MODELAREA 3D A PODURILOR, O SOLUȚIE MODERNĂ PENTRU IDENTIFICAREA DEFECTELOR ȘI ANALIZA DETALIATĂ A ACESTORA

Ing. Florin Haralambe[1]
Ing. Teodor Gabriel Brașov[1]
Ing. Mihai Marian Negoiță[1]

Progresul tehnologiei permite realizarea modelelor 3D ale podurilor pe baza fotogrametriei aeriene. Aceste modele permit analizarea structurii cu ușurință, inclusiv în zonele greu accesibile. Modelele realizate la diferite intervale de timp pot fi utilizate pentru urmărirea evoluției degradărilor structurii în timp.
Lucrarea prezintă utilizarea fotogrametriei aeriene cu dronă pentru realizarea unui model 3D al podului de pe DN5 peste râul Argeș (la Adunații Copăceni), în scopul evaluării detaliate a structurii și a comportării acestuia. Podul analizat are aproximativ 260 m lungime și o structură mixtă oțel–beton.
Fotografierea aeriană a fost realizată cu o dronă echipată cu receptor GNSS RTK, asigurând georeferențierea centimetrică a imaginilor. Planul de zbor fotogrammetric a inclus rute transversale și longitudinale, cu camera orientată nadiral (90°) și oblic (~45°), asigurând o suprapunere de peste 70% între cadre, pentru acoperirea completă a structurii din unghiuri diferite. Suplimentar, au fost captate imagini detaliate ale fațadelor laterale ale podului (printr-un zbor ascendent în zig-zag de-a lungul uneia dintre laturi) și ale părților inferioare (intradosul tablierului și al pilelor, prin zbor manual sub pod), astfel încât toate componentele structurale să fie fotografiate. În teren au fost amplasate, de asemenea, marcaje pentru punctele de control (GCP – Ground Control Points), cu coordonate determinate cu precizie prin GPS, utilizate ulterior la calibrarea modelului.
Datele colectate (câteva sute de fotografii) au fost prelucrate cu ajutorul unui software specializat (Agisoft Metashape Professional). Pașii de procesare au constat în: alinierea fotografiilor (generarea unui nor de puncte inițial), densificarea norului de puncte (obținerea unui nor dens care descrie geometria detaliată a structurii), generarea modelului poligonal 3D (mesh) al podului și aplicarea texturii fotografice pe suprafața acestuia. Modelul 3D rezultat este realist, detaliat și referențiat într-un sistem de coordonate real, permițând realizarea unor analize cantitative și calitative.

Advances in technology make it possible to create 3D models of bridges based on aerial photogrammetry. These models facilitate the analysis of structural elements, including those located in hard-to-access areas. Models generated at different time intervals can also be used to monitor the progression of structural deterioration over time.
This paper presents the use of drone-based aerial photogrammetry to develop a 3D model of the bridge carrying National Road DN5 over the Arges River (at Adunatii Copaceni), with the objective of performing a detailed assessment of its structure and behavior. The analyzed bridge is approximately 260 m long and has a composite steel–concrete structure.
The aerial survey was conducted using a drone equipped with an RTK GNSS receiver, ensuring centimeter-level georeferencing accuracy of the images. The photogrammetric flight plan included both transverse and longitudinal flight paths, with the camera oriented in nadir (90°) and oblique (~45°) positions, providing more than 70% overlap between images and ensuring complete coverage of the structure from multiple viewing angles. In addition, detailed images of the bridge side elevations were captured through an ascending zigzag flight along one side of the bridge, while images of the underside (deck intrados and piers) were acquired through manual flights beneath the bridge. This approach ensured that all structural components were photographed. Ground Control Points (GCPs) were also

1) Centrul de Studii Tehnice Rutiere și Informatică (tel. 021.317.11.20, e-mail. office@cestrin.ro)

established on site and surveyed using high-accuracy GPS measurements, providing reference coordinates for subsequent model calibration.
The collected data, consisting of several hundred photographs, were processed using specialized software (Agisoft Metashape Professional). The processing workflow included photo alignment (generation of an initial point cloud), point cloud densification (creation of a dense point cloud representing the detailed geometry of the structure), generation of a 3D polygonal model (mesh) of the bridge, and application of photographic textures. The resulting 3D model is realistic, highly detailed, and georeferenced within a real-world coordinate system, enabling both quantitative and qualitative analyses.

Cuvinte cheie: FOTOGRAMETRIE AERIANĂ, MODEL 3D, RECEPTOR GNSS RTK, DRONA, NOR DE PUNCTE.

1. INTRODUCERE

Infrastructura rutieră, în special podurile, necesită monitorizare structurală periodică pentru a asigura siguranța circulației și identificarea timpurie a eventualelor defecțiuni. Pe măsură ce multe poduri existente se apropie de limita duratei de serviciu proiectate, metodele tradiționale de inspecție devin adesea ineficiente, costisitoare și pot implica riscuri semnificative pentru echipele de inspectori (lucrul la înălțime, interferența cu traficul etc.). În acest context, fotogrametria aeriană cu ajutorul dronelor s-a impus ca o soluție modernă și eficientă pentru evaluarea stării podurilor, oferind posibilitatea generării de modele 3D detaliate ale structurilor. O astfel de abordare permite colectarea rapidă de date vizuale din multiple unghiuri și crearea unui „geamăn digital" al podului, care poate fi examinat în detaliu în mediul virtual. Imaginile oblice (realizate la un unghi de ~45° față de verticală) surprind nu doar partea superioară a tablierului, ci și fețele laterale ale elementelor structurale, furnizând informații bogate, ce nu pot fi obținute din fotografii aeriene strict verticale.

Figura 1 – Drona DJI Phanthom 4 RTK

Lucrarea de față prezintă metodologia de realizare a unui model 3D al podului de pe DN5 peste râul Argeș, la Adunații Copăceni, folosind o dronă echipată cu sistem GNSS RTK și tehnici de fotogrametrie oblică. Podul studiat are aproximativ 260 m lungime și o structură mixtă (elemente din oțel și beton armat). Scopul modelării 3D a fost obținerea unei documentații digitale detaliate asupra geometriei podului, în vederea determinării săgeții acestuia (deformația verticală sub încărcare, care nu este vizibilă cu ochiul liber) și a identificării eventualelor defecte sau degradări ale structurii.

2. METODOLOGIA DE REALIZARE A MODELULUI 3D

Captarea datelor aeriene:
Pentru colectarea datelor, s-a utilizat o dronă dotată cu receptor GNSS în modul RTK, care a înregistrat poziția fiecărei fotografii cu o precizie de ordinul centimetrilor [2]. De asemenea, în jurul podului au fost amplasate mai multe puncte de control la sol (Ground Control Points – GCP) [2], materializate prin markeri vopsiți, ale căror coordonate au fost determinate cu un receptor GPS de înaltă precizie; aceste repere au fost ulterior folosite în procesarea fotogrammetrică pentru calibrarea și creșterea acurateței modelului 3D obținut.
Zborurile fotogrametrice au fost planificate astfel încât să asigure o acoperire completă a podului din toate unghiurile relevante. S-au efectuat mai multe misiuni de zbor distincte:

- Zbor transversal oblic [2] – un set de rute de zbor perpendiculare pe axul podului, cu camera dronei înclinată ~45° față de verticală, pentru a captura structura din lateral și de sus simultan. Aceste imagini suprapuse asigură acoperirea întregii lungimi a podului într-o direcție transversală.
- Zbor longitudinal oblic [2] – un set de rute de zbor de-a lungul podului (paralel cu axul acestuia), realizate tot cu camera la 45°, pentru a surprinde detalii de-a lungul direcției de mers. Împreună, zborurile transversal și longitudinal creează un grid de imagini oblice care surprind podul din perspective ortogonale diferite.
- Zbor lateral „piramidă” [2] – o misiune de zbor automat realizată de-a lungul uneia dintre lateralele podului, în care drona a parcurs întreaga lungime a podului la o altitudine joasă, apoi a revenit în sens opus la o altitudine puțin mai mare și a repetat procesul în mai multe „straturi”. Prin acest zbor în zig-zag ascendent s-au capturat imagini detaliate ale fațadei laterale a podului, de la nivelul apei până la nivelul tablierului, cu suprapuneri suficiente între benzi pentru reconstrucția 3D fidelă.
- Fotografierea substructurii [2]– zonele de sub pod, precum intradosul tablierului și pilele (picioarele podului), au fost fotografiate manual prin zboruri controlate sub tablier, astfel încât elementele structurale inferioare (grinzi, aparate de reazem, infrastructura) să fie și ele documentate vizual.

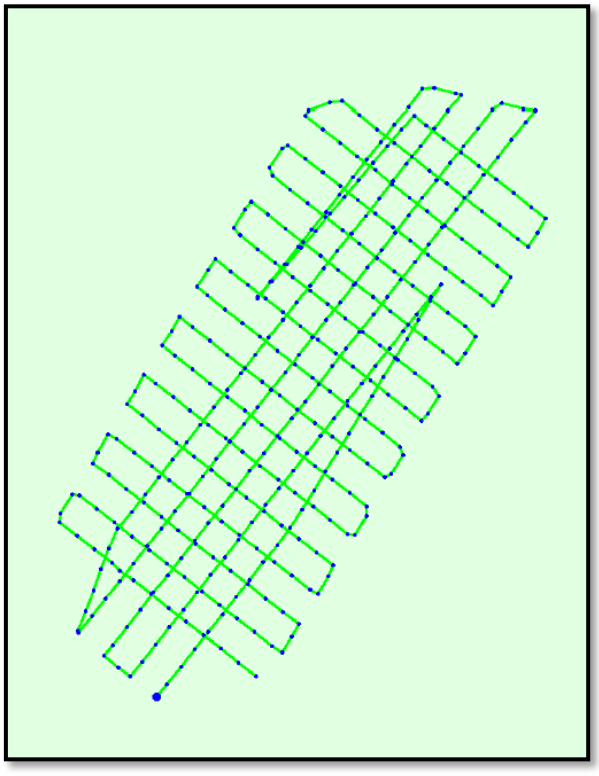

Figura 2 – Vedere de sus a poziției fotografiilor realizate

Prelucrarea datelor și generarea modelului 3D:
Fotografiile obținute au fost ulterior procesate utilizând software-ul Agisoft Metashape Professional, parcurgând etapele standard ale reconstrucției fotogrammetrice.
Pașii de procesare au fost:

- ✓ Alinierea fotografiilor (*Align Photos*) [1] – software-ul detectează puncte omologe în imagini și calculează pozițiile relative ale camerelor, generând un nor de puncte dispersat (sparce) ce schițează structura podului.
- ✓ Construirea norului dens de puncte (*Build Dense Cloud*) [1] – pe baza aliniamentului inițial se generează un nor de puncte dens, mult mai detaliat, care modelează cu precizie suprafețele podului.
- ✓ Construirea modelului poligonal (Mesh) (*Build Mesh*) [1] – norul dens este folosit pentru a crea o plasă poligonală tridimensională (rețea de triunghiuri) ce reprezintă geometria continuă a podului (tablier, grinzi, piloni etc.).
- ✓ Aplicarea texturii (*Build Texture*) [1] – fotografiile originale sunt proiectate pe suprafața modelului 3D sub forma unei texturi fotorealiste, conferind modelului detalii vizuale de înaltă rezoluție.

În urma acestor pași, s-a obținut un model 3D digital complet al podului, georeferențiat în sistem de coordonate real, cu textură realistă, care reproduce fidel geometria și starea suprafețelor structurii la momentul scanării, precum și otomozaicul și modelul digital al terenului (DMS).

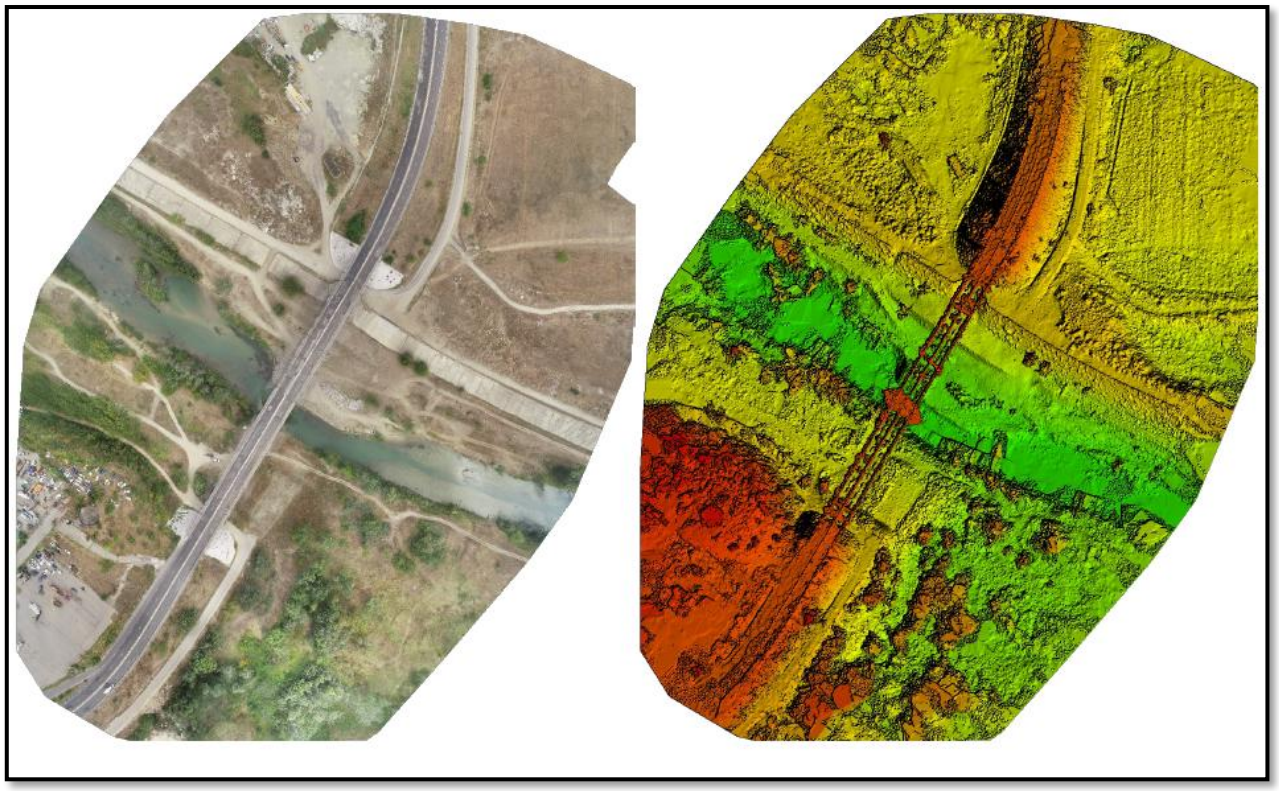

Figura 3 – Otomozaic si modelul digital al terenului (DSM)

Figura 4 – Model 3D pod – vedere din amonte

Figura 5 – Model 3D pod – vedere din aval

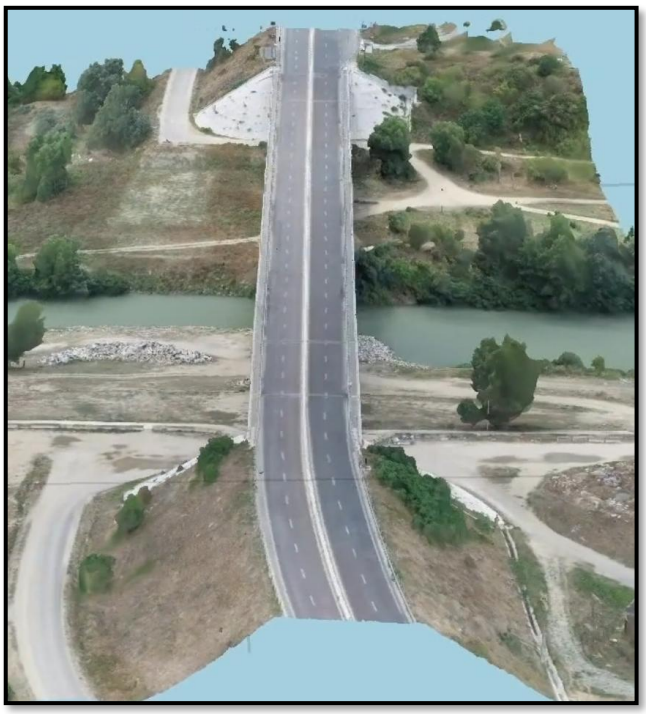

Figura 6 – Model 3D pod vedere dinspre București

Figura 7 – Model 3D pod vedere dinspre București

Modelul tridimensional al podului astfel generat oferă o bază bogată pentru analize cantitative și calitative asupra structurii.
Din model se pot deriva produse topografice și inginerești, precum:

- ✓ Curbe de nivel și modele digitale – folosind norul dens de puncte se poate extrage un model digital al suprafeței (DSM) pentru pod și zona adiacentă, din care se pot genera curbe de nivel ce evidențiază profilul longitudinal și transversal al tablierului.
- ✓ Secțiuni și măsurători dimensionale – modelul permite realizarea de secțiuni prin orice plan (longitudinal, transversal) pentru a verifica gabaritele și forma structurală. De asemenea, se pot măsura direct pe model distanțe (lungimi de elemente, deschideri, grosimi), arii (de exemplu suprafața carosabilă a podului sau a elementelor structurale) și chiar volume ale elementelor reprezentate. Aceste măsurători se realizează cu ușurință în software, având precizia asigurată de scalarea corectă a modelului.
- ✓ Analiza deformațiilor – unul dintre obiectivele cheie ale proiectului a fost determinarea săgeții podului, adică a deformației verticale a tablierului sub încărcare. Prin compararea modelului 3D al podului (ce reflectă geometria actuală, sub acțiunea încărcărilor din trafic) cu geometria teoretică (proiectată) sau cu modele similare obținute la momente diferite, se poate cuantifica deplasarea sau rotirea elementelor. Deși aceste deformații sunt în general de ordinul centimetrilor sau milimetrilor – deci invizibile ochiului liber – metoda fotogrametrică le poate detecta și măsura, așa cum indică comparația dintre modelul 3D și măsurători tradiționale (ex. traductoare de deplasare), care arată diferențe sub 1 mm.
- ✓ Inspectarea stării suprafețelor – modelul 3D texturat oferă posibilitatea examinării vizuale de aproape a fiecărui element al podului. Defecte precum fisuri în beton, exfolieri ale stratului de protecție, zone de coroziune ale metalului sau deplasări ale elementelor pot fi identificate și localizate pe model prin inspecție virtuală. Utilizarea dronelor pentru inspecția structurilor civile s-a dovedit eficientă, în special pentru identificarea deteriorărilor structurale, iar în cazul de față modelul 3D al podului permite evidențierea acestor probleme fără a fi necesar accesul direct al inspectorilor în zone dificile.

Prin intermediul acestor aplicații, modelul 3D al podului de la Adunații Copăceni devine un instrument util pentru ingineri și administratorii infrastructurii: el poate fi folosit atât pentru evaluarea capacității portante (analizând săgeata sub sarcină și eventualele deformații permanente), cât și pentru planificarea lucrărilor de reabilitare (localizând zonele cu defecte ce necesită intervenție) sau pentru monitorizarea în timp a comportării structurii (comparând modele succesive ale podului, obținute la intervale diferite).

3. CONCLUZII

Studiul realizat demonstrează avantajele utilizării dronelor și fotogrametriei 3D în domeniul inspecției podurilor. Metoda aplicată pentru podul de peste Argeș (DN5 Adunații Copăceni) a permis obținerea rapidă a unui model digital detaliat, evidențiind caracteristici structurale care ar fi fost dificil de observat prin inspecție vizuală directă.
Comparativ cu tehnicile convenționale, inspecția aeriană cu drone reduce drastic timpul, costurile și efortul necesar inspectării unui pod, precum și riscurile pentru personalul implicat. Metoda propusă reprezintă o abordare modernă de inspecție, care oferă avantaje semnificative față de procedeele tradiționale, datorită colectării rapide de date detaliate fără a perturba traficul.
În același timp, precizia ridicată a rezultatelor (asigurată prin integrarea sistemului RTK și a punctelor de control) face ca informațiile extrase – de la măsurători geometrice până la identificarea defectelor – să poată sta la baza deciziilor inginerești.
Modelarea 3D a podurilor prin fotogrametrie UAV reprezintă, așadar, o unealtă modernă și valoroasă pentru gestionarea infrastructurii de transport. Un astfel de model poate fi arhivat și actualizat periodic, permițând monitorizarea evoluției stării structurii de la o inspecție la alta.
Pe măsură ce tehnologia dronelor și a software-ului fotogrammetric evoluează, este de așteptat ca aceste metode să devină parte integrantă a programelor de monitorizare structurală și întreținere preventivă a podurilor, completând metodele clasice de inspecție.
Pe baza modelului, se pot extrage curbe de nivel, secțiuni și măsura direct distanțe, suprafețe sau volume. Modelul a permis determinarea săgeții podului – deformarea verticală a tablierului sub încărcare – un parametru invizibil ochiului liber, evidențiind astfel comportarea structurală reală. De asemenea, modelul texturat facilitează identificarea defectelor de suprafață (fisuri, coroziune, exfolieri) prin inspecția vizuală detaliată a elementelor, fără a necesita acces fizic direct la structura podului.
În concluzie, fotogrametria cu drone s-a dovedit o soluție eficientă și precisă pentru monitorizarea podurilor, oferind un „geamăn digital” al structurii ce poate fi examinat din orice unghi. Metoda reduce semnificativ timpul și riscurile față de inspecțiile tradiționale, furnizând totodată date bogate necesare analizelor structurale și deciziilor de întreținere.

REFERINȚE

[1] Agisoft LLC (2024). Agisoft Metashape Professional User Manual.
[2] DJI (2018). DJI Phantom 4 RTK Technical Specifications and User Guide.