

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 39

ספטמבר 2018

עורך: אלעד פריאל, המחלקה להנדסת מכונות, המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון, באר-שבע 84100, טל. 08) 6475884, דואר אלקטרוני: eladp@sce.ac.il
חברי ועד אישח"מ: מיכאל אנגלמן, רמי בן-צבי, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי, יצחק הררי, עמיאל הרשגה, יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבאש (נשיא), סלבה קרילוב (מזכיר-גזבר)
איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר
ועדת ביקורת: מחמוד ג'בארין ומרדכי סנטו
אתר אישח"מ (IACMM) באינטרנט: <http://www.iacmm.org.il>
רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים: באתר האגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, פרופ' סלבה קרילוב, טל. 054-7746664, דואר אלקטרוני: krylov@tauex.tau.ac.il

מ-"שולחן העורך":

כחברים באגוד או לחדש את חברותכם. טופס רישום לאיגוד ניתן למצוא ב <http://www.iacmm.org.il/member>

עדכונים מיום העיון הקודם:

יום העיון ה-44 נערך ב-22 במרץ באוניברסיטת בן גוריון. (המארגנים המקומיים היו דר' יורי פלדמן ודר' ארז גל).
Prof. Stefan Hartmann, Institute of Applied Mechanics, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld, Germany.

פרופ' הרטמן פתח את יום העיון עם הרצאה מעניינת מאד בנושא:

Two decades of the method of vertical lines in non-linear finite elements.

בנוסף להרצאת הפתיחה המרתקת פרופ' Hartmann העביר גם הרצאה מודרכת בנושא Aspects of material parameter identification in solid mechanics.



ISC44 – פרופ' Hartmann (במרכז התמונה) והוועד המנהל של האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה.

שימוש במודלים חישוביים במכאניקה לצורכי מחקר ופיתוח אפשרי רק כאשר ניתן לכמת בצורה אמינה את שגיאות הדיסקרטזציה ושגיאות האידיאליזציה בעזרת שיטות אימות ותיקוף (Verification & Validation). בעוד שאימות מבוצע בסביבה וירטואלית לחלוטין (בצורת בדיקות התכנסות), תיקוף מחייב ביצוע ניסויים מעשיים אשר גוזלים לא רק זמן ומומחיות אלא גם כסף רב. עד לעשור האחרון, ניסויים (מכאניים כדוגמא) אפשרו מדידה של ערכים אינטגרליים כגון עומס וקשיחות או ערכים לוקליים בשימוש במספר מצומצם של מדי עיבור ו/או מדי תזוזה. כיום, ניתן להשתמש בטכניקות של עיבוד תמונה על מנת לקבל מספר כמעט בלתי נדלה של מדידות לוקליות. שיטות אלו מאפשרות לתקף בצורה טובה מודלים חישוביים בעזרת מספר מצומצם של ניסויים (בהנחה שהדפורמציה הנבחנת מאפשרת שדות תזוזה/עיבורים מספיק נרחבים).

בעלון הנוכחי מתוארת בהרחבה שיטה שכזו לתיקוף מודלים חישוביים לחקר של ההתנהגות המכאנית של עצמות. אני מודה למר יקותיאל כץ לגברת גל דהן ולפרופ' זהר יוסיבאש על שכתבו את המאמר המעניין המופיע בהמשך העלון.

לקראת ראש השנה הקרב ובא אני מאחל לכל חברי האיגוד ברכת שנה טובה ומוצלחת.

כמו תמיד, אשמח לשמוע מכל אחד ואחת מחברי האיגוד בנוגע לתכנים אשר הם היו מעוניינים לראות מופיעים בעלון. אנא פנו אלי במייל בכל שאלה או הצעה.

אתם מוזמנים לבקר באתר האיגוד בו תמצאו מידע על האיגוד ועל מכאניקה חישובית בארץ ובעולם <http://www.iacmm.org.il>. באתר תוכלו לצרף עצמכם (ללא תשלום) לרשימת התפוצה האלקטרונית, להירשם

על סריקות טומוגרפיה ממוחשבת (CT) ומותאמים אישית למטופל, יכולים לשמש לצרכים קליניים, כגון הערכת הסיכון לשבר במקרים של אוסטאופורוזיס או גידולים סרטניים המחלישים את העצם [1]. כמו כן עשויים מדלים אלו לסייע בהתאמת השתל האופטימלי למטופל ספציפי [2]. טרם יישום המודל לצרכים הקליניים האמורים, יש צורך לתקף אותו בעזרת מדידות ניסיוניות.

הוכחת אמינות האנליזות מבוצעת בד"כ השוואה בין תוצאות האנליזה לתוצאות ניסיוניות. במהלך הניסוי, העצם מועמסת בלחיצה תוך מדידת העיבורים על פניה. ברוב הגדול של המקרים מדידת העיבורים נעשית באמצעות מדי עיבור (Strain gauges - SG) הנחשבים כסטנדרט למטרה זו [3].

בשנים האחרונות גובר השימוש בשיטות קורלציה דיגיטלית

(Digital Image Correlation – DIC)

לצרכי תיקוף המודל הנומרי. DIC הינה שיטה אופטית שאיננה כרוכה במגע עם הגוף, מאפשרת מדידת שדה הזזות בתלת-ממד וחישוב שדה עיבורים המכיל אלפי נקודות. זאת בשונה ממדי עיבור, אותם יש להדביק פיזית על האזור הנמדד למדידת עיבור בנקודה אחת בלבד.

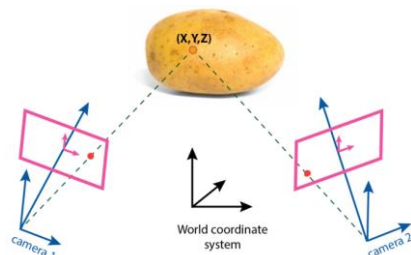
במאמר זה נסקור את עקרון הפעולה של שיטת ה-DIC ונדגים את אופן ההשוואה בין תוצאות האנליזות הנומריות למדידות ניסיוניות על עצם ירך של אדם.

מהלך הניסוי

עצם ירך של אדם נוקתה מרקמות רכות, קובעה בתוך צילינדר פלדה ולאחר מכן הועמסה בלחיצה על גבי ראש הירך. טרם העמסתה, הודבקו על העצם שני מדי עיבור לצורך השוואה למדידות האופטיות. כמו כן נצבעה העצם בלבן וכוסתה נקודות שחורות אקראיות באמצעות ספריי צבע. ההעמסה תועדה באמצעות מערכת DIC (ראה איור 4).

עקרון הפעולה של DIC

מערכת ה-DIC מורכבת משתי מצלמות המתעדות את העצם בו-זמנית מכיוונים שונים, באמצעות סדרת תמונות עוקבות בתדירות גבוהה. בתהליך כיוול מקדים נקבעת האוריינטציה המרחבית של המצלמות אחת ביחס לשנייה. עבור כל נקודה בגוף הניתנת לזיהוי בשתי המצלמות, ניתן לקבוע מיקום מרחבי (טריאנגולציה) לקבלת "שדה מיקומים" (ראה איור 1). מתוך השדות המתקבלים - לפני ואחרי הדפורמציה, ניתן לחשב את שדה ההזזות. שדה העיבורים מתקבל מתוך נגזרת מרחבית של שדה ההזזות.



איור 1 – התאמת קואורדינטות מרחביות לנקודה שזוהתה במצלמות (טריאנגולציה)

התאמת הנקודות הזרות בין צמד המצלמות ולאורך תמונות עוקבות נעשית באמצעות אלגוריתמים של עיבוד תמונה. על

במסגרת יום העיון ניתנו עוד תשע הרצאות של חוקרים וסטודנטים מהאקדמיה ומהתעשייה. הרצאות הניתנות בימי העיון ה-44 וה-45 משתתפות בתחרות ההרצאה המצטיינת לשנת 2018. במסגרת זו נבחרה ביום העיון ה-44 הרצאתו של ד"ר יניב בריק כהרצאה מצטיינת. במסגרת יום העיון ה-44 הוענקו גם הפרסים לזוכים במקום הראשון והשני בתחרות ההרצאה המצטיינת לשנת 2017.



ISCM44 – פרופ' זהר יוסיבאש נשיא האיגוד מעניק את הפרס על ההרצאה המצטיינת לשנת 2017 לגב' דאנה באשרה - מקום ראשון (למעלה) ומר' חנן עמר - מקום שני (למטה).

ISCM-45

יום העיון ה-45 יתקיים ב-18 לאוקטובר 2018, בפקולטה להנדסת מכונות בטכניון (המארגנים המקומיים הם פרופ' פנחס בר יוסף ופרופ' ספי גבלי). המרצה המוזמן הוא Prof. John E. Dolbow, Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, USA. פרטים נוספים ניתן למצוא באתר האיגוד ובהודעות לתפוצה.

תיקוף אנליזות אלמנט סופי לעצמות באמצעות DIC

יקותיאל כץ*, גל דהן וזהר יוסיבאש

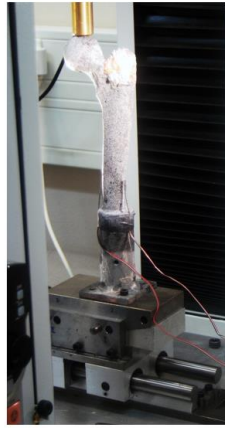
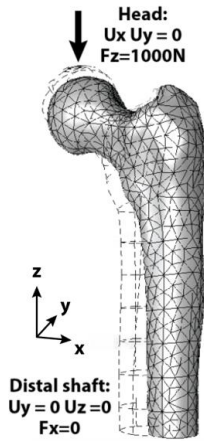
בית הספר להנדסה מכנית, הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן, אוניברסיטת תל-אביב, ישראל

* כתובת אימייל לתגובות:

yekutielkatz@mail.tau.ac.il

הקדמה

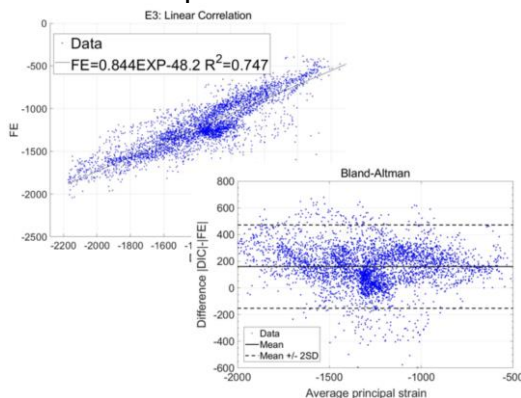
בעשור האחרון גובר השימוש באנליזות אלמנט סופי לעצמות אדם לצורך חיזוי קשיחות וחוזק העצם. המודלים המבוססים



איור 4 – מימין: מערכת הניסוי עם עצם מועמסת. משמאל: מודל אלמנט סופי המדמה את תנאי הניסוי.

השוואה בין תוצאות הניסוי לאנליזה

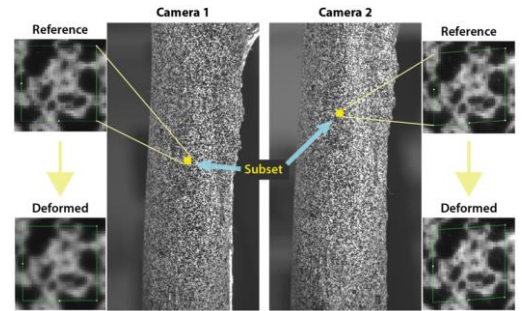
תחילה נתייחס להשוואת שדות העיבורים. מתוך תוצאות ה-DIC וכן מתוך תוצאות האנליזה ניתן להפיק מערך המכיל את קואורדינטות המשטח החיצוני של העצם באזור הנבחן יחד עם ערך העיבור הראשי בכל נקודה (X,Y,Z,E). זהו 'ענן נקודות' מרחביות עם ערכים סקלרים. כיוון שמדידות ה-DIC והחישוב הנומרי בוצעו ביחס למערכות צירים שונות, יש לבצע רגיטרציה של העננים אחד על פני השני. תהליך זה נעשה על ידי אלגוריתם ה-iterative closest point (ICP). אלגוריתם זה מוצא את הטרנספורמציה המרחבית שיש להפעיל על ענן אחד כך שסכום ריבועי המרחקים בין הנקודות הקרובות ביותר בין שני העננים יהיה מינימאלי. כעת ניתן להשוות את ערכי העיבור בין הנקודות הקרובות ביותר בשני העננים. על מנת לכמת את ההתאמה ניתן להשתמש בקורלציה לינארית (איור 5), כאשר כל ציר y מייצג ערכים מחושבים וציר x - ערכים נמדדים. ערכי השיפוע והחיתוך מלמדים על התאמה טובה בין המודל לניסוי (כאשר התאמה מושלמת פירושה שיפוע של 1 וחיתוך 0). כלי נוסף להערכת ההתאמה הינו תרשים Bland-Altman [4], גם הוא מוצג באיור 5. תרשים זה מציג את ההפרש בין הערכים המשווים כתלות בערכם הממוצע. ניתן לראות כי העיבורים בניסוי היו גדולים יותר בממוצע מהעיבורים מתוך האנליזה.



איור 5 – התאמה בין עיבורים שנמדדו לעיבורים שנחזו באנליזה. משמאל: קורלציה לינארית. מימין: Bland-Altman.

נוסף לתרשימים שתוארו, ניתן ליצור שדות סקלרים נוספים לכימות ההתאמה, למשל שדה המכיל את ההפרש האבסולוטי או היחסי בין ערכי ה-DIC לערכים הנומריים בכל

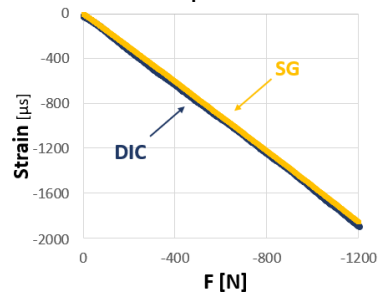
מנת לקבל התאמה טובה יש לצבוע את הדגם במרקם אקראי של נקודות שחור לבן, כך שבכל "נקודה" תיווצר "טביעת אצבע" ייחודית הניתנת לזיהוי, תהליך זה מומחש באיור 2.



איור 2 – התאמה של נקודות גוף זהות בין תמונות ממצלמות שונות ובזמנים שונים.

התאמה למדי העיבור

כשלב מקדים להשוואת תוצאות ה-DIC לתוצאות מודל אלמנט סופי לצורך תיקוף, יש לבדוק האם תוצאות ה-DIC תואמות לאלה המתקבלות מתוך מדי העיבור הנחשבים כסטנדרט למטרה זו. עיבורים שנמדדו באמצעות ה-DIC על פני מד העיבור (שגם הוא כוסה בצבע) הושוו לערכים שנמדדו על ידי המדיד עצמו. באיור 3 ניתן לראות כי בין מדידות ה-DIC למדידות מד העיבור התקבלה התאמה טובה מאוד.

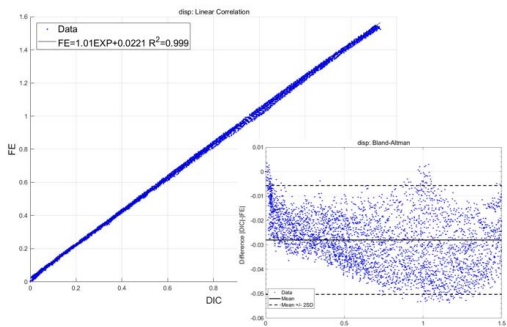


איור 3 – התאמה בין עיבורים שנמדדו על ידי DIC ועל ידי מד עיבור.

מודל אלמנט סופי

גאומטריית העצם, כמו גם תכונות החומר, מתקבלות מתוך סריקת CT. באמצעות פנטומים בעלי צפיפות ידועה הנסרקים יחד עם העצם, ניתן לכייל את ערכי ה-HU (גווני אפור) מהסריקה לערכי הצפיפות של הפנטומים. ערכים אלה מומרים לאחר מכן למודול יאנג באמצעות קשרים אמפיריים מן הספרות כפי שנעשה ב-[1], מקדם פואסון הינו קבוע $\nu=0.3$. באופן זה מתקבל מודל עם תכונות חומר איזוטרופיות ולא הומוגניות. המודל מרושת באלמנטים טטרהדרלים מסדר גבוה ($p=8$). תנאי השפה מותאמים לאלה שבניסוי ומתוארים באיור 4, יחד עם מערכת הניסוי.

מתווסף להזזות המחושבות גם סיבוב קשיח של העצם וההתאמה משתפרת (איור 8). בתרשים Bland-Altman ניתן לראות כי המגמה הלינארית נעלמה, ההפרש הממוצע קרוב לאפס וסטיית התקן קטנה בשני סדרי גודל מהערכי ההזזות עצמם. כמובן שהנחה זו יש לתקף בניסוי עתידי על ידי תיעוד הכפיפה של הצילינדר בו מקובעת העצם.



איור 8 – קורולציה לינארית ובלנד-אלטמן עם שימוש בתנאי שפה של קפיץ.

סיכום

התאמה טובה מאוד נמצאה בין מדידות ה-DIC למדידות מדי העיבור הנחשבים כסטנדרט בתיקוף מודלים של עצמות אדם. שיטת ה-DIC מאפשרת שילוב הזזות בתהליך התיקוף, זאת בשונה ממדי עיבור. השימוש באלפי נקודות השוואה מביא למידול טוב יותר של הבעיה, ובכך גם מעצים משמעותית את אמיתותו של המודל הנומרי.

מראי מקום

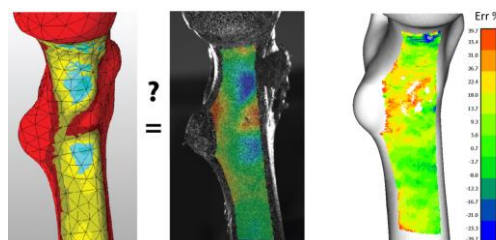
Z. Yosibash, R. Plitman Mayo, G. Dahan, N. Trabelsi, G. Amir, and C. Milgrom, "Predicting the stiffness and strength of human femurs with real metastatic tumors," *Bone*, vol. 69, pp. 180–190, 2014.

Z. Yosibash, A. Katz, and C. Milgrom, "Toward verified and validated FE simulations of a femur with a cemented hip prosthesis," *Med. Eng. Phys.*, vol. 35, no. 7, pp. 978–987, 2013.

N. Trabelsi, Z. Yosibash, C. Wutte, P. Augat, and S. Eberle, [3] "Patient-specific finite element analysis of the human femur-A double-blinded biomechanical validation," *J. Biomech.*, vol. 44, no. 9, pp. 1666–1672, 2011.

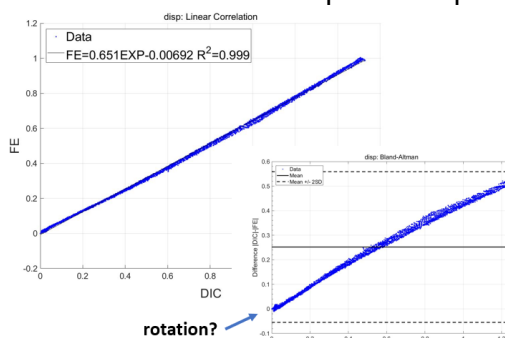
J. Martin Bland and D. Altman, "Statistical Methods for [4] Assessing Agreement Between Two Methods of Clinical Measurement," *The Lancet*, vol. 327, no. 8476, pp. 307–310, 1986.

נקודה (איור 6). כך ניתן לבחון ויזואלית את טיב ההתאמה באזורים השונים בתחום הנמדד. עד כה דנו בשדה העיבורים, נרצה כעת לדון בשדה ההזזות המתקבל מתוך המדידה האופטית. יש לציין כי זהו יתרון בולט נוסף למדידה בעזרת DIC על פני מדי העיבור. השימוש בהזזות לצרכי תיקוף נעשה לעיתים רחוקות בלבד וגם במקרים אלו הוא מבוסס על מספר מצומצם מאוד של נקודות. להזזות ערך מוסף מכיוון שהן מהוות את השדה ה"גולמי" ממנו נגזרים העיבורים, הן בשיטת ה-DIC והן באנליזות אלמנט סופי. על כן שדה זה הינו רציף ופחות רועש במידה ניכרת משדה העיבורים.



איור 6 – משמאל לימין: שדה עיבורים מתוך אנליזה, שדה עיבורים מתוך ניסוי, ההפרש היחסי בין השדות.

הטיפול בשדה ההזזות לצורך השוואה מעט מורכב יותר משדה העיבורים, שכן שדה ההזזות הינו שדה וקטורי. המערך המגדיר את ענן הנקודות הוא מהצורה (XYZUVW). במצב זה לא די בהפעלת הטרנספורמציה על הקוארדינטות (XYZ), יש צורך גם להפעיל רוטציה (ללא הזזה) על גודל ההזזות (UVW). כעת, גם הנקודות עצמן וגם כיווני ההזזות מבוטאים באותה מערכת. טרם השוואה יש צורך לבחור נקודה זהה על העצם בה עבור שני השדות ההזזה הינה אפס. רק כך, כאשר ההזזות מדווחות ביחס לאותה נקודה בגוף, ניתן לערוך השוואה בין השדות. ההשוואה נעשית על בסיס הנורמה הסקלרית של וקטור ההזזה ומובאת באיור 7.



איור 7 – התאמה בין הזזות שנמדדו להזזות שנחזו באנליזה. משמאל: קורולציה לינארית. מימין: Bland-Altman.

ניתן לראות כי בשונה משדה העיבורים, שדה ההזזות כמעט ואינו רועש והקורולציה המתקבלת מושלמת ($R^2 \approx 1$). אולם, השיפוע רחוק מ-1, ההזזות בניסוי גדולות בכ- 50% מאלה הנחזות על ידי המודל. דיאגרמת Bland-Altman מציגה קשר לינארי בין ההפרש בהזזות לגודלן, דבר היכול לרמז על סיבוב קשיח שמתרחש בניסוי ולא מיוצג נכון באנליזה. סיבוב כזה יכול לנבוע מכפיפה של הצילינדר ומערכת הרתימה של העצם שאינם ממודלים באנליזה. על מנת לבדוק הנחה זו, הוחלפו תנאי השפה בבסיס העצם לתנאי שפה של קפיץ. באופן זה