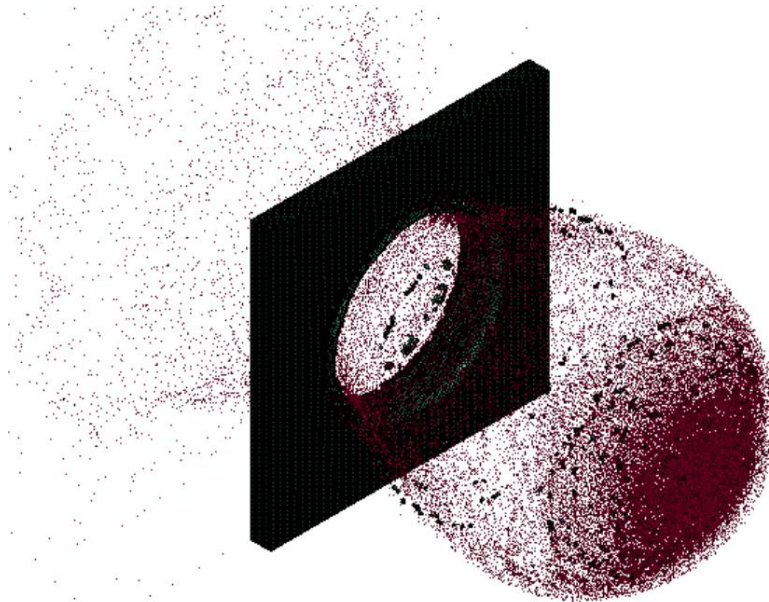




National Technical University of Athens
School of Civil Engineering
Institute of Steel Structures



Numerical Analysis of Hypervelocity Space Debris Impact on Spacecraft Whipple Shield



Postgraduate Thesis

Stavros Panagiotopoulos

EMK ME 2025 1

Supervisor: Prof. Charalampos Gantes

Co-Supervisor: Dr.-Ing. Stefanos Gkatzogiannis

Copyright © Σταύρος Παναγιωτόπουλος, 2025
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Stavros Panagiotopoulos, 2025
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Σταύρος Παναγιωτόπουλος (2025)
Numerical Analysis of Hypervelocity Space Debris Impact on Spacecraft Whipple Shield
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2025 1
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Stavros Panagiotopoulos (2025)
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2025 1
Numerical Analysis of Hypervelocity Space Debris Impact on Spacecraft Whipple Shield
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Acknowledgments

I would like to thank my parents, Ileana and Panagiotis, for inspiring and supporting me every step of the way during my academic efforts no matter the circumstances. Marina, who was always by my side, lifting my spirits, being most caring and thoughtful. My friend and colleague, Thanos with whom we cooperated flawlessly during our studies to complete any task at hand despite any adversities. Lastly, I would like to express my gratitude to Professor Gantes and Dr.-Ing. Gkatzogiannis for their valuable recommendations but also for allowing me to delve into such an interesting subject for my postgraduate thesis.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2025 1

Numerical Analysis of Hypervelocity Space Debris Impact on Spacecraft Whipple Shield

Σταύρος Παναγιωτόπουλος

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων (αν υπάρχει): Στέφανος Γκατζογιάννης, Ακαδημαϊκός Ερευνητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία επέκταση των διαστημικών δραστηριοτήτων έχει εντείνει τον κίνδυνο υπερταχυτικών συγκρούσεων (HVI) σε χαμηλή τροχιά της Γης (LEO), όπου οι συγκρούσεις με θραύσματα ή μικρομετεωρίτες σε ταχύτητες που ξεπερνούν τα 7 km/s απειλούν την ακεραιότητα των διαστημικών κατασκευών. Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη αριθμητική ανάλυση των φαινομένων HVI, εστιάζοντας στη δυναμική απόκριση λεπτών αλουμινένιων πλακών που υπόκεινται σε κρουστικά φορτία από σφαιρικά θραύσματα, χρησιμοποιώντας μια υβριδική προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων–σωματιδίων (FE-SPH).

Η μελέτη ακολουθεί τις μεθοδολογίες που περιγράφονται στη βιβλιογραφία, εφαρμόζοντας σύγχρονες αριθμητικές τεχνικές και επικυρώνοντας το σχηματισμό του νέφους θραυσμάτων, την διάδοση κυμάτων, την εξέλιξη της δυναμικής θραύσης και το σχηματισμό κρατήρων έναντι πειραματικών δεδομένων. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων συνδυάζει τη σταθερότητα των πεπερασμένων στοιχείων με την ευελιξία των SPH σωματιδίων για την καταγραφή του μηχανισμού θραύσης και των μεγάλων παραμορφώσεων, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση της ενέργειας και αντιμετωπίζοντας τα ζητήματα αστάθειας εφελκυσμού.

Τέσσερις πειραματικές περιπτώσεις εξετάστηκαν στο φάσμα ταχυτήτων 2,54–6,71 km/s, με σταθερή διάμετρο βλήματος και μεταβαλλόμενα πάχη πλακών. Οι αναλύσεις επέδειξαν πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και τις εμπειρικές μετρήσεις σε τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις, με μέσο σφάλμα 4,38% σε όλες τις μετρήσεις.

Παρά τη συνολική συνέπεια, παρατηρήθηκαν ορισμένες μεμονωμένες αποκλίσεις, κυρίως λόγω αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τη γεωμετρική μεθοδολογία αναζήτησης του αλγορίθμου παρακολούθησης του νέφους θραυσμάτων, καθώς και λόγω της διακριτοποίησης που εφαρμόστηκε εξαιτίας περιορισμένων υπολογιστικών πόρων. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για τον υπολογισμό συνολικής διαμόρφωσης κρατήρα αξιοποιώντας την χωρική κατανομή και τις βαλλιστικές αλληλεπιδράσεις μεμονωμένων θραυσμάτων, το οποίο ενσωματώνει μια χωρική συσχέτιση βάσει των φυσικών χαρακτηριστικών τους και κριτήρια του βαλλιστικών ορίων από την βιβλιογραφία. Το μοντέλο συγκρίθηκε με αριθμητικό προσομοίωμα και επέδειξε σχετικό σφάλμα 4,23% στην πρόβλεψη της τελικής διαμέτρου του κρατήρα.

Η υβριδική προσέγγιση FE-SPH αποδείχθηκε ανώτερη από τις ανεξάρτητες μεθόδους, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και φυσικής ακρίβειας. Καταγράφει επιτυχώς κρίσιμες μετρήσεις, όπως τη μορφολογία του νέφους και τα χαρακτηριστικά επικίνδυνων θραυσμάτων, ενώ αποφεύγει την απώλεια ενέργειας και τα προβλήματα αστάθειας που εμφανίζονται σε μοντέλα με καθαρά πεπερασμένα στοιχεία ή SPH.

Ωστόσο, οι επιδράσεις της μεταφοράς θερμότητας και οι αλλαγές φάσης υλικού παραλείφθηκαν λόγω περιορισμών υπολογιστικής ισχύος, και όλες οι προσομοιώσεις βασίστηκαν σε ορθή κρούση, παρά το γεγονός ότι οι κρούσεις υπό γωνία είναι πιο συχνές σε πραγματικές συνθήκες. Μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να επεκταθούν σε θερμο-μηχανικές αναλύσεις, λαμβάνοντας υπόψη καταστατικούς νόμους για την αλλαγή φάσης των υλικών, καθώς και σε περιπτώσεις κρούσεων υπό γωνία με σκοπό την βελτίωση της τρέχουσας πρακτικής.

Η συνεχής καινοτομία στις υπολογιστικές τεχνικές, σε συνδυασμό πειραματική έρευνα, θα είναι απαραίτητη για την προστασία της τροχιακής υποδομής σε ένα ολοένα και πιο πολυπληθές διαστημικό περιβάλλον.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



POSTGRADUATE THESIS
EMK ME 2025 1

Numerical Analysis of Hypervelocity Space Debris Impact on Spacecraft Whipple Shield

Stavros Panagiotopoulos

Supervisor: Prof. Charalampos Gantes
Co-supervisor: Dr.-Ing. Stefanos Gkatzogiannis

ABSTRACT

The rapid expansion of space activities has intensified the risk of hypervelocity impacts (HVI) in low Earth orbit (LEO), where collisions with debris or micrometeoroids at velocities exceeding 7 km/s threaten spacecraft integrity. This thesis presents a comprehensive numerical investigation into (HVI) phenomena, specifically examining the dynamic response of thin aluminum plates subjected to spherical projectile impacts by employing a hybrid finite element-smoothed particle hydrodynamics (FE-SPH) approach. The study closely adheres to the methodologies outlined in the literature, applying state of the art numerical techniques and validates debris cloud formation, wave propagation, fracture evolution, and crater formation against experimental work. The coupling of the two methods combines the stability of finite elements and the flexibility of SPH particles to capture fragmentation and large deformations, ensuring energy conservation while mitigating tensile instabilities. Four experimental cases were examined, in the velocity regime of (2.54-6.71 km/s), with a constant projectile diameter and varying plate thicknesses. The analyses demonstrated strong agreement with experimental X-ray imagery and empirical measurements in three of four cases, particularly in predicting debris cloud expansion, crater formation and dynamic fracture patterns with an average error of 4.38% across all measurements. Despite the overall consistency, a few isolated discrepancies were noted, mainly attributed to uncertainties inherent in the debris cloud tracking algorithm's geometric search methodology as well as mesh resolution due to hardware constraints. A crater aggregation model was developed to predict the spatial distribution and ballistic interactions of individual fragments, integrating kernel-weighted spatial association of their physical characteristics and ballistic limit criteria. Validated through a numerical experiment, the model demonstrated a 4.23% relative error in predicting the final crater diameter. The hybrid FE-SPH approach proved superior to standalone methods, balancing computational efficiency with physical accuracy. It successfully captured essential metrics, such as debris cloud morphology and residual fragment information, while avoiding energy loss and instability issues inherent in pure finite element or SPH models. However, heat transfer effects and phase transitions were omitted due to computational constraints, and all simulations assumed normal impacts despite the prevalence of oblique collisions in real-world scenarios. Future work should integrate thermal-structural analyses, advanced equations of state for phase transitions, and oblique impact studies to refine predictive capabilities. Continued innovation in computational techniques, coupled with experimental validation, will be essential to safeguarding orbital infrastructure in an increasingly congested space environment.