

15. תקרת צלעות

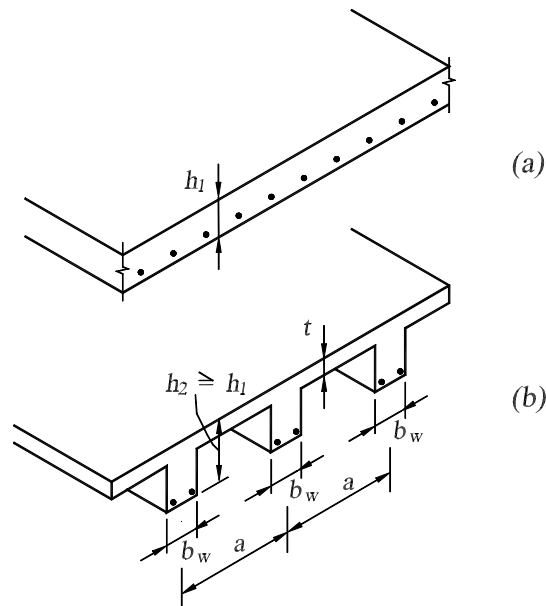
15.1 מבוא

בתכן טבלות מקשיות מתוחות בכיוון אחד נתקלים בשתי תופעות אופייניות לטבלות מסוג זה:

1. החתכים אינם מנוצלים לכפיפה ולגזירה. בבדיקת ניצול החתכים בכפיפה מסתבר לרוב כי ω קטנה (ולעתים קטנה מאד). בבדיקת כוחות גזירה לעתים רחוקות הם יתקרבו ל V_{RdI} - התסבולת לגזירה ללא זיון לגזירה.

2. עובי הטבלה (הגובה הסטטי) נקבע כמעט תמיד משיקולי אבטחת מצב שרות - אבטחת הגבלת הכפף לגבולות המותרים.

מסקנה בלתי נמנעת היא כי גובה החתך דרוש לאבטחת מצב שרות כאשר הבטון לא מנוצל, ולהיפך - ככל שגובה החתך עולה על מנת לספק את צרכי אבטחת הגבלת הכפף, חלקו של משקל הבטון המוסיף על העומס עולה ללא צורך. מכאן בא הרעיון הבסיסי בתקרת צלעות: לשמור על הגובה הדרוש להגבלת הכפף תוך הפחתה מירבית בכמות החומר (הבטון).



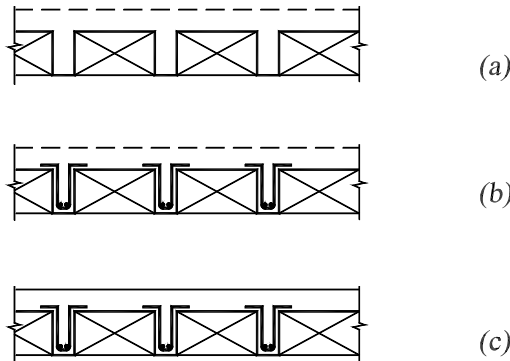
ציור 15.1

בציור 15.1a נתון חתך טבלה מקשית מתוחה בכיוון אחד. עוביה h_1 . מוטות הזיון מסודרים במרחקים שווים על פני רוחב הטבלה. בציור 15.1b נתונה האלטרנטיבה לתקרה המקשית אשר בציור 15.1a בצורת תקרת צלעות: אחוז נכבד מחתך הבטון הוצא, עובי הטבלה הדקה הפרוסה על כל השטח עליו ניפרסה הטבלה המקשית הינו כעת t . על כל יחידת רוחב a יש צלע ברוחב b_w ובגובה כולל h_2 . בדרך כלל, על מנת לשמור על קירבה במומנט האינרציה, יהיה $h_2 \geq h_1$. הזיון אשר היה מפוזר על פני רוחב a מרוכז כעת בתוך b_w . החתך דומה ליחידות קמץ צמודות זו לזו אשר רוחב האגף שלהן a רוחב הדופן b_w והגובה הכולל h_2 . החתכים קשורים ביניהם מונוליטית בעובי הטבלה הדקה t . בתמורה לעליה מסוימת בגובה הכולל של החתך הוצאה כמות בטון נכבדה.

במבנה הזה של התקרה היא איבדה משקל עצמי רב, חוזקה למומנט חיובי (חתך קמץ) שופר, ברם, נחלש משמעותית לכוח גזירה ולמומנט שלילי - הרוחב הפעיל עבור שניהם הינו b_w אשר מחליף את a בטבלה המקשית.

מבחינת הקשיחויות לאורך הטבלה (מתוחה בכיוון אחד!) נוצר מצב של שתי רמות קשיחות: קשיחות בצורת חתך קמץ (היא הקשיחות למומנט חיובי) והקשיחות של חתך מלבני (ברוחב b_w) לאותו איזור בו יש מומנטים שליליים וכן כוחות הגזירה גדולים. בחישוב הסטטי המצוי (ראה להלן) אין התחשבות בפערי קשיחות אלה. זה לא נעשה מתוך שיקול נבון אלא בדרך כלל מחוסר שיקול.

יצירת חללים נעשית בדרך כלל באופן הבא (ראה ציור 15.2):



ציור 15.2

א. מניחים תבנית. על התבנית מניחים את המילוי -בלוקים מלאים או תיבות או תבניות חלולות (ציור 15.2a).

ב. מרכיבים את כל הזיון - בצלעות ומעליהן (ציור 15.2b).

ג. יוצקים את הבטון - בתוך הצלעות ומעליהן (ציור 15.2c).

ד. מפרקים את התבניות החלולות אם הן רב שימושיות ונועדו לפירוק ושימוש מחדש.

מקובל היום לבצע תקרת צלעות עם טבלה תחתונה. בשנת 1996 הוכנס תיקון מיוחד ל [2] המכשיר את תקרת הצלעות עם טבלה תחתונה [2].

יש בעיה בסיסית עם תקרות צלעות בעלות טבלה תחתונה והיא - יצירת הטבלה התחתונה. הדרך אשר הוצגה בציור 15.2 נוחה ביותר ליצירת תקרה עם טבלה עליונה בלבד. יצירת טבלה תחתונה יכולה להיות לפי אחת משתי הדרכים: א. יציקת הטבלה התחתונה, הנחת הגופים, הרכבת הברזל ויציקת יתרת התקרה. זה דומה מאד למתואר בציור 15.2 עם הבדל אחד - יציקת הטבלה התחתונה באה לפני שלב א' שם. ב. הנחת הברזל התחתון, הנחת התבניות (אשר לא תפורקנה לעולם) במרחק מהתבנית שהינו עובי הטבלה התחתונה, הנחת יתרת הברזל (עליון וצלעות) וביצוע יתרת היציקה. בחלק גדול מן המקרים נתקלים בקושי לקבל טבלה תחתונה יצוקה בצורה מושלמת.

לתקרה עם טבלה תחתונה יש יתרון אחד בולט: הקשיחות שלה למומנט שלילי לא קטנה - גם למומנט שלילי יש לה חתך קמץ. החסרון - התבניות כלואות בבטון ולא ניתן יהיה לשחרר אותן (לכן הן חייבות להיות קלות) וגם לא ניתן יהיה לעצב תקרה עם חללים נאים נראים מלמטה. כמובן גם אין בקורת על שלמות היציקה סביב התבניות אשר נותרו חבויות בפנים.

החומר המוגש בפרק זה מצטט את התקן 466 חלק 2 [2] אשר תוצאות רביזיה שלו צפויות תוך מס' שנים. אפשר כי תיווצר אי התאמה מסוימת בין התקן העתיד לקום לבין הכתוב בפרק זה.

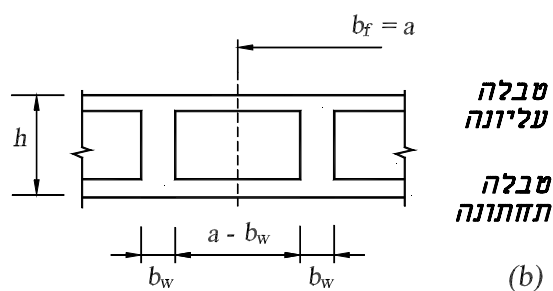
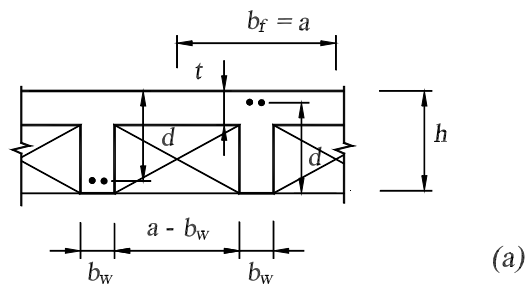
15.2 מידות ומיקום הצלעות

ביצירת תקרת צלעות מושקעת עבודה רבה לעומת טבלה מקשית. היום נוטים להשתמש בחומר לעומת עבודה (הנחשבת למרכיב בעייתי של העלות) אי לכך אם בעבר היתה נטייה לעבור לתקרת צלעות במפתחים לא גדולים (לדוגמה 4.5 עד 5 מ' ומעלה) הרי שהמפתחים ה"גבוליים" בין טבלה מקשית ותקרת צלעות גדלו. בנוסף - השימוש בטבלות חלולות טרומות ודרוכות התרחב והעמיק. מסיבות אלה ואחרות תקרת

צלעות פחות נפוצה. מצד שני תקרת צלעות מתוחה בכיוון אחד היא המבוא והיסוד לתכנון תקרת ערוגות (תקרה מצולבת עשויה צלעות מתוחות בשני הכיוונים) וכן לתקרת ערוגות ללא קורות. פרט לכך - יש עדיין מפתחים גדולים, על פניהם רוצים לגשר בתקרת צלעות, ובעיקר יש להיענות לדרישה של תחתית תקרה עשויה חללים מעוצבים ונקיים מצטלבים. משום כך יש חשיבות לדעת לעצב ולתכנן תקרת צלעות, בה העיקר נעוץ בעיצוב הצלעות. כפי שהובהר ב 15.1 חלק ממה שיינתן במיוחד בסעיף זה קשור ב [2] אשר יעבור רביזיה תוך מס' שנים.

15.2.1 מידות הצלע בחתך

ציור 15.3a כולל את כל הדרוש כדי להגדיר צלע (בחתך). רוחב הצלע הינו b_w והוא נתון במרחקים a מציר לציר צלע. הטבלה העליונה בעובי t_f . עובי הטבלה הכולל - h . נוצר באופן כזה כל a מטרים חתך קמץ אשר רוחב הדופן שלו - b_w , רוחב האגף שלו b_f , עובי האגף - t_f והגובה הכולל - h (גובה פעיל d). בציור 15.3b נתונה תקרה עם טבלה תחתונה.



ציור 15.3

לפי [2]:

הטבלה העליונה - t_f , צריכה להיות בעובי הגדול מבין: 50 מ"מ או $(a-b_w)/12$.
הטבלה התחתונה - צריכה להיות בעובי הגדול מבין: 40 מ"מ או $(a-b_w)/14$.
אין סיבה מיוחדת מדוע הטבלה התחתונה לא תהיה בעובי העליונה, מה גם שהקושי ביציקה מתחת למילוי עולה כאשר רוצים לקבל טבלה תחתונה דקה יותר.
המרחק החופשי בין הצלעות $(a-b_w)$ - לא יעלה על 750 מ"מ.
רוחב הצלעות b_w - לא יפחת מ 80 מ"מ.
עובי התקרה - לא פחות מהדרוש לחוזק ולא פחות מהדרוש לאבטחת מצב שרות (הגבלת הכפף) בהתאם לחוקת הבטון [1] פרק 6.

השיקול לגבי הטבלה העליונה נובע ממסי גורמים. ראשית חשיבותה כחלק בלתי ניפרד מן הצורך להקשיח את התקרה במישורה על מנת לקבל כלי לחלוקת כוחות אופקיים במבנה (ראה פרק 8). שנית - הגבלת המידות כפי שניתנה על ידי התקן [2] מאפשרת לא לחשב את הטבלה הדקה הזאת אלא להניח כי עם הזיון המועט אשר ניתן בה (הזיון המחלק בטבלה העליונה) ניתן יהיה לקבל עומסים, כולל עומסי מחיצות מצויות (לא עומסים קוויים חריגים) ללא חישוב מיוחד.
כאשר המרחק הנקי בין הצלעות גדול מהמותר לפי התקן - יש לחשב את הטבלה הדקה הני"ל כטבלה בעובי t_f הנשענת על דפנות הצלעות. אז עובייה יצטרך להיות גדול יותר והיא תיזקק לזיון מחושב.
הטבלה העליונה משמשת גם עוד מרכיב בחלוקת העומסים בין הצלעות.
השיקול לגבי רוחב הצלע המינימלי הוא: לאפשר יציקה אשר תמלא היטב את הצלע ולאפשר הכנסת מינימום שני מוטות זיון וחישוב מינימלי עם כסוי בטון. אם לדון לפי שיקולים אלה הרוחב 100 מ"מ הינו מינימום סביר יותר מאשר 80 מ"מ כנדרש בתקן.
טבלה תחתונה ניתנה, כאמור, לענות על כמה מקרים חריגים בבניה. היתרון של השגת חתך קמץ גם המומנט השלילי אינו כל כך מכריע אם יובא בחשבון שגם חתך קמץ אינו תורם דבר לתסבולת לגזירה - b_w נשאר עדיין הקובע.

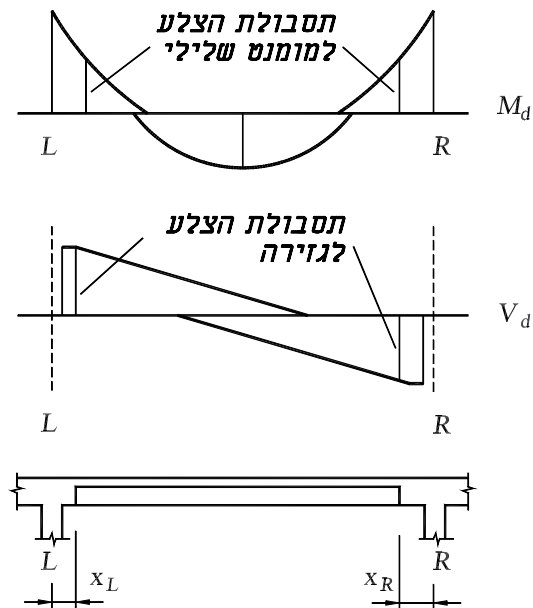
15.2.2 קביעת פרופיל הצלע במיפתח

תכנון הצלע כך שבחתך עם הדופן בלבד b_w תוכל לענות לכל צרכי המומנטים (חיובי ושלילי) וכוח הגזירה, הינו תכנון בזבזני אשר אינו מביא לניצול את יתרונות החתך המוצע. בציור 15.4 נתון שדה פנימי של תקרת צלעות עם מעטפת המומנטים

ועם מעטפת כוחות הגזירה הנובעים מחישוב סטטי מפורט אשר על תקרה זו לענות על צרכיהם.

למומנט חיובי התקרה תוכל להנות מחתך קמץ. אם השדה נימשך בתחום המומנט החיובי כוח הגזירה בדרך כלל לא גדול. לכל סמך יש רוחב מסוים. יתירה מכך - המילוי לעולם לא צריך להיות מתוכנן להגיע לקצה הסמך בגלל אי דיוקים בביצוע. יש להרחיק אותו מקצה הסמך.

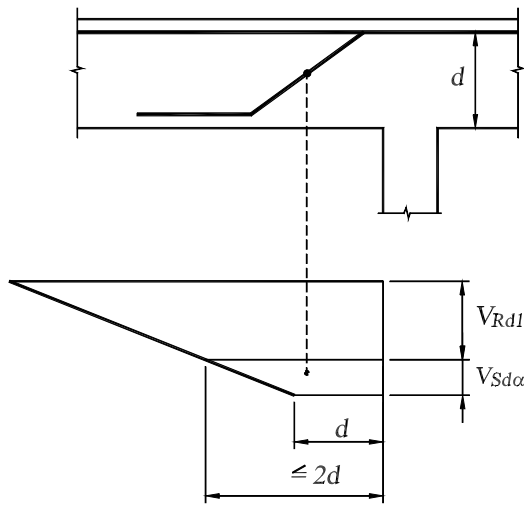
בתחום **המומנט השלילי** בו גם כוח הגזירה גדול יותר, עומד לרשות המתכנן רוחב b_w לגזירה. אם אין טבלה תחתונה - זהו הרוחב העומד לרשותו גם למומנט שלילי. על המתכנן לבדוק לפי התסבולת לגזירה של הצלע ולפי התסבולת לכפיפה (מומנט שלילי) מהם המרחקים x_L ו x_R בהם הוא חייב להתרחק ממרכז הסמך השמאלי והימני בהתאמה.



ציור 15.4

התסבולת לכפיפה תהיה $M_{cd,max} = 0.32 b_w d^2 f_{cd}$. זיון לחוץ לא רצוי להביא בחשבון כי זה מחייב חישוקים וגם חישוקים צפופים (במרחקים שלא עולים על 16 קטרים) דבר מאד לא מקובל בתקרות צלעות.

התסבולת לגזירה - צריכה לידון מכמה זוויות. בצלעות קטנות - צרות ובעלות גובה נמוך, קשה לתת זיון לגזירה. כאשר רוחב הצלעות 180-200 מ"מ ויותר ובהתאם לזה גם הגובה גדול, ניתן לתת חישוקים בדומה לקורה (ראה סעיף 11.8). אין לתת חישוק פתוח ללא מוטות ישרים בקצהו ונשען על המילוי. חישוק זה לא יכול לקבל גזירה. אי לכך יש להבחין בין תקרות צלעות בעלות צלעות בהן ניתן לתת זיון לגזירה ואז תסבולת הצלע כתסבולת כל קורה לגזירה. כאשר אין חישוקים - יש להסתפק ב V_{RdI} - תסבולת הצלע ללא זיון לגזירה. מאחר וגזירה בצלעות היא קושי לא קטן, אפשר להרחיק לכך לכיוון הבא (הותר ב [2]): אם אורך התחום בין V_{RdI} ובין כוח הגזירה העולה עליו בסיום הצלע אינו עולה על $2d$,



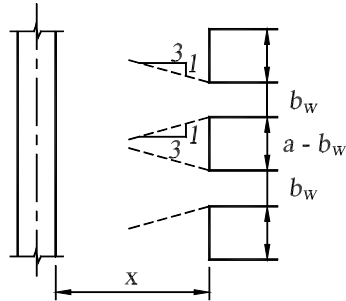
ציור 15.5

כאשר d הגובה הפעיל (ראה ציור מס' 15.5), ניתן להניח כי אם ניתן בו מוט זיון משופע יוכל להיווצר בו משולש כוחות לקבלת גזירה. לכן מותר אף כי אין זיון לגזירה בצורת

חישוקים, לתת כסוי לגזירה על פני אורך כנ"ל, בתנאי שאינו עולה על $2d$, באמצעות מוט משופע (אחד - אין סיכוי כי אפשר יהיה לתת יותר מאחד).

15.2.3 הרוחב הפעיל בסמוך לסמך

כאשר יש להרחיק את המילוי מקצה הסמך (ראה x_L , x_R בסעיף 15.2.2) נוצר מצב בו אפשר לנצל יותר מאשר רוחב הצלע המצומצם b_w אולם בהדרגה. ציור 15.6 בא לתאר כיצד יש לנהוג.

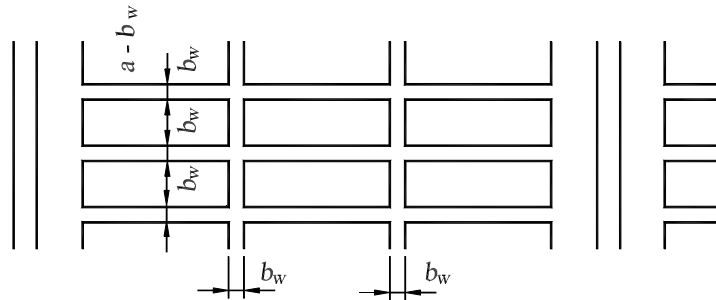


ציור 15.6

לפי ההסבר שבסעיף 15.2.2 הוחלט להפסיק את הצלעות ברוחבן הרגיל (b_w) במרחק x מקצה הסמך. לפי נוהג בן שנים רבות מותר להרחיב את הרוחב בו ניתן להתחשב בהדרגה, בשיפוע אופקי של 1:3. משמעות הדבר היא שלרוחב b_w מתווסף רוחב נוסף בשיעור $2x/3$. אם x גדול מספיק - מקסימום הרוחב אשר יהיה ניתן לניצול יגיע עד a (בכל מקרה הרוחב לא יוכל לעלות על a). אם x קצר - הרוחב לא יוכל להגיע ל a . ההנחה עבור השיפוע 1:3 הינה בת שנים רבות והרקע שלה כניראה אמפירי.

15.3 צלעות מחלקות

הטבלה המקשית הדקה בעובי t_f אינה יכולה לבדה לשמש כמחלק עומסים לא מחולקים שווה על פני רוחב התקרה. אין בה את הקשיחות (עובי) ולא את הזיון הדרוש לשם כך. האלמנט העיקרי הנועד לכך הן הצלעות המחלקות (ראה ציור 15.7).



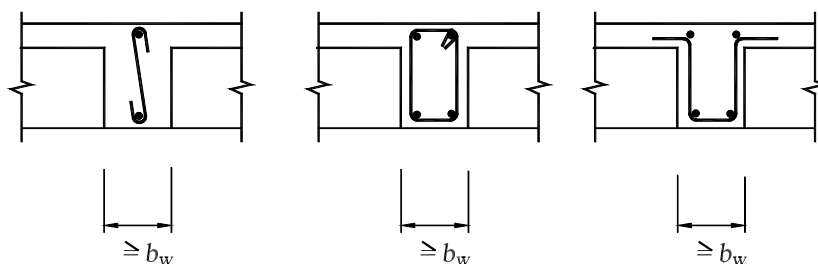
ציור 15.7

צלע מחלקת היא צלע בעלת חתך צלע רגילה ובעלת כמות זיון ככמות הניתנת באמצע השדה של תקרת הצלעות (למען האחידות הגדולה מבין כמויות הזיון בשדות קובעת). צלע מחלקת קובעים לפחות 2 או יותר בכל שדה והיא ניתנת בניצב לצלעות הרגילות המתוחות בכיוון אחד. תפקידה לגרום לכך שעומס מרוכז או עומס מחולק על שטח מצומצם מן השדה יתחלק על מספר גדול של צלעות. היא פועלת כמקשר בין צלעות אשר הסמכים שלהם רחוקים ולכן נוצר אפקט של מצע אלסטי הגורם לגל מומנטים בצלע המחלקת בו המקסימום מתחת לעומס וערכי המומנטים הולכים ודועכים לשני הכיוונים.

הדבר מצריך זיון עליון ותחתון. מסיבה זו כמות הזיון שהוזכרה לעיל מתחלקת בין עליון ותחתון. בצלע מחלקת (ראה ציור 15.8) יהיה תמיד חישוב אשר תפקידו אינו לקבל גזירה אלא לשמור על מיקום הזיון כעליון ותחתון. אפשר שיהיו בה רק שני מוטות והחישוב יהיה לולאה כפולה או אם חתכה גדול יותר - יהיו בה ארבעה מוטות, עם חישוב מלבני סגור. הזיון האורכי של הצלע יהיה רצוף וללא הפסקות (כמובן אפשרי עם חפיות).

ככל שהעומס השימושי גדול יותר דרושות צלעות מחלקות רבות יותר. המלצת התקן היא: המירווחים בין הצלעות המחלקות לא יעלו על 3 מ' ובכל מקרה תהיה לפחות צלע מחלקת אחת בכל מיפתח שאורכו גדול מ 3 מ'. כאשר $q_k > 3 kN/m^2$ המרחקים הנ"ל לא יעלו על 2.5 מ'. כאשר קיימת טבלה מקשית תחתונה התקן מתיר שהמירווחים לא יעלה על 6 מ' ואם $q_k > 3 kN/m^2$ המירווחים לא יעלו על 5 מ'. נראה כי המירווחים הנ"ל גדולים מדי ומיפתחים העולים על 3 מ' בתקרת צלעות אין. המירווחים הנראים סבירים הם 2-2.5 מ' וכאשר $q_k > 3 kN/m^2$ רצוי כי המירווחים

לא יעלו על 2 מ'. ביחס לתקרה עם טבלה תחתונה בנוסף לעליונה, רצוי כי המירווחים לא יעלו על 4 מ' בשום מקרה.



ציור 15.8

הצלע המחלקת הינה מרכיב שאין להפריז בחשיבותו בתקרת צלעות. העדר צלעות מחלקות יכול להעמיד בסכנה ממשית את תקרת הצלעות עקב העדר כל אפשרות להטיל על הטבלה הדקה בעובי t_f את התפקיד שממלאות הצלעות המחלקות.

15.4 חישוב סטטי של תקרת צלעות

החישוב הסטטי הוא זה עבור אלמנט מתוח בכיוון אחד. כל השיטות המפורטות בפרק 8 המתאימות לאלמנט מתוח בכיוון אחד מתאימות גם לתקרת צלעות. יוזכר שוב שאף כי ברור שאין הקשיחות שווה לכל האורך אין מתחשבים בשוני בין הקשיחויות לאורך התקרה. אחת הסיבות היא שההבדל אינו בין חתך קמץ לחתך מלבני אלא בין חתכי קמץ אשר בחלקם סדוקים בחלק התחתון (בשדה במומנט החיובי) וחלקם בפן העליון - מעל הסמך במומנט השלילי. בראייה כזאת ההבדל לא כל כך חמור. אבל זה נכון רק באותם איזורים בהם יש צלעות. החל במרחק מסוים מקצה הסמך אין כלל צלעות וקיים מלוא עובי התקרה.

בתקרת צלעות (ומאוחר יותר - בתקרת ערוגות ובתקרת ערוגות ללא קורות) חייבים להניח את מבנה התקרה (מידות הצלעות, אופי וחומר המילוי וכו') מפני שהמבנה קובע את המשקל העצמי. אי לכך התהליך במידה מסוימת איטרטיבי: מניחים מבנה, מחשבים עומס, עורכים חישוב סטטי, בודקים אם המבנה של הצלעות שהונח עונה לצרכי החישוב הסטטי. אם לא, מתקנים את ההנחה על מבנה הצלעות ועוברים את כל השלבים מחדש. כאשר המבנה יתאים אפשר לערוך את חישוב הזיון.

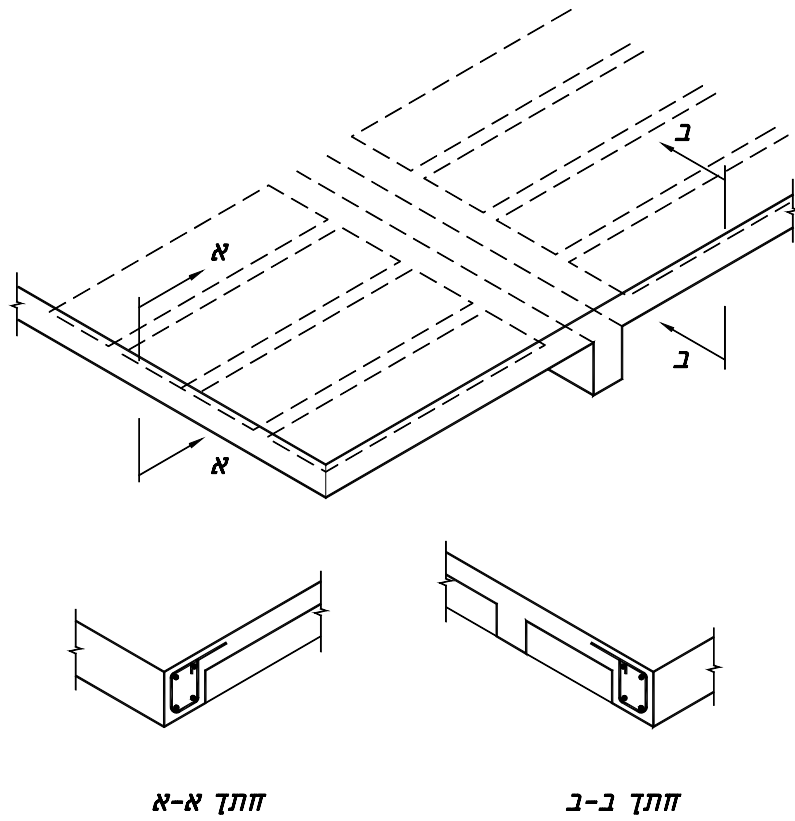
אפשר לערוך את החישוב לרוחב 1.0 מטר או לרוחב יחידת צלע, כלומר - a .
מה שחשוב הוא להיות בטוח כי הצלעות נבחנות לעמידה בערכים סטטיים המתאימים לרוחב יחידת צלע, כלומר a , וכי חישוב הזיון נעשה לצלע.
יש מידה מסוימת של רדיסטריבוציה אשר נעשתה, אף אם לא מביאים אותה בחשבון. זו הוזכרה למעלה והיא הרדיסטריבוציה הנובעת מכך שבסביבות הסמכים מלוא עובי תקרת הצלעות קיים (הצלעות הופסקו במרחק מה מקצה הסמך) בו בזמן שבשדה קיים רק חתך חלקי - בחלקו מלבני ובחלקו של הקמץ. הבדל זה בין הקשיחות לא הובא בחשבון ולכן ללא הבאתו בחשבון האיזור ליד הסמך למעשה מצוי במצב כאילו נעשתה רדיסטריבוציה המפחיתה את המומנטים מעל הסמך.
יתר השלבים, כולל חישוב הזיון, דומים לשלבי הבדיקה והחישוב של קורה.

15.5 מידת ההעתקה

מידת ההעתקה של קו כוח המתיחה, בכל אלמנט וגם כאן, תלויה לחלוטין בזיון לגזירה. אם אין זיון לגזירה - לפי [1] מידת ההעתקה תהיה $1.0 d$. אם יש זיון חישובים מידת ההעתקה תהיה $0.5-0.75 d$. גישה זו רואה את תקרת הצלעות ללא זיון לגזירה כטבלה מתוחה בכיוון אחד ללא זיון לגזירה. לחליפין - עם זיון לגזירה (מינימלי או יותר) רואים את הצלע כאילו היא קורה.

15.6 הגנת היקף הטבלה

בטבלה מקשית מתוחה בכיוון אחד ניתנו הנחיות להגנת היקף הטבלה במקביל למיפתח וכן שפת זיז, בזיון (מוטות אורכיים וחישובים). הגנה דומה בתקרת צלעות חשובה עוד יותר עקב מבנה התקרה - חוזק בכיוון המפתח (הוא כיוון הצלעות) וחולשה יחסים בניצב להן.



ציור 15.9

בציור 15.9 ניתן עיקר ההנחיות בענין זה עבור תקרת צלעות. חתך א-א הינו קצה הזיז אליו מגיעות כל הצלעות חתך זה חייב צלע מחלקת חזקה על מנת לאחד את היקף התקרה וגם לגרום לשיתוף מירב הצלעות בעת עומס לא רצוף או בודד על קצה הזיז. חתך ב-ב מראה את הצלע הקיצונית בשדה. צלע זו משמשת חיזוק היקף הטבלה, פרט לעובדה כי אם יופעל עליה עומס בודד או מרוכז יותר והיא בקצה הטבלה יש לה מעט צלעות שכנות עמן היא יכולה להתחלק. מסיבה זו צלע זו צריכה להיות בעשרות אחוזים חזקה יותר משכנותיה.

בשני החתכים - א-א ו ב-ב יש לתת חישוק רבוע עם ענף נכנס לתוך הטבלה

הדקה בעובי t_f באורך לפחות $1.5 d$. רצוי כי החישוקים יהיו לא פחות מ $\phi 6 @ 200$ mm . בחתך א-א רצוי שיהיו 4 מוטות זיון ישרים, עם חפיות. בחתך ב-ב רצוי שיהיה 1.5 פעמים זיון צלע רגילה לפחות וכן כזיון עליון משלים בפינות החישוק, לא פחות מ $2\Phi 10$.