

# NUMERICAL SIMULATION OF A SINKING SHIP SCENARIO BASED ON ARCHAEOLOGICAL RECORDS

## NUMERIČKA SIMULACIJA POTONUĆA BRODA NA TEMELJU ARHEOLOŠKIH ZAPISA

SMILJKO RUDAN

University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture  
*Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje*  
Ulica Ivana Lučića 5  
HR-10002 Zagreb  
srudan@fsb.hr

IRENA RADIĆ ROSSI

University of Zadar, Department of Archaeology  
*Sveučilište u Zadru, Odjel za arheologiju*  
Obala kralja Petra Krešimira IV., 2.  
HR-23000 Zadar  
irradic@unizd.hr

---

UDK: 902.3.034

DOI: 10.15291/archo.3393

ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER / IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Received / Primljeno: 2020-04-09

---

**KEY WORDS:**

*ship, shipwreck scenario,  
numerical modelling,  
simulation, amphorae,  
virtual reconstruction*

*Over the past decade, photogrammetric recording and virtual 3D modelling have evolved as a standard practice in documenting shipwreck sites. Exploiting the same methods, we can attempt to virtually reconstruct the dynamics of an accident leading to the creation of an archaeological site. By applying modern engineering tools capable of deploying multi-body system dynamics to simulate the damaging, capsizing and/or sinking of a ship, we can model and analyse the various possible scenarios of an incident occurring to an ancient merchantman. Subsequently, we can establish the correlation between the characteristics of the actual shipwreck site, and the outcome of the numerical simulation of the assumed scenario.*

**KLJUČNE RIJEČI:**

*brod, tijek brodoloma,  
numeričko modeliranje,  
amfore, virtualna  
rekonstrukcija*

*Proteklog desetljeća uvriježila se praksa fotogrametrijskog snimanja i izrade virtualnih 3D modela pri dokumentiranju nalazišta brodoloma. Tim tehnikama moguće je prikupiti podatke koji omogućuju rekonstrukciju dinamike havarije koja je dovela do nastanka arheološkog nalazišta. Primjenjujući suvremene tehničke alate, moguće je analizirati ponašanje plovila na moru, pojavu oštećenja na trupu broda ili prodora vode u brod, njegovo prevrtanja i/ili potonuće, te analizirati različite pretpostavljene tijekom nesreće koja je snašla drevne trgovce. U konačnici, moguće je utvrditi suodnos i podudaranje karakteristika postojećeg nalazišta brodoloma i ishoda numeričke simulacije pretpostavljenog tijeka nesreće.*

## INTRODUCTION

Shipwreck sites are among the most frequent underwater discoveries and are found in various states of preservation. The term *shipwreck*, as applied by maritime archaeologists, often encompasses any incident which brought to the seabed part or the whole of a ship's cargo. On the other hand, in maritime legislation, *naufragium* or *navis fractio* indicates the loss of a ship<sup>1</sup>, i.e. an incident that caused the ship to cease its navigation and lose its function. Such a definition is still used in Croatian maritime law<sup>2</sup> and is applied in this meaning in the following text.

Considering just wooden ships, the great majority of sites in the Eastern Adriatic belong to Classical Antiquity, and more specifically to the Hellenistic and Roman periods. In many cases, they are easily identified by the presence of amphorae, common ancient non-perishable transport containers.<sup>3</sup>

Since the appearance of heavy diving gear at the end of the 19<sup>th</sup> century, and even more since the development of autonomous diving in the second part of the 20<sup>th</sup> century, most of the ancient shipwreck sites accessible to sports divers have suffered from intense looting.<sup>4</sup> This fact in most cases has reduced the possibility of satisfactorily explaining how the unfortunate events occurred.

During the past two decades, non-looted sites, dating from the 4<sup>th</sup> century BC to the 4<sup>th</sup> century AD, have been discovered in Croatian waters,<sup>5</sup> increasing the amount and accuracy of the input data for the attempted reconstruction of sinking scenarios. Such reconstruction usually relies on subjective interpretation provided by the researcher. It is mostly based on direct observations of the archaeological record, an analysis of the site formation process,

<sup>1</sup> A. M. BURRIL, 1998.

<sup>2</sup> I. GRABOVAC, 2003.

<sup>3</sup> M. JURIŠIĆ, 2000; M. JURIŠIĆ, 2006.

<sup>4</sup> I. RADIĆ ROSSI, 2012.

<sup>5</sup> I. RADIĆ ROSSI, 2014.

## UVOD

Nalazišta brodoloma predstavljaju jedna od najčešćih podmorskih otkrića, a njihovo stanje očuvanosti varira. Izraz *brodolom* u kontekstu podmorske arheologije najčešće podrazumijeva bilo koji događaj uslijed kojeg je cjelokupni brodski teret ili dio njega dospio na morsko dno. S druge strane, u pomorskom pravu, *naufragium* ili *navis fractio* ukazuje na gubitak broda<sup>1</sup>, odnosno na događaj uslijed kojeg je brod prestao ploviti i izgubio funkciju. Takva se definicija još uvijek primjenjuje u hrvatskoj pomorskom pravu<sup>2</sup> te se u tom značenju koristi i u ostatku ovog članka.

Uzmu li se u obzir samo drveni brodovi, velika većina nalazišta na istočnom Jadranu datira se u razdoblje antike, konkretno u helenističko i rimsko doba. U mnogim slučajevima lako ih je prepoznati po prisustvu amfora koje su bile uobičajena i postojana transportna ambalaža.<sup>3</sup>

Od pojave teške ronilačke opreme krajem 19. stoljeća, a još više od razvoja autonomnog ronjenja drugom polovicom 20. stoljeća, većina antičkih nalazišta brodoloma kojima su mogli pristupiti sportski ronionci bila je izložena intenzivnom pljačkanju.<sup>4</sup> Ta činjenica u većini slučajeva smanjila je mogućnost izvođenja zadovoljavajućeg zaključka o načinu na koji je došlo do nesretnog događaja.

U protekla dva desetljeća u hrvatskom su akvatoriju otkrivena neopljačkana nalazišta koja se datiraju od 4. stoljeća pr. Kr. do 4. stoljeća po Kr.<sup>5</sup> čime je povećana količina i točnost ulaznih podataka na temelju kojih se nastoji rekonstruirati načine na koje je došlo do potonuća. Takva rekonstrukcija obično počiva na subjektivnoj interpretaciji znanstvenika. Najčešće se temelji na izravnim zapažanjima na arheološkom nalazištu, analizi procesa njegovog nastanka, proučavanju geografskog

<sup>1</sup> A. M. BURRIL, 1998.

<sup>2</sup> I. GRABOVAC, 2003.

<sup>3</sup> M. JURIŠIĆ, 2000; M. JURIŠIĆ, 2006.

<sup>4</sup> I. RADIĆ ROSSI, 2012.

<sup>5</sup> I. RADIĆ ROSSI, 2014.

an examination of the geographical context, and research experience. Although in many cases it could correspond to what happened in the past, the testing of the hypothesis that would firmly confirm or revise the suggested scenario is usually missing. The danger of superficiality and unrealistic interpretations has already been pointed out by Keith Muckelroy.<sup>6</sup>

In the framework of the Archaeology of Adriatic Shipbuilding and Seafaring (AdriaS) Project, supported by the Croatian Science Foundation, interdisciplinary collaboration has led to experiments with numerical modelling to find out how to apply naval engineering methods and tools in the field of nautical archaeology. This paper aims to present the first steps towards the possible solution of simulating the sinking of an ancient ship and testing the various assumptions regarding the sinking event.

## PREMISES

The constant development of software solutions and, at the same time, the increase in computational speed have resulted in the availability of very sophisticated numerical tools for the analysis of various engineering problems.<sup>7</sup> In state-of-the-art software packages, a large number of material models has been defined and many algorithms encoded. Material models are essentially equations describing the physical behaviour of certain materials, like wood, steel, water, etc. Encoded algorithms consider the interaction between different structures or materials, such as their contact, heat transfer, the buoyancy of floating objects, and so on.<sup>8</sup>

When the simulation of a real-world event is to be performed, careful preparation of such a numerical experiment is required.

<sup>6</sup> K. MUCKELROY, 1978, 157.

<sup>7</sup> E. g. S. RUDAN, K. TABRI, I. KLARIĆ, 2010; S. RUDAN, D. VOLARIĆ, 2016.

<sup>8</sup> S. G. LEE, T. ZHAO, J. H. NAM, 2013.

konteksta i istraživačkom iskustvu. Iako je u brojnim slučajevima moguće podudaranje sa stvarnim događajima iz prošlosti, obično izostaje provjera hipoteze kojom bi se potvrdio ili revidirao pretpostavljeni tijek događanja. Na opasnosti koje sa sobom nosi površno i nerealistično tumačenje već je ukazao Keith Muckelroy.<sup>6</sup>

U okviru projekta Arheologija jadranske plovidbe i brodogradnje (AdriaS), uz financijsku potporu Hrvatske zaklade za znanost, interdisciplinarna suradnja rezultirala je numeričkim modeliranjem kako bi se utvrdili mogući načini primjene metodologije i alata iz područja konstrukcijske analize i hidromehanike broda u području arheologije broda. Ovim se radom nastoji prikazati prve korake ka iznalaženju metodologije za simulaciju potonuća antičkog broda, koja bi zatim omogućila preispitivanja raznih pretpostavki povezanih s događajem potonuća.

## PRETPOSTAVKE

Konstantni razvoj softverskih rješenja i istodobno povećanje proračunskih kapaciteta računala omogućili su dostupnost veoma sofisticiranih numeričkih alata za analizu različitih tehničkih problema.<sup>7</sup> Suvremeni softverski paketi sadrže velik broj materijalnih modela i brojne algoritme. U osnovi, materijalni modeli predstavljaju dijelove softverskog koda koji opisuju fizikalno ponašanje materijala na osnovi teorijskih jednadžbi. Istodobno, takvi softverski paketi ujedno sadrže i brojne algoritme koji omogućuju analizu međusobnog kontakta različitih tijela, pojavu i razvoj oštećenja, prijenos topline i tlakova, npr. uzgona, i slično.<sup>8</sup>

Kako bi se provela smislena numerička analiza stvarnih događaja potrebno je pažljivo pripremiti numerički eksperiment. Postupak za-

<sup>6</sup> K. MUCKELROY, 1978, 157.

<sup>7</sup> Npr. S. RUDAN, K. TABRI, I. KLARIĆ, 2010; S. RUDAN, D. VOLARIĆ, 2016.

<sup>8</sup> S. G. LEE, T. ZHAO, J. H. NAM, 2013.

The process needs to start with a good understanding of the problem and the physics involved in the event. If, for example, a sinking event is studied, then all the available information about the ship structure, its cargo and seafaring capabilities, environmental conditions (waves, wind, sea current) and so on must be known or assumed. Following this path, a proper material model must be considered: wood for modelling the ship structure, ceramics for the amphorae, water and air material models for the sea and air modelling, etc. Of course, certain simplifications are introduced during the numerical simulation setup. Once this is done, the calculation may start, but not before all the calculation control parameters are properly set.

Although setting up the entire simulation is not a straightforward task and requires certain skills and experience, the analyst is rewarded by the possibility of numerically studying a number of scenarios that include non-linear multi-physics problems of great complexity. Depending on the time available and access to other resources, several possible solutions may be examined in the virtual environment with great confidence.

To test the possibility of studying the mechanics and reasons for the sinking of an ancient ship by applying numerical tools, an ancient ship loaded with cargo (amphorae) and exposed to lateral waves is considered. Then, by varying the environmental parameters and cargo weight, an attempt is made to obtain the realistic behaviour of the ship, leading either to floating or capsizing.

### *Ship stability in waves*

Ship stability in waves, along with ship strength, is the most important property of any ship, either ancient or modern. Ship stability is determined mainly by the equilibrium of two simultaneously acting forces: the ship weight and ship buoyancy. Ship weight is the total weight of the ship structure, cargo,

počinje temeljitim razumijevanjem problema, kao i fizike povezane sa samim događajem. Ako se, na primjer, proučava događaj potonuća, potrebno je poznavati ili pretpostaviti sve dostupne podatke o strukturi broda i njegovim plovnim karakteristikama, sadržaju i rasporedu tereta, uvjetima u okolišu (valovi, vjetar, morska struja) i dr. U tom kontekstu potrebno je razmotriti prikladne materijalne modele te njihove mogućnosti, prednosti i nedostatke: materijalni model koji opisuje ponašanje drva za izradu modela strukture broda, odgovarajući materijalni model za keramiku od koje su izrađene amfore, materijalne modele vode i zraka za izradu okolišnih uvjeta itd. Često se prilikom postavljanja parametara numeričke simulacije uvode određena pojednostavljenja. Nakon toga može započeti izračun, ali tek nakon što su ispravno namješteni i provjereni svi kontrolni parametri proračuna.

Iako postavljanje cjelokupne simulacije nije jednostavan zadatak te ono iziskuje određene vještine i iskustvo, analitičar ima mogućnost numeričkog izučavanja čitavog niza mogućih scenarija od kojih svaki uključuje numerički izračun vrlo složenih nelinearnih višefizikalnih problema. Ovisno o raspoloživom vremenu, kao i o dostupnosti svih potrebnih resursa, u virtualnom je okruženju moguće s velikom pouzdanošću preispitati nekoliko mogućih scenarija.

Kako bi se numeričkim alatima ispitali mogući razlozi i načini potonuća antičkog broda, u razmatranje se uzima antički brod natovaren teretom (amfore) te izložen bočnim valovima. Zatim se, mijenjajući parametre okoliša i težine tereta nastoji postići realistično ponašanje broda koje će dovesti do njegovog plutanja ili potonuća.

### *Stabilnost broda na valovima*

Pored čvrstoće brodske konstrukcije, najvažnija karakteristika svakog – i antičkog i suvremenog – broda njegova je stabilnost na valovima. Stabilitet broda određuje u prvom

equipment, crew and any other weight that results in ship displacement. Ship buoyancy is determined by the shape of the hull, displacement and the wetted surface. The total of the weight forces acts at the location of the ship's centre of gravity, while the total of the buoyancy forces acts at the centre of the immersed volume, or immersed cross section, as in the case of the presented 2D floating model. When the ship is exposed to the action of waves, it moves with six degree of freedom, three translations and three rotations regarding to defined coordinate system. One of the rotation displacements is rotation about z axis, i.e. rolling where resulting rolling angle determines the restoring moment which is a consequence of the two forces (weight,  $W$  and buoyancy,  $B$ ), acting simultaneously (Fig. 1).

Three points may be distinguished:  $K$  is the point on the keel defined as intersection of baseline ( $BL$ ) and centreline ( $CL$ ) and is conveniently used as the origin of the coordinating system;  $G$  is the centre of the ship's gravity; and  $Bo$  is the centre of its buoyancy, which is determined by the immersion of the ship below the waterline ( $WL$ ). Two forces acting at any time are the ship weight or displacement ( $W$ ) and the ship buoyancy ( $B$ ). Clearly, when the ship is in calm water,

redu ravnoteža dviju sila koje djeluju istodobno, a to su: težina i uzgon broda. Težina broda ukupna je težina brodske konstrukcije, tereta, opreme, posade i bilo koje druge težine koja daje istisninu broda. Uzgon broda određen je oblikom trupa, istisninom i oplakanom površinom. Ukupan zbroj težina rezultira centrom gravitacije, a ukupan zbroj sila uzgona rezultira centrom volumena ili uronjenog presjeka kao u slučaju 2D plutajućeg modela. Kad je brod izložen djelovanju valova, ostvaruje šest stupnjeva slobode gibanja: tri translacije i tri rotacije u odnosu na definirani koordinatni sustav. Jedan od tih stupnjeva slobode jest rotacija oko uzdužne osi broda, tj. ljuljanje, pri čemu rezultirajući kut ljuljanja određuje moment uspravljanja (povratni moment) koji je posljedica spomenutih dviju sila (težine,  $W$  i uzgona,  $B$ ), koje djeluju istovremeno (Sl. 1).

Na karakterističnom presjeku broda moguće je razlikovati tri točke:  $K$  je točka na kobilici definirana kroz presjek osnovne ( $BL$ ) i središnje crte ( $CL$ ) i prikladno se koristi kao ishodište koordinatnog sustava;  $G$  je centar gravitacije; a  $Bo$  je centar uzgona broda koji je određen uranjanjem broda ispod vodne linije ( $WL$ ). Dvije sile koje djeluju čitavo vrijeme jesu težina broda odnosno njegova istisnina ( $W$ ) i uzgon broda ( $B$ ). Naravno, kad se brod

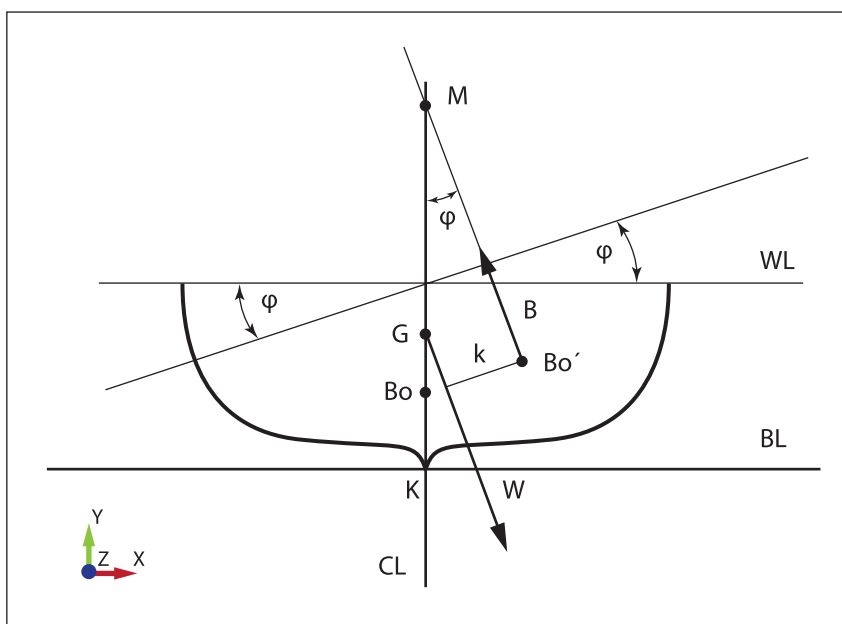


FIGURE 1 *Principle of the restoring moment*  
SLIKA 1. *Princip djelovanja momenta uspravljanja*

both forces act in the vertical direction and the restoring moment is zero. When the ship rolls due to the action of the waves by angle  $\rho$ , the buoyancy changes and the new centre of buoyancy moves to point  $Bo'$ . Again, the ship weight acts through point  $G$ , while the ship buoyancy forces act through point  $Bo'$ . These two forces are parallel but no longer collinear, and the restoring moment  $M_{sr} = Wk$  is generated. In normal circumstances, the restoring moment always acts in such a way that the ship tends to return to the original undisturbed position. During the numerical simulation of the ship rolling on the sea surface, the equilibrium of all the forces acting on the model, including weight and buoyancy, needs to be constantly maintained.

## NUMERICAL MODEL

Since the purpose of this article is to explore the capability of modern engineering tools in simulating an ancient marine accident, a simplified numerical model is applied. Therefore, the modelling and calculation efforts are reduced, while all the relevant physical components of the event are considered, allowing a realistic simulation.

The presumed scenario considers an ancient ship loaded with cargo, deprived of manoeuvring capacity and drifting helplessly in rough sea. As time passes, seawater penetrates the hull, slowly reducing the buoyancy of the ship. Finally, the ship sinks to the seabed, assuming a final resting position.

Modelling such an event presumes considering as much physics as possible. In other words, a model of the environment must be established, a model of the ship and its cargo produced, interaction between all the structural parts and interaction between the fluid and structure defined, and the friction and contact forces controlled, etc. Obtaining the

nalazi u mirnoj vodi, obje sile djeluju u okomitom smjeru pa je moment uspravljanja jednak nuli. Kad se brod ljulja uslijed djelovanja valova i naginje pod nekim kutom  $\rho$ , uzgon se mijenja, a novi centar uzgona premješta se u točku  $Bo'$ . Težina broda opet djeluje u točki  $G$ , dok sila uzgona broda djeluju u točki  $Bo'$ . Te su dvije sile paralelne, ali više nisu kolinearne, te se stvara moment uspravljanja  $M_{sr} = Wk$ . U normalnim okolnostima, moment uspravljanja uvijek djeluje tako da brod vraća u ravnotežni položaj. Prilikom numeričke simulacije ljuljanja broda na moru ravnoteža svih sila na modelu, uključujući težinu i uzgon, mora biti zadovoljena u svakom proračunskom koraku.

## NUMERIČKI MODEL

S obzirom da je osnovni cilj ovog članka istražiti mogućnosti suvremenih tehničkih alata u simulaciji antičkih pomorskih nesreća, primjenjuje se pojednostavljeni numerički model. Na taj način smanjen je obim izrade svih modela i trajanje izračuna, a istodobno su uzete u obzir sve mjerodavne fizikalne značajke događaja, koje omogućuju realističnu simulaciju.

Prema pretpostavljenom tijeku događaja u scenariju na osnovi kojega će se izraditi proračunski numerički model, polazi se od antičkog broda natovarenog teretom, smanjene ili onemogućene upravljivosti, koji bespomoćno pluta uzburkanim morem. Kako vrijeme prolazi, tako morska voda prodire u trup, postupno smanjujući uzgon broda. Naposljetku brod tone i zauzima konačan položaj mirovanja na morskom dnu.

Pri izradi numeričkog modela takvog događaja važno je uzeti u obzir što više fizikalnih činjenica. Drugim riječima, potrebno je izraditi realističan model okoliša, dovoljno detaljan model broda i tereta koji je prevezio, definirati međudjelovanje svih dijelova njegove konstrukcije, uključujući pomicanje tereta, kao i interakciju između tekućine i konstrukcije, za-

optimum between the modelling effort and the quality of the results is an important first step, which, as already anticipated, requires certain simplifications.

To obtain the desired result, a combination of two different models is proposed: the floating model and the sinking model. The first one is the model of a fluid-structure analysis of a ship drifting in rough sea, while the second one is a structural model of a ship sinking to the seabed. The LS-Dyna software package was used to perform the analysis.

### *Floating model*

The floating model consists of three main parts: water, air and a ship loaded with cargo (Fig. 2). The most important simplification is the restriction of the floating model to only two dimensions, one extending along the ship width and the other extending along the ship height. Since the ship length is not relevant, there is no bow or stern included in the model. Only the main section frame is considered, as presented in Fig. 2. The entire numerical model, i.e. each of the three parts within (air, water and ship with cargo), is restricted to moving in the direction normal to the presented plane.

The finite element mesh consists of shell elements, used to model the ship hull and each of 18 amphorae, and solid elements used to

tim kontrolirati silu trenja, kontaktne sile koje nastaju dodirivanjem različitih objekata i dr. Pri tome je važno postići optimalnu ravnotežu između truda uloženog u izradu samog modela i kvalitete rezultata, što sukladno očekivanju zahtjeva određena pojednostavljena.

Na osnovi dosadašnjeg iskustva, predlaže se kombinacija dvaju različitih i nezavisnih računskih modela: plutajućeg i tonućeg modela. Prvi je model namijenjen analizi međudjelovanja tekućine i konstrukcije broda koji pluta uzburkanim morem, a drugi je model namijenjen analizi ponašanja konstrukcije broda koji tone na morsko dno. Pri tome se rezultat analize plutajućeg modela koristi u analizi tonućeg modela, čime se ostvaruje cjelina simuliranog događaja. Za provedbu analize korišten je računalni program LS-Dyna.

### *Plutajući model*

Plutajući model sastoji se od tri glavna dijela, a to su voda, zrak i natovareni brod (Sl. 2). Najvažnije pojednostavljenje je ograničenje plutajućeg modela na samo dvije dimenzije, one u kojima je moguće definirati širinu i visinu broda. Budući da dužina broda nije od presudnog značaja pri analizi ljuljanja broda, u model nisu uključeni njegovi pramčani i krmeni dijelovi. Uzet je u obzir samo okvir glavnog dijela kao što je prikazano na Sl. 2. Čitav numerički model odnosno svaki pojedini od triju njegovih sastavnih dijelova (zrak, voda

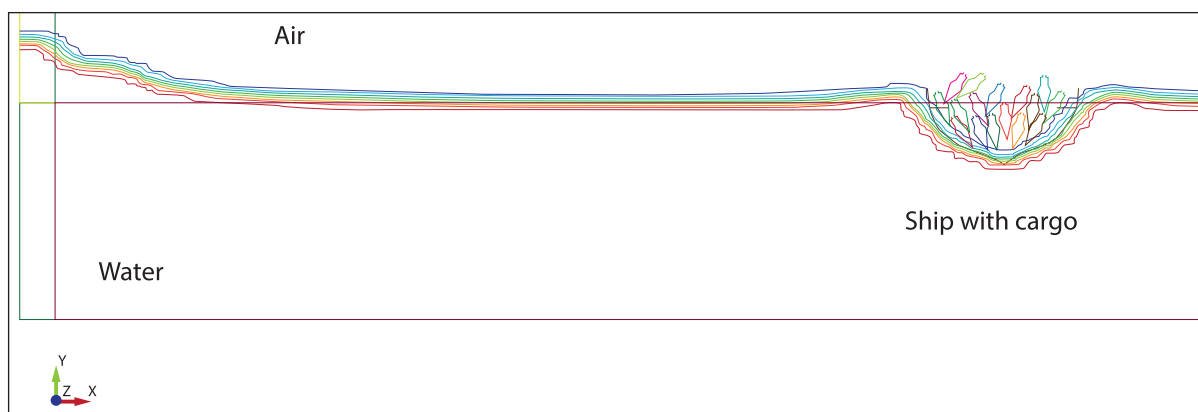


FIGURE 2 Floating model: fluid domain (air, water) and structural model (ship, cargo)

SLIKA 2. Model za analizu plutanja: fluid (zrak, voda) i konstrukcija (brod, teret)

model the water and air domain. A total of 404 shell and 12,804 solid finite elements are used.

The ship hull cross section is generic and is supposed to be similar to the Kyrenia class of ancient ships.<sup>9</sup> The beam of the ship is 4.45 metres, and each amphora is 1.13 metres high. The mass of the ship is 14 tons and the total mass of the amphorae is 20 tons, corresponding again to the Kyrenia ship and cargo weight estimation.

The initial position of the amphorae within the ship hull at the beginning of the simulation is presented in Fig. 3A. As soon as the simulation started, gravity was applied to the entire model and the amphorae assumed their natural position in the ship (Fig. 3B), which resembles the placement of amphorae in a ship hull as found at a common wreck site. It should be noted that the cargo is free to move within the ship hull due to the action of the waves, as each amphora is in contact with surrounding amphorae and the ship hull.

The size of the fluid domain (both water and air) is 194 x 9.5 metres, of which the water depth is 6.5 metres. At the ends of the fluid domain, there are ambient parts of the domain, i.e. a numerical representation of the infinite fluid domain, used for wave generation on the left and wave absorption on the right of the fluid domain. In this way, waves are generated, they travel from the left to the right (along the x axis) and when they reach the right-most edge of the domain, they are not reflected back but are absorbed by the ambient parts.

Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) and Constrained-Lagrange-in-Solid algorithms encoded in LS-Dyna were used to set up the physical behaviour of the structural model within the fluid domain. An ALE algorithm is a two-step algorithm. The first step is the Lagrangian step where deformations

i brod s teretom) ograničen je na kretanje u prikazanoj ravnini. Mreža konačnih elemenata plutajućeg modela sastoji se od ljuskastih konačnih elemenata korištenih za izradu modela trupa broda i modela amfora, njih ukupno 18, te od volumnih elemenata korištenih za izradu modela vode i zraka. Model sadrži 404 ljuskasta konačna elementa i 12.804 volumna konačna elementa.

Presjek trupa broda je generički te je izrađen po uzoru na antičke brodove klase onoga čija je olupina pronađena u blizini grada Kyrenije na današnjem Cipru.<sup>9</sup> Širina broda je 4,45 metara, a amfore su visoke 1,13 metara. Masa broda iznosi 14 tona, a ukupna masa amfora 20 tona, što opet odgovara procijenjenoj težini broda pronađenog kraj Kyrenije i pripadajućeg mu tereta.

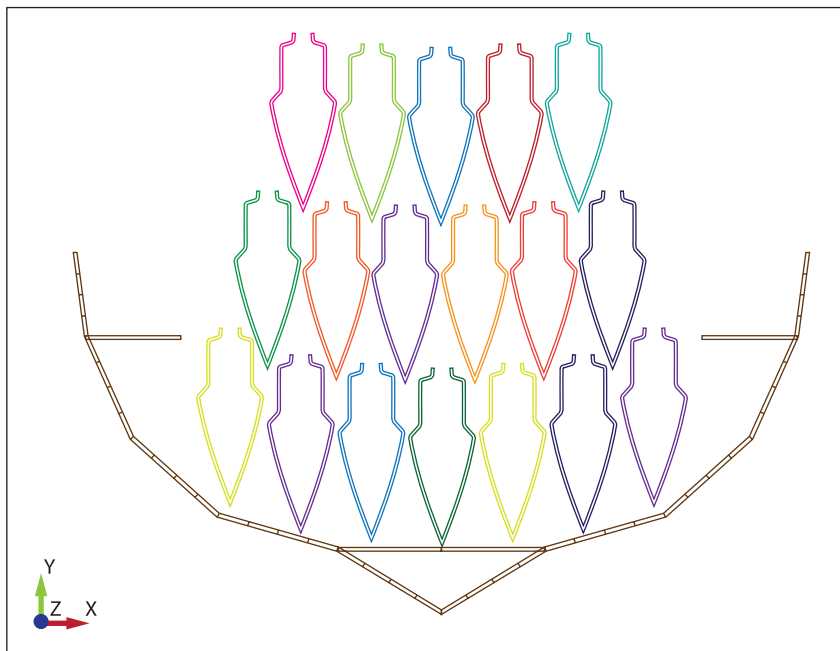
Početni položaj amfora u trupu broda na početku simulacije prikazan je na Sl. 3A. Zatim, kada je simulacija pokrenuta, na čitav je model primijenjena sila teže te su amfore nakon vrlo kratkog vremena zauzele rezultirajući prirodan položaj u brodu (Sl. 3B), podsjećajući na položaj amfora u trupu broda zatečen na uobičajenom nalazištu brodoloma. Treba napomenuti da se teret može slobodno kretati u trupu broda uslijed djelovanja valova s obzirom da su sve amfore u dodiru s okolnim amforama i trupom broda.

Veličina područja tekućine (i vode i zraka) je 194 x 9,5 metara, od čega je dubina vode 6,5 metara. Na krajevima područja tekućine nalaze se dijelovi područja tzv. numeričkog ambijenta, odnosno numerička reprezentacija beskonačnog područja tekućine, korišteni za stvaranje dolaznih valova u lijevom dijelu područja tekućine te za apsorpciju odlaznih valova u njegovu desnom dijelu. Na taj se način proizvode valovi, a zatim oni putuju s lijeva udesno (duž osi x) i kad stignu do krajnjeg desnog ruba područja ne odbijaju se natrag, već ih apsorbira numerički ambijent na tome mjestu.

Za uspostavu fizikalnog ponašanja konstruk-

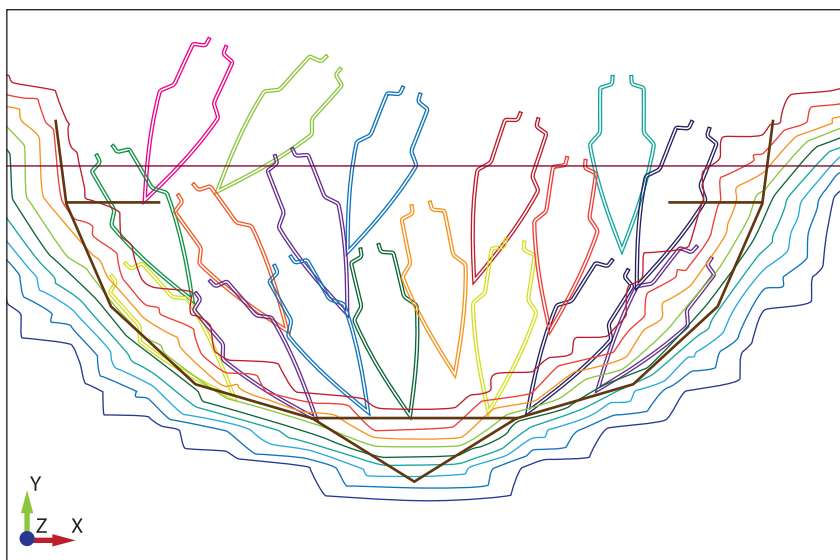
<sup>9</sup> J. R. STEFFY, 1994, 42-59.

<sup>9</sup> J. R. STEFFY, 1994, 42-59.



**FIGURE 3A** Ship and cargo arrangement in initial position and before the gravity is applied

**SLIKA 3A.** Brod i raspored tereta u početnom položaju, prije početka djelovanja gravitacije



**FIGURE 3B** Ship and cargo arrangement in natural position due to action of gravity and mutual contact

**SLIKA 3B.** Brod i raspored tereta u prirodnom položaju uslijed djelovanja gravitacije te međusobnog kontakta

and displacements of the structure are determined. The second step is the advection step, where the deformed material configuration is mapped back onto the reference mesh. Conservation of the mass, momentum and energy is used to solve the problem, along with the constitutive equations of the material. Multimaterial ALE elements were defined so that each element may contain a certain percentage of both water and air. Material model 9, i.e. NULL, is used to define the properties of the water and air.

The *Constrained\_Lagrange\_in\_Solid* is a coupling algorithm that looks for intersec-

cijskog modela u području tekućine korišteni su algoritmi ALE (proizvoljna Lagrangeova-Eulerova formulacija) i *Constrained\_Lagrange\_in\_Solid* (interakcija konstrukcije i tekućine) kodirani u sustav LS-Dyna. Algoritam ALE uključuje dva koraka. U prvom, Lagrangeovom koraku utvrđuju se deformacije i pomaci konstrukcije. Drugi korak je korak advekcije, pri kojem se konfiguracija deformiranog materijala mapira natrag na referentnu mrežu. Problem se rješava uz uvjet očuvanja mase, momenta i energije, uz konstitutivne jednadžbe materijala. Definirani su multimaterijalni ALE elementi kako bi svaki element

tions between the Lagrangian parts (structure) and ALE parts (fluid) in each time step of the simulation. When intersections are detected, coupling forces are calculated and re-distributed back on both parts, resulting in their interaction. The penalty method is used to generate coupling forces in the present analysis.

Simulation started with the initialisation of the hydrostatic pressure and gravity. Then the waves were generated and ALE and FSI coupling algorithms determined the floating of the ship with cargo. As the purpose of this article was to evaluate the possibility of numerical modelling of shipwreck conditions, in this analysis, no wind or sea currents were considered. Only the waves were modelled, and the rough sea was simulated by the generation of irregular, breaking waves. Harmonic oscillation of the ambient seawater level was imposed, with a period of 4 seconds and an amplitude of 2 metres. Short and steep waves like those used in numerical analysis occur due to strong winds such as hurricane-force bora (north-east), rising and breaking waves around shallow seas (shallows) or in channels when the slope of the wave is amplified by sea currents from the opposite direction. Such waves are not described by a simple linear theory but are the subject of nonlinear analysis not performed in the paper. The wave characteristics in the simulation were chosen arbitrarily, but in a way to achieve wave refraction that would lead to numerical flooding of the ship. Due to the steepness of the waves, they break while travelling and

mogao sadržavati određeni postotak i vode i zraka. Za definiranje svojstava vode i zraka koristi se Materijalni model 9, tj. NULL.

Constrained\_Lagrange\_in\_Solid algoritam pretražuje sjecišta Lagrangeovskih dijelova (konstrukcije) i Eulerovih dijelova (tekućine, odnosno fluida) u svakom pojedinom koraku simulacije. Kad se sjecišta otkriju, izračunavaju se sile na mjestu interakcije te ih se redistribuira natrag na oba dijela, uslijed čega nastaje njihovo međudjelovanje. U ovoj analizi, za izračun sila na mjestu interakcije primjenjuje se tzv. penalty metoda.

Simulacija započinje iniciranjem hidrostatskog tlaka i sile teže (gravitacije). Zatim se generiraju valovi, a algoritmi ALE i Constrained\_Lagrange\_in\_Solid određuju pomicanje broda s njegovim teretom na valovima. Kako je svrha ovog članka procijeniti mogućnost numeričkog modeliranja ovakvih složenih događaja, u ovoj analizi nisu uzeti u obzir ni vjetar ni morske struje. Simulacija uzburkanog mora postignuta je generiranjem nepravilnih valova koji se lome. Simulirana je harmonijska uzbuda morske površine u periodu od 4 sekunde i s amplitudom od 2 metra. Kratki i strmi valovi poput ovih korištenih u numeričkoj analizi pojavljuju se uslijed djelovanja snažnog vjetra poput orkanske bure, rastom i lomom valova u okolici plitkog mora (plićina) ili u kanalima kada strminu vala pojačava morska struja iz suprotnog smjera. Takvi valovi ne opisuju se jednostavnom linearnom teorijom, već su predmet nelinearne analize koja u članku nije provedena. Značajke valova u simulaciji odabrane su proizvoljno, ali na način da se posti-

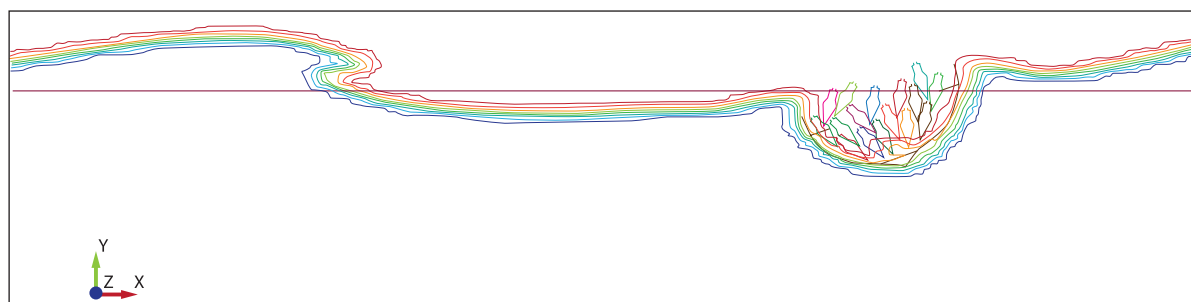


FIGURE 4 Typical simulation instance: ship with cargo is floating due to the action of the waves coming from the left side  
SLIKA 4. Tipičan trenutak simulacije: brod s teretom pluta uslijed djelovanja valova koji dolaze s lijeve strane

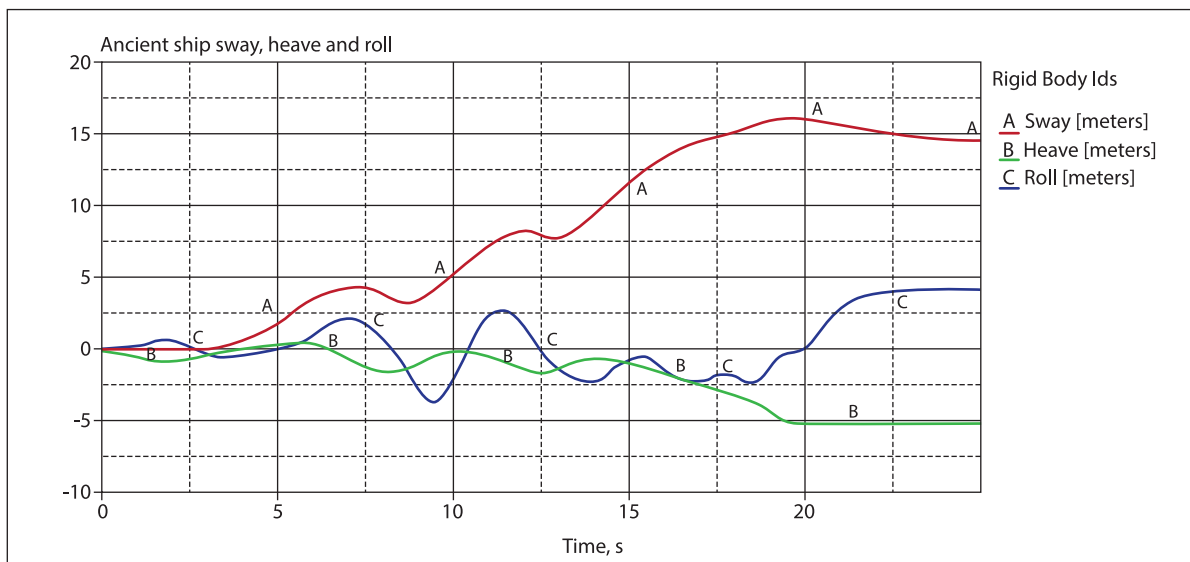


FIGURE 5 Ship floating motions in time: sway, heave and roll

SLIKA 5. Gibanje plutajućeg broda u vremenu: zanošenje, poniranje i ljuljanje

a typical situation is presented in Fig. 4. at time  $t=12$  seconds from the beginning of the simulation.

Flooding of the model is simulated by imposing a force acting in the negative  $y$ -direction (toward the bottom), which gradually increases and therefore reduces the ship buoyancy. This corresponds to the situation where there is an inflow of water in the hull, due to some kind of hull damage. Once buoyancy was lost due to the action of the flooding force and the force of the breaking wave mass that entered into the hull, the ship laden with cargo started to sink due to gravity. At this moment, the 2D simulation of the floating ship in waves stops.

Fig. 5 presents the motions of the ship as a rigid body, that is sway (translation in  $x$  direction) and heave (translation in  $y$  direction) as well as roll, as previously explained. It should be noted that the roll angles in Fig. 5 are scaled by a factor of 10 so that all the results can be displayed in the same Figure. The simulation lasted 25 seconds and, in that time, the ship drifted by the action of the waves by approximately 15 metres to the right.

From Fig. 5 it is clear that the ship loses its buoyancy as it constantly loses its freeboard. Eventually, at approximately  $t=15$  seconds,

gne lom valova koji će dovesti do numeričkog naplavlivanja broda. Uslijed strmosti valova oni se lome dok se gibaju te je tipična situacija prikazana na Sl. 4. u vremenu  $t = 12$  sekundi od početka simulacije.

Simulacija poplavlivanja modela izvedena je izazivanjem sile koja je djelovala u smjeru negativne osi  $y$  (prema dnu) i koja se postupno povećavala, uslijed čega je smanjen uzgon broda. To je usporedivo sa situacijom u kojoj voda prodire u trup zbog oštećenja koja su nastala na njemu. Nakon što je uslijed djelovanja sile poplavlivanja i sile izazvane valovima koji su prodrli u trup prestao djelovati uzgon, brod natovaren teretom počeo je tonuti uslijed djelovanja gravitacije. U tom trenutku 2D simulacija plutajućeg broda na valovima se prekida.

Sl. 5. prikazuje kretanje broda kao krutog tijela, koje se ljuđa (roll), ponire (heave) i zanosi (sway) u vremenu, kako je prethodno objašnjeno. Treba napomenuti da su kutovi ljuđanja na Sl. 5. uvećani za faktor od 10 kako bi se svi rezultati mogli pregledno prikazati na istoj slici. Simulacija je obuhvatila 25 sekundi plovidbe broda i u to je vrijeme došlo do njegovog zanošenja uslijed djelovanja valova za približno 15 metara udesno.

Poniranje je gibanje u smjeru osi  $y$ ; Sl. 5. prikazuje kako brod gubi uzgon paralelno s kon-

it starts to sink and at approximately  $t=20$  seconds it hits the bottom of the 2D fluid domain, where it resides for the rest of the simulation. Finally, significant roll motions can be observed at approx.  $t=10$  seconds. The analysis of the rest of the sinking process is described in the next section.

### *Sinking model*

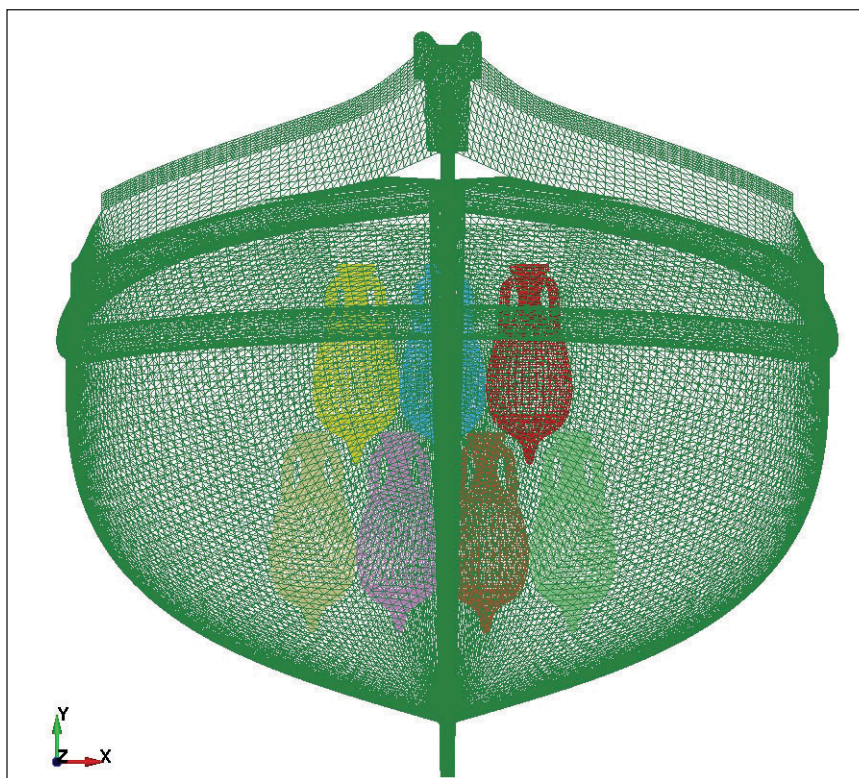
An analysis of the ship sinking was performed in LS-Dyna with the ship and cargo, as well as the seabed, represented with 3D models. Here, 48 amphorae of the height of 90 cm are modelled as a cargo so that the motion of the cargo can be monitored throughout the analysis and particularly during contact with the seabed. The front view of the ship with cargo used in the sinking simulation is presented in Fig. 6. The 3D model consists of 73,695 shell finite elements, used to model the ship hull and the seabed, and 163,392 solid finite elements used to model the amphorae.

Only a small number of amphorae is intro-

tinuiranim povećavanjem gaza. Naposljetku, približno u vrijeme  $t = 15$  sekundi, brod počinje tonuti, a približno u vremenu  $t = 20$  sekundi pada na dno područja tekućine 2D, gdje ostaje do kraja simulacije. Na kraju, približno u vremenu  $t = 10$  sekundi, vidljivo je značajno ljuljanje broda. Analiza ostatka procesa potonuća iznesena je u sljedećem odlomku.

### *Model potonuća*

Analiza broda koji tone provedena je pomoću programa LS-Dyna. Izrađen je 3D model broda s teretom te model nepravilnog morskog dna. Model tereta uključuje 48 amfora visine 90 cm, pri čemu je za cjelokupnog trajanja analize, a osobito za vrijeme kontakta s morskim dnom, omogućeno praćenje gibanja tereta. Na Sl. 6. prikazan je pogled sprijeda na brod s teretom upotrijebljen u simulaciji potonuća. 3D model uključuje 73.695 ljuskastih konačnih elemenata upotrijebljenih za izradu modela trupa broda i morskog dna te 163.392 volumna konačna elementa upotrijebljena za izradu modela amfora.



**FIGURE 6** *Sinking model: rigid ship shell loaded with 48 amphorae*

**SLIKA 6.** *Model za analizu potonuća: kruta oplata broda nakrcana s 48 amfora*

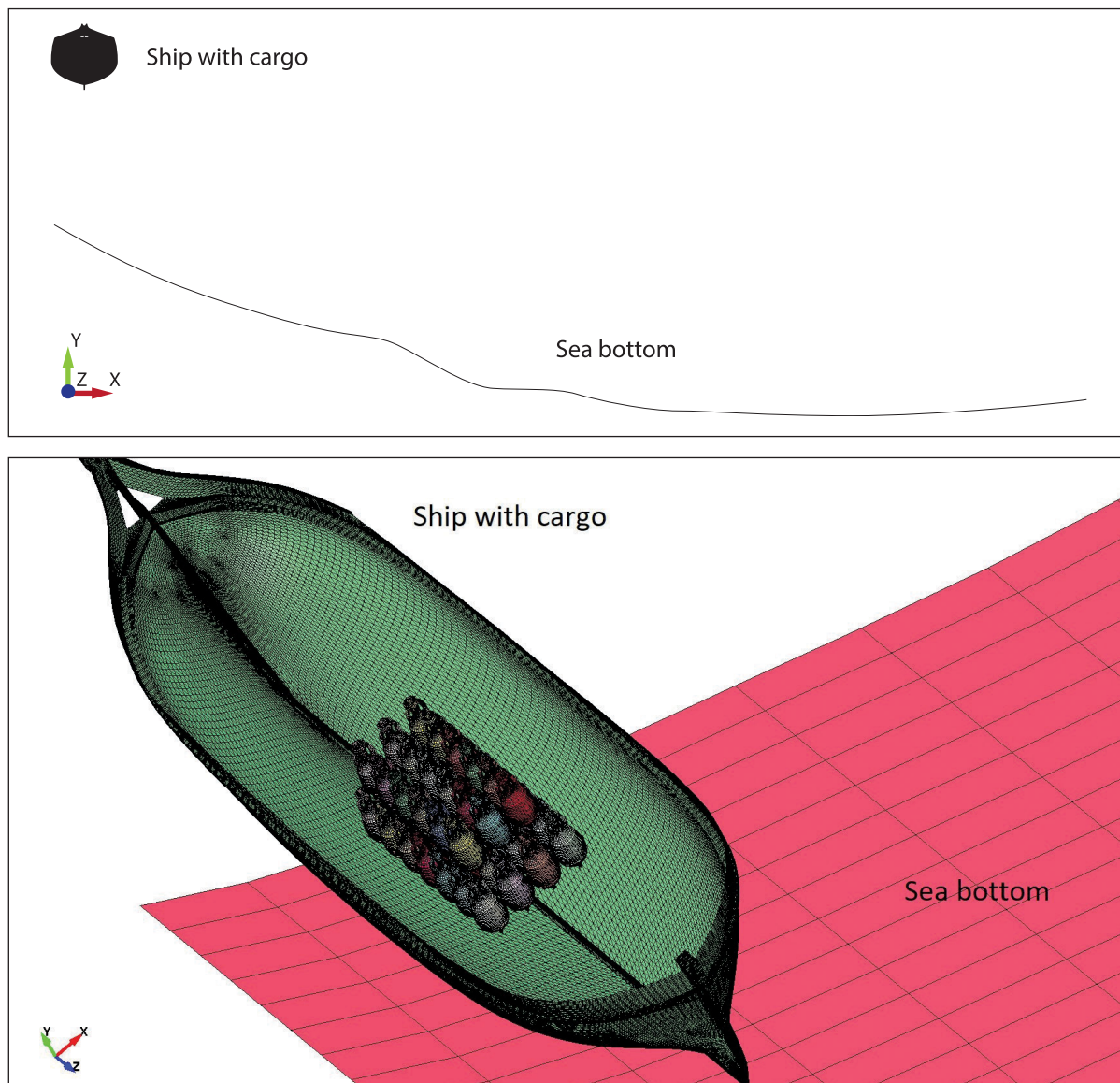


FIGURE 7 Sinking model; ship with cargo and sea bottom: side view (up) and isometric view (down)  
 SLIKA 7. Model za analizu potonuća; brod s teretom: pogled sa strane (gore) i izometrijski pogled (dolje)

duced into the ship's hold. Although the hull is therefore mostly empty, the movement of the amphorae is therefore less restricted. Another simplification is that only the hull shell is considered, with no bulkheads, deck, mast, or any other structural element, which can be easily added. A front view of the model (top) and isometric view of the sinking model (below) are presented in Fig. 7.

The fluid is not modelled directly in the sinking simulation. Therefore, the effect of the fluid was considered indirectly in the following manner. The buoyancy of the ship and amphorae is estimated by measuring

U spremište modela broda unesen je tek mali broj amfora. Iako je trup zbog toga uglavnom prazan, uslijed toga je i gibanje amfora manje ograničeno. Još jedno pojednostavljenje je i to što je razmotrena samo ljuska trupa, bez pregrada, palube, jarbola ili bilo kojeg drugog elementa konstrukcije koji je moguće jednostavno dodati. Na Sl. 7. prikazan je pogled sprijeda na model (gore) i izometrijski pogled modela potonuća (dolje).

Tekućina nije izravno modelirana u simulaciji potonuća. Stoga je učinak tekućine razmotren neizravno na sljedeći način. Na temelju stvarnog volumena i pripadnih specifičnih te-

their volume. Then, the total weight of the ship and cargo was reduced by the amount of buoyancy. Finally, the ratio of the two weights was applied to the earth's gravity, resulting in a net vertical body acceleration of  $6.8 \text{ metres/second}^2$ . While much more detailed modelling of underwater structural behaviour is possible, the accent in this paper is on the overall methodology and contact problem, both for the ship and cargo and interaction with the seabed.

In addition, a light horizontal sea current was introduced in the simulation by the application of a body load in the x-direction, acting on every object in the simulation. Penalty-based automatic contact was defined between each object and the static and dynamic friction coefficients in contact were both 0.6. As in the case of the floating simulation, all structural elements like the hull and amphorae were considered rigid. In addition, the seabed is modeled as rigid and immobile.

Sinking simulation starts when the ship sinks below the water level surface in the 2D simulation. The motions obtained for the

žina, procijenjen je ukupan uzgon broda s teretom. Zatim je cjelokupna težina broda i tereta smanjena za vrijednost uzgona. Naposljetku je omjer dviju težina, smanjene i cjelokupne, primijenjen na Zemljinu silu težu te je na taj način izračunata vrijednost neto vertikalne akceleracije tijela  $6,8 \text{ m/s}^2$ . Iako je moguća izrada mnogo detaljnijih modela ponašanja konstrukcije pod morem, u ovom je radu naglasak na razradi općenite metode simulacije brodoloma, te razmatranju problema kontakta između konstrukcije broda i tereta, kao i njihovo međudjelovanje s morskim dnom na kraju simulacije.

Dodatno, u simulaciju potonuća uvedena je horizontalna morska struja male brzine, primjenom sila u smjeru osi x koje djeluju na svaki objekt u simulaciji. Između pojedinih objekata, uključujući i morsko dno, definiran je automatski kontakt te su i koeficijent statičkog trenja i koeficijent dinamičkog trenja u kontaktu iznosili 0,6. Kao i u slučaju plutajuće simulacije, svi elementi brodske konstrukcije i sve amfore modelirane su kao kruta tijela. Dodatno, morsko dno modelirano je kao kruto i nepomično.

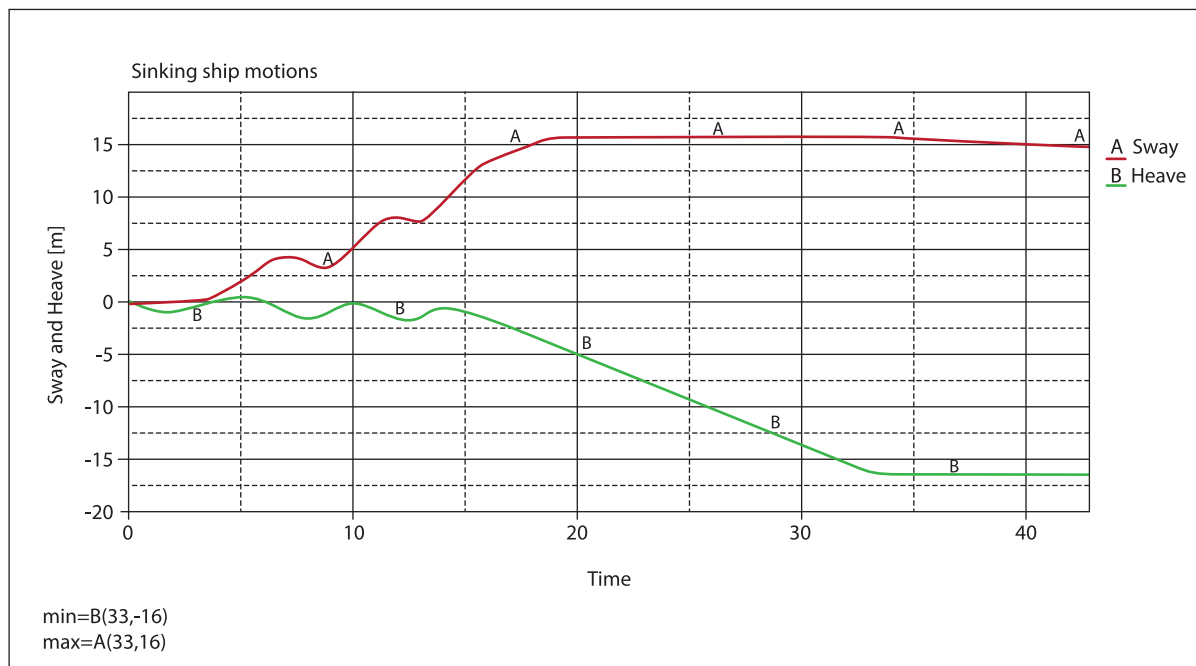


FIGURE 8 Ship sinking motion in time: sway and heave

SLIKA 8. Gibanje tonućeg broda u vremenu: zanošenje i poniranje

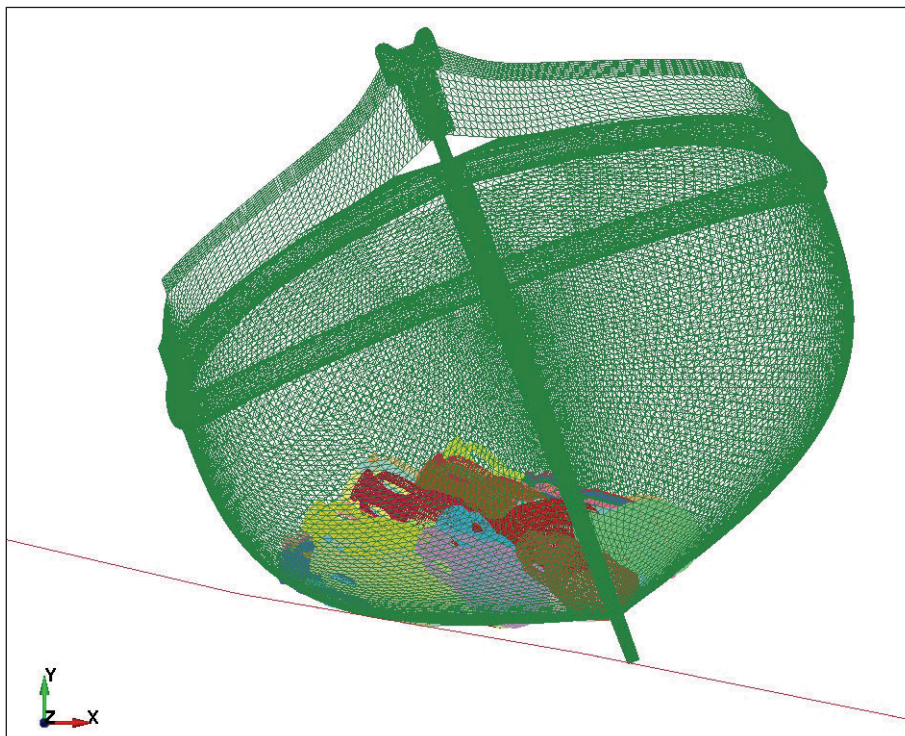
ship with cargo on the waves, presented in Fig. 5, were applied to the 3D ship and cargo model. In other words, the 3D ship and cargo model in the sinking simulation is constrained first to execute the motions from the 2D analysis. The reason for this was to study the more complex behaviour of the cargo, no longer restricted to just 3 degrees of freedom.

The constraints on the 3D model, i.e. the motions from the 2D model, were removed at  $t=18.8$  seconds, after which the ship was left to freely sink to the seabed. The time history of the ship sinking, i.e. the sway and heave motions, is presented in Fig. 8. Up to  $t=18.8$  seconds, the motions of the 3D sinking model are equal to the motions of the 2D floating model. However, after that time, sway due to the action of the waves is not possible as the ship is underwater, and the ship remains at approx. 15 metres from the initial position. At the same time, the ship sinks at a constant speed, as seen in Fig. 8 as straight line heave from approximately  $t=16$ s to  $t=33$ s, until it reaches the seabed at a depth of approx. 16 metres.

The resting position of the ship on the sea-

Potonuće započinje kad brod potone ispod površine vode u simulaciji. No prije toga, na 3D model broda i tereta primijenjena su gibanja određena za brod s teretom na valovima iz simulacije plutanja, prikazana na Sl. 5. Drugim riječima, 3D model broda i tereta u simulaciji potonuća prvotno je prisiljen izvesti gibanja iz analize plutanja na površini mora. Time se nastojalo proučiti složenije ponašanje tereta koji više nije ograničen na samo tri stupnja slobode gibanja.

Prisilna gibanja 3D modela, odnosno gibanja iz 2D modela, uklonjena su u vremenu  $t = 18,8$  sekundi, nakon čega je brod prepušten slobodnom potonuću na dno mora. Grafički prikaz promjene zanašanja i poniranja 3D modela vidljiv je na Sl. 8. Do vremena  $t = 18,8$  sekundi, gibanja 3D modela potonuća jednaka su gibanjima plutajućeg 2D modela. Međutim, nakon tog vremena, zanašanje uslijed djelovanja valova nije moguće jer je brod pod vodom te stoga do kraja simulacije ostaje na udaljenosti približno 15 metara od početnog položaja. Istodobno brod tone nepromjenjivom brzinom, vidljivo na Sl. 8. kao pravocrtno poniranje od približno  $t=16$  s do  $t=33$  s, dok ne



**FIGURE 9** *Sunken ship in resting position on the sloped sea bottom*  
**SLIKA 9.** *Potonuli brod u konačnom položaju na nagnutom morskom dnu*

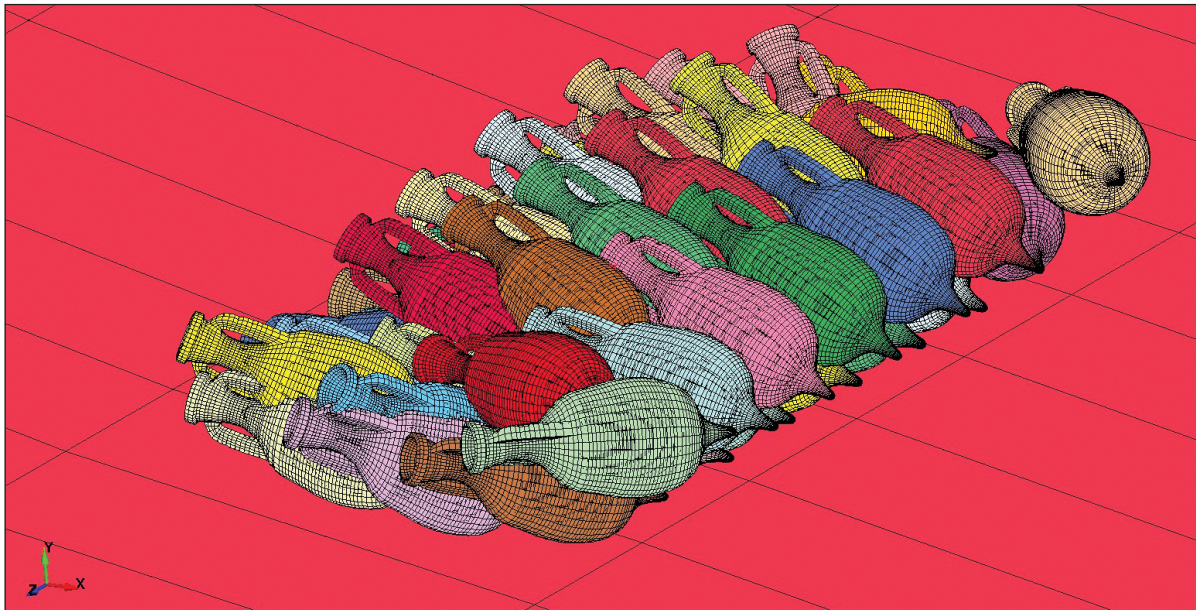


FIGURE 10 Final position of the ship's cargo – hull is removed from presentation

SLIKA 10. Konačan položaj broskog tereta – brodski trup je uklonjen iz prikaza

bed is presented in Fig. 9. It can be noted that the amphorae are lying toward the port side of the ship. Such a position of the amphorae in the (mostly empty) cargo space is the result of the action of the wave-induced motions. Once the ship touched the seabed, although the slope goes downward to the right, the equilibrium of the forces resulted in the ship rolling to the left. If the seabed or cargo hold and the cargo itself were more complex, the end result would be calculated accordingly. The ship does not slip further down the slope due to the rather large friction expected in the contact between the wooden hull and the rocky seabed typical along the east coast of the Adriatic Sea.

Cargo is commonly found on a wreck site and its quantity and layout on the seabed provides a source of valuable information about the ship and the shipwreck. Fig. 10 presents the layout of the amphorae when the ship hull is removed from the display. Due to the action of aging, most of the hull would eventually disappear. The situation in Fig. 10 presents the outcome of the analysed scenario. Note that the red background indicates the mesh of the seabed finite elements.

dosegne dno na dubini od približno 16 metara.

Položaj mirovanja broda na dnu mora prikazan je na Sl. 9. Zamjetno je da su amfore okrenute prema lijevom boku broda. Takav položaj amfora u (većinom praznom) prostoru za teret rezultat je gibanja broskog trupa izloženog djelovanju valova. Nakon što je brod dosegaio morsko dno, unatoč silaznom nagibu dna udesno, ravnoteža prisutnih sila uzrokovala je naginjanje broda ulijevo. Da su morsko dno ili brodsko skladište i sam teret bili složeniji, konačan bi se rezultat računao u skladu s tim. Brod ne klizi dublje po nagibu zahvaljujući prilično velikom trenju koje se očekuje u kontaktu drvenoga trupa i stjenovitoga morskog dna, tipičnog za istočnu obalu Jadranskog mora.

Teret je uobičajen nalaz na nalazištima brodoloma, a njegova količina i raspored na morskom dnu predstavljaju vrijedan izvor podataka o brodu i brodolomu. Na Sl. 10. prikazan je razmještaj amfora kad se ukloni prikaz trupa broda. Zbog starenja i erozije drvenih dijelova konstrukcije, najveći dio trupa naposljetku nestaje te situacija prikazana na Sl. 10. predstavlja ishod analiziranog tijeka događanja. Pritom valja istaknuti kako crvena pozadina prikazuje mrežu konačnih elemenata na morskom dnu.

## CONCLUSION

In the two-stage simulation of a ship capsizing and sinking, state-of-the-art engineering tools were applied. LS-Dyna software was used to perform a highly non-linear, fluid-structure interaction and contact problem analysis.

In the first part, a floating numerical model was created, enabling the simulation of sea surface events. In this case, numerous parameters may be varied: wave height, wave period, wave induced current, sea current, various cargo combinations, various dynamics of seawater penetration in the hull, etc. The result of the performed analysis is the realistic simulation of ship motions induced by the waves and the loss of ship stability in rough sea.

In the second part, a sinking numerical model was created in an attempt to explore the effects of the underwater environment, including sea currents, the buoyancy of the cargo, the slope and the composition of the seabed, etc., and to examine one of the possible situations in which the ship assumes final resting position.

The presented work has proven that complex events can be successfully modelled to provide a useful tool for exploring various floating, capsizing and sinking situations. In this way, through the comparison of simulation results with the traditional interpretation of archaeological evidence, the cause and dynamics of a specific shipwreck may be identified with high probability.

The described modelling process could be applied to test a working hypothesis formulated in accordance with the results of archaeological research, or to experiment with various factors until a result is obtained which corresponds to the archaeological record. As anticipated, this should be considered as the first step towards the more sophisticated modelling of shipwreck events, which could be subsequently extended to other interesting issues in nautical archaeology.

Four decades ago, Keith Muckelroy stated:

## ZAKLJUČAK

U simulaciji plutanja i potonuća broda izvedenoj u dvije faze primijenjene su najsvremenije tehnike modeliranja složenih fizikalnih problema. Softverski paket LS-Dyna omogućio je simulaciju visoko nelinearnog međudjelovanja tekućine i konstrukcije te analizu problema kontakta.

U prvom je dijelu izveden plutajući numerički model koji je omogućio simulaciju događaja na površini mora. U ovom dijelu moguće je odrediti brojne parametre kao što su: visina vala, period vala, jačina površinske morske struje izazvane valovima, jačina morske struje, različite kombinacije tereta, različita dinamika prodiranja morske vode u trup itd. Rezultat provedene analize realistična je simulacija gibanja broda izazvanih valovima i gubitak stabilnosti broda na uzburkanom moru.

U drugom dijelu izrađen je numerički model potonuća kako bi se istražilo učinke podvodnog okruženja uključujući morske struje, uzgon tereta, nagib i sastav morskoga dna i dr. te ispitao njihov utjecaj na moguće ishode u kojima brod zauzima svoj konačni položaj mirovanja.

Predstavljeni rad dokazuje kako je moguće uspješno izraditi modele složenih događaja koji tada mogu poslužiti kao koristan alat za istraživanje različitih situacija plutanja, prevrtanja i potonuća. Na taj način, korištenjem rezultata simulacije i tradicionalnog tumačenja arheoloških dokaza moguće je s velikom pouzdanošću razumjeti uzrok i dinamiku određenog brodoloma.

Opisani postupak izrade modela te opisana metodologija proračuna mogu se primijeniti za ispitivanje radne hipoteze formulirane u skladu s rezultatima arheoloških istraživanja ili za parametarsko numeričko istraživanje koje će u konačnici dati rezultat koji će biti u skladu s arheološkim dokazima. Opisani rad predstavlja prvi korak prema izradi sofisticiranijih modela brodoloma, a stečena saznanja mogu se proširiti i na ostale zanimljive teme iz područja arhe-

“The shipwreck is the event by which a highly organised and dynamic assemblage of artefacts are transformed into a static and disorganised state with long-term stability . . . If the various processes which have intervened between the two states can be identified and described, the researcher can begin to disentangle the evidence he has uncovered”.<sup>10</sup> Today, with the virtual modelling tools available, researchers can also test the physical requirements for the sustainability of their assumptions.

*Proof-reading: Mark Davies  
(for Etnotrend d. o. o.)*

ologije broda.

Pred četiri desetljeća, Keith Muckelroy je utvrdio: „Brodolom je događaj kojim se visoko organiziran i dinamičan sklop artefakata pretvara u statično i neorganizirano stanje dugoročne stabilnosti... Ako je moguće prepoznati i opisati različite procese koji su djelovali u vremenu između tih dvaju stanja, znanstvenik može početi nazrijevati koje je otkrio”<sup>10</sup>. Danas dostupni inženjerski alati omogućuju znanstvenicima ispitivanje fizikalnih uvjeta koji moraju biti ispunjeni za održivost njihovih pretpostavki.

*Prijevod: Nina Matetić Pelikan  
(Etnotrend d. o. o.)*

<sup>10</sup> K. MUCKELROY, 1978, 157.

<sup>10</sup> K. MUCKELROY, 1978, 157.

## REFERENCES / LITERATURA

- BURRILL, A. M., 1998. – Alexander Mansfield Burrill, *A New Law Dictionary and Glossary: Containing Full Definitions of the Principal Terms of the Common and Civil Law, Together with Translations and Explanations of the Various Technical Phrases in Different Languages, Occurring in the Ancient and Modern Reports, and Standard Treatises; Embracing Also All the Principal Common and Civil Law Maxims. Compiled on the Basis of Spelman's Glossary, and Adapted to the Jurisprudence of the United States; with Copious Illustrations, Critical and Historical (1<sup>st</sup> edn 1850-1851)*, Reprint of the first edition, The Lawbook Exchange, New York.
- GRABOVAC, I., 2003. – Ivo Grabovac, *Plovidbeno pravo Republike Hrvatske*, Književni krug, Split.
- JURIŠIĆ, M., 2000. – Mario Jurišić, *Ancient Shipwrecks of the Adriatic, maritime transport during the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> centuries AD*, BAR International Series 828, Archaeopress, Oxford.
- JURIŠIĆ, M., 2006. – Mario Jurišić, The maritime trade of the Roman province, *Dalmatia: Research in the Roman Province 1970-2001* (ur./eds.: D. Davison, V. Gaffney, E. Marin), BAR International Series 1576, Archaeopress, Oxford, 175–193.
- LEE, S. G., ZHAO, T., NAM, J. H., 2013. – Sang-Gab Lee, Tuo Zhao, Jae-Hyung Nam, Structural safety assessment of ship collision and grounding using FSI analysis technique, *Proceedings of the 6th International conference Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, Trondheim*, CRC Press, 197–204.
- MUCKELROY, K., 1978. – Keith Muckelroy, *Maritime archaeology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- RADIĆ ROSSI, I., 2012. – Irena Radić Rossi, Underwater Cultural Heritage and Maritime Archaeology in Croatia: An Overview, *European Journal of Archaeology*, 15.2, 285–308.
- RADIĆ ROSSI, I., 2014. – Irena Radić Rossi, Experience in Current Management of Underwater Cultural Heritage in Croatia; The Case of the Protective Cages, *Archaeologia Maritima Mediterranea. An International Journal on Underwater Archaeology*, 11, Pisa – Rome, 45–62.
- RUDAN, S., TABRI, K., KLARIĆ, I., 2010. – Smiljko Rudan, Kristjan Tabri, Ivan Klarić, Analysis of sloshing interaction in ship collisions by means of ALE finite element method, *Proceedings of 5th International Conference on Collision and Grounding of Ships, Espoo*, Aalto University, 229–234.
- RUDAN, S., VOLARIĆ, D., 2016. – Smiljko Rudan, Davor Volarić, Fluid structure interaction analysis of a ship collision, *Proceedings of the 7th International conference Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, Ulsan*, CRC Press, 183–190.
- STEFFY, J. R., 1994. – Richard J. Steffy, *Wooden Ship Building and the Interpretation of Shipwrecks*, Texas A&M University Press, College Station.

## INTERNET SOURCES / INTERNETSKI IZVORI

[http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/jim\\_ALE\\_for\\_MGD\\_18oct2010.pdf](http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/jim_ALE_for_MGD_18oct2010.pdf)

[http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/trent001/manuals/ls-dyna\\_theory\\_manual\\_2006.pdf](http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/trent001/manuals/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf)

