

# עלנו

# אלשח'ם

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 11

מרץ 2004

**שורך:** דן גבעולי, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, טכניון, חיפה 32000, טל. 04 8292030 (04), פקס 8292308 (04), דואר אלקטרוני: givolid@aerodyne.technion.ac.il  
**חברי ועד אישוח"מ:** עמנואל אור (מצחיר-גובר), מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי, יצחק הרדי (נסיא), יונתן טל, זהר יוסיבש

**איש-קשר עם ECCOMAS:** מישל ברקוביץ' ועדה ביקורת: איתן כוכבי, משה פוקס

**אתר אישוח"מ (IACMM) באינטרנט:** <http://www.iacmm.org.il>

**רישום לחברות באגודה ופרטיהם נוספים:** באתר האגודה הנ"ל, או פנו למצחיר-גובר, ד"ר עמנואל אור, טל. 04 9908164 (04), פקס 9908640 (04), דואר אלקטרוני: emanuelo@rafael.co.il

אינטלקטואלית, כגון אלגוריתמים גנטיים, לוגיקה בעמונה, ורשתות עצביות. אלו שיטת רבת עצמה אך יחד עם זאת פשוטה להבנה ולתכנות. יומם העיוני מבתייה להיות מרתך ביחסו, והאבסדרה של CRI ידועה בטيبة המשובча. תוכנית דואשונית מופצת יחד עם עלון זה.

**הערות השורה:**  
אם שלחו לכתובת המערכת (בדו"ר אלקטרוני או רגיל) חומר לפוסטם בעលו, ניתן וצוי לצרף צירורים ותמונה. לידעת חברות: ניתן גם לפוסט חומר מסחרי. פרסום בתשלום. לפרטים נא לפנות למערכת. גירסה צבעונית של עלון זה מופיעה באתר האגודה (ראה לעיל).

## אנגליזט אלמנט סופי של מחבר מוברג עם טלאי מחומרים מורכבים

יעידו קרסל, דוד ברלם, גילה גילאי  
תעשייה אווירית  
[ikressel@iai.co.il](mailto:ikressel@iai.co.il)

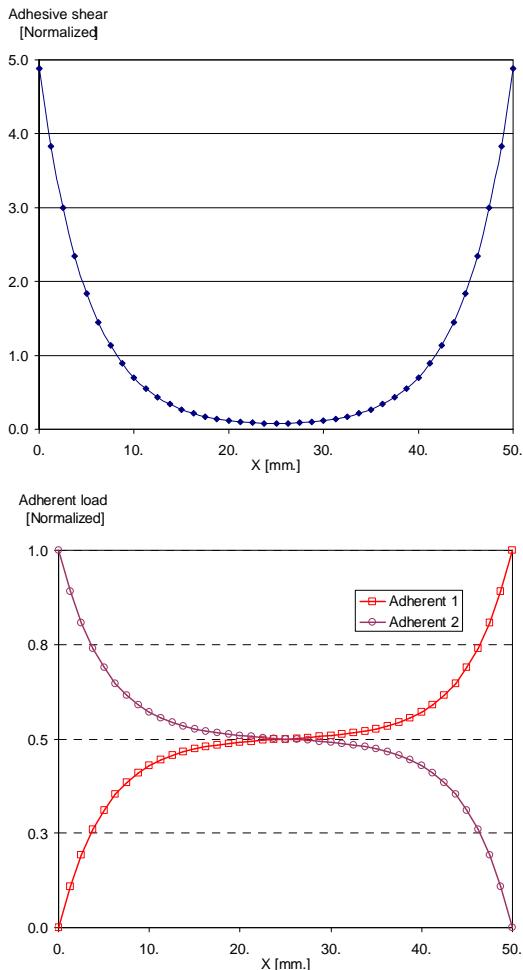
שלומית גלי<sup>א</sup>  
מפא"ת, משרד הבטחון

קונספט תיכון מבנים מתחתיים במוטסים מזקנים נ"י  
טלאי מחומרים מורכבים הציג כבר בשנות ה-70. מבחן העבודות הראשונות יש לציין תיכון סדקרי התעויופות במענה תחתון של כנף מטוס מיר' III נ"י האוטstralים. תיכון דומה בוצע נ"י התעשייה האוירית במוטס כפיר

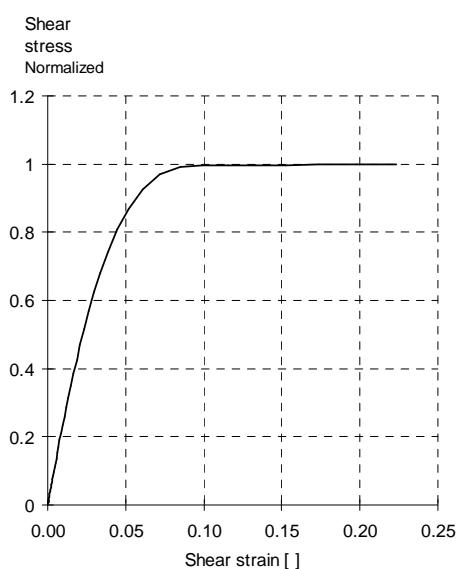
**חידוש רישום באגודה:**  
אנא הרשומם כחברים באגודה או חדשו את חברותכם! טופס רישום עם פרטיים מלאים ניתן למצוא באתר <http://www.iacmm.org.il/member>

**ISCM-15**  
יום העיון ה- 15 של אישוח"מ התקיים ב- 23.10.2003 באוניברסיטת ת"א. ארגנו אותו להפליא ד"ר אלכס גלפגט וד"ר סלה קሪלוב. יום העיון כלל הרצאה מהחמתת של החוקר הדגול במכניקה החומרית, פרופ' הרש מבристל, שני מושבי הרצאות, ולומדה מלאפת של פרופ' לסליב בנקס-סילס על מכינקת השבר החישובית. יום העיון כולל היה מוצלח ביותר.

**ISCM-16**  
יום העיון ה- 16 יתקיים ב- 25.3.04 במכון קיסריה רוטשילד, למדעי המחשב (CRI) באוניברסיטת חיפה. יום העיון כולל המאורגן נ"י דן גבעולי ו- CRI, הוא בחסות הנדיבה של CRI, ויוקdash לנושא "שיטות חישוב רכות". ALSO שיטות אופטימיזציה חדשות המבוססות על כלים של



**איור 2: אנטזית מחבר מודבק. גרפ' תחתון: פילוג העומס במחוברים, גרפ' עליון: פילוג ממוצע הגדרה בדבק.**



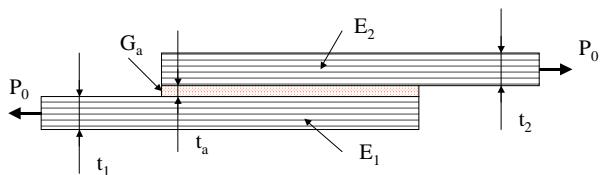
**איור 3: עקומת ממוצע עיבור אופיינית לדבק מבני**

בראשית שנות ה-80. כיוון שיטת תיקון זו מקובלת בעיקר בתחום הצבאי אם כי גם בתחום האזרחי נמשים מאמצים לשימוש הטכנולוגיה, כפי שנעשה בשנות ה-90 בפרויקט תיקון סדקים שבב דלת כניסה למוטוס 1011-L של חברת מקדונל דגלס.

יחסית לתיקון של טלאי מתחתי המחבר לבניין בעורף קשיחים, לטלאי מודבק מחומרם מרכובים ישם יתרונות הבאים: מעבר העומס מהמבנה לטלאי דציף והדרגי, אין צורך בקידוח חורדים נוספים עבור קשיחים ובכך נמנעת הופעה של מקומות קritisטים חדשים. החומר המרוכב עצמו הוא בדרך כלל בעל תכונות טובות לנימיצה בעמידה מחוזרת ומזהה הגנה למבנה המתחתי מפני השפעת תנאי סבירות. בנוסף שציוין כי בעורף חומרים וטכנולוגיות יוצרות מתקדים ניתן להתקיים את גיאומטריה הטלאי מחומרם מרכובים בצורה מושלמת לבנייה, כל זאת בתהילן הקשייה על המוטוס. מניסיון שהצבר נד הימן ניתן לקבוע כי קונספט תיקוני המבוסס על טלאי מודבק הנמצא על המוטוס מראהו אופצייה זולה ואמינה לתיקון המוקשה על המוטוס מהזיה אופצייה של נזקי מבנה במוטוסים מודקינים.

העומסים מהמבנה המתחתי נוברים לטלאי דרך שכבות דבק. המאיצים בשכבות הדבק הם בעירם עומסי גזירה ומתייה ניצבת (Peel). אנליזה של תיקונים מודבקים חיבבת לכלול התיקחות לפילוג המאיצים בשכבות הדבק הנמצאת בין המבנה המתחתי לטלאי. תכונו וכוכו של טלאי מועד להקטנת המאיצים בשכבות הדבק הגדרה בדבק, במיוחד באזורי הקצה. הדבר נשנה ע"י אופטימיזציה של הליווה והקטנת מספר השכבות לקראת שפת הטלאי.

מודל אנליטי לחיזוי פילוג המאיצים בטלאי מודבק הוצע עוד ב- 1944 ע"י Reissner-Hart-Smith. מודל זה שופר ע"י וושינגטון תעשייה, 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 לנקח בחשבון את ההתנגדות הלא-LINIARITY של הדבק. עקומת ממוצע עיבור אופיינית לדבק מבני הנמצא בשימוש התעשיית האירואנוטית מוצגת באיור 3.

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



(b)

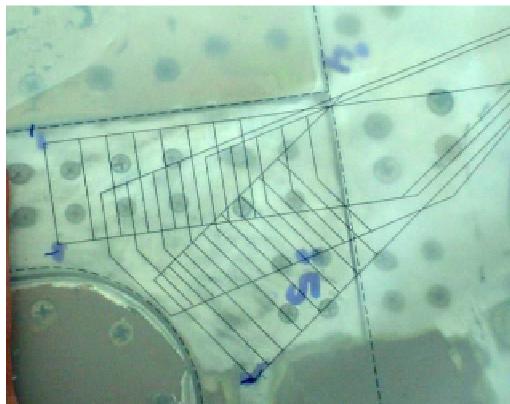


(a)

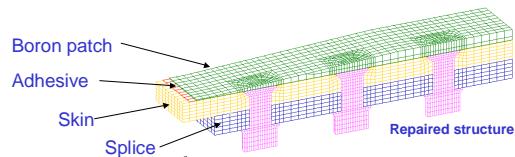
**איור 6: תיקון מודבק מטוס F-16**  
(a) מבט כללי (b) פרט קצה קדמי

הצדקת תיקון זה הצריכה התייחסות לעובדה שהתיקון יושם על אזור מרובה קשיחים כמו שnitן לראות ב איור 7. שטח הקשיחים מהווע נתמך שמעוניי מסך כל אזור ההדקה והם עצם מהווים הפרעה בריציפות של המעטה. קושי נוספת לאחר מסיבות טכניות לא ניתן היה להבטיח הדקה נאותה של ראייה הקשיחים לטלאי.

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



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



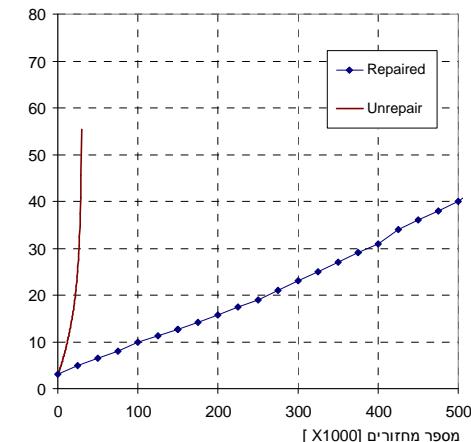
**איור 8: מודל אלמנט סופי-תאזר כימי**

המודל כולל 13,000 נקודות צומת ורך במשר כשתה על מחשב 2400MHz PC עם 1.5G זיכרון. פילוג מאמצים אורכרים במודל מוצג באיור 10. השפעת הטלאי על דרכו

בשנות ה-80 הצביע Rose מודל אנליטי מוקדם לחישוב מוקדם ועוצמת המאמץ עבור סדק המפתחת במהלך מבנה מתכוון תחת טלאי מודבק. מודול זה צופה כי מוקדם ועוצמת המאמץ לא ישתנה עקב גידול אוור הסדק ולכן קצב גידול הסדק יהיה קבוע תחת עמידה מוחזקת באמפליטודה קבועה. זאת בניגוד למוקדם עבור סדק פשוט שם מוקדם ועוצמת המאמץ תלוי באורך הסדק.

דוגמא לניסוי גידול סדק של דגם מובא באיור 4. נראה בבודור כי השפעת הטלאי על אורך החיים של הדגם מרשימה. בנוסף ניתן להבחין כי קצב גידול הסדק בדגם עם תיקון הוא קבוע.

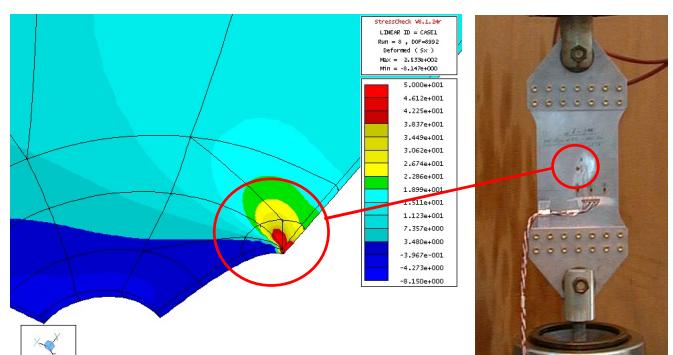
אורך סדק [mm]



**איור 4: עוצמת גידול סדק לדגם עם תיקון מודבק**

עבור דגם זה בוצעה אנליזה אלמנט סופי לחישוב מוקדם ועוצמת המאמץ (איור 5). האנליזה בוצעה בתוכנת StressCheck על קרט השגיאה, נוחות החישוב של מוקדם ועוצמת

Element המאמץ והאפשרות לモודל פרטורי שבו ניתן לקבל את מוקדם ועוצמת המאמץ עבור טווח גודל סדק רצוי.



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

פותחו טכנולוגיות תיקונים מודבקים הוכר ע"י מפא"ת וחיל האוויר כבעל פוטנציאל להגדלת שימוש המטוסים תוך מצומצם עלויות האחזקה. במסגרת זו הותנעו פרויקט משותף לפיתוח תשתיית תיקון מטוס מטוס F-16. במסגרת פרויקט זה הותקנו שני חיזוקים מסיבי בורון בעובי של

## פינט הלשון

באנגלית קיימת אבחנה, בהקשר של מכנית חישובית, בין המילים "efficient" ו- "effective". הבדל בין שתי המילים הוא דק, אך יש שוראים ב- "efficient" התיחסות בעיקר לזמן החישוב ולא לדוק התוצאות, ואילו ב- "effective": התיחסות לשינויים ייחד. ככלומר, לפ' אחת הגדראות: "Accurate + Efficient = Effective". יש להניר כי אבחנה זו אינה מקובלת על הכל וכי יש לה גם גרסאות אחרות. ניתן מובן להשתמש במילוי "אפקטיבי" גם בעבורית.

## מדדית אפקטיביות של שיטה חישובית

מדדית האפקטיביות של שיטה חישובית אינה מאד פשוטה, ובפרט רואים לעתים קרובות השוואה לא זהירה של ביצועי שיטות שונות לפחות בעיה מסוימת. למשל, בהינתן בעיה שפטורונה המדוד ידוע, ניתן להסתכל על תוצאות השתקבולו עבורה מושתת שיטה חישובית. אם אחת השיטות יותר מדוקת ויתר מהירה מהשניה, ברור שהיא השיטה העדיפה. ישנו גם שיטות נוספים, כגון קלות היישום, אך נעלם מהם לצורך הדיוון). אולם מה ניתן להסיק כאשר אחת השיטות יותר איטית אך יותר מדוקת מהשניה? ננסה לננות על שאלה זו להלן.

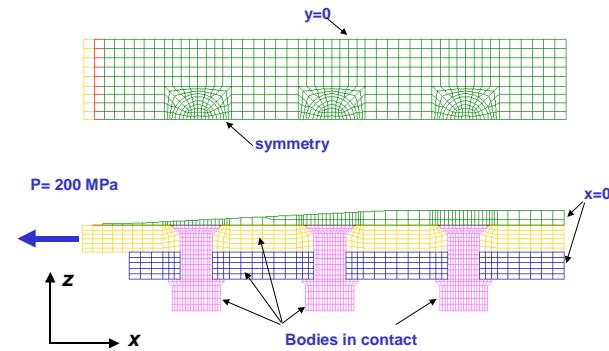
רוב השיטות החישוביות מערכות בתוך פרמטרים חישובים המשמשים הן על דוק התוצאות והן על מהירות החישוב. לדוגמה, בשיטת האלמנטים הסופיים פרמטרים אלו הם עדינות הרשת, סוג האלמנטים וכו'. ע"י הגדרת עדינות הרשת, למשל, נקבל תוצאות מדוקות יותר אך גם זמן חישוב ארוך יותר. נניח עתה שאנו רוצים להשוות בין האפקטיביות של שתי שיטות ולבזק מי העדיפה מבין שתיהן. נוכל לבחור את הפרמטרים החישובים של שתי השיטות כך שייתנו לנו תוצאות בעלות דוק זהה. אז נבדק מי מהשתיים נתנה את התוצאות בזמן קצר יותר, והיא השיטה האפקטיבית יותר. לחילופין, נוכל לבחור את הפרמטרים החישובים של שתי השיטות לנו זמן חישוב זהה, ואז השיטה העדיפה תהיה זו שנותנת תוצאות מדוקות יותר.

## פתרון חדית רב-סרייג מגליון הקודם

בטקסט יהיה נתון הסתתרו שני טקסטים נוספים אותם היה על הקוראים למצוא. שם החידה, "רב-סרייג", רמז על דרך הפתרון. אותן הטעסט הנtauו מוסמלות צמתים בראשון, כמו בשיטת רב-סרייג, מגדרים רשותות גסות יותר המונחות על גבי הרשת העדינה. שני הטקסטים המוחבאים מסמלים שתי דמות של סרייגים כאלה: סרייג, שיכונה "הרמה הבינוונית", הגס פ' 3 מהסרייג הבינווני, שיכונה "הרמה הגסה". וסרייג הגס פ' 3 מהסרייג הבינווני, שיכונה "הרמה הגסה". הטקסט ברמה הבינוונית מותקבל לפירך ע"י דילוגים של 3 אותיות על פני הטקסט הנתון, והוא:

**קשה לצפות במדת השפעה של חחר, מאך, עדינות הסרייג וצורתו על הפתרון, ובאופן שיתן לנו רוח מעשי.**  
הטקסט ברמה הגסה מתתקבל ע"י דילוגים של 3 אותיות על פני הטקסט הנ'ל, והוא:  
**קצב ההתקנסות הוא שלווש.**

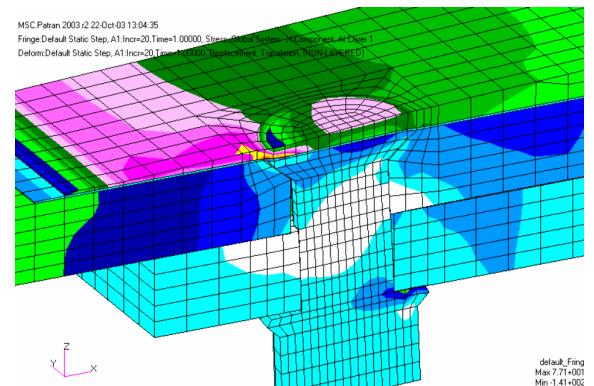
הקורס פורופ' יוסוף שטריקר פתר את החידה נכון, וזכה בשנת חברות חינוך באישח"מ. מכיוון שמכניקה חישובית אינה תחום עיסוקו העיקרי, הוא בחר להעביר את הפרס לסטודנט יair מוד-יוסף.



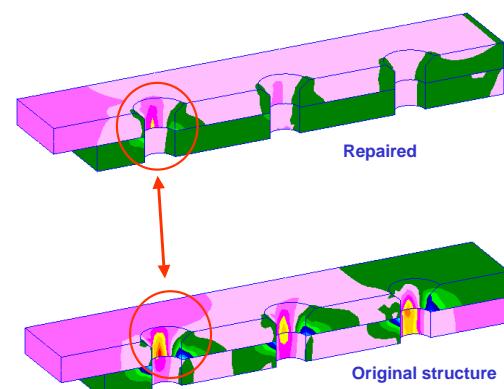
איור 9: מודל אלמנט סופי-תנאי שפה

המאמצים בחורי הברגים מוצגת באיור 11. המאמצים המכסימים בקדח הברג הראשון ירדו ב- 40%.

בנרת האנליה שתוודה ניתן לומר כי תיקונים מודבקים ישנים גם לאזורים מודובי קשיחים תחת עומסים גבויים. בפועל, לאחר גיבוש הטכנולוגיה ליישום בתנאי שדה, אכן תיקונים אלו צברו כ- 200 שנות טסה ללא מצאים חריגים.



איור 10: מודל אלמנט סופי - פילוג מאמצים אודכינים וחדות



איור 11: השפעת הטלאי על ריכוז המאמצים במבנה המתכת

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