

עלון

אי שח"מ

עלון האיגוד הישראלי לשיטות חישוביות במכניקה

מספר 27

ספטמבר 2012

עורך: זהר יוסיבאש, המחלקה להנדסת מכונות, אוני' בן-גוריון בנגב, באר-שבע 84105, טל. 6477103 (08), פקס 6477101 (08), דואר אלקטרוני: zohary@bgu.ac.il
חברי ועד אישח"מ: עמנואל אור, מיכאל אנגלמן, פנחס בר-יוסף, דן גבעולי (נשיא), יצחק הררי, עמיאל הרשגה (מזכיר-גזבר), יונתן טל (אחראי האתר), זהר יוסיבאש
איש-קשר עם ECCOMAS: מישל ברקובייר
ועדת ביקורת: משה איזנברגר ושמואל קידר

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

רישום לחברות באגוד ופרטים נוספים: באתר האיגוד הנ"ל, או פנו למזכיר-גזבר, ד"ר עמיאל הרשגה, טל. 8183709 (04), פקס 8183723 (04), דואר אלקטרוני: amiel@iec.co.il

ISC33

יום העיון ה-33 יתקיים ב-18 באוקטובר, 2012, בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית בטכניון (המארגנים הם דר' מחמוד ג'בארין ודר' עודד אמיר).
המרצה המוזמן הוא Prof. Jan Hesthaven, Brown University, Providence, USA, וכותרת הרצאתו: Reduced models you can believe in. פרטים נוספים – ראו באתר האיגוד ובהודעות לתפוצה.

חיזוי התגובה המכאנית של עצם לחולה פציעי בשימוש אלמנטים סופיים מסדר גבוה

זהר יוסיבאש

ראש המעבדה למכניקה חישובית, אוני' בן-גוריון בנגב.
zohary@bgu.ac.il

מבוא

הסטטיסטיקה מראה כי אחת מכל שלוש נשים, ואחד מכל שלשה גברים מעל גיל 50 צפוי לשבר בעצמות במהלך חייו¹.

מ-"שולחן העורך":

ראשית, שנה טובה, שנת הצלחות ורעיונות חדשים וברוכים, ושנת עשייה והתחדשות.

ככל פעם, הנני פונה ומעודד אתכם לשלוח אלי בדוא"ל רעיונות לכתבות, נושאים שהייתם מעוניינים שיופיעו, או תגובות לפרסום על כתבות שכבר הופיעו בעבר. ניתן ורצוי לצרף ציורים ותמונות. ניתן גם לפרסם חומר מסחרי- פרסומי בתשלום.

אני מתנצל בפני הקוראים על כי הכתבה הפעם הוכנה על ידי – מכיוון שהגיליון הקודם הכיל שתי כתבות והיה ארוך מהרגיל, וכיוון שלא נמצאו מתנדבים לכתובת כתבות בגיליון זה (יש מי שהתנדב לכתוב כתבה לגיליון הבא) החלטתי שחייבים להמשיך ולהוציא את גיליון החורף, ועל כן כתבתי בעצמי.

אנא בקרו באתר האיגוד <http://www.iacmm.org.il>, בו מידע על האיגוד ועל מכאניקה חישובית בארץ ובעולם. באתר תוכלו לצרף עצמכם (ללא תשלום) לרשימת התפוצה האלקטרונית, להירשם כחברים באגוד או לחדש את חברותכם. טופס רישום ניתן למצוא ב-
<http://www.iacmm.org.il/member>

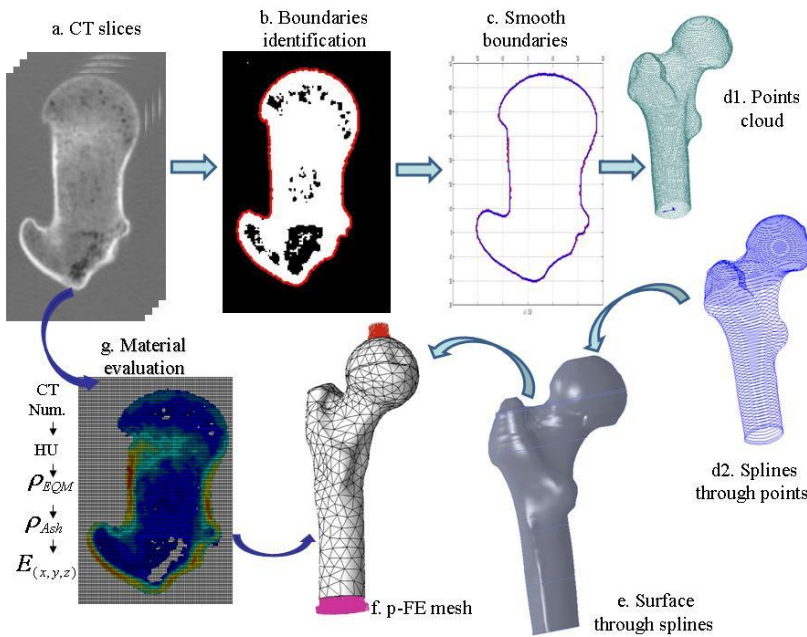
יום העיון ה-32 אורגן ע"י פרופ' דליה פישלוב בחודש אפריל 2012 במכללת אפקה, והיה פורה ומעניין.

¹ Melton LJ, et al. (1998) Bone density and fracture risk in men. *J Bone Miner Res* 13:1915.

Kanis JA, et al. (2000) Long-term risk of osteoporotic fracture in Malmo. *Osteoporos Int* 11:669.

המתאר את גאומטריית העצם. תהליך זה הוא אוטומטי וה-solid המתאר את העצם מתקבל תוך מספר דקות. מודל solid זה (המכיל משטחים עקומים) מועבר לתוכנת אלמנט סופי, ובאופן אוטומטי נבנית רשת של אלמנטים טטרהדרליים. התהליך כולו מודגם באיור 1.

לאחר שנבנו מודלים רבים של עצמות ירך, נמצא כי השגיאה המקסימלית במידות שנמדדו בעצם שנסרקה ביחס למודלים שנבנו נמוכה מ-2%, ולכן המודלים מתארים היטב את העצם הנסרקת.



איור 1 - תאור סכמטי של יצירת מודל אלמנט סופי מנתוני סי.טי. לעצם הירך.

הגדרת תכונות החומר בעצם

אחת הבעיות הקשות להדמיה אמינה של עצמות היא קביעת החוק הקונסטיטיוטיבי והגדרת תכונות החומר. תחת עומסים פיזיולוגיים וברמה המאקרו-סקופית (רמת העצם כולה), העצם עוברת עיבורים קטנים ותזוזות קטנות, ולכן ניתן להשתמש בתיאוריה האלסטית לינארית. יחד עם זאת, תכונות החומר אינן הומוגניות ותלויות בצפיפות המקומית של העצם. בנוסף, תכונות החומר הן אנאיזוטרופיות, על אף כי קרוב טוב מתקבל גם אם מניחים תכונות חומר איזוטרופיות (כל זאת תחת עומסים פיזיולוגיים מסוימים). עבודות ניסוייות רבות בוצעו בעבר על דגמי עצם קטנים המראות כי קיים קשר בין הצפיפות המקומית ומודול יינג, אולם קשרים שונים הוצעו במהלך השנים. מכל הקשרים הללו, אנו מצאנו כי הקשר המובא להלן מתאר את עצם הירך בצורה הטובה ביותר ללא תלות בגיל, מין, והיסטוריית העצם:³

³ Yosibash Z., Trabelsi N., & Milgrom C. "Reliable simulations of the human proximal femur by high-

שברים בעצמות מלווים גם בהוצאות כלכליות משמעותיות: לדוגמה, במהלך 2005 היו בארה"ב בלבד כ-2 מיליון שברים עם הוצאות טיפול הנעמדות ב-17 מיליארד דולר.² לפיכך, התגובה המכאנית של עצם עבור חולה ספציפי, דהיינו מציאת העיבורים, המאמצים וההזזות תחת עומס נתון, הינה בעלת עניין רב לקהילה האורתופדית. זאת כיוון שמבנה והרכב העצם לכל אדם שונה, ואין מדד מדעי מהימן שניתן להסתמך עליו לקביעת הסיכון לשבר או לבחינת התקן אופטימלי לאיחוי שברים. למעלה משלשה עשורים

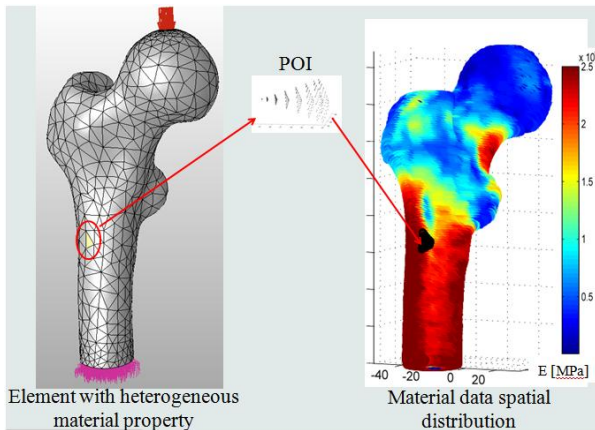
משקיעים המדענים מאמצים לבניית יכולת לחיזוי התגובה המכאנית בעצם ספציפית, אולם עד כה טרם פותח הכלי המתאים לשימוש קליני יומיומי. לאחרונה במעבדה למכאניקה חישובית באוני' בן-גוריון פותחה מערכת המבוססת על נתוני טומוגרפיה ממוחשבת (סי.טי.) ואנליזות אלמנט סופי מסדר גבוה (מגוברים בניסויים על עצמות אדם מוקפאות) בעלת יכולת מוכחת לחזות את התגובה המכאנית בדיוק גבוה ובאמינות גבוהה. בכתבה זו אנו מביאים סקירה על הכלים המאפשרים לבנות מודל גאומטרי לעצם כלשהי באדם ואיך נקבעות התכונות המכאניות המשתנות מנקודה לנקודה, ולבסוף על כלי סימולציה בשימוש בשיטות אלמנט סופי מסדר גבוה. אנו מציגים אנליזות

שבוצעו לעצמות ירך רבות באדם והשוואת התוצאות לניסויים לצורך אישור (validation) התוצאות.

בניית מודל גאומטרי של העצם מנתוני סי.טי.

מכשיר הטומוגרפיה הממוחשבת (סי.טי.) הקליני מאפשר כיום לקבל חתכי צפיפות, ברזולוציה של חלקית המילימטר (בד"כ 0.3x0.3 מ"מ²). תמונות דו ממדיות אלו, הנלקחות כל מ"מ לערך לאורך העצם, מאפשרות עיבוד לצורך שיחזור הגאומטריה התלת ממדית של העצם. לכן, אם לדוגמה מתגלה בעיה בעצם הירך בחולה מסוים, הוא עובר צילום סי.טי. והקובץ המכיל את הסריקה ניתן לעיבוד. ע"י שימוש בתוכנות לעיבוד תמונה פיתחנו אלגוריתמים אוטומטיים המגדירים את הגבול החיצוני של העצם, את הגבול הפנימי במידה וקיים, ויוצרים אוסף נקודות המתארות את המשטח הפנימי והחיצוני של העצם. אוסף נקודות אלו משמשות ליצירת משטח דרן, ולאחר מכן בשימוש במשטחים אלו נבנה solid

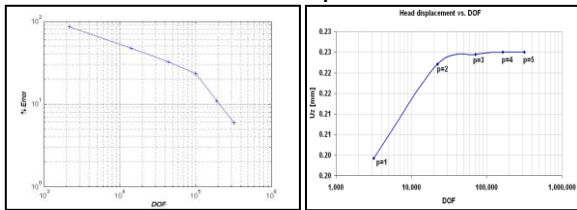
² Burge R, et al. (2007) Incidence and economic burden of osteoporosis-related fractures in the United States, 2005-2025. *J Bone Miner Res* 22:465.



איור 3 - הגדרת תכונות החומר לכל נקודת אינטגרציה בכל אלמנט עפ"י הסי.טי.

בדיקת דיוק התוצאות הנומריות (Verification)

לאחר בניית מודל אלמנט סופי, ומתן תכונות חומר, ניתן להפעיל תנאי שפה על העצם, ולחשב הזזות, עיבורים ומאמצים בכל נקודה. כמובן שכדי להשוות את התוצאות לניסויים יש תחילה לוודא כי השיגאה הנומרית קטנה ומבוקרת. לשם כך אנו מעלים את דרגת הפולינום על כל אלמנט עד לקבלת התכנסות בנרמת האנרגיה, והתכנסות הערכים אותם רוצים לחשב (כגון הזזות ועיבורים). דוגמת גרפי התכנסות עבור אנליזה לעצם הירך מובאת באיור 4.



איור 4 - דוגמת התכנסות השיגאה בנרמת האנרגיה (שמאל) והתכנסות בהזזות (ימין)

השוואה לניסויים (Validation)

לבעיות ביו-מכאניות סבוכות יש להוכיח את אמינות התוצאות הנומריות (לאחר תהליך סדור של verification) ע"י השוואתן לניסויים. בתחילה בוצעה השוואה לניסויים על עצמות ירך במעבדה למכניקה חישובית. יחד עם זאת, תמיד עדיף כי הניסויים והאנליזות יבוצעו ע"י שתי קבוצות שונות ללא ידיעת האחת לגבי התוצאות של הקבוצה השניה. תהליך כזה נקרא double blinded validation process. חמש עצמות ירך של אדם שנשמרו בהקפאה עד הניסויים (מסומנים ע"י FF1-FF5) עברו סריקת סי.טי., אח"כ הודבקו עליהם מדי עיבור, והועמסו במכונת לחיצה בזווית הטיה שונות. הכח וההזזות גם הם נמדדו. דוגמת ניסוי כזה מובאת באיור 5. במקביל בוצעו אנליזות אלמנט סופי לעצמות אלו והעיבורים במקומות מדי העיבור, וההזזות חושבו כדי להשוותם לתוצאות הניסויים.

$$\rho_{EQM} = 10^{-3} (a \times HU - b) \quad [g/cm^3]$$

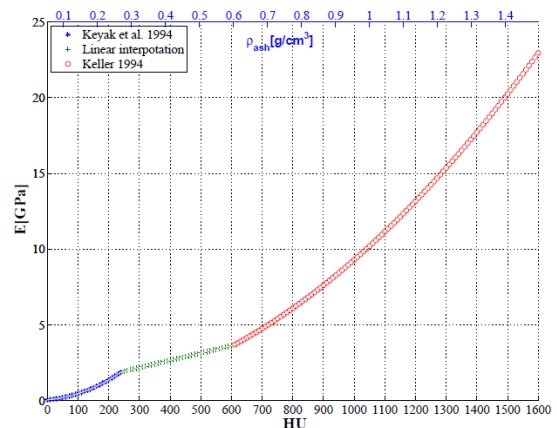
$$\rho_{ash} = (1.22 \times \rho_{EQM} + 0.0523) \quad [g/cm^3]$$

$$E_{Cort} = 10200 \times \rho_{ash}^{2.01} \quad [MPa] \quad \rho_{ash} > 0.6$$

$$E_{Trab} = 5307 \times \rho_{ash} + 469 \quad [MPa] \quad 0.27 < \rho_{ash} \leq 0.6$$

$$E_{Trab} = 33900 \times \rho_{ash}^{2.20} \quad [MPa] \quad \rho_{ash} \leq 0.27$$

ראשית ה-Hounsfield Unit (HU), גוון האפור בסי.טי.) מקושר לצפיפות אקוילנטית, שמקושרת למדד צפיפות העצם. מודול יינג בחלק העצם הקורטיקלית (העצם הצפופה) ובחלק העצם הטרבקולרית (העצם הספוגית) נתון כפונקציה של הצפיפות עפ"י הקשרים הנ"ל ומובא כתלות ב-HU באיור 2.



איור 2 - קשר בין מודול יינג וצפיפות העצם המקומית.

מקדם פויסון משפיע מעט על התגובה המכנית של העצם והוא נלקח בד"כ כקבוע בכל העצם וערכו בין 0.2 ל-0.4. לאחר שמודול יינג נקבע באופן נקודתי כתלות בצפיפות בכל נקודה בעצם, מתקבל פילוג כמוצג באיור 1g בחתך נתון. עבור כל נקודת אינטגרציה, תכונות החומר נלקחות עפ"י הסי.טי. והקשרים הנ"ל כמתואר באיור 3.

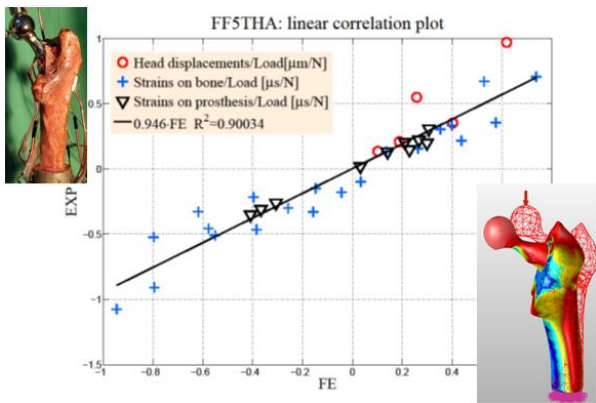
קשרים אנאיזוטרופיים קיימים גם, אולם הם מורכבים הרבה יותר, ונסמכים על הנחות מיקרו-מכאניות. בקשר האנאיזוטרופי הפשוט ביותר, המניח חוק טרנסוורסלי-איזוטרופי יש להגדיר בכל נקודה חמישה קבועי חומר. כיוון שבכל נקודה יש נתון סי.טי. יחיד, יש לבצע הנחות להגדרת חמשת הקבועים הטרנסוורסלי-איזוטרופיים. בנוסף לקביעת התכונות, לחומר אנאיזוטרופי יש גם לקבוע את כיווני הצירים עבורם נתונים תכונות החומר (כיוונים אלו משתנים גם הם מנקודה לנקודה בתוך העצם), דבר המסבך עוד יותר את הבעיה אולם נושא זה לא נדון בכתבה זו. המעוניינים מוזמנים לקרוא את המאמר המובא מטה⁴.

order finite element analysis validated by experimental observations", *J. Biomech.*, **40** (2007), pp. 3688-3699.

⁴ Trabelsi N. & Yosibash Z., "Patient-specific FE analyses of the proximal femur with orthotropic material properties validated by experiments", *ASME J. Biomech. Eng.*, **133**, (2011), pp. 061001-1-11.

צוואר הירך (בד"כ כתוצאה של נפילה במבוגרים), יש צורך בהסרת ראש העצם והכנסת תותב מתכתי. במקרה זה המנתח צריך לבחור תותב כך שמצב המאמצים והעיבורים בעצם לאחר הכנסתו יישארו כפי שהיה לפני הכנסתו.

לבדיקת מצב העיבורים לפני ואחרי הכנסת התותב, ניתן להשתמש באנליזות אלמנט סופי לאחר סי.טי. כדי להדגים את איכות פתרונות אלמנט סופי, בנינו מודל לעצם ירך מתורם, אח"כ ביצענו בה ניתוח לשם הכנסת תותב ולעצם עם התותב ביצענו אנליזה שוב. במקביל, בוצע על העצם השלמה ניסוי העמסה, ואחר כך ניסוי העמסה שני לאחר התקנת התותב. גם במקרה זה התקבלה התאמה בין הניסויים לאנליזות כמראה באיור 7.



איור 7 - התאמה בין ניסוי לאנליזה לעצם שעברה THR עם תותב מתכתי.

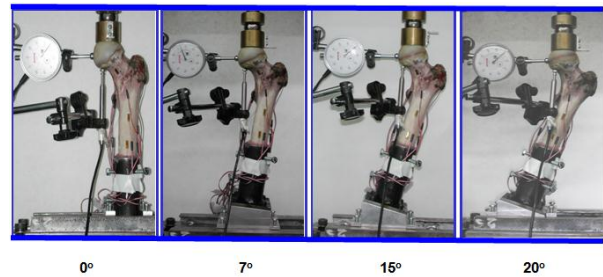
מצב העיבורים בעצם השלמה וזאת עם התותב הושווה גם כן לוודא כי אין שינוי מהותי ברמת העיבורים, דבר היכול לגרום עם הזמן להתרופפות התותב. לפרטים נוספים ראה המאמר מטה.⁶

סיכום

פותחה יכולת לביצוע אנליזות אמינות בשיטות אלמנט סופי מסדר גבוה (מגובות בניסויים) לעצם מסוימת בחולה ספציפי מתוך נתוני סי.טי. האנליזות בעלות פוטנציאל להיות לעזר רב בקביעת דרכי הטיפול בשימוש יומיומי ע"י אורטופדים. לאור התהליך האוטומטי לביצוע אנליזה מנתוני סי.טי, מתקבלות התוצאות יחד עם אימות איכות הפתרון הנומרי תוך פרק זמן של כשלוש שעות. מחקר זה נמצא בעיצומו: אנו בשלבים מתקדמים לקביעת חוקי כשל בעצמות בריאות וכאלו עם גרות סרטניות.

הבעת תודה

ברצוני להודות לסטודנטי המחקר שלי בעבר: ד"ר ניר טרבליס, מר רועי פדן ומר אלון כץ, ולפרופ' צ'ארלס מילגרום מבי"ח הדסה על תרומתם לעבודה המתוארת.



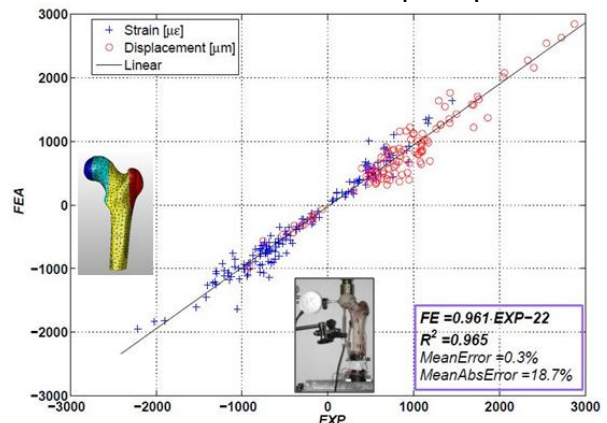
איור 5 - דוגמת ניסויי העמסה על FF3.

לאחר שהתקבלה התאמה טובה מאוד, בוצע תהליך של double blinded validation על 12 עצמות ירך נוספות בשת"פ עם קבוצה בבי"ח בגרמניה. אנליזות אלמנט סופי בוצעו במע' למכניקה חישובית באב"ג⁵. נתוני כלל 17 עצמות הירך ששימשו ל-validation ופרטיהם מובאים בטבלה 1.1.

Table 1.1 Data of femurs and CT scan resolution.

Donor label	Side	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Gender	Slice thickness (mm)	Pixel size (mm)	Load rate (mm/sec)
1	L & R	59	180	96	female	1.00	0.547	1/6
2	L & R	53	193	98	male	1.00	0.488	1/6
3	L & R	48	170	55	male	1.00	0.488	1/6
4	L & R	64	168	136	female	1.00	0.488	1/6
5	L & R	54	178	161	male	1.00	0.547	1/6
6	L & R	58	185	86	male	1.00	0.547	1/6
FF1	L	30	N/A	N/A	male	0.75	0.78	1/600-1/30
FF2	R	20	N/A	N/A	female	1.5	0.73	1/600, 1/120, 1/6
FF3	L	54	N/A	N/A	female	1.25	0.52	1/2
FF4	R	63	N/A	N/A	male	1.25	0.195	1/60, 1/6, 1
FF5	R	56	N/A	N/A	male	1.25	0.26	1/2

באיור 6 מוצגים העיבורים וההזזות באנליזות בציר y כנגד העיבורים וההזזות שנמדדו בניסוי בציר x עבור 17 העצמות בכלל הניסויים. ניתן לראות התאמה טובה מאוד בין תוצאות האנליזה לתוצאות הניסויים. התאמה מצוינת זו אינה תלויה בגיל, מין והיסטוריית התורם, ולכן מחזקת את אמינות ההדמיה.



איור 6 - השוואת תוצאות FE לתוצאות הניסויים.

ישנם תחומים קליניים רבים עבורם אנליזות אלמנט סופי רלבנטיות. אחת הדוגמאות הבולטות לכך היא הדמיה לצורך החלפת ראש עצם ירך (total hip replacement - THR). במקרים רבים של שבר

⁶ Yosibash Z., Katz A. & Milgrom C., "Towards verified and validated FE simulations of a femur with a cemented hip prosthesis", *Med. Eng. & Phys.* In Press.

⁵ Trabelsi N., Yosibash Z., Wutte C., Augat P. & Eberle S., "Patient-specific finite element analysis of the human femur - A double-blinded biomechanical validation", *J. Biomech.*, **44** (2011), pp. 1666-1672.