MODELAREA MULTI-REZOLUȚIE A FORMELOR DE TEREN

dr. ing. Felicia Ionescu

Universitatea *Politehnica* București

Rezumat: Lucrarea prezintă modelarea multi-rezoluție a formelor de teren, pentru reprezentarea realistă și eficientă a suprafeței terenului în bazele de date grafice destinate aplicațiilor de realitate virtuală și simulare. Reconstruirea suprafeței terenului prin aproximare este realizată printr-un algoritm de selecție a punctelor astfel încât să se obțină cel mai redus volum de date în anumite condiții impuse. Condițiile de aproximare se impun astfel încât să se asigure atât limitarea deviației la o eroare de toleranță dată, cât și coerența regiunilor de teren adiacente, reprezentate cu rezoluții diferite.

Cuvinte cheie: modelarea multi-rezoluție, baze de date geografice, realitate virtuală, simulare.

1. Introducere

Modelarea terenului pentru crearea bazelor de date grafice, destinate aplicațiilor de realitate virtuală și simulare, necesită prelucrarea datelor de descriere a zonei geografice de interes și reconstrucția cât mai fidelă și mai eficientă a suprafeței terenului. [1].

Reconstrucția formelor de teren reprezintă un caz particular în reconstrucția formelor tridimensionale, dacă se admite că terenul nu prezintă concavități pe direcția verticală, și deci suprafața terenului poate fi reprezentată ca o funcție $z = F(x,y)$.

Problema de reconstrucție se formulează astfel: *Fiind dată o funcție $F(x,y)$, a cărei valoare este cunoscută pentru toate punctele care aparțin frontierei poligonale a domeniului precum și într-un număr de locații distribuite uniform sau neuniform, în domeniul său, să se construiască o funcție $F^*(x,y)$, care să aproximeze, cu condiții de aproximare impuse, funcția dată.*

Fie $D = \{p(x,y)\}$ domeniul de definiție al funcției $F(x,y)$.

Soluția directă, constând în considerarea tuturor punctelor date în domeniul funcției $F(x,y)$, și în care se obține o eroare de aproximare nulă pe întreg domeniul de definție este, în general, nesatisfăcătoare, datorită volumului mare de date rezultate. Costul de stocare și de prelucrare, în diferite aplicații, a volumului de date rezultat prin considerarea tuturor valorilor date, poate fi inacceptabil, iar, pe de altă parte, variațiile locale mici să nu prezinte nici un interes în aplicațiile de realitate virtuală.

Alternativa o constitue construcția unei funcții care utilizează o submulțime din mulțimea datelor din domeniu, și care respectă toate condițiile de aproximare impuse.

2. Condițiile de aproximare a suprafeței de frontieră

Algoritmul de construire a unei funcții de aproximare a terenului cu condiții impuse implementat, folosește o *metodă de selecție a punctelor* din domeniul funcției $F(x,y)$.

Condițiile impuse funcției de aproximare a unei reconstrucții definită pe un domeniu de intrare D, se împart în două categorii:

- Pentru o anumită submulțime de puncte din domeniu se impune eroare de aproximare nulă; aceste puncte sunt puncte de *interes particular* pentru aplicația dată, și toate aceste puncte trebuie să fie luate în considerare pentru construcția funcției de aproximare. Datele de interes sunt punctele de pe frontiera poligonală, punctele de pe muchiile comune a două segmente de teren vecine, între care trebuie să fie asigurată coerența de reprezentare, precum și punctele care alcătuiesc, de exemplu, liniile de demarcație a văilor, a crestelor, a coastelor mărilor sau oceanelor. Fie **I** submulțimea acestor puncte.
- Pentru toate celelalte puncte din domeniu, (submulțimea **S = D - I**), se impune o eroare de aproximare dată sub forma unei distanțe euclidiene tridimensionale Δ maxim admisă de la fiecare punct la suprafața de aproximare.
- Așadar, funcția de aproximare $F^*(x,y)$, va fi construită folosind o submulțime a datelor din domeniu, astfel încât să fie îndeplinite condițiile:

$$F^*(x,y) - F(x,y) = 0, \qquad \forall p(x,y) \in \mathbf{I};$$

$$|F^*(x,y) - F(x,y)| \leq \Delta, \qquad \forall p(x,y) \in \mathbf{S};$$

Selecția punctelor care se utilizează pentru construcția funcției de aproximare $F^*(x,y)$ se execută în două faze.

- În prima fază se analizează datele din mulțimea de intrare, pentru identificarea punctelor de interes particular pentru aplicația dată, puncte care reprezintă submulțimea **I**. Punctele acestei mulțimi se utilizează pentru construirea unei diagrame de triangularizare inițiale, folosind un algoritm de triangularizare adecvat.
- În faza a doua, se construiește funcția de aproximare $F^*(x,y)$, care este funcția de reconstrucție a terenului, într-un număr oarecare de etape succesive de triangularizare, astfel încât să fie satisfăcută toleranța de eroare maximă impusă. Pentru aceasta, în fiecare etapă se selectează punctul cu deviația maximă față de triangularizarea curentă și se inserează în diagramă.

3. Algoritmul de triangularizare prin metoda selecției punctelor

Există mai multe metode de triangularizare care pot fi folosite în diferite aplicații [1], [2], dar cea mai atractivă pentru crearea bazelor de date pentru realitate virtuală este metoda de triangularizare Delaunay, care prezintă mai multe proprietăți interesante, dintre care amintim proprietatea unghiului maxim (unghiul minim al tuturor triunghiurilor create este maxim în raport cu oricare altă metodă de triangularizare). Această proprietate permite evitarea triunghiurilor lungi și subțiri care, în general, au o contribuție nesemnificativă în imaginea generată și, în plus, pot să producă erori numerice la redare.

Datorită modalității de reprezentare a terenului cel mai frecvent utilizată - reprezentarea fără concavități pe verticală - se poate folosi triangularizarea Delaunay pur bidimensională: pentru triangularizare se consideră numai proiecțiile xy ale punctelor de intrare, iar altitudinea punctelor este utilizată pentru asigurarea reconstrucției cu toleranță de eroare maximă impusă. Cu toate că triangularizarea se execută bidimensional, se obține o bună aproximare a suprafeței terenului, datorită faptului că sunt conectate punctele prin proximitate.

Triangularizarea Delaunay a unei mulțimi de puncte în plan conține muchii care conectează punctele în triunghiuri, cu condiția cunoscută sub numele de *condiția cercului vid*: se construiește un triunghi dacă cercul circumscris acestuia nu conține nici un alt punct în interiorul său.

Metoda de triangularizare Delaunay a fost și este intens studiată, fiind propuși un număr mare de algoritmi de calcul eficienți, care pot fi clasificați în două categorii: algoritmi incrementali și algoritmi de tipul "divide-and-conquer". Pentru construcția funcției de aproximare a terenului prin metoda selecției punctelor este necesar un algoritm de triangularizare Delaunay de tip incremental, care începe procesul cu o triangularizare inițială a unei submulțimi de puncte, iar punctele rămase se adaugă iterativ, ca noi vârfuri în diagrama de triangularizare [3].

Metoda selecției punctelor calculează o secvență T_0, T_1, ...T_m de triangularizări Delaunay pentru submulțimi succesiv crescătoare ale mulțimii datelor de intrare, domeniul de definiție D.

Pentru calculul triangularizării inițiale T_0 se ia în considerare o submulțime de puncte din domeniul D obținută prin reuniunea a două submulțimi, și anume:

- **H**, submulțimea care definește acoperirea convexă (convex-hull) a domeniului.
- **I**, submulțimea punctelor de interes particular de reconstrucție

Fiecărei triangularizări T_k îi corespunde o funcție lineară pe porțiuni F_k, astfel că, în interiorul fiecărui triunghi al triangularizării T_k, F_k este dată de ecuația planului ce trece prin vârfurile triunghiului respectiv, considerate în spațiul tridimensional (x_i,y_i,z_i), unde: $z_i = F(x_i,y_i)$. Fie:

$$a_{j,k}\,x+b_{j,k}\,y+c_{j,k}\,z+d_{j,k}=0$$

ecuația planului corespunzător unui triunghi t_j din triangularizarea T_k.

Pentru o triangularizare dată Tk, deviația Δi într-un punct oarecare $(xi,yi) \in tj$ este definită ca fiind valoarea absolută a distanței euclidene de la punct la plan, deci:

$$\Delta_i = |\, a_{j,k}\,x_i+b_{j,k}\,y_i+c_{j,k}\,z_i+d \,|,$$

iar deviația maximă Δ_k a triangularizării T_k este maximul deviațiilor pentru toate locațiile (x_i,y_i) din domeniul de definiție D:

$$\Delta_k = max\,(\Delta_i(T_k)).$$

Triangularizarea finală T_m, este prima triangularizare pentru care:

$$\Delta_m = max((\Delta_i(T_m)) \leq \Delta,$$

unde Δ este eroarea impusă pentru reconstrucția suprafeței de aproximare a terenului. Funcția de aproximare $F^*(x,y)$ a terenului cu eroarea impusă Δ este funcția lineară pe porțiuni corespunzătoare acestei triangularizări T_m. .

Dacă o triangularizare T_k nu satisface condiția $\Delta_k \leq \Delta$, se calculează o nouă triangularizare T_{k+1}, prin inserarea unui nou punct în diagrama de triangularizare. Ca punct nou de inserat se selectează punctul p a cărui deviație este deviația maximă pentru triangularizarea T_k.

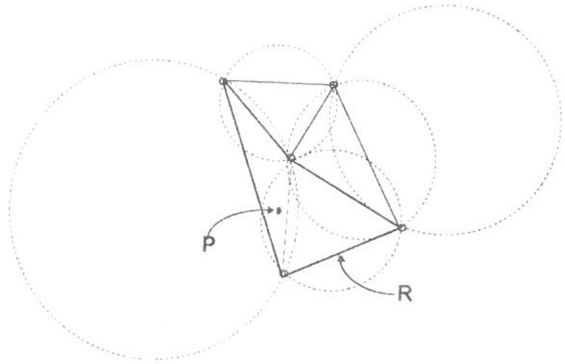


Figura 1. Inserarea unui punct *p* într-o diagramă de triangularizare

Algoritmul utilizat se poate rezuma după cum urmează:

1. Calculul triangularizării T_0 pentru toate punctele $p(x,y) \in I \cup H$; se obține funcția $F_0(x,y)$, pentru triangularizarea curentă, k=0.
2. Inițializarea structurilor de date, astfel că, pentru fiecare triunghi din triangularizarea inițială, să se determine punctele din submulțimea $D - (I \cup H)$ care sunt cuprinse în interiorul fiecăruia, deviația maximă și locația la care are loc.
3. Determinarea deviației maxime a triangularizării curente.
4. Dacă deviația maximă Δ_k este mai mică sau egală cu Δ, atunci funcția de aproximare este egală cu funcția de reprezentare a triangularizării, obținuta în pasul curent ($F^*(x,y) = F_k(x,y)$). Altfel se trece la pasul următor:

   4a. Fie p, locația cu deviația maximă. Se inserează punctul p în triangularizarea curentă T_k.

   4b. Se actualizează structurile de date, cu calculul deviației maxime pentru toate triunghiurile nou introduse.

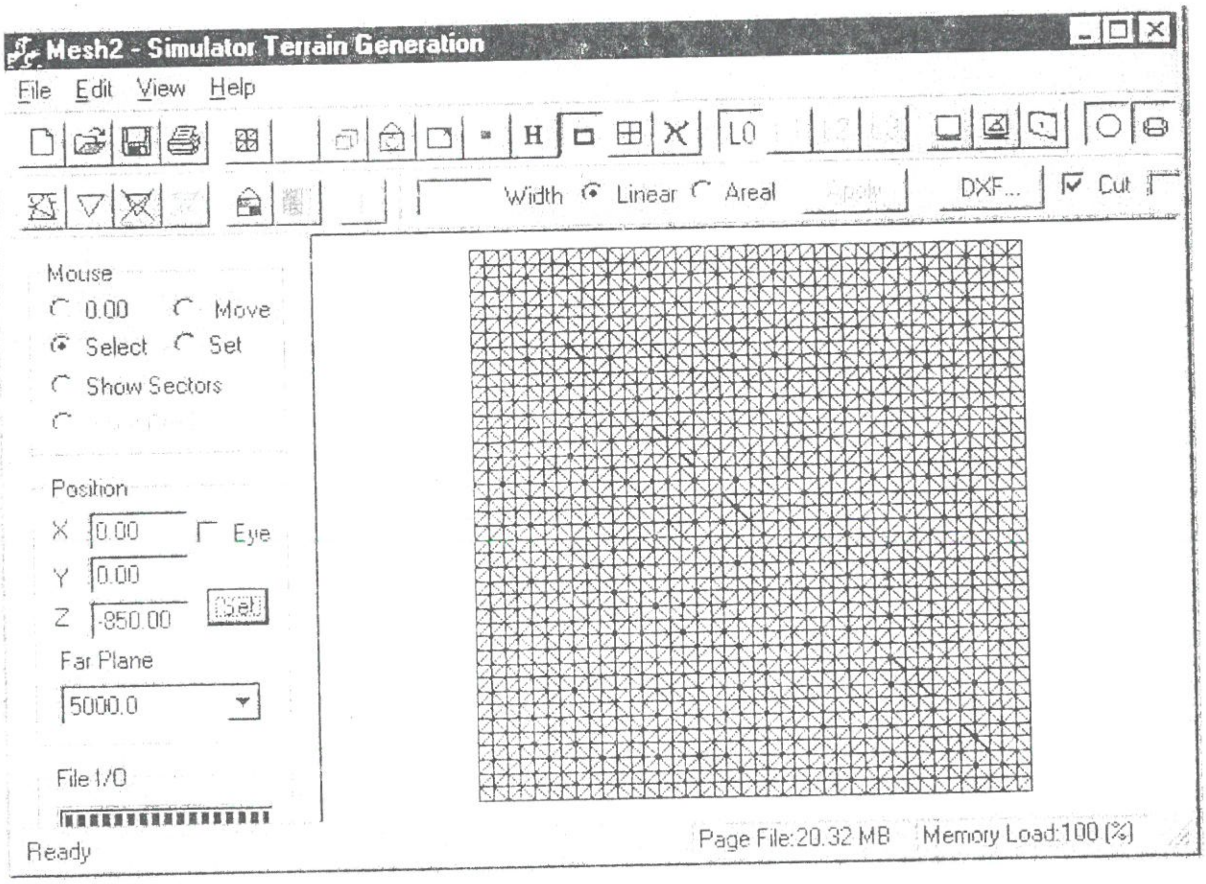
Pentru inserarea unui punct p într-o triangularizare curentă se conectează punctul p cu un număr de alte locații ale diagramei de triangularizare. Aceste locații formează împreună o regiune R, care are următoarele proprietăți:

- R nu conține nici-un alt punct cu excepția lui p în interiorul lui.
- Vârfurile frontierei lui R sunt toate vizibile din p, adică segmentele de dreaptă care conectează p cu aceste vârfuri nu intersectează frontiera regiunii R.
- Triunghiurile obținute prin conectarea lui p cu vârfurile frontierei lui R satisfac condiția de triangularizare Delaunay, condiția cercului vid. De aceea, pentru inserarea unui nou punct într-o triangularizare, se determină mai întâi regiunea R a punctului de inserat p, care este compusă din mulțimea triunghiurilor al căror cerc circumscris conține punctul p. Din această regiune se extrage frontiera, prin eliminarea muchiilor interne ale regiunii R (figura 1).

Programul de modelare a terenului realizat generează descrierea tridimensională a terenului unei zone geografice date, pentru aplicații de realitate virtuală, pornind de la datele numerice de altitudine distribuite uniform într-o grilă bidimensională.Acest program evidențiază dependența numărului de triunghiuri obținute, precum și a aspectului suprafeței terenului rezultat prin aproximare, de eroarea impusă.

În figurile 2-4 sunt prezentate rezultatele triangularizării unei mulțimi de puncte distribuite uniform într-o grilă bidimensională cu 41 de linii și 41 de coloane.

Triangularizarea directă, care include toate punctele din domeniu, produce un număr de 3200 de triunghiuri (figura 2). Este evident că această triangularizare asigură eroare nulă pentru toate punctele din domeniu, dar aceeași eroare (zero) se poate obține cu un număr mai mic de triunghiuri construite (2624) prin metoda selecției punctelor (figura 3).



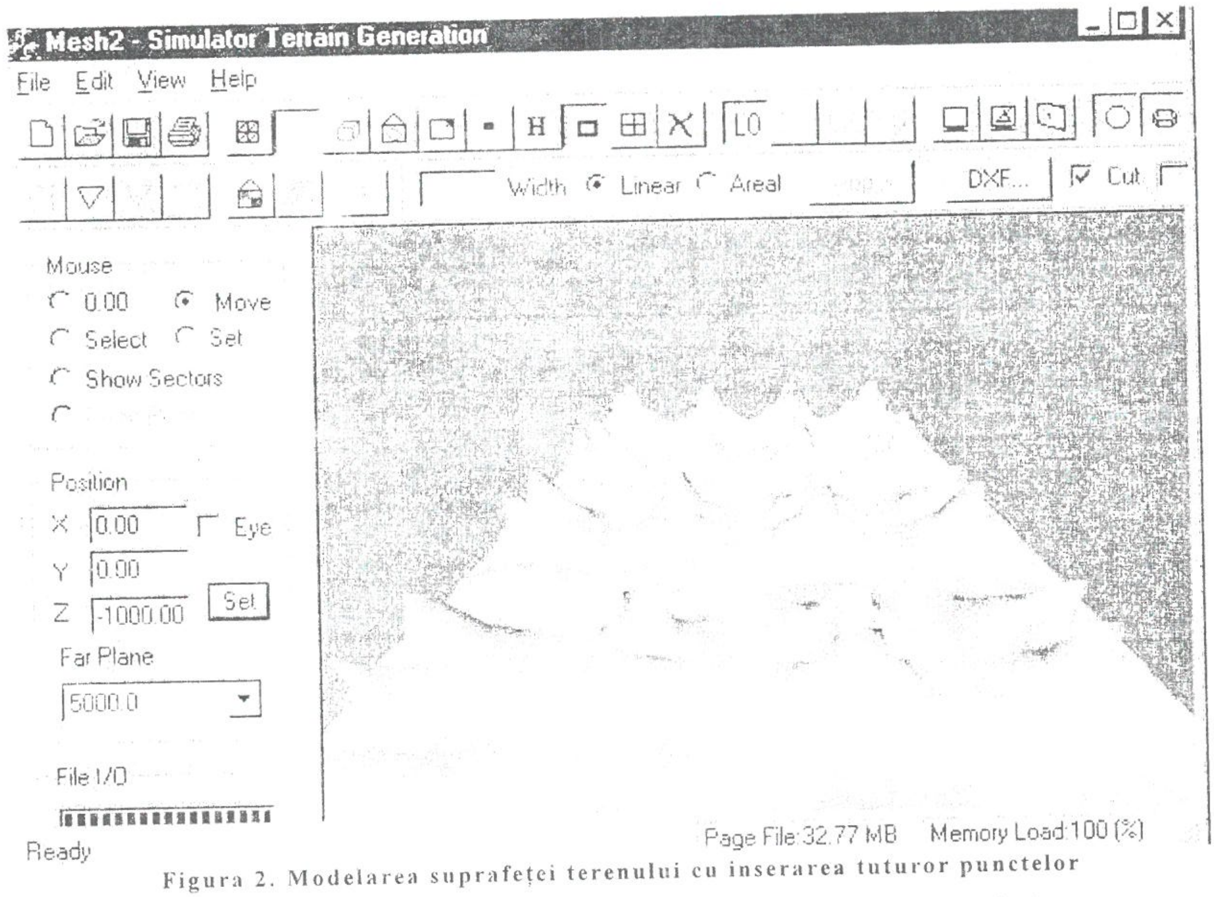
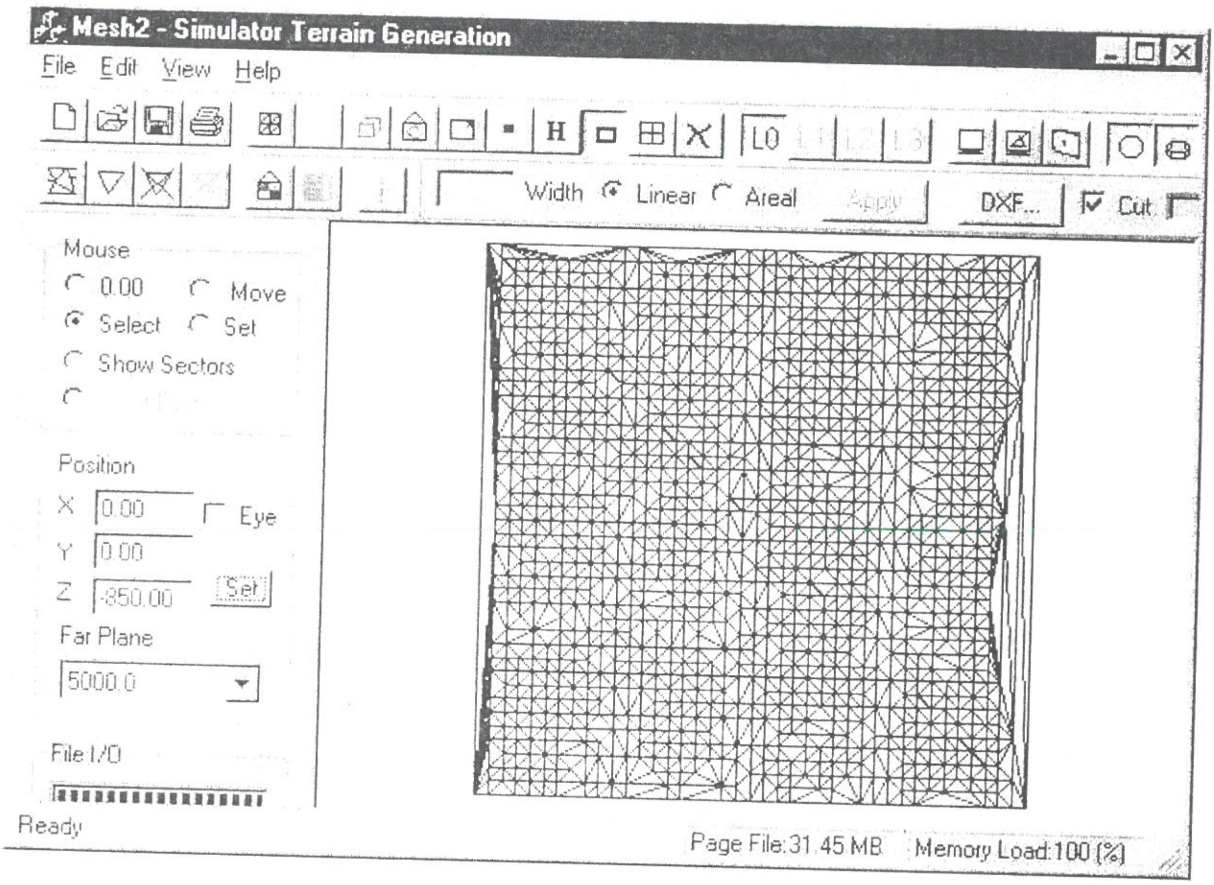


Figura 2. Modelarea suprafeței terenului cu inserarea tuturor punctelor

a) Diagrama de triangulizare. b)Imaginea 3d a modelului rezultat



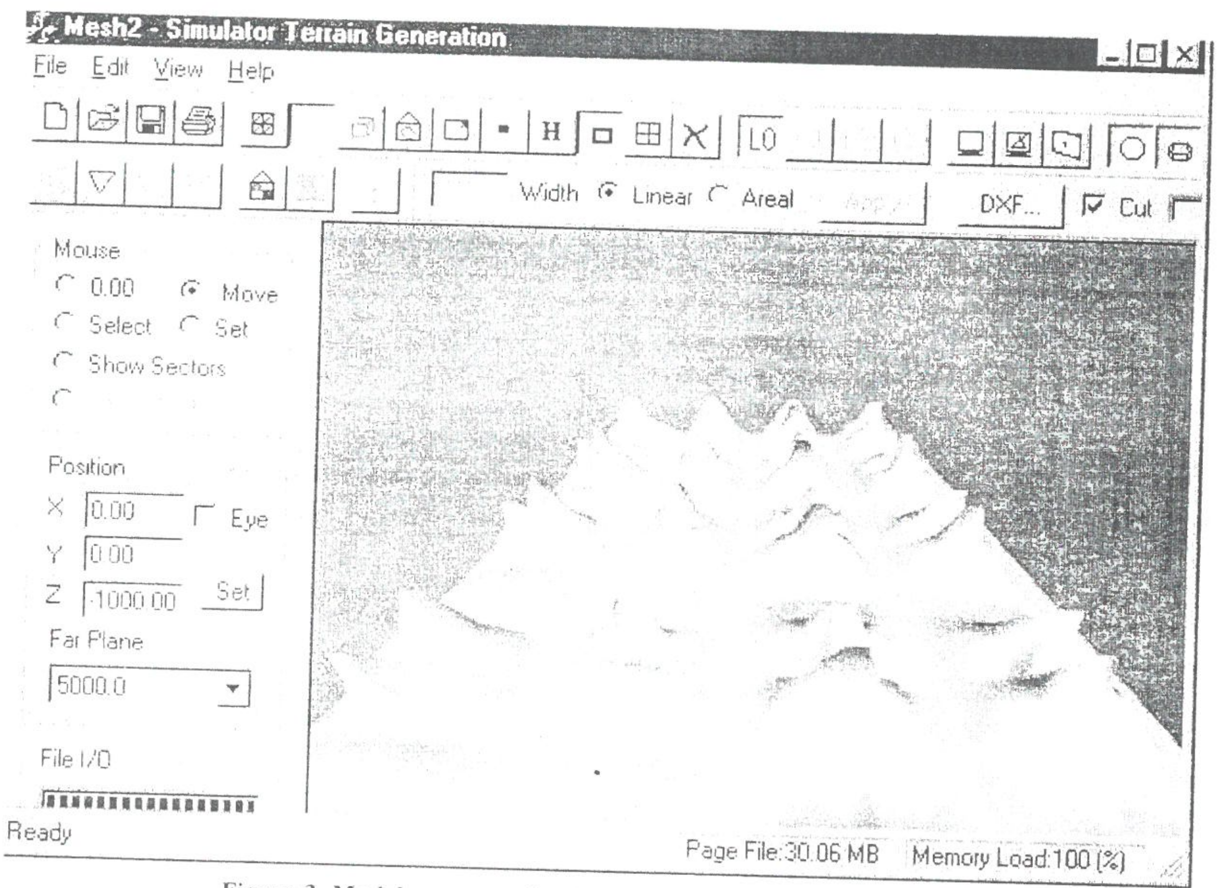


Figura 3. Modelarea suprafeței terenului cu toleranța de eroare = 0
a) Diagrama de triangulizare. b) Imaginea 3d a modelului rezultat

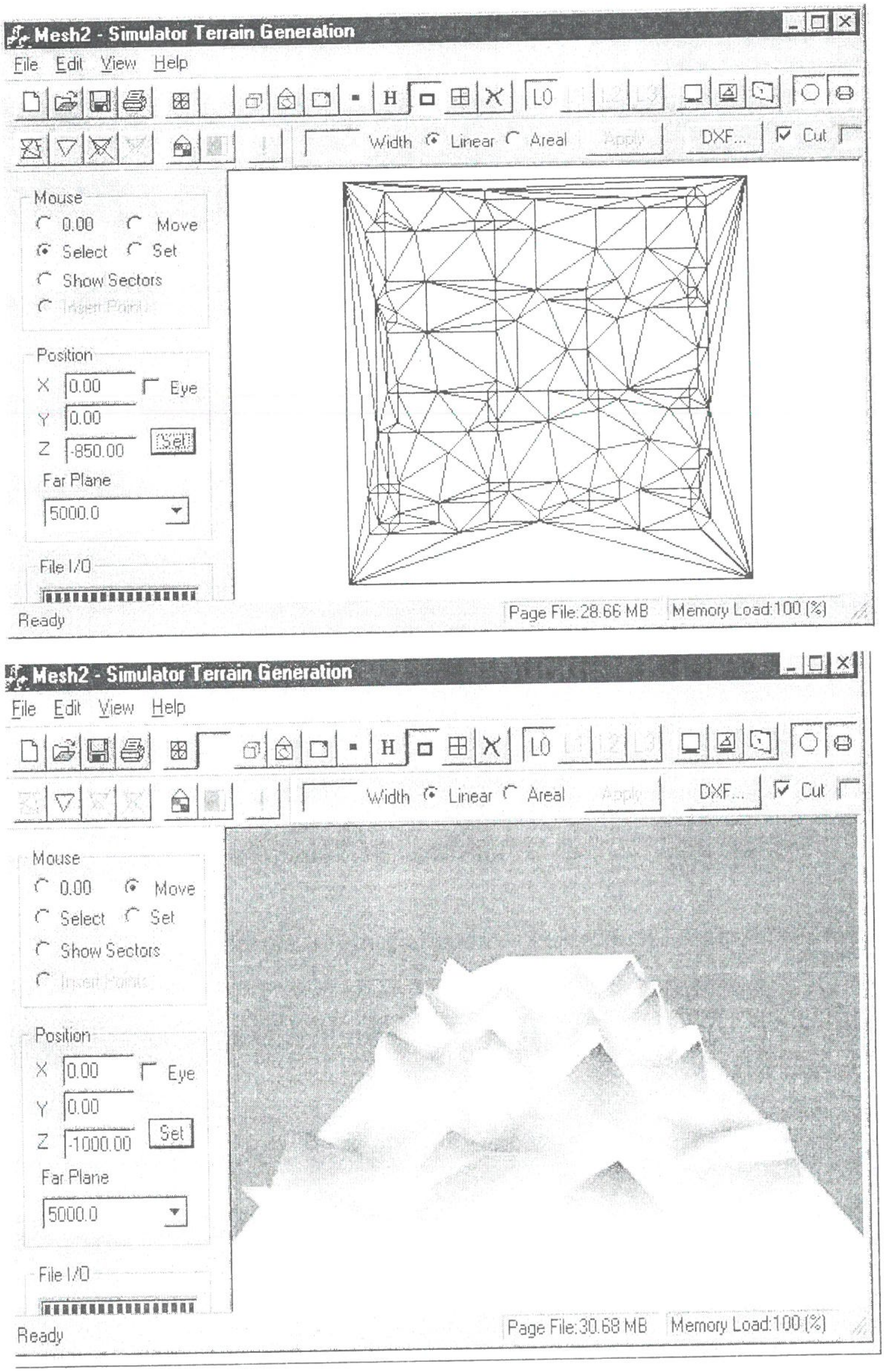


Figura 4. Modelarea suprafeței terenului cu toleranța de eroare = 50
a) Diagrama de triangulizare. b) Imaginea 3d a modelului rezultat

În figura 4 este prezentată diagrama Delaunay de triangularizare cu condiția de eroare maxim admisă egală cu 50, pentru care rezultă 475 de poligoane, care aproximează, cu un grad mai redus de fidelitate, așa cum se vede din imaginea 3d, terenul de reconstruit.

4. Modelarea multi-rezoluție a formelor de teren

Toate sistemele grafice, oricât ar fi de puternice, au o capacitate de calcul limitată, care afectează numărul de elemente grafice (poligoane) care pot fi redate într-o imagine, dacă se impune o frecvență minimă de generare și, deci, un timp maxim limitat. Pentru reprezentarea realistă a terenului cu domeniu de vizibilitate mare sunt necesare zeci sau chiar sute de mii de poligoane în reprezentarea triangularizată a acestuia, dar, dintre acestea, o mare parte se află la o distanță mare de punctul de observare, imaginea lor ocupă un spațiu foarte redus pe ecran, și deci acestea pot fi reprezentate cu eroare de aproximare mai mare.

Metoda de reconstrucție a terenului prin aproximare cu condiții de eroare impuse, prezentată mai sus, permite modelarea terenului cu rezoluție multiplă, fiecare rezoluție corespunzând unui nivel de detaliu de reprezentare, nivel care rezultă din valoarea toleranței de eroare impuse.

Pentru reprezentarea cu rezoluție multiplă a suprafeței terenului, se partiționează domeniul datelor de intrare într-un număr de partiții disjuncte. Partiționarea se execută spațial, în general sub forma unei rețele bidimensionale (figura 5).

$$\mathbf{D} = \bigcup_{i,j=0}^{s-1} \mathbf{D}_{i,j}, \quad \mathbf{D}_{i,j} \cap \mathbf{D}_{k,l} = \emptyset, \quad \forall\, i \neq k,\ j \neq l.$$

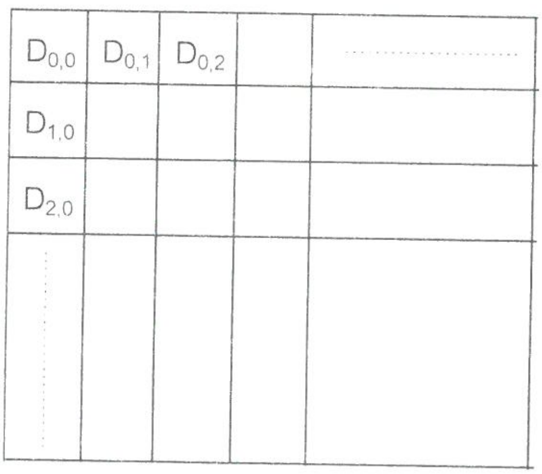


Figura 5. Partiționarea spațială în rețea bidimensională a suprafeței terenului

Fiecare partiție a suprafeței terenului se modelează multi-rezoluție, ca un sector separat, reprezentat cu niveluri de detaliu multiple. Pentru fiecare nivel de detaliu se impune o toleranță de eroare corespunzătoare: cu cât eroarea admisă de reconstrucție a suprafeței este mai mare, cu atât numărul de poligoane rezultat este mai mic, reprezentând un nivel de detaliu mai redus. Acest lucru reiese și din figurile 2-4, prezentate mai sus.

În cursul generării imaginii terenului, sistemul grafic selectează, pentru fiecare sector, nivelul de detaliu corespunzător, pe baza distanței acestuia față de punctul de observare. Cu cât un sector este mai departe de observator, cu atât nivelul de detaliu selecționat este mai mic și, deci, se iau în considerație mai puține detalii și numărul de poligoane prelucrate și redate scade (figura 6).

Selectarea nivelurilor de detaliu poate conduce la situația în care două sectoare adiacente (care partajează o muchie comună) să fie reprezentate pe niveluri de detaliu diferite, așa cum se poate vedea și în figura 6. Pentru asigurarea continuității funcției de aproximare a suprafeței terenului între două sectoare adiacente reprezentate pe nivele de detaliu diferite este necesar să se adauge încă o condiție de execuție algoritmului de reconstrucție a suprafeței de teren, și anume: pe fiecare muchie partajată de două sectoare adiacente se inserează un număr de puncte egal pentru toate nivelurile de detaliu. Aceste puncte se includ în mulțimea **I**, de interes particular pentru reconstrucția suprafeței terenului.

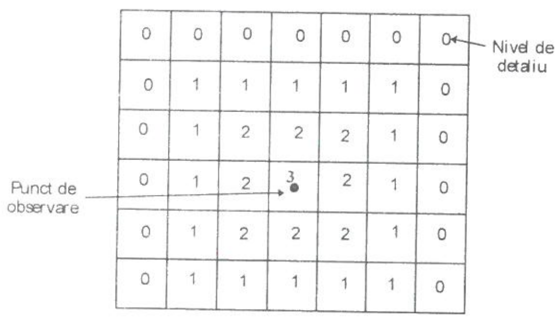


Figura 6. Selectarea nivelurilor dedetaliuale sectoarelor în funcție de poziția punctului de observare

Introducerea acestei condiții suplimentare pentru funcția de aproximare produce, în general, creșterea numărului de triunghiuri ale suprafeței rezultate. De exemplu, pentru o toleranță de eroare egală cu 50, numărul de triunghiuri crește de la 475 la 636.

5. Concluzii

Maximizarea realismului vizual, concomitent cu minimizarea volumului de date prelucrate, reprezintă singura posibilitate de redare în timp real a bazelor de date complexe, constând din modelarea terenului pe suprafețe întinse. Acest deziderat se poate obține prin modelarea multi-rezoluție a suprafețelor de teren, fiecare rezoluție corespunzând unui nivel de detaliu de reprezentare, nivel care rezultă din valoarea toleranței de eroare impuse. Procesarea nivelurilor de detaliu multiple reprezintă cel mai important instrument de control și de îmbunătățire a performanțelor de redare în timp real a bazelor de date grafice complexe.

Bibliografie

1. **IONESCU, F.**: Baze de date grafice orientate pe obiecte. Revista Română de Informatică şi Automatică, Vol.6, nr. 1, 1996.

2. **AURENHAMMER, F.**: Voronoi Diagrams - A Survey of Fundamental Geometric Data Structure. ACM Computing Survey , Vol.23, No. 3, Sept. 1991.

3. **FJALLSTROM, P.O.**: Evaluation of a Delaunay-based method for surface aproximation. Computer-Aided Design, Vol.25, No.11, Nov. 1993.