חשב את כמויות הזיון הדרושות.



<u>פתרון</u>:

$$d = 0.55\text{ m} \quad f_{cd} = 13.0 = \text{MPa} \quad f_{sd} = 350\text{ Mpa}$$

$$A_{s,min} = A_s'_{,min} = 0.004\ 300\ 550\ = 660\text{ mm}^2$$

$$M_{cd,max} = 0.32\ 300\ 550^2\ 13.0\ 10^{-6} = 377.5\text{ kNm}$$

$$M_{sd} = 1000\ [0.5 + (0.30\text{-}0.05)] = 750\text{ kNm} > M_{cd,max}$$

$$\Delta M_d = 750 - 377.5 = 372.5\text{ kNm}$$

הזיון הלחוץ:

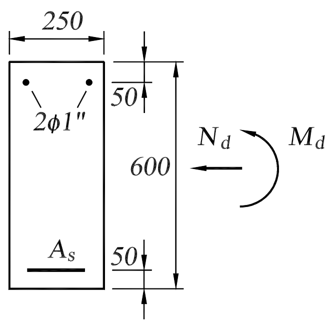
$$A_s' = \frac{372.5}{(0.55 - 0.05)\,0.35} = 2128\,\text{mm}^2$$

הזיון המתוח :

$$A_s = 2128 + \frac{377.5}{0.80\ 0.55\ 0.35} - \frac{1000}{0.35} = 2178 + 2451 - 2857 = 1772\,\text{mm}^2$$

<u>דוגמה 5.2</u>

נתון חתך במידות $250/600$ mm עשוי מבטון ב20. באיזור הלחוץ יש $2\phi1''$. הזיון המתוח יהיה זיון מצולע Φ . על החתך פועל כוח תכן 360 kN באקסצנטריות של 0.6 מ׳. הזיון המינימלי מכל צד יהיה $\rho'_{min} = \rho_{min} = 0.004$. מה כמות הזיון הדרושה באיזור המתוח?



<u>פתרון :</u>

$f_{sd} = 200$ MPa A_s' עבור $f_{cd} = 8.6$ MPa

$$A_{s,min}=A_{s',min}= 0.004\ 250\ 550 = 550\ mm^2$$

$$M_{cd,max} = 0.32\ 250\ 550^2\ 8.6\ 10^{-6} = 208\ kNm$$

$$\Delta M_d = 2\ 507\ 0.20\ (0.55 - 0.05) = 101.4\ kNm$$

$$M_{sd} = 360\ [0.6 + (0.30 - 0.05)] = 306\ kNm$$

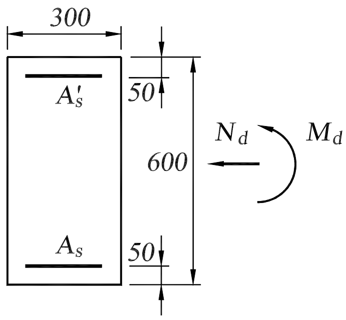
$$M_{cd} = M_{sd} - \Delta M_d = 306 - 101.4 = 204.6\ kNm \sim M_{cd,max}$$

$$A_s = 1014\frac{0.20}{0.35} + \frac{204.6}{(1-0.50\ 0.40)\,0.55\,0.35} - \frac{360}{0.35} = 579 + 1329 - 1029 = 879\ mm^2$$

<u>דוגמה 5.3</u>

נתון חתך במידות 300/600 ממ׳ מבטון ב30 ופלדת זיון מצולעת בשני הצדדים. על החתך פועל כוח תכן בלחיצה ומומנט תכן - $N_d = 800$ kN $M_d = 180$ kNm.

$\rho'_{min} = \rho_{min} = 0.004$ חשב את כמויות הזיון הדרושות בכל צד של החתך.



<u>פתרון:</u>

$f_{sd} = 350$ MPa $f_{cd} = 13.0$ MPa $A_{s,min} = A_s'{}_{min} = 0.004\ 300\ 550 = 660\ mm^2$

$M_{cd,max} = 0.32\ 300\ 550^2\ 13.0\ 10^{-6} = 377.5$ kNm $e_d = 180/800 = 0.225$ m

$M_{sd} = 800\ [0.225 + (0.30 – 0.05)] = 380$ kNm

$M_{sd} \cong M_{cd,max}$ ולכן לא דרוש A_s' . $A_s' = A_s'{}_{min} = 660\ mm^2$

$\Delta M_d = 660\ 0.35\ (0.55 – 0.05) = 115.5$ kNm

נניח כי A_s מתוח (חושבה $\omega=0.26$):

$$A_s = 660 + \frac{253.3}{(1-0.5\,0.26)\,0.55\,0.35} - \frac{800}{0.35} = 660 + 1512 - 2286 = -114\,mm^2$$

אם כך נניח כי A_s לחוץ: נעביר את הכוח מעל A_s':

$M'_{sd} = 800\ [(0.30 – 0.05) – 0.225] = 20$ kNm $M'_{sd} < M_{cd,max}$

לכן לא דרוש חישובית A_s מכל הנחה, אי לכך: $A_s = A_{s,min} = 660\ mm^2$

<u>דוגמה 5.4</u>

נתון חתך במידות 400/600 ממ׳ עשוי בטון ב20 ופלדת זיון מצולעת Φ.

על החתך פועל כוח תכן 3000 kN בלחיצה. הכוח פועל באקסצנטריות של 50 ממ׳.

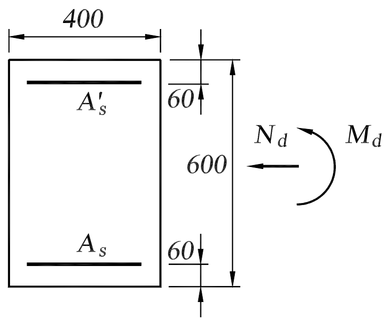
חשב את כמויות הזיון הדרוש. $\rho'_{min} = \rho_{min} = 0.004$.

<u>פתרון:</u>

$d = 540$ mm . $f_{sd} = 350$ MPa $f_{cd} = 8.6$ MPa

$A_{s,min} = A_s'{}_{,min} = 0.004\ 400\ 540 = 864\ mm^2$

$M_{cd,max} = 0.32\ 400\ 540^2\ 8.6\ 10^{-6} = 321$ kNm



$M_{sd} = 3000\ [\ 0.05 + (0.3 - 0.06)] = 870$ kNm

$\Delta M_d = 870 - 321 = 549$ kNm $\quad A_s' = \dfrac{549}{(0.54-0.06)\,0.35} = 3268\,\text{mm}^2$

נניח כי הזיון A_s לחוץ: $\quad M'_{sd} = 3000\ [0.30\text{-}0.06) - 0.05] = 570$ kNm

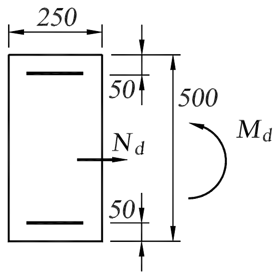
$\Delta M_d' = 570 - 321 = 249$ kNm $\quad A_s = \dfrac{249}{(0.54-0.06)\,0.35} = 1482\,\text{mm}^2$

<u>דוגמה 5.5</u>

נתון חתך מלבני במידות 250/500 ממ׳, עשוי בטון ב30 ופלדה מצולעת Φ .

על החתך פועל כוח $N_d = 300$ kN במתיחה ומומנט תכן $M_d = 240$ kNm.

$\rho'_{min} = \rho_{min} = 0.004$. חשב את כמויות הזיון הדרושות.



<u>פתרון:</u>

$e_d = 240/300 = 0.8$ m $\quad d = 450$ mm $\quad f_{cd} = 12.7$ MPa $\quad f_{sd} = 350$ MPa

$A_{s,min} = A_s'_{min} = 0.004\ 250\ 450 = 450\ \text{mm}^2$

$$M_{cd,max} = 0.32\ 250\ 450^2\ 13.0\ 10^{-6} = 210.6\ \text{kNm}$$

$$M_{sd} = 300\ [\ 0.8 - (0.25 - 0.05)] = 180\ \text{kNm} < M_{cd,max}$$

הזיון המינימלי מקבל : $\Delta M_d = 450\ 0.35\ (0.45\text{-}0.05) = 63$ kNm

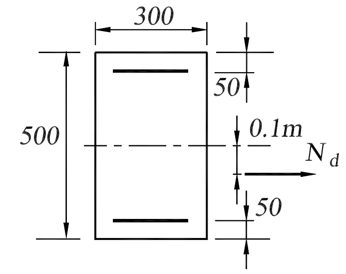
הבטון מקבל : $M_{cd} = M_{sd} - \Delta M_d = 180 - 63 = 117$ kNm $\quad \omega = 0.17$

$$A_s = 450 + \frac{117}{(1-0.5\ 0.17)\ 0.45\ 0.35} + \frac{300}{0.35} = 450 + 812 + 857 = 2119\,\text{mm}^2$$

$$A_s' = A_s'_{min} = 450\ \text{mm}^2$$

<u>דוגמה 5.6</u>

נתון חתך במידות 300/500 mm. החתך עשוי מבטון ב30 ומוטות זיון עגול ϕ . $f_{sd} = 200$ MPa . על החתך פועל כוח תכן $N_d = 400$ kN במתיחה אקסצנטרית $e_d = 0.1$ m . מה כמויות הזיון הדרושות?



<u>פתרון :</u>

האקסצנטריות הינה קטנה והכוח מתיחה לכן כל הכוח מועבר באמצעות הזיון באופן פרופורציונלי הפוך ל מרחק קו פעולת הכוח מצירי הזיון :

$$A_s = \frac{0.25 - 0.05 + 0.10}{0.45 - 0.05}\ \frac{400}{0.20} = 1500\,\text{mm}^2$$

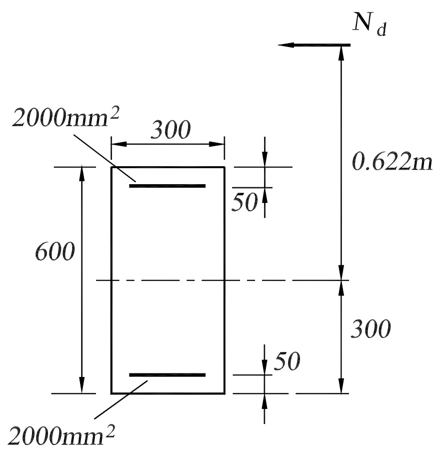
$$A_s' = \frac{0.25 - 0.05 - 0.10}{0.45 - 0.05}\ \frac{400}{0.20} = 500\,\text{mm}^2 < A_{s,min}$$

אין כאן משמעות לשמירה על $A_{s,min}$ אולם אם נירצה כי מנת זיון מינימלית תישמר
בצד זה של החתך וכתוצאה מכך ניתן $A_s'_{min} - 0.004\ 300\ 450 = 540\ \text{mm}^2$ נכון
יהיה כי הכמות בצד השני תיגדל : $A_s = 1500\ (540/500) = 1620\ \text{mm}^2$ על מנת

לשמור על יחס כמויות הזיון כיחס הפוך של מרחק מרכזי הכובד שלהם מקו פעולת הכוח האקסצנטרי.

<u>דוגמה 5.7</u>

נתון חתך במידות 300/600 mm עשוי מבטון ב30 ובו $2000\ mm^2$ זיון מסוג Φ בכל צד של החתך כאשר $d_s = d_s' = 50\ mm$ כמסומן. על החתך פועל כוח לחיצה באקסצנטריות של 0.622 מ'. מה גודל הכוח המירבי?



<u>פתרון</u>:

$f_{sd} = 350\ MPa$. $f_{cd} = 13.0\ MPa$. $A_s = A_s' = 2000\ mm^2$

ניתן לערוך שתי משוואות שווי משקל: כוחות אנכיים על החתך ומומנטים -

(ההנחה היא כי יש ניצול מלא של האיזור הלחוץ בבטון - $\omega = \omega_{max}$):

משוואת שווי משקל של כוחות: $N_d = \omega_{max} b d f_{cd} + A_s' f_{sd} - A_s f_{sd}$

שווי משקל מומנטים: $N_d[e_d + (h/2 - d_s)] = M_{cd,max} + A_s' f_{sd}(d - d_s')$

בדרך כלל לא סביר כי שתי כמויות הזיון A_s ו A_s' שוות. צריך להניח כי לא. נוכל להניח כי אחת מהן לא מנוצלת. אם ננסח את שתי האפשרויות ניראה כי האפשרות ש A_s' מנוצלת מובילה לכוח גדול יותר מהאפשרות ש A_s מנוצלת.

נכתוב את שתי המשוואות בהנחה כי $A_s = 2000\ mm^2$ ו A_s' לא ידועה:

$$N_d = \omega_{max}\ 300\ 550\ 13.0 + (A_s' - 2000)\ 350$$

$$N_d\ [622+250] = 0.32\ 300\ 550^2\ 13.0 + A_s'\ 350\ (550-50)$$

נבטא את A_s מתוך המשואה הראשונה לתוך השניה. נשארים עם משואה אחת.

התוצאה: $N_d = 802.5$ kN , A_s מנוצל ולעומת זאת – $A_s' = 1841$ mm^2 .

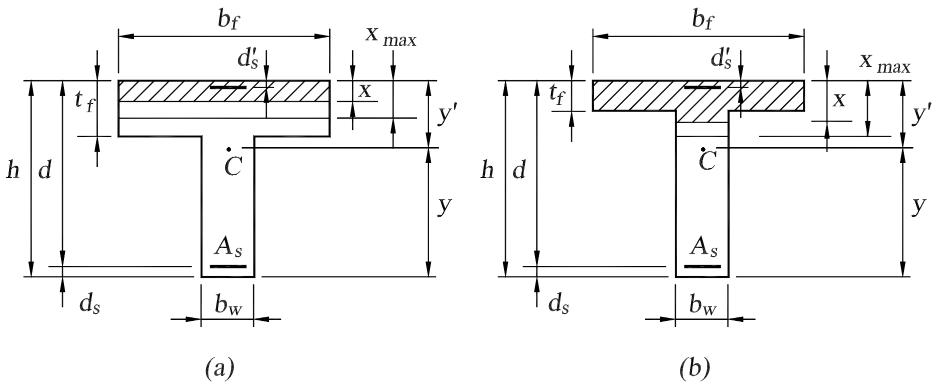
5.4 חתך קמץ בפעולת כוח אקסצנטרי

5.4.1 כללי

חתך קמץ הינו מקרה פרטי של חתך כללי. במבנים מבטון מזוין ודרוך הוא שכיח ביותר ועל כן נהוג להרחיב את הטיפול בו ביחד עם הטיפול בחתך מלבני. בפרק 4 הדן בכפיפה טהורה ראינו כי קיימת אבחנה בין הימצאות האיזור הלחוץ באגף בלבד לבין חריגת האיזור הלחוץ גם לתוך הדופן.

בראשית הדיון על פעולת כוח אקסצנטרי וחישוב חתך בשיטה המקורבת, נאמר כי בחישוב סטטי מניחים שציר האלמנט הינו מרכז הכובד (או המרכז הגיאומטרי) של החתך וכלפיו מיוחסים כל הערכים הסטטיים אשר מופקים תוך החישוב הסטטי. זה קיים גם בחתך קמץ אך כאן יש בידנו את היכולת מצד אחד ואת החובה מצד שני לפרט וליעל את החישוב הזה ולשלבו עם צרכי החישוב לכפיפה.

בציור 5.8a ו 5.8b נתונים שני חתכי קמץ. בראשון האיזור הלחוץ משתרע על חלק מהאגף בלבד. בשני האיזור הלחוץ חורג אל תוך הדופן. לצורך חישובי החתך לכפיפה ראינו כי דרוש המומנט הסטטי של החתך הפעיל (S_0) ביחס לציר הזיון המתוח. כן ראינו כי מומנט הסטטי של האיזור הלחוץ בכפיפה מוגדר $S_{c,} \leq 0.64\ S_0$ הכוח הצירי N_d נתון כפועל לאורך ציר מרכז הכובד של החתך אי לכך חייבים לאתר את מקומו אשר כידוע הוגדר כבר קודם להיות במרחק y' מהסיב הלחוץ ביותר ובמרחק y מהסיב המתוח ביותר. מאחר ו S_0 דרוש עבור כפיפה נעשה בו שימוש גם למציאת מרכז הכובד על ידי:



ציור 5.8

$$\frac{S_0}{A_c} = \frac{(b_f - b_w)t_f(d - 0.5t_f) + 0.5b_w d^2}{(b_f - b_w)t_f + b_w d} = y - d_s \qquad (5.26)$$

כאשר ידועים y ו y' ידוע מרכז הכובד של החתך, אליו מיוחס קו פעולת הכוח הצירי. בביטוי עבור S_0 בו נעשה שימוש ב (5.26) ייעשה שימוש גם בחישוב החתך.

5.4.2 חתך קמץ בלחיצה אקסצנטרית

הכוונה היא שהאיזור הלחוץ הוא הצד של האגף. אם האיזור הלחוץ הינו בצד הדופן ניתן לחשב את החתך בדרך מקורבת כחתך מלבני בעל רוחב b_w כולו ובהזנחת האגפים. אם האגפים לא גדולים והשפעתם על הסטת מרכז הכובד של החתך קטנה לא יהיה בזה אי דיוק בעל השפעה.

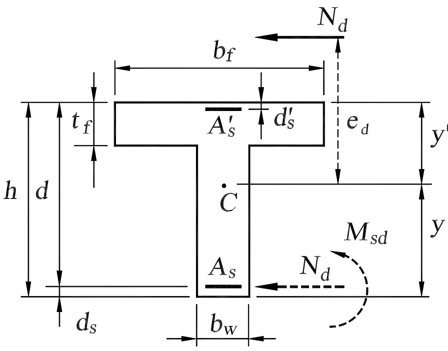
5.4.2.1 חתך קמץ בלחיצה באקסצנטריות גדולה

חתך קמץ עליו פועל כוח לחיצה באקסצנטריות גדולה נתון בציור מס' 5.9 . כמקובל לגבי חתך כללי וחתך מלבני קו פעולת הכוח יועתק אל ציר הזיון המתוח A_s דבר שכרוך בתוספת מומנט חיצוני M_{sd} :

$$M_{sd} = N_d\left[e_d + (y - d_s)\right] \qquad (5.27)$$

בהנחה כי $M_{sd} > M_{cd,max}$ חלק מן המומנט ΔM_d יתקבל באמצעות זיון לחיצה:

$$A_s' = \frac{\Delta M_d}{(d - d_s')\ f_{sd}} \geq A_s'_{min} \tag{5.28}$$



ציור 5.9

מאחר ולצורך חישוב $M_{cd,max}$ ניקבע כבר איפה האיזור הלחוץ בחתך, כלומר x_{max}, ניתן לחשב את A_s מתוך שווי משקל של כוחות (במקום לחשב את הזרוע הפנימית)

כאשר $x_{max} \leq t_f$:

$$A_s = A_s' + \frac{b_f\ x_{max}\ f_{cd}}{f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \tag{5.29}$$

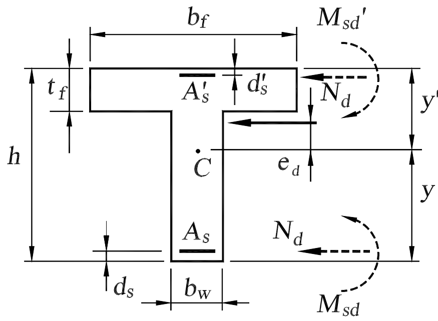
כאשר $x_{max} > t_f$:

$$A_s = A_s' + \frac{\lfloor (b_f - b_w)t_f + b_w\ x_{max} \rfloor f_{cd}}{f_{sd}} - \frac{N_d}{f_{sd}} \geq A_{s,min} \tag{5.30}$$

בכל מקרה כל כמויות הזיון המינימליות מחושבות לפי החתך הפעיל של הדופן, כלומר – $b_w d$ (כפולה אם החתך קמץ ו פי 1.5 אם החתך ריש לפי [1]).

<u>5.4.2.2 חתך קמץ בלחיצה באקסצנטריות קטנה</u>

חתך קמץ בלחיצה באקסצנטריות קטנה נתון בציור 5.10 . קו פעולת הכוח יועתק שוב אל ציר הזיון בצד המתוח – $\boldsymbol{A_s}$ ויתווסף מומנט $\boldsymbol{M_{sd}}$ לפי נוסחה (5.27). הזיון בצד הלחוץ $\boldsymbol{A_s'}$ יחושב לפי נוסחה (5.28).



ציור 5.10

לגבי הזיון בצד המתוח – $\boldsymbol{A_s}$, כמו בחתך כללי או בחתך מלבני, החישוב לפי נוסחאות (5.29) או (5.30) ייתן, קרוב לודאי, תוצאה שלילית – כלומר – ההנחה כי צד זה מתוח אינה נכונה. נעתיק את הכוח אל ציר הזיון $\boldsymbol{A_s'}$ בתוספת מומנט $\boldsymbol{M_{sd}'}$:

$$M_{sd}' = N_d\ [\ (y' - d_s') - e_d\ ] \qquad (5.31)$$

אם $\boldsymbol{M_{sd}' \le M_{cd,max}}$ יש לתת עבור הזיון בצד ה"מתוח" או ה"פחות לחוץ" $\boldsymbol{A_{s,min}}$. אם $\boldsymbol{M_{sd}' > M_{cd,max}}$ (מצב נדיר ביותר) יהיה צורך לתת שם זיון מחושב לפי:

$$A_s = \frac{M_{sd}' - M_{cd,max}}{(\ d - d_s'\ )\ f_{sd}} \ge A_{s,min} \qquad (5.32)$$

5.4.3 חתך קמץ במתיחה אקסצנטרית

5.4.3.1 אקסצנטריות גדולה

חישוב חתך קמץ במתיחה אקסצנטרית נערך בדיוק באותה הצורה כמו חישוב חתך בלחיצה אקסצנטרית, עם ההבדל כי כאן כוח המתיחה מעלה את כמות הזיון למתיחה (כמו בחתך כללי או מלבני).

לאחר חישוב מקום מרכז הכובד של החתך (y ו y') הכוח מועתק אל ציר הזיון המתוח A_s (ראה ציור 5.6) בתוספת מומנט M_{sd}:

$$M_{sd} = N_d\,[\,e_d - (\,y - d_s\,)\,] \qquad (5.33)$$

הזיון בצד הלחוץ A_s' יחושב לפי נוסחה (5.28).

הזיון בצד המתוח A_s יחושב לפי (5.34) , (כאשר $x_{max} \le t_f$) :

$$A_s = A_s' + \frac{b_f\, x_{max}\, f_{cd}}{f_{sd}} + \frac{N_d}{f_{sd}} \ge A_{s,min} \qquad (5.34)$$

אולם כאשר $x_{max} > t_f$ הזיון יחושב לפי:

$$A_s = A_s' + \frac{\lfloor (\,b_f - b_w\,)\,t_f + b_w\, x_{max} \rfloor\, f_{cd}}{f_{sd}} + \frac{N_d}{f_{sd}} \ge A_{s,min} \qquad (5.35)$$

5.4.3.2 אקסצנטריות קטנה

אם יובא בחשבון שחתך הבטון כלל לא משתתף בקבלת כוח המתיחה האקסצנטרי במקרה זה (אקסצנטריות קטנה) חישוב החתך זהה לחלוטין לזה של חתך כללי או מלבני. את מרכז הכובד של החתך מוצאים על מנת לקבוע למה מיוחסת האקסצנטריות אך מעבר לזה לא דרושים חישובים הכוללים פרטים של החתך (ראה משוואות (5.24) ו (5.25)).

דוגמאות חישוב ב'

דוגמה 5.8

נתון חתך קמץ אשר מידותיו לפי הציור, עשוי מבטון ב30 ופלדה מצולעת Φ . על החתך פועל כוח תכן בלחיצה 1300 kN באקסצנטריות של 0.5 m .

$\rho_{min}=\rho'_{min}= 0.004$. יש לחשב את הזיון הדרוש באיזור הלחוץ (אם דרוש) והמתוח.

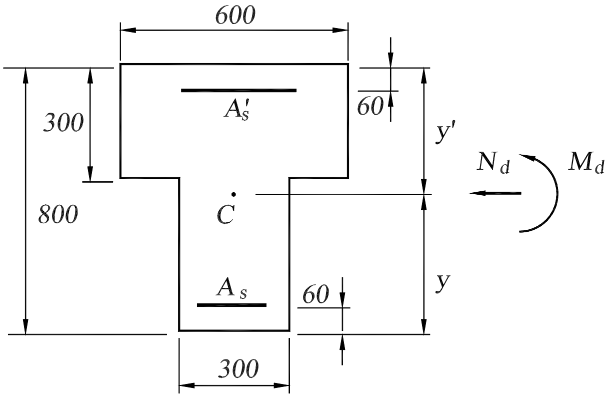
פתרון:

מציאת מרכז הכובד של החתך:

$$y = 60 + \frac{600\ 300(650-60) + 300\ 500(250-60)}{300\ 600 + 500\ 300} = 60 + 408 = 468\,\text{mm}$$

$y' = 800-468=332mm$ המומנט הסטטי S_0 של החתך הפעיל ביחס לציר הזיון

המתוח: $S_0 = (600-300)300(740-150)+300\ 740^2 = 135.24\ 106\ mm^2$



המומנט הסטטי המירבי של השטח הלחוץ $S_{c,max}$:

$$S_{c,max} = 0.64\ S_0 = 86.554\ 10^6\ mm^3$$

מומנט התכן המירבי המתקבל האמצעות הבטון $M_{cd,max}$:

$$M_{cd,max} = S_{c,max}\ f_{cd} = 86.554\ 10^6\ 13.0 = 1125\ kNm$$

$$M_{sd} = 1300\ [0.5 + (0.468 - 0.06)] = 1180\ kNm > M_{cd,max}$$

$$\Delta M_d = 1180-1125 = 55\ kNm \quad A_s' = 55/(0.68\ 0.35) = 231\ mm^2 < A_s'_{min}$$

בצד הלחוץ יינתן זיון מינימלי: $A_s' = A_s'_{min} = 0.004\ 300\ 740 = 888\ mm^2$

זיון זה מקבל ΔM_d: $\Delta M_d = 888\ 0.35\ (0.74 - 0.06) = 211.3\ kNm$

המומנט הנותר עבור הבטון: $M_{cd} = 1180 - 211.3 = 968.7\ kNm$

נניח כי האיזור הלחוץ כולו באגף: $\omega=1-[1-\dfrac{2\ 968.7 10^6}{600\ 740^2 13}]^{1/2}=0.26$

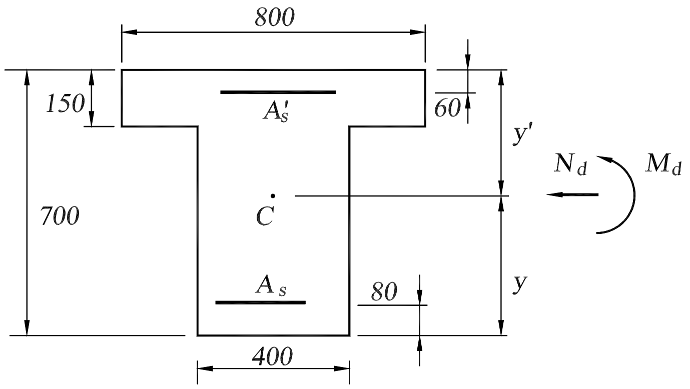
מאחר ו: $x = 0.26\ 740 = 193\ mm < t_f\ (=300\ mm)$ ההנחה התאמתה.

הזיון המתוח: $A_s = 888+\dfrac{600\ 193\ 13}{350}-\dfrac{1300}{350}=888+4301-3714=1475\,mm^2$

<u>דוגמה 5.9</u>

נתון חתך קמץ לפי הציור, עשוי בטון ב30 ומוטות זיון מצולעים Φ . על החתך פועל כוח תכן $1200\ kN$ בלחיצה ומומנט תכן $1320\ kNm$. $\rho_{min} = \rho'_{min} = 0.004$.

חשב את הזיון הדרוש.



<u>פתרון</u> :

יש למצוא ראשית את מרכז הכובד של החתך (מומנט התכן מוגדר לגביו) :

$$y = \frac{800\,150\,(700-75)+550\,400\,275}{800\,150+550\,400} = 400\,mm$$ ביחס לסיב המתוח ביותר

$y' = 700 - 400 = 300\ mm$ S_0 – המומנט הסטטי של החתך הפעיל :

$$S_0 = (800\text{-}400)\ 150\ (620\text{-}75) + 0.5\ 620^2\ 400 = 109.58\ 10^6\ mm^3$$

המומנט הסטטי של האיזור הלחוץ : $S_{c,max} = 0.64\ S_0 = 70.13\ 10^6\ mm^3$

המומנט המקסימלי שהבטון מקבל :

$$M_{cd,max} = S_{c,max}\ \ f_{cd} = 70.13\ 13.0 = 912\ kNm$$

המומנט ביחס לציר הזיון המתוח :

$$M_{sd} = 1200\ [1.10 + (0.400\text{-}0.08)] = 1704\ kNm > M_{cd,max}$$

הפרש המומנט ΔM_d אשר מתקבל באמצעות זיון לחוץ :

$$\Delta M_d = 1704 – 912 = 792\ kNm$$

הזיון באיזור הלחוץ :

$$A_s' = \frac{792}{(0.62-0.06)\,0.35} = 4041\,mm^2$$

נבדוק אם x_{max} באגף או מחוץ לאגף. נניח תחילה שהוא באגף :

$S_{c,max} = 70.13\ 10^6 = 800\ x_{max}\ (620 - 0.5\ x_{max}) \qquad x_{max} = 163\ mm > t_f$

כלומר – x_{max} הינו מחוץ לאגף.

$S_{c,max} = 70.13\ 10^6 = (800\text{-}400)\ 150\ (620\text{-}75) + 400\ x_{max}\ (620\text{-}0.5\ x_{max})$

מכאן: $x_{max} = 176\ mm$ והוא גדול מ t_f .

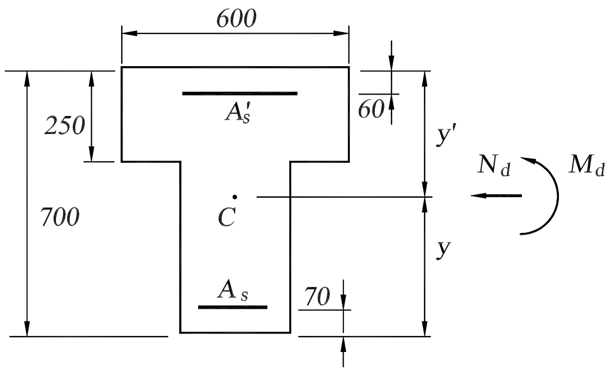
כעת אפשר לחשב את הזיון בצד המתוח:

$$A_s = 4148 + \frac{(800-400)150 + 400\ 176}{350} 13.0 - \frac{1200}{0.35} = 4041 + 4843 - 3429 = 5455 mm^2$$

__דוגמה 5.10__

נתון חתך קמץ במידות לפי הציור. החתך עשוי מבטון ב20 ומוטות פלדה מצולעת Φ .

$\rho_{min} = \rho'_{min} = 0.004$. על החתך פועל כוח תכן בלחיצה של 2500 kN באקסצנטריות של 100 ממ׳. חשב את כמויות הזיון הדרושות.



__פתרון:__

$f_{sd} = 350\ MPa \quad f_{cd} = 8.6\ MPa$ חישוב מרכז הכובד של החתך:

$$y = \frac{600\ 250\ (700-125) + 300\ 450\ 225}{600\ 250 + 300\ 450} = 409\, mm$$

$y' = 700 - 409 = 291\ mm$. חישוב המומנט הסטטי של החתך הפעיל S_0 :

$$S_0 = (600\text{-}300)\ 250\ (630\text{-}125) + 0.5\ 300\ 630^2 = 97.41\ 10^6\ mm^3$$

המומנט הסטטי של האיזור הלחוץ: $S_{c,max} = 0.64\ S_0 = 62.342\ 10^6\ mm^3$

המומנט המקסימלי שהחתך מקבל באמצעות הבטון:

$$M_{cd,max} = S_{c,max}\ f_{cd} = 62.342\ 8.6 = 536\ kNm$$

המומנט של הכוח סביב ציר הזיון המתוח :

$$M_{sd} = 2500\ [0.100 + (0.409 - 0.07)] = 1093\ kNm\ >\ M_{cd,max}$$

דרוש A_s' .

הזיון בצד הלחוץ :

$$A_s`=\frac{1093-536}{(0.63-0.06)0.35}=2792\,mm^2 > A_s`_{,min}$$

עבור חישוב הזיון בצד המתוח דרוש לדעת זרועות פנימיות. נניח כי $x_{max} \le t_f$

$S_{cf} = 600\ 250\ (\ 630 - 125) = 75.75\ 10^6\ mm^3 > S_{c,max}$ מכאן שההנחה נכונה -

מכאן ש : $x_{max} < t_f$ (בתוך האגף).

על מנת לקבוע את ω_{max} : $S_{c,max} = 62.342\ 10^6 = 600\ x_{max}\ (630\text{- }0.5\ x_{max})$

מכאן $x_{max} =\ 0.195\ m$.

בהנחה כי הזיון A_s מתוח נקבל:

$$A_s = 2792+\frac{536}{(0.63-0.50.195)0.35}-\frac{2500}{0.35}=-1475\,mm^2$$

בהנחה : A_s לחוץ נחשב את M_{sd}' :

$$M_{sd}'= 2500\ [0.291\text{–}0.10\text{–}0.06] = 327.5kNm$$

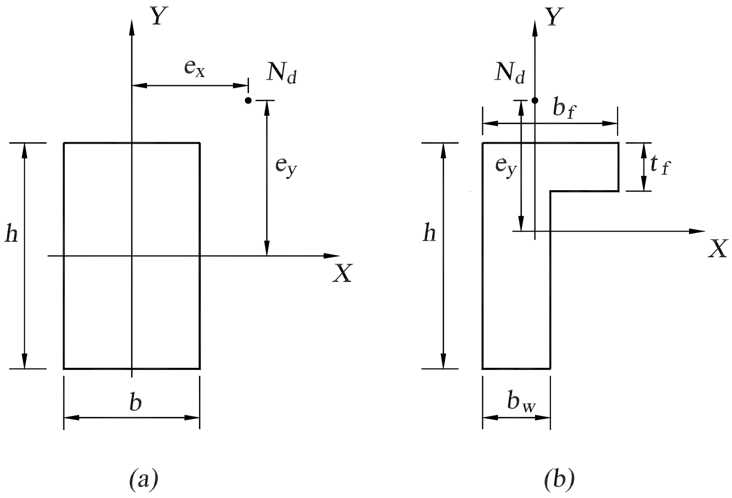
$M_{cd}'_{max} = 0.32\ 300\ 630^2\ 8.6 = 328\ kNm$ לפי זה לא דרוש A_s כלחוץ.

אי לכך יהיה $A_s = A_{s,min} = 0.004\ 300\ 630 = 756\ mm^2$

5.5 חתך מלבני בלחיצה באקסצנטריות דו צירית

אופטימיזציה של עיצוב מובילה לכך שמרבית החתכים של אלמנטים מבטון מזוין הינם בעלי צורה מרובעת. חלק גדול ביותר מן העמודים מבטון מזוין הינם בעלי צורה מלבנית. מצב הטרחה בו מתפתחת אקסצנטריות סביב שני צירים הינו מצוי ביותר. אי לכך ההתמודדות עם בעיית לחיצה אקסצנטרית סביב שני צירים (או כוח צירי עם כפיפה משופעת) הינה חלק חשוב מהתכנון של מבנים כשגרה יום יומית ויש לעמוד במטלה זו. גם כאן חייבים להזכיר כי כפיפה משופעת נוצרת לא רק כאשר לחתך שני צירי סימטריה ופועל מומנט סביב כל ציר בנוסף לכוח הצירי (ראה ציור 5.11a) אלא גם במקרה של חתך אחר, ריש למשל, עם אקסצנטריות סביב ציר אחד (ראה ציור 5.11b).

באלמנטים לחוצים, יותר מבכל אלמנט אחר, קיימת התופעה של עמיסה אשר שומרת על גודל אך מחליפה סימן, כגון זו הנוצרת עקב עמיסה בגין כוחות אופקיים רוח או רעידת אדמה). מסיבה זו אלמנטים לחוצים לעתים קרובות מתכננים עם זיון סימטרי, אשר עונה לצרכי עמיסה מחליפת סימן.



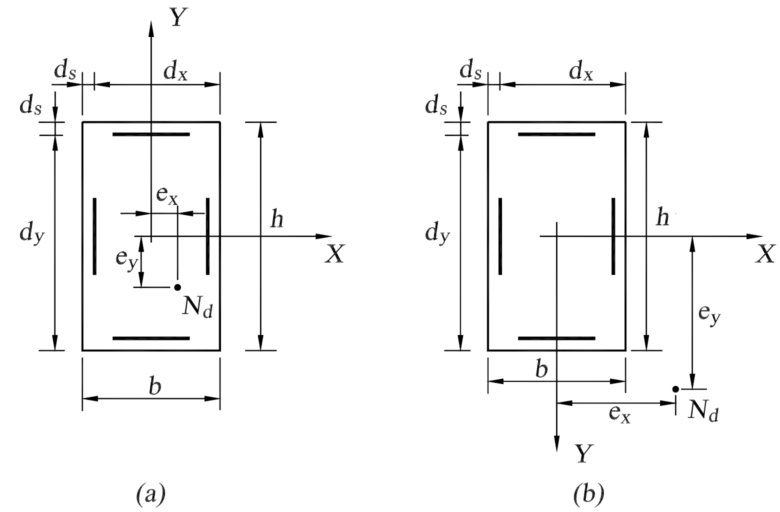
ציור 5.11

שיטת החישוב הטובה ביותר היא באמצעות מחשב, אשר מסייע לאופטימיזציה מהירה של הבעיה של הגדרת גודל ומיקום של איזור לחוץ לעומת איזור מתוח כך שיתקיימו שלושת תנאי שווי המשקל הדרושים: מומנט פנימי מול חיצוני ביחס לשני צירי הכפיפה וכן כוח לחיצה צירי. פרט לשימוש במחשב קיימים אמצעי עזר רבים, ביניהם טבלאות וגרפים עבור מקרים מצויים, שוב - עמודים בעלי חתך מלבני עם זיון סימטרי, בדרך כלל, אם כי קיימים עזרי תכנון גם לחתכים בהם כמויות הזיון הוגדרו אחרת מאשר פיזור שווה על פני כל הפאות.

בכל אופן דרושות גם שיטות חישוב "ידניות" שהן לרוב מקורבות. בדרך כלל חושפים מפתחי החישוב המקורב את מידת הקרוב הגלומה בשיטת החישוב המוצעת על ידם.

מבחינים בין שני סוגי אקסצנטריות דו צירית - קטנה וגדולה. האבחנה הזאת מלאכותית מאד והיא נובעת אך ורק מהטכניקות המקורבות לחישוב חתך תחת הטרחה כזאת אשר פותחו עם השנים (לגבי חישוב לא ליניארי באמצעות מחשב אין

לחלוקה זו משמעות רבה). לגבי חתך מלבני בפעולת כוח לחיצה באקסצנטריות קטנה, זו תיחשב קטנה כאשר קו פעולת הכוח בתוך החתך (ציור 5.12a) והאקסצנטריות תיחשב גדולה כאשר קו פעולת הכוח מחוץ לגבולות החתך (ציור 5.12b). שתי הפרוצדורות המקורבות לחישוב החתכים מוסברות להלן.



ציור 5.12

5.5.1 חישוב חתכים מלבניים לפעולת כוח לחיצה באקסצנטריות דו צירית קטנה

ההגדרה של חתך מלבני בפעולת כוח צירי באקסצנטריות דו צירית קטנה ניתנה בציור 5.12a לעיל. הבעיה מוגדרת כך: פועל על החתך כוח לחיצה N_d באקסצנטריות e_y סביב ציר x (כלומר גורמת ל: $M_{dx} = N_d\, e_y$) ובאקסצנטריות e_x סביב ציר y (כלומר גורמת ל: $M_{dy} = N_d\, e_x$). האקסצנטריות נקבעה קטנה מאחר וקו פעולת הכוח בתוך תחום החתך.

חישוב תסבולת חתך נתון נתונה לפי הנוסחה:

$$\frac{1}{N_d} = \frac{1}{N_{dx}} + \frac{1}{N_{dy}} - \frac{1}{N_{d0}} \qquad (5.36)$$

בה: N_d - כוח התכן המבוקש (אותו החתך אמור לשאת באקסצנטריות המוכתבת)

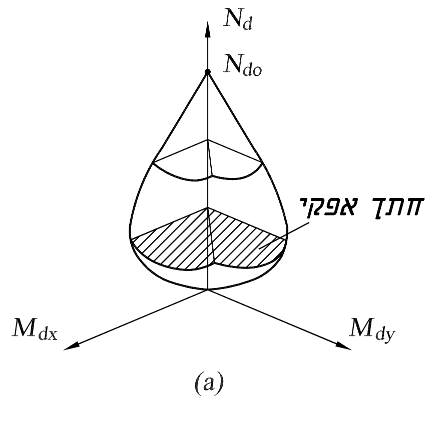
N_{dx} - תסבולת החתך הנתון בפעול עליו כוח צירי באקסצנטריות e_y הנתונה בלבד ואילו $e_x = 0$.

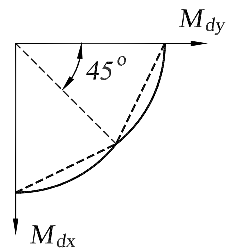
N_{dy} - תסבולת החתך הנתון בפעול עליו כוח צירי באקסצנטריות e_x הנתונה בלבד ואילו $e_y = 0$.

N_{d0} - כוח התכן בלחיצה צירית בלבד שהחתך מסוגל לקבל מוגדר על ידי :

$$N_{d0} = f_{cd}\, bh + A_s f_{sd}$$

החישוב הנ"ל פותח על ידי Bresler [29] והוא בנוי על מודל המתואר בציור 5.13a. בציור זה מתואר interaction diagram של הכוח N_d ומומנט כפיפה M_{dy} בכיוון אחד. בכיוון ניצב לו מתואר interaction diagram של הכוח N_d ומומנט כפיפה M_{dx} . כל אחת הדיאגרמות הללו מובנת וברורה - ראה סעיף 5.1 ציור 5.2 . כאשר מומנטי הכפיפה הינם אפס הכוח הצירי הוא כמוגדר עבור N_{d0} . הבעיה היא מה קורה במצבי ביניים. Bresler חישב את ערך האמצע (45^0) במדויק וקבע כי אם עבור ערכי ביניים אחרים יונח פרוס לפי קו ישר (הקו המרוסק בציור 5.13b) זו תהיה סטייה לא גדולה מערכים יותר מדויקים לפי הקו המלא בציור 5.13b . החישובים שלו מגובים על ידי נסויים והטענה היא כי הסטיות הן בגבולות עד 15% (עבור אקסצנטריות קטנה).





<u>ציור 5.13</u>

<u>דוגמה 5.11:</u>

נתון חתך במידות 350/500 ממ' עשוי בטון ב30 וזיון מצולע Φ. בפינות החתך יש מוט Φ20 mm ובנוסף על כל פאה יש עוד 2Φ16 mm . המרחק d_s=45 mm כלפי

כל שפה. על החתך פועל כוח לחיצה צירי N_d באקסצנטריות e_y=150mm ו e_x=100mm מה הכוח אשר החתך מסוגל לקבל באקסי' זו?

<u>פתרון:</u>

הפתרון לפי נוסחת ברסלר (5.36) מאחר והאקסצנטריות קטנה. כמות הזיון בחתך היא 8Φ16 ו 4Φ20. עבור הפתרון לפי נוסחה (5.36) דרוש לחשב את N_{dx} N_{dy} ו N_{d0}.

$$N_{d0} = [\ 13.0\ 350\ 500 + 2856\ 350\ ]\ 10^{-3} = 3275.6\ \text{kN}$$

N_{dx} הינה התסבולת לפעולת כוח אקסצנטרי באקסצנטריות e_x = 100 mm כלומר סביב ציר y ובהתעלם מהאקסצנטריות סביב הציר השני.

בחישוב סביב ציר y - $A_s = A_s' = 1028\ \text{mm}^2$ d_s=45 mm b=500 mm h=350 mm.

התסבולת מתקבלת כאשר מנוצל: $M_{cd,max} = 0.32\ 500\ 305^2\ 13.0 = 193$ kNm

וכן: $\Delta M_d = 1028\ 0.35\ 0.26 = 93.55$ kNm

ועוד: $M_{sd} = N_{dx}\ [0.10 + 0.175\text{-}0.045)] = 0.23\ N_{dx}$

התוצאה היא: $N_{dx} = 1246$ kN

N_{dy} הינה התסבולת לפעולת כוח אקסצנטרי באקסצנטריות e_y = 150 mm כלומר סביב ציר y ובהתעלם מהאקסצנטריות סביב הציר השני.

בחישוב סביב ציר y - $A_s = A_s' = 1028\ \text{mm}^2$ d_s=45 mm b=350 mm h=500 mm.

התסבולת מתקבלת כאשר מנוצל: $M_{cd,max} = 0.32\ 350\ 455^2\ 13.0 = 301.4$ kNm

וכן: $\Delta M_d = 1028\ 0.35\ 0.41 = 147.52$ kNm

ועוד: $M_{sd} = N_{dy}\ [0.15 + 0.25\text{-}0.045)] = 0.355\ N_{dy}$

התוצאה היא: $N_{dy} = 1265$ kN

להצבה בנוסחה (5.36) נקבל:

$$\frac{1}{N_d} = \frac{1}{1246} + \frac{1}{1265} - \frac{1}{3275.6}$$ ומכאן התשובה הסופית: $N_d = 777$ kN

5.5.2 חישוב חתכים מלבניים לפעולת כוח לחיצה באקסצנטריות דו צירית גדולה

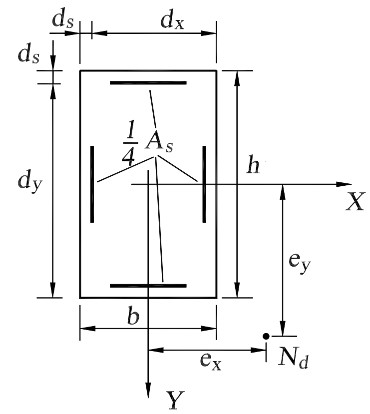
ההגדרה של חתך מלבני בפעולת כוח צירי באקסצנטריות דו צירית גדולה ניתנה בציור 5.12b לעיל. הבעיה מוגדרת כך: פועל על החתך כוח לחיצה $\boldsymbol{N_d}$ באקסצנטריות $\boldsymbol{e_y}$ סביב ציר $\boldsymbol{x}$ (כלומר גורמת ל: $\boldsymbol{M_{dx} = N_d\ e_y}$) ובאקסצנטריות $\boldsymbol{e_x}$ סביב ציר $\boldsymbol{y}$ (כלומר גורמת ל: $\boldsymbol{M_{dy} = N_d\ e_x}$). במקרה זה האקסצנטריות נחשבת גדולה מאחר וקו פעולת הכוח מחוץ לתחום החתך.

חישוב חתך להטרחה בעלת אופי כמוגדר לעיל מבוסס על פרוצדורה מקורבת שהופיעה בספרות ב 1982 , בתקן הבריטי [6] החל ב 1985, אולם אינה קיימת בתקנים אחרים. פרוצדורה זו והפרוצדורה לחישוב חתך בכפיפה משופעת (ראה 4.11) גזורות מאותה מיקשה עם כיול שונה.

הפרוצדורה קובעת כי את החתך לכפיפה משופעת אפשר (בגבולות אי דיוק מסוים) לחשב כחתך בפעולת כוח אקסצנטרי בכיוון אחד, כאשר המומנט "מעודכן". התיקון במומנט נעשה כאשר בעקבות מבחן המומנט בכיוון הדומיננטי מוגדל כך שייווצר פיצוי עבור הכיוון שלא הובא בחשבון.

כאשר (ראה ציור 5.14) מתקיים התנאי (המעיד כי הכפיפה סביב ציר x הינה הדומיננטית):

$$\frac{\boldsymbol{M_{dx}}}{\boldsymbol{d_y}} \geq \frac{\boldsymbol{M_{dy}}}{\boldsymbol{d_x}} \qquad (5.37)$$



<u>ציור 5.14</u>

יש לחשב את החתך לפעולת כוח צירי הפועל במרכזו בתוספת המומנט המוגדל $\boldsymbol{M_{dx,eq}}$:

$$M_{dx,eq} = M_{dx} + \beta_N \, M_{dy} \frac{d_y}{d_x} \tag{5.38}$$

כאשר לא מתקיים (5.37), כלומר :

$$\frac{M_{dx}}{d_y} < \frac{M_{dy}}{d_x} \tag{5.39}$$

יש לחשב את החתך לפעולת כוח צירי הפועל במרכזו בתוספת המומנט המוגדל $M_{dy,eq}$:

$$M_{dy,eq} = M_{dy} + \beta_N \, M_{dx} \frac{d_x}{d_y} \tag{5.40}$$

בנוסחאות לעיל : $M_{dx} = N_d \, e_y$ $M_{dy} = N_d \, e_x$ ו d_s הינו המרחק בין מרכז כובד הזיון האורכי לפאה הקרובה בכל כיוון.

בתקן הישראלי [1] הוגבל $M_{dx,eq}$ או $M_{dy,eq}$ ל $2\,M_{cd,max}$, תנאי שאינו מופיע במקור.

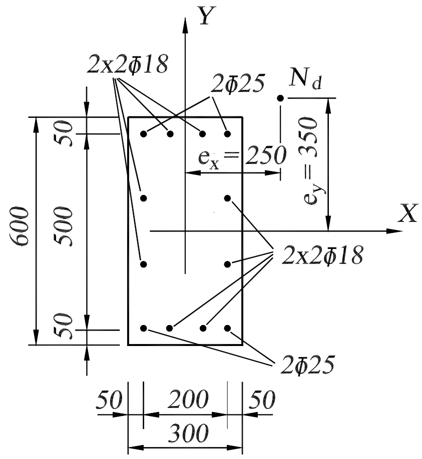
β_N - הינו מקדם התלוי בעוצמת הכוח הצירי ונתון בטבלה 5.2 להלן :

טבלה 5.2 - המקדם β_N

$N_d/bh\,f_{cd}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	≥1.2
β_N	0.75	0.80	0.85	0.90	0.86	0.80	0.74	0.68	0.62	0.50	0.38

דוגמה 5.12 :

נתון חתך במידות 300/600 mm עשוי מבטון ב40 ומוטות זיון מצולע Φ .
בכל פינה נתון מוט Φ25 mm ובנוסף לאורך כל פאה יש 2Φ18 mm . על החתך פועל כוח לחיצה באקסצנטריות : $e_x = 250$ mm ו $e_y = 350$ mm . מה כוח הלחיצה N_d אשר ניתן להעמיס על החתך באקסצנטריות כנ"ל?



<u>פתרון:</u>

M_{dx} מוגדר כ: $M_{dx} = N_d\ 0.35$ M_{dy} מוגדר כ: $M_{dy} = N_d\ 0.25$

לגבי המבחן מה יהיה הכיוון הדומיננטי: $M_{dx}/d_y = N_d\ 0.35 / 0.55 = 0.636\ N_d$

ו $M_{dy}/d_x = N_d\ 0.25 / 0.25 = 1.0\ N_d$

ברור אם כן ש: $M_{dx}/d_y < M_{dy}/d_x$ לכן המומנט בכיוון הקובע יהיה $M_{dy,eq}$:

$M_{dy,eq} = M_{dy} + M_{dx}\ \beta_N\ d_x/d_y$ מאחר ו N_d אינו ידוע - לא ידוע גם β_N לכן יש להניח ערך בשבילו ולבדוק ולתקן אם דרוש: תהליך נסוי ותהיה. בסיומו מתקבל:

מניחים $N_d = 520$ kN. $N_d / (bh\ f_{cd}) = 0.165$. עבור ערך זה $\beta_N = 0.834$

$$M_{dy,eq} = 0.25\ N_d + (0.834\ 0.35\ 0.25/0.55)N_d = 0.383\ N_d$$

המומנט ביחס ציר הזיון A_s יהיה M_{sd}:

$$M_{sd} = N_d\ [\ 0.383 + 0.15 - 0.05] = 0.483\ Nd = 251\ kNm$$

מאחר ו $M_{cdmax} = 210$ kNm הזיון הלחוץ A_s' יחושב עבור ההפרש(41 kNm) ונניח כי הזיון בצד הלחוץ לא מנוצל על מנת לבדוק לפי זיון מתוח מנוצל:

הזיון המתוח יהיה: $A_s = 586 + (0.32\ 250\ 600\ 17.5)/350 - 520/0.35 = 1500$

הזיון הקיים בפועל הינו 1480 ממ״ר וזו סטייה קטנה מאד.

התשובה היא: $N_d = 520$ kN באקסצנטריות הנתונה $e_x = 0.25$ m ו $e_y = 0.35$ m

5.6 חתך עגול בלחיצה אקסצנטרית

החישוב המקורב הנתון להלן מופיע בתקן הישראלי [1] אך לא מופיע בתקן אחר. הוא תקף עבור חתך עגול הנתון בלחיצה אקסצנטרית, כאשר הזיון מחולק בצורה אחידה על פני היקף החתך והוא כולל לא פחות מ 6 מוטות זיון אורכיים. סה"כ הזיון האורכי נימצא בתחום : $0.004\ A_g \leq \Sigma A_s \leq 0.02\ A_g$ כאשר A_g הינו שטח החתך העיגול ברוטו אך ללא הזיון בו. כפוף להנחות אלה החישוב נערך כך :

כוח הלחיצה הצירי N_d נתון על ידי הנוסחה :

(5.41) $\qquad N_d = \alpha_N A_g f_{cd} \qquad$ כפוף להגבלה : $0.1\ A_g f_{cd} \leq N_d \leq 1.0\ A_g f_{cd}$

ומומנט הכפיפה M_d נתון על ידי :

(5.42) $$M_d \leq D_s\ [\ \beta_s\ \Sigma A_s f_{sd} + \beta_c A_g f_{cd}\ ]$$

D_s - הינו קוטר העיגול העובר דרך מרכזי המוטות האורכיים ($D_s = D - 2\ d_s$).

המקדמים β_s ו β_c נתונים בטבלה 5.3 עבור ערכי α_N $(\alpha_N = N_d / A_g f_{cd})$:

טבלה 5.3 - ערכי β_s ו β_c כפונקציה של α_N

α_N	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
β_c	0.059	0.089	0.097	0.106	0.093	0.082	0.060	0.033	0.00	0.324
β_s	0.319	0.303	0.291	0.284	0.280	0.282	0.287	0.296	0.309	0.036-

דוגמה 5.13:

נתון חתך עגול בעל קוטר 600 mm והמרחק בין מרכזי מוטות הזיון האורכי למעטפת החיצונית - $d_s = 60$ mm . החתך עשוי מבטון ב40 והזיון האורכי כולל $12\Phi18$ mm . על החתך פועל כוח תכן צירי $N_d = 3000$ kN . מה מומנט התכן אשר החתך יכול לקבל?

פתרון:

$A_g = 282600\ mm^2$ ו $A_s = 3000\ mm^2$ לכן $A_s \sim 0.01\ A_g$. מתוך הקשר $N_d = \alpha_N A_g f_{cd} = 3000$ kN וכאשר $f_{cd} = 17.5$ MPa יהיה $\alpha_N = 0.61$.

מתוך הטבלה 5.3 נימצא כי : $\beta_s = 0.283 \quad \beta_c = 0.08$ ולכן M_d יהיה :

$$M_d = (600 - 2\ 60)\ [0.283\ 3000\ 350 + 0.08\ 282600\ 17.5]\ 10^{-6} = 333\ kNm$$

<u>דוגמה 5.14</u> :

מה החתך העגול הדרוש לקבלת מומנט תכן $M_d = 500$ kNm וכוח תכן בלחיצה $N_d = 2000$ kN ? החתך יהיה עשוי מבטון ב40 ומוטות זיון מצולעים Φ.

<u>פתרון</u> :

נניח חתך בקוטר D=670 mm ו d_s=60 mm. נניח $A_s=14\Phi18 = 3500\ mm^2$.

$A_g=352387\ mm^2$ ולכן $A_s \sim 0.01A_g$. כאשר f_{cd}=17.5 MPa יהיה $\alpha_{N} = 0.324$.

בהתאם לכך יהיו : $\beta_s = 0.289$ $\beta_c = 0.099$ ומומנט התכן המתאים לכך :

$M_d = (670\text{-}2\ 60)\ [0.289\ 3500\ 350 + 0.099\ 352387\ 17.5]10^{-6} = 530$ kNm

תוצאה זו מאד קרובה למומנט התכן הנדרש לכן ההנחות נשארות.