

עלון

אישח"מ

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 11

מרץ 2004

עורך: דן גבעולי, הפקולטה להנדסת אוירונאוטיקה וחלל, טכניון, חיפה 32000,
טל. 8292308 (04), פקס 8292030 (04), דואר אלקטרוני: givolid@aerodyne.technion.ac.il
חברי ועד אישח"מ: עמנואל אור (מזכיר-גזבר), מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי,
יצחק הררי (נשיא), יונתן טל, זהר יוסיב
איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר
ועדת ביקורת: איתן כוכבי, משה פוקס
אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.iacmm.org.il>
רישום לחברות באגודה ופרטים נוספים: באתר האגודה הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר,
ד"ר עמנואל אור, טל. 9908640 (04), פקס 9908164 (04), דואר אלקטרוני: emanuelo@rafael.co.il

הערות העורך:

אינטליגנציה מלאכותית, כגון אלגוריתמים גנטיים, לוגיקה
עמומה, ורשתות עצביות. אלו שיטות רבות עוצמה אך יחד
עם זאת פשוטות להבנה ולתכנות. יום העיון מבטיח להיות
מרתק ביותר, והאכסדרה של CRI ידועה בטיבה המשובח.
תוכנית ראשונית מופצת יחד עם עלון זה.

נא שלחו לכתובת המערכת (בדואר אלקטרוני או רגיל) חומר
לפרסום בעלון. ניתן ורצוי לצרף ציורים ותמונות. לידיעת חברות:
ניתן גם לפרסם חומר מסחרי-פרסומי בתשלום. לפרטים נא לפנות
למערכת. גירסה צבעונית של עלון זה מופיעה באתר האגודה
(ראה לעיל).

חידוש רישום באגודה:

אנא הרשמו כחברים באגודה או חדשו את חברותכם! טופס רישום
עם פרטים מלאים ניתן למצוא באתר
<http://www.iacmm.org.il/member>

אנליזת אלמנט סופי של מחבר מוברג עם טלאי מחומרים מרוכבים

עידו קרסל, דוד בולם, גילה גילאי
תעשייה אוירית
ikressel@iai.co.il

שלומית גליא
מפא"ת, משרד הבטחון

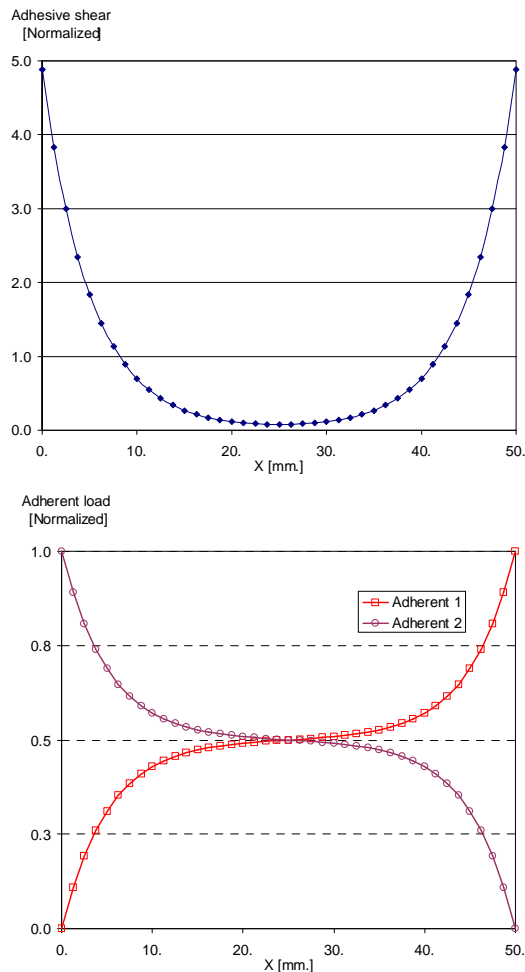
קונספט תיקון מבנים מתכתיים במטוסים מזדקנים ע"י
טלאי מחומרים מרוכבים הוצג כבר בשנות ה-70. מבין
העבודות הראשונות יש לציין תיקון סדקי התעייפות
במעטה תחתון של כנף מטוס מירד' III ע"י האוסטרליים.
תיקון דומה בוצע ע"י התעשייה האווירית במטוסי כפיר

ISC-15

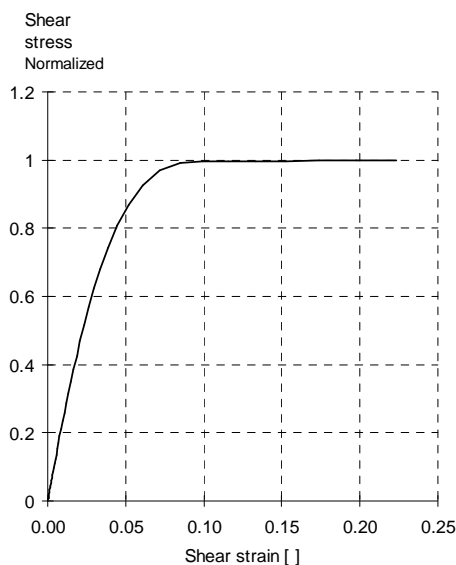
יום העיון ה-15 של אישח"מ התקיים ב-23.10.2003
באוניברסיטת ת"א. ארגנו אותו להפליא ד"ר אלכס גלפגט
וד"ר סלבה קרילוב. יום העיון כלל הרצאה מוזמנת של
החוקר הידוע במכניקת הזורמים החישובית, פרופ' הירש
מבריסל, שני מושבי הרצאות, ולומדה מאלפת של פרופ'
לסלי בנקס-סילס על מכניקת השבר החישובית. יום העיון
כולו היה מוצלח ביותר.

ISC-16

יום העיון ה-16 יתקיים ב-25.3.04 במכון קיסריה רוטשילד
למדעי המחשב (CRI) באוניברסיטת חיפה. יום העיון כולו,
המאורגן ע"י דן גבעולי ו-CRI, הוא בחסות הנדיבה של
CRI, ויוקדש לנושא "שיטות חישוב רכות". אלו שיטות
אופטימיזציה חדשניות המבוססות על כלים של



איור 2: אנליזת מחבר מודבק. גרף תחתון: פילוג העומס במחברים, גרף עליון: פילוג מאמץ הגזירה בדבק.



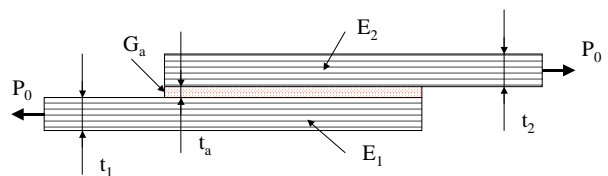
איור 3: עקומת מאמץ עיבור אופיינית לדבק מבני

בראשית שנות ה-80. כיום שיטת תיקון זו מקובלת בעיקר בתחום הצבאי אם כי גם בתחום האזרחי נעשים מאמצים לישום הטכנולוגיה, כפי שנעשה בשנות ה-90 בפרויקט תיקון סדקים סביב דלת כניסה למטוס L-1011 של חברת מקדונלד דגלס.

יחסית לתיקון של טלאי מתכתי המחובר למבנה בעזרת קשיחים, לטלאי מודבק מחומרים מרוכבים ישנם היתרונות הבאים: מעבר העומס מהמבנה לטלאי רציף והדרגתי, אין צורך בקידוח חורים נוספים עבור קשיחים ובכך נמנעת הופעה של מקומות קריטיים חדשים. החומר המרוכב עצמו הוא בדרך כלל בעל תכונות טובות לעמידה בעמיסה מחזורית ומהווה הגנה למבנה המתכתי מפני השפעת תנאי סביבה. בנוסף יש לציין כי בעזרת חומרים וטכנולוגיות יצור מתקדמים ניתן להתאים את גיאומטריית הטלאי מחומרים מרוכבים בצורה מושלמת למבנה, כל זאת בתהליך הקשייה על המטוס. מניסיון שהצטבר עד היום ניתן לקבוע כי קונספט תיקונים המבוסס על טלאי מודבק המוקשה על המטוס מהווה אופציה זולה ואמינה לתיקון נזקי מבנה במטוסים מזדקנים.

העומסים מהמבנה המתכתי עוברים לטלאי דרך שכבת דבק. המאמצים בשכבת הדבק הם בעיקרם עומסי גזירה ומתיחה ניצבת (Peel). אנליזה של תיקונים מודבקים חיבת לכלול התייחסות לפילוג המאמצים בשכבת הדבק הנמצאת בין המבנה המתכתי לטלאי. תכנון נכון של טלאי מיועד להקטנת המאמצים בשכבת הדבק הגזירה בדבק, במיוחד באזורי הקצה. הדבר נעשה ע"י אופטימיזציה של הליווח והקטנת מספר השכבות לקראת שפת הטלאי.

מודל אנליטי לחיזוי פילוג המאמצים בטלאי מודבק הוצג עוד ב-1944 ע"י Reissner. מודל זה שופר ע"י Hart-Smith ומשמש בתעשייה, בשינויים קלים, עד היום. דוגמא לחישוב פילוג עומסים במחבר מודבק פשוט בעל עובי קבוע מוצגת באיור 1 ואיור 2. ניתן לדאות בברור כי האזור הקריטי מבחינת הדבק הוא קצה המחבר.



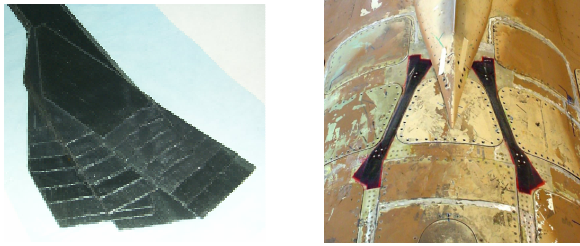
איור 1: מחבר מודבק פשוט

נתוני המחבר הם:

$$\begin{aligned} E_1 &= 70 \text{ GPa} & t_1 &= 3 \text{ mm} \\ E_2 &= 70 \text{ GPa} & t_2 &= 3 \text{ mm} \\ G_a &= 0.8 \text{ GPa} & t_a &= 0.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

בחישוב מעשי של מחבר מודבק יש לקחת בחשבון את ההתנהגות הלא-ליניארית של הדבק. עקומת מאמץ עיבור אופיינית לדבק מבני הנמצא בשימוש התעשייה האווירונאוטית מוצגת באיור 3.

4mm על גב המטוס לצורך מניעת התפתחות סדקים (איור 6).



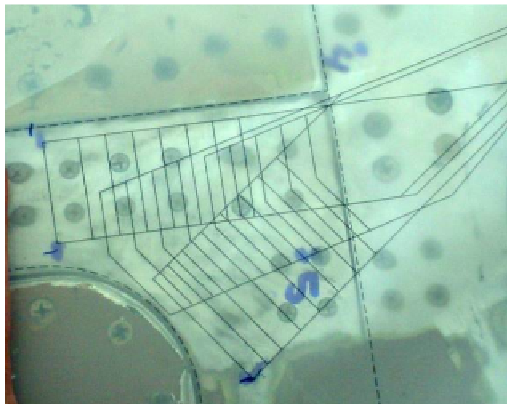
(b)

(a)

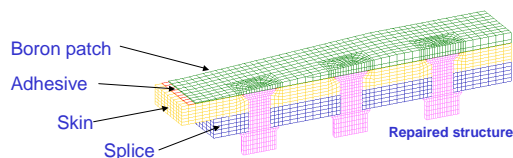
איור 6: תיקון מודבק מטוס F-16
(a) מבט כללי (b) פרט קצה קדמי

הצדקת תיקון זה הצריכה התייחסות לעובדה שהתיקון יושם על אזור מרובה קשיחים כמו שניתן לראות ב איור 7. שטח הקשיחים מהווה נתח משמעותי מסך כל אזור ההדבקה והם עצמם מהווים הפרעה ברציפות של המעטה. קושי נוסף התעורר מאחר ומסיבות טכנולוגיות לא ניתן היה להבטיח הדבקה נאותה של ראשי הקשיחים לסילאי.

תוכנת MSC/MARC נבחרה לביצוע האנליזה מאחר ובעזרתה ניתן לחשב את פילוג המאמצים בדבק תוך התחשבות בגורמים הבאים: ההתנהגות הלא ליניארית של הדבק ואופי המחבר המורג שכולל מספר אלמנטים הנמצאים במגע תחת עומס מוקדם. תאור כללי של המודל מובא באיור 8 ו-1 איור 9.



איור 7: תיקון F-16 מיקום קשיחים באזור הקידמי של התיקון



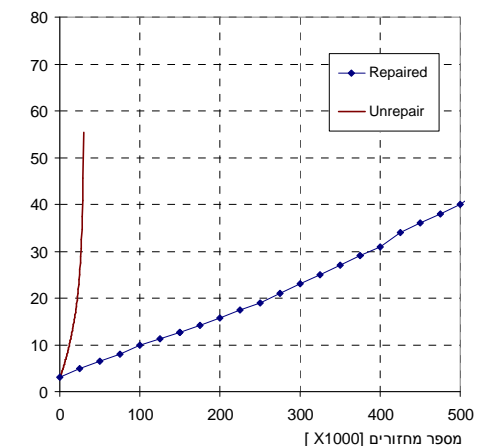
איור 8: מודל אלמנט סופי-תאור כללי

המודל כלל 13,000 נקודות צומת ורץ במשך כשעה על מחשב PC 2400MHz עם 1.5G זיכרון. פילוג מאמצים אורכיים במודל מוצג באיור 10. השפעת הטלאי על ריכוז

בשנות ה-80 הציג Rose מודל אנליטי מקורב לחישוב מקדם עוצמת המאמץ עבור סדק המתפתח במבנה מתכתי תחת טלאי מודבק. מודל זה צופה כי מקדם עוצמת המאמץ לא ישתנה עקב גידול אורך הסדק ולכן קצב גידול הסדק יהיה קבוע תחת עמיסה מחזורית באמפליטודה קבועה. זאת בניגוד למקובל עבור סדק פשוט שם מקדם עוצמת המאמץ תלוי באורך הסדק.

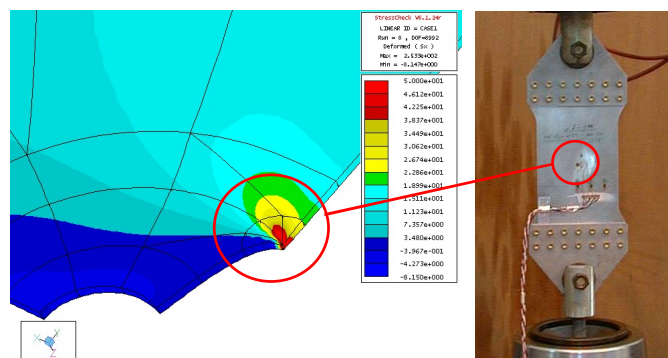
דוגמה ליסודי גידול סדק של דגם מובאת באיור 4. נראה בברור כי השפעת הטלאי על אורך החיים של הדגם מרשימה. בנוסף נתן להבחין כי קצב גידול הסדק בדגם עם תיקון הוא קבוע.

אורך סדק [mm]



איור 4: עקומת גידול סדק לדגם עם תיקון מודבק

עבור דגם זה בוצעה אנליזה אלמנט סופי לחישוב מקדם עוצמת המאמץ (איור 5). האנליזה בוצעה בתוכנת StressCheck עקב הדיוק הרב שמתאפשר בשיטת P-Element, בקרת השגיאה, נוחות החישוב של מקדם עוצמת המאמץ והאפשרות למודל פרמטרי שבו ניתן לקבל את מקדם עוצמת המאמץ עבור טווח גודל סדק רצוי.



איור 5: מודל אלמנט סופי לסדק היוצא מתוך קדח (StressCheck), 1/8 מודל

פתוח טכנולוגית תיקונים מודבקים הוכר ע"י מפא"ת וחיל האוויר כבעל פוטנציאל להגדלת שמישות המטוסים תוך צמצום עלויות האחזקה. במסגרת זו הותנה פרויקט משותף לפתוח תשתית לתיקון מעטה של מטוס F-16. במסגרת פרויקט זה הותקנו שני חיזוקים מסיבי בורון בעובי של

פינת הלשון

באנגלית קיימת אבחנה, בהקשר של מכניקה חישובית, בין המילים *efficient* ו-*effective*. בעברית משתמשים במילה "יעיל" עבור שניהם. ההבדל בין שתי המילים הוא דק, אך יש שרואים ב-"*efficient*" התייחסות בעיקר לזמן החישוב ולא לדיוק התוצאות, ואילו ב-"*effective*" התייחסות לשניהם יחד. כלומר, לפי אחת הגרסאות: $Accurate + Efficient = Effective$. יש להעיר כי אבחנה זו אינה מקובלת על הכל וכי יש לה גם גרסאות אחרות. ניתן כמובן להשתמש במילה "אפקטיבי" גם בעברית.

מידת אפקטיביות של שיטה חישובית

מידת האפקטיביות של שיטה חישובית אינה מאד פשוטה, ובספרות רואים לעיתים קרובות השוואה לא זהירה של ביצועי שיטות שונות לפתרון בעיה מסוימת. למשל, בהנתן בעיה שפתרונה המדויק ידוע, ניתן להסתכל על תוצאות שהתקבלו עבורה משתי שיטות חישוביות. אם אחת השיטות יותר מדויקת ויותר מהירה מהשנייה, ברור שהיא השיטה העדיפה. (ישנם גם שיקולים נוספים, כגון קלות היישום, אך נתעלם מהם לצורך הדיון). אולם מה ניתן להסיק כאשר אחת השיטות יותר איטית ויותר מדויקת מהשנייה? ננסה לענות על שאלה זו להלן.

רוב השיטות החישוביות מערבות בתוכן פרמטרים חישוביים המשפיעים הן על דיוק התוצאות והן על מהירות החישוב. לדוגמה, בשיטת האלמנטים הסופיים פרמטרים אלו הם עדינות הרשת, סוג האלמנטים וכו'. ע"י הגדלת עדינות הרשת, למשל, נקבל תוצאות מדויקות יותר אך גם זמן חישוב ארוך יותר. נניח עתה שאנו רוצים להשוות בין האפקטיביות של שתי שיטות ולבדוק מי העדיפה מבין שתיהן. נוכל לבחור את הפרמטרים החישוביים של שתי השיטות כך שיתנו לנו תוצאות בעלות דיוק זהה. אז נבדוק מי מהשתים נתנה את התוצאות בזמן קצר יותר, והיא השיטה האפקטיבית יותר. לחילופין, נוכל לבחור את הפרמטרים החישוביים של שתי השיטות כך שיתנו לנו זמן חישוב זהה, ואז השיטה העדיפה תהיה זו שנותנת תוצאות מדויקות יותר.

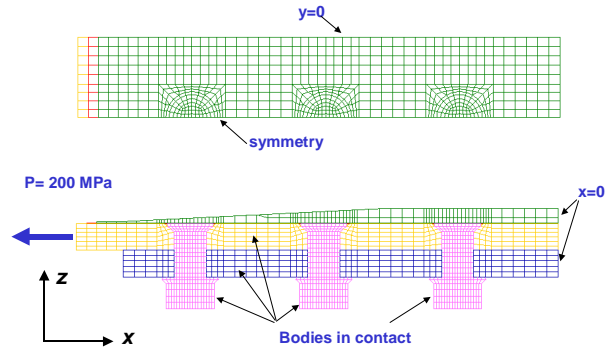
פתרון חידת רב-סריג מהגליון הקודם

בסקסט שהיה נתון הסתתרו שני טקסטים נוספים אותם היה על הקוראים למצוא. שם החידה, "רב-סריג", רמז על דרך הפתרון. אותיות הטקסט הנתון מסמלות צמתים ברשת עדינה. כמו בשיטת רב-סריג, מגדירים רשתות גסות יותר המונחות על גבי הרשת העדינה. שני הטקסטים המוחבאים מסמלים שתי רמות של סריגים כאלה: סריג, שיכונה "הרמה הבינונית", הגם פי 3 מהסריג הנתון ברמה העדינה, וסריג הגם פי 3 מהסריג הבינוני, שיכונה "הרמה הגסה". הטקסט ברמה הבינונית מתקבל לפיכך ע"י דילוגים של 3 אותיות על פני הטקסט הנתון, והוא:

קשה לצפות במדת השפעה של חתך, מאך, עדינות הסריג וצורתו על הפתרון, ובאופן שיתן לנו רוח מעשי. הטקסט ברמה הגסה מתקבל ע"י דילוגים של 3 אותיות על פני הטקסט הנ"ל, והוא:

קצב ההתכנסות הוא שלוש.

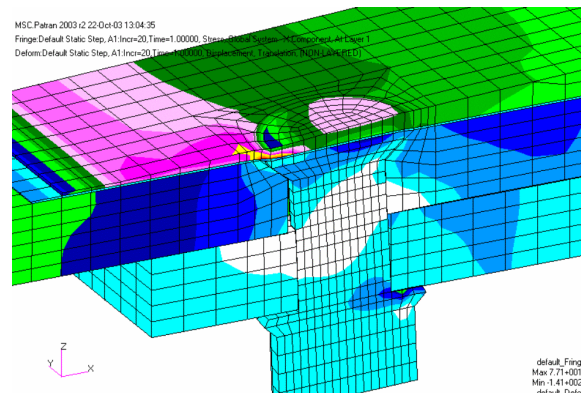
הקורא פרופ' יוסף שטריקר פתר את החידה נכונה, וזכה בשנת תברות חינו באישח"מ. מכיוון שמכניקה חישובית אינה תחום עיסוקו העיקרי, הוא בחר להעביר את הפרס לסטודנט יאיר מור-יוסף.



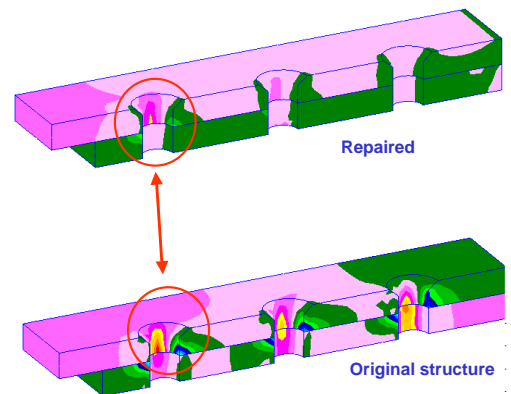
איור 9: מודל אלמנט סופי-תנאי שפה

המאמצים בחורי הברגים מוצגת באיור 11. המאמצים המכסימיים בקדח הבורג הראשון ירדו ב- 40%.

בעזרת האנליזה שתוארה ניתן לומר כי תיקונים מודבקים ישימים גם לאזורים מרובי קשיחים תחת עומסים גבוהים. בפועל, לאחר גיבוש הטכנולוגיה ליישום בתנאי שדה, אכן תיקונים אלו צברו כ- 200 שעות טיסה ללא ממצאים חריגים.



איור 10: מודל אלמנט סופי - פילוג מאמצים אורכיים והזזות



איור 11: השפעת הטלאי על ריכוז המאמצים במבנה המתכתי

לקריאה נוספת:

A. Baker, F. Rose and R. Jones (Eds.), *Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures*, Elsevier, 2002.