

היכן הסדקים בהגדרת "בטון סדוק"?

סקירה ביקורתית של הבסיס התקני לברירת המחדל של בטון סדוק בתכן עוגנים מותקנים בדיעבד, והנימוק לסיווג הסתברותי

איב דה לטואר

מהנדס מבנים, [אדית בע"מ](mailto:adit@adit.org.il), ישראל

www.adit.org.il

תקציר

תקן EN 1992-4 מתיר לתכנן עיגון עבור בטון לא סדוק רק כאשר ניתן להוכיח את היעדר הסידוק לכל עומק העיגון; בהיעדר הוכחה כזו הבטון נחשב סדוק. בפועל ההוכחה כמעט שאינה נעשית, והנחת הסידוק התקבעה כברירת מחדל כמעט-אוניברסלית. ההשלכה התכנונית משמעותית: התסבולת האופיינית לכשל חרוט בטון בבטון סדוק היא כ-70% מן הערך בבטון לא סדוק, ובעוגנים כימיים תסבולת ההידבקות המוצהרת לבטון סדוק היא בדרך כלל בין מחצית לשני שלישים מן הערך הלא סדוק. מאמר זה בוחן האם ברירת המחדל מידתית ביחס לראיות התומכות בה. מפותחות בו חמש טענות. ראשית, EN 1992-1-1 ו-EN 1992-4 כאחד מגדירים את סדק הייחוס לפי רוחבו (0.3 מ"מ) ושותקים לחלוטין בנוגע לעומקו, כך שסדק שטח רדוד וסדק החוצה את כל החתך מטופלים באופן זהה — אף שהשפעתם על עוגן שקוע אינה זהה כלל. שנית, סדק כפיפה אמיתי הוא טריזי: רחב ביותר בפני המתיחה ונסגר לאפס בקצהו, ולכן סדק של 0.3 מ"מ בפני השטח צר בהכרח בכל עומק שמתחתיו — בעוד שדגם הבדיקה לאישור המוצר מסודק ברוחב אחיד בקירוב לכל עובי האלמנט. שתי הגיאומטריות אינן יכולות להתקיים יחד. שלישית, מעולם לא נבדק הקשר בין המאמץ הדרוש לפתיחת סדק של 0.3 מ"מ לעומק נתון לבין התפלגות עומקי העיגון הנהוגים, ובעיגון הנטען בגזירה טהורה העוגן אינו תורם דבר לפתיחת הסדק. רביעית, מחקרים ניסויים עדכניים על תרומת הזיון המשלים והזיון העילי מראים כי מודל החרוט שבבסיס הסיווג מתעלם ממנגנון תסבולת הקיים באופן שיטתי באלמנטים אמיתיים. חמישית, דוגמה מספרית מתוך הערכה טכנית אירופית תקפה מדגימה את אותו דפוס בבדיקת כשל ה־pry-out, שבה המקדם הייחודי למוצר המוצהר מציב את תסבולת ה־pry-out באופן קבוע מעל תסבולת הפלדה של העוגן עצמו — כך שאופן הכשל שהמקדם מכמת אינו ניתן כלל להשגה במוצר שאותו הוא מתאר. המאמר מציין גם, כמגבלה של בסיס הראיות ולא כהאשמה, שרוב מוחלט של בדיקות העוגנים ממומן על ידי יצרנים שהאינטרס המסחרי שלהם משרת דווקא את הסיווג המחמיר. מוצעת מסגרת החלטה מבוססת-קריטריונים במקום ברירת המחדל הבינארית, לצד הצהרה מפורשת של גבולותיה: בתכן סייסמי, ובכל מקרה של ספק אמיתי, הבטון נותר סדוק.

מילות מפתח: עוגנים מותקנים בדיעבד; בטון סדוק; EN 1992-4; כשל חרוט בטון; עומק סדק; זיון משלים; תכן הסתברותי; גיאומטריית סדק; טעינה בגזירה; כשל pry-out; הנחיית BBA מס' 39; טכנולוגיית עיגון

1. מבוא

סיווג חומר הבסיס כסדוק או כלא סדוק הוא מן ההחלטות המוקדמות ביותר בתכן עיגון מותקן בדיעבד, ומן המשמעותיות שבהן. היא מתקבלת עוד לפני בחירת העוגן, היא מגבילה את הבחירה שלאחריה, והיא מחלחלת ישירות לעומק העיגון, למרחקי הקצה והמרווחים, למספר נקודות החיבור ובסופו של דבר לעלות. מניסיונו המסחרי של המחבר, ההפרש בין שני הסיווגים מכפיל באופן שגורתי את עלות העיגון פי שניים עד ארבעה, משום שאת התסבולת המופחתת יש להשיב באמצעות קטרים גדולים יותר, עומקי עיגון עמוקים יותר, מערכי עוגנים צפופים יותר, או מעבר ממערכת מכנית למערכת כימית.

אין מחלוקת על עצם התופעה הפיזיקלית. העובדה שסדק העובר דרך אזור העיגון מפחית את כושר הנשיאה של העוגן הודגמה שוב ושוב, היא מובנת היטב מבחינה מכנית, והיא מוטמעת במסגרת התכן והאישור האירופית. השאלה הנשאלת כאן שונה. היא איננה מהי תסכולת העוגן המותקן בתוך סדק, אלא מהי ההסתברות שעוגן ביישום רגיל אכן יותקן בסדק מן הסוג שהתקנים מתארים, ובעומק שהם מניחים במשתמע. השאלה הראשונה נחקרה בהרחבה. השנייה כמעט שלא נשאלה.

ההבחנה חשובה משום שהמסגרת האירופית ממירה מציאות רציפה והסתברותית למתג בינארי, ולאחר מכן קובעת את מצב ברירת המחדל של אותו מתג בצד השמרני. שמרנות כשלעצמה אינה פסולה ולעיתים קרובות היא נכונה. שמרנות המוחלת באופן גורף, בעלות ניכרת, על בסיס תנאי שתדירות התרחשותו בפועל מעולם לא כומתה — היא עניין אחר, וראויה לבחינה.

מבנה המאמר: פרק 2 מציג את מה שהמסמכים התקניים אומרים בפועל, ומזהה את מה שהם משמיטים באופן בולט. פרק 3 משחזר קריאה הסתברותית מפורשת של אותה בעיה מתוך הנחיית ה־BBA הבריטית. פרק 4 עוסק במקורו של בסיס הראיות. פרקים 5 ו־6 בוחנים, בהתאמה, היכן נוצרים סדקים באלמנטים אמיתיים ומתי סדק אכן קובע את אופן הכשל. פרק 7 בוחן את בדיקת ה־pry-out כדוגמה מעשית לאותו דפוס. פרק 8 מציג השערה, המסומנת ככזו במפורש, בדבר תפקידו של סוג העוגן עצמו ביצירת הסדק. פרק 9 מציג מסגרת מבוססת־קריטריונים במקום ברירת המחדל הבינארית, ופרק 10 מציג את מגבלות הטיעון.

2. המסגרת התקנית

2.1 רוחב הסדק: EN 1992-1-1

EN 1992-1-1, סעיף 7.3.1, קובע בקרת סידוק בבטון מזוין באמצעות ערך גבולי לרוחב הסדק המחושב w_{max} , שהערך המומלץ עבורו במחלקות החשיפה הנפוצות הוא 0.3 מ"מ בצירוף העומסים המעין־קבוע. זהו קריטריון שימושיות שעניינו עמידות ומראה. זוהי אמירה על מה שמותר בפני האלמנט, ולא אמירה על הגיאומטריה הפנימית של הסדק, ובוודאי לא על מצב הבטון בעומק כלשהו מתחת לאותו פני שטח.

2.2 מצב הבטון: EN 1992-4

EN 1992-4:2018, סעיף 4.7, מסדיר את קביעת מצב הבטון עבור עיגונים. שתי הוראות מכריעות. הראשונה היא ברירת המחדל: נקבע כי שמרני להניח שהבטון סדוק לאורך חיי השירות של העיגון, וזו העמדה הננקטת אלא אם הוכח אחרת. השנייה היא ההוכחה עצמה, הדורשת כי באזור העיגון, תחת הפעולות האופייניות במצב הגבולי של שימושיות, יתקיים:

$$\sigma_L + \sigma_R \leq \sigma_{adm}$$

כאשר σ_L הוא מאמץ המתיחה מן העומס החיצוני לרבות פעולת העוגן, σ_R הוא המאמץ מעיוות מרוסן (הנלקח כ־3 נ"מ/מ"ר כאשר אינו מחושב בפירוט), ו־ σ_{adm} הוא מאמץ המתיחה המותר, שהערך המומלץ עבורו הוא אפס. הערך המומלץ אפס הוא שמקשה על ההוכחה בפועל: הוא מחייב להראות שהבטון באזור העיגון נמצא בלחיצה, או לכל הפחות נקי ממתחה נטו, לכל עומק העיגון. כל ריסון מכל סוג, אם לא כומת בנפרד, מכלה את מלוא הקצבה בעצמו.

מבנה הסעיף אינו אפוא "סדוק אלא אם הוכח אחרת" במובן רופף, אלא דרישת אימות ממשית שברירת המחדל שלה נכנסת לתוקף בכל פעם שהאימות אינו מבוצע. מאחר שהאימות מחייב מידע על ריסון שלרוב אינו זמין למתכנן העיגון — שאיננו בדרך כלל מתכנן האלמנט ואף אינו מחזיק במצב המאמצים שלו כפי שנבנה — ברירת המחדל נכנסת לתוקף כמעט תמיד. אוניברסליות הסיווג הסדוק היא אפוא, במידה רבה, תוצר של מי מבצע את החישוב ואיזה מידע מגיע אליו, ולא ממצא על הבטון.

2.3 האישור: סדק הייחוס

מסגרת האישור המקבילה עקבית עם זאת. לפי מסמכי ההערכה האירופיים החלים על עוגנים מכניים וכימיים, מוצרים המיועדים לשימוש בבטון סדוק נבחנים באלמנטי בדיקה שבהם נוצרים סדקים ברוחב 0.3 מ"מ החוצים את אזור העיגון, כאשר משטרי מחזוריות הסדק פותחים וסוגרים את הסדק בדרך כלל בין 0.1 ל-0.3 מ"מ בקירוב. התסבולות האופייניות המוצהרות בהערכה הטכנית האירופית עבור מצב הסידוק הן התסבולות שנמדדו תחת אותו משטר. מסמכי ההערכה והדוחות הטכניים הרלוונטיים מרוכזים, בגרסאותיהם העדכניות, ב**ספריית התקנים והחברות של אדית**.

יש לשים לב במדויק למה שתצורת הבדיקה הזו מייצגת. סדק נוצר באלמנט בדיקה דק יחסית והוא נפתח, מתוך תכנון, לכל עומק העיגון. תנאי הייחוס אינו אפוא סדק בעומק בלתי מוגדר; הוא למעשה סדק החוצה את העיגון. זהו תנאי אישור לגיטימי ומחמיר במכוון. הוא הופך למקור לשגיאה רק כאשר כלל הסיווג המפעיל אותו — סדק שטח של 0.3 מ"מ — מתמלא על ידי מצב פיזיקלי חמור הרבה פחות.

2.4 סדר הגודל של הקנס התכנוני

ההשלכה התכנונית של הסיווג אינה שולית. עבור כשל חרוט בטון במתיחה, EN 1992-4 מבטא את התסבולת האופיינית של עוגן בודד בצורה הכללית

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot f_{ck}^{0.5} \cdot h_{ef}^{1.5}$$

כאשר המקדם k_1 מקבל ערך לבטון סדוק וערך לבטון לא סדוק. היחס ביניהם הוא כ-0.70:

סוג העוגן	בטון סדוק	בטון לא סדוק	יחס
עוגנים יצוקים מראש עם ראש	8.9	12.7	0.70
עוגנים מותקנים בדיעבד (הערכים מוצהרים ב־ETA; טיפוס)	7.7	11.0	0.70

טבלה 1. ערכי המקדם k_1 לתסבולת חרוט הבטון בבטון סדוק ובבטון לא סדוק. עבור עוגנים מותקנים בדיעבד הערכים הקובעים הם המוצהרים בהערכה הטכנית האירופית של המוצר; המספרים המוצגים הם המקובלים.

בעוגנים כימיים הקנס בדרך כלל גדול יותר ומשתנה יותר, ותסבולת ההידבקות האופיינית המוצהרת לבטון סדוק יורדת בדרך כלל לכדי מחצית עד שני שלישים מן הערך הלא סדוק, כאשר היחס המדויק ייחודי למוצר ומצוין בהערכה הטכנית האירופית. מתכנן המשתמש במנוע חישוב לפי EN 1992-4 — למשל תוכנת **AAS** — הזמינה חנים — יכול לראות את ההשפעה ישירות על ידי החלפת מצב הבטון במודל זהה לחלוטין.

2.5 מה שהתקנים אינם אומרים: עומק הסדק

לא EN 1992-1-1 ולא EN 1992-4 מייחסים עומק כלשהו לסדק המגדיר את מצב הסידוק. הרוחב מוגדר; העומק אינו מוזכר. זוהי ההשמטה המרכזית של המסגרת הנוכחית, ויש לה השלכה ספציפית ואסימטרית.

רוחב הסדק בפני השטח ועומק הסדק אינם גדלים בלתי תלויים בבטון מזוין, אך גם אינם שקולים. סדק כפיפה באלמנט מזוין מתפשט עד לציר הנייטרלי ונעצר שם; סדק ריסון או כיוון באזור הכיסוי עשוי להיות שטחי כמעט לחלוטין; סדק שקיעה פלסטית או סדק תרמי שטחי עשוי להיות עמוק עשרות מילימטרים בלבד ועדיין להציג רוחב תואם לחלוטין של 0.3 מ"מ בפני השטח. שלושתם מקיימים את כלל הסיווג באופן זהה. השפעתם על עוגן השקוע 80, 120 או 200 מ"מ מתחת לאותו פני שטח אינה זהה כלל וכלל.

המסגרת מכילה אפוא סתירה פנימית ממשית. קריטריון הסיווג הוא מדידת רוחב בפני השטח; תנאי האישור שאליו הוא מוביל הוא סדק החוצה את העיגון. בין השניים שוכנת כל אוכלוסיית הסדקים הרחבים דיים כדי להפעיל את הסיווג ורדודים מכדי להצדיק את הקנס שהוא מטיל. אף הוראה בשני התקנים אינה מבחינה ביניהם.

2.6 גיאומטריית הסדק האמיתי: הרוחב אינו קבוע לאורך העומק

השמטה שנייה נובעת מן הראשונה, והיא מזיקה אף יותר, משום שהיא נוגעת לא למה שהתקנים אינם אומרים אלא למה שהם קובעים במשתמע. סדק כפיפה באלמנט מזוין אינו חריץ ברוחב קבוע. הוא טריז: רחב ביותר בפני המתיחה, מצטמצם ברציפות עם העומק, ונסגר לאפס בקצהו. הרוחב הוא פונקציה של המאמץ-עיוות ברום הנדון, והעיוות באלמנט בעל גרדיאנט כפיפה יורד מפני המתיחה לעבר הציר הנייטרלי. אם הרוחב בפני השטח הוא w_0 , אזי הרוחב בכל עומק z מתחת לאותם פני שטח קטן מ- w_0 , ומעבר לקצה הסדק הוא אפס.

הסיווג מופעל על ידי הערך בפני השטח. EN 1992-1-1 מגביל את רוחב הסדק המחושב ל-0.3 מ"מ בפני האלמנט, ו-EN 1992-4 מאמץ את אותו מספר כתנאי הייחוס. מכאן נובע ישירות שעוגן השקוע מתחת לאותם פני שטח אינו חשוף, באלמנט סדוק בכפיפה, לסדק של 0.3 מ"מ. הוא חשוף לכל מה שנותר מן הסדק בעומקו שלו, שהוא קטן יותר — לעיתים קרובות קטן בהרבה — ולשום דבר כלל מעבר לקצה הסדק.

דגם האישור מתנהג באופן הפוך. סדקים באלמנטי בדיקה לעוגנים נוצרים על ידי הפעלת מתיחה על פני הדגם, כך שהסדק נוצר לכל העובי ונפתח ומוחזק ברוחב הנקוב באמצעות ניטור בנקודת העוגן. הגיאומטריה המתקבלת היא סדק ברוחב אחיד בקירוב לכל אורך העיגון. זו אינה קירוב של סדק כפיפה בעל אותו רוחב שטח; זהו עצם אחר.

שני התנאים הם, באלמנט הנתון לכפיפה, מוציאים זה את זה — וניתן לקבוע זאת ללא כל תמיכה ניסויית. או שהסדק מודד 0.3 מ"מ בפני השטח, ואז הוא צר מ-0.3 מ"מ בכל נקודה לאורך העיגון ותנאי האישור מפרזי בחומרתו; או שהסדק מודד 0.3 מ"מ בעומק העיגון, ואז הוא רחב מ-0.3 מ"מ בפני השטח והאלמנט כבר חרג ממגבלת בקרת הסידוק המגדירה את הסיווג מלכתחילה. המסגרת אינה יכולה להחזיק בשניהם. ואף על פי כן היא מפעילה את הראשון כדי להפעיל את הסיווג ומשחזרת את השני כדי לקבוע את התסבולת.

התוצאה היא שכבת שמרנות שנייה היושבת על גבי הראשונה, ושכבה בלתי מכומתת. הסיווג הסדוק מפחית את התסבולת בכ-30% עבור כשל חרוט; ההפחתה נמדדה תחת גיאומטריית סדק חמורה יותר מזו שהסיווג מתאר. עד כמה חמורה יותר — הדבר תלוי ביחס שבין עומק העיגון לעומק הסדק ובגרדיאנט העיוות באלמנט, שני גדלים הניתנים לחישוב עבור חתך נתון ואף אחד מהם אינו מופיע בשום מקום בכלל הסיווג.

טיעון זה מוגבל לסידוק המונע על ידי גרדיאנט עיוות, הכולל סידוק כפיפה ואת רוב הסידוק בתקריות ובקורות. כאשר סדק נגרם מריסון צירי או מעיוות כפוי באלמנט בעל גרדיאנט כפיפה מועט — קיר מרוסן לאורך בסיסו, אלמנט במתיחה ישירה, סדק ריסון בגיל צעיר החוצה חתך דק — הרוחב אכן עשוי להיות אחיד בקירוב לכל העובי, ושם גיאומטריית האישור מייצגת. השאלה חוזרת אפוא להיות שאלה של פרופורציה: איזה חלק מן העיגונים נמצא בכל אחת מן הקטגוריות. חלק זה לא נמדד, מה שמחזיר את הטיעון אל הפער שזוהה בפרק 4.

2.7 איזה מאמץ דרוש סדק הייחוס? שתי דוגמאות מחושבות

הסיווג שואל האם עשוי להיווצר סדק של 0.3 מ"מ. הוא אינו שואל איזה מאמץ דרוש כדי לייצר אותו. חישוב זה אלמנטרי — הוא נובע מהוראות רוחב הסדק שב-EN 1992-1-1, סעיף 7.3.4 — והוא מבוצע כאן בשתי תצורות, משום שהתשובה נוגעת ישירות לשאלה באיזו תדירות תנאי הייחוס אכן מושג. הדוגמאות ממחישות את סדרי הגודל ואינן מוצגות כתוצאות כלליות.

דוגמה 1: סידוק כפיפה בתקרה. ניקח תקרה בעובי 200 מ"מ מבטון C30/37 עם קוטר 12 כל 150 מ"מ בפאה המתוחה וכיסוי 25 מ"מ. ההוראות נותנות מרווח סדקים מרבי של 234 מ"מ, ומאמץ הפלדה הדרוש לפתיחת סדק של 0.3 מ"מ הוא 348 נ/ממ"ר — כ-80% מחוזק הכניעה התכנוני. מומנט הכפיפה המעין קבוע המתאים למאמץ זה הוא כ-41 קילו-ניוטון-מטר למטר, כ-80% מכוח הכפיפה של החתך במצב הגבולי הסופי. תקרה בעובי 300 מ"מ עם קוטר 16 כל 150 מ"מ נותנת תמונה זהה: 303 נ/ממ"ר, כ-70% מחוזק הכניעה התכנוני, בכ-70% מכוח הכניעה הסופי.

הממצא הראשון נובע מיד. סדק הייחוס של 0.3 מ"מ מתאים, בצירוף העומסים המעין־קבוע שבו נבדק רוחב הסדק, למאמץ פלדה של כ־300 עד 350 נ"מ/מ"ר. זה אינו מצב שירות; זה קרוב למצב הסופי. תקרה בשירות רגיל, במאמץ פלדה מעין־קבוע של 200 עד 250 נ"מ/מ"ר, נושאת סדקי שטח של 0.14 עד 0.23 מ"מ. סדק הייחוס אינו אפוא הסדק שאלמנט הטעון כרגיל מציג — הוא הסדק שאלמנט מציג בקצה העליון של הטווח המותר לו, והסיווג מחיל אותו על כל אלמנט ללא קשר למקום שבו הוא נמצא באותו טווח.

הממצא השני הוא תיקון לטיעון שבסעיף 2.5 ויש לציין במפורש. בשתי הדוגמאות עומק הסדק הוא 81% עד 83% מן החתך — 165 מ"מ בתקרה של 200 מ"מ, 242 מ"מ בתקרה של 300 מ"מ. סדק כפיפה אכן מגיע לציר הנייטרלי, ולכן בעיגון המותקן מן הפאה המתוחה הוא עובר את כל אזור העיגון. עומק הסדק אינו, בתצורה זו, ההגנה. ההגנה היא הרוחב, וכאן גיאומטריית הטרזי שבסעיף 2.6 הופכת לטיעון הפועל ולא לעידון שלו.

עבור התקרה בעובי 200 מ"מ, בהנחת התדלדלות ליניארית של הרוחב עד אפס בציר הנייטרלי, ובהערכה הן בתנאי הייחוס והן במאמץ פלדה מעין־קבוע רגיל של 250 נ"מ/מ"ר:

רוחב ממוצע לאורך העיגון בתנאי הייחוס (מ"מ)	רוחב ממוצע לאורך העיגון במאמץ 250 נ"מ/מ"ר (מ"מ)	hef (מ"מ)
0.245	0.151	60
0.227	0.140	80
0.191	0.118	120

טבלה 2. רוחב הסדק שהעיגון אכן פוגש. תקרה 200 מ"מ מבטון C30/37 עם קוטר 12 כל 150 מ"מ, עיגון המותקן מן הפאה המתוחה. תנאי הייחוס הוא רוחב שטח של 0.3 מ"מ; טור השירות מתאים למאמץ פלדה מעין־קבוע של 250 נ"מ/מ"ר, המייצר רוחב שטח של 0.185 מ"מ.

עבור המקרה הנפוץ מכולם — תלייה מתחת לתקרה בעובי 200 מ"מ בעומק עיגון אפקטיבי של 80 מ"מ — הרוחב הממוצע שהעיגון פוגש תחת עומס מעין־קבוע הוא כ־0.14 מ"מ, פחות ממחצית הרוחב שבו נבחן העוגן. העוגן נבחן ב־0.3 מ"מ לכל אורך העיגון; הוא חווה כ־0.14 מ"מ בממוצע לאורכו. מקדם זה אינו מוכר בשום מקום בסיווג.

דוגמה 2: סידוק מרוסן ברוחב אחיד בקירוב. זהו המקרה שזוהה בסעיף 2.6 כמקרה שבו גיאומטריית האי שור מייצגת, וכדאי לשאול מה הוא דורש. ניקח קיר בעובי 250 מ"מ מבטון C30/37 עם קוטר 12 כל 150 מ"מ בכל פאה. מרווח הסדקים המרבי הוא 674 מ"מ, וסדק של 0.3 מ"מ דורש מאמץ פלדה של 148 נ"מ/מ"ר, המתאים לכוח מתיחה צירי של 224 קילו־ניוטון למטר. אלא שהכוח המסדק לראשונה את החתך הוא שטח החתך כפול חוזק המתיחה הממוצע, 725 קילו־ניוטון למטר; אילו הופעל כוח זה והועבר במלואו לזיון, מאמץ הפלדה היה 481 נ"מ/מ"ר, מעבר לכניעה, והסדק המתקבל היה בסדר גודל של מילימטר ולא 0.3 מ"מ. הזיון המסופק הוא מחצית מ־3,020 מ"מ למטר ש־EN 1992-1-1, סעיף 7.3.2, היה דורש לסידוק מבוקר של 0.3 מ"מ במתיחה ישירה.

הפתרון הוא שסדק אחיד לכל העובי ברוחב 0.3 מ"מ הוא מצב מונע־עיוות ולא מונע־כוח. הרוחב נקבע על ידי העיוות המרוסן ולא על ידי עומס מופעל: במרווח סדקים של 674 מ"מ, עיוות מרוסן של 4.5×10^{-4} מייצר אותו, וכיוון תרמי בגיל צעיר יחד עם התכווצות ייבוש מרוסנת יכולים לספק זאת כאשר הריסון גבוה. זהו תנאי אמיתי ומתועד היטב — הוא נושאה של הנחיית CIRIA בדבר סידוק מעיוות מרוסן [11] ושל EN 1992-3 למבנים אוגרי נזלים [12].

המסקנה אינה אפוא שסידוק אחיד לכל העובי הוא תיאורטי. הוא אינו כזה. המסקנה היא שהוא שייך למחלקת אלמנטים מוגדרת — קירות ורצפות היצוקים לתוך ריסון, רצפות נשענות על הקרקע, ומבנים אוגרי נזלים — ולא לתקרות, לקורות ולתחתיות שבהן מבוצע הרוב המכריע של העיגונים בדיעבד. באלמנטים הנתונים לכפיפה, השולטים באוכלוסיית העוגנים, גיאומטריית הטרזי תקפה וסדק הייחוס מושג רק בקרבת הקצה העליון של טווח

השירות המותר לאלמנט. כלל הסיווג אינו שואל לא באיזו מחלקת אלמנטים מדובר ולא היכן בטווח השירות שלו הוא נמצא.

3. קריאה הסתברותית: הנחיית BBA מס' 39

הטיפול הבינארי אינו הטיפול היחיד שהוצע על ידי גוף מוכר. הנחיה מס' 39 של ה־ British Board of Agrément, *Anchor Bolts for Use in Concrete* (מהדורה 4, 2015), מתייחסת לאותה שאלה במונחים הסתברותיים מפורשים. עותק זמין ב[אן](#). שלוש מאמירותיה נוגעות ישירות לטיעון.

על מבנים קיימים קובעת ההנחיה:

”במבנה קיים שבשימוש, כלומר כאשר לא מתבצע פינוי ואכלוס מחדש, ניתן להתקין עוגנים בכל מיקום ובלבד שאין זה סביר שתחול עליה משמעותית בעומס לאחר התקנת העוגנים.” — הנחיית BBA מס'

39

ההיתר אינו מסווג כאשר למיקום, ולפי קריאתו הפשוטה הוא חל גם על עוגנים שאושרו לבטון לא סדוק בלבד. התנאי המצורף אינו תנאי על הבטון אלא על העתיד — היעדר צפי לעלייה משמעותית בעומס לאחר ההתקנה. זהו קריטריון שונה מהותית מזה של האירוקוד, ומנומק פיזיקלית טוב יותר: הסידוק החשוב לעוגן מותקן הוא הסידוק המתרחש, או המתרחב, לאחר שהעוגן כבר במקומו.

על אופי הטעינה:

”עומסים שימושיים המופעלים על רצפות משתנים בזמן ובמרחב, ולפיכך כל התייחסות מציאותית לטעינה תהיה במונחי הסתברות.” — הנחיית BBA מס' 39

ועל הקשר בין שתי מערכות העומסים:

”העומס הנישא על ידי העוגנים הוא בדרך כלל בלתי תלוי בעומס השימושי המופעל על המבנה, ולפיכך מדובר בהסתברות משותפת.” — הנחיית BBA מס' 39

האחרונה שבהן היא המשמעותית ביותר והמוזנחת ביותר. כדי שסדק יפחית את תסכולת העיגון באופן המאיים על התכן, כמה תנאים צריכים להתקיים בו־זמנית: סדק חייב להיווצר באזור העיגון; עליו להתפשט לעומק בר־השוואה לעומק העיגון; עליו להיות פתוח, ברוחב הרלוונטי, ברגע שבו העיגון נמצא בעומס התכן שלו או בסמוך לו; והעיגון חייב באותו רגע להיות טעון בכיוון ובמנגנון שעבורם הסדק מזיק. אלו אינם אירועים מתואמים לחלוטין. האירוקוד מתייחס אליהם כאילו היו ודאיים ובו־זמניים.

שתי הערות הסתברותיות נוספות נובעות מאותו היגיון. סדקים באלמנט מזוין נוצרים במרווחים סדירים למדי הנקבעים על ידי הזיון והכיסוי, ולכן השאלה אם מיקום עוגן מסוים חופף לסדק היא כשלעצמה שאלת הסתברות מרחבית; וככל שמספר נקודות החיבור הנושאות עומס משותף גדול יותר, כך פוחתת ההסתברות שהחיבור כולו ייפגע, שכן העומס שמשילה נקודה אחת הממוקמת באופן לא נוח מתחלק בין היתר. עוגן קצר יחיד באזור מתיחה וקבוצה של שנים־עשר אינם אותה בעיה, ואף על פי כן כלל הסיווג אינו מבחין ביניהם.

4. מקורו של בסיס הראיות

יש לציין במפורש מגבלה של הספרות בנושא זה, ולציין כמגבלה ולא כהאשמה בהתנהגות פסולה. הרוב המכריע של העבודה הניסויית על התנהגות עוגנים מותקנים בדיעבד בבטון סדוק הוזמן, מומן או בוצע על ידי יצרני אותם עוגנים, או בשיתוף עמם. אין בכך הפתעה ואין בכך כשלעצמו פסול: הבדיקות יקרות, הציוד מיוחד, ומעבדות התעשייה נמנות עם המוכשרות ביותר בתחום. מערכת האישור עצמה מחייבת יצרנים לממן את הערכת מוצריהם.

הנקודה הרלוונטית צרה יותר. ההשלכה המסחרית של הסיווג הסדוק היא עיגון גדול, עמוק או יקר יותר במידה ניכרת. הגורמים המממנים את המחקר הם הגורמים שהכנסתם עולה תחת הסיווג המחמיר. תצורה זו אינה פוסלת אף תוצאה בודדת, והממצאים המכניים על התנהגות עוגן בסדק פתוח הם, להערכת המחבר, נכונים וניתנים לשחזור. מה שהיא כן משפיעה עליו הוא סדר היום המחקרי — אילו שאלות נשאלות ואילו לא.

באופן ספציפי, השאלה שנחקרה עד תום היא: מהי תסבולת העוגן בסדק ברוחב w ? השאלות שמשכו השקעה מועטה בהרבה הן: מהי התדירות הנצפית, במבנים אמיתיים, של סדקים ברוחב זה בעומקים שבהם מותקנים עוגנים; איזה שיעור מן העוגנים בשירות אכן נחצה על ידי סדק כזה; ומהו מדד המהימנות המושג בפועל על ידי אוכלוסיית עיגונים המתוכננים כלא סדוקים באלמנטים המסווגים כסדוקים. בסיס ראיות יכול להיות ישר לחלוטין בכל מדידה שהוא מדווח ועדיין להיות חסר באופן שיטתי במה שהוא בוחר למדוד. זו, ולא התנהגות פסולה כלשהי, היא הביקורת המועילית כאן.

המאמר הנוכחי נתון לתמונת הראי של אותה זהירות, והצהרת האינטרסים מציינת במפורש את האינטרס של המחבר עצמו.

5. מצב המאמצים ומיקום העוגן: גבולות מודל הקורה

המודל המחשבתי העומד בבסיס רוב החלטות הסיווג המעשיות הוא הקורה הפשוטה: הסיב העליון בלחיצה, הסיב התחתון במתיחה. מכאן נובע כלל האצבע המוכר שלפיו עיגון בתקרה הוא עיגון בבטון מתוח וחייב להיחשב סדוק, בעוד שעיגון בפני הרצפה הוא בבטון לחוץ ולכן ניתן להתייחס אליו כלא סדוק. הכלל הוא קירוב ראשון סביר, והוא שגוי במספר ניכר של מקרים רגילים.

- הוא אינו תקף באלמנטים דרוכים, שבהם מצב המאמצים המתוכנן הוא לחיצה בכל העומק או ברובו. לוחות חלולים דרוכים (לוח"ד/ספיינקריט) ואלמנטים דרוכים אחרים נמנים עם חומרי הבסיס הנפוצים ביותר לעיגון בדיעבד, והם בדיק המקרה שבו כלל האצבע מטעה.
- הוא אינו תקף בסמוך לתמיכות. מתיחת הכפיפה והלחיצה קטנות שתיהן לקראת התמיכה, ומעל תמיכה רציפה הסימן מתהפך, כך שדווקא הבטון בחלק העליון של האלמנט נמצא במתיחה. כאשר התמיכות אינן בקצוות האלמנט — קצוות בקונוול, מצבים נתמכים — ההתפלגות משתנה שוב.
- הוא מתעלם מן הגרדיאנט לאורך העומק. מאמץ הכפיפה מרבי בסיבים הקיצוניים ועובר דרך אפס בציר הנייטרלי. עיגון אינו נקודה בפני השטח; הוא מערב אורך של בטון.
- הוא מתעלם מן היחס בין עומק העיגון לעומק האזור הנדון. נניח אלמנט בעובי 400 מ"מ שבו, לפי המודל הפשוט, 200 המ"מ העליונים במתיחה ו־200 המ"מ התחתונים בלחיצה. עוגן בעומק עיגון אפקטיבי של 300 מ"מ המותקן מן התקרה עובר דרך אזור הלחיצה ומסתיים בתוך אזור המתיחה; אותו עוגן המותקן מלמעלה עושה את ההפך. בשני המקרים העיגון פורש על פני שני האזורים, ולסיווג הבינארי של האלמנט אין הרבה מה לומר על הבטון שאכן מתנגד לעוגן.

המסקנה אינה שמצב המאמצים אינו רלוונטי — הוא האינדיקטור החשוב ביותר הזמין — אלא שהסיווג צריך להיעשות עבור אזור הבטון שהעיגון אכן מערב, לאורך עומקו בפועל, ולא עבור האלמנט כולו על בסיס הפאה שממנה מתקרב המתקין.

6. מתי הסדק אכן קובע?

6.1 כשל חרוט וגיאומטריית הסדק

עבור כשל חרוט בטון, המנגנון שבו סדק מפחית את התסבולת ברור ואינו שנוי במחלוקת. החרוט הוא משטח כשל במתיחה המתפשט מן הקצה השקוע של העוגן אל פני הבטון. סדק המונח במישור אותו משטח, או החוצה אותו, מפצל את החרוט: חלק ממשטח הכשל כבר נוצר, תסבולת המתיחה לרוחבו כבר מוצתה, והתסבולת הנמדדת

יורדת בהתאם. ההפחתה המגולמת במקדמי k_1 שבטבלה 1 היא ייצוג סביר של השפעה זו עבור סדק החוצה את החרוט.

עם זאת, חומרת ההשפעה היא פונקציה של כמה מן החרוט הסדק אכן חוצה. סדק שעומקו שבר קטן מעומק העיגון האפקטיבי חוצה רק את החלק החיצוני ביותר – הגדול ביותר גיאומטרית אך הקריטי ביותר מכנית – של משטח הכשל. התקנים אינם קובעים דבר לגבי הדרגתיות זו, משום שאינם מתעדים עומק סדק כלל.

6.2 תרומת הזיון שהושמטה

מקור שני ובלתי תלוי לשמרנות במודל הבטון הסדוק הוא שמשוואות חרוט הבטון של EN 1992-4 אינן מביאות בחשבון את הזיון החוצה את משטח הכשל, אלא אם זיון זה תוכנן ופורט במפורש כזיון משלים לפי מערכת כללים ייעודית. באלמנט מזוין רגיל חוצים את החרוט זיון כפיפה וזיון חלוקה שתפקידם הוא בדיוק לשאת את המתיחה שהמודל מניח כי על הבטון לבדו לשאת.

שני גופי עבודה ניסויית עדכניים נוגעים לכך. שארמה, אליגהאוזן ואסמוס [4], המדווחים על תוכנית בדיקות נרחבת בעיגונים עם זיון משלים, מדגימים שזיון החוצה את גוף הכשל מגדיל מהותית את התסכולת ומשנה את אופן הכשל, ושטיפול התקן שמרני במידה ניכרת כאשר זיון כזה קיים. נילפורוש, נילסון ואלפגן [5] בחנו את השפעת עובי האלמנט, גודל ראש העוגן והזיון העילי האורתוגונלי על תסכולת המתיחה של עוגנים עם ראש, ומצאו שזיון עילי מעלה את תסכולת הכשל, כאשר תרומתו היחסית גדלה ככל שהאלמנט דק יותר.

שילוב שני הממצאים עם טיעון עומק הסדק שבסעיף 2.5 מניב תוצאה שימושית, משום ששתי ההשפעות פועלות באותו כיוון על פני כל טווח עובי האלמנטים. באלמנט עבה תרומת הזיון קטנה יחסית, אך האלמנט מזוין בדרך כלל בכבדות ובצפיפות רבה יותר, ועומק העיגון הוא שבר קטן יותר מן העובי; באלמנט דק תרומת הזיון גדולה יחסית, וסדק סביר פחות בהתאם להתפתח לעומק בר־השוואה לעומק העיגון. אף אחד משני חלקי הטיעון אינו תלוי בשני, ואף אחד מהם אינו נתפס על ידי הסיווג.

יש לציין שאף אחד מן המחקרים המצוטטים לא נועד לבחון את סיווג הבטון הסדוק, ואין לקרוא אף אחד מהם כתומך בעמדה הנקטת כאן. הם מצוטטים עבור הטענה הצרה יותר שמודל החרוט משמיט מנגנון תסכולת הקיים באופן שיטתי באלמנטים אמיתיים, דבר הרלוונטי לכל הערכה של כמה שמרנות נוספת מספקת ברירת המחדל הסדוקה.

עבודות נוספות של אותן קבוצות בוחנות את המקרים הסמוכים: ההשפעה המשולבת של זיון עילי, עובי האלמנט ובטון סדוק על תסכולת עוגנים [6], וכשל קצה בטון בעיגונים רב־שורתיים עם זיון משלים [7].

6.3 המאמץ הדרוש לפתיחת הסדק, ומקרה הגזירה הטהורה

הסיווג שואל האם עשוי להיווצר סדק של 0.3 מ"מ באזור העיגון. הוא אינו שואל איזה מאמץ דרוש כדי לייצר אותו, ולא לאיזה עומק בחתך אותו מאמץ נושא אותו. אלו שאלות רגילות של מכניקת בטון מזוין וניתנות למענה עבור כל חתך נתון: עומק סדק כפיפה נקבע על ידי מיקום הציר הנייטרלי בצירוף העומסים הקובע, והרוחב בפני המתיחה נקבע על ידי העיוות ופירוט הזיון. מהם ניתן לחשב, עבור חתך נתון, את מומנט הכפיפה הדרוש לפתיחת סדק של 0.3 מ"מ ואת העומק שאליו הסדק אז מתפשט.

חישוב כזה אינו מופיע בספרות שהמחבר הצליח לאתר, ואף מחקר אינו מקשר בין המאמץ הדרוש להגעה לעומק סדק נתון לבין התפלגות עומקי העיגון הנהוגים בפועל. זהו היעדר בולט, משום שהחישוב אלמנטרי והיה תוחם את הבעיה מיד. הוא היה מראה, עבור כל חתך ומערך זיון נפוצים, האם רמת העומס שבה סדק מגיע לעומק עיגון טיפוסי היא רמה שהאלמנט יראה באופן סביר בשירות – וברוב החתכים חלק ניכר מן העומק נמצא בלחיצה בכל צירוף עומסים מציאותי, כך שסדק המתפשט ל־80 או 120 מ"מ דורש מאמץ גדול במידה ניכרת מזה שמסדק לראשונה את פני השטח.

עומס העיגון עצמו הוא תורם שני ובלתי תלוי לאותה שאלה, וכאן כיוון הטעינה מכריע. עוגן הנטען במתיחה מפעיל מתיחה על הבטון סביב אזור העיגון ויכול, עקרונית, להרחיב או לפתוח בו סדק. עוגן הנטען בגזירה טהורה אינו עושה זאת. עומסו מועבר לבטון במגע לאורך קטע קצר סמוך לפני השטח, ובהיטלו על מישור סדק הניצב לאותם פני שטח הוא אינו תורם דבר לפתיחתו. כל סדק הקיים באזור העיגון של עוגן הנטען בגזירה טהורה קיים בגלל האלמנט, לא בגלל העיגון.

לכך יש השלכה על דרישת האישור שראוי לנסח במדויק, משום שקל להפריז בה. החלק הנוגע לסידוק בהערכת עוגן לבטון סדוק הוא משטר מחזוריות סדק שבו הסדק נפתח ונסגר שוב ושוב בעוד העוגן נושא מתיחה, ומה שהוא בוחן הוא האם העוגן שומר על כוח ההתפשטות שלו ומשלים התפשטות ככל שהסדק נפתח. מנגנון זה הוא מנגנון מתיחה. בעיגון שאינו נושא מתיחה הוא אינו מתעורר כלל: אין מתח קדם לאבד ואין השלמת התפשטות לדרוש.

ההפחתות בצד הבטון הן עניין אחר ונותרות ישימות במלואן, משום שהן תכונות של הבטון ולא של העוגן. EN 1992-4 מפחית את מקדם כשל קצה הבטון מ-2.4 ל-1.7 כאשר הבטון סדוק, וכשל ה-*pry-out* מחושב כמכפלה של תסכולת חרוט הבטון, הנושאת בעצמה ערכים לבטון סדוק ולבטון לא סדוק. אין בטיעון הנוכחי דבר המרמז שמתכנן רשאי להתעלם מהן.

מה שנותר הוא שאלה צרה יותר, ולדעת המחבר בלתי נענית עד כה. עבור עיגון שבו המתיחה נעדרת באופן מוכח, אופני הכשל האפשריים הם כשל פלדה בגזירה, *pry-out*, וכשל קצה בטון. הראשון הוא תכונה של הפלדה; השני והשלישי הם, בניסוח התקן עצמו, גיאומטריים. בתצורה זו העוגן מתנהג חיובית כמוט פלדה השקוע לעומק נתון, ואין זה ברור מפני איזה מנגנון מגינה הדרישה להערכת בטון סדוק של המוצר, בהינתן שאף אחת משלוש הבדיקות הקובעות אינה תלויה בהתנהגות שאותה הערכה בוחנת.

שני סייגים נחוצים. ראשית, עיגון המתואר כנטען בגזירה טהורה כמעט לעולם אינו כזה: מינוף ממרווח, ריסון של הפריט המחובר, אפקט החבל בהזזות גדולות, ומתח הקדם של העוגן עצמו — כולם מכניסים מתיחה, ויש להגביל את הטענה למקרים שבהם המתיחה נעדרת או זניחה באופן מוכח. שנית, השאלה המועלית נוגעת לדרישת האישור החלה על המוצר, ולא להפחתות המספריות החלות על הבטון, ואין לקרוא אותה כהיתר להתעלם מן האחרונות.

6.4 שלוש בדיקות הגזירה, נתון אחר נתון

את הטענה שהועלתה זה עתה — שאף אחת מן הבדיקות הקובעות אינה תלויה בהתנהגות שאותה בוחנת ההערכה לבטון סדוק — אין להשאיר כאמירה בלבד, משום שכל נתון המעורב בה כבר מתועד וניתן פשוט לבדוק אותה. עבור עיגון שטעינתו מוגבלת באופן מוכח לגזירה, שלוש בדיקות עשויות לקבוע, ואף אחת מהן אינה דורשת ערך שהתקבל מבדיקה בבטון סדוק.

- כשל פלדה בגזירה הוא תכונה של פלדת העוגן. הערך האופייני המוצהר בהערכה אינו משתנה עם מצב הבטון, ואף בדיקה בבטון סדוק אינה תורמת לו.
- כשל קצה בטון מחושב ממרחק הקצה, מן הקוטר החיצוני של העוגן ומאורך העברת העומס שלו, יחד עם חוזק הבטון. המקרה הסדוק והלא סדוק נבדלים במקדם 1.7 — 2.4 מול 2.4 — שהוא ערך של התקן ולא תכונת מוצר מוצהרת. שני נתוני המוצר הנכנסים לחישוב, *lf-dnom*, הם מידות, והן אותן מידות בבטון סדוק כמו בבטון לא סדוק.
- כשל *pry-out* מחושב כ- k_8 כפול תסכולת חרוט הבטון. המקדם k_8 מאפיין את קשיחות העוגן ואת התנהגות התזוזה שלו בגזירה; אין סיבה שיהיה שונה בין בטון סדוק לבטון לא סדוק, ואף הערכה שהמחבר בחן אינה מצהירה על ערכים נפרדים לשני המצבים. ההפחתה לבטון סדוק נכנסת דרך איבר החרוט, ובעוגנים מותקנים בדיעבד היא נכנסת כ- $k_{cr,N}$, ערך שהתקן עצמו מספק. ומכל מקום, כפי שמראה פרק 7, בדיקת ה-*pry-out* אינה קובעת ברגע שמשווים אותה לתסכולת הפלדה.

מכאן הטענה. כאשר הטעינה מוגבלת באמת לגזירה, אין שום מניעה חישובית להשתמש בעוגן שאושר לבטון לא סדוק בלבד באלמנט המסווג כסדוק. כל מה שהחישוב דורש הוא תכונה של הפלדה, מידה, או מקדם של התקן. המנגנון שלשם הדגמתו קיימת ההערכה לבטון סדוק — שהעוגן שומר על כוח ההתפשטות שלו כסדוק נפתח ונסגר תחת מתיחה — אינו מופעל כלל, והיעדרו אינו משנה אף אחד משלושת המספרים.

יש לציין שני גבולות לטענה זו. אין היא אמירה על מה שמתכנן רשאי לעשות כיום: EN 1992-4 מחייב עוגן המתאים לבטון סדוק בכל מקום שבו הבטון סדוק, והערכה המכסה בטון לא סדוק בלבד תותיר את הנתונים המתאימים בלתי מוצהרים — ב-ETA-11/0374 מקדם החרוט לבטון סדוק רשום פשוט כ"לא בוצעה הערכה". הצבת ערך של התקן במקום ערך שההערכה נמנעת מלתת היא סטייה מאותה הערכה, ולכן הטענה מופנית לגופים הכותבים את הכללים ולא למהנדס המיישם אותם. והיא מוגבלת, כפי שמפורט בסעיף 6.3, לעיגונים שבהם המתיחה נעדרת באופן מוכח — תנאי מחמיר יותר משהוא נשמע, המוציא מכלל חשבון חיבורים במרווח, תצורות בעלות הזזה גדולה, וכל סידור שבו הפריט המחובר מרוסן.

7. כשל pry-out: מקדם ייחודי למוצר עבור מנגנון גיאומטרי

הדפוס שזוהה לעיל — מקדם המוצג כמייצג תנאי פיזיקלי, מכיל בבדיקות שהמתכנן אינו יכול לבחון, ומישם בצורה שבסיסה אינו ניתן לאימות מתוך המסמך המצהיר עליו — אינו מוגבל לסיווג הבטון הסדוק. בדיקת ה-pry-out מציעה דוגמה מעשית קומפקטית, וכזו שבה ניתן להדגים את הקושי אריתמטית מתוך הערכה טכנית אירופית תקפה במקום לטעון אותו.

EN 1992-4 מבטא את התסבולת האופיינית ל-pry-out של עיגון בגזירה כמכפלה של תסבולת חרוט הבטון שלו במתיחה,

$$V_{Rk,cp} = k_g \cdot N_{Rk,c}$$

עם ערכי ברירת מחדל של $k_g = 1$ עבור $h_{ef} < 60$ מ"מ ו-2 עבור $h_{ef} \geq 60$ מ"מ. מסמכי ההערכה מתירים להצהיר על ערך ייחודי למוצר במקום ערך ברירת המחדל כאשר הוא נתמך בבדיקות, ויצרנים אכן מצהירים על ערכים גבוהים יותר.

נבחן את הערכים המוצהרים עבור עוגן טרזי נפוץ מאוד המבוקר במומנט, ה-Hilti HSA, בהערכה ETA-11/0374 מיום 27 באוקטובר 2023 [10]. עבור מידה M16 ההערכה מצהירה על $k_g = 2.9$ בכל שלושת עומקי ההתקנה, על תסבולת חרוט בטון אופיינית בבטון לא סדוק של 25.8, 35.2 ו-50.0 קילו-ניוטון בעומקי עיגון אפקטיביים של 65, 80 ו-120 מ"מ, ועל תסבולת פלדה אופיינית בגזירה של 51.0 קילו-ניוטון. עבור עוגן בודד בבטון C20/25 הרחק מקצוות, תסבולת ה-pry-out נובעת ישירות.

hef (מ"מ)	N _{Rk,c} (kN)	V _{Rk,cp} (kN)	V _{0Rk,s} (kN)	יחס
65	25.8	74.8	51.0	1.47
80	35.2	102.1	51.0	2.00
120	50.0	145.0	51.0	2.84

טבלה 3. תסבולת pry-out מול תסבולת פלדה בגזירה עבור Hilti HSA M16 (HSA / HSA-BW), מחושבת מן הערכים המוצהרים ב-ETA-11/0374, נספחים C1 ו-C2, עבור עוגן בודד בבטון C20/25 לא סדוק הרחק מקצוות. בהחלת מקדמי הבטיחות החלקיים של ההערכה (1.25 על הפלדה, 1.5 על הבטון), היחסים ברמת התכן הם 1.22, 1.67 ו-2.37.

שתי הערות נובעות מכך, האחת מתודולוגית והשנייה מכנית.

ההערה המתודולוגית היא שתסבולת ה-pry-out עולה על תסבולת הפלדה בגזירה של העוגן עצמו בכל אחד מעומקי העיגון המוצהרים, פי 1.5 עד 2.8 ברמה האופיינית ופי 1.2 עד 2.4 ברמת התכן. אופן כשל ה-pry-out אינו

יכול אפוא להיות קובע עבור עוגן זה בתצורה זו. וחשוב מכך, הוא אינו ניתן לייצור בבדיקה על עוגן זה כפי שהוא מסופק: בטעינה בגזירה, גזע העוגן נקרע הרבה לפני שהבטון מתמנף החוצה. מקדם שהתקבל מבדיקות חייב היה להתקבל בתנאים שבהם הכשל הנצפה אכן היה pry-out, מה שעבור מוצר זה מחייב אלמנטי גזירה חלופיים מפלדה בדרגה גבוהה יותר, בטון חלש מדרגת הייחוס, או עומק עיגון קצר מכל אלה שההערכה מצהירה עליהם. איזה מהם חל אינו מצוין בהערכה, ולמתכנן המשתמש בערך אין דרך לברר זאת. המקדם מוצהר כמאפיין של המוצר, ואף על פי כן אופן הכשל שהוא מכמת הוא כזה שהמוצר אינו יכול להגיע אליו.

ראוי לשים לב עד כמה צר המרווח תחת ערך ברירת המחדל של התקן. בעומק העיגון המוצהר הרדוד ביותר, k_8 = 2 = היה נותן תסכולת pry-out של 51.6 קיל־ניוטון מול תסכולת פלדה של 51.0 קיל־ניוטון — השניים שווים למעשה. הערך הייחודי למוצר 2.9 אינו מכיל בדיקה קובעת; הוא מוציא את הבדיקה מן המשחק לצמיתות.

ההערה המכנית היא שכשל pry-out הוא כשל בטון. גוף הבטון המתמנף החוצה מאחורי העוגן מוגדר על ידי עומק העיגון ועל ידי גיאומטריית משטח הכשל, בדיוק כפי שהגוף הנשבר לעבר קצה חופשי מוגדר על ידי מרחק הקצה והגיאומטריה של חרוט הקצה. ניסוח התקן עצמו מבהיר זאת: ל־pry-out לא ניתנת כלל פונקציית תסכולת עצמאית, אלא הוא נכתב כמכפלה של תסכולת חרוט המתיחה, שהיא בעצמה גיאומטרית טהורה ב־ h_{ef} . לכאורה אין מנגנון שבו עקרון ההתפשטות של העוגן משנה את נפח הבטון המתמנף החוצה.

יש להציג את נימוק התקן בהגינות, משום שאינו ריק. המקדם k_8 מובן כמשקף את קשיחות העוגן ואת התנהגות העומס־תזוזה שלו בגזירה ולא את חוזק הבטון: עוגן המתעוות ומחלק מחדש בפני השטח אינו מפתח את הקינמטיקה המתמנפת חרוט, בעוד שעוגן קשיח כן. בקריאה זו ערך ייחודי למוצר לגיטימי, משום שמה שמאפיין אינו הבטון אלא האופן שבו העוגן מעביר אליו עומס.

הקושי הוא שקריאה זו, אם לוקחים אותה ברצינות, משנה את משמעות המקדם. היא הופכת את k_8 למדד לכמה רחוק אופן ה־pry-out מלהיות מושג עבור מוצר נתון — וערך מוצהר המציב את תסכולת ה־pry-out באופן קבוע מעל תסכולת הפלדה הוא, בקריאה זו, קביעה שהאופן אינו ישים. ביטוי קביעה כזו כמקדם תסכולת המוכפל בתסכולת חרוט בטון מציג כחזק את מה שהוא במהות טענת אי־ישימות. הוא גם מותיר ללא מענה את השאלה מה, בתוך ההערכה, מבחין בין ערך מוצהר של 2.9 לבין 2.4 או 3.5, כאשר בכל אחד מן המקרים התסכולת המתקבלת מצויה מעבר להישג ידה של הפלדה של העוגן עצמו.

נקודת הדוגמה אינה שהערכים המוצהרים אינם בטוחים. הם בטוחים: הבדיקה שאליה הם שייכים נדחתה על ידי בדיקת הפלדה, ומתכנן המיישם את EN 1992-4 ככתבו יגיע לתסכולת פלדה קובעת ולתשובה נכונה. הנקודה היא שמקדם המוצג כתכונת מוצר נמדדת, במסמך שהמתכנן נדרש להסתמך עליו ואינו רשאי לתשאל, עשוי לכמת תנאי שאין להביא את המוצר להציגו. זוהי אותה חולשה מבנית שזוהתה בפרק 4 עבור סיווג הבטון הסדוק, המופיעה במקום שבו ניתן להדגימה בשלוש שורות של אריתמטיקה.

8. סוג העוגן כמשתנה ביצירת הסדק: השערה

הפרקים הקודמים עוסקים בבטון. פרק זה עוסק בעוגן, ומוצג במפורש כהשערה שלה לא איתר המחבר אישוש ניסויי ישיר.

עקרונות עיגון שונים מטילים על הבטון הסובב מצבי מאמצים שונים מאוד בעת ההתקנה. עוגן טריז המבוקר במומנט — הבורג המתפשט הרגיל, וכן [עוגן ההתפשטות לעומסים כבדים](#) — מפתח את אחיזתו על ידי הרחבת שרוול או קליפס אל דופן הקדח. מומנט ההתקנה מייצר שדה מתיחה ניכר ומתמשך בבטון הסובב, הקיים בהיעדר כל עומס חיצוני ודועך עם הזמן לכ־60% מערכו ההתחלתי. העדות המעשית לעוצמת שדה זה מוכרת לכל מתקין: עוגן טריז המורכב קרוב מדי לקצה חופשי עלול לפצח את הבטון כבר בעת ההידוק, לפני שהופעל עליו עומס שירות כלשהו.

בורג בטון החורץ את תביריגו בעצמו, **ועוגן כימי**, מעבירים עומס לאורך התביריג או לאורך שכבת ההידבקות בהתאמה, ואינם מטילים מתח קדם דומה: הבטון נמתח רק כאשר העוגן נטען. אזור ההשפעה שלהם בבטון צר בהתאם. כאשר עוגנים כאלה נטענים בשירות, המתיחה המושרית מגיעה בשיאה לשבר קטן — כשליש בערך — מתסכולת העוגן, בעוד שהמתיחה המושרית בהתקנה סביב עוגן טריז עשויה להתקרב לאותו סדר גודל של תסכולתו.

ההשערה היא אפוא: שדה המתיחה הקבוע המושרה בהתקנה של עוגני טריז המבוקרים במומנט, בשילוב אזור ההשפעה הרחב שלהם, הופך אותם לסבירים יותר מבורגי בטון או מעוגנים כימיים ליצור או להרחיב סדק במיקומם שלהם. אם הדבר נכון, יש בכך מעגליות מטרידה לדין בסיווג, שכן סוג העוגן המפורט לרוב מתוך הנחת בטון סדוק יהיה, בחלקו, הגורם ליצירת התנאי שאותו הוא מיועד לשאת.

ההשערה ניתנת לבדיקה. ההשוואה הנדרשת היא מערך מותאם של עוגני טריז, בורגי בטון ועוגנים כימיים המותקנים באלמנטים לא סדוקים נומינלית, עם מיפוי סדקים של אזור העיגון לפני ההתקנה, מיד לאחריה, ולאחר פרק זמן ממושך, בטווח של מרחקי קצה ועומקי עיגון. המחבר אינו מודע לפרסום של השוואה כזו, והיא מוצגת כאן כהצעה ולא כממצא.

9. מסגרת מבוססת קריטריונים לסיווג

להלן הצעה למבנה החלטת הסיווג על בסיס הגורמים שזוהו לעיל, במקום ברירת מחדל בינארית. אין בה תחליף לאימות הנדרש ב־EN 1992-4, סעיף 4.7, וכאשר ניתן לבצע אימות זה — יש לבצעו. היא מוצעת למקרה הרגיל שבו האימות אינו ניתן לביצוע מחוסר מידע, והמתכנן נאלץ אחרת ליפול חזרה לברירת המחדל.

שני גבולות מוחלטים ומצוינים ראשוניים. בתכן סייסי הבטון נחשב סדוק בכל מקרה, ללא יוצא מן הכלל, והעוגן חייב להחזיק בהערכה הסייסמית המתאימה (C1 או C2). וכל אימת שנותר ספק אמיתי לאחר יישום הקריטריונים שלהלן, הסיווג הסדוק הוא התשובה ההנדסית הנכונה; טענת המאמר היא שהספק לעיתים קרובות מונח מראש ולא מבוסס, ולא שניתן להניחו מן העולם.

עבור עיגון באזור בטון הנמצא בלחיצה לכל עומק העיגון, הבטון אינו סדוק. עבור עיגון הנמצא באזור מתיחה, או הפורש עליו, מוצעים הקריטריונים הבאים.

תומך בסיווג כלא סדוק	מחייב סיווג כסדוק
העומס מתחלק בין מספר רב של נקודות חיבור, המאפשר חלוקה מחדש	החיבור נשען על מעט עוגנים קצרים באזור מתיחה
נעשה שימוש בבורגי בטון או בעוגנים כימיים, שאינם מטילים מתח קדם על הבטון בהתקנה	נעשה שימוש בעוגני טריז מבוקרי מומנט בעומק עיגון קטן או בסמוך לקצה
עוגן מכני מערב, לאורך עומק עיגונו, בטון המצוי באזור הלחיצה של החתך	עומק העיגון מצוי כולו באזור המתיחה וקרוב לפאה המתוחה
באזור העיגון אין מנגנון מציאותי שבו סדק יתפתח לעומק המתקרב לעומק העיגון האפקטיבי	אזור העיגון הוא כזה שבו סביר לצפות לסדק עמוק ורחב
לא צפוי שינוי משמעותי בטעינת האלמנט או העיגון לאחר ההתקנה	צפויות עליות משמעותיות בטעינת האלמנט או העיגון לאחר ההתקנה
האלמנט דרוך ונותר בלחיצה באזור העיגון בצירוף העומסים הרלוונטי	האלמנט תוכנן במפורש לתפקד במצב סדוק באזור העיגון

טבלה 4. קריטריונים מוצעים לסיווג מצב הבטון באזור מתיחה, במקום ברירת מחדל גורפת. כל רשומה יחידה בטור הימני קובעת. תכן סייסי סדוק בכל מקרה.

הקריטריונים מצטברים בצד הסדוק וחיבוריים בצד הלא סדוק; רשומה יחידה בטור המחייב סיווג כסדוק מספיקה כדי לחייב אותו, בעוד שהסיווג כלא סדוק צריך להישען על כמה מן התנאים התומכים המתקיימים יחד. ביישום כזה המסגרת אינה הקלה על האירוקוד אלא ניסיון להשיב להחלטה את המידע שהמתג הבינארי משליך.

כאשר הסיווג נותר שקול, התגובה הפורייה ביותר היא בדרך כלל לא להתווכח עליו אלא לתכנן אותו החוצה — על ידי הגדלת מספר נקודות החיבור, על ידי הגדלת עומק העיגון כך שהעיגון יחרוג מכל עומק סדק סביר, או על ידי בחירת מערכת עיגון הנושאת הערכה לבטון סדוק בתסבולת מקובלת. ניתן להשוות את שני הסיווגים כמותית עבור חיבור נתון בתוך דקות ספורות באמצעות כלי תכן לפי EN 1992-4 כגון [AAS](#); מכלול יישומי התכן החינמיים שמתחזקת חברת המחבר מרוכז ב**מדד התוכנות**.

10. מגבלות

יש להכיר בכמה מגבלות של הטיעון. הוא נשען על פרשנות מסמכים תקינים ועל ההשלכות המכניות של עבודה ניסויית מפורסמת, ולא על נתונים ניסויים חדשים; לא בוצעו בדיקות לצורך מאמר זה. טיעון עומק הסדק, אף שהוא פשוט מכנית, אינו נתמך כאן בהתפלגות כמותית של עומקי סדקים במבנים בשירות, והיעדרה של התפלגות כזו הוא בדיוק הפער בבסיס הראיות שזוהה בפרק 4 — הטיעון מזהה אפוא מערך נתונים חסר ולא מספק אותו. טיעון גיאומטריה הסדק שבסעיף 2.6 הוא אנליטי: הוא נובע מצורת סדק הכפיפה ומקריאת שתי ההוראות יחד, ואינו דורש מדידה, אך גם לא לוו אליו כאן מדידות של רוחב מול עומק באלמנטים אמיתיים, שהיו קובעות עד כמה גדול הפער ולא רק שהוא קיים. הטיעון שבסעיף 6.3 בדבר עיגונים הנטענים בגזירה טהורה מזהה חישוב שלא בוצע ולא מבצע אותו, והוא מוגבל לדרישת האישור החלה על המוצר; אין הוא נוגע להפחתות בצד הבטון. דוגמת ה-*pry-out* שבפרק 7 נשענת על הערכה טכנית אירופית אחת עבור משפחת מוצרים אחת; האם אותו יחס בין המקדם המוצהר לתסבולת הפלדה מתקיים במוצרים אחרים ואצל יצרנים אחרים — לא נבחן כאן, וההערה על האופן שבו יכול היה המקדם להתקבל היא שאלה המופנית להערכה ולא ממצא עליה. ההשערה שבפרק 8 אינה מאומתת. הקריטריונים שבפרק 9 איכותיים ולא כוילו מול מדד מהימנות יעד; המרתם למקדמים חלקיים או למסגרת מהימנות פורמלית תדרוש בדיוק את נתוני התדירות שאינם זמינים כיום. לבסוף, הוראות לאומיות שונות זו מזו, ואין בדבר מן האמור כאן כדי לגבור על נספח לאומי, על הערכה טכנית אירופית ספציפית, או על שיקול דעתו של המהנדס האחראי למבנה.

11. מסקנות

התקנים האירופיים המגדירים בטון סדוק עקביים ביניהם בין תקן הבטון לתקן העיגון: שניהם מגדירים את המצב לפי אפשרות היווצרותו של סדק ברוחב 0.3 מ"מ. אף אחד מהם אינו מייחס לסדק זה עומק. התוצאה היא שסדק בעומק זניח מספיק כדי להפעיל את הסיווג, בעוד שמשטר האישור שאליו הסיווג מוביל משחזר סדק החוצה את העיגון. התקנים אינם מבחינים בין סידוק שטח לסידוק לכל העומק. באלמנט הנתון לכפיפה הסדק אכן מגיע לציר הנייטרלי, ולכן בעיגון המותקן מן הפאה המתוחה העומק אינו ההגנה; מה שכללי העיגון מפרזים בו שם הוא הרוחב, שלאורך עיגון טיפוסי תחת עומס מעין־קבוע נמוך בהרבה ממחצית ערך הייחוס.

סתירה נוספת מצויה בגיאומטריה. סדק כפיפה הוא טריז, רחב ביותר בפני המתיחה ונסגר לאפס בקצהו, ולכן סדק של 0.3 מ"מ בפני השטח צר יותר בכל עומק שמתחתיו. דגם האישור, לעומת זאת, מסודק ברוחב אחיד בקירוב לכל עובי האלמנט. בחתך הנתון לכפיפה שני התנאים אינם יכולים להתקיים יחד: סדק של 0.3 מ"מ בעומק העיגון רחב מ־0.3 מ"מ בפני השטח וכבר חרג מן המגבלה המגדירה את הסיווג. המסגרת מפעילה את הסיווג על הגיאומטריה הראשונה ומודדת את התסבולת תחת השנייה.

שני פערים נוספים נוגעים לטעינה ולא לגיאומטריה. המאמץ הדרוש לפתיחת סדק של 0.3 מ"מ לעומק נתון ניתן לחישוב עבור כל חתך ומעולם לא קושר להתפלגות עומקי העיגון הנהוגים, אף שעשיית הדבר הייתה תוחמת את הבעיה ישירות. ובעיגון הנטען בגזירה טהורה העוגן אינו תורם דבר לפתיחת הסדק, ואף אחת משלוש הבדיקות

העשויות לקבוע שם אינה נשענת על נתון שהתקבל מבדיקה בבטון סדוק: המנגנון שהערכת הבטון הסדוק של המוצר בוחנת — שמירת כוח ההתפשטות כשסדק נפתח ונסגר תחת מתיחה — אינו מתעורר, גם אם ההפחתות בצד הבטון ממשיכות לחול כדין.

בדיקת ה־pry-out ממחישה את אותה חולשה מבנית בצורה הניתנת לבדיקה אריתמטית. הערכה תקפה מצהירה על מקדם ייחודי למוצר המציב את תסכולת ה־pry-out של עוגן טריז M16 בין 1.5 ל־2.8 מתסכולת הפלדה שלו בגזירה, כך שאופן הכשל שהמקדם מכמת אינו ניתן לייצור על ידי המוצר שאותו הוא מתאר. אין מכך נובע דבר בלתי בטוח, שכן בדיקת הפלדה קובעת; אך מקדם המוצג כתכונת מוצר נמדדת, במסמך שהמתכנן חייב להסתמך עליו ואינו יכול לתשאל, עשוי לתאר תנאי שאין להביא את המוצר להציגו.

שלוש מסקנות נוספות נובעות מכך. ראשית, הסיווג הוא כראוי שיפוט הסתברותי על אירוע משותף — סדק קיים, סדק עמוק, סדק פתוח, עיגון טעון — והוכר ככזה בהנחיית BBA מס' 39 עוד לפני שהניסוח הבינארי של האירוקוד דחק קריאה זו. שנית, מודל החרוט המכמת את הקנס משמיט את תרומת הזיון הרגיל החוצה את משטח הכשל, ועבודה ניסויית עדכנית מלמדת שהשמטה זו אינה קטנה. שלישית, המאמץ המחקרי התומך במסגרת הופנה כמעט כולו לחומרת התנאי וכמעט כלל לא לתדירותו, ומבנה המימון של אותו מחקר מציע הסבר פשוט לאסימטריה.

המלצה

המלצת מאמר זה אינה שיש להקל בסיווג. היא שיש לבחון מחדש שתי הנחות יסוד שלו, ולבחון אותן אמפירית ולא בדרך של טיעון, משום ששתיהן מונחות כיום ולא מבוססות.

הראשונה היא סבירות תנאי הייחוס עצמו: באיזו תדירות, ובאילו נסיבות, סדק של 0.3 מ"מ אכן קיים לכל אורך העיגון. משטר האישור משחזר את התנאי הזה באופן גורף, והסיווג מפעיל אותו על כל עיגון באלמנט הנחשב סדוק. סעיף 2.7 מלמד שבאלמנטים הנתונים לכפיפה הוא מושג רק בקרבת הקצה העליון של טווח השירות המותר, ושגם כאשר הוא מושג הרוחב לאורך העיגון נמוך בהרבה מן הערך בפני השטח; באלמנטים מרוסנים הוא אמיתי אך מוגבל למחלקת מבנים מוגדרת. האם תנאי בתדירות כזו צריך לשמש ייחוס לכל עיגון — שאלה זו, ככל שהמחבר יכול לקבוע, מעולם לא נשאלה.

השנייה היא העומק שבו סדקים אכן מופיעים במבנים בשירות, והשפעתו של אותו עומק על עוגן מותקן — כאשר שני נתונים נחשבים כמשתנים הקובעים את ההחלטה ולא כנתונים שהיא מתעלמת מהם: עומק ההתקנה של העוגן, וכוח השליפה המופעל עליו בפועל. סדק בעומק נתון אינו אותה בעיה עבור עיגון של 60 מ"מ ועבור עיגון של 160 מ"מ; ועיגון העובד בשליש מתסכולתו אינו באותו מצב כמו עיגון בעומס התכן שלו. הסיווג אינו מביא כיום בחשבון אף אחד מהם, אף ששניהם ידועים למתכנן ברגע שבו הסיווג נעשה.

פריט שליש אינו דורש מדידה חדשה כלל, והוא מפורט בסעיף 6.4: עבור עיגון שטעינתו מוגבלת באופן מוכח לגזירה, כל נתון ששלוש הבדיקות הקובעות דורשות הוא תכונה של הפלדה, מידה, או מקדם של התקן. אף אחד מהם אינו מתקבל מבדיקה בבטון סדוק. אין אפוא שום מניעה חיובית להשתמש בעוגן שאושר לבטון לא סדוק בלבד באלמנט המסווג כסדוק, ובלבד שהיעדר המתיחה אמיתי. מסקנה זו מופנית לגופים הכותבים את הכללים ולא למהנדס המיישם אותם, מן הטעמים המפורטים שם, והיא השינוי היחיד שיסיר את הנתח הגדול ביותר של עלות מיותרת מן הפרקטיקה הרגילה בלי לוותר על מהימנות.

מה שיכריע שאלות אלה הוא מדידה ולא נימוק: סקרי עומק ורוחב סדקים בעומקי ההתקנה של עוגנים במבנים בשירות, וניתוח מהימנות של אוכלוסיית העיגונים המתוכננים כלא סדוקים באלמנטים שהיו מסווגים כסדוקים. אף אחד משניהם אינו מעבר ליכולת המשאבים של התעשייה המממנת את שאר התחום, ואף אחד מהם לא בוצע.

עד שיעשו, את העמדה המעשית ניתן לנסח ככלל — וכלל זה הפוך מזה הנוהג כיום. כאשר אין מנגנון מציאותי שבו יכול להופיע באזור העיגון סדק מן הסוג המשמש ייחוס, יש לסווג את הבטון כלא סדוק. רק כאשר נותר ספק אמיתי יש לסווג כסדוק.

זו הצעה ויש להכיר בה ככזו. EN 1992-4, סעיף 4.7, קובע את ברירת המחדל בכיוון ההפוך, ואין במאמר זה דבר המתיר למתכנן לסטות ממנה. אלא שברירת מחדל היא קביעה בשאלה על מי מוטל נטל ההוכחה, ומקומה על התנאי הפחות שכיח ולא על השכיח יותר. הראיות שנאספו כאן מצביעות על כך שמצב הסידוק הוא החרגי בבנייה רגילה ולא הכללי: סדק הייחוס מתאים למאמץ פלדה הקרוב לטווח הסופי ולא לטווח השירות; באלמנט הנתון לכפיפה הרחב שהעיון פוגש נמוך בהרבה ממחצית הערך בפני השטח; הסדק האחיד לכל העובי שייך למחלקת אלמנטים מוגדרת וקטנה יחסית; ובגזירה טהורה אף אחת מן הבדיקות הקובעות אינה נשענת כלל על בדיקה בבטון סדוק. מסגרת המחייבת להפריך את החרגי בכל מקרה ומקרה, באמצעות מידע שאין בידי מתכנן העיון, תחזיר את התשובה "סדוק" בכל פעם — וזה בדיוק מה שהיא עושה.

אי־סימטריית העלות נובעת מאי־סימטריית ברירת המחדל. בהסדר הנוכחי הקנס משולם על כל עיון. בהסדר המוצע הוא משולם רק כאשר הספק אמיתי, ושם התשובה אינה משתנה: תכנון לבטון סדוק, משום שהקנס הוא עלות ידועה והחלופה היא סיכון לא ידוע. מה שמשתנה אינו הטיפול במקרה המסופק אלא הטיפול במקרה הברור.

הצהרת אינטרסים

המחבר הוא מהנדס מבנים מעשי ובעלים באדית בע"מ, חברה ישראלית המספקת מוצרי עיון וחיוק ומעניקה ליווי הנדסי לשימוש בהם. אינטרס מסחרי זה פועל בכיוון ההפוך לטיעון המועלה כאן — סיווג סדוק מגדיל את ערך המוצרים שחברת המחבר מוכרת — אך הוא אינטרס בנושא הנדון ומוצהר מאותו טעם שבגינו נדון מימון הספרות הרחבה יותר בפרק 4. לא התקבל מימון חיצוני לעבודה זו.

זמינות נתונים ותוכנה

לא נוצרו נתונים ניסויים חדשים. המסמכים התקניים ומסמכי ההערכה שעליהם נשען המאמר, בצורתם הניתנת להפצה, מרוכזים בספריית התקנים והחברות של אדית. יישומי התכן לפי EN 1992-4 המוזכרים בטקסט זמינים חנם ואינם דורשים הרשמה: AAS (תכן עוגנים לפי EN 1992-4) ומדר יישומי התכן המלא. תקנים המוגנים בזכויות יוצרים שפורסמו על ידי CEN וגופים אחרים מצוטטים בהפניה בלבד ויש לרכושם מן המוציא לאור. מאמרים הנדסיים נוספים של המחבר מתפרסמים בadit.org.il/articles. התכתבות: adit.org.il/contact-us.

מקורות

- [1] EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. הוועד האירופי לתקינה, בריסל. (בקרת סידוק: 7.3.1).
- [2] EN 1992-4:2018, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 4: Design of Fastenings for Use in Concrete*. הוועד האירופי לתקינה, בריסל. (מצב הבטון: 4.7).
- [3] British Board of Agrément, *Guidance No. 39: Anchor Bolts for Use in Concrete*, מהדורה 4, אפריל 2015 (סימוכין 17-06-39). זמין ב- <https://eng.adit.org.il/wp-content/uploads/2018/06/UK-Guidance-cracked-or-non-cracked.pdf>
- [4] A. Sharma, R. Eligehausen and J. Asmus, "Comprehensive Experimental Investigations on Anchorages with Supplementary Reinforcement", in *Connections between Steel and Concrete*, 3rd International Symposium, Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, 2017
- [5] R. Nilforoush, M. Nilsson and L. Elfgren, "Experimental Evaluation of Influence of Member Thickness, Anchor-Head Size, and Orthogonal Surface Reinforcement on the Tensile Capacity of Headed Anchors in Uncracked Concrete", *Journal of Structural Engineering*, 144(4): 04018012, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001976

- [6] R. Nilforoush, M. Nilsson and L. Elfgrén, "Influence of Surface Reinforcement, Member Thickness and Cracked Concrete on Tensile Capacity of Anchor Bolts", 2017. Luleå University of Technology ;רשומה זמינה דרך DiVA (diva2:1153766).
- [7] A. Sharma, R. Eligehausen and J. Asmus, "Experimental Investigation of Concrete Edge Failure of Multiple-Row Anchorages with Supplementary Reinforcement", *Structural Concrete*, 18(1), 2017. DOI: 10.1002/suco.201600015
- [8] EOTA, מסמכי הערכה אירופיים לעוגנים מכניים וכימיים לשימוש בבטון (EAD 330499 ו־ EAD 330232), והדוחות הטכניים הנלווים. הארגון האירופי להערכה טכנית, בריסל.
- [9] "Turning the Screw on Stud Anchors", *Engineers Journal* (Engineers Ireland), 5 May 2015
- [10] European Technical Assessment ETA-11/0374, *Hilti HSA metal expansion anchor* ב־27 באוקטובר 2023. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), ברלין. (נספח C1: תסבולת אופיינית במתיחה בבטון לא סדוק; נספח C2: תסבולת אופיינית בגזירה בבטון לא סדוק.)
- [11] CIRIA C766, *Control of Cracking Caused by Restrained Deformation in Concrete*, CIRIA, London, 2018 (מערבן את C660, Early-age Thermal Crack Control in Concrete, 2007).
- [12] EN 1992-3:2006, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures — Part 3: Liquid Retaining and Containment Structures*. הוועד האירופי לתקינה, בריסל.

ציטוט מוצע

דה לטואר, א' (2026). היכן הסדקים בהגדרת "בטון סדוק"? סקירה ביקורתית של הבסיס התקני לברירת המחדל של בטון סדוק בתכנון עוגנים מותקנים בדיעבד, והנימוק לסיווג הסתברותי. אדית בע"מ, ישראל.