

A FINITE ELEMENT ANALYSIS STUDY OF FOOTWEAR LOWER ENSEMBLE INFLUENCE ON THE PLANTAR PRESSURE DISTRIBUTION

ANALIZA ÎN ELEMENT FINIT A INFLUENȚEI STRUCTURII ANSAMBLULUI INFERIOR AL ÎNCĂLTĂMINTEI ASUPRA DISTRIBUȚIEI PRESIUNILOR PLANTARE

Răzvan MOCANU*, Ioan CIOARĂ

"Gheorghe Asachi" Technical University of Iași, Faculty of Textiles & Leather Engineering and Industrial Management

A FINITE ELEMENT ANALYSIS STUDY OF FOOTWEAR LOWER ENSEMBLE INFLUENCE ON THE PLANTAR PRESSURE DISTRIBUTION

ABSTRACT. The plantar pressure distribution has a complex influence on the kinetics and kinematics of the lower limbs. The foot bed-outsole ensemble must provide the correct support of the foot and add corrections if necessary, in order to adjust the pressure distribution on the foot plantar surface. A poorly designed outsole, a feeble midsole or the incorrect care and use of the footwear product will lead to the deterioration of the foot bed functionality. The degree of the foot bed deterioration can be determined using in-shoe plantar pressure measuring devices. This loss of functionality must be prevented as much as possible in the design stage. Footwear prototyping and wearing tests are very expensive and time consuming and do not represent a viable method in economic terms. The fastest and less expensive testing method suitable for footwear production in design stages is the Finite Element Analysis. To use this method we developed a 3D CAD model of the human foot using as model a real 3D scanned foot. The scanned foot was processed in various 3D CAD systems in order to obtain a FEA usable 3D part. The developed model was used to determine how the ensemble of a specific sole design and a midsole with wear characteristics modify the plantar pressure distribution.

KEY WORDS: footwear, outsole, CAD, FEA

ANALIZA ÎN ELEMENT FINIT A INFLUENȚEI STRUCTURII ANSAMBLULUI INFERIOR AL ÎNCĂLTĂMINTEI ASUPRA DISTRIBUȚIEI PRESIUNILOR PLANTARE

ABSTRACT. Distribuția presiunilor plantare influențează într-un mod complex cinetica și cinematica membrelor inferioare. Ansamblul inferior al încăltămintei trebuie să asigure susținerea corectă a piciorului și să aducă ajustări, dacă este necesar, pentru a corecta distribuția presiunilor pe suprafața plantară. O talpă incorrect proiectată, un branț defectuos sau incorrectă îngrijire și utilizare a produsului de încăltărire va duce la deteriorarea funcționalității ansamblului inferior. Gradul de deteriorare poate fi determinat prin utilizarea sistemelor de măsurare a presiunilor plantare în încăltărire. Această pierdere a funcționalității trebuie prevenită pe cât posibil în fază de proiectare. Prototiparea și teste în utilizare sunt foarte scumpe, necesită mult timp și nu reprezintă o metodă viabilă din punct de vedere economic. Cea mai rapidă și necostisitoare metodă de testare potrivită pentru producția de încăltărire în fază de proiectare este Analiza în Element Fini. Pentru utilizarea acestei metode am proiectat un model 3D CAD al piciorului uman utilizând ca model un picior real, scanat 3D. Piciorul scanat a fost procesat într-o serie de sisteme 3D CAD pentru a obține o piesă tridimensională, utilizabilă în AEF. Modelul proiectat a fost utilizat pentru a determina modul în care ansamblul format dintr-un anumit model de talpă și un branț cu proprietățile fizice ale unui branț uzat; modifică distribuția presiunilor plantare.

CUVINTE CHEIE: încăltărire, talpă, CAD, AEF

L'ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS DE L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE DU DESSOUS DE LA CHAUSSURE SUR LA RÉPARTITION DES PRESSIONS PLANTAIRES

RÉSUMÉ. La répartition des pressions plantaires influence dans une manière complexe la cinétiqe et la cinématique des membres inférieurs. Le dessous de la chaussure doit offrir un soutien adéquat pour le pied et faire les ajustements nécessaires pour corriger la répartition des pressions sur la surface plantaire. Une semelle mal conçue, une semelle intermédiaire défectueuse ou l'utilisation et soin erronées de la chaussure endommageront le fonctionnement du dessous de la chaussure. Le degré d'altération peut être déterminé au moyen du système de mesure des pressions plantaires dans la chaussure. Cette perte de fonctionnalité doit être évitée autant que possible dans la phase de conception. Le prototypage et les tests d'utilisation sont coûteux, longs et ne représentent pas une méthode viable du point de vue économique. La plus rapide et peu coûteuse méthode de test appropriée pour la production de la chaussure dans la phase de conception est l'analyse par éléments finis. Pour utiliser cette méthode, nous avons conçu un modèle de CAO 3D du pied humain en utilisant le modèle de pied réel 3D numérisé. Le pied à analyser a été passé dans un nombre de systèmes de CAO 3D afin d'obtenir une pièce en trois dimensions utilisée dans la FEA. Le modèle conçu a été utilisé pour déterminer la manière dont le dessous de la chaussure, formé d'un modèle particulier de semelle et une semelle intermédiaire ayant les propriétés physiques d'une semelle intermédiaire usée, change la répartition des pressions plantaires.

MOTS CLÉS: semelles, chaussure, CAO, FEA

INTRODUCTION

The footwear sole weight removal cavities structure and the materials used for the midsole have a major influence on the distribution of the plantar surface pressures [1, 2]. The midsole deteriorates over

INTRODUCERE

Structura golurilor de ușurare ale tălpii și materialele utilizate în producția branțului au o influență semnificativă asupra distribuției presiunilor plantare [1, 2]. Branțul se deteriorează cu timpul sub

* Correspondence to: Răzvan MOCANU, 10 Dr. Savini; H3 building; entrance A; 2nd floor; apt. 3; Iași – 700320; Iași, e-mail: razvan_mocanu@yahoo.com

time under the influence of a set of factors. These factors include the characteristics of the material used for the midsole, but also the usage of the footwear product [3-6]. An improper maintenance of the product, correlated with the midsole structure and materials, will lead to changes of the physical properties and the loss of functional features of the footwear lower ensemble. The functional losses render the product unusable. However, the deteriorated product is still used by individuals with peripheral neuropathy, leading to short and long term lower limb injuries.

To determine the deterioration degree and to prevent foot injuries, wearing tests on prototype products should be performed. This method is very expensive and time consuming and is not economically viable.

This paper describes a method developed by the authors to estimate the changes of the plantar pressures distribution according to the physical characteristics of the midsole and the weight removal cavities structure.

MATERIALS AND METHODS

The method used to estimate the plantar pressure changes consists in the development of a 3D CAD (Three Dimensional Computer Aided Design) model and the use of FEA (Finite Element Analysis).

To accomplish this, the three parts interacting in the model were designed. The industry uses CAD as the method of choice for sole and midsole design [7], therefore the sole and midsole used in the analysis were completely developed and defined in a CAD system. However, to obtain estimation results as close to reality as possible, a real human foot was the starting point in the 3D part development.

The INFOOT three dimensional foot scanner, presented in Figure 1, was used to digitize the foot surface [8].

This system uses the optical laser scanning method to scan the foot form. The raw data is presented as point cloud and can be converted in various scalar file formats. The scanning step accuracy is 0.5mm, the scanning speed is up to 30mm/sec, the full scanning and data processing takes about 10

influență unui cumul de factori. Acești factori includ caracteristicile materialului utilizat pentru producția branțului, dar și modul de utilizare a produsului de încălțăminte [3-6]. O îngrijire incorectă a produsului, corelată cu structura și materialele ansamblului inferior, duc la schimbări ale proprietăților fizice și la pierderea caracteristicilor funcționale ale acestui ansamblu. Pierderea caracteristicilor funcționale conduce la un produs care nu se pretează utilizării. Cu toate acestea, produsul deteriorat este utilizat de către persoane cu neuropatie periferică, ceea ce cauzează afecțiuni pe termen scurt și pe termen lung la nivelul membrelor inferioare.

Pentru a determina gradul de deteriorare și pentru a preveni afecțiunile la nivelul piciorului, sunt necesare o serie de teste pe produse prototip. Această metodă este foarte scumpă și necesită mult timp, nefiind viabilă din punct de vedere economic.

În această lucrare este descrisă o metodă dezvoltată de autori pentru a estima modificările distribuției presiunilor plantare în corelație cu caracteristicile fizice ale branțului și cu structura golurilor de ușurare.

MATERIALE ȘI METODE

Metoda utilizată pentru estimarea schimbărilor presiunilor plantare constă în dezvoltarea unui model CAD 3D (Three Dimensional Computer Aided Design – proiectarea tridimensională cu ajutorul calculatorului) și utilizarea AEF (Analiză în Element Finit).

Pentru realizarea studiului se proiectează cele trei componente care interacționează. Industrial, se utilizează metoda CAD ca metodă de proiectare a tălpilor și a branțurilor [7], astfel talpa și branțul utilizate în analiză sunt complet proiectate și definite într-un sistem CAD. Pentru a obține rezultate cât mai precise s-a utilizat modelul real al unui picior pentru proiectarea modelului 3D.

Digitizarea suprafeței piciorului s-a realizat prin intermediul unui scanner INFOOT prezentat în Figura 1.

Acest sistem utilizează scanarea optică pe bază de laser pentru scanarea formei piciorului [8]. Datele brute sunt prezentate sub formă de nor de puncte și pot fi convertite în diferite formate de fișiere scalare. Scanarea se realizează cu o precizie a pasului de 0.5mm, cu o viteză de 30mm/sec, iar întreg procesul de scanare durează

sec/foot. A model of the raw data, processed polygon mesh and surface model are presented in the Figure 2.

aproximativ 10 secunde pentru fiecare picior. Reprezentarea datelor brute, rețeaua poligonală procesată și suprafața modelului sunt prezentate în Figura 2.



Figure 1. INFOOT laser scanner
Figura 1. Scanner laser INFOOT

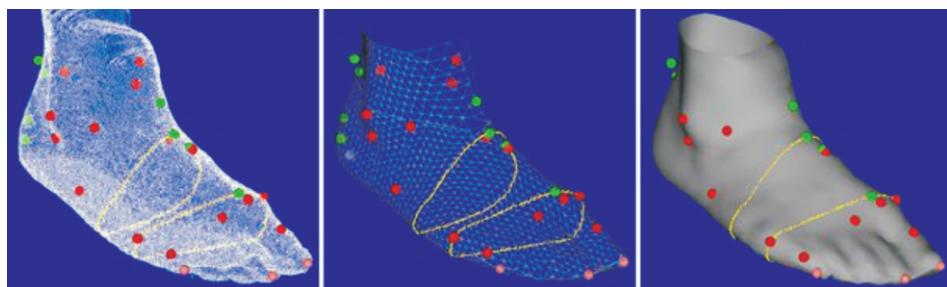


Figure 2. Scanned data
Figura 2. Date scanate

The 3D CAD systems are using vectorial data. Even if these systems are able to import scalar data, this data can be used only as reference. In order to obtain a usable mesh, the raw data is processed in a mesh processing application. The MeshLab v1.3.2 64bit was used to import, analyse and process the raw data. The imported scanned foot is presented in Figure 3.

Sistemele de proiectare tridimensională CAD utilizează date vectoriale. În cazul în care aceste sisteme pot importa date scalare, respectivele date pot fi utilizate numai ca referință. Pentru a obține o structură utilizabilă, datele de intrare sunt procesate inițial într-o aplicație de procesare a structurilor scalare. Pentru importul, analiza și procesarea datelor de intrare s-a utilizat aplicația MeshLab v1.3.2 64bit. Piciorul scanat și importat în aplicație este prezentat în Figura 3.

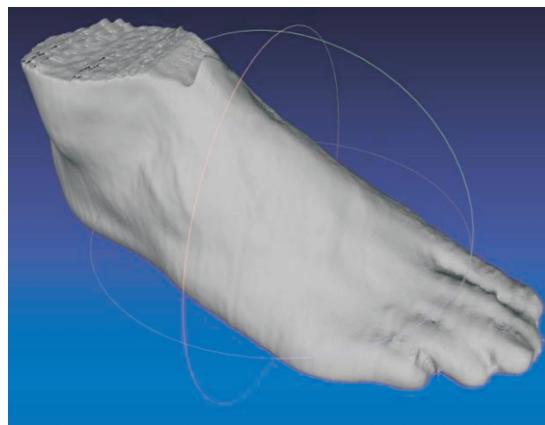


Figure 3. MeshLab imported raw data
Figura 3. Date importate în MeshLab

Laser scanning point clouds are usually high density clouds. For the purpose of obtaining a 3D usable part, the point density must be down sampled. The Mesh Element Subsampling function is used to reduce the number of vertices, edges or faces. As the scanned model is defined by points, the option used is vertex subsampling. The processed model, presented in Figure 4, did not lose definition quality through the subsampling process because the scanned model is over defined.

Norul de puncte obținut prin scanarea laser este în general de densitate mare. Pentru a obține un model 3D utilizabil în analiză, trebuie redusă densitatea norului de puncte. Funcția Mesh Element Subsampling este utilizată pentru reducerea numărului de puncte, muchii sau suprafete. Deoarece modelul scanat este definit prin puncte, opțiunea utilizată este cea de reducere a numărului de puncte. Modelul procesat, prezentat în Figura 4, nu a pierdut în calitatea definiției prin procesul de reducere a punctelor, deoarece modelul scanat este supra definit.

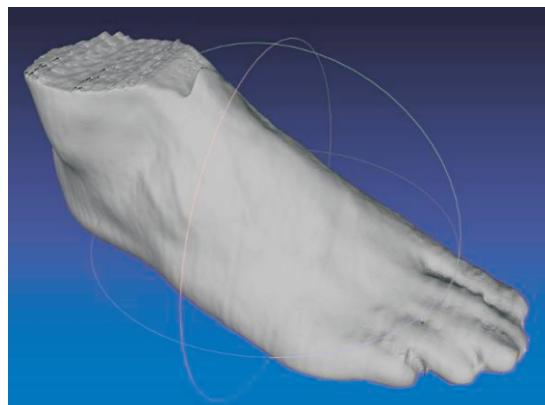


Figure 4. Processed mesh
Figura 4. Rețea procesată

The subsampling degree should be tuned to not deteriorate the mesh quality. Once the optimum vertex density is obtained, the mesh is used to create the 3D part. SolidWorks 2013 64bit [9] was used for the part modelling. The mesh is imported in the application workspace. The import process uses high computing

Gradul de reducere a numărului de noduri trebuie ajustat pentru a nu deteriora calitatea rețelei. După obținerea densității optime de noduri, rețeaua poate fi utilizată pentru crearea unei componente 3D. Pentru modelarea componentei 3D s-a utilizat SolidWorks 2013 64bit [9]. Rețeaua este inițial importată în spațiul de lucru al aplicației. Procesul de import utilizează o

resources. A high speed quad processor computer will need about five hours to import the model and the imported model will use about 4GB of the available RAM. The result is a set of surfaces, presented in Figure 5.

cantitate semnificativă de resurse computaționale. O unitate cu procesor de mare viteză, cu patru nuclee, va necesita aproximativ cinci ore pentru a importa modelul și va utiliza aproximativ 4GB din memoria RAM disponibilă. Rezultatul constă într-un set de suprafețe, prezentat în Figura 5.

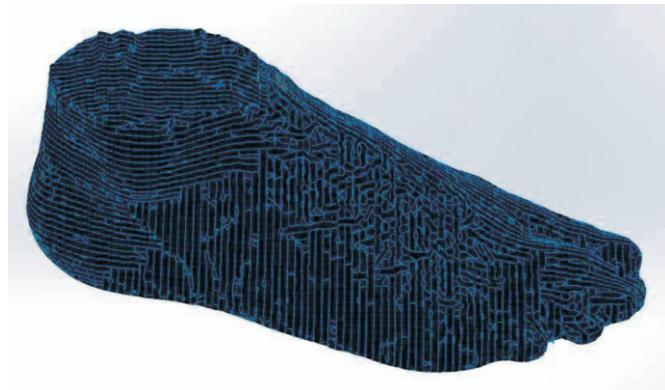


Figure 5. Imported mesh
Figura 5. Structura importată

By processing this mesh, a solid body is obtained. This solid part, presented in Figure 6, is the vectorial representation of the scanned foot.

Prin procesarea acestei rețele se obține un corp solid. Acest corp solid, prezentat în Figura 6, este reprezentarea vectorială a piciorului scanat.

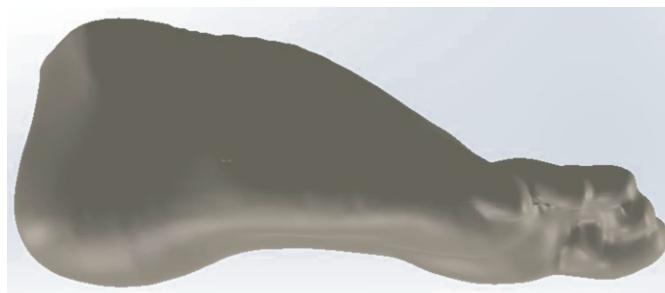


Figure 6. Solid part defined
Figura 6. Corp solid

Once the solid part is defined, it is fully usable for FEA.

The next step consists in defining the midsole and the sole. These two parts are designed directly in the CAD system, obtaining fully defined vectorial parts.

While designing the sole, the emphasis was put on the structure of the weight removal cavities. This is one of the multiple possible patterns. The wireframe representation of the sole is presented in Figure 7.

Odată definit corpul solid, acesta poate fi utilizat în AEF.

Următorul pas constă în definirea branțului și a tălpiei. Aceste două componente sunt proiectate direct în sistemul CAD, obținând astfel componente vectoriale complet definite.

În proiectarea tălpiei s-a pus accentul pe structura golurilor de ușurare. Modelul realizat este unul dintr-o gamă largă de modele posibile. Reprezentarea structurală a tălpiei este prezentată în Figura 7.

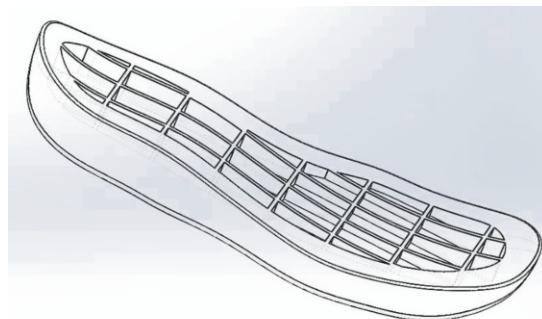


Figure 7. The wireframe representation of the sole

Figura 7. Reprezentarea structurală a tălpii

The midsole is designed starting from the top surface of the sole, as it has to fit as precisely as possible to this surface. The designed midsole is presented in Figure 8 in wireframe configuration.

Branțul este proiectat pornind de la suprafața superioară a tălpii, deoarece branțul trebuie să se îmbine cât mai precis cu talpa. Branțul proiectat este prezentat în configurație structurală în Figura 8.



Figure 8. The wireframe representation of the midsole

Figura 8. Reprezentarea structurală a branțului

Using the designed parts, an assembly is designed in order to perform the analysis [10]. This assembly is presented in Figure 9.

Utilizând componentele proiectate se configurează ansamblul care va fi utilizat în analiză [10]. Acest ansamblu este prezentat în Figura 9.



Figure 9. Assembly model

Figura 9. Model ansamblu

RESULTS AND DISCUSSIONS

The FEA process is executed for a sample individual with the following characteristics: weight = 80kg, foot size = EU41. Using both new and worn midsole physical characteristics, the plantar pressure distribution is obtained for both cases. Figure 10 presents the result for the new midsole.

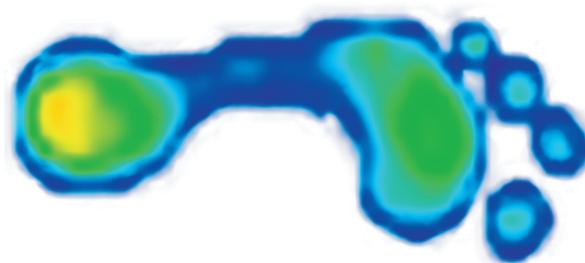


Figure 10. FEA results for new midsole
Figura 10. Rezultate AEF pentru branț nou

The plantar pressure distribution is close enough to the average foot on a flat surface.

After running the FEA process on the used midsole, the result obtained shows a significant modification of the plantar pressure distribution as presented in Figure 11.

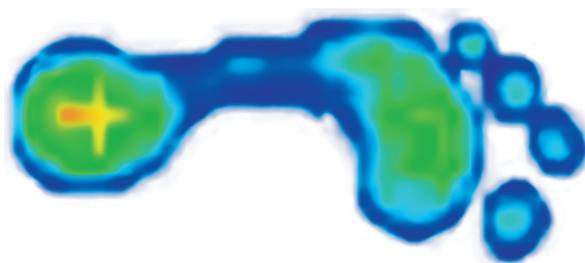


Figure 11. FEA results for the worn midsole
Figura 11. Rezultate AEF pentru branț uzat

The pressures concentrate on the ribs of the weight removal cavities. The highest pressure is on the ribs located in the heel region. However, there is significant pressure concentrated on the ribs in the metatarsophalangeal joints area also.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Procesul AEF este realizat pentru cazul concret al unei persoane cu următoarele caracteristici: greutate = 80kg, număr mărime = EU41. Utilizând atât caracteristicile fizice ale unui branț nou, cât și pe cele ale unui branț uzat, se obține distribuția presiunilor plantare pentru ambele cazuri. În Figura 10 este prezentat rezultatul pentru analiza branțului nou.

Distribuția presiunilor plantare este foarte asemănătoare cu distribuția presiunilor plantare ale unui picior comun în contact cu o suprafață plană.

După analiza în cazul branțului uzat, rezultatul obținut prezintă modificări semnificative ale distribuției presiunilor plantare, după cum este prezentat în Figura 11.

Presiunile sunt concentrate pe nervurile golorilor de ușurare. Cea mai mare presiune este localizată la nivelul nervurilor din zona călcâiului. În zona articulațiilor metatarsofalangiene se observă, de asemenea, o concentrație a presiunii la nivelul nervurilor.

CONCLUSIONS

By using the method developed in this paper, the footwear product functionality can be estimated in a short time with minimum financial costs. This enables the analysis of different materials used for the midsole fabrication and choosing the optimal material without prototype fabrication and time consuming wearing tests.

CONCLUZII

Utilizând metoda dezvoltată în această lucrare, funcționalitatea produsului de încălțăminte poate fi estimată într-un timp scurt, cu costuri minime. Acest lucru permite analiza mai multor materiale utilizate în fabricația branțului și selectarea materialului optim fără a fi necesară fabricarea de prototipuri și fără teste de uzură costisitoare.

REFERENCES

1. Nigg, B.M., Stefanyshyn, D., Cole, G., Stergiou, P., Miller, J., The effect of material characteristics of shoe soles on muscle activation and energy aspects during running, *J. Biomech.*, **2003**, 36, 569–575.
2. Zhang, X., Li, B., Influence of in-shoe heel lifts on plantar pressure and center of pressure in the medial–lateral direction during walking, *Gait Posture*, **2014**, 9, 1012–1016.
3. Perry, S.D., Radtke, A., Goodwin, C.R., Influence of footwear midsole material hardness on dynamic balance control during unexpected gait termination, *Gait Posture*, **2007**, 25, 94–98.
4. Healy, A., Naemi, R., Chockalingam, N., The effectiveness of footwear as an intervention to prevent or to reduce biomechanical risk factors associated with diabetic foot ulceration: A systematic review, *J. Diabetes Complicat.*, **2013**, 27, 391–400.
5. Shariatmadari, M.R., English, R., Rothwell, G., Effects of temperature on the material characteristics of midsole and insole footwear foams subject to quasi-static compressive and shear force loading, *Mater. Design*, **2012**, 37, 543–559.
6. Verdejo, R., Mill, N.J., Simulating the effects of long distance running on shoe midsole foam, *Polym. Test.*, **2004**, 23, 567–574.
7. Sahin, M., Mihai, A., Yaldiz, S., Pătină, M., A Multilingual Virtual Environment for Shoe Design Training. ICVL **2009**, Bucharest University Press, ISSN: 1844-8933, Section-Technologies, 214.
8. Pătină, M., Mihai, A., 3D Modelling and Rapid Prototyping of Lasts Used to Obtain Special Footwear for Patients with Arthritis, ICAMS 2010, Advanced Materials and Systems, Proceedings of 3rd International Conference, **2010**, Bucharest, Romania, ISSN 2068-0783, 283.
9. <http://www.solidworks.com/sw/resources.htm> (accessed on 18.12.2013).
10. <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm> (accessed on 18.12.2013).

Article received/Data primirii articolului: 12.01.2014

Accepted/Acceptat la data: 17.06.2014