

Exemplu de utilizare a programului FTOOL – Grinzi cu zăbrele



Firth of Forth Railway Bridge 1890, Scotland

Analiza liniară a unei structuri 2D tip grindă cu zăbrele

Descrierea structurii

Structura de analizat este de tip grindă cu zăbrele plană (2D) alcătuită din elemente de bară, încărcată cu un sistem de forțe concentrate aplicate la noduri. Geometria structurii și ipoteza de încărcare considerată sunt prezentate în Figura 1.

Toate elementele structurii sunt confecționate din oțel.

Din punct de vedere static structura este static determinată:

$$G_{ns} = (b + r) - 2n = (25 + 3) - 2 \cdot 14 = 0$$

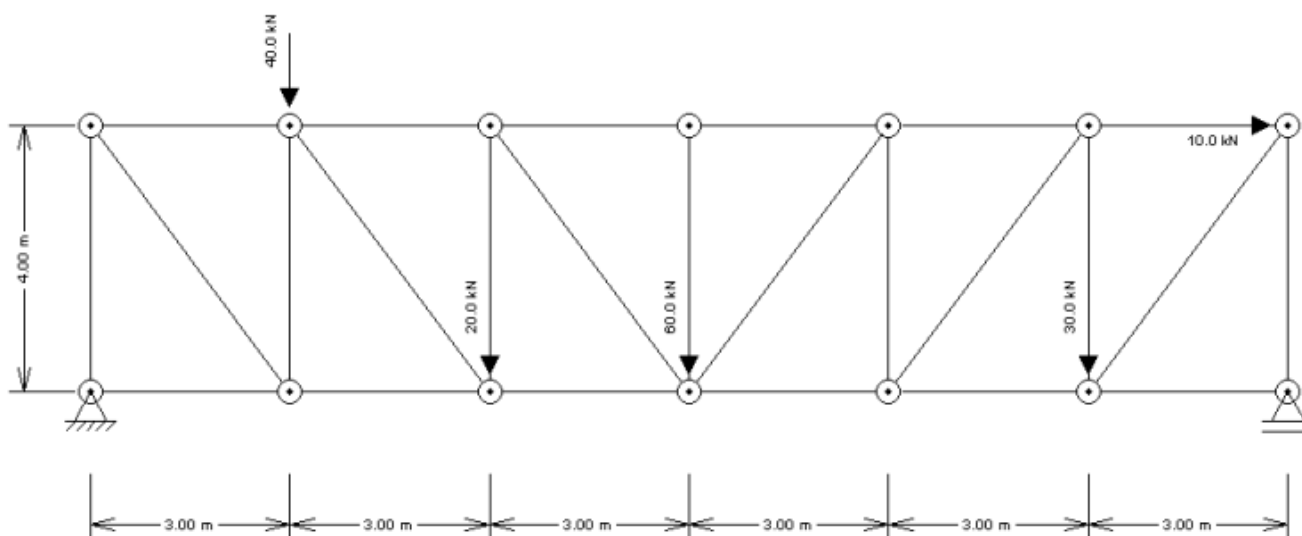


Figura 1.

Obiectivele analizei

Ca urmare a analizei structurii se solicită:

1. Diagramele de eforturi secționale: forță axială
2. Deformata calitativă a structurii
3. Linii de influență pentru eforturi axiale în barele grinzii cu zăbrele

Observație: Întrucât structura este static determinată, iar valorile efective ale deplasărilor nu sunt cerute, se poate accepta pentru calcule un singur tip de secțiune transversală pentru toate elementele structurii.

Apelarea programului FTOOL

Programul de analiză a structurilor plane alcătuite din elemente de grindă și bare FTOOL poate fi apelat prin click dublu pe icoana:



Dublu click cu buton stânga mouse

Ca urmare a acestei comenzi se deschide interfața de lucru a programului pregătită pentru o nouă sesiune de lucru – Figura 2.

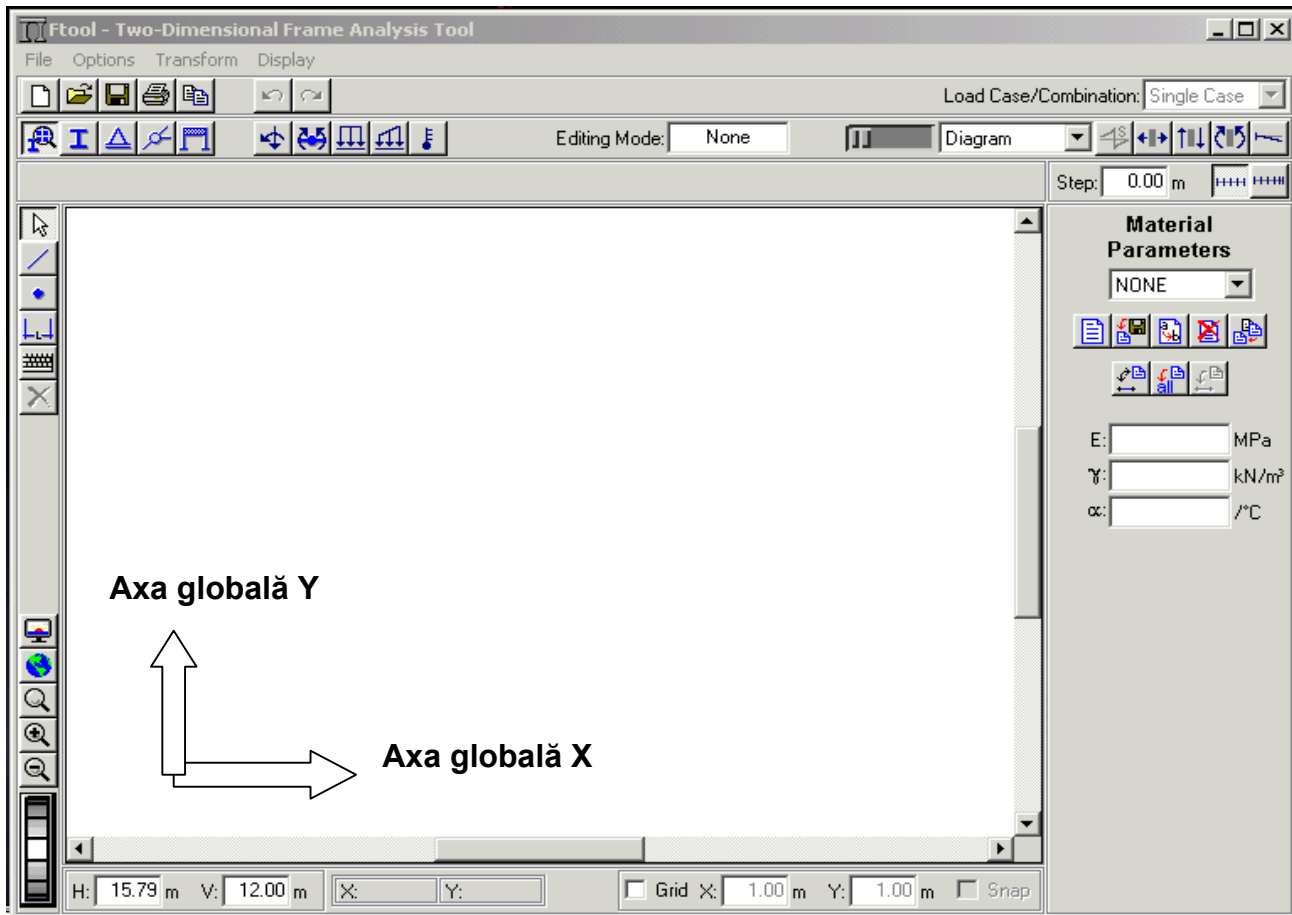


Figura 2.

Modelul de calcul a structurii

Modelul de calcul cuprinde un număr de 14 puncte nodale și 25 elemente de bară. Elementele de bară sunt delimitate de nodurile articulate ale structurii.

În Figura 3 este prezentată numerotarea nodurilor structurii și numerotarea elementelor modelului de calcul.

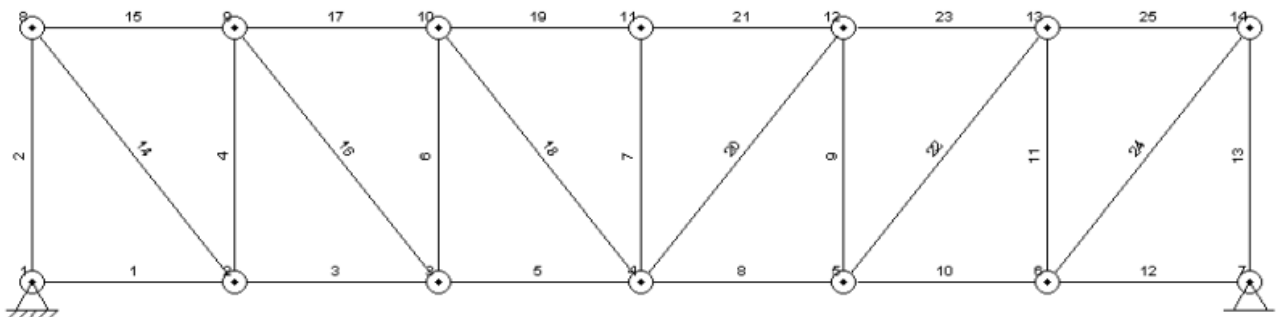


Figura 3.

Setări inițiale de lucru

1. Limitele modelului

Pentru ca întregul model să poată fi vizualizat în ecranul de lucru, utilizatorul trebuie să precizeze limitele maxime în direcție orizontală și verticală ale modelului.

În cazul structurii analizate, dimensiunea maximă pe direcție orizontală este 18,00 m iar pe verticală este 4,00 m.

În aceste condiții se poate preciza ca limite $X_{\text{maxim}} = 20$ m iar $Y_{\text{maxim}} = 10$ m. Dimensiunile minime pot fi $X_{\text{minim}} = -2.00$ și respectiv $Y_{\text{minim}} = -2.00$ – vezi Figura 4.

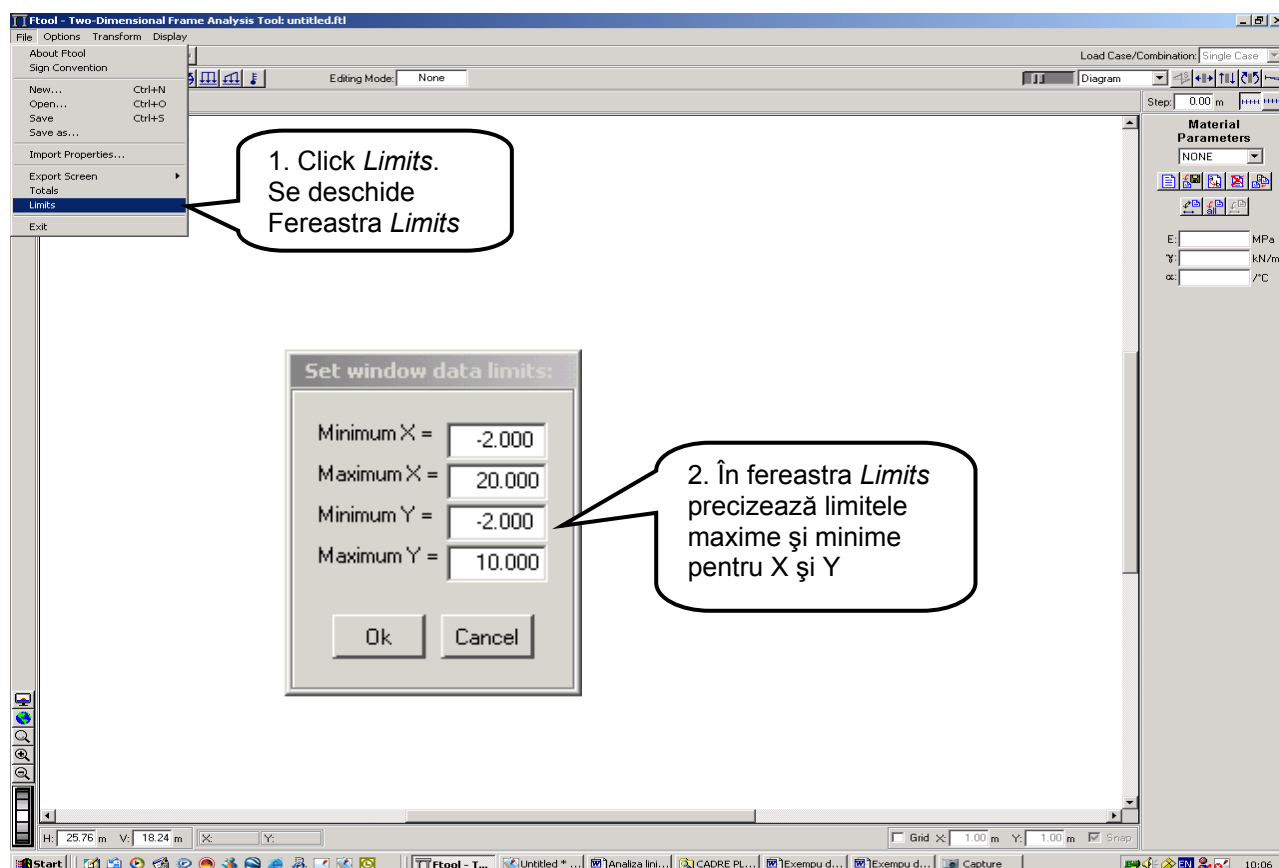


Figura 4.

2. Unitățile de măsură pentru caracteristicile modelului

Pentru prezenta analiză se va selecta ca sistem al unităților de măsură kN și m. Formatul de scriere al valorilor numerice va fi păstrat cel implicat al programului.

Comenzile necesare pentru selectarea unităților de măsură alese sunt prezentate în Figura 5.

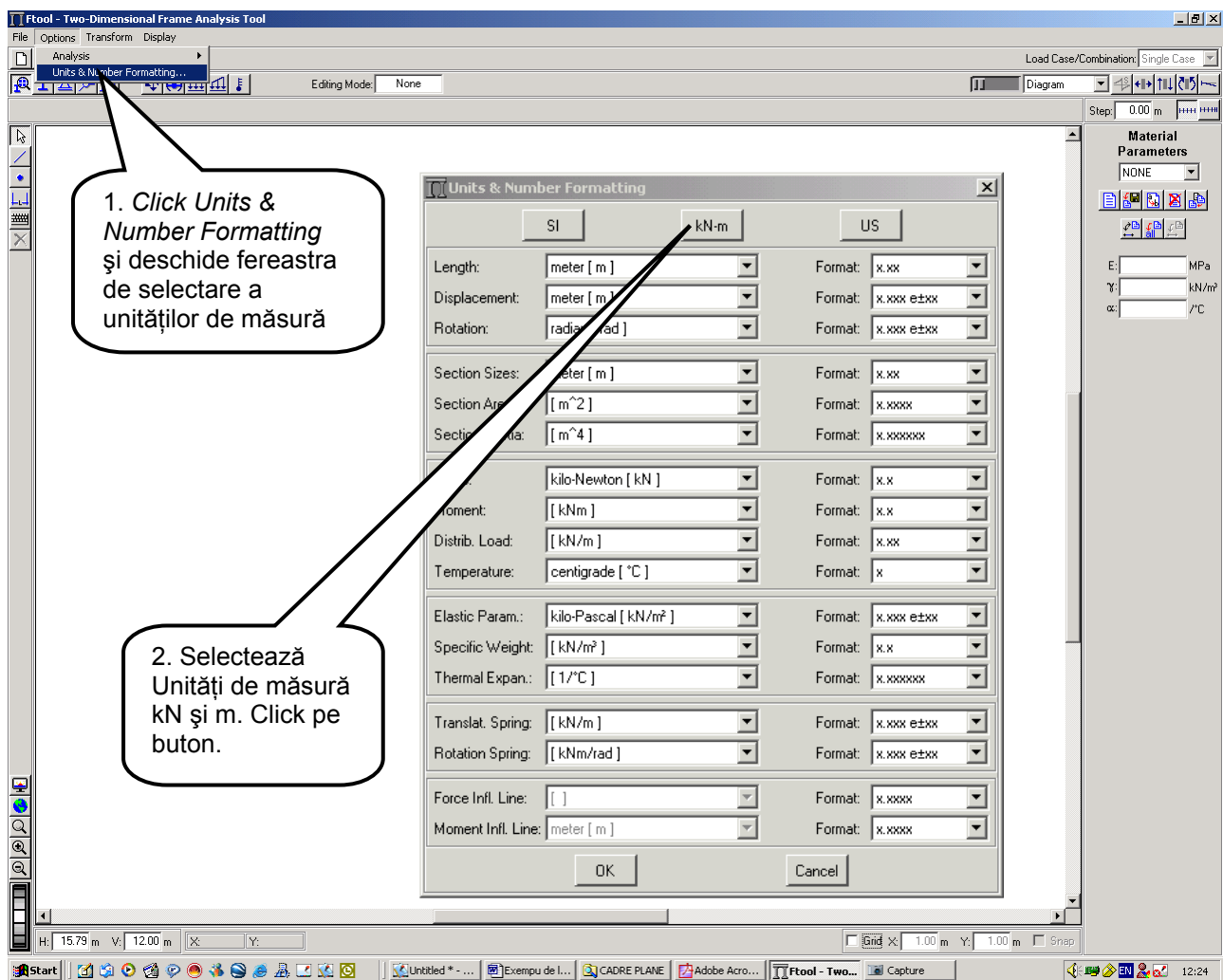


Figura 5.

3. Densitatea rețelei de puncte ajutătoare

Pentru a ușura operația de introducere a datelor de intrare privind pozițiile nodurilor de la capetele elementelor se poate apela la o rețea ajutătoare de puncte care pot fi vizibile în ecranul de lucru.

Afișarea pe ecran a rețelei de puncte se face selecând butonul *Grid* situat la partea inferioară a ecranului de lucru – Figura 6. Dimensiunile ochiurilor rețelei de puncte sunt implicit de 1,00m pe 1,00m. Întrucât dimensiunile structurii sunt date ca numere întregi se vor adopta dimensiunile ochiurilor cele implicite ale programului.

Poziția originii sistemului de coordonate este marcată pe ecran cu o cruce.

În procesul de plasare a nodurilor pe ecran se poate forța cursorul să se poziționeze automat pe cel mai apropiat punct al rețelei situat în apropierea cursorului, prin selectarea opțiunii *Snap* – Figura 6.

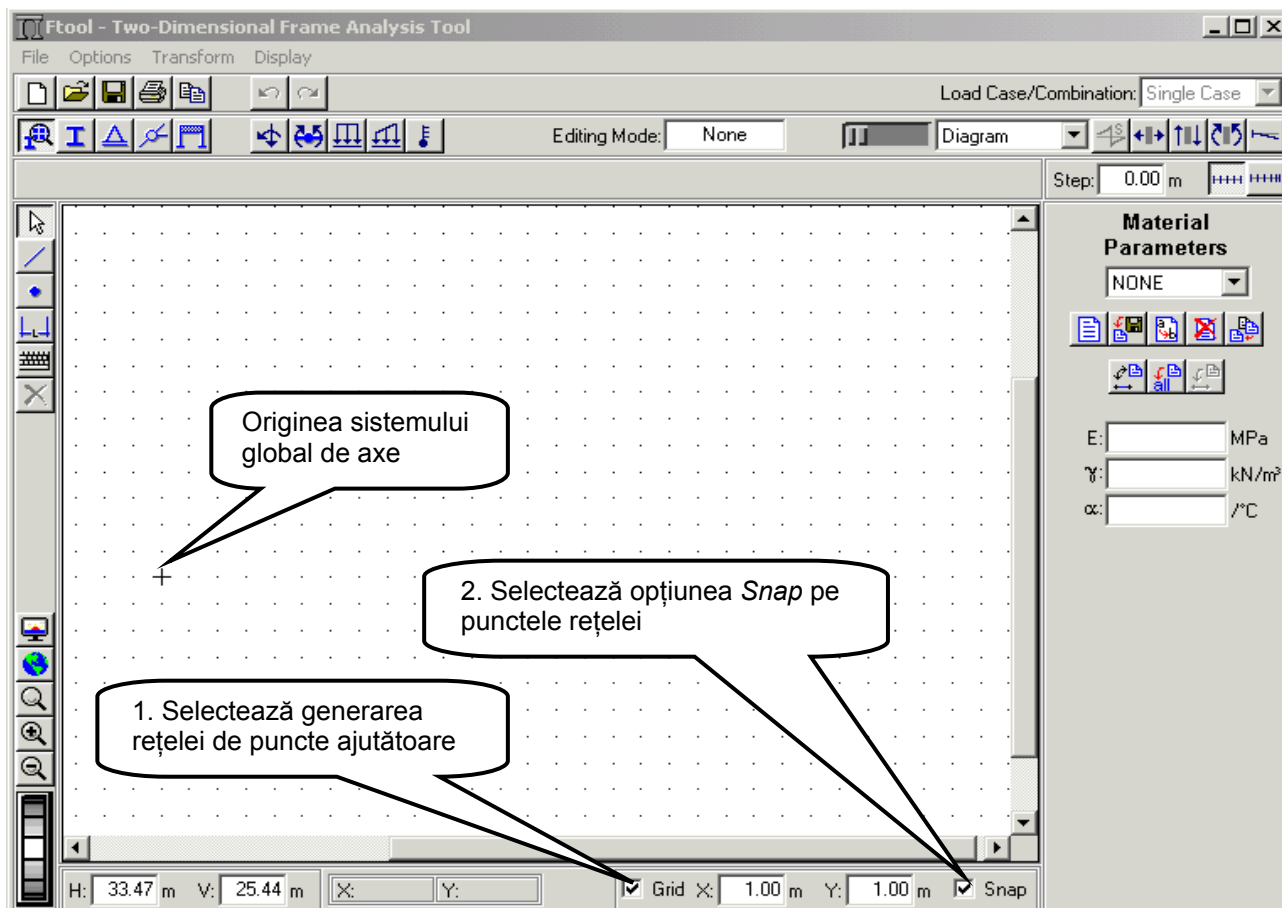


Figura 6.

Definirea geometriei structurii

Definirea geometriei structurii constă în precizarea poziției punctelor nodale și a legăturilor dintre acestea cu elemente de bară.

În cadrul prezentei analize geometria structurii va fi generată prin introducerea direct pe ecran a elementelor de bară prin click cu butonul din stânga pe poziția nodului origine, deplasarea (*drag*) cursorului pe poziția nodului final și click din nou cu butonul din stânga. În acest caz de mare ajutor este activarea opțiunilor *Grid* și *Snap*.

Numărul de generări individuale de elemente poate fi redus substanțial dacă se are în vedere pe de o parte, facilitatea oferită de program de a copia elementele și nodurile deja generate, iar pe de altă parte de simetria structurii față de o axă verticală ce trece prin nodurile 4 și 11.

Procedura de generare a geometriei unei structurii simetrice în situația în care s-a generat jumătatea din stânga a structurii, urmând ca cealaltă jumătate să fie copiată în oglindă (*Mirror*) în raport cu axa verticală care trece prin axa de simetrie, a fost prezentată în Exemplul de utilizare a programului FTOOL – Diagrame de eforturi (Figura 16).

Pentru a urmări modul în care geometria structurii este construită parcurgeți Figurile 7 la 16.

Se va considera că originea sistemului de axe global coincide cu poziția nodului 1, reazemul din stânga al structurii.

a. Generează elementul 1 – Figura 7

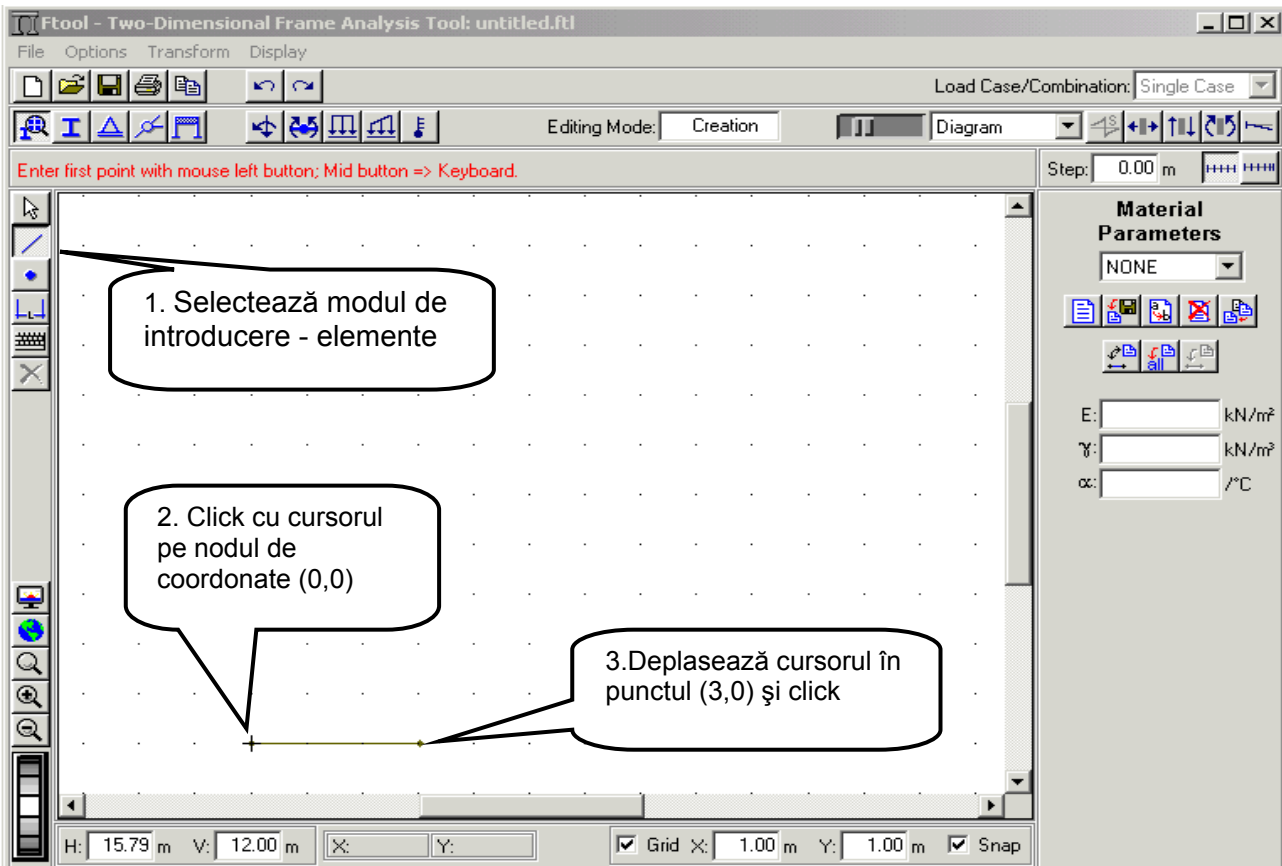


Figura 7.

b. Generează elementul 2 – Figura 8

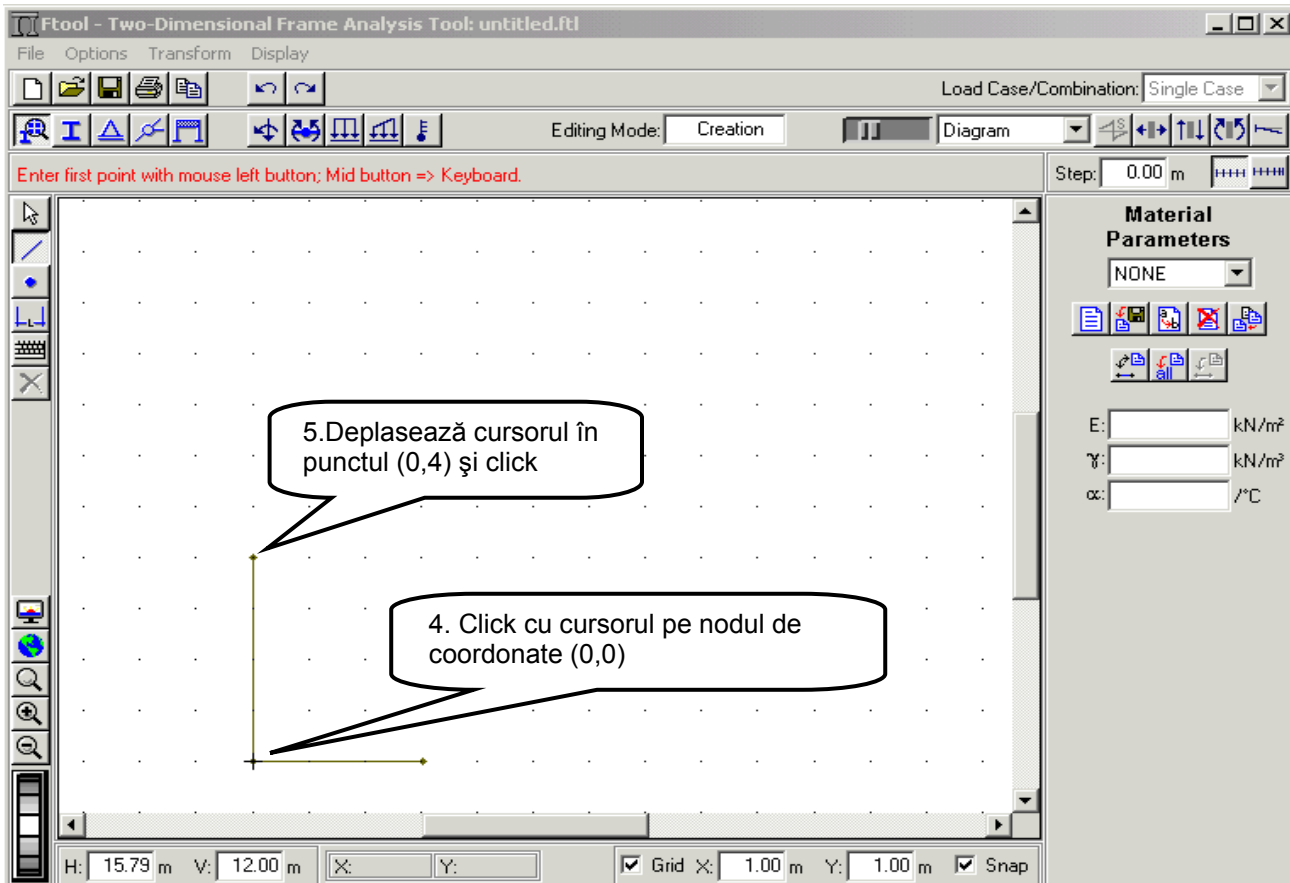


Figura 8.

c. Generează elementul 4 – Figura 9

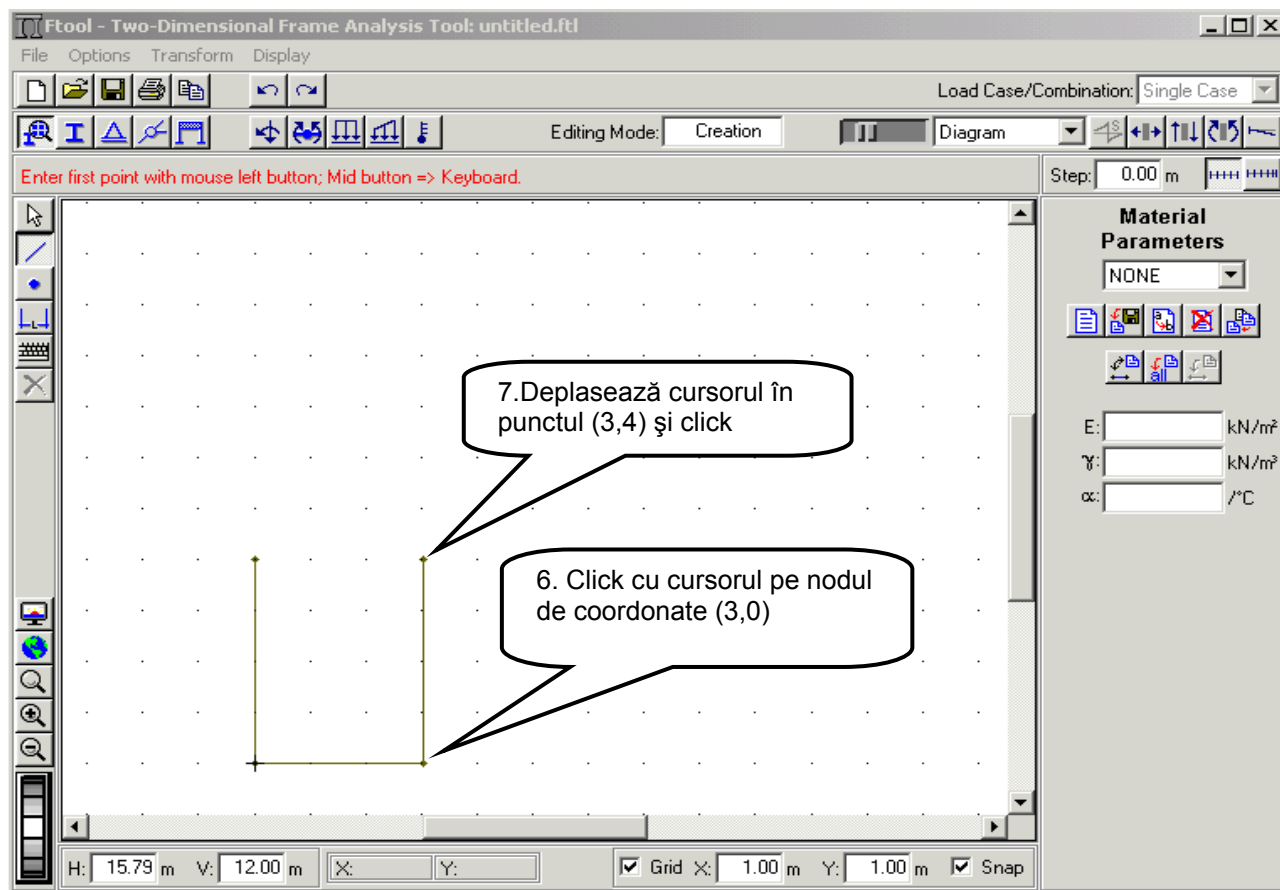


Figura 9.

d. Generează elementul 15 – Figura 10

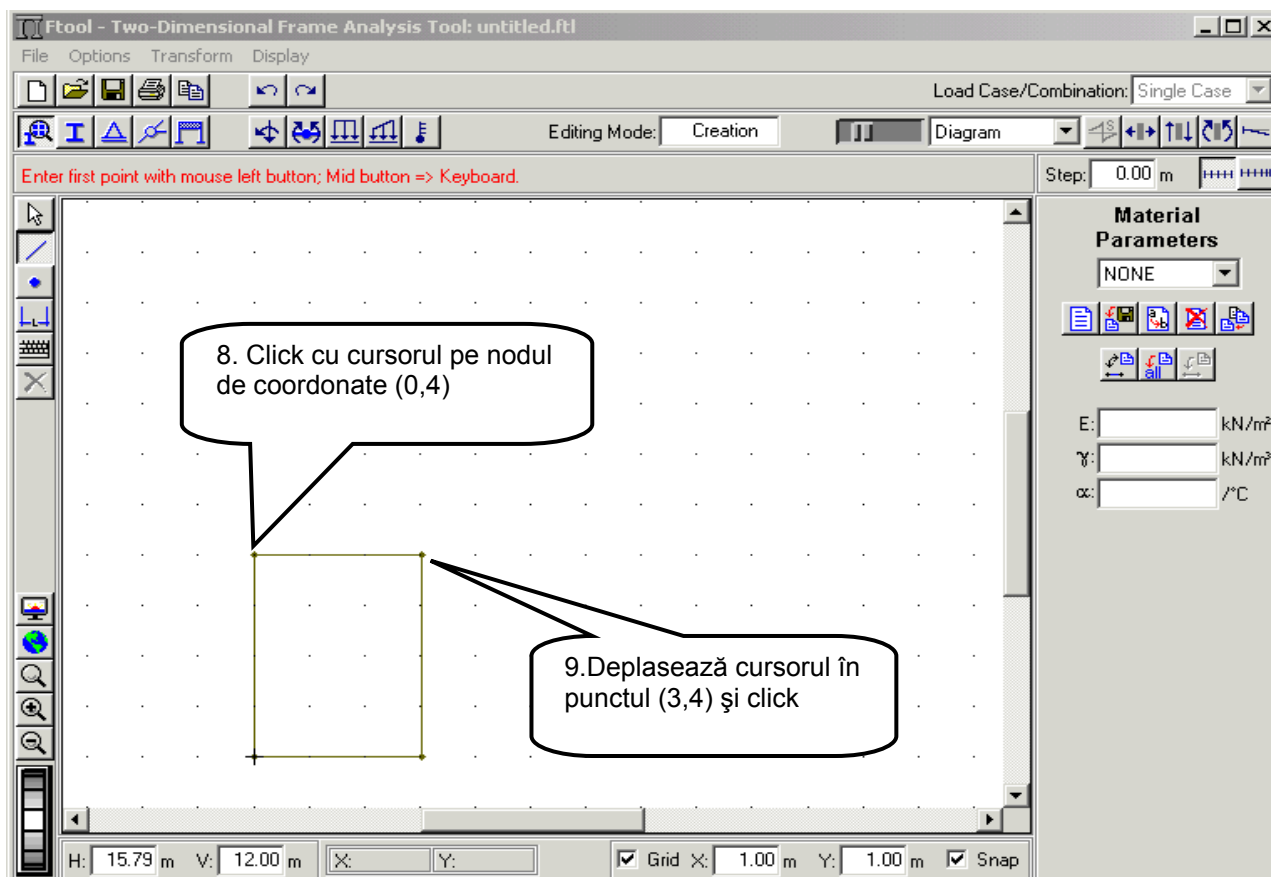


Figura 10.

e. Generează elementul 14 – Figura 11.

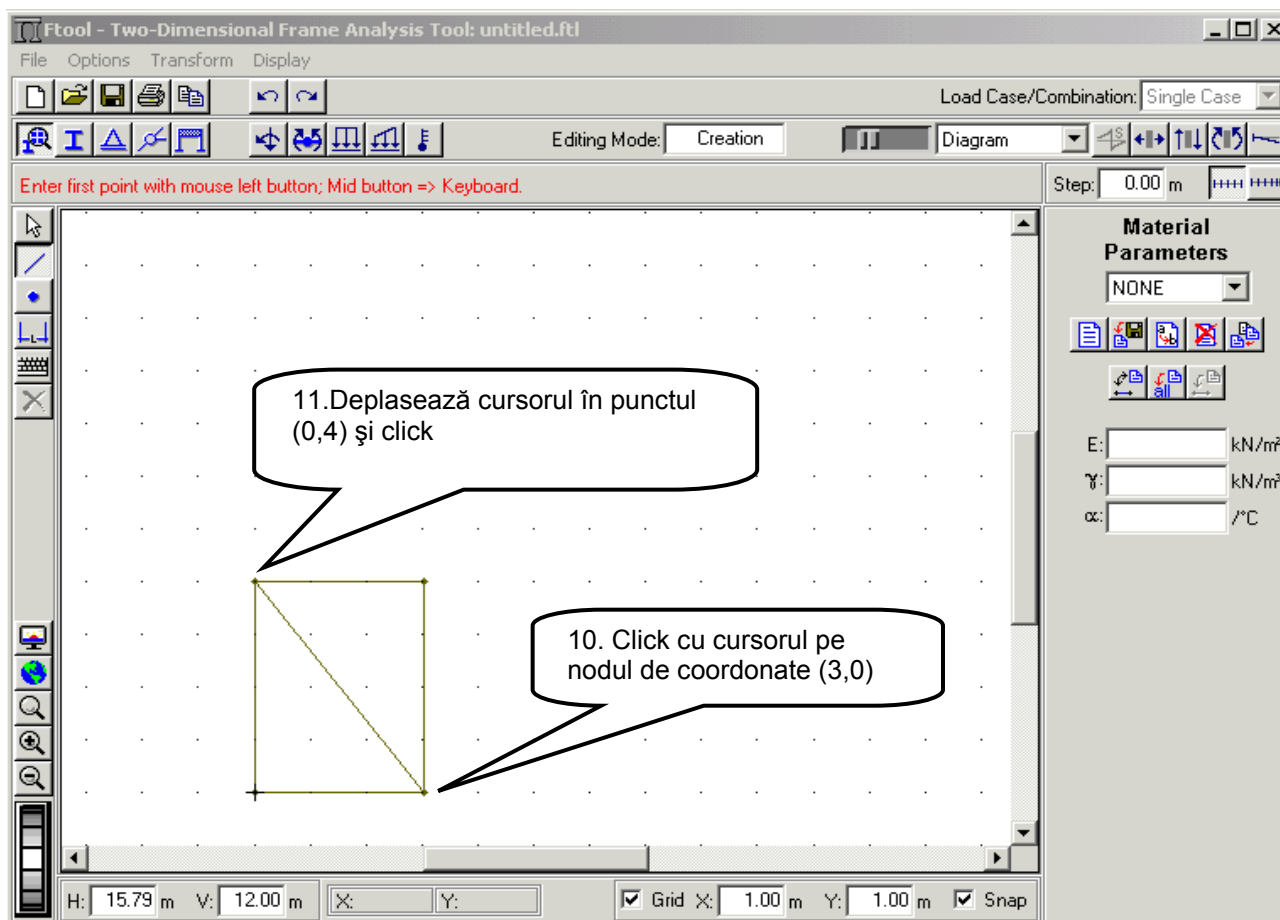


Figura 11.

La terminarea operațiilor prezentate în Figura 11, primul panou al grinzii cu zăbrele a fost generat.

În continuare generarea următoarelor două panouri se va face apelând la opțiunea de copiere a elementelor și nodurilor deja generate. Pentru acesta se va activa meniul *Transform* și se va selecta opțiunea *Leave Original*. Pe această cale ne asigurăm că elementele și nodurile selectate vor fi copiate în noua poziție păstrând originalul celor selectate.

Pentru a genera următorul panou a grinzii cu zăbrele, cu ajutorul cursorului se va selecta panoul deja generat, construind o fereastră în jurul acestuia. Toate elementele selectate vor fi desenate pe ecran în culoare roșu.

În continuare se deschide meniul *Transform* și selectează opțiunea *Move*. Plasează cursorul pe nodul 2 al panoului selectat, click cu butonul din stânga al mouse-ului și deplasează prin translatăre (*Drag*) până în punctul de coordonate (6,0). Pe ecran se poate observa cum panoul selectat se deplasează către poziția dorită.

Când cursorul este pe punctual de coordonate (6,0) se eliberează butonul mouse-ului.

Noul panou al grinzii cu zăbrele va apare pe ecran în poziția dorită.

Generarea prin copiere a celui de al doilea panou al grinzii cu zăbrele este prezentată secvențial în Figurile 12 și 13.

În continuare parcurgând aceeași procedură se generează cel de al treilea panou al grinzii cu zăbrele – vezi Figurile 14 și 15.

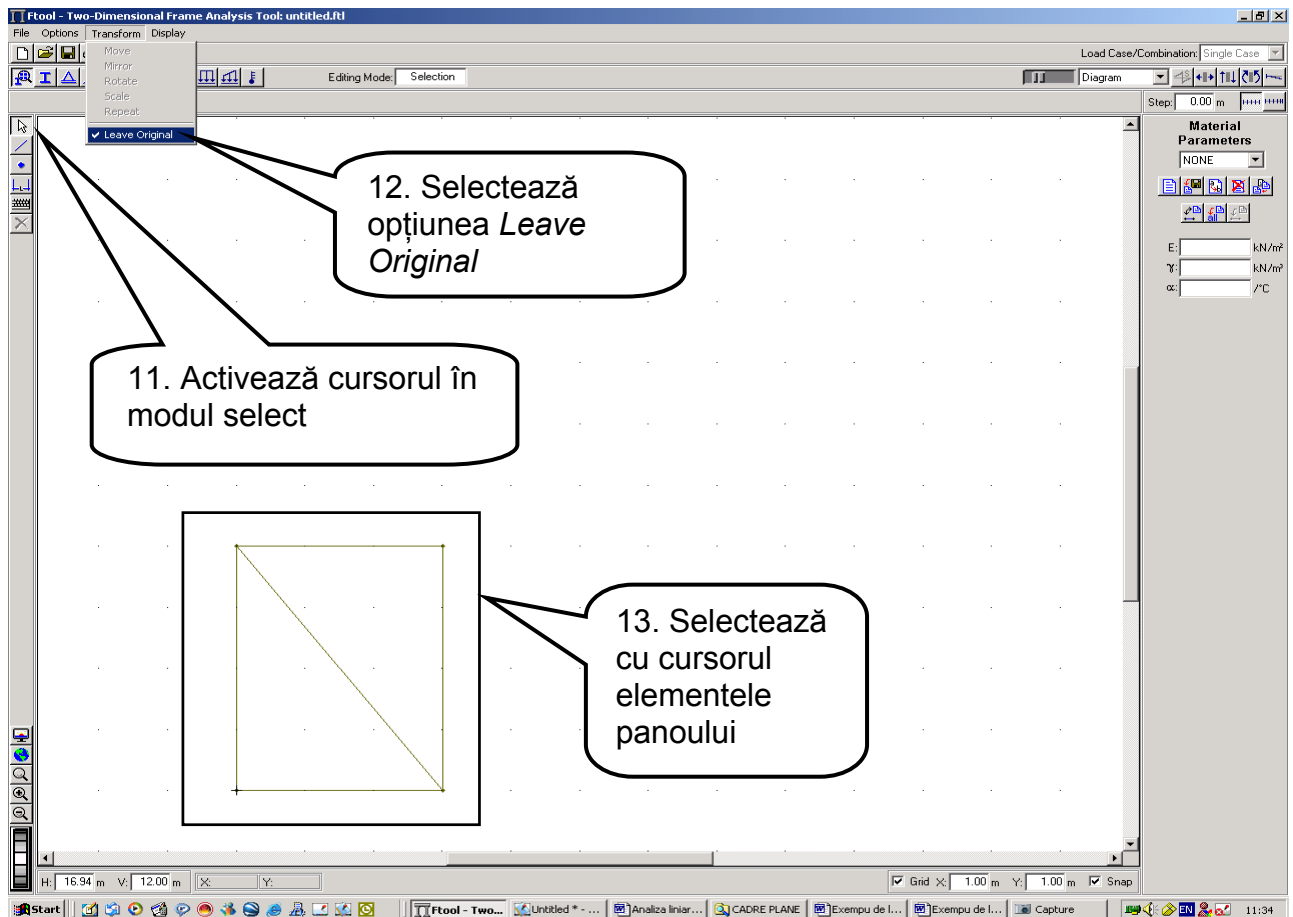


Figura 12.

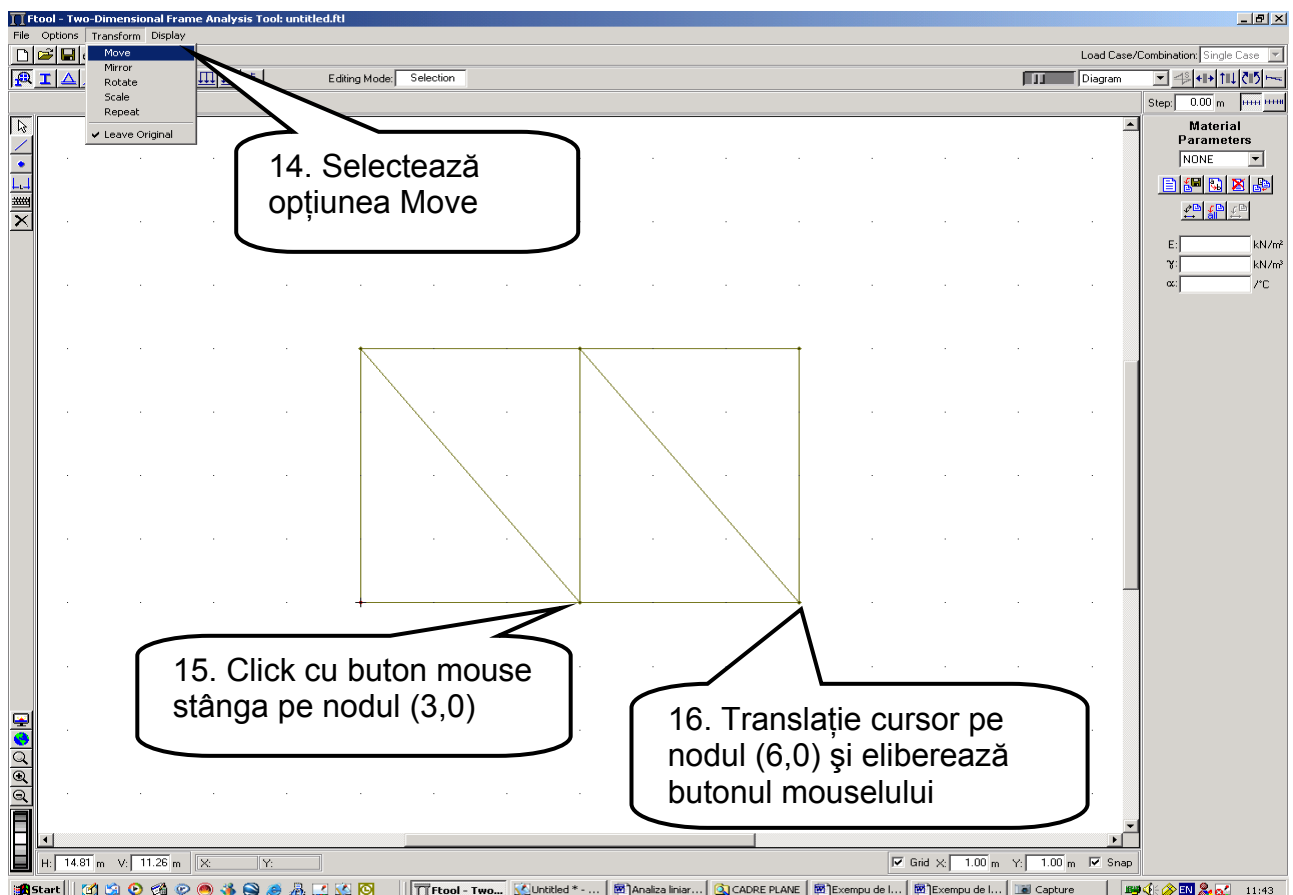


Figura 13.

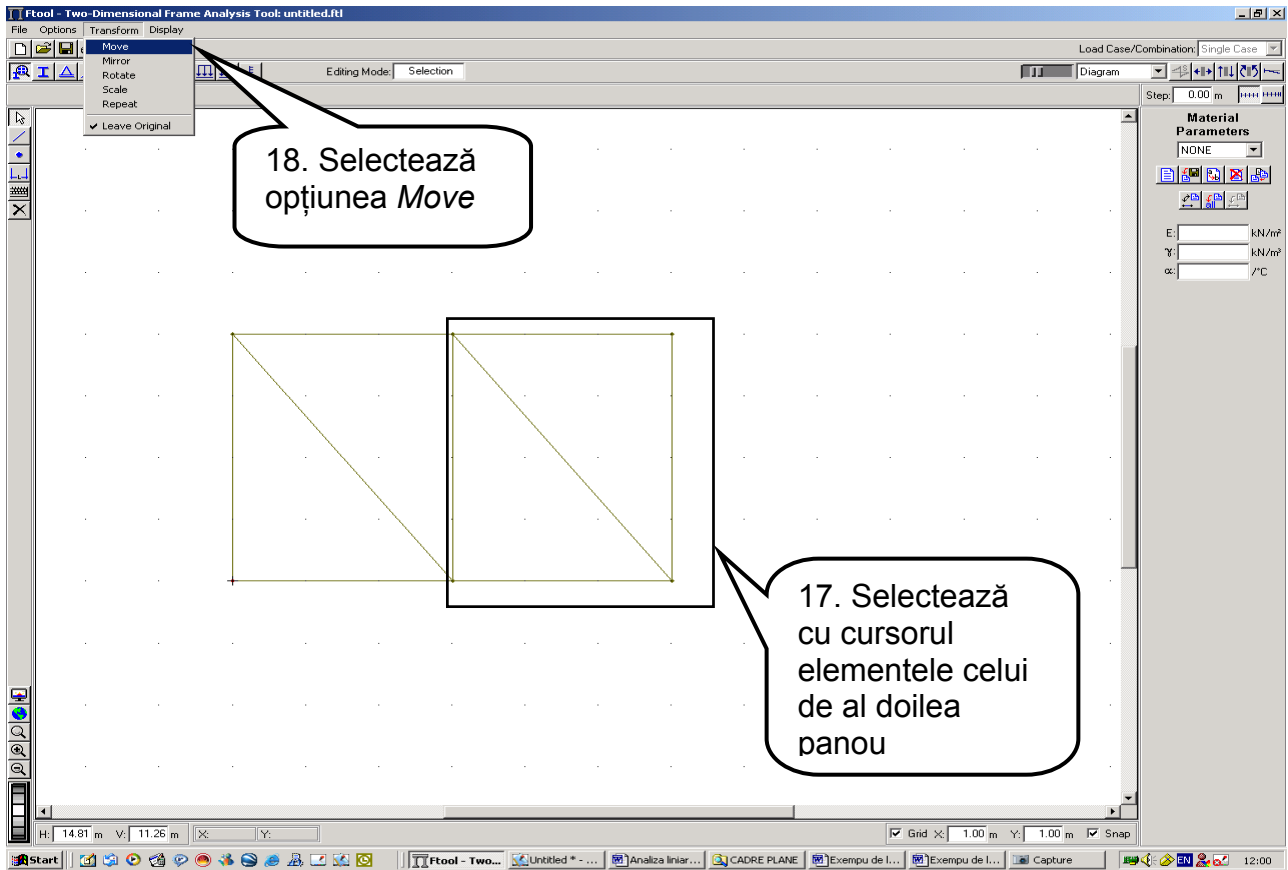


Figura 14.

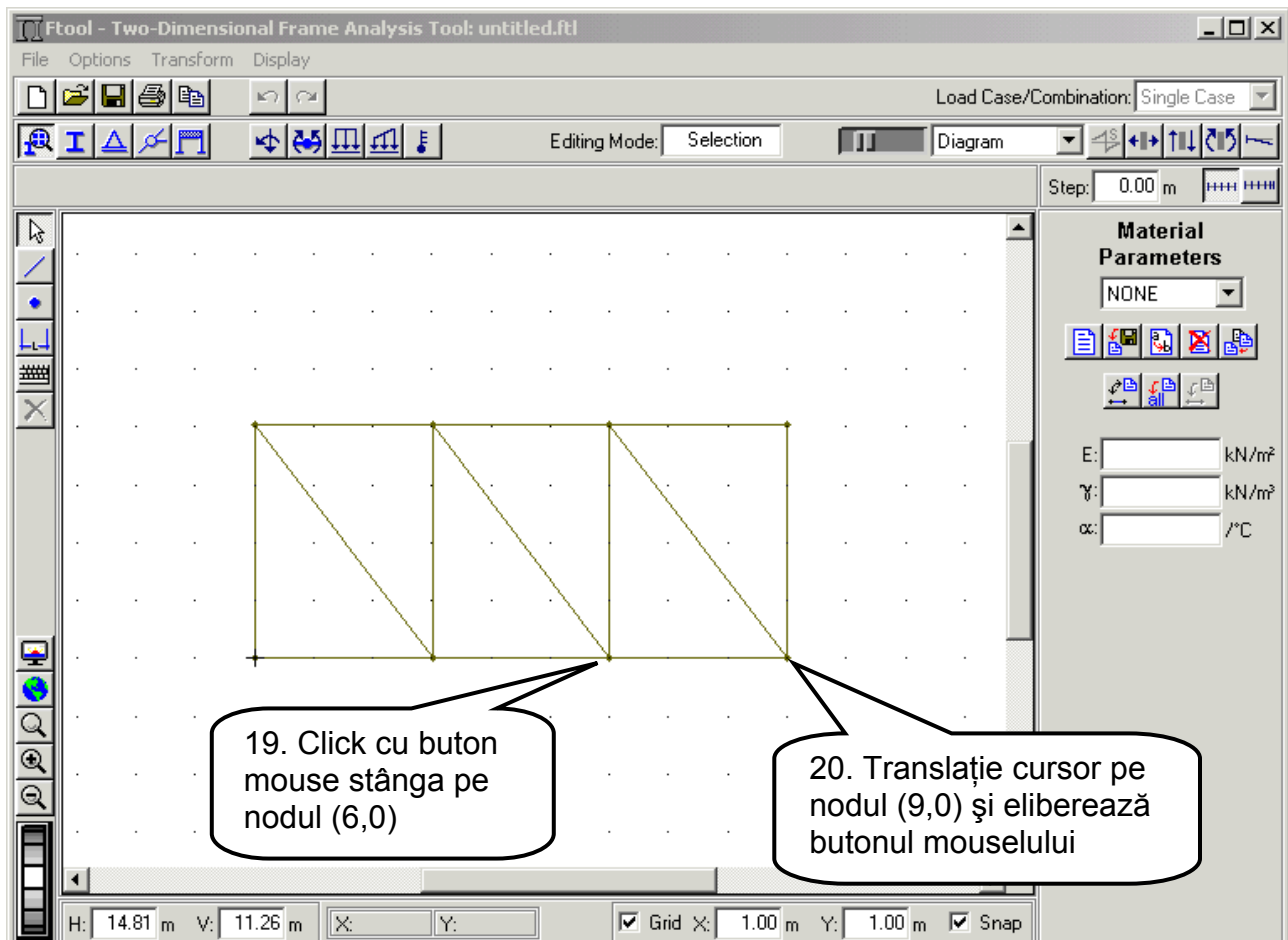


Figura 15.

După terminarea operațiilor prezentate în Figura 15, jumătatea din stânga a grinzii cu zăbrele este generată. Cealaltă jumătate a grinzii va fi generată apelând la opțiunea de copiere în oglindă a elementele existente, utilizând ca axă de simetrie axa care trece prin nodurile 4 și 11 – vezi Figura 3.

Operațiile necesare generării prin copiere în oglindă a părții din dreapta a grinzii cu zăbrele sunt prezentate în Figura 16.

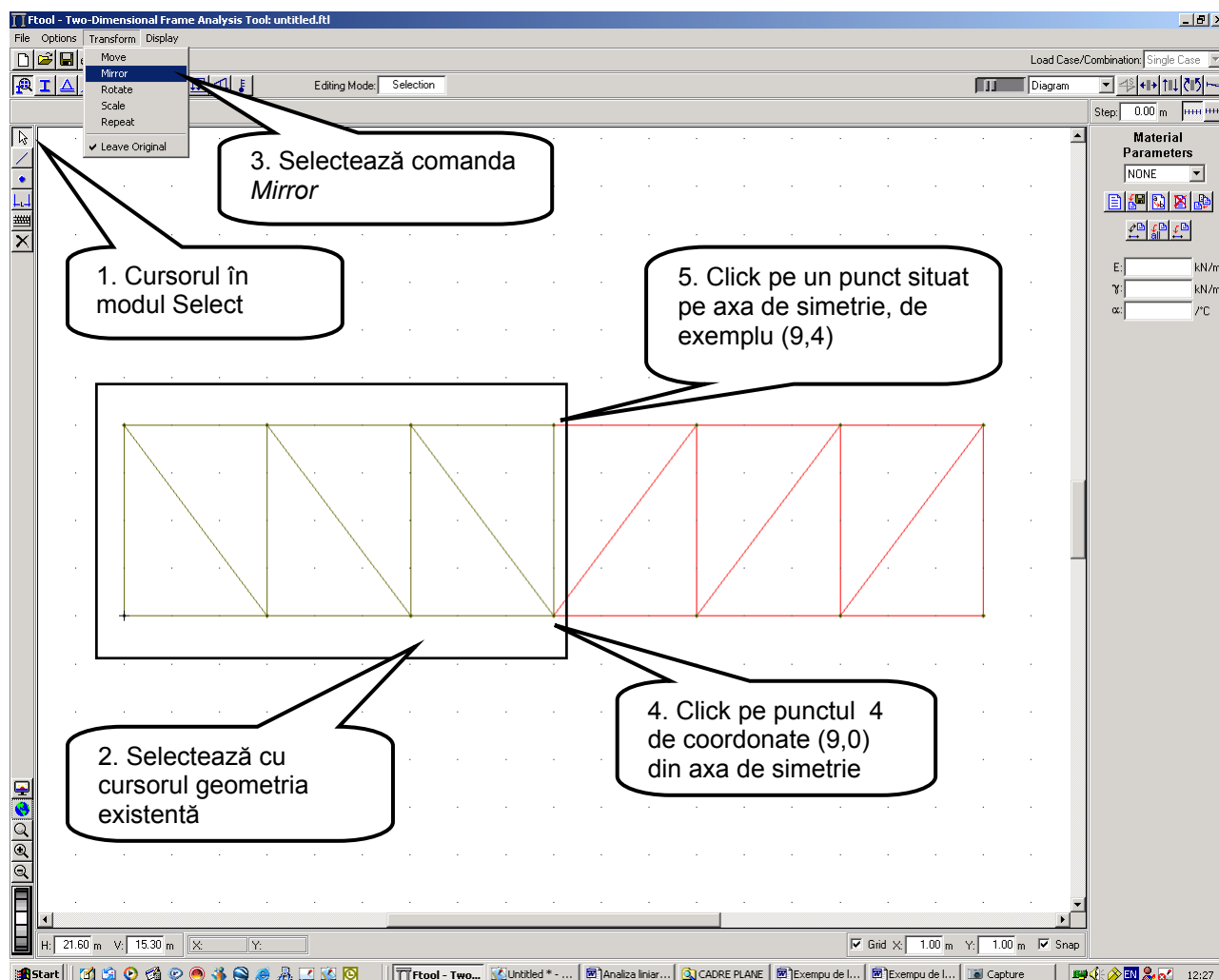


Figura 16.

După operațiile descrise în Figura 16, geometria grinzii cu zăbrele este integral definită.

Pentru a deveni model de calcul, acestea i se vor atribui caracteristici fizico-mecanice, condiții de rezemare și de încărcare, condiții de legătură a elementelor la noduri și constrângeri privind deformabilitatea axială a elementelor.

Generarea și atribuirea caracteristicilor amintite se realizează apelând la comenzile specifice meniului bară prezentat în Figura 17.



Figura 17.

Caracteristici fizico-mecanice ale materialelor

Întrucât structura analizată este static determinată, eforturile secționale se obțin din ecuații de reducere și în consecință acestea nu depind de valorile efective ale caracteristicilor mecanice ale materialelor din care structura este confecționată. Întrucât pentru efectuarea calculului programul FTOOL solicită date referitoare la caracteristicile mecanice ale materialelor, se va considera structura confecționată din oțel, caracteristicile mecanice ale acestuia fiind cele furnizate de program.

În Figurile 18, 19 și 20 sunt prezentați pașii urmași pentru definirea caracteristicilor mecanice ale oțelului și atribuirea acestora tuturor elementelor structurii.

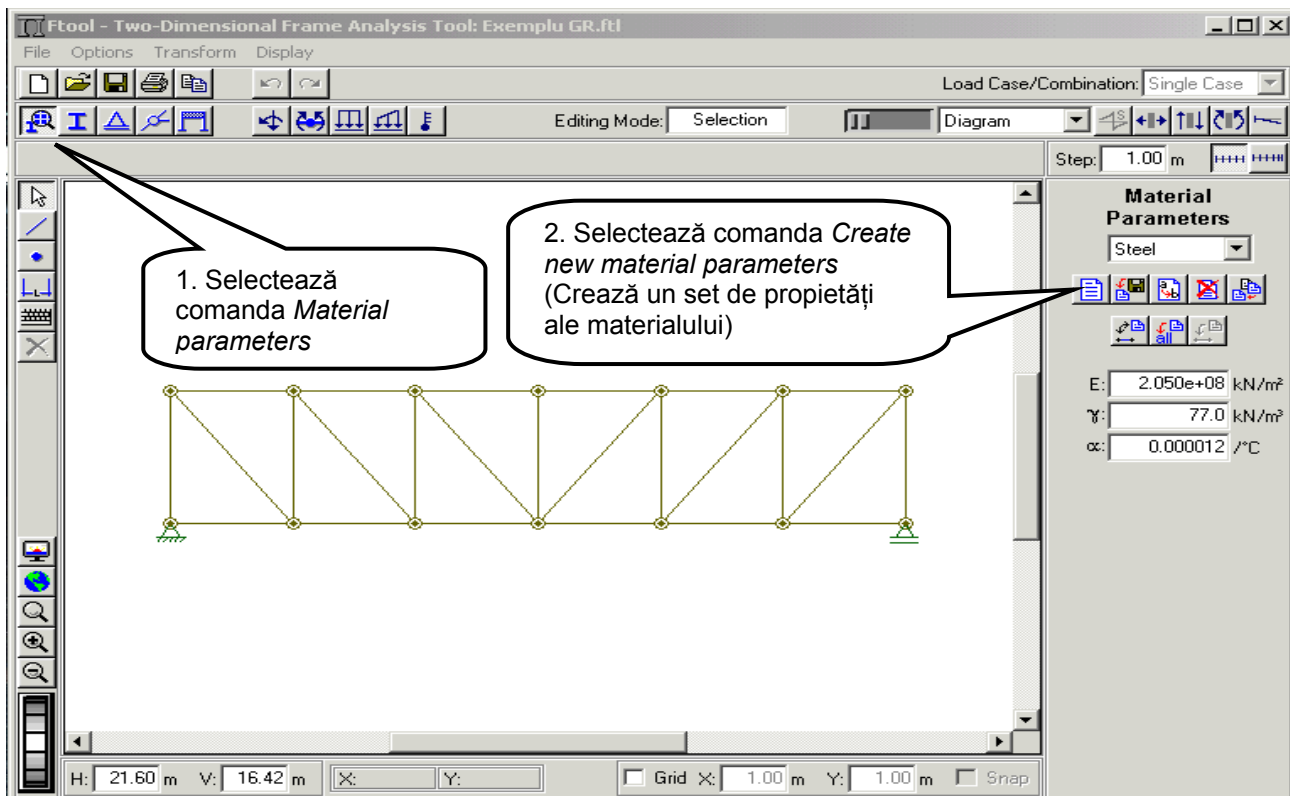


Figura 18.

3. Din lista materialelor disponibile în biblioteca programului selectează *Steel* (Oțel)

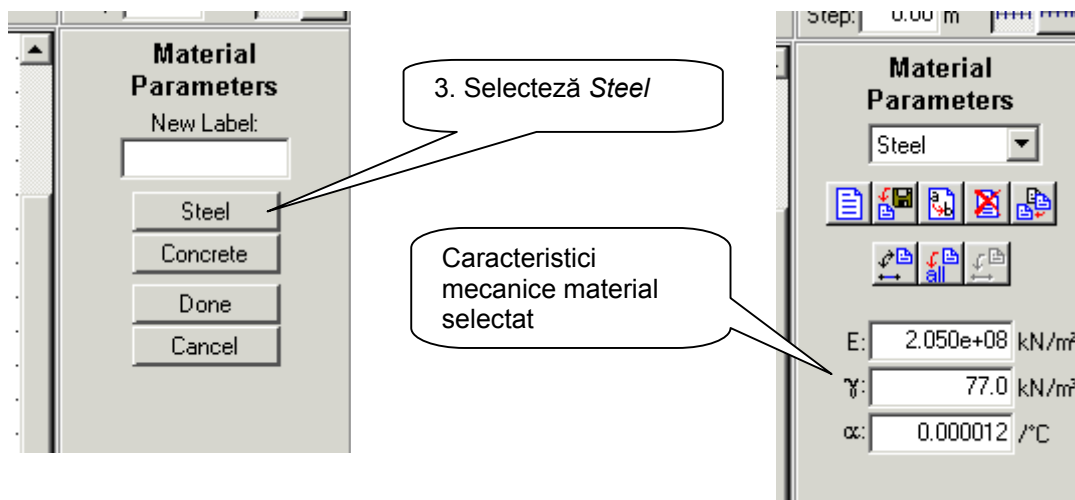


Figura 19.

4. Atribuie caracteristicile materialului definit la toate elementele structurii

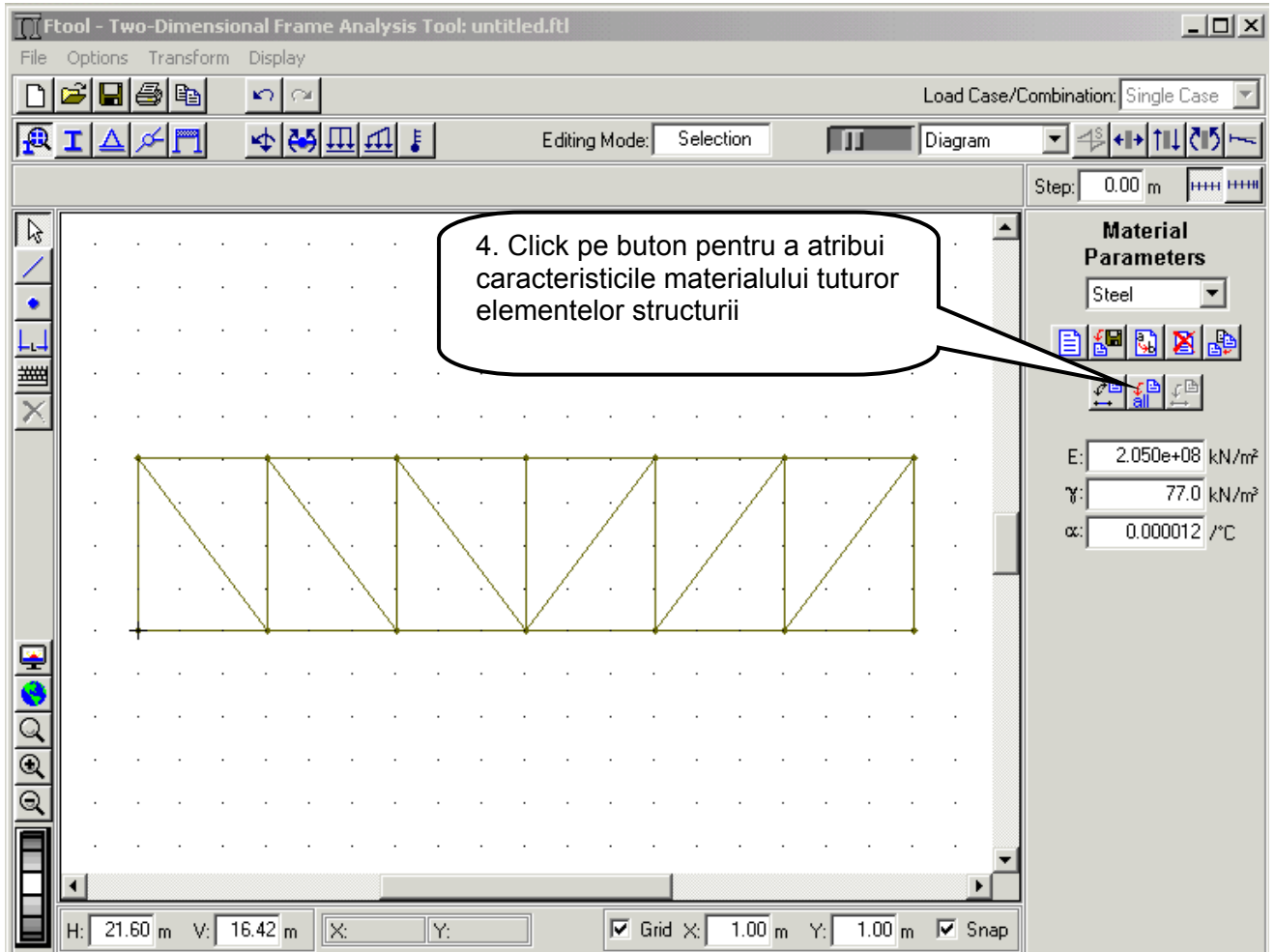


Figura 20.

Caracteristici geometrice ale secțiunilor transversale

Pentru structuri static determinate, eforturile secționale se obțin numai prin ecuații de reducere și, în consecință, acestea nu depind de distribuția materialului în structură. În situația în care nu interesează valorile reale ale deplasărilor structurii, caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale pot fi alese arbitrar.

În cadrul prezentei analize se va considera o singură secțiune transversală pentru toate elementele grinzii cu zăbrele. Caracteristicile geometrice ale secțiunii transversale pot fi alese arbitrar, de exemplu $A = 0.1 \text{ m}^2$, $I = 0.001 \text{ m}^4$, apelând la opțiunea *Section Type = Generic*.

În Figurile 21, 22 și 23 sunt prezentați pașii urmați pentru definirea caracteristicilor secțiunii transversale și atribuirea acestora tuturor elementelor grinzii cu zăbrele.

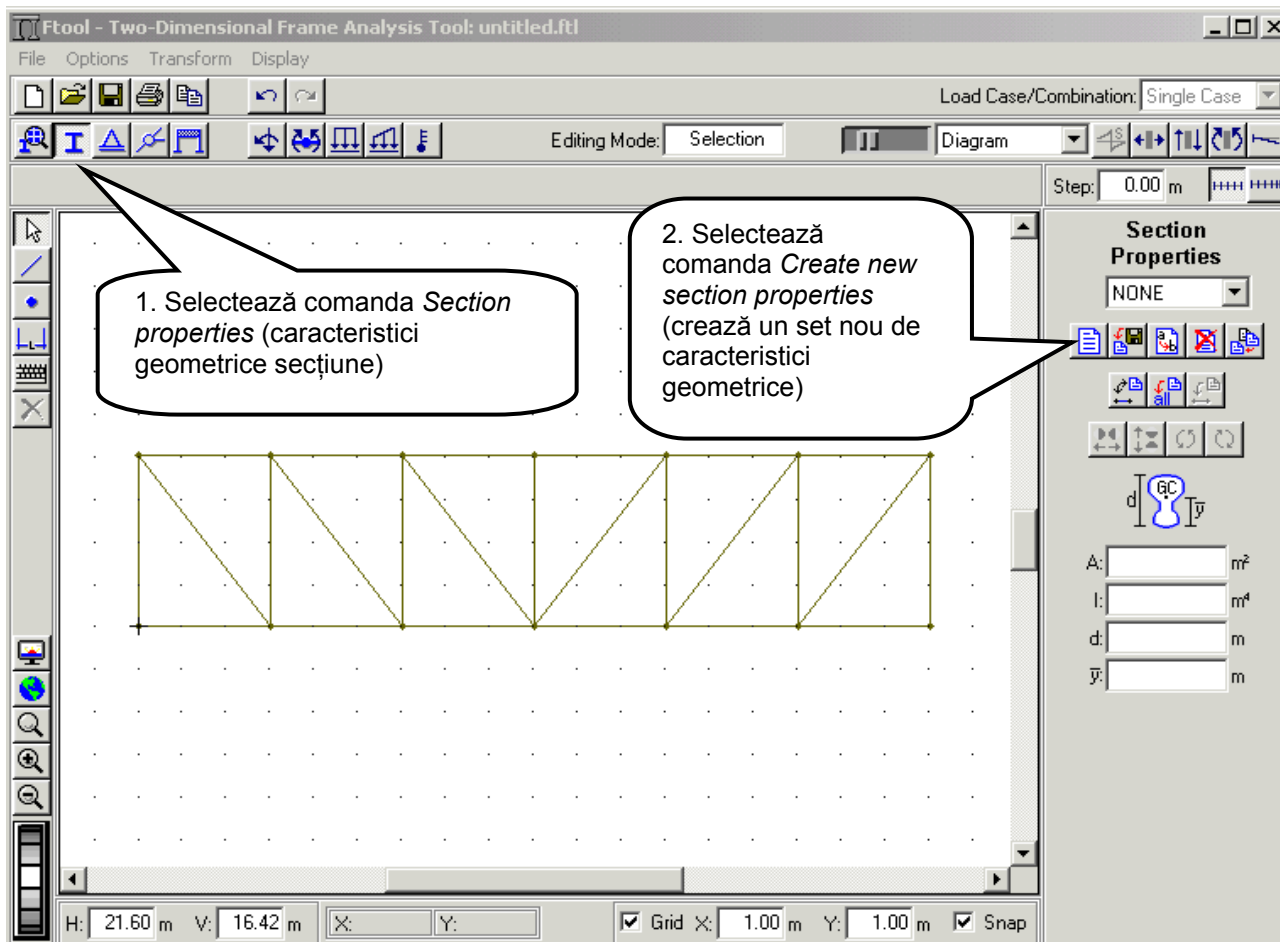


Figura 21.

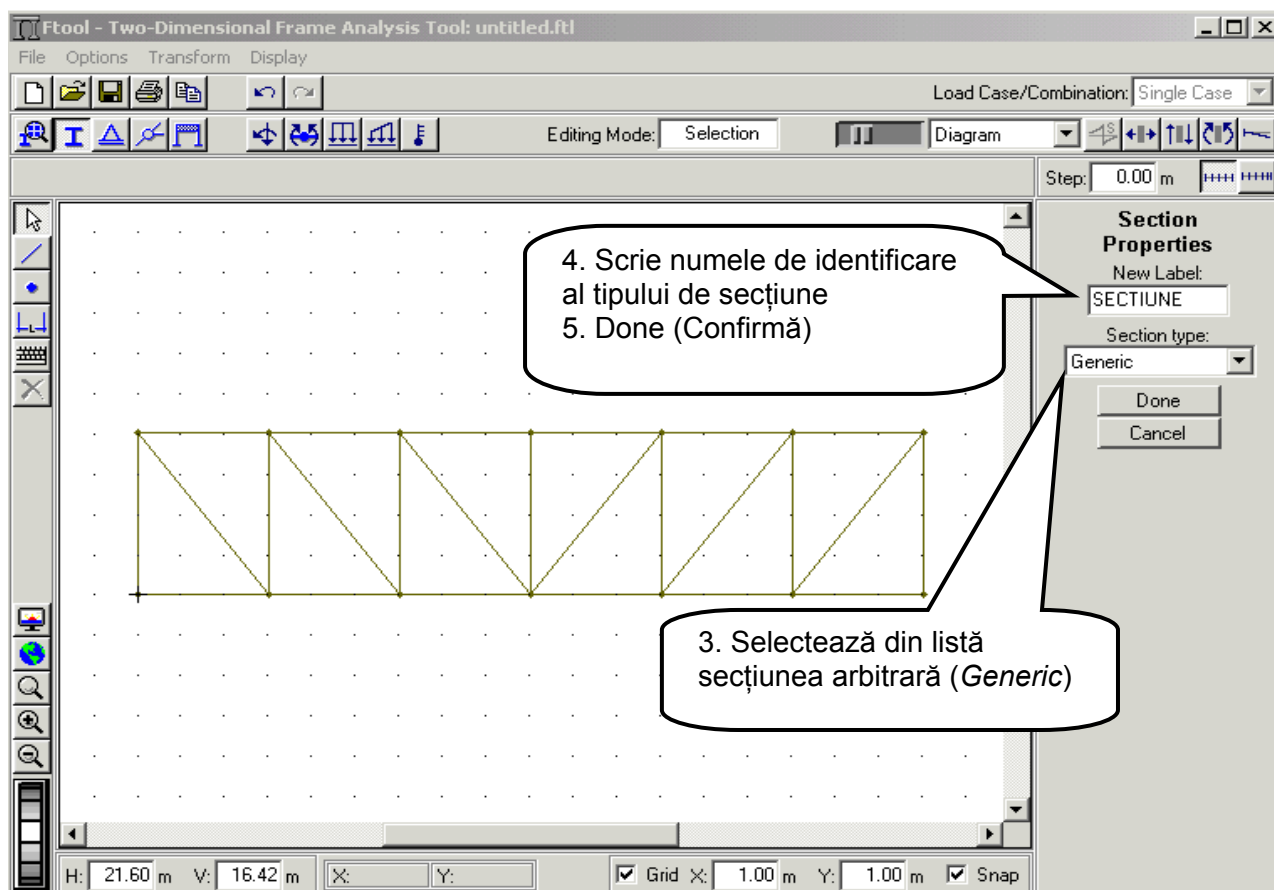


Figura 22.

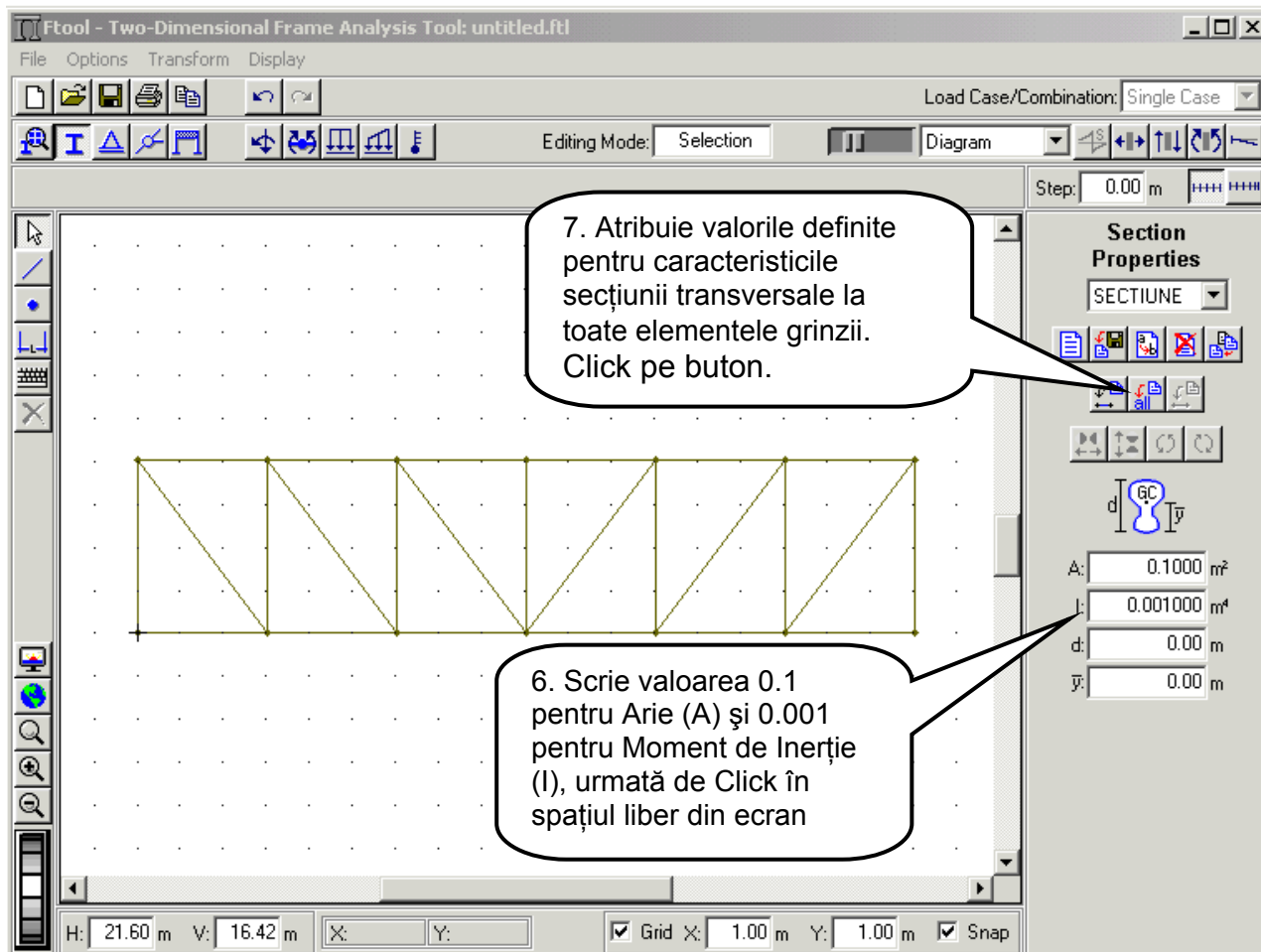


Figura 23.

Condiții de rezemare

Condițiile de rezemare ale structurii se referă la deplasările împiedicate ale punctelor de rezemare, cu componente exprimate în Sistemul Global de axe.

În cazul structurilor plane nodurile structurii dispun de câte trei grade de libertate: translații în raport cu axele **OX** și **OY**, respectiv rotirea în raport cu axa **OZ** (perpendiculară pe planul structurii).

Structura analizată are două puncte de rezemare, nodul 1 unde este prevăzut un reazem articulat și nodul 7, unde este prevăzut un reazem simplu pe direcție verticală.

Prin condițiile de rezemare se vor impune deplasări de tip translații egale cu zero (direcțiile **OX** și **OY**) la nodul 1 și deplasarea pe direcție verticală egală cu zero (direcția **OY**) la reazemul 7. Rotirile sunt libere la cele două puncte de rezemare.

Figurile 24 și 25 prezintă etapele parcurse pentru definirea și atribuirea condițiilor de rezemare la nodurile 1 și 7 ale structurii.

După atribuirea condițiilor de rezemare celor două noduri, programul desenează cele două tipuri de reazeme la nodurile respective.

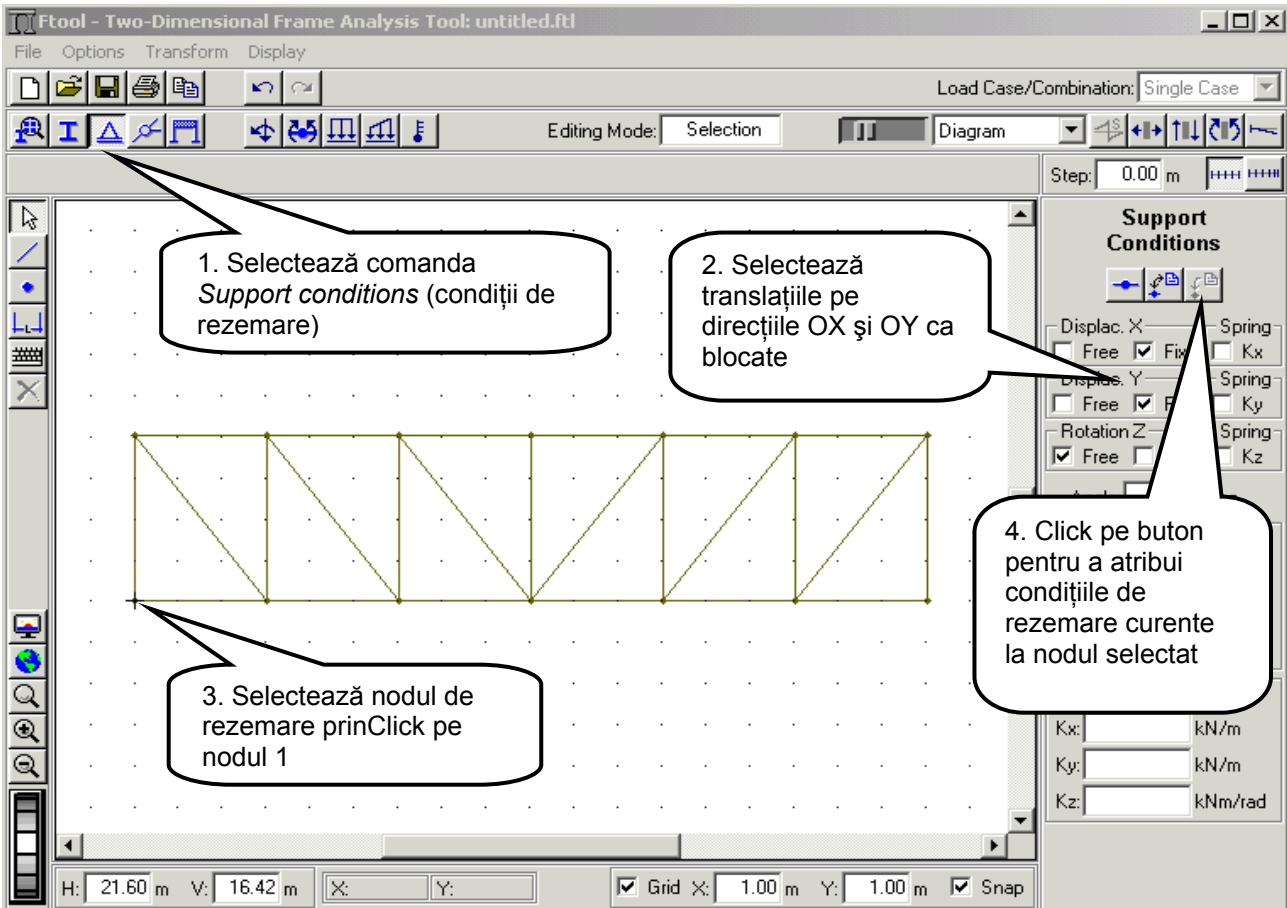


Figura 24.

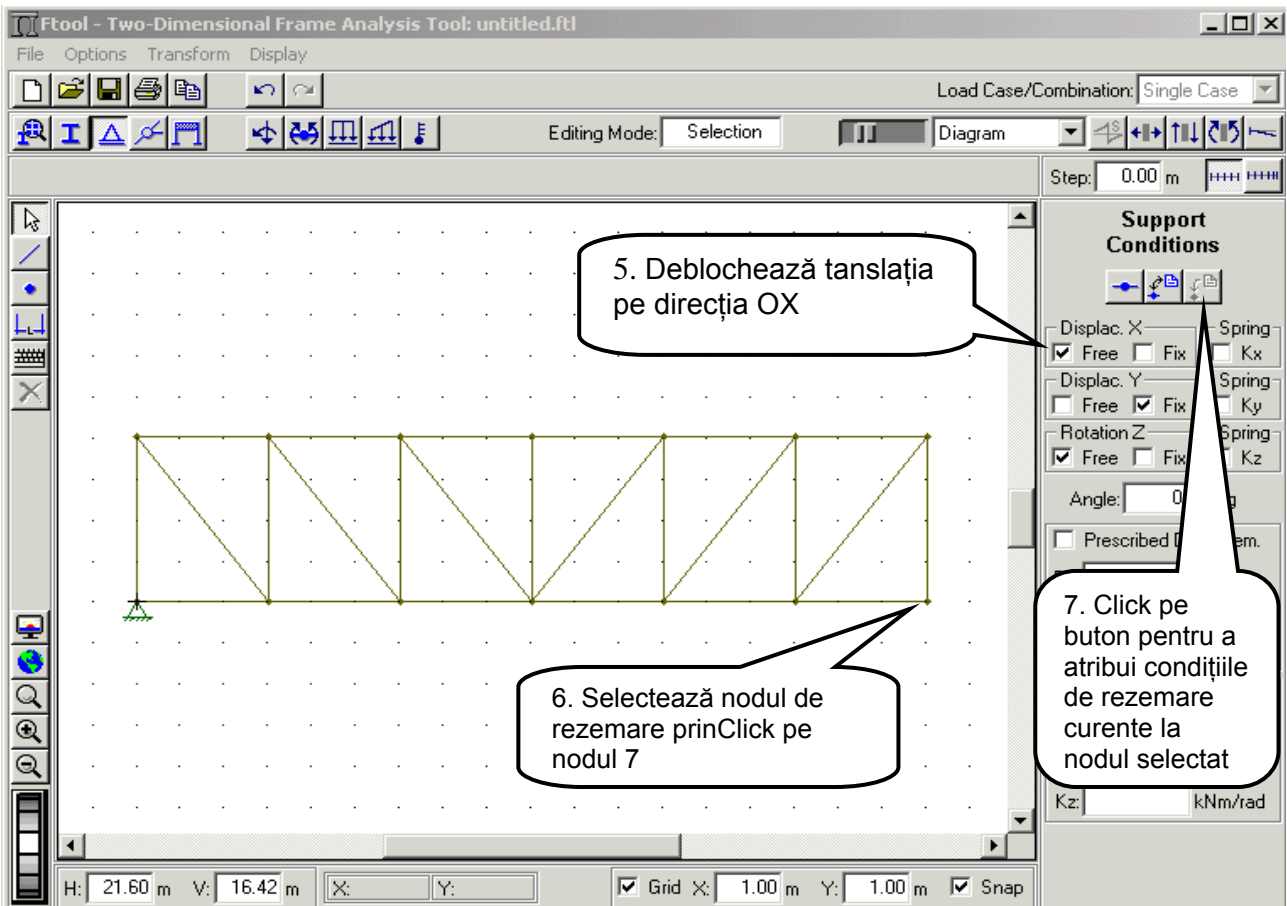


Figura 25.

Suprimare de legături la noduri

În absența altor mențiuni programul FTOOL consideră că elementele modelului sunt conectate rigid la noduri (ipoteza nodurilor rigide).

În situația în care toate elementele sunt conectate la un nod prin legături de tip articulație, cazul grinzilor cu zăbrele, programul permite înlocuirea nodului rigid cu unul articulat.

Structura analizată este o grindă cu zăbrele la care prin ipotezele de calcul se admite că elementele (barele) sunt perfect articulate la nodurile structurii.

Suprimarea de legături pe direcțiile momentelor se realizează apelând la opțiunea *Rotation release* care va deschide submeniul din dreapta ecranului de lucru – vezi Figura 26.

Pentru a insera articulații la capetele elementelor se selectează după caz unul dintre butoanele *Elemente articulate*, se selectează cu cursorul toate elementele la care vor fi șterse legăturile pe direcția momentelor, urmată de comanda de atribuire a tipului de legături ales la elementele selectate – vezi Figura 26.

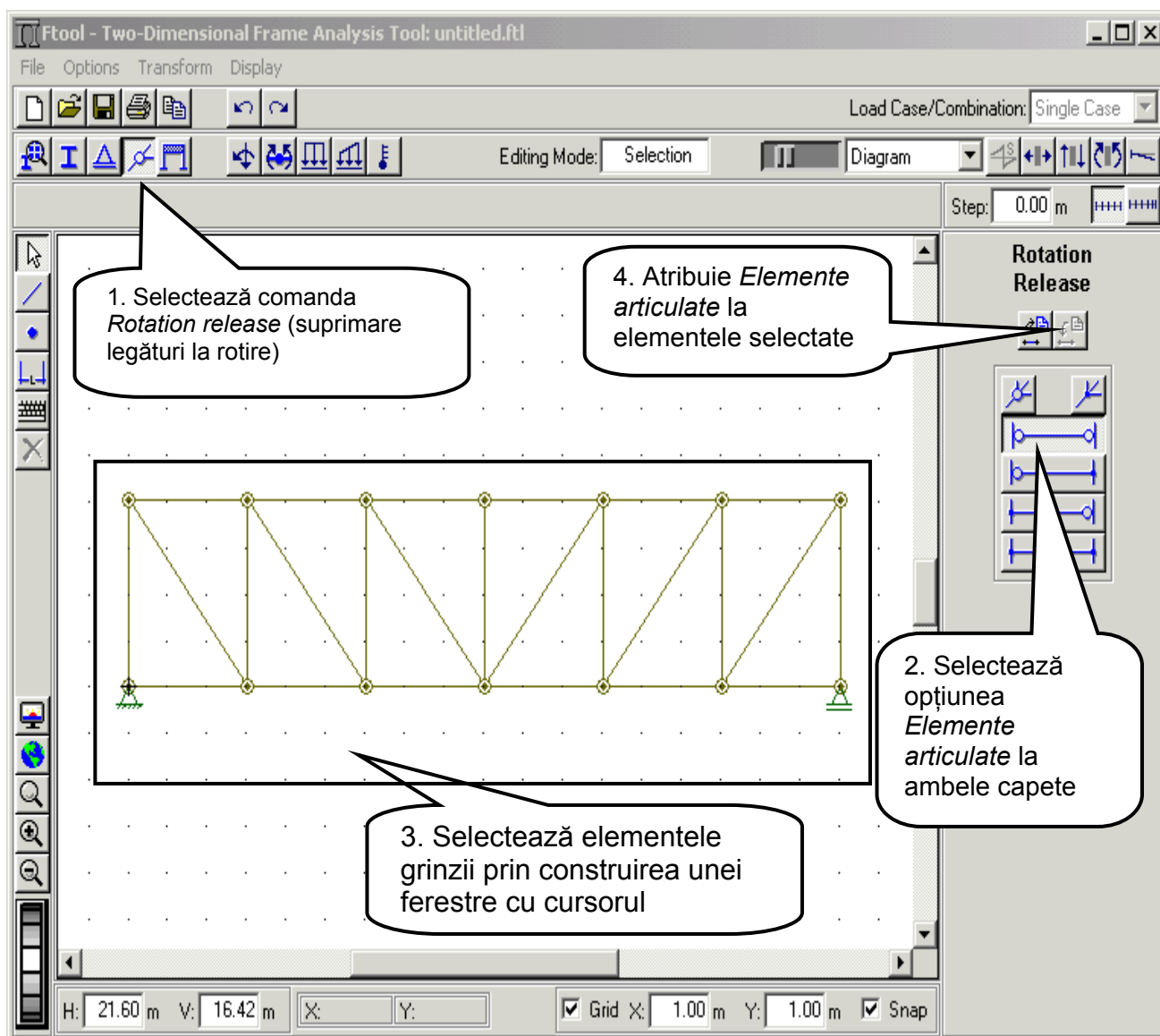


Figura 26.

Definirea și atribuirea încărcărilor

Încărcări concentrate

Forțele concentrate au componente definite în sistemul de axe Global, cu puncte de aplicare la nodurile modelului și sensuri pozitive în direcțiile pozitive ale axelor Globale.

Structura analizată este încărcată cu cinci seturi de forțe concentrate aplicate la nodurile grinzii cu zăbrele – vezi Figura 1.

Prin selectarea comenzii *Nodal forces* se deschide o fereastră în dreapta ecranului de lucru care permite definirea unor seturi de forțe concentrate și ulterior atribuirea acestora la nodurile structurii vezi Figura 27.

Vom denumi cele cinci seturi de forțe concentrate P1, P2, P3, P4, și P5.

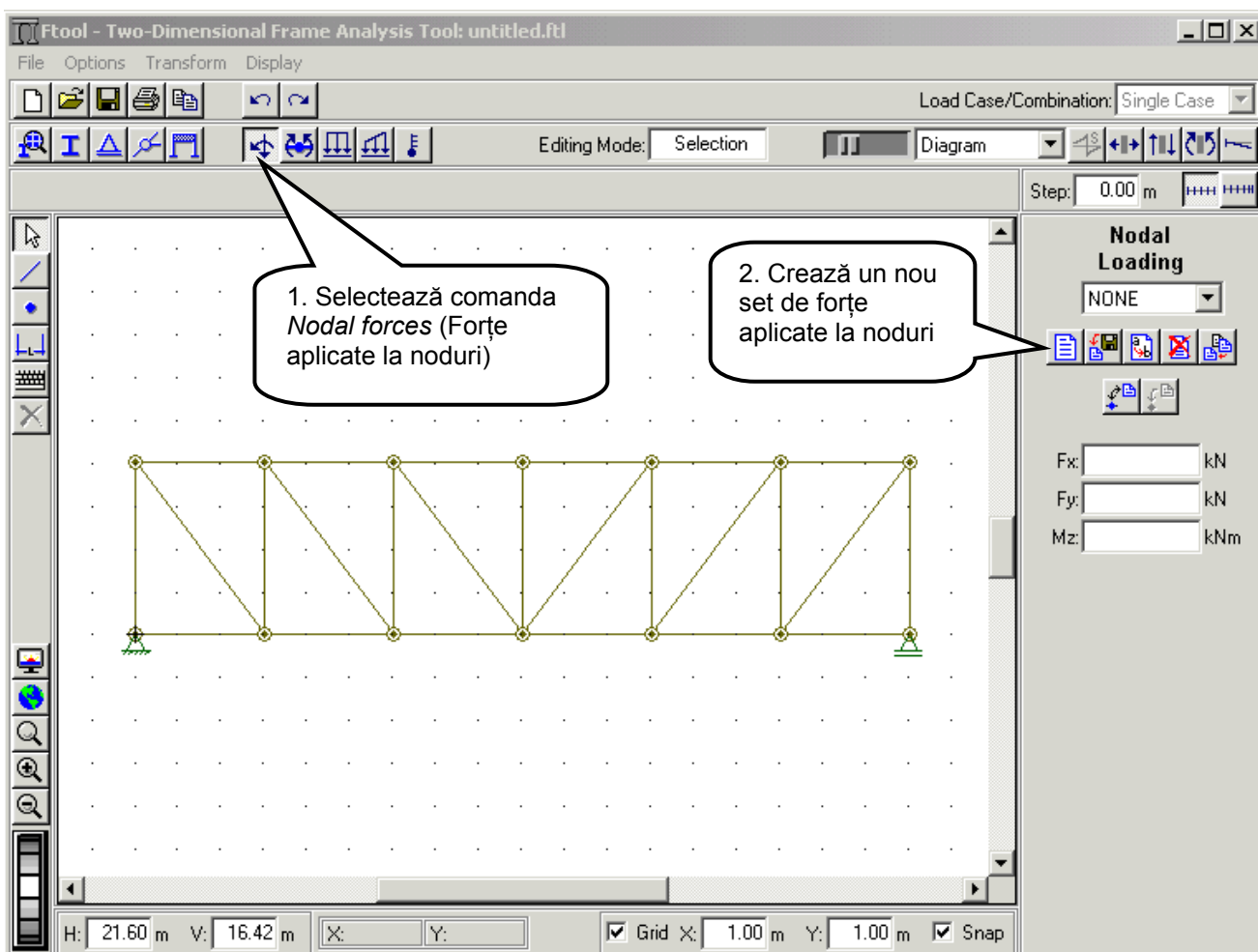


Figura 27.

Figurile 28 și 29 prezintă în detaliu etapele definirii setului de forțe concentrate P1 și a atribuirii acestuia nodului 9 de pe grinda cu zăbrele. Aceste etape vor fi reluate pentru fiecare set de forțe în parte.

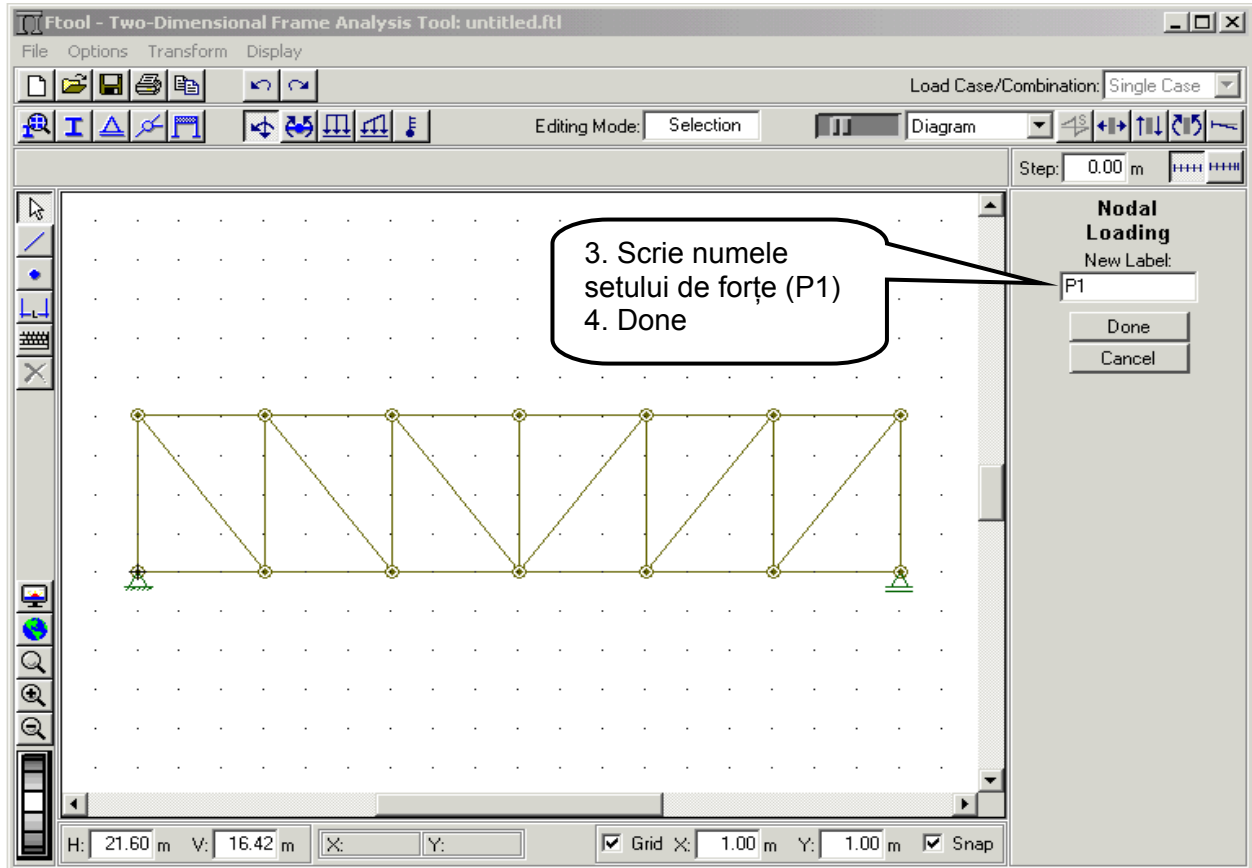


Figura 28.

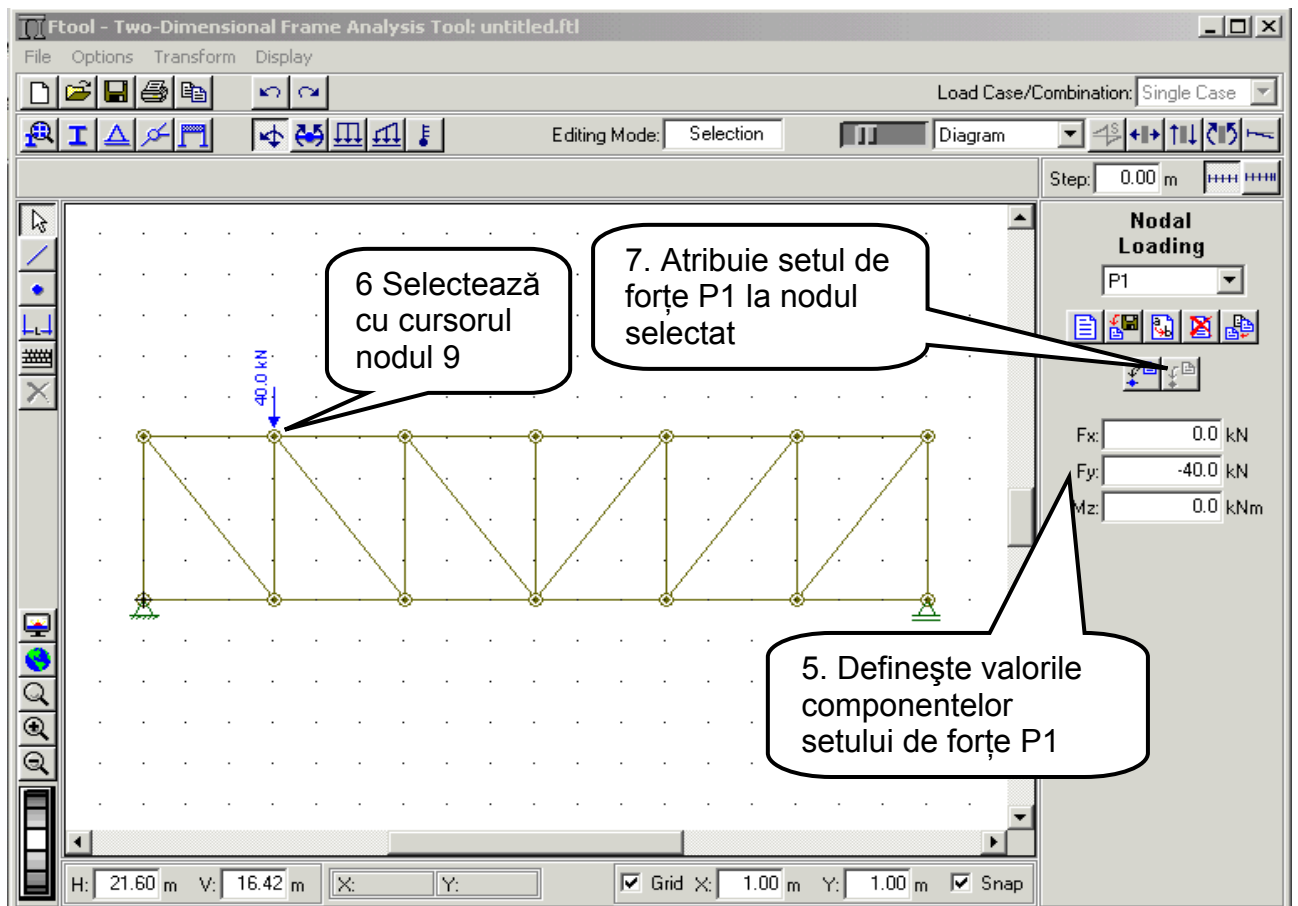


Figura 29.

Procedând similar ca în Figurile 27, 28 și 29 se definesc seturile de forțe concentrare P2, P3, P4, P5 și se atribuie nodurilor corespunzătoare ale grinzii cu zăbrele. După atribuirea setului de forțe P5, ipoteza de încărcare a grinzii cu zăbrele este prezentată în figura 30.

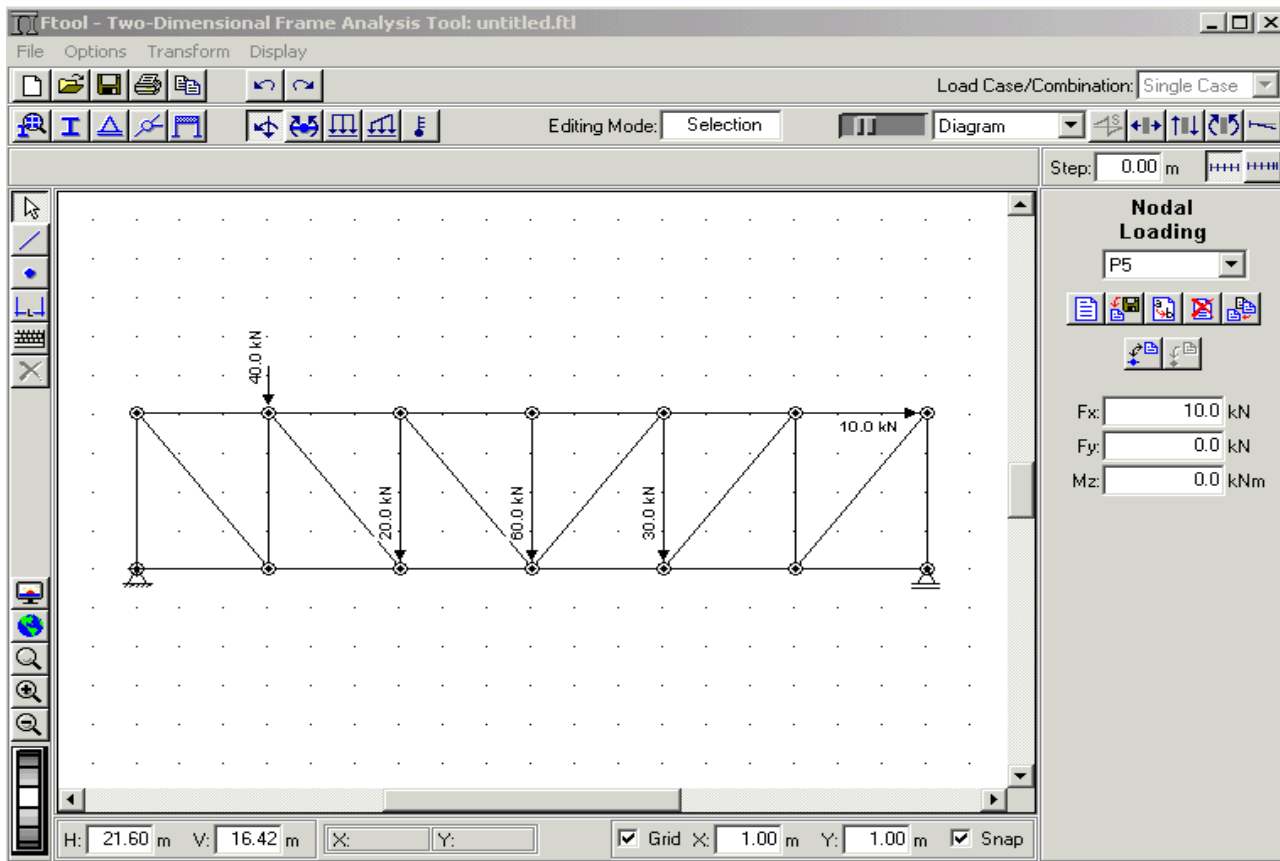


Figura 30.

Modelul de calcul al structurii grinzii cu zăbrele este complet definit și urmează a fi analizat. Modelul obținut se salvează într-un fișier cu numele *Exemplu GR*– vezi Figura 31.

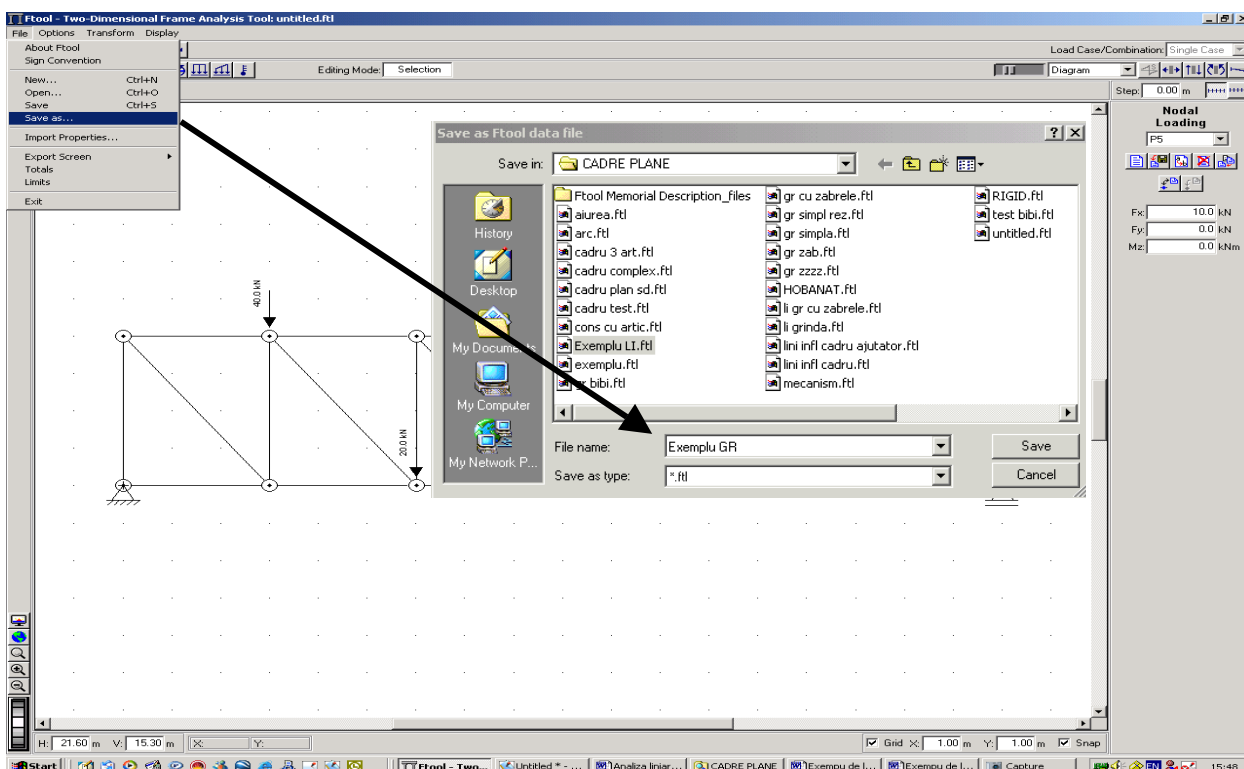


Figura 31.

Generarea rezultatelor analizei

Ca urmare a efectuării analizei liniar elastice, principalele categorii de rezultate sunt: configurația deformată a structurii, diagramele de eforturi secționale – forță axială și linii de influență pentru eforturi axiale în barele grinzii cu zăbrele. Aceste rezultate pot fi obținute atât sub formă grafică cât și ca valori numerice.

Rezultatele prezentate grafic pot fi exportate în diferite formate și importate în documente specifice pachetului MS Office.

a. Configurația deformată a structurii

Formatul în care rezultatele sunt prezentate grafic este controlat prin meniul cu comenzi *Display*. Figura 32 prezintă principalele opțiuni selectate pentru a obține configurația deformată a structurii și valorile reacțiilor, precum și etapele parcurse pentru obținerea acestora.

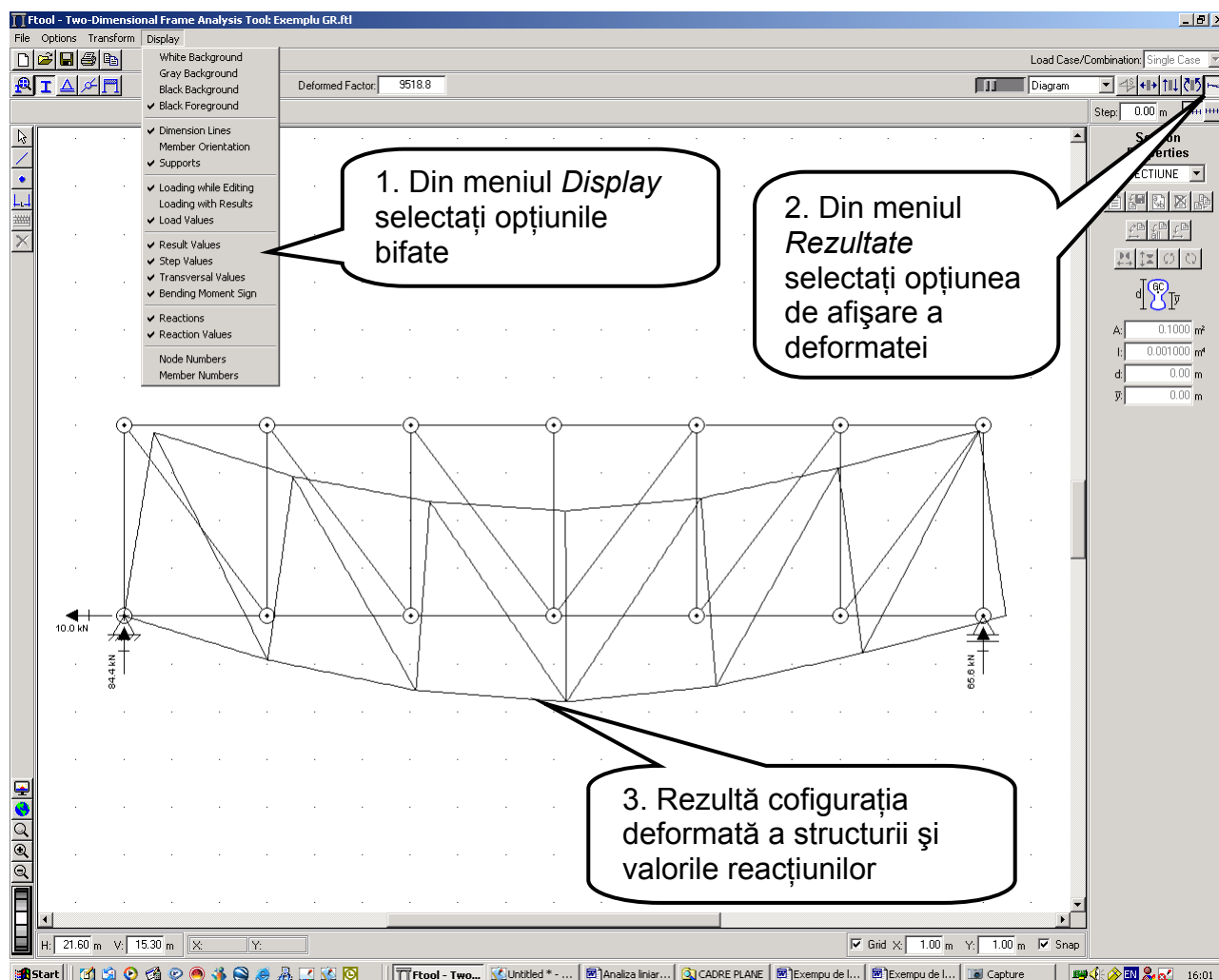


Figura 32.

b. Diagrame de forțe axiale

Convenția de semn pozitiv pentru forța axială este: Forța axială pozitivă = întindere. Pentru reprezentarea grafică a diagramei s-a adoptat convenția: ordonatele pozitive ale diagramei de forță axială sunt desenate deasupra axei de referință a barelor, iar cele negative sub axa de referință.

Figura 33 prezintă diagramele de forță axială pentru toate barele structurii analizată, precum și etapele și opțiunile alese pentru a realiza reprezentarea grafică a acestora.

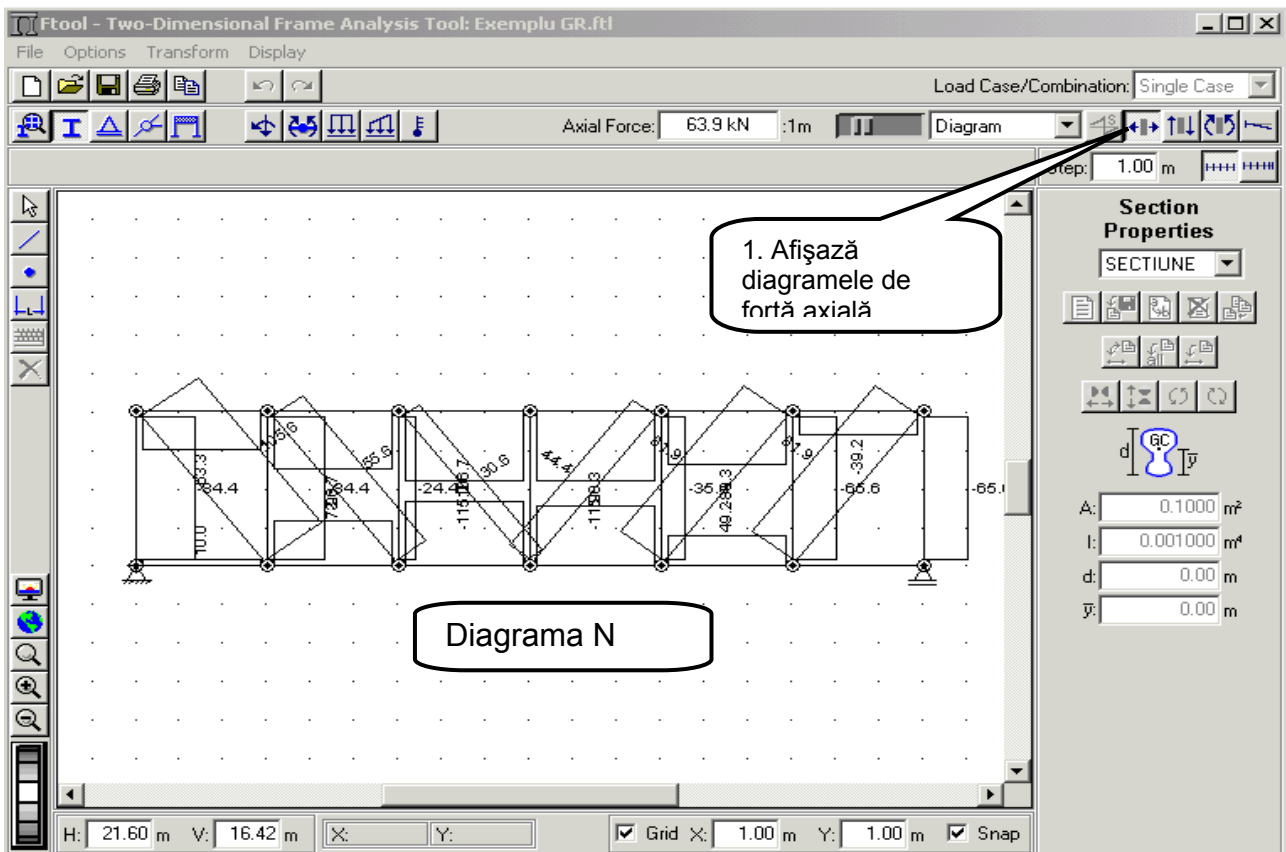


Figura 33.

c. Linii de influență pentru forță axială în barele 3, 5, 7, 16

La selectarea opțiunii de trasare a liniilor de influență, încărcările extrieoare definite anterior vor fi neglijate.

Principalele etape ce trebuie parcurse pentru trasarea liniilor de influență ale eforturilor axiale în barele grinzii cu zăbrele au fost descrise în detaliu în Exemplu de utilizarea a programului FTOOL – Linii de influență.

Figurile 34 la 37 prezintă principalele opțiuni selectate pentru a obține forma grafică a liniilor de influență și valorile ordonatelor acestora.

Este de menționat că programul nu permite definirea liniilor de încărcare și în consecință forma grafică a liniilor de influență conține și ordonate pentru bare care nu fac parte din linia de încărcare, cum sunt diagonalele și montanții. Este responsabilitatea utilizatorului de a selecta acele ordonate care aparțin efectiv liniei de încărcare (cale sus sau cale jos).

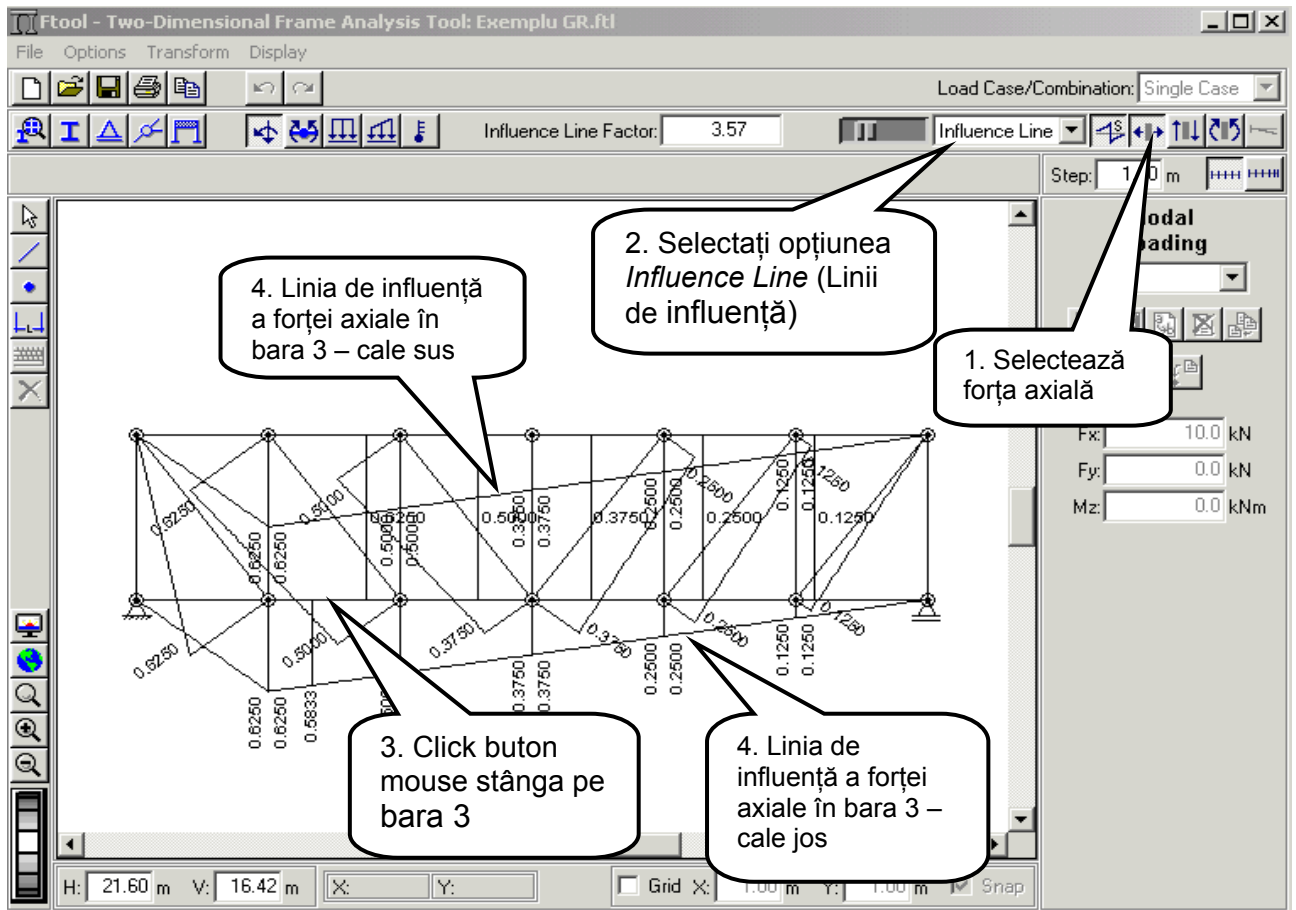


Figura 34.

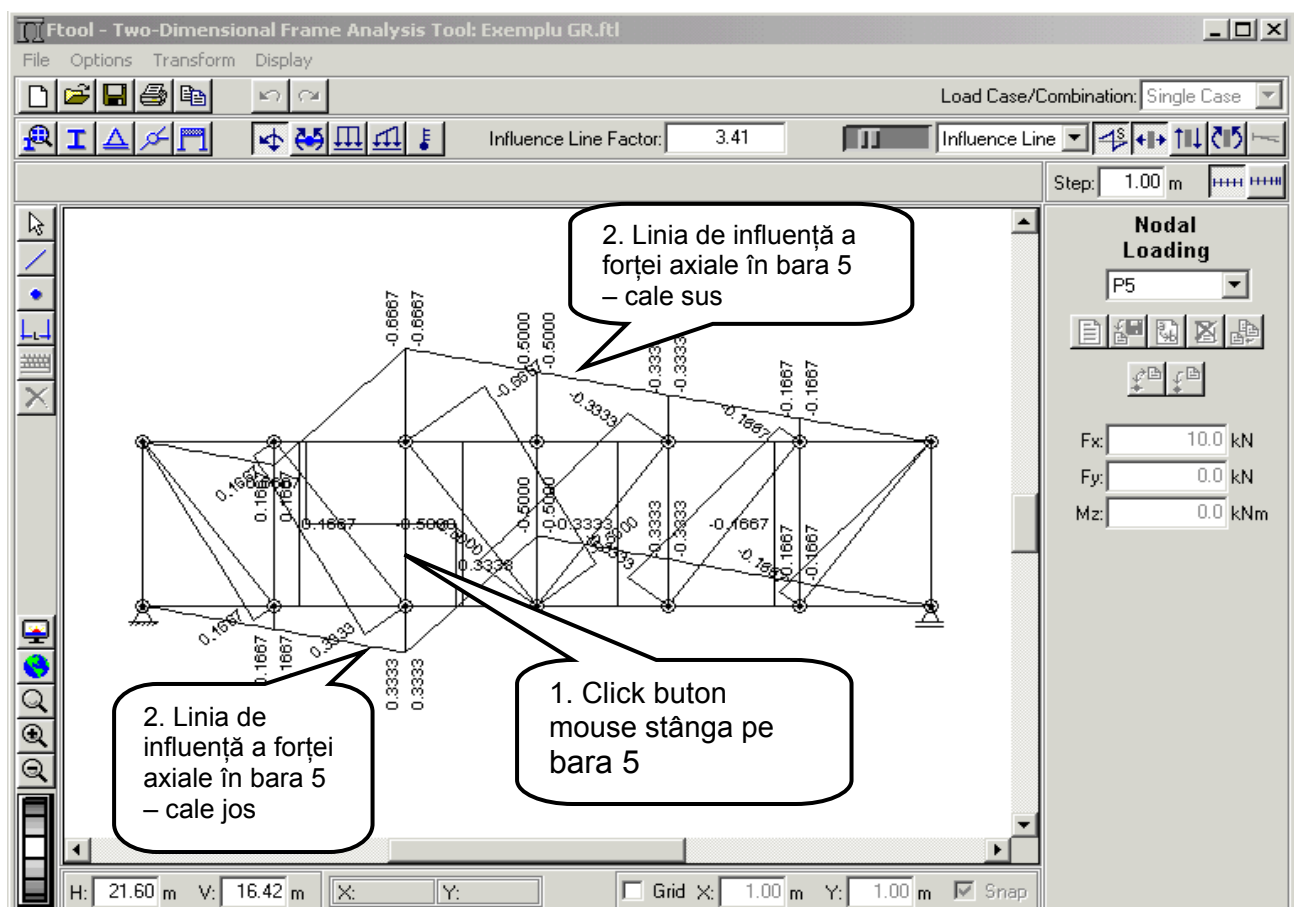


Figura 35.

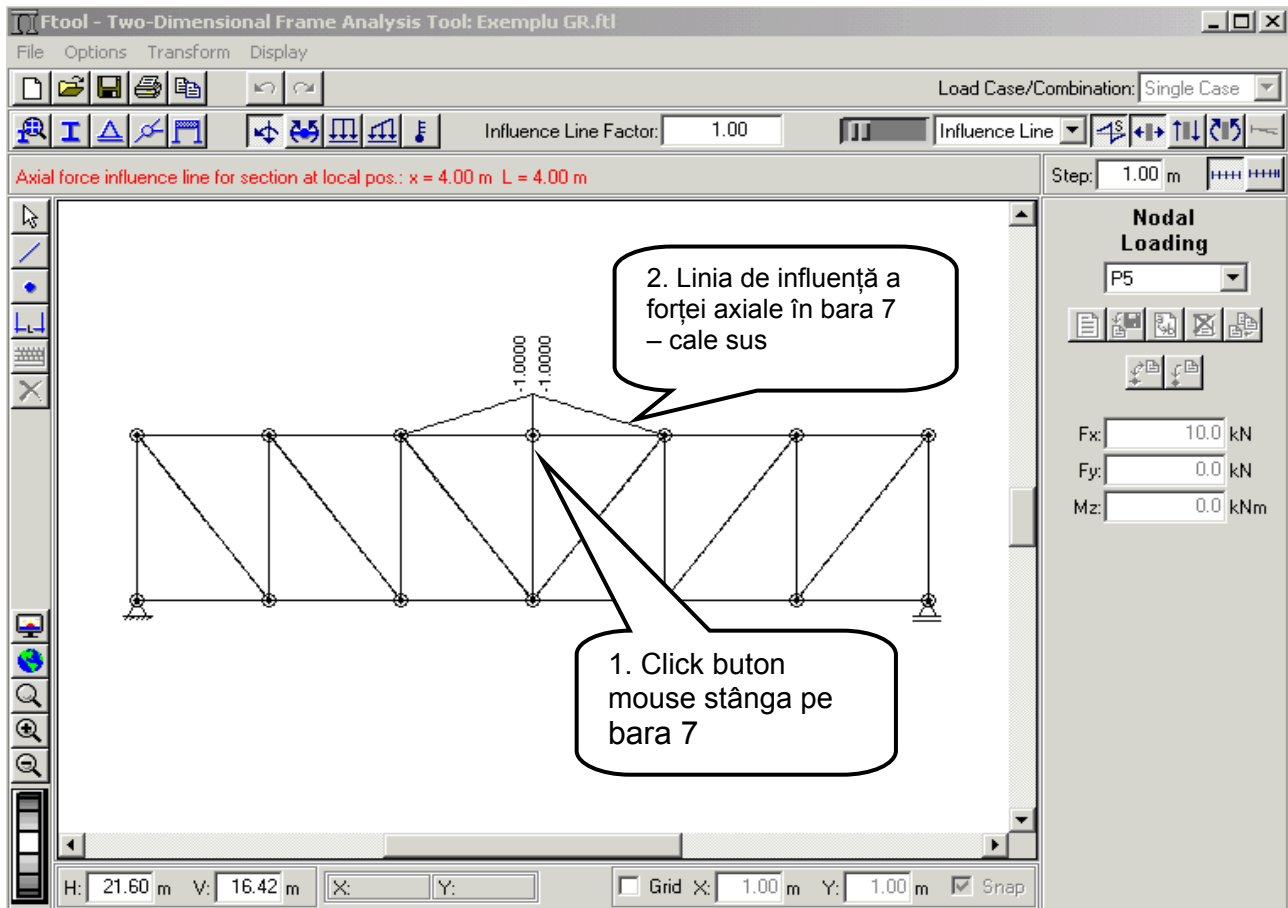


Figura 38.

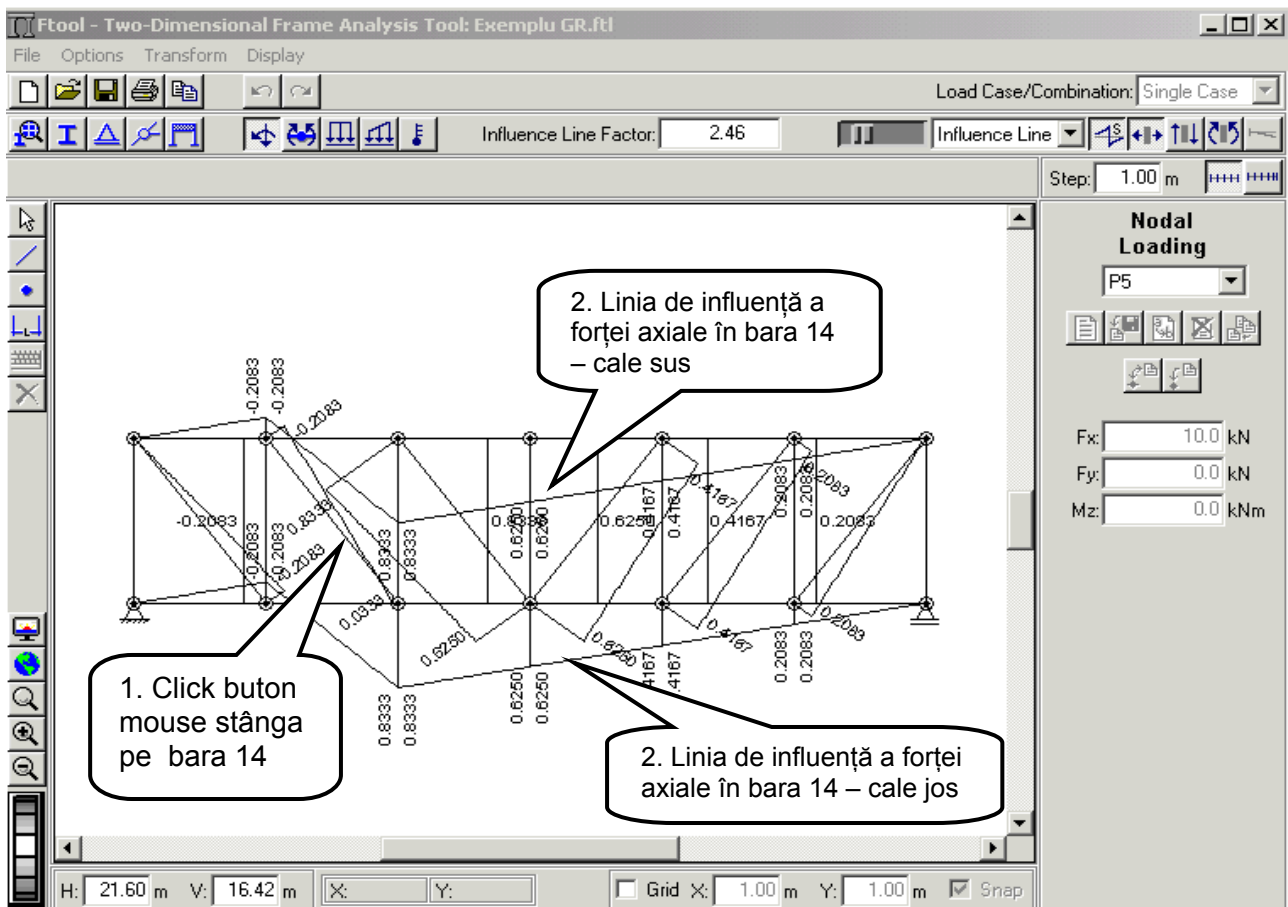


Figura 37.