

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΏΝ

Διδακτορική Διατριβή

Γαλανάκης Μ. Δημήτριος

Αντίστροφη μηχανική στην Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων. Πολυδιάστατη ανάλυση, μηχανική μάθηση και μοντέλα θεμελίωσης για την αναγνώριση και εξαγωγή δομικών στοιχείων

Reverse engineering in Historic Building Information Modeling – HBIM. Multi-dimensional analysis, foundation models, machine learning, and deep learning models for mesh segmentation

Χανιά, 18 Μαρτίου 2025

Τίτλος (**ελληνικά** / ***αγγλικά***): Αντίστροφη μηχανική στην Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων. Πολυδιάστατη ανάλυση, μηχανική μάθηση και μοντέλα θεμελίωσης για την αναγνώριση και εξαγωγή δομικών στοιχείων / *Reverse engineering in Historic Building Information Modeling – HBIM. Multi-dimensional analysis, foundation models, machine learning, and deep learning for mesh segmentation*

Γαλανάκης Μ. Δημήτριος

Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την: ***18/ 3 / 2025***

Μαραβελάκης Εμμανουήλ	Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ (**Επιβλέπων**)	
Μπιλάλης Νικόλαος	Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή)	
Κωνσταντάρας Αντώνιος	Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ (Τριμελής Συμβουλευτική επιτροπή)	
Βιδάκης Νεκτάριος	Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ	
Σταυρουλάκης Γεώργιος	Καθηγητής Πολυτεχνείο Κρήτης	
Πετούσης Μάρκος	Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ	
Γιαννακάκης Γεώργιος	Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ	

Δημοσιεύσεις του Συγγραφέα

Galanakis, D., Maravelakis, E., Vidakis, N., Petousis, M., Konstantaras, A., & Pepe, M., Multidimensional analysis of HBIM Segmentation: A roadmap towards standardization. *Journal of Cultural Heritage* [submitted – in Journal of Cultural Heritage]

Galanakis, D., Maravelakis, E., Phaedra, D., Vidakis, N., Petousis, M., Konstantaras, A., & Tsakoumaki, M. (2023). SVD-based point cloud 3D stone by stone segmentation for cultural heritage structural analysis – The case of the Apollo Temple at Delphi. *Journal of Cultural Heritage*, 61, 177–187. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.04.005

Galanakis, D., Lucho, S., Maravelakis, E., Bolanakis, N., Konstantaras, A., Vidakis, N., Petousis, M., Treuillet, S., Desquesnes, X., & Brunetaud, X. (2024). Segment Anything Model for Scan-to-Structural Analysis in Cultural Heritage. *2024 5th International Conference in Electronic Engineering, Information Technology & Education (EEITE)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/eeite61750.2024.10654401

Galanakis,D. Pocobelli, P., D., Konstantaras, A., Mania, K., and Maravelakis,E., 2023, “Introduction to BIM for Heritage”, in D. Tzetzis & P. Kyratsis (Eds), *Computer-Aided Design: Advances in Research and Applications*, pp 23-42, DOI: https://doi.org/10.52305/IMIY7382

Galanakis, D., Maravelakis, E., Idjaton, K., Phaedra, D., Konstantaras, A., & Bolanakis, N. (2022). Stone by stone segmentation from the orthophoto to the 3D CAD model of a masonry façade. 2015, 2–7. *4th International Conference in Electronic Engineering, Information Technology & Education (EEITE2023)*, Chania, 2023.

Galanakis, D., Maravelakis, E., Konstantaras, A., D. Pocobelli, P., D., Bolanakis, N. (2022). MESH SEGMENTATION FOR HBIM APPLICATIONS in Cultural Heritage. *2022 3rd International Conference in Electronic Engineering, Information Technology & Education (EEITE)*. https://eeite2022.hmu.gr/eeite2022-proceedings-2/

Maravelakis E, Giannioti G, Psalti A, Tsakoumaki M, Pocobelli DP, Xinogalos M, **Galanakis** D, Bilalis N, Stavroulakis G. 3D Modeling & Analysis Techniques for the Apollo Temple in Delphi. *Buildings*. 2023; 13(7):1730. https://doi.org/10.3390/buildings13071730

Volanis, G., **Galanakis**, D., Bolanakis, N., Maravelakis, E., Borg, R. P., & Stavroulakis, G. E. (2024). Modelling and Stability Assessment of the Rock Cliffs and Xrobb l-Ġħaġin Neolithic Structure in Malta. *Heritage*, 7(6), 2944–2958. https://doi.org/10.3390/heritage7060138

Μέρος των δημοσιεύσεων υλοποιήθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών έργων:

3D4DELPHI - ΓΓΕΤ – Ειδικές Δράσεις «ΑΝΟΙΧΤΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΣΤΟΝ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟ» (ΕΣΠΑ 2014-2020), Κωδικός Έργου Τ6ΥΒΠ-00190, «Μοντελοποίηση αρχαιολογικής αβεβαιότητας με συνδυασμό σύγχρονων μεθόδων 3Δ αποτύπωσης για την επιστημονική τεκμηρίωση και ανάδειξη πολιτιστικής κληρονομιάς – Εφαρμογή στον αρχαιολογικό χώρο Δελφών» www.3d4delphi.gr

AI4HBIM - Πρόγραμμα Συνεργασιών Hubert Curien: “Αυτόματη αναγνώριση δομικών στοιχείων για εφαρμογές BIM και διάγνωσης μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και εικόνων

Lip3D – Living forever the Past through a 3Digital world - Πρόγραμμα Digital Europe Program

Malta Council for Science and Technology IPAS Program (Collaboration between Faculty for the Built Environment, University of Malta, Technical University of Crete and Hellenic Mediterranean University, Crete).

Ευχαριστίες

Στην διάρκεια της διδακτορικής διατριβής υπήρξαν πολλές καλές στιγμές αλλά και αρκετά εμπόδια και δυσκολίες. Ωστόσο, η αμέριστη στήριξη, σε όλους τους τομείς, πρωτίστως του επιβλέποντα Καθηγητού μου κ. Μαραβελάκη Εμμανουήλ και των Καθηγητών κ. Μπιλάλη Νικόλαο και κ. Κωνσταντάρα Αντώνιο, μελών της Τριμελούς Επιτροπής, των οποίων η καθοδήγηση και οι εύστοχες παρατηρήσεις συνετέλεσαν καθοριστικά στην επιτυχή περάτωση του ακαδημαϊκού μου έργου. Παράλληλα οφείλω να ευχαριστήσω τις αρχαιολόγους και επιστήμονες κα. Αθανασία Ψάλτη (Προϊσταμένη) και κα. Μαριλένα Τσακουμάκη από την Εφορεία Αρχαιοτήτων Φωκίδος για την παροχή των ειδικών τους γνώσεων τόσο στο κομμάτι της τεκμηρίωσης όσο και στην σωστή προοπτική του προβλήματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Σχεδιομελέτης, Κατεργασιών και Αυτοματισμών https://dma.hmu.gr/, του υποψήφιους διδάκτορες Μπολανάκη Νικόλαο και Βολάνη Γεώργιο τόσο για τις πολύτιμες γνώσεις τους όσο και για την αγαστή συνεργασία κατά την διάρκεια της διατριβής μου και να τους ευχηθώ να «ευδοκιμήσει» και το δικό τους ερευνητικό έργο.

Κλείνοντας με τις ευχαριστίες, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα την γυναίκα μου για την υπομονή που επέδειξε και τον υιό μου που υπήρξε ένα ισχυρό κίνητρο για να ολοκληρώσω αυτό το οποία ξεκίνησα σε σύγκρουση των πολλών άλλων καθημερινών μου υποχρεώσεων ως ενήλικας.

Αφιερωμένο στην κόρη μου...

Πρόλογος

Οι συνεχείς απαιτήσεις για αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων, έχει στρέψει το ενδιαφέρον των ερευνητικών, αρχιτεκτόνων και αρχαιολόγων στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογικών εργαλείων και δυνατοτήτων όπως είναι τα Μοντέλα Κτηριακής Πληροφορίας (ΜΚΠ) ;ή Building Information Modelling (BIM) για την αντίστροφη μηχανική των κτηρίων Πολιτιστικής Κληρονομίας. Εν πολλοίς η νέα αυτή τεχνολογία βασίζεται στην ανάπτυξη των επίγειων σαρωτών LASER που επιτρέπουν την μαζική λήψη χωρικών δεδομένων σε πολύ μικρό χρόνο και με αρκετά μεγάλη αξιοπιστία καθώς και στην ανάπτυξη του κλάδου της φωτογραμμετρίας που δίδει πλέον την δυνατότητα ανακατασκευής της 3Δ γεωμετρίας ενός μνημείου με χρήση φωτογραφικού υλικού.

Η μετεξέλιξη του BIM σε HBIM (Heritage - BIM) που εξειδικεύεται σε Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΠΚ) εάν και συστήνεται αρχικά το 2009, παραμένει ακόμα και σήμερα ζητούμενο λόγω της πολυπλοκότητας των αρχαιολογικών και πολιτιστικών εκθεμάτων τα οποία τείνουν να αποκλίνουν από την «γραμμή παραγωγής» των νέων και υπό ανέγερση κτηριακών υποδομών. Ως εκ τούτου, το βάρος της έρευνας έχει μετατοπιστεί από τον χώρο της λήψης των 3Δ δεδομένων και εστιάζει σήμερα στην ενσωμάτωση νέων αλγορίθμων αυτόματης αναγνώρισης αντικειμένων και χαρακτηριστικών των φυσικών αντικειμένων κυρίως μέσω αλγορίθμων από τον χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης και των Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων – ΣΝΔ (Convolutional Neural Networks - CNNs) τα οποία έχουν επιδείξει σημαντικά θετικά αποτελέσματα στον δισδιάστατο χώρο.

Στην παρούσα διατριβή διενεργείται μία διεξοδική βιβλιογραφική επισκόπηση η οποία ακολουθεί ένα μεικτό ερευνητικό σχήμα επιχειρώντας να αποκωδικοποιήσει τις βέλτιστες πρακτικές κατάτμησης του νέφους σημείων, που αποτελεί και το βασικότερο βήμα στην αυτοματοποιημένη αναγνώριση δομικών στοιχείων. Έπειτα με βάση και τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης συστήνονται και ελέγχονται δύο νέες καινοτόμες τεχνολογίες οι οποίες ευθυγραμμίζονται σε μία λογική ανάπτυξης εφαρμογών με σημαντικό βαθμό γενίκευσης, ιχνηλασιμότητα, προτυποποίηση και διαχρονικότητα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Abstract i

Περίληψη iv

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή 1

1.1. Η Μοντελοποίηση Κτηριακής Πληροφορίας (ΜΚΠ) για Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΚΠ) 1

1.2. Σάρωση-προς-ΜΚΠ και αντίστροφη μηχανική (Scan-to-BIM) 2

1.2.1. Απόκτηση δεδομένων 3

1.2.2. Επίγειοι Σαρωτές LASER 4

1.2.3. Δεδομένα που παράγονται με ΣμηΕΑ (UAVs) 4

1.3. 3Δ Μοντελοποίηση και ανασύνθεση μνημείου 5

1.4. Εγγενή εμπόδια & προκλήσεις στον χώρο της αντίστροφης μοντελοποίησης για ΜΠΙΚ (HBIM) εφαρμογές 6

1.5. Προοπτικές των συστημάτων ΜΚΠ στην διαχείριση και συντήρηση της Πολιτιστικής Κληρονομίας 7

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση 9

2.1. ΜΠΙΚ (H-BIM) για ΕΠΚ 9

2.2. Νέφη σημείων (Point Cloud) και κατάτμηση πλέγματος(Mesh Segmentation) 10

2.2.1. Κατάτμηση για εφαρμογές ΜΠΙΚ (HBIM Segmentation) 10

2.2.2. Κατάτμηση λίθο-προς-λίθο (Stone-by-stone segmentation) 12

2.2.3. Η περίπτωση του Ναού του Απόλλωνα 14

2.2.4. Η περίπτωση του Μεγαλιθικού Ναού στην Μάλτα 15

2.3. Φάσμα διαφορετικών ΕΠΚ 18

2.3.1. Εφαρμογή του BIM και HBIM για σκοπούς συντήρησης και αποκατάστασης 20

2.3.2. Εφαρμογές HBIM στον τομέα της διαχείρισης (Facility Management - FM) 21

2.3.3. Εφαρμογές HBIM για παρακολούθηση κα επιθεώρηση 22

2.3.4. Εφαρμογές HBIM σε δομικές προσομοιώσεις 22

2.3.5. Εφαρμογές HBIM για εικονικές ανακατασκευές (AR / VR / XR / DT) 23

2.3.6. HBIM για τη μοντελοποίηση της αρχαιολογικής αβεβαιότητας 24

2.4. Πλεονεκτήματα & Περιορισμοί Συστημάτων Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ) 25
2.5. Σημεία καμπής στην ανάπτυξη μοντέλων HBIM 27
Κεφάλαιο 3. Ερευνητικό κενό 28
3.1. Μεθοδολογία ΜΚΙΠ (HBIM) και προκλήσεις στον χώρο της μοντελοποίησης για εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομιάς 28
Αναλυτικά τα ερευνητικά ερωτήματα που καθοδηγούν την έρευνα: 29
4. Πολυδιάστατη ανάλυση των μεθοδολογικών εφαρμογών για ΜΚΠ Ιστορικών Κτηρίων 31
4.1. Μεικτή Ερευνητική στρατηγική 31
4.2. Ποιοτική έρευνα 32
4.2.1. Εντοπισμός Βιβλιογραφίας (Literature identification) 32
4.2.2. Κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού ερευνητικών άρθρων 35
4.2.3. Θεματική ανάλυση 40
4. 3. Ποσοτική ανάλυση 43
4.4. Αποτελέσματα ποσοτικής ανάλυσης 45
4.4.1. Διάγραμμα Biplot 46
4.4.2. Ιεραρχική ομαδοποίηση 48
4.4.3. Δημιουργία γραφημάτων κοινών μεθοδολογικών χαρακτηριστικών / ανά συστάδα εφαρμογών 50
4.4.4. Δυσκολίες και προκλήσεις στο σύνολο των μελετών 57
Κεφάλαιο 5. Μεθοδολογική προσέγγιση – Μοντέλα Θεμελίωσης (Foundation Models) στην ανάλυση των μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομίας 68
5.1. Το μοντέλο Segment Anything Model – SAM της Meta AI 68
5.2. Πολιτιστική Κληρονομιά των Χανίων, Περιγραφή των αρχαιολογικών χώρων 71
5.2.1. Άπτερα 71
5.2.2. Βενετσιάνικος φάρος 72
5.2.3. Πύλη Sabbionara 72
5.2.4. Τάφοι Βενιζέλου 72
5.3. Πολιτιστική Κληρονομία σε διεθνές επίπεδο – Μνημεία Αναγεννησιακού Ρυθμού από την περιοχή της Γαλλίας 73
5.3.1. Château de Chaumont 73
5.3.2. Château de Chambord 73

Κεφάλαιο 6. Μεθοδολογική προσέγγιση – Η Ανάλυση Ιδιαζουσών Τιμών (Singular Value Decomposition – SVD) στον αρχαιολογικός χώρου των Δελφών 75
6.1. Ανάλυση και αποσύνδεση σε επίπεδο θεμελιωδών δομικών στοιχείων (Stone-by-Stone Segmentation) 75
6.2. Ο χώρος των Δελφών 77
6.3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός - Developed methodology 79
6.3.2. Εξαγωγή αντικειμένων ίδιας κλάσης - Instance Segmentation 81
6.3.3. Εκτίμηση μαθηματικών παραμέτρων - Parameter Estimation 84
6.3.4. Εντοπισμός σημείων τομής - Joint detection 87
6.4. Μετατροπή από νέφος σημείων σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων - Cloud2FEM 89
Κεφάλαιο 7. Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων 90
7.1. Μοντέλα θεμελίωσης και ΕΠΚ 90
7.2. Ανάλυση SVD στο μνημείο των Δελφών 97
7.3. Συνδυαστική ανάλυση αποτελεσμάτων 101
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα 106
Περιορισμοί – Μελλοντική έρευνα 111
Βιβλιογραφία 112

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Εικόνα από το σημείο του μεγαλιθικού ναού Xrobb l-Ghagin. 17
Εικόνα 2. Μοντέλο Jeddah Historical Building Information Modelling - JHBIM από την Τζέντα της Σαουδικής Αραβίας. 19
Εικόνα 3. Υπέρθεση παραμόρφωσης (deformation) μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού αντικειμένου από την δημοσίευση των (Paris et al., 2022).. 20
Εικόνα 4. «Work of orders» των Cheng et al., (2020).. 21
Εικόνα 5. Πολυτροπική ανάλυση του Ναού του Απόλλωνα. 23
Εικόνα 6. Χρήση Επαυξημένης πραγματικότητας επί του πεδίου. 24
Εικόνα 7. Η διαχείριση της αρχαιολογικής αβεβαιότητας, η υπόθεση του Θησαυρού των Αθηναίων (Mania et al., 2021). 25
Εικόνα 8. Μεθοδολογία συγκέντρωσης και ανάλυσης μεικτών ερευνητικών δεδομένων. 33
Εικόνα 9. Θεματική ανάλυση κατά τους Naeem et al., (2023).. 42
Εικόνα 10. Έλεγχος επίδρασης τιμών μεταβλητών με μικρή εκπροσώπηση στο δείγμα , με την μέθοδο MCA. 44
Εικόνα 11. Διάγραμμα Biplot, των αποτελεσμάτων της ανάλυσης CA. 48
Εικόνα 12. Εξαγωγή ομάδων από ιεραρχικά δέντρα, με χρήση της συνάρτησης hclust και της μεθόδου αποστάσεων "ward.D". 49
Εικόνα 13. Κανόνας του «Elbow» (Dhalmahapatra et al., 2019). 50
Εικόνα 14. Διαγράμματα αράχνης (ραντάρ) που απεικονίζουν τις μεθοδολογικές παραμέτρους, έτσι όπως αυτές συγκεντρώνονται ανά συστάδα εφαρμογών. 52
Εικόνα 15. Κατανομή των προκλήσεων ανά συστάδα ΕΠΚ. 54
Εικόνα 16. Διάγραμμα συχνοτήτων προβλημάτων όπως αυτά ανέκυψαν από την θεματική ανάλυση. 58
Εικόνα 17. Διάγραμμα συχνοτήτων προκλήσεων με βάση την θεματική ανάλυση. 59
Εικόνα 18. Πολικό διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τις σχέσεις μεταξύ της μεθόδου κατάτμησης του νέφους ανά προτιμητέα εφαρμογή. 59
Εικόνα 19. Αντιπροσωπευτικά στοιχεία Πολιτιστικής Κληρονομίας από τον Ελληνικό και Διεθνή χώρο (Γαλλία). 71
Εικόνα 20. Αρχαιολογικός χώρος των Δελφών. 77
Εικόνα 21. Ο Ναός του Απόλλωνα στον αρχαιολογικό χώρο των Δελφών. 78
Εικόνα 22. Πειραματικός σχεδιασμός για την κατάτμηση της 3Δ επιφάνειας σε επίπεδο θεμελιωδών στοιχείων. 81
Εικόνα 23. Κατανομή σημείων κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα Z. 82
Εικόνα 24. Μεθοδολογία διαμερισμού ομαδοποίησης με χρήση του αλγορίθμου K-means. 84
Εικόνα 25. Εκτίμηση παραμέτρων για την μετατροπή των αντικειμένων σε παραμετρικά μοντέλα. 86

Εικόνα 26. Ανίχνευση των σημείων τομής (τοποθέτησης) των λίθινων τυμπάνων που συνιστούν τους κίονες του ναού.. 88
Εικόνα 27. Εκτέλεση του μοντέλου SAM στον αρχαιολογικό χώρο της αρχαίας Απτέρας. 91
Εικόνα 28. Χωρική ανάλυση και διακριτική ικανότητα του μοντέλου Segment Anything SAM. 92
Εικόνα 29. Εκτέλεση του μοντέλου SAM σε διαφορετικές περιπτώσεις φωτισμού, βλάστησης και τειχοποιίας. 93
Εικόνα 30. Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομίας από την Περιοχή της Γαλλίας. 95
Εικόνα 31. Château de Chambord : 96
Εικόνα 32. Η αυτόματη κατάτμηση αντικειμένων ελέγχεται σε σχέση με την εγκυρότητα με την οποία γίνεται αυτή η κατάτμηση. 97
Εικόνα 33. Αποτελέσματα της μεθόδου εξαγωγής των θεμελιωδών δομικών στοιχείων με την μεθοδολογία SVD..... 98
Εικόνα 34. Ραβδόγραμμα ΕΠΚ σε σχέση με το τελικό επίπεδο ΠΠ (LOD).. 102
Εικόνα 35. Πολικό διάγραμμα που απεικονίζει τις διάφορες μεθόδους κατάτμησης σε αντιπαραβολή με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την συλλογή των πρωτογενών δεδομένων..... 103
Εικόνα 36. Πολικό διάγραμμα που εμφανίζει τις διάφορες μεθόδους κατάτμησης του νέφους ή πλέγματος σε σχέση με την τεχνική λήψης των δεδομένων.. 105

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Πίνακας Εντοπισμού Βιβλιογραφίας & Λειτουργικοί Ορισμοί.....35
Πίνακας 2. Λέξεις-κλειδιά ομαδοποιημένες ανά συστάδα εφαρμογών.....55
Πίνακας 3. Εκτίμηση ακρίβειας αλγορίθμου SVD για την λίθο-προς-λίθο κατάτμηση του πολυγωνικού πλέγματος των κιόνων του ναού 101

Συντομογραφίες στα Αγγλικά

CA	Correspondence Analysis
GIS	Geographic Information Systems
AECO	Architecture, Engineering, Construction & Operations
AMS	Asset Management System
BIM	Building Information Modelling
CAD	Computer Aided Design
CH	Cultural Heritage
CLIP	Contrastive Language-Image Pre-Training
CNN	Convolutional Neural Networks
CWT	Continuous Wavelet Transform
DEM	Digital Elevation Models
DGCNN	Dynamic Graph Convolutional Neural Network
DL	Deep Learning
FEM	Finite Element Modelling
GIS	Geographic Information Systems
HC	Hierarchical Clustering
IFC	Industry Foundation Classes
IMG	Image
IoT	Internet-of-Things
IRRL	Irrelevant
JHBIM	Jeddah Historic Building Information Modelling
LOD	Level of development
LOM	Level of Maturity
MCA	Multiple Correspondence Analysis
ML	Machine Learning
MLMR	Multi-Layer Multi-Resolution
MVS	Multi-View Stereo
NA	Non Available
OOP	Object Oriented Programming
PC	Point cloud
PCA	Principal Component Analysis
RANSAC	Random Sample Consensus
RF	Rando Forrest
SAM	Segment Anything Model
SEG	Segmentation
SEM	Semantization
SfM	Structure-from-motion
SVD	Singular Value Decomposition
TLS	Terrestrial LASER Scanner
UAVs	Unmanned Aerial Vehicle
ViT	Visual Transformers

VR	Virtual Reality
WSS	Within Sum of Squares
HBIM	Historic Building Information Modelling

Συντομογραφίες στα Ελληνικά

ΒΜ	Βαθιά Μάθηση
ΔΣΝΔ	Δυναμικά Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα
ΕΠΚ	Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας
ΜΚΠ	Μοντελοποίηση Κτηριακής Πληροφορίας
ΜΜ	Μηχανική Μάθηση
ΜΠΙΚ	Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτηρίων
ΠΠ	Πληρότητα Πληροφορίας
ΤΝ	Τεχνητή Νοημοσύνη

Abstract

The primary objective of this study is to present a comprehensive roadmap for HBIM segmentation that facilitates the integration of various methodologies while allowing for a transparent understanding of the steps involved in the segmentation pipeline. To achieve this, at the preamble of this research, the significance of employing a mixed-mode research strategy is highlighted, by integrating both qualitative and quantitative approaches, and developing segmentation tools that require no a-priori knowledge of the scene while embracing the open-source idea. The challenges posed by HBIM stem from its inherent complexity, mainly related to the variations in Level of Detail (LOD) across applications. As a result, this work aims to engage researchers and practitioners by offering well-tested tools and methodologies that support effective segmentation tailored to the specific needs of cultural heritage artifacts

Section two discloses contemporary literature findings regarding the diversity of different applications being developed under the HBIM framework. In the next step, automations are investigated through the lens of segmentation which is the most crucial stem in automatic object detection and classification. Finally, at the end of this comprehensive introduction, chapter three explicitly states research objectives consolidating thus the scope of this research aim. Emphasis is being given to persistent challenges and difficulties which seem to decelerate further expansion of the BIM notion towards Cultural Heritage (CH) inclined approaches.

Correspondence analysis (CA) and hierarchical clustering (HC) are introduced in chapter four which are then utilized in conjunction with thematic analysis (Content analysis) to dissect and classify the unique characteristics of various HBIM applications. Through this mixed-methods framework, we systematically investigate the segmentation parameters associated with HBIM, including data capturing technologies technology, input type, machine learning (ML) or deep learning (DL) integration, and Level of Development or Level of Maturity. We outline a structured end-to-end methodological framework that not only addresses the typical challenges faced in HBIM implementations but also ensures a degree of transferability and traceability across different projects.

To facilitate transparency and traceability, statistical inference is utilized in R, an open-source statistical software package, which played a pivotal role in conducting the correspondence analysis and hierarchical clustering. By employing packages like FactoMineR, comprehensive analysis is executed yielding back insights into the relationships and features inherent in diverse HBIM applications. Key findings of contemporary literature reveal significant barriers that impede the widespread acceptance of HBIM within the Cultural

Heritage (CH) domain. Many existing studies tend to examine specific aspects of HBIM without fully addressing the holistic picture needed for effective integration. As a result, our findings suggest that there is a critical need for standardized workflows and protocols that unify the diverse definitions existing in this domain, as in the case of the Level of Detail (LOD) that currently exists in the BIM sector but varies in the CH landscape.

Chapter five introduces the latest unsupervised segmentation tool under the name of Segment Anything Model (SAM), which is proposed by META AI as a vital multi-purpose segmentation tool for cultural heritage (CH) applications. SAM's advanced capabilities in zero-shot segmentation have the potential to enhance scan-to-structural analysis, reaching stone-level accuracies in complex scenes and addressing the inherent complexities associated with heritage artifacts. The research methodology employs SAM for semantic segmentation tasks across various cultural heritage scenarios, typical in the context of CH. The developed workflow facilitates the transition from raw data to structured, parametric representations within BIM environments. Key findings from the research underscore SAM's impressive performance in complex scene understanding and its zero-shot segmentation ability, confirming its value in automating detection, either for segmentation or other automated related tasks such as defect detection and classification in cultural assets. The model's propensity to focus on small objects offers significant promise for identifying subtle features in cultural heritage artifacts that may otherwise go unnoticed using conventional methods. Furthermore, the study highlights the model's adaptability and generalizability across varying spatial resolutions, allowing for effective background separation and accurate segmentation outcomes.

Singular Value Decomposition (SVD), a well-established mathematical tool, is discussed in chapter six which then utilized for Stone-by-Stone segmentation in the case of Apollo Temple at Delphi. This approach meticulously dissects point cloud data from a 3D textured temple model, allowing for granular classification of individual stone components—essential for accurately representing complex cultural artifacts in an optimized lightweight format. In the analysis phase, advanced software tools were employed to assist in implementing the segmentation and reconstruction processes. The proposed method comprises a two-step experimental design: first, instance segmentation extracts recurrent architectural elements and SVD decomposes these elements to achieve stone-level precision. Scrip was implanted in Python, using several packages, including TensorFlow for model development and Open3D for point cloud processing. The research incorporates a finite element method (FEM) approach to create watertight, FEM-condensed meshes, enabling accurate representations of the structure's topology.

Key findings, summarized and discussed in chapters seven and eight, indicate that the developed segmentation framework enhances the modeling of complex historical sites and significantly reduces the computational resources required for annotation while also fostering more versatile integrations with FEM software, ultimately addressing existing bottlenecks in 3D surveying and Building Information Modeling (HBIM) identified in literature review. Overall, this work contributes to both the digital preservation of cultural heritage and the optimization of segmentation tasks in heritage-related machine learning and deep learning applications.

Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να παρουσιάσει έναν ολοκληρωμένο χάρτη πορείας για την κατάτμηση 3Δ δεδομένων για Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ), ο οποίος διευκολύνει την ενσωμάτωση διαφόρων μεθοδολογιών, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διαφανή κατανόηση των βημάτων που εμπλέκονται στον κατάτμηση του νέφους σημείων. Για να επιτευχθεί ο ανωτέρω στόχος, αρχικά τεκμηριώνεται η σημασία της υιοθέτησης μιας μεικτής ερευνητικής στρατηγικής, με ενσωμάτωση τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών προσεγγίσεων και της ανάπτυξης εργαλείων τμηματοποίησης που δεν απαιτούν εκ των προτέρων γνώση της σκηνής, ενώ παράλληλα ενστερνίζονται την ιδέα του ανοικτού κώδικα. Οι προκλήσεις που θέτει το HBIM απορρέουν από την εγγενή πολυπλοκότητά του, η οποία σχετίζεται κυρίως με τις διαφοροποιήσεις στο επίπεδο της φέρουσας αναπαραστατικής λεπτομέρειας (Level of detail ή Level of Development LOD) των τελικών εφαρμογών. Ως αποτέλεσμα, η παρούσα εργασία στοχεύει να εμπλέξει ερευνητές και επαγγελματίες προσφέροντας καλά δοκιμασμένα εργαλεία και μεθοδολογίες που υποστηρίζουν την αποτελεσματική κατάτμηση προσαρμοσμένη στις ειδικές ανάγκες των αντικειμένων Πολιτιστικής Κληρονομιάς (ΠΚ).

Στο κεφάλαιο δύο εντοπίζεται η βιβλιογραφική επισκόπηση η οποία αρχικά εντοπίζει και παραθέτει τις βασικές Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΠΚ) των συστημάτων Μοντελοποίησης Πληροφοριών Ιστορικών Κτηρίων (ΜΠΙΚ) και στην συνέχεια εστιάζει στους αλγορίθμους αυτοματοποίησης για την εξαγωγή και την κατηγοριοποίηση των δομικών αντικειμένων εντός του νέφους σημείων. Τέλος, κλείνοντας με τα εισαγωγικά κεφάλαια, το κεφάλαιο τρία επισημαίνει το ερευνητικό κενό και θέτει με σαφήνεια τα ερευνητικά ερωτήματα που καθοδηγούν την παρούσα διατριβή. Μεταξύ άλλων τα βασικά ερωτήματα αφορούν στις επιμένουσες προκλήσεις στον χώρο της μοντελοποίησης για ΕΠΚ καθώς και στις βασικές δυσκολίες που αντιμετωπίζει η περαιτέρω ενσωμάτωση του κλάδου.

Στο κεφάλαιο τέσσερα, η Ανάλυση των Αντιστοιχιών (Correspondence Analysis) και η ιεραρχική ομαδοποίηση (Hierarchical Clustering) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τη θεματική ανάλυση (Thematic Analysis) για την ανάλυση και ταξινόμηση των μοναδικών χαρακτηριστικών των διαφόρων εφαρμογών ΜΠΙΚ. Μέσω αυτού του πλαισίου μεικτών μεθόδων, διερευνούμε συστηματικά τις παραμέτρους κατάτμησης που σχετίζονται με το HBIM, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας συλλογής δεδομένων, του τύπου εισόδου, της ενσωμάτωσης μηχανικής μάθησης (ML) ή βαθιάς μάθησης (DL) και του επιπέδου Πληρότητας Πληροφορίας (LOD) ή του επιπέδου ωριμότητας (LoM)). Σκιαγραφούμε ένα δομημένο, από άκρη σε άκρη, μεθοδολογικό πλαίσιο που όχι μόνο

αντιμετωπίζει τις τυπικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι υλοποιήσεις HBIM, αλλά και διασφαλίζει έναν βαθμό μεταφερσιμότητας και ιχνηλασιμότητας σε διάφορα έργα.

Προς επίρρωση της διαφάνειας και της ιχνηλασιμότητας (traceabliity), στην στατιστική ανάλυση χρησιμοποιείται η γλώσσα R, ένα στατιστικό πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα, το οποίο έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διεξαγωγή της ανάλυσης αντιστοιχίας και της ιεραρχικής ομαδοποίησης. Χρησιμοποιώντας πακέτα όπως το FactoMineR, κατέστη δυνατή η διεξοδική ανάλυση επί μεικτών δεδομένων αποκαλύπτοντας πληροφορίες σχετικά με τις σχέσεις και τα χαρακτηριστικά που ενυπάρχουν σε διαφορετικές εφαρμογές HBIM. Τα βασικά ευρήματα της σύγχρονης βιβλιογραφίας αποκαλύπτουν σημαντικά εμπόδια που εμποδίζουν την ευρεία επέκταση της ιδέας των μοντέλων HBIM στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς (CH). Πολλές υπάρχουσες μελέτες τείνουν να εξετάζουν συγκεκριμένες πτυχές του HBIM χωρίς να αντιμετωπίζουν ολιστικά την εικόνα που απαιτείται για την αποτελεσματική ενσωμάτωση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Ως αποτέλεσμα, τα ευρήματά μας υποδηλώνουν ότι υπάρχει κρίσιμη ανάγκη για τυποποιημένες ροές εργασίας και πρωτόκολλα που ενοποιούν τους διαφορετικούς ορισμούς και προσεγγίσεις που υπάρχουν σε αυτόν τον τομέα, όπως χαρακτηριστικά η περίπτωση του επιπέδου Πληρότητας Πληροφορίας – ΠΠ (LOD) που σήμερα είναι πλήρως ορισμένο μόνο στις εφαρμογές BIM, αλλά ποικίλλει στο τοπίο της Πολιτιστικής Κληρονομίας.

Στο κεφάλαιο πέντε, το Segment Anything Model (SAM), που προτείνεται από την META AI, παρουσιάζεται ως ένα ζωτικής σημασίας εργαλείο τμηματοποίησης πολλαπλών χρήσεων για εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομιάς (CH). Οι προηγμένες δυνατότητες του SAM στην τμηματοποίηση μηδενικών λήψεων (Zero-Shot) έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την ανάλυση από τη σάρωση στη δομή, επιτυγχάνοντας ακρίβεια επιπέδου ξεχωριστών δομικών στοιχείων (λίθων) σε πολύπλοκες σκηνές, αντιμετωπίζοντας έτσι τις εγγενείς δυσκολίες που σχετίζονται με τα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς. Η ερευνητική μεθοδολογία χρησιμοποιεί το SAM για εργασίες κατάτμησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού σε διάφορα σενάρια πολιτιστικής κληρονομιάς, τυπικά στο πλαίσιο της ΠΚ. Το προτεινόμενο πλαίσιο που αναπτύχθηκε διευκολύνει τη μετάβαση από τα ακατέργαστα δεδομένα σε δομημένες, παραμετρικές αναπαραστάσεις σε περιβάλλοντα BIM. Τα βασικά ευρήματα της έρευνας υπογραμμίζουν τις αρκετά ικανοποιητικές επιδόσεις του SAM στην κατανόηση σύνθετων σκηνών και την ικανότητα τμηματοποίησης με μηδενική λήψη, επιβεβαιώνοντας την αξία του στην αυτοματοποίηση της ανίχνευσης, είτε για την τμηματοποίηση είτε για άλλες αυτοματοποιημένες εργασίες, όπως η ανίχνευση ελαττωμάτων και η ταξινόμηση των φθορών σε Εφαρμογές διαχείρισης της Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΠΚ). Η τάση του μοντέλου να εστιάζει σε μικρά αντικείμενα υπόσχεται πολλά για τον εντοπισμό

λεπτών χαρακτηριστικών σε αντικείμενα ΠΚ που διαφορετικά μπορεί να περάσουν απαρατήρητα με τη χρήση συμβατικών μεθόδων. Επιπλέον, η μελέτη αναδεικνύει την προσαρμοστικότητα και τη γενικευσιμότητα του μοντέλου σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του φόντου και τα ακριβή αποτελέσματα τμηματοποίησης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, η Ανάλυση ή Παραγοντοποίηση Ιδιαζουσών Τιμών (Singular Value Decomposition - SVD), ένα καθιερωμένο μαθηματικό εργαλείο, χρησιμοποιείται για την κατάτμηση λίθο-προς-λίθο (Stone-by-stone) στην περίπτωση του ναού του Απόλλωνα στους Δελφούς. Αυτή η προσέγγιση αναλύει σχολαστικά τα δεδομένα νέφους σημείων από ένα τρισδιάστατο μοντέλο ναού με υφή, επιτρέποντας την ταξινόμηση των επιμέρους στοιχείων σε επίπεδο ξεχωριστής λίθου - απαραίτητη για την ακριβή αναπαράσταση σύνθετων πολιτιστικών τεχνουργημάτων σε βελτιστοποιημένη (optimized) και διαχειρίσιιμη (manageable) υπολογιστικά μορφή. Στη φάση της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν προηγμένα εργαλεία λογισμικού για να βοηθήσουν στην εφαρμογή των διαδικασιών τμηματοποίησης και ανακατασκευής. Η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει έναν πειραματικό σχεδιασμό δύο βημάτων: πρώτα, η τμηματοποίηση των κιόνων (Instance Segmentation) η οποία και εξάγει κυκλικά όλα τα παρόμοια αρχιτεκτονικά στοιχεία και στην συνέχεια, η SVD η οποία και αποσυνθέτει αυτά τα στοιχεία για να επιτευχθεί ακρίβεια σε επίπεδο λίθων. Το πρόγραμμα υλοποιείται στην γλώσσα Python, χρησιμοποιώντας διάφορα πακέτα, συμπεριλαμβανομένου του TensorFlow για την ανάπτυξη μοντέλων και του Open3D για την επεξεργασία νέφους σημείων. Η έρευνα ενσωματώνει μια προσέγγιση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για τη δημιουργία υδατοστεγών, συμπυκνωμένων με FEM πλεγμάτων, επιτρέποντας ακριβείς αναπαραστάσεις της τοπολογίας της δομής.

Τα βασικά ευρήματα, που παρουσιάζονται και αναλύονται στα κεφάλαια επτά και οκτώ, δείχνουν ότι το πλαίσιο τμηματοποίησης που αναπτύχθηκε βελτιώνει τη μοντελοποίηση σύνθετων ιστορικών χώρων και μειώνει σημαντικά τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για τον σχολιασμό, ενώ παράλληλα προωθεί πιο ευέλικτες ενσωματώσεις με λογισμικό FEM, αντιμετωπίζοντας τελικά τις υφιστάμενες δυσχέρειες στην τρισδιάστατη τοπογραφία και τη μοντελοποίηση πληροφοριών κτιρίων (HBIM) που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Συνολικά, η παρούσα εργασία, ως ενιαίο σύνολο, συμβάλλει τόσο στην ψηφιακή διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς όσο και στη βελτιστοποίηση των εργασιών τμηματοποίησης και κατάτμησης 3Δ αντικειμένων ενσωματώνοντας εφαρμογές από τον χώρο της μηχανικής μάθησης (ML) και της βαθέως μάθησης (DL).

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Η Μοντελοποίηση Κτηριακής Πληροφορίας (ΜΚΠ) για Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΚΠ)

Η Μοντελοποίησης Κτηριακής Πληροφορίας ή Building Information Modelling είναι μια ολιστική διαδικασία ενσωμάτωσης ψηφιακών μοντέλων κτιρίων και κατασκευαστικών έργων, μαζί με όλα τα αντίστοιχα μεταδεδομένα που αφορούν την συγκεκριμένη κατασκευή. Αυτή η 4Δ εφαρμογή της ψηφιακής αναπαράστασης περιλαμβάνει χωρική και χρονική διάσταση ενισχύοντας έτσι τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων Σχεδιομελέτης και Παραγωγής με την Χρήση Υπολογιστή (Computer Aided Design - CAD) (CAD) (Pocobelli et al., 2018; Romero-Jarén & Arranz, 2021; Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2020, σ. 44). Η χρονική παράμετρος επιτρέπει τη διεπιστημονική και εγκάρσια συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών τομέων της βιομηχανίας (Maietti et al., 2018) ενώ παράλληλα μειώνει τον κίνδυνο περιττών επαναληπτικών ενεργειών ή αλληλοεπικαλύψεων δράσεων και δεδομένων (Ma et al., 2020).

Κατ' ελάχιστο η διαδικασία Μοντελοποίησης Κτηριακής Πληροφορίας (ΜΚΠ) αποτελεί μια προσέγγιση τριών ξεχωριστών βημάτων, την απόκτηση δεδομένων, την τρισδιάστατη μοντελοποίηση και την ανακατασκευή των τελικών αντικειμένων τα οποία και τελικώς αποθηκεύονται σε μία δομή που να είναι κατάλληλη για περαιτέρω διαμοιρασμό και επεξεργασία (Croce et al., 2021; Pocobelli et al., 2018). Σε σύγχρονες αρχιτεκτονικές εφαρμογές τα τελικά αντικείμενα αποθηκεύονται με την μορφή αρχείων.*IFC* (Industry Foundation Classes) τα οποία και αποτελούν παράγωγο του διεθνούς συστήματος προτυποποίησης κτηριακών αντικειμένων κατά τις συστάσεις του οργανισμού *BuildingSMART* (Colucci et al., 2021). Τα αρχεία αυτά κωδικοποιούνται με την χρήση της γλώσσας EXPRESS κατά το ISO /TC 184/ SC 4.1994 και περιέχουν πληροφορίες όπως το είδος των δεδομένων, τις λειτουργίες που επιτελεί το 3Δ αντικείμενο, τις συνδέσεις του με τα γειτονικά στοιχεία, τις μηχανικές τις φυσικο-χημικές ιδιότητες και τους κανόνες (constraints) δόμησης της γεωμετρίας του (Juan E. Nieto-Julián et al., 2021).

Η δημιουργία ΜΚΠ, όταν αφορά σε Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομίας (Cultural Heritage), μετονομάζεται σε Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ) ή *H-BIM* ή *HBIM* με το αρχικό πρόθεμα να αφορά στον αγγλικό όρο που αναφέρεται σε στοιχεία πολιτιστικής κληρονομιάς (Heritage). Το σημείο εκκίνησης μίας σύγχρονης εφαρμογής είναι η τοπογραφική αποτύπωση του χώρου με χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης αποτύπωσης (3D Reality Capture devices), η εξαγωγή του νέφους σημείων (Point Clouds - PC) (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2020, σ. 224), η ανίχνευση των τοπικών (local) και συνολικών

χαρακτηριστικών (global) χαρακτηριστικών (features), και η ανίχνευση (identify) και ανάσυρσης (retrieve) των σχημάτων αρχιτεκτονικού ή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Croce et al., 2021; Macwilliam & Nunes, 2019). Το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα είναι ο μετασχηματισμός ενός σχήματος υψηλής πολυπλοκότητας και χαμηλής παραμετροποίησης (organic shape), σε ένα ευέλικτο και παραμετροποιήσιμο μαθηματικό σχήμα τα οποία και αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως παραμετρικό αντικείμενο (parametric) ή έξυπνο αντικείμενο (smart object) και η φέρουσα ευφυΐα αφορά στην ικανότητα μαθηματικής παραμετροποίησης, την ευελιξία του στην μεταφορά μεταξύ διαφορετικών παρόχων, λογισμικών επεξεργασίας και απαιτήσεων σε αποθηκευτική μνήμη (Logothetis et al., 2015)

Αυτό το τελευταίο βήμα μετατροπής είναι το «θεμελιώδες αξίωμα» πίσω από την υλοποίηση των συστημάτων HBIM και ως ιδέα αναφέρεται με τον όρο της διαλειτουργικότητας (interoperability). Στην βάση του πρόκειται για την μετατροπή ενός μη-αποδοτικού πολύπλοκου μοντέλου επιφάνειας με καλή αποτύπωση υφής (texture) και γεωμετρίας (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2020, σ. 229) σε ένα παραμετροποιήσιμο και σημασιολογικά εμπλουτισμένο (*semantics*) ευέλικτου «έξυπνου» αντικειμένου (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; López et al., 2017; Macwilliam & Nunes, 2019; Mania et al., 2021). Η διαλειτουργικότητα είναι επομένως η βασική αιτία που τα συστήματα BIM ανθούν στον τομέα της Αρχιτεκτονικής, της Μηχανικής, και των Κατασκευών (Architecture, Engineering, Construction & Operations - AECO). Η μεθοδολογία αυτή εξασφαλίζει την βιωσιμότητα επιτρέποντας την διαφανή ανταλλαγή δεδομένων δια επιστημονικά (trans-disciplinarity) και με διαφορετικό υπόβαθρο και επιστημονική ορολογία, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και συλλογικά στο ίδιο έργο με δεδομένα διαφορετικού τύπου (tangible / intangible) (Morbidoni et al., 2020; Romero-Jarén & Arranz, 2021; Soilán et al., 2020). Ωστόσο, αυτή η πολύ-επίπεδη δια-επιστημονική προσέγγιση, έως και σήμερα, συνοδεύεται από υψηλή τεχνογνωσία, μη τετριμμένες διεργασίες, κατακερματισμό δεδομένων και λογισμικών για την διαχείριση των μετατροπών από γεωμετρίες επιφάνειας σε αντικείμενα BIM (Antón et al., 2018; Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Pocobelli et al., 2018) και αυτό ενώ έχουν περάσει πάνω από 16 χρόνια από την πρώτη σύλληψη της βασικής ιδέας από τους (Murphy et al., 2009)

1.2. Σάρωση-προς-ΜΚΠ και αντίστροφη μηχανική (Scan-to-BIM)

Η δημιουργία συστημάτων *BIM* μπορεί να ακολουθεί την ορθή πορεία όπου το μοντέλο δημιουργείται και εμπλουτίζεται στην πορεία ή την ανάστροφη η οποία και είναι γνωστή ως αντίστροφη μηχανική, οπότε και αφορά σε εξαγωγή πληροφορίας ενός υπάρχοντος προϊόντος (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2020, σ. 224). Σε αυτήν την δεύτερη εκδοχή, τα βασικά βήματα που ακολουθούνται είναι η απόκτηση των 3Δ δεδομένων, η επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης και αξιοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων για την κατασκευή των τελικών έξυπνων αντικειμένων (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2020, σ. 224). Στον τομέα

της αντίστροφης μηχανικής για την διάσωση και διαχείριση της Πολιτισμικής Κληρονομιάς (Cultural Heritage - CH) η διαδικασία αυτή είναι γνωστή με το ακρωνύμιο *Scan-to-BIM* (Costantino et al., 2021; Valeria Croce, Caroti, Luca, et al., 2021). Η σάρωση-προς-BIM, ή *Scan-to-BIM* αποτελείται από τρία διακριτά στάδια, την συλλογή δεδομένων, την κατάτμηση τους σε αντικείμενα λειτουργικού ΄ή δομικού ενδιαφέροντος και την αποθήκευση τους σε συστήματα HBIM (Colucci et al., 2021; Croce et al., 2021; Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Pocobelli et al., 2018).

1.2.1. Απόκτηση δεδομένων

Η τρισδιάστατη αποτύπωση πλέον σημειώνει τεράστια πρόοδο λόγω των εξελίξεων σε επίπεδο ενεργών και παθητικών μετρητικών οργάνων, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τους επίγειους σαρωτές LASER (Terrestrial LASER Scanner) και την τεχνολογία στερεοσκοπικής αναπαράστασης βάσει εικόνας που χρησιμοποιεί εναέρια ή επίγεια μέσα (Braun & Borrmann, 2019; Idjaton et al., 2021; Mania et al., 2021; Maravelakis et al., 2014; Volanis et al., 2024). Αυτές οι διατάξεις παρέχουν αυξημένη μετρητική ακρίβεια και δεδομένα υψηλής πιστότητας (Croce et al.2021; Piemonte, et al., 2021). Τα πλέον διαδεδομένα σε επίπεδο τοπογραφικών εφαρμογών είναι οι επίγειοι σαρωτές LASER (TLS), διαφόρων παρόχων, που εκπέμπουν μια δέσμη παλμών λέιζερ σε μια σφαίρα 360 που εγγράφεται από δύο ταυτόχρονα περιστρεφόμενες γωνίες ή πλάκες, οι οποίες περιστρέφονται γύρω από τα επίπεδα αζιμούθιου και απόκλισης (Antón et al., 2018).

Σε αντίθεση με τα ενεργητικά μέσα που εκπέμπουν σήματα, τα παθητικά στοιχεία, όπως οι φωτογραφικοί αισθητήρες, εκμεταλλεύονται την επανα-σκεδαζόμενη ακτινοβολία των αντικειμένων (Pocobelli et al., 2018). Παρόλο που αυτά τα παθητικά μέσα τείνουν να υπολείπονται σε σχέση με τα ενεργά στην αναπαραστατική ποιότητα του τελικού αποτελέσματος (Braun & Borrmann, 2019) συνεχίζουν να είναι δημοφιλή λόγω του χαμηλού κόστους απόκτησης και της σχετικά απλής μετέπειτα επεξεργασίας για την λήψη του 3Δ αντικειμένου (Bienvenido-Huertas et al., 2020; Croce et al. 2021; Piemonte, et al., 2021). Χαρακτηριστικά, ενώ η πρώτη επίδειξη της δημιουργίας HBIM σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με επίγειους σαρωτές LASER (Murphy et al., 2009) σήμερα η φωτογραμμετρία και η χρήση παθητικών δεκτών, με την ενσωμάτωση αλγορίθμων Structure-from-Motion (SfM) και Multi-View Stereo (MVS) (Moyano et al., 2021), είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος συλλογής δεδομένων και αυτό διότι εκτός των φωτογραφικών ψηφιακών τεκμηρίων, εν τέλει προκύπτουν 3Δ μοντέλα ικανοποιητικής μετρητικής ικανότητας (Yang et al., 2020). Σε επίπεδο εφαρμογών Κληρονομίας, υλοποιούνται συχνά μεικτά σχήματα τα οποία συμπλέκουν δεδομένα (Data fusion) προερχόμενα από σαρωτές *LASER* και φωτογραμμετρία (Abbate & Invernizzi, 2022) ή

φωτογραφικά δεδομένα διαφορετικών οπτικών οργάνων με σκοπό την μέγιστη αναπαραστατική πληροφορία (Alshawabkeh & Baik, 2023).

1.2.2. Επίγειοι Σαρωτές LASER

Οι επίγειοι σαρωτές σαρώνουν τον χώρο με ρυθμό της τάξεως των εκατομμυρίων σημείων ανά δευτερόλεπτο, ανεξαρτήτως συνθηκών εξωτερικού φωτισμού. Η ταχύτητα καταγραφής δεδομένων διαφοροποιείται ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας του όπως η χωρική ανάλυση ή σάρωση με καταγραφή και του χρώματος αλλά και από μεταβλητές του ίδιου του αντικειμένου όπως η πολυπλοκότητα του, τα διακοσμητικά στοιχεία και την εσωτερική ή εξωτερική χρήση (Antón et al., 2018; Tkáč et al., 2018). Εξαιτίας της υψηλής μετρητικής ακρίβειας και την μεγάλης ταχύτητας στην αποτύπωση των μνημείων και κτηριακών αντικειμένων οι σαρωτές έχουν εν μέρει απλοποιήσει το πρώτο βήμα στην κατασκευή ενός συστήματος BIM, επιτρέποντας την ανάπτυξη διαφορετικών κλάδων αντίστροφης μηχανικής όπως ή «Σάρωση-σε-BIM» (Scan-to-BIM) και Σάρωση-εναντίον-BIM (Scan-vs-BIM). Η πρώτη αφορά στην τεκμηρίωση της κείμενης πραγματικότητας, με τη γεωμετρία να δύναται να αποκλίνει από το αρχικό αρχιτεκτονικό σχέδιο ενώ στην δεύτερη περίπτωση η σάρωση αποτελεί σημείο ελέγχου της πορείας υλοποίησης, σε πραγματικό χρόνο, με ακρίβεια που μπορεί να κατέρχεται σε επίπεδο χιλιοστού (Antón et al., 2018; E. Valero et al., 2018).

1.2.3. Δεδομένα που παράγονται με ΣμηΕΑ (UAVs)

Η χρήση των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών ή ΣμηΕΑ (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) (Barrile et al., 2022; Isailović et al., 2020; Emmanuel Maravelakis et al., 2023; Volanis et al., 2024) και η χρήση ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών υψηλής ανάλυσης (Poux et al., 2017) κερδίζει συνεχώς έδαφος λόγω της προόδου στον χώρο των μη επανδρωμένων πτητικών μέσων (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs), τα οποία μπορούν να μεταφέρουν ωφέλιμο φορτίο (payload) είτε τύπου *LASER* (LiDAR) (Domenica Costantino et al., 2021) είτε με κάμερες υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με Δορυφορικό Σύστημα Γεωεντοπισμού Θέσης (Global Positioning System - GPS) επιτυγχάνοντας έτσι γεω-αναφορά της τάξης των λίγων εκατοστών (Martínez-Carricondo et al., 2020). Συγκεκριμένα, τα σύγχρονα ΣμηΕΑ δύναται να επιτύχουν χωρικές ακρίβειες της τάξης των 15 χιλιοστών τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην οριζόντια διάσταση, οι οποίες είναι παρεμφερείς με αυτές των επίγειων σαρωτών. Ωστόσο, η υψηλή αυτή ακρίβεια συνοδεύεται και από επιπρόσθετα βήματα στο πεδίο όπως η τοποθέτηση σημείων ελέγχου εδάφους (Ground Control Points – GCP) (Avena et al., 2021), ή την επανα-επίλυση του σήματος *GPS* με την εφαρμογή κινηματικών λύσεων τύπου (PPK) (Martínez-Carricondo et al., 2020).

Ωστόσο και οι δύο τεχνολογίες λήψης δεδομένων συνοδεύονται και από ορισμένους περιορισμούς. Κατ' αρχάς, τα δεδομένων φωτογραμμετρίας απαιτούν ισχυρή επεξεργαστική ισχύ τόσο σε επίπεδο *CPU* όσο και *GPU* για την επίλυση των 3Δ σκηνών. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση με βάση την χρήση πολλαπλών εικόνων υψηλής αλληλοεπικάλυψης (overlap) απαιτεί χρόνο και πόρους, δεδομένου του σημαντικού αριθμού φωτογραφιών που επεξεργάζονται παράλληλα, με επιλύσεις να φθάνουν ακόμα και σε χρόνο επεξεργασίας άνω των 15 ωρών (Martínez-Carricondo et al., 2020). Επιπλέον των ζητήματα επεξεργαστικής ισχύος, η φωτογραμμετρία έχει εγγενείς αδυναμίες σε ομοιόμορφες και χωρίς υφή δομές ή σε περιπτώσεις επιφανειών υψηλής διαπερατότητας ή ανακλαστικότητας (Braun et al., 2020).

Τα νέφη σημείων στην απλούστερη των περιπτώσεων παρέχουν τις καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης {X,Y,Z} των αντικειμένων εντός του χώρου σάρωσης (Moyano et al., 2021). Συχνά, μαζί με τις συντεταγμένες καταγράφονται τρεις ακόμα παράμετροι, η επιστρέπτουσα ισχύς (backscattered) (Błaszczak-Bąk et al., 2020), οι κάθετες στην νοητή εφαπτόμενη στο σημείο επιφάνεια {Nx, Ny, Nz} και οι χρωματικές συνιστώσες κωδικοποιημένες σε *Red-Green-Blue* (RGB) ή *Hue-Saturation Value* (HSV) (Musicco et al., 2021). Έτσι ένα τυπικό αρχείο αποθήκευσης χωρικών δεδομένων, για n-παρατηρήσεις ανήκει στον $R^{(n \times 9)}$ χώρο με τις συντεταγμένες και τις καθέτους να καταλαμβάνουν έξι από τις εννέα διαστάσεις και τις χρωματικές συνιστώσες τις υπόλοιπες τρεις. Το πρόβλημα με τα νέφη σημείων είναι αρχικά ο όγκος τους καθώς σε συνήθεις εφαρμογές μπορεί να προκύψουν εκατοντάδες εκατομμύρια δεδομένα (Poux et al., 2017; Teruggi et al., 2020) καθιστώντας έτσι ζητούμενο όχι μόνο την επεξεργασία αλλά ακόμα και την οπτική θεώρηση τους σε κοινά λογισμικά πακέτα (Moyano et al., 2021). Επιπροσθέτως, σε ό,τι αφορά την επεξεργασία, τα 3Δ αυτά δεδομένα στερούνται τοπολογικής συνοχής (topology) και ιεραρχίας δυσκολεύοντας έτσι την ανάσυρση της υποκείμενης πληροφορίας (Castellazzi et al., 2015; Pocobelli et al., 2018). Αυτό είναι έως μία βασική πρόκληση στον τομέα της αντίστροφης μηχανικής, με ή χωρίς την χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) (Cotella, 2023a), και αποτελεί τροχοπέδη στην περαιτέρω εξάπλωση των συστημάτων *HBIM* στον χώρο της Αρχαιολογίας και της διάσωσης και συντήρησης της Πολιτιστικής Κληρονομίας (Arnold et al., 2021; Pellis et al., 2022; Wysocki et al., 2022).

1.3. 3Δ Μοντελοποίηση και ανασύνθεση μνημείου

Υιοθετώντας τον φορμαλισμό των (Yang et al., 2020) ορίζονται τα διαφορετικά είδη της μοντελοποίησης τα οποία εσωκλείονται σε ένα σύστημα *HBIM*. Αυτά είναι το γεωμετρικό μοντέλο (geometric model), που παρέχει την μετρητική και τοπολογική πληροφορία, το σημασιολογικό (semantic model) το οποίο παρέχει

την πληροφορία σε σχέση με την φύση κάθε αντικειμένου μέσα στον χώρο, τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά και την ιεραρχία του μέσα στο γενικότερο οικοδόμημα και τέλος το παραμετρικό μοντέλο (parametric model) που επιτρέπει στον χρήση για κάθε αντικείμενο, εντός του μοντελοποιημένου χώρου, να έχει πρόσβαση σε μία σωρεία λειτουργικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών τα οποία διαφέρουν από αντικείμενο σε αντικείμενο. Έτσι, σκοπός είναι στο τέλος η πλήρης αποτύπωση του κτηρίου, μαζί με όλα τα επί μέρους χαρακτηριστικά του συστήματα, σε ένα σύστημα που έχει ευελιξία τόσο ως προς την διαχείριση της πληροφορίας όσο και ως προς την αποθήκευσης.

Ως εκ τούτου, η σύσταση ενός συστήματος *HBIM* καταλήγει σε παραμετρικά αντικείμενα και προϋποθέτει, την ανίχνευση όλων των αντικειμένων ενδιαφέροντος, την περιγραφή τους με μία «κλειστή» (watertight) μαθηματική επιφάνεια και τον εμπλουτισμό όλων των μεταδεδομένων για κάθε ένα από τα αντικείμενα τα οποία έχουν δημιουργηθεί προηγουμένως. Τέλος, τα παραμετροποιήσιμα 3Δ αντικείμενα συνήθως δημιουργούνται και αποθηκεύονται σε λογισμικά σχεδιασμένα για *BIM* εφαρμογές (Croce et al., 2021). Εν πολλοίς, η άνευ προηγουμένου πρόοδος στα ψηφιακά μέσα λήψης και στις τεχνικές τρισδιάστατης μοντελοποίησης έχουν πλέον καταστήσει εφικτή αυτήν την μορφή μοντελοποίησης ακόμα και για αντικείμενα υψηλής πολυπλοκότητας, όπως αυτές που συχνά συναντώνται στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς και της συντήρησης (Maravelakis et al., 2013).

1.4. Εγγενή εμπόδια & προκλήσεις στον χώρο της αντίστροφης μοντελοποίησης για ΜΠΙΚ (HBIM) εφαρμογές

Η εξέλιξη αυτή, σε συνδυασμό με τη αξιοσημείωτη πρόοδο των συστημάτων *BIM*, σε νέες, υπό-κατασκευή υποδομές, έχει στρέψει το ερευνητικό ενδιαφέρον προς την ευρύτερη υιοθέτηση της τεχνικής αυτής στην Πολιτιστική Κληρονομιά, με μερικά μόνο από τα οφέλη να σχετίζονται με την δυνατότητα ψηφιακής ανακατασκευής, την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων συντήρησης ή αποκατάστασης, τα πλεονεκτήματα της παρακολούθησης όλων των επεμβάσεων δυναμικά, την ενσωμάτωση εικονικών περιηγήσεων και την τεκμηρίωση με χρήση μετρητικών και μη (intangible) δεδομένων του περιουσιακού στοιχείου (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Maravelakis et al., 2023; Pocobelli et al., 2018) με έναν τρόπο υψηλής κανονικοποίησης.

Αυτό το τελευταίο αποτελεί και την Αχίλλειο πτέρνα του συστήματος *HBIM* καθώς τα στοιχεία πολιτιστικής κληρονομιάς παρουσιάζουν σοβαρές προκλήσεις, τόσο ως προς την υψηλή τους πολυπλοκότητα, όσο και με την έμφυτη τάση των κατασκευαστών για αντικείμενο μοναδικά τα οποία δεν ευθυγραμμίζονται με τις συνήθεις βιομηχανικές νόρμες τυποποίησης (serialization) (Croce et al., 2021; Galanakis et al., 2024; Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Garagnani & Manferdini, 2013; Pocobelli et al., 2018). Έτσι, παρά τις μοναδικές ευχέρειες που προσφέρει η τεχνολογία *BIM* στον τομέα της

πολιτιστικής κληρονομιάς και της συντήρησης των αρχιτεκτονικών και αρχαιολογικών μνημείων υπάρχει μία έντονη αντίθεση του αρχαιολογικού αρχιτεκτονικού χώρου με τις αρχικές παραδοχές της μοντελοποίησης στα συστήματα HBIM (Murphy et al., 2009, 2013). Όπως τονίζεται από το έργο των Pocobelli et al., (2018) τα ιστορικά περιουσιακά στοιχεία τείνουν, από σχεδιασμού, να παρεκκλίνουν των παραδοσιακών κανόνων κατασκευαστικής ομοιομορφίας, οι οποίοι, αποτελούν βασική παραδοχή της ικανότητας επέκτασης και επαναχρησιμοποίησης των μοντέλων BIM (Murphy et al., 2009, 2013). Αυτή λοιπόν η έλλειψη κανονικότητας (standardization) οδηγεί σε αδυναμία ενσωμάτωσης και επέκτασης των βιβλιοθηκών «έξυπνων» αντικειμένων, καταργώντας την ιδέα της εξοικονόμησης πόρων κατά την προσπάθεια μοντελοποίησης των πολύπλοκων και μοναδικών αυτών κατασκευών (Martínez-Carricondo et al., 2020; Morbidoni et al., 2020).

1.5. Προοπτικές των συστημάτων ΜΚΠ στην διαχείριση και συντήρηση της Πολιτιστικής Κληρονομίας

Σήμερα, εν μέσω της 4ης βιομηχανικής επανάστασης (Fernández-Mora et al., 2022), η Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίων (BIM), αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο για την μετέπειτα εξάπλωση των συστημάτων *HBIM*, όχι μόνο ως ένα εργαλείο προς στην κατεύθυνση των στόχων για βιωσιμότητα, εντός των δεσμεύσεων της Ατζέντας 2030 (Cotella, 2023), αλλά και ως μια άμεση απάντηση στους προβληματισμούς αρκετών ευρωπαϊκών χωρών για πιο αποτελεσματικά σχήματα διαχείρισης των κινδύνων, την ψηφιακή διακυβέρνηση, την αυτοματοποίηση, τη συνέργεια και την ανταγωνιστικότητα (Fernández-Mora et al., 2022). Ο στόχος των Ηνωμένων Εθνών για τη βιώσιμη ανάπτυξη (Sustainable Development Goals), στον στόχο 11.4, αναφέρεται ρητά στην υποχρέωση των μελών να διαφυλάξουν την «Παγκόσμια Πολιτιστική και Φυσική Κληρονομιά» (UN, Sustainable Development) και πολλές χώρες ήδη επικυρώνουν την ενσωμάτωση των συστημάτων BIM για χρήσεις στον τομέα της Αρχιτεκτονικής, της Μηχανικής και Κατασκευών (AECO) στο (Fernández-Mora et al., 2022).

Η μοντελοποίηση πληροφοριών ιστορικών κτιρίων (HBIM) προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη διατήρηση και τη διαχείριση των δομών πολιτιστικής κληρονομιάς (Dore & Murphy, 2013; Penjor et al., 2024). Με τη δημιουργία περίπλοκων και πλούσιων σε δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, το *HBIM* ενισχύει τις προσπάθειες διαχείρισης και διατήρησης των ιστορικών δομών, ενώ διευκολύνει τη βαθύτερη εξέταση και κατανόηση των μεθόδων κατασκευής και του ιστορικού πλαισίου. Το HBIM σχεδιάστηκε αρχικά ως μια επανάσταση της αντίστροφης μηχανικής που επιτρέπει την αυτοματοποιημένη μετατροπή τρισδιάστατων σύνθετων κτιρίων σε πραγματικό χρόνο σε συμβατικά τρισδιάστατα σχέδια μηχανικής έρευνας. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος,

η οποία αρχικά υλοποιήθηκε με ένα αποστασιόμετρο *RIEGL* σε συνδυασμό με μια κάμερα υψηλής ανάλυσης CCD, τοποθετημένη στην κορυφή του *LASER*, πριν από 16 χρόνια (Murphy et al., 2009), εξακολουθεί να περιορίζεται σε λίγους οργανισμούς διαχείρισης εγκαταστάσεων (Lovell et al., 2023), παρόλο που η δημοτικότητά της κερδίζει συνεχώς έδαφος στον ακαδημαϊκό χώρο (Cotella, 2023).

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1. ΜΠΙΚ (Η-BIM) για ΕΠΚ

Οι (Murphy et al., 2009) στο άρθρο τους με τίτλο *Historic Building Information Modeling* (HBIM) παρουσιάζουν μία μέθοδο τεκμηρίωσης της Πολιτιστικής κληρονομιάς η οποία σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης του χώρου, όπως το θεοδόλιχο, η μετροταινία και οι φωτογραφίες, μπορεί να συνδυάζει *LASER* αποστασιόμετρο μαζί με φωτογραφικό υλικό ώστε να καταλήγει σε έγχρωμο νέφος σημείων. Σκοπός τους είναι να δημιουργήσουν ένα σύστημα που να μπορεί να παράξει σχέδια για συστήματα *CAD/CAM* με βάση το νέφος σημείων, μία δουλειά η οποία παραδοσιακά χρειάζεται αρκετές ημέρες επεξεργασίας και ανθρώπινη παρέμβαση. Ο αντίλογος στην πολύπλοκη αυτή μετατροπή ενός νέφους σε αντικείμενο CAD και τελικά σε μοντέλο BIM είναι ότι με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας οι χρήστες θα έχουν στα χέρια τους ένα λεπτομερές σύστημα απεικόνισης όλων των πληροφοριών για κάθε σημείο στο χώρο. Επομένως, η μεγάλη εικόνα αφορά στην προσπάθεια δημιουργίας μίας βάσης τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς σε τρεις διαστάσεις (Dore & Murphy, 2013; Murphy et al., 2009, 2013).

Στη μοντελοποίηση κτιριακών πληροφοριών (BIM), η λεπτομέρεια απεικόνισης αποδίδεται στον όρο Επίπεδο-Λεπτομέρειας ή *Level-of-Detail (LoD)*. Αυτός ο δείκτης ελέγχει την πληρότητα των 3Δ μοντέλων *BIM* και εκτείνεται σε εύρος από 100 αντιπροσωπεύοντας μία αφηρημένη σχηματική γεωμετρική αναπαράσταση έως και *LOD* 500 όπου περιέχει όλα τα γεωμετρικά μοντέλα (*as-is BIM*), μαζί με όλες τις ενώσεις τους και τις λειτουργίες που αυτά επιτελούν (Güneş et al., 2024). Ένας απλός τρόπος θεώρησης του δείκτη *LOD* είναι ότι αυξάνεται αναλόγως του αριθμού των διαφορετικών διακριτών αρχιτεκτονικών αντικειμένων που αναγνωρίζονται μέσα στο νέφος (Musicco et al., 2024). Έτσι, για παράδειγμα, ένας κίονας είναι ένα μοναδικό αντικείμενο στον χώρο για *LOD* 0 για *LOD* 4 αποσυντίθεται σε στυλοβάτη, επιστύλιο, τύμπανο, άβακα κ.τ.λ. (Musicco et al., 2024).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των κτηρίων πολιτιστικής κληρονομιάς, ο δείκτης *LOD*, έτσι όπως αυτός μεταφράζεται για αρχαιολογικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές αναμένεται κατά κανόνα μεταξύ LOD300 – LOD350, με το τελικό σύστημα να ενσωματώνει πέραν των δομικών μεταβλητών μη δομικές πληροφορίες και το σύνολο των δεδομένων να λαμβάνεται με πλήρως αυτοματοποιημένες μεθόδους τοπογραφικής αποτύπωσης (Pocobelli et al., 2018). Η συζήτηση γύρω από τον δείκτη γραφικής και σημασιολογικής ανάπτυξης είναι θεμελιώδης για τον χώρο καθώς τα μοντέλα HBIM θα πρέπει να αντανακλούν την κατάσταση του εκθέματος «όπως κατασκευάστηκε» ή «όπως είναι» (as-is), παρέχοντας τον δυνατότερο υψηλό βαθμό πληρότητας ώστε να επιτρέπουν την διαχείριση και τη συντήρηση τους με γνώμονα το

υπάρχον μοντέλο. Ιδανικά, για έργα συντήρησης και αποκατάστασης, το αναμενόμενο *LOD* πρέπει να είναι το υψηλότερο δυνατό, ήτοι *LOD500,* εξασφαλίζοντας έτσι ότι τα ψηφιακά μοντελοποιημένα αρχιτεκτονικά τεχνουργήματα έχουν την μεγαλύτερη δυνατή γεωμετρική ομοιότητα με τα γνήσια αντικείμενα (Cotella, 2023). Αυτό συνεπάγεται, πρώτον, πως στην διεργασία παραγωγής *H-BIM*, ανάμεσα στα πρωτογενή 3Δ δεδομένα και τα τελικά παραμετρικά αντικείμενα πρέπει να παρεμβληθεί ένα στάδιο αναγνώρισης και εξαγωγής δομών με στόχο της ιεραρχική ανοικοδόμηση όλων των αρχιτεκτονικά σημαντικών αντικειμένων στο χώρο και δεύτερον ότι το επίπεδο επιτυχίας των δράσεων *BIM* με ή χωρίς την χρήση ΤΝ κρίνεται από την αναπαραστατική πληρότητα της τελικής 3Δ βάσης δεδομένων.

2.2. Νέφη σημείων (Point Cloud) και κατάτμηση πλέγματος(Mesh Segmentation)

2.2.1. Κατάτμηση για εφαρμογές ΜΠΙΚ (HBIM Segmentation)

Το στάδιο αναγνώρισης και εξαγωγής αντικειμένων αρχιτεκτονικού και αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, γνωστό και ως κατάτμηση (*Segmentation*) νέφους σημείων και είναι μία ιδιαίτερα διαδεδομένη ερευνητική περιοχή στον χώρο των υπολογιστών και της κατανόησης του 3Δ περιβάλλοντος (Liu et al., 2022). Η οργάνωση του νέφους σε ομοιογενή και διακριτά αντικείμενα αρχικά ήταν μία διαδικασία που απαιτούσε την υπέρθεση αντικειμένων διανυσμάτων επάνω στα σημεία και έπειτα την αναδόμηση και ανασύνθεση της 2Δ γεωμετρίας από το λογισμικό πακέτο *CAD* (Murphy et al., 2009). Σήμερα, πολλές και διαφορετικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί με στόχο την αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας με στόχο την τελική οργάνωση του νέφους σε διακριτά αντικείμενα υψηλής λειτουργικής και γεωμετρικής ομοιογένειας (Croce, Caroti, Piemonte, et al., 2021; Galanakis et al., 2024; Idjaton et al., 2021; Musicco et al., 2021).

Η κατάτμηση προϋποθέτει προηγούμενα βήματα όπως είναι η ευθυγράμμιση και συνένωση των 3Δ δεδομένων (*pc registration*) προερχόμενα από διαφορετικές θέσεις σάρωσης και την απομάκρυνση ακραίων τιμών (*filtering & noise removal*) και ψευδών δεδομένων (Ma et al., 2020). Τα νέφη σημείων από μία ή περισσότερες θέσεις, αναφέρονται στο κοινό σύστημα αναφοράς, ώστε να ενσωματώνονται οι λήψεις του ίδιου αντικειμένου από διαφορετική προοπτική (Braun & Borrmann, 2019). Αφού συγχωνευθεί και συνενωθεί το νέφος σημείων, κάθε σημείο $\{X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)}\}$ στον Ευκλείδειο Χώρο, μαζί με οποιαδήποτε άλλη διαθέσιμη πληροφορία που αποδίδεται στη συγκεκριμένη θέση, όπως ο συντελεστής οπισθοσκέδασης ή το χρώμα, ταξινομείται σε αρχεία πινάκων μέσω καταλλήλων επικεφαλίδων (Morbidoni et al., 2020; Pierdicca et al., 2020). Το τελευταίο βήμα, την ανίχνευσης και εξαγωγής των αντικειμένων προσελκύει το μεγαλύτερο μέρος της επιστημονικής έρευνας, δεδομένου ότι είναι το πιο αυστηρό, χρονοβόρο και δαπανηρό σε όρους κόστους και επεξεργαστικών πόρων και αφορά στην δημιουργία μοντέλων *HBIM*. Το βήμα

αυτό απαντάται στην βιβλιογραφία ως σημασιολογικός εμπλουτισμός (semantic enrichment) και αφορά στην απόδοση μίας συγκεκριμένης κλάσης, σε κάθε σημείο του νέφους (Liu et al., 2022), με βάση την προηγουμένως θεμελιωμένη βάση δεδομένων κλάσεων αντικειμένων (Poux et al., 2017) που στον χώρο της σημασιολογίας ονομάζεται και οντολογικό πλαίσιο αναφοράς. Στο τέλος της κατάτμησης με σημασιολογικό εμπλουτισμό προκύπτει ένα πλούσιο, υψηλής πυκνότητας, ιεραρχημένο, νέφος σημείων μαζί με το σύνολο των πλήρως ταξινομημένων στοιχείων εντός του, τα οποία μπορούν εν τέλει να εξαχθούν σειριακά και να μετατραπούν σε «έξυπνα» παραμετροποιήσιμα αντικείμενα τύπου *.IFC* (Antón et al., 2018; Croce, Caroti, Luca, et al., 2021; Morbidoni et al., 2020).

Η κατάτμηση του νέφους ή του πλέγματος (*mesh*), ποικίλει, ανάλογα και με δείκτη πληρότητας πληροφορίας *LOD* (Cotella, 2023), από χρονοβόρες 100% χειροκίνητες τεχνικές εξαγωγής των κείμενων δομών, όπου οι ειδικοί εντοπίζουν την γεωμετρία με βάση το υπερτιθέμενο νέφος (Garagnani & Manferdini, 2013), ημι-αυτόματες όπου είτε η τμηματοποίηση γίνεται με συνδυασμό ανθρώπινης παρέμβασης και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (*Machine Learning - ML* (Antón et al., 2018; Soilán et al., 2020) ή πλήρως αυτοματοποιημένες όπου εξελιγμένα σύνθετα συστήματα υλοποιούν αλγόριθμους ΤΝ με επίβλεψη (supervision) (Valero et al., 2018) ή χωρίς επίβλεψη (un-supervised) (Valero, Bosché, & Forster, 2018).

Στις προσπάθειες αυτοματοποίησης, οι κύριοι κλάδοι είναι οι μέθοδοι που βασίζονται σε μοντέλα (*model-based*) ή σε δεδομένα (*data-driven*). Στην πρώτη περίπτωση, το ακατέργαστο αδόμητο νέφος σημείων διαχωρίζεται με βάση το βαθμό ταύτισης με ένα προκαθορισμένο αντικείμενο, σχήμα ή μοντέλο, ο οποίος και ποσοτικοποιείται με όρους στατιστικής προσαρμογής (Musicco et al., 2024). Δημοφιλή τέτοια παραδείγματα είναι η προσέγγιση ο αλγόριθμος *RANdom SAmple Consensus - RANSAC* (Poux et al., 2017), *3D Hough Transform (HT)* και *Region Growing – RG*, με τον *RANSAC* να ταιριάξει την υπό εξέταση γεωμετρία με μια γεωμετρία αναφοράς, που δηλώνεται από ένα μοντέλο, και τον *RG* να προσπαθεί να επεκτείνει την περιοχή από όπου εκκινεί με βάση την ομοιότητα ή τη διαφορετικότητα με των γειτονικών στοιχείων. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην καθοδήγηση με βάση ένα μαθηματικό μοντέλο υπολείπονται γενικευσιμότητας και επαναχρησιμοποίησης (Galanakis et al., 2024). Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε δεδομένα για την κατάτμηση των αντικειμένων συνεχώς κερδίζουν έδαφος μέσω και τεχνολογιών βαθιάς μάθησης (*Deep Learning – DL*) με χαρακτηριστικά παραδείγματα το δίκτυο *PointNet* (Boyko & Rizhko, 2021) και τα αρκετά δημοφιλή Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα – ΣΝΔ (*Convolutional Neural Networks - CNNs*) τύπου *Dynamic Graph Convolutional Neutral Network (DGCNN)* (Morbidoni et al., 2020). Ωστόσο, τέτοιες εφαρμογές εάν και υπερτερούν των εφαρμογών μηχανικής μάθησης σε γενικευσιμότητα και ικανότητα επανα-χρησιμοποίησης

απαιτούν τεράστιο όγκο δειγμάτων για την εκπαίδευση και την επαλήθευση του συστήματος, με ό,τι αυτό συνεπάγεται δεδομένης της δυσκολίας συγκέντρωσης και προετοιμασίας των δεδομένων αυτών (Ma et al., 2020).

2.2.2. Κατάτμηση λίθο-προς-λίθο (Stone-by-stone segmentation)

Η αυτοματοποίηση, μέσω αλγορίθμων ΤΝ, στην περίπτωση αντίστροφης μηχανικής για εφαρμογές *HBIM* εκκινούν θεωρώντας ολόκληρο το συγκρότημα και στην βέλτιστη περίπτωση καταλήγουν σε ανίχνευση και τεκμηρίωση των ξεχωριστών δομικών λίθων που σε περιπτώσεις αρχαιολογικών κτισμάτων είναι η ίδια η τοιχοποιία (Dais et al., 2021; Idjaton et al., 2021; Valero, Bosché, & Forster, 2018). Η ενδελεχής αυτή ανάλυση περιλαμβάνει έναν επαναλαμβανόμενο βρόχο βελτιστοποίησης ο οποίος και συγκλίνει όταν η δυνατότητα πρόβλεψης του μοντέλου (*inference*) αγγίξει ένα αποδεκτό όριο, οπότε και η φάση της εκπαίδευσης ολοκληρώνεται. Στην συνέχεια τα μοντέλα που προκύπτουν εκτελούνται στο υπόλοιπο «αθέατο» σύνολο δεδομένων, και μέσα από ένα σχήμα προβολής πίσω στον αρχική διάσταση ή αρχική ανάλυση (*back-propagation*) αποδίδονται ετικέτες κλάσης αρχιτεκτονικών αντικειμένων σε κάθε ένα από τα μεμονωμένα σημεία του νέφους (Croce, Caroti, Luca, et al., 2021; Matrone et al., 2020; Morbidoni et al., 2020; Poux et al., 2017). Η τμηματοποίηση εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έρευνας και ανοιχτής συζήτησης με διάφορους συγγραφείς, να υιοθετούν διαφορετικές ευρετικές (*Heuristics*) ή συνδυασμούς μηχανικής μάθησης, είτε με επίβλεψη (Bienvenido-Huertas et al., 2020; Koo et al., 2021) είτε χωρίς (Matrone & Martini, 2021) σε μια προσπάθεια επιτάχυνσης της ψηφιακής τεκμηρίωσης των αρχιτεκτονικών περιουσιακών στοιχείων (Croce et al., 2021 ; La Russa & Santagati, 2020 ; Logothetis et al., 2015 ; Pocobelli et al., 2018 ; Valero et al., 2018).

Πρωτοπόροι στον τομέα της κατάτμησης των 3Δ δεδομένων,. μέσω βαθιάς μάθησης (*Deep Learning - DL*) χρησιμοποίησαν τα Δυναμικά Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα ΔΣΝΔ (*Dynamic Graph Convolutional Neural Networks - DGCNN*) εξετάζοντας έναν 12-διάστατο χώρο χαρακτηριστικών που αποτελείται από τις χωρικές συντεταγμένες *XYZ*, τις χρωματικές συνιστώσες σε κωδικοποίηση *HSV*. Αυτά τα συστήματα αποδίδουν ακρίβεια πρόβλεψης άνω 91% και μπορούν να εντοπίζουν δομικά στοιχεία όπως τοίχους, δάπεδο, πυλώνες, θόλους και άλλα ευρέως διαδεδομένα στοιχεία κτιρίου (Pierdicca et al., 2020). Οι Teruggi et al., (2020) υλοποιώντας πρακτικές μηχανικής μάθησης (*ML*) σε κλιμακούμενα επίπεδα χωρικών αναλύσεων (*Multi-Layer Multi-Resolution*) παρουσιάζουν μία ολοκληρωμένη λύση για την κατάτμηση πολύπλοκων δεδομένων αποτυγχάνοντας μόνο στην ακριβή ανίχνευση των αντικειμένων με μικρή εκπροσώπηση μέσα στο πλέγμα. Πιο πρόσφατες εργασίες ενσωματώνουν δίκτυα τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για τις ιδιαιτερότητες των νεφών σημείων όπως το *PointNet* και *PointNet++* για την

τμηματοποίηση και τον σημασιολογικό εμπλουτισμό κτηρίων αλλά απαιτούν δεδομένα τα οποία έχουν τιτλοδοτηθεί μέσω ειδικών και χειροκίνητων διαδικασιών (Boyko & Rizhko, 2021; Haznedar et al., 2023; Koo et al., 2021; Malinverni et al., 2019). Παρά τη συνολικά καλή μέση απόδοση (78, 62%) οι Haznedar et al., (2023) καταλήγουν και αυτοί στο συμπέρασμα ότι κλάσεις με μικρές διαστάσεις ή λιγότερο έντονη εκπροσώπηση είναι δύσκολο να ταξινομηθούν (Haznedar et al., 2023).

Η αυτόματη κατάτμηση τρισδιάστατων τοίχων σε δομικά στοιχεία τοιχοποιίας, είναι σύνηθες αντικείμενο στα πλαίσια των εκθεμάτων πολιτιστικής κληρονομίας και υπό αυτήν την παραδοχή προσελκύει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών (Galanakis et al., 2022; Idjaton et al., 2021; Ji et al., 2023; Poux et al., 2017; Valero, Bosché, & Forster, 2018). Οι Valero, Bosché, & Forster, (2018) παρουσιάζουν τους μετασχηματισμός *Continuous Wavelet Transformations (CWT)* και επιτυγχάνουν ανίχνευση και εξαγωγή των δομικών λίθων από πέτρινους τοίχους επενεργώντας επάνω σε 3Δ νέφη σημείων. Οι ίδιοι συγγραφείς επεκτείνουν την μεθοδολογία τους για μη επίπεδες επιφάνειες χρησιμοποιώντας μια διαδικασία προβολής των κυκλικών επιφανειών σε κυλινδρικές συντεταγμένες (Valero et al., 2018). Η τμηματοποίηση λίθο-προς-λίθο (Stone-by-stone segmentation) εισάγεται επίσημα στον τίτλο της δημοσίευσης της Idjaton et al., (2021), όπου ένα τρισδιάστατο αποτελεί την βάση εξαγωγής καταλλήλων ορθο-φωτογραφιών. Οι φωτογραφίες αφορούν σε ασβεστολιθικά τετράγωνα πέτρινα λαξευμένα δομικά στοιχεία τα οποία έχουν τοποθετηθεί με τόσο μεγάλη ακρίβεια που καθιστούν αδύνατη την ανίχνευση γεωμετρικών χαρακτηριστικών διαφοροποίησης. Στην συνέχεια τα 2Δ αρχεία κατευθύνονται σε ένα δίκτυο DL που περιλαμβάνει μια αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή (*Encoder-Decoder*), βασισμένο στο μοντέλο *DeepLabV3+*, για την βασική κατάτμηση υποβοηθούμενο στην είσοδο από ένα δίκτυο αδρομερούς συνέλιξης (*Atrous Separable CNN*) για την ενίσχυση του οπτικού πεδίου (Idjaton et al., 2021).

Το *Image2DEM* των Loverdos & Sarhosis, (2023) παρουσιάζεται ως ολοκληρωμένο δίκτυο για ανάλυση των θεμελιωδών δομικών μονάδων τειχοποιίας ξεκινώντας από μία μόνο εικόνα. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν ένα δίκτυο *CNN* για την ανίχνευση και την εξαγωγή κάθε μεμονωμένου τούβλου σε μια τοξωτή γέφυρα από τοιχοποιία χρησιμοποιώντας την ορθογραφική της προβολή ως είσοδο στο σύστημα. Μετά το τέλος της κατάτμησης οι εξαχθείσες καμπύλες στον δισδιάστατο χώρο εξωθούνται (*extrude*) κατά μήκος του άξονα z αποκαθιστώντας έτσι την τρίτη διάσταση. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει στην περαιτέρω ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων όπως (FEM) καθώς καταλήγει σε μαθηματικά επιλύσιμο πλέγμα δεδομένων (Loverdos & Sarhosis, 2023). Η μοντελοποίηση με *FEM* μπορεί να απαιτήσει την πλήρη αποσυναρμολόγηση μεγάλων αρχαιολογικών χώρων όπως έγινε στην περίπτωση του αρχαιολογικού χώρου των Δελφών (Maravelakis et al., 2023),

η οποία και εξετάζεται στην συνέχεια. Σε αυτές τις δομές είναι ιδιαίτερης σημασίας η ανίχνευση των συνδέσεων των στοιχείων οι οποίες πρέπει να είναι τοπολογικά απλουστευμένες ώστε να μπορεί να συγκλίνει το μοντέλο (Maravelakis et al., 2023; Motsa et al., 2020; Papadopoulos et al., 2019; Volanis et al., 2024).

2.2.3. Η περίπτωση του Ναού του Απόλλωνα

Ο ναός του Απόλλωνα στους Δελφούς, που βρίσκεται στον ιερό τόπο των Δελφών στην Ελλάδα, και αποτελεί ένα μνημείο εξαιρετικής ιστορικής σημασίας (Liritzis et al., 1997; Mania et al., 2021; Maravelakis et al., 2023). Αυτό το μνημειώδες οικοδόμημα, μέρος ενός μεγαλύτερου αρχαιολογικού χώρου που περιλαμβάνει επίσης το περίφημο Μαντείο των Δελφών, παρουσιάζει κλασικά ελληνικά αρχιτεκτονικά στοιχεία και αποτελεί βασική μαρτυρία του αρχαίου ελληνικού πολιτισμού. Ο ναός όχι μόνο αντικατοπτρίζει την καλλιτεχνική και θρησκευτική ζωή της αρχαιότητας αλλά διαδραματίζει και σήμερα σημαντικότατο ρόλο ως μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς με σημαντικό αποτύπωμα στην τοπική κοινότητα και την οικονομία της. Δεδομένης της σπουδαιότητάς του, η διασφάλιση της διατήρησης του, ενόψει και των φυσικών επικινδυνοτήτων στην περιοχή, όπως οι σεισμοί, είναι πρωταρχικός στόχος. Σε αυτό το πλαίσιο διεξήχθη έρευνα, από τον (Maravelakis et al., 2023) σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων με τα πρωτογενή δεδομένα να λαμβάνονται μέσω προηγμένων τεχνικών τρισδιάστατης μοντελοποίησης και η αξιολόγηση της δομικής του ακεραιότητας να επιτελείται βάσει της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων (*FEM*). Η παρούσα μελέτη εστιάζει συγκεκριμένα στην ανάδειξη των μεθοδολογιών για την τοπογράφηση, την ψηφιοποίηση και την ανάλυση του χώρου, τονίζοντας έτσι την ανάγκη συστηματικών προσεγγίσεων για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι στόχοι που τίθενται περιλαμβάνουν τη δημιουργία ενός ακριβούς τρισδιάστατου μοντέλου του ναού, τη χρήση μεθόδων τμηματοποίησης που αγγίζει το επίπεδα κάθε λίθου ξεχωριστά (λίθο-προς-λίθο) επιτρέποντας έτσι την ακριβή ανάλυση και μοντελοποίηση κατά την εκτέλεση των διαδικασιών *FEM* για την αξιολόγηση πιθανών σεναρίων κατάρρευσης σε περίπτωση σεισμού. Για την αποτελεσματική τεκμηρίωση και ανάλυση της δομικής ακεραιότητας κτιρίων πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως ο ναός του Απόλλωνα, η μελέτη εξετάζει διάφορες τεχνικές μοντελοποίησης.

Το συστήματα *HBIM* σε αυτές τις περιπτώσεις υποστηρίζουν την μοντελοποίηση και αποθήκευση των περιουσιακών στοιχείων πολιτιστικής κληρονομιάς, επιτρέποντας τη λεπτομερή τεκμηρίωση και μετέπειτα διαχείριση των δομικών τους στοιχείων και ατελειών (Maravelakis et al., 2023; Pocobelli et al., 2018; Tapkin et al., 2022). Οι δυνατότητες του συστήματος *HBIM* έγκεινται στην ικανότητά να ενσωματώνει δεδομένα διαφορετικών τύπων όπως ιστορικά

δεδομένα, γεωμετρικές πληροφορίες και τρέχουσες συνθήκες, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του χώρου (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Pocobelli et al., 2018). Παρά ταύτα, ζητούμενο παραμένει η μεθοδολογία τμηματοποίησης σε τόσο μικρές γεωμετρίες. Αυτή η λεπτομερής ανάλυση επιτρέπει την αξιολόγηση της δομικής αντοχής του συνολικού οικοδομήματος και τον εντοπισμό περιοχών που χρήζουν παρέμβασης ή αποκατάστασης. Εφαρμόζοντας προηγμένες τεχνικές τμηματοποίησης, οι Maravelakis et al., (2023) συνέλλεξαν ακριβή δεδομένα σχετικά με τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και την κατάσταση ενώ παράλληλα μέσω ανάλυσης *FEM* εξέτασαν και αξιολόγησαν την απόκριση των κιόνων σε σεισμικά γεγονότα.

Η μέθοδος *FEM* περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου που προσομοιώνει τη φυσική συμπεριφορά του πραγματικού κόσμου, επιτρέποντας την αξιολόγηση των στατικών και δυναμικών συνθηκών που επηρεάζουν το ναό (Abbate & Invernizzi, 2022; Barsanti et al., 2017; Maravelakis et al., 2023). Στη μελέτη αυτή, τα υλικά ορίζονται με ακρίβεια, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων τους και των δομικών διαμορφώσεων, γεγονός που επιτρέπει την πρόβλεψη των πιθανών σημείων αστοχίας κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Μεταξύ των βασικών ευρημάτων ήταν ότι ορισμένα τμήματα του ναού είναι πιο επιρρεπή σε κατάρρευση με βάση τον σχεδιασμό τους και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της αναμενόμενης σεισμικής δραστηριότητας. Ωστόσο, η εφαρμογή της προηγμένης μοντελοποίησης με *FEM* εμπεριέχει κρίσιμες μεθόδους, όπως η κατάτμηση και εξαγωγή των δομικών στοιχείων, το οποίο παραδοσιακά συνδυάζει χειρωνακτικές εργασίες, αρκετής πολυπλοκότητας και υψηλής εξειδίκευσης τόσο ως προς την ίδια την απόκτηση του νέφους δεδομένων, με συνδυασμένες τεχνικές σάρωσης με *LASER* και φωτογραμμετρίας με *UAV*, όσο και ως προς την μετέπειτα αποσύνθεση του 3Δ πλέγματος στα δομικά του συστατικά.

2.2.4. Η περίπτωση του Μεγαλιθικού Ναού στην Μάλτα

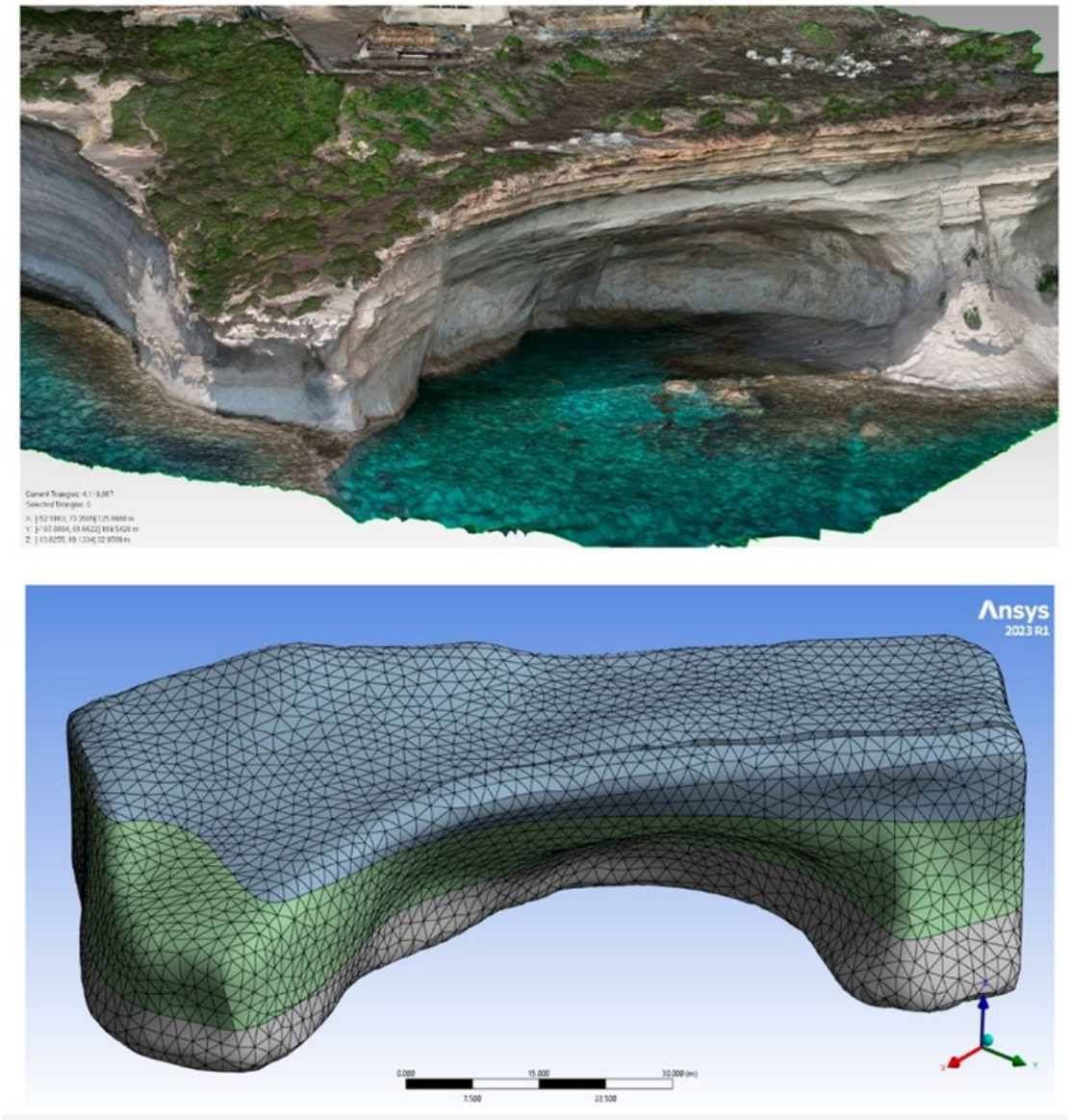
Ο ναός *Xrobb l-Ghagin* αποτελεί σημαντικό μνημείο μεγαλιθικής αρχιτεκτονικής και βρίσκεται στη περιοχή της Μάλτας (Volanis et al., 2024). Κατά το παρελθόν ο ναός αποτέλεσε σημείο ερευνητικού ενδιαφέροντος λόγω εντόνων διαβρωτικών παράκτιων φαινομένων τα οποία υπονομεύουν την σταθερότητα του εδάφους. Στην μελέτη των Volanis et al., (2024) υπογραμμίζεται η ιδιαιτερότητα της απόκτησης και επεξεργασίας των δεδομένων για την ανίχνευση της δομικής ευστάθειας μέσω τεχνικών αριθμητικής ανάλυσης και μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η ευστάθεια των βράχων είναι ζωτικής σημασίας για τη διαφύλαξη τέτοιων εκθεμάτων σπουδαίας πολιτιστικής κληρονομίας, τα οποία συχνά αντιμετωπίζουν κινδύνους είτε από φυσικά διαβρωτικά φαινόμενα είτε από σεισμικά γεγονότα συνδεδεμένα με βραδείς

τεκτονικές αλλαγές που απειλούν εν συνόλω την ακεραιότητά τους (Volanis et al., 2024).

Οι μεγαλιθικοί ναοί, συμπεριλαμβανομένου του *Xrobb l-Ghagin*, είναι ανυπολόγιστης αρχαιολογικής και γεωλογικής σημασίας και ως εκ τούτου απαιτούν προσεκτική ανάλυση και στρατηγικές διατήρησης. Στην δημοσίευση τους οι Volanis et al., (2024) ενσωματώνουν τρισδιάστατη μοντελοποίηση και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης για την αξιολόγηση της πιθανότητας βραχοπτώσεων που τελικώς θα επιφέρει την ολική αποκόλληση του εδάφους θεμελίωσης του ναού. Ερευνητικοί σκοποί του εγχειρήματος είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου τρισδιάστατου παραμετρικού μοντέλου του γεωλογικού υποστρώματος επάνω στο οποίο θεμελιώνεται ο ναός και σε δεύτερο χρόνο η δομική ανάλυση με τη χρήση *FEM* η οποία θα μπορούσε να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την χημική και φυσική σύσταση του υπεδάφους (Volanis et al., 2024).

Η επιτυχία της ανάλυσης αυτής προϋποθέτει την σύνταξη ενός γεωμετρικού μοντέλου υψηλής πιστότητας του γεωλογικού υποβάθρου το οποίο και θα αποτελέσει την μονάδα αναφοράς για την δημιουργία του μοντέλου αξιολόγησης των ιδιοτήτων των υλικών και της δομικής απόκρισης κάτω υπό διάφορα σενάρια φόρτισης. Αποτελέσματα της πρώτης αυτής ανάλυσης είναι ο εντοπισμός των πιθανών τρωτών σημείων της βραχώδους δομής με στόχο την λήψη μέτρων αποκατάστασης. Για την δημιουργία του μοντέλου επιφάνειας υψηλής αναπαραστατικής ικανότητας χρησιμοποιήθηκαν τηλεματικές μέθοδοι επισκόπησης με ενσωμάτωση εναερίων φωτογραφικών πτητικών μέσω, ΣμηΕΑ στην συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς η χωροταξία του μνημείου σε συνδυασμό με τους κανονισμούς ασφαλείας της περιοχής δεν επέτρεπαν την άμεση πρόσβαση στο σημείο ενδιαφέροντος, δηλαδή το σημείο του ρήγματος. Για την δημιουργία του τελικού πολυγωνικού μοντέλου με υφή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Reality Capture* (https://www.capturingreality.com/) το οποίο και διαχειρίζεται την μετατροπή των φωτογραφικών δεδομένων σε ένα συνεκτικό τρισδιάστατο μοντέλο με υφή (Volanis et al., 2024).

Η μετατροπή του μοντέλου σε αναλυτικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του ANSYS *(https://www.ansys.com/*) και συγκεκριμένα της εφαρμογή «Ansys Workbench» μετά από μετά αρκετά βήματα βελτιστοποίησης του πολυγωνικού πλέγματος. Στο ακόλουθο σχήμα (Εικ. 1) απεικονίζεται η αρχική μορφή του τρισδιάστατου φωτογραμμετρικού μοντέλου επιφάνειας (επάνω), σε αντιπαραβολή με την τελική μορφή του μοντέλου (κάτω) μετά και την απαραίτητη επεξεργασία προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναλύσεις τύπου *FEM*.



Εικόνα 1. *Εικόνα από το σημείο του μεγαλιθικού ναού Xrobb l-Ghagin. Πλέγμα επιφάνειας υπολογιζόμενο με φωτογραμμετρία (πάνω) σε αντιπαραβολή με το τοπολογικά βελτιωμένο πλέγμα (κάτω) που χρησιμοποιείται ως είσοδο στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Volanis et al., 2024)*

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο *Ansys* αποτελείτο από 85193 τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία καλύπτουν συνολική επιφάνεια 76254 m3. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι στερεά στοιχεία 4 κορυφών με τρεις βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης ανά κορυφή. Η τοπολογία του πλέγματος επανα-υπολογίστηκε με την συνάρτηση «*Hex Dominate Method*» η οποία παρέχεται στο λογισμικό μοντελοποίησης και προσομοιώσεων της *Ansys* και η οποία μετατρέπει το πολυγωνικό πλέγμα σε στερεό πυραμιδοειδές πλέγμα μέσω μίας κυκλικής διαδικασίας.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, ο κύριος όγκος του γεωλογικού στρώματος που αποσπάται από το κύριο σώμα, δημιουργεί μια προεξοχή, εύκολα

ανιχνεύσιμη με γυμνό μάτι. Αυτή η υποσκαφή συνθέτει ένα σπηλαίο κάτω από το σημείο του ναού, που σχηματίστηκε λόγω διαβρωτικών φαινομένων στην περιοχή, με βασική συνιστώσα τον άνεμο στην περιοχή και δευτερευόντως την θαλάσσια υποσκαφή. Η διάβρωση της βραχώδους όψης λόγω της κόπωσης των μικρών βραχωδών σφηνών είναι μια αργή διαδικασία σε σύγκριση με την υποσκαφή του πετρώματος ασβεστολιθικής σύστασης όπως το στην περίπτωσης της γκλομπερίνας (*Globigerina*), η οποία αποτελεί ένα ιζηματογενές πέτρωμα ευπαθή σε διαβρωτικά φαινόμενα αεροδυναμικής ή υδρο-δυναμικής φύσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία και συνεκτιμώντας την απώλεια στήριξης της προεξάρχουσας περιοχής κρίνεται αναγκαίο να διερευνηθεί το ενδεχόμενο κατολίσθησης του ναού και να υπολογιστεί η ζώνη απαγόρευσης κατά μήκος της ακτογραμμής (Volanis et al., 2024).

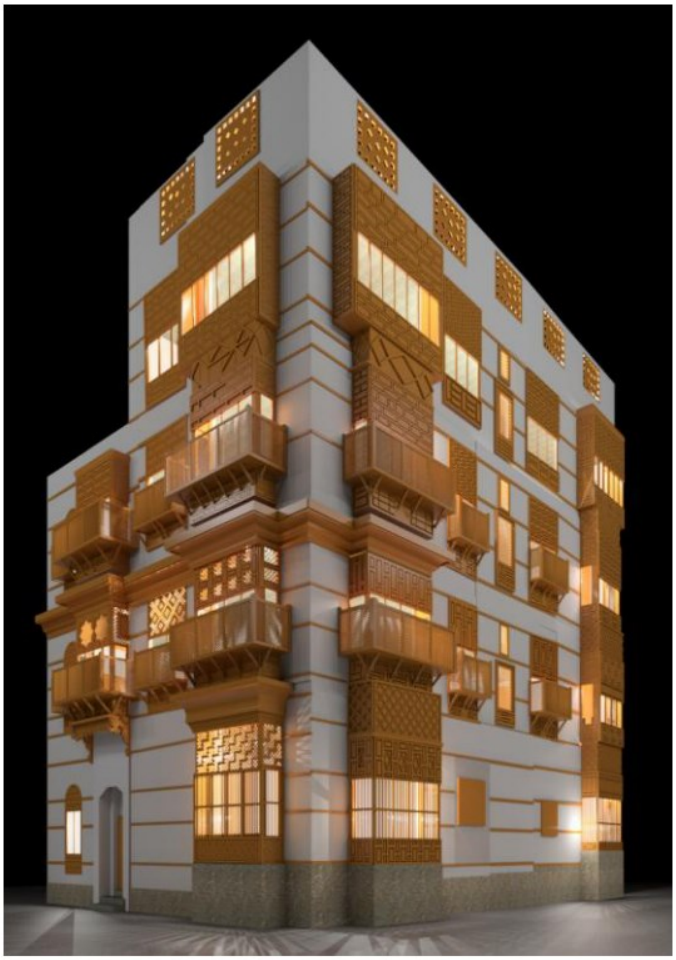
Η δομική ανάλυση στατικών και δυναμικών τάσεων με βάση και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών, επέδειξε επιτυχώς τα κρίσιμα σημεία τρωτότητας και εν μέρει προσδιόρισε τα σημεία πιθανής αστοχίας παρέχοντας έτσι πολύτιμες πληροφορίες για τα μέτρα και τις στρατηγικές διατήρησης και θωράκισης. Ωστόσο, προέκυψαν προκλήσεις και δυσκολίες κυρίως σε ό,τι αφορά την μετατροπή της σύνθετης αναπαραστατικής 3Δ γεωμετρίας σε τοπολογικά χρησιμοποιήσιμη για εφαρμογές μαθηματικής μοντελοποίησης δυναμικού φορτίου, συμπεριλαμβανομένης της διατμητικής αντοχής και της ανίχνευσης της υποβάθμισης των υλικών. Η διαδικασία μετατροπής του νέφους δαπανά χρόνο και εμπεριέχει σύνθετα βήματα κατάτμησης και βελτιστοποίησης υπονομεύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της ανάλυσης των μηχανικών ιδιοτήτων του ναού. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης των μοντέλων *FEM* στα συστήματα *HBIM* προσφέρει μια σημαντική ευκαιρία στο έργο συντήρησης και αποκατάστασης, ενώ συγχρόνως εμπεριέχει πολύπλοκες διαδικασίες τόσο για την μοντελοποίηση όσο και την ενσωμάτωση των ψηφιακών εργαλείων αιχμής στην τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς.

2.3. Φάσμα διαφορετικών ΕΠΚ

Πριν το κλείσιμο του παρόντος κεφαλαίου, για λόγους πληρότητας του βασικού αντικειμένου της συγκεκριμένης διατριβής, κρίνεται αναγκαίο να γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών εφαρμογών των συστημάτων *HBIM* καθώς και των πλεονεκτημάτων αλλά και των προκλήσεων / δυσκολιών που απαντώνται αυτήν την στιγμή στο χώρο με βάση την κείμενη βιβλιογραφία. Τέλος, αμέσως μετά και πριν την παρουσίαση των μεθοδολογιών, ανά μελέτη περίπτωσης, θα δοθεί το αναλυτικά πλαίσιο μαζί με το ερευνητικό κενό και τις σκοπεύσεις που καθοδηγούν την έρευνα.

Η Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ) αναπτύχθηκε από τους Murphy et al., (2009, 2013) ήδη από το 2009 με την καινοτομία της

ενσωμάτωσης παραμετρικών αντικειμένων στην 3Δ αντίστροφη μηχανική. Έκτοτε, η χρήση της έχει αυξηθεί κατακόρυφα σε διάφορες εφαρμογές ενώ παράλληλα έχουν δημιουργηθεί εξειδικευμένες παραμετρικές βιβλιοθήκες, όπως η *Jeddah Historic Building Information Modelling (JHBIM)* (Baik et al., 2013), για την προσαρμογή και την αναπαράσταση του τοπικού αρχιτεκτονικού στυλ και της τεχνικής κατασκευής (Εικ. 2).



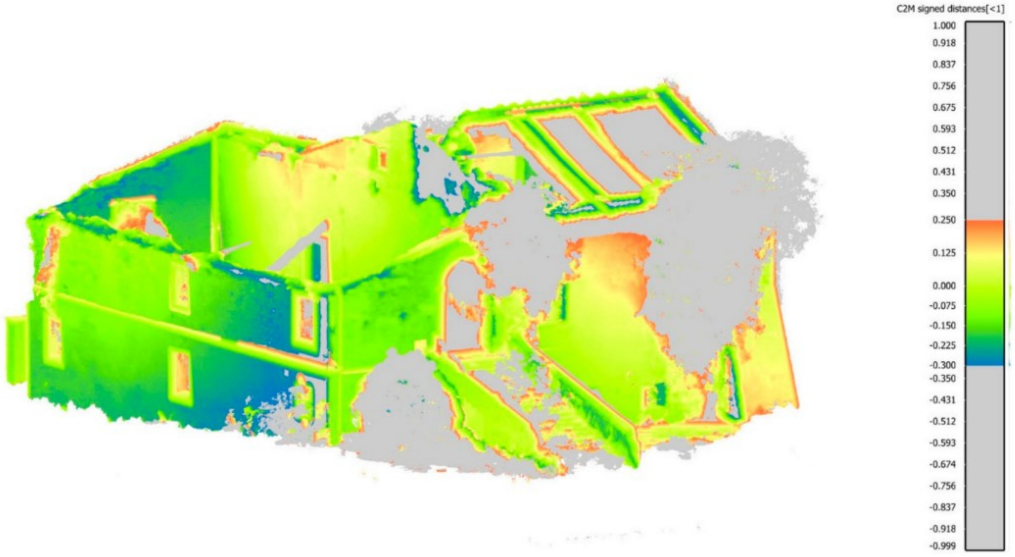
Εικόνα 2. *Μοντέλο Jeddah Historical Building Information Modelling - JHBIM από την Τζέντα της Σαουδικής Αραβίας. Η Πληρότητα Πληροφορίας (LOD) δίδεται της τάξης του 3.5 των* (Baik et al., 2013) *και υλοποιήθηκε στα πλαίσια εδραίωσης των Συστημάτων BIM*

Παράλληλα η δυνατότητα επέκτασης και ενσωμάτωσης νέων δυνατοτήτων έχει καλύψει τόσο το κομμάτι της χωρικής πληροφορίας με υιοθέτηση τεχνολογιών από τον χώρο των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (*Geographic Information Systems - GIS*) (Calvano & Guadagnoli, 2016), όσο και τον τομέα της συνεργασίας και της διαλειτουργικότητας με εφαρμογές που εκτείνονται από την απομακρυσμένη χρήση και πρόσβαση, μέσω τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (*Internet-of-Things - IoT*) (Banfi & Mandelli, 2021; Tang et al., 2019), έως και την ικανότητα αναπαράστασης των κτηρίων με χρήση μεικτής

και επαυξημένης πραγματικότητας (Mania et al., 2021; Sifniotis et al., 2010; Sifniotis et al., 2007).

2.3.1. Εφαρμογή του BIM και HBIM για σκοπούς συντήρησης και αποκατάστασης

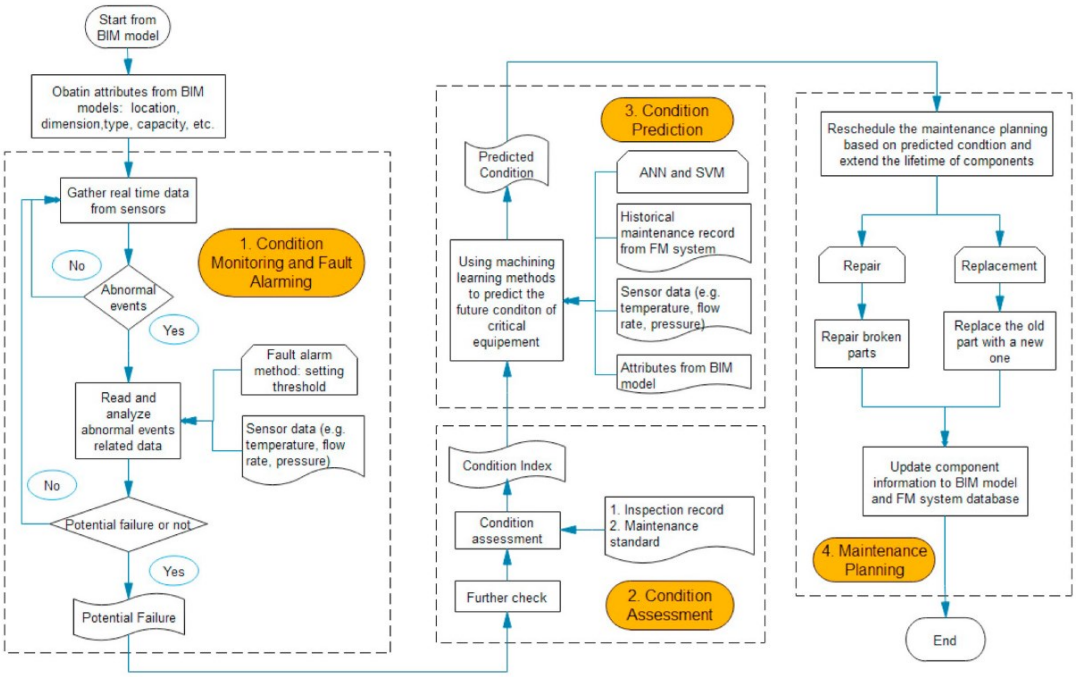
Η συντήρηση και αποκατάσταση είναι θέματα βαρύνουσας σημασίας για τον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς. Το δημόσιο μη-κυβερνητικό σώμα της Βρετανικής Κοινοπολιτείας με την ονομασία «*Historic England*» θεωρεί ζωτικής σημασίας την κατανόηση, τη διατήρηση και την προστασία, για τις μελλοντικές γενιές, της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς, με σαφείς εκπαιδευτικές και οικονομικές προεκτάσεις, όπως για παράδειγμα την περίπτωση των αμέσων εσόδων για την οικονομία μέσα από το τουριστικό προϊόν (Khodeir et al., 2016). Παράλληλα, η τεχνολογία HBIM είναι ένα πολύτιμο εργαλείο υποστήριξης και ενίσχυσης της μη δομημένης 3Δ πληροφορίας η οποία μπορεί πλέον να παρουσιάζεται με χρήση θερμικών χαρτών (heatmaps, Εικ.3), επί του μοντελοποιημένου ψηφιακού αντιγράφου, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την «αποκωδικοποίηση» της υπάρχουσας πληροφορίας και την αποτελεσματικότερη διαχείριση και συντονισμό των έργων συντήρησης και αποκατάστασης των κτηριακών υποδομών (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Maravelakis et al., 2023; Pocobelli et al., 2018).



Εικόνα 3. *Υπέρθεση παραμόρφωσης (deformation) μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού αντικειμένου από την δημοσίευση των* (Paris et al., 2022)*. Το νέφος αντιπαρατίθεται σε σύγκριση με το μοντέλου BIM, με την απόκλιση σε μέτρα (m) να παρατίθεται στην κλίμακα στο ένθετο στα δεξιά, σε μία συγκροτημένη προσπάθεια επέκτασης των εφαρμογών HBIM για κτήρια που έχουν υποστεί σοβαρές φθορές.*

2.3.2. Εφαρμογές HBIM στον τομέα της διαχείρισης (Facility Management - FM)

Η χρήση της τεχνολογίας BIM βρίσκει πλέον εφαρμογές και στον τομέα της διοίκησης και διαχείρισης με εφαρμογές όπως η διαχείριση εγκαταστάσεων (*Facility Management*) (Jung et al., 2014) και εφαρμογές πρόβλεψης (Εικ. 4) κτηριακής συμπεριφοράς (Cheng et al., 2020; Dhalmahapatra et al., 2019; Massafra et al., 2020). Όσον αφορά τον τομέα της διαχείρισης, οι (McArthur et al., 2018) εισαγάγουν μια ενοποίηση μεταξύ του μοντέλου *BIM* και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (ML) για την επισήμανση και την παρακολούθηση ζητημάτων συντήρησης. Συγκεκριμένα, δημιουργούν έναν καινοτόμο τρόπο συλλογής πληροφοριών σχετικά με τις αστοχίες της εγκατάστασης και τις εργασίες αποκατάστασης (*Work of Orders*) με αναφορές οι οποίες αποστέλλονται διαδικτυακά σε πραγματικό χρόνο μέσω αλγορίθμων ML ώστε να αντιμετωπιστούν άμεσα. Χάρη στο κτίριο που προβάλλεται από το σύστημα *BIM*, η ομάδα αποκατάστασης μπορεί να εντοπίσει αμέσως τη θέση και τη σοβαρότητα των αναφερόμενων ζητημάτων. Επιπλέον, η μέθοδος ταξινομεί και ιεραρχεί τα αναφερόμενα ζητήματα επιτρέποντας την λήψη ανατροφοδότησης με ερωτήσεις από χρήστες και ειδικούς που παρατηρούν το συμβάν.



Εικόνα 4*. «Work of orders» των* Cheng et al., (2020)*. Μία ολοκληρωμένη ροή εργασιών πρόβλεψης και σχεδιασμού έργων συντήρησης και αποκατάστασης μέσω συνδυασμένης χρήσης αισθητήριων οργάνων και πληροφοριών που ανασύρονται από τα ΜΚΠ.*

Για το ίδιο θέμα, οι (Pour et al., 2020) συστήνουν μια υβριδική μέθοδο για τη διευκόλυνση των λειτουργιών *FM*, η οποία συνίσταται στην ευκολότερη πρόσβαση σε δεδομένα μεγάλου όγκου που παράγονται από τα μοντέλα *HBIM*

και αφορούν σε διαδικασίες συντήρησης. Κατά τη διάρκεια της ζωής του, ένα κτίριο παράγει τεράστιο όγκο δεδομένων που προέρχονται από επιθεωρήσεις, αναφορές και επισκευές καθιστώντας έτσι ζητούμενο την αντιμετώπιση αυτού του φόρτου εργασίας (Arias et al., 2007). Για την επίλυση αυτού του ζητήματος, οι Pour et al., (2020) προτείνουν μια εικονική ανακατασκευή με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας BIM και του περιβάλλοντος εικονικής πραγματικότητας (*Virtual Reality -VR*). Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι η πλατφόρμα τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά τη φάση της κατασκευής, για την παρακολούθηση της προόδου και της παρουσίασης των αποτελεσμάτων στους πελάτες, όσο καθόλη την διάρκεια ζωής της εγκατάστασης παρέχοντας υποστήριξη στα έργα συντήρησης.

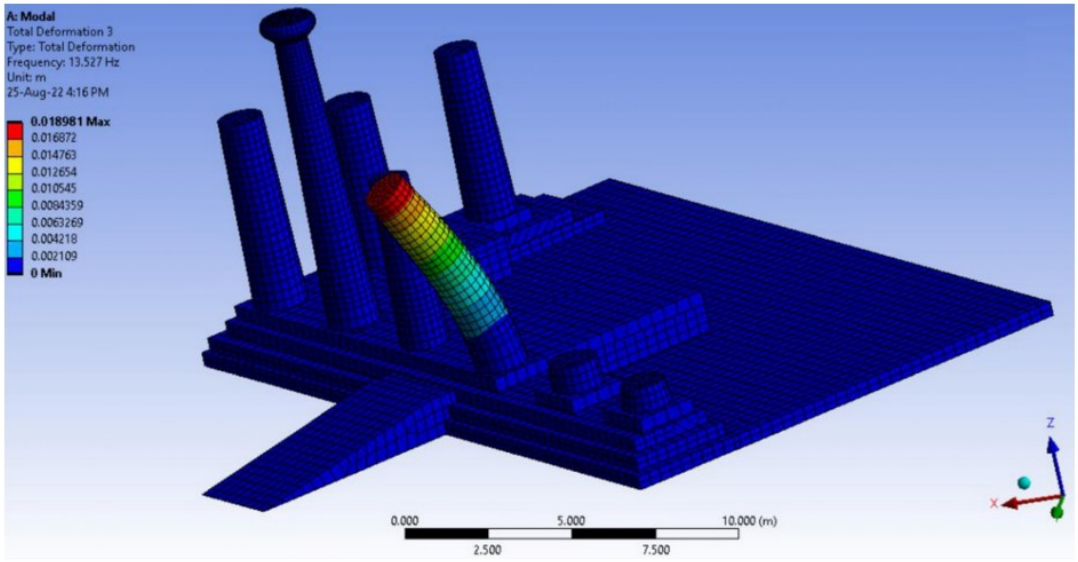
2.3.3. Εφαρμογές HBIM για παρακολούθηση κα επιθεώρηση

Μέχρι το 2018, υπήρχαν πολύ λίγα παραδείγματα χρήσης των συστημάτων *HBIM* για σκοπούς παρακολούθησης, ωστόσο αυτό έχει αλλάξει σημαντικά από τότε (D.P. Pocobelli et al. 2018). Οι μελέτες περιβαλλοντικής παρακολούθησης και προσομοίωσης όπως στην περίπτωσης της (Adán et al., 2023; Pocobelli et al., 2018) είναι μερικά παραδείγματα. Και οι δύο βασίζονται στην ικανότητα των περιβαλλόντων *BIM* για απεικόνιση περιβαλλοντικών προφίλ. Οι Loverdos & Sarhosis, (2023) & Minh Dang et al., (2022) χαρτογραφούν την ανάλυση σε τοιχοποιία με χρήση δικτύων DL με τους πρώτους συγγραφείς να ανασυνθέτουν την τρισδιάστατη γεωμετρία και να εκτελούν δομικές αναλύσεις, εισάγοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποτύπωσης της δομικής συμπεριφοράς του κτηρίου. Οι Sammartano et al., (2023), επιδεικνύουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα (*Asset Management System - AMS*) το οποίο παρέχει ενοποίηση των συστημάτων BIM και GIS για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των κτηριακών υποδομών. Οι Croce, Adeline, et al., (2023) ενσωματώνουν στο δίκτυο δυνατότητες παρακολούθησης και σημασιολογικού εμπλουτισμού σε τρεις διαστάσεις (*semantic annotation*) από τους χρήστες μέσω του νέφους (*cloud*). Τέλος, οι Isailović et al., (2020) προτείνουν ολοκληρωμένα συστήματα, πλήρως αυτοματοποιημένα για την παρακολούθηση και τεκμηρίωση των ζημιών σε υποδομές γέφυρας δίδοντας έμφαση στο οικονομικό σκέλος της διαχείρισης.

2.3.4. Εφαρμογές HBIM σε δομικές προσομοιώσεις

Υπάρχουν αρκετές προσπάθειες για την ενσωμάτωση του μοντέλου HBIM για δομικές προσομοιώσεις σε σημείο που πλέον αναζητούνται ολοκληρωμένες λύσεις πλήρους ενσωμάτωσης των δύο τεχνολογιών, της αντίστροφης μηχανικής Σάρωση-σε- Μοντέλα (Scan-to-BIM) και της μαθηματικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (*Scan-to-FEM*) (Εικ. 5), καλύπτοντας έτσι το σύνολο της διαδικασίας (end-to-end), από νέφη σημείων σε μαθηματικά

ορισμένα μοντέλα προσομοιώσεων (Barazzetti et al., 2015). Οι (Pirchio et al., 2021) λαμβάνουν δεδομένων με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων και στην συνέχεια αναζητούν τα σημεία αδυναμίας ή σημεία υψηλού ρίσκου για κατάρρευση σε ναούς. Σκοπός τους είναι η υπόδειξη των σημείων θωράκισης και ενίσχυσης των ναών θεωρώντας ωστόσο την συνολική απόκριση τους. Στο ίδιο μήκος κύματος οι (Ursini et al., 2022) «εκμεταλλεύονται» τα πλεονεκτήματα της προϋπάρχουσες *BIM* μοντελοποίησης, για την δημιουργία ενός σχετικά απλοποιημένου μοντέλου για την δομική λειτουργία του κτηριακού εκθέματος. Σκοπός τους είναι να ενισχύσουν την αξία των μοντέλων *BIM* τα οποία ούτως ή άλλως ευνοούν και διευκολύνουν την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ λογισμικών μέσω της προτυποποίησης .IFC.



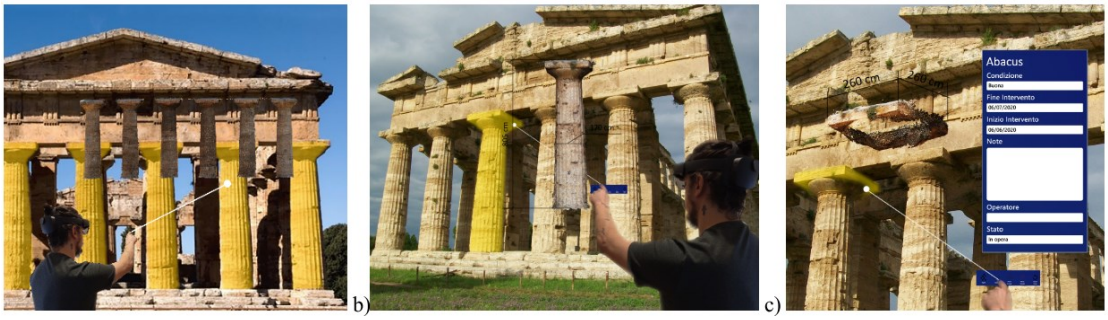
Εικόνα 5*. Πολυτροπική ανάλυση του Ναού του Απόλλωνα. Ο υπολογισμός και η υπέρθεση των αποτελεσμάτων της στατικής δομικής ανάλυσης, εκτελείται με την μέθοδο τω Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), στον αρχαιολογικό χώρο των Δελφών από τους* (Maravelakis et al., 2023).

2.3.5. Εφαρμογές HBIM για εικονικές ανακατασκευές (AR / VR / XR / DT)

Οι εικονικές ανακατασκευές μπορούν να πραγματοποιηθούν για διάφορους λόγους. Βιβλιογραφικά μερικές εφαρμογές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η αντισεισμική προστασία, μέσω της μεθοδολογίας *ARIMA* (Cheng et al., 2020), για συντήρηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο, μέσω της πλατφόρμας *Forge/Dasher* της *Autodesk* (Pocobelli et al., 2022), για σκοπούς κοινής χρήσης, μέσω της τεχνολογίας *cloud* και των δικτυακών τόπων *Sketchfab* (Thalmann et al., 2014), Aioli.cloud (Croce, Adeline, et al., 2023) και *Unity3D* (Teruggi et al., 2021) και για ολιστική αναπαράσταση μέσω του ψηφιακού διδύμου ή *Digital Twin (DT)* (Fabrizio Banfi, 2021). Εκκινώντας από το τέλος, η δημιουργία ψηφιακού διδύμου βασίζεται στην υλοποίηση ενός μοντέλου ενός κτηρίου ή συστήματος σε σημείο που να επιτρέπει την ανίχνευση μεταβολών

στο φυσικό αντικείμενο (Funari et al., 2021). Η συγκεκριμένη ιδέα έλαβε ιδιαίτερης βαρύτητας μετά και την καταστροφική φωτιά στην Παναγιά των Παρισίων επιδεικνύοντας την ικανότητα και την αποτελεσματικότητα των σύγχρονων μεθόδων τηλεπισκόπησης στην συντήρηση και αποκατάσταση των μνημείων (Réby et al., 2023).

Αξιοσημείωτη στον χώρο της εικονικής πραγματικότητας είναι και η εργασία των (Teruggi et al., 2021) οι οποίοι προχωρώντας στο κομμάτι της αυτοματοποίησης και της ανίχνευσης δομικών στοιχείων στα 3Δ δεδομένα, παρουσιάζουν ένα σύστημα που επιτρέπει την εκτέλεση αναζητήσεων σε βάσεις δεδομένων και την ανάσυρση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και σε πραγματικές συνθήκες ενός αρχαιολογικού πεδίου διευκολύνοντας έτσι τα έργα συντήρησης, σχεδίασης και αποκατάστασης (Εικ. 6).



***Εικόνα 6**. Χρήση Επαυξημένης πραγματικότητας επί του πεδίου. Για την επεξεργασία και το σημασιολογικό εμπλουτισμό στοιχείων σε πραγματικό χρόνο και στο σημείο τοποθέτησης γίνεται χρήση τεχνολογίας μεικτής και επαυξημένης πραγματικότητας* (Teruggi et al., 2021).

2.3.6. HBIM για τη μοντελοποίηση της αρχαιολογικής αβεβαιότητας

Μία άλλη καινοτομία που συνδέεται άμεσα με τον χώρο της διαχείρισης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς και της 3Δ μοντελοποίησης είναι η διαχείριση της αβεβαιότητας. Εδώ η αρχαιολογική αβεβαιότητα ορίζεται κατά τους (Mania et al., 2021) (Εικ. 7) ως έλλειψη βεβαιότητας σχετικά με την ορθή τοποθέτηση των διάσπαρτων και κατ' επέκταση, έλλειψη εμπιστοσύνης της τεκμηρίωσης του αρχαιολογικού χώρου. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει αρκετά συχνά σε περιπτώσεις εκσκαφής, όπως και συνέβη στον Θησαυρό των Αθηναίων, ένα κτήριο στους Δελφούς όπου 30 μετόπες, εννέα σε κάθε επιμήκη πλευρά (βόρεια - νότια) και έξι σε κάθε στενή πλευρά (ανατολικά - δυτικά) φέρουν στοιχεία μυθολογίας απεικονίζοντας θέματα από τις ιστορίες του Θησέα, του μυθικού βασιλιά και ιδρυτή της Αθήνας, τους άθλους του Ηρακλή, και σκηνές από την Αμαζονομαχία, τη μυθική μάχη μεταξύ των Ελλήνων και των γυναικών πολεμιστριών που ονομάζονταν Αμαζόνες, στην οποία έλαβαν μέρος και οι δύο παραπάνω δημοφιλείς ήρωες. Σε απόκριση του παραπάνω προβλήματος, οι συγγραφείς ενσωματώνουν στοιχεία 3Δ μοντελοποίησης και σύγχρονες μεικτές μεθόδους αντίστροφης μηχανικής ανασυνθέτοντας το αρχαιολογικό μνημείο και

εκτελώντας στην συνέχεια μοντέλα ασαφούς λογικής (*fuzzy logics*) σε μία προσπάθεια επανα-υπολογισμού της αβεβαιότητας ενώ συγχρόνως προσφέρουν οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων (Mania et al., 2021).



Εικόνα 7*. Η διαχείριση της αρχαιολογικής αβεβαιότητας, η υπόθεση του Θησαυρού των Αθηναίων* (Mania et al., 2021).

2.4. Πλεονεκτήματα & Περιορισμοί Συστημάτων Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ)

Μερικά από τα σημαντικότερα οφέλη της εφαρμογής των μοντέλων BIM στην Πολιτιστική Κληρονομιά είναι ότι περιλαμβάνουν τη δυνατότητα της ψηφιακής ανακατασκευής, και αξιολόγησης των διαφορετικών σεναρίων στα πλαίσια της συντήρησης ή/και αποκατάστασης (Mania et al., 2021), καθώς επίσης και την δυνατότητα της παρακολούθησης όλων των επεμβάσεων τόσο στο παρελθόν όσο και στο μέλλον, σε ένα σχήμα που να επιτρέπει την τεκμηρίωση τόσο των καθαρά τοπογραφικών και αρχιτεκτονικών στοιχείων όσο και των μη μετρητικών «άυλων δεδομένων» που συνιστούν στοιχεία έντονου ποιοτικού ενδιαφέροντος (Pocobelli et al., 2018). Παράλληλα, αυτή η ραγδαία αύξησης της χρήσης των σαρωτών *LASER* και της ενσωμάτωσης των νεφών δεδομένων για εφαρμογές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος δεν έρχεται χωρίς κάποια εγγενή μειονεκτήματα (Maravelakis et al., 2014) απαιτώντας έτσι μία συστηματική μελέτη του χώρου των αρχαιολογικών εφαρμογών σε όλο το φάσμα των διαφορετικών απαιτήσεων και εφαρμογών (Maravelakis et al., 2008). Αυτή η πληθώρα διαφορετικών απαιτήσεων και διαφορετικών χρήσεων έχει πυροδοτήσει το ενδιαφέρον των ερευνητών στον χώρο για τα συστήματα *BIM* τα οποία οικοδομούνται επάνω στην ανάγκη για προτυποποίηση και κανονικοποίηση

(standardization) των μεθόδων λήψης και 3Δ μοντελοποίησης, τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού και ρυθμίσεων όσο και στον γενικότερο σχεδιασμό και την μελέτη προδιαγραφών με ανάγκες για σαφή προσδιορισμό των δομών των δεδομένων και των συνοδευτικών μετα-δεδομένων, με απώτερο σκοπό την σωστή καταγραφή και τεκμηρίωση των φυσικών εκθεμάτων όχι μόνο κατά την στιγμή της αντιγραφής αλλά καθόλη την πορεία τους στον ψηφιακό κόσμο (Maravelakis et al., 2013).

Η ενσωμάτωση των μεθόδων *BIM* στην καθημερινότητα των αρχαιολογικών αρχιτεκτονικών εφαρμογών για σκοπούς διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις, άρρηκτα συνδεδεμένες με τα εγγενή χαρακτηριστικά του χώρου όπως είναι η τάση για αντικείμενα υψηλής πολυπλοκότητας, η τάση για απόκλιση από τα συνήθη μοτίβα κατασκευής, η έλλειψη κανονικοποίησης σε σχέση με την «γραμματική» των αρχαιολογικών αντικειμένων, η ελλιπής τεκμηρίωση ή τα συσσωρευμένα σφάλματα από συνεχείς επεμβάσεις και λανθασμένους χειρισμούς και η έλλειψη των σχεδίων ανέγερσης και οικοδόμησης που αποτελούν μερικά από τα πλέον σαφή παραδείγματα (Croce, Caroti, et al., 2023; Croce, Caroti, Luca, et al., 2021; Garagnani & Manferdini, 2013; Pocobelli et al., 2018). Σε αντίθεση με τις ακριβείς και λεπτομερείς πληροφορίες που εκτίθενται σε νέα και υπό-κατασκευή έργα, στον τομέα της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς δεν είναι σπάνιο να πέφτει κανείς σε ασαφώς τεκμηριωμένα ή ελλιπώς ιστορικά δεδομένα, οικοδομήματα με πολλαπλές προσπάθειες μη καταγεγραμμένες ενέργειες αποκατάστασης και ανακαίνισης (Khodeir et al., 2016; León-Robles et al., 2019).

Όπως τονίζουν οι Pocobelli et al., (2018) σχετικά με τη δυνατότητα επέκτασης των συστημάτων BIM για ιστορικά και αρχαιολογικά εκθέματα, τα ιστορικά περιουσιακά στοιχεία τείνουν από σχεδιασμού να αποκλίνουν από τους κανόνες ομοιομορφίας (homogeneity), που είναι βασική, ρητή παραδοχή των συστημάτων *BIM*, τρίτη «θέση» του ίδιου του θεμελιωτή των εφαρμογών αυτών (Murphy et al., 2009). Οι Murphy et al., (2009, 2013) με σαφήνεια δηλώνουν την ανάγκη ύπαρξης έτοιμων οικογενειών παραμετρικών αντικειμένων αναγνωρίζοντας την πολυπλοκότητα της αντιγραφής των μνημειακών εκθεμάτων. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα σε όρους κόστους/ οφέλους της αρχής των *BIM* συνδέεται με την «υπόθεση εργασίας» περί επαναχρησιμοποίησης των αντικειμένων που μοντελοποιούνται, η οποία αρχή και παραβιάζεται εξ' αντικειμένου στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς, ο οποίος κατακλύζεται από χειροποίητες, μοναδικές και πολύπλοκες κατασκευές (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Martínez-Carricondo et al., 2020; Morbidoni et al., 2020).

2.5. Σημεία καμπής στην ανάπτυξη μοντέλων HBIM

Η απάντηση που δίδεται σε επίπεδο ερευνητικής κοινότητας σε αυτήν την έλλειψη ομοιογένειας στον χώρο της αρχαιολογίας αφορά κυρίως σε ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων αυτοματοποίησης και εξαγωγής των υποκειμένων δομών με έμφαση να δίδεται στην γενικευσιμότητα και επεκτασιμότητα των προτεινόμενων μοντέλων (Cotella, 2023b; Croce, Caroti, Luca, et al., 2021; Gil et al., 2024; Pantoja-Rosero et al., 2023; Pierdicca et al., 2020; Réby et al., 2023) και δευτερευόντως σε διάφορες τεχνικές είτε ενίσχυσης και εμπλουτισμό των βάσεων δεδομένων (Babacan et al., 2017; Colucci et al., 2021; Kellner et al., 2022; F. Matrone et al., 2020) είτε σε αναζήτηση εναλλακτικών για αποφυγή του σύνθετων μοντέλων *HBIM* (Paris et al., 2022) και χρήση των λεγόμενων έξυπνων νεφών δεδομένων (Colucci et al., 2021; Templin & Popielarczyk, 2020) τα οποία ενσωματώνουν δυνατότητες παραδοσιακού νέφους με ιεραρχικές δομές οντολογικών πλαισίων (Poux et al., 2017), μία ιδέα κοντά στην βασική δομή πίσω από την δημιουργία συστημάτων *HBIM*.

Η έλλειψη ομοφωνίας μεταξύ των ερευνητών στον χώρο μεταξύ των παραγόντων που επιδρούν καθοριστικά και αρνητικά στην περαιτέρω επέκταση του κλάδου είναι εύκολα ανιχνεύσιμη με τους (Yang et al., 2020) να αποδίδουν στην ίδια την μοντελοποίηση την αδυναμία προόδου, τους (Cotella, 2023; Gil et al., 2024) να δίδουν έμφαση στο επίπεδο της μοντελοποιούμενης λεπτομέρειας (*Level of Detail - LOD*) και τους (Lovell et al., 2023) να υπογραμμίζουν την ανάγκη τυποποίησης. Από μια διαφορετική οπτική, οι Penjor et al., (2024) προβλέπουν περαιτέρω ενσωμάτωση των τεχνολογιών τηλεματικής και παραγωγής ψηφιακών αντιγράφων με μοναδική παραδοχή την βελτίωση μικρών επί μέρους βημάτων που αφορούν στην βελτιστοποίηση των μέσων καταγραφής και απεικόνισης της 3Δ γεωμετρίας και ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών παρόχων τεχνολογίας τηλεματικής.

Ταυτόχρονα, βιβλιογραφικά εντοπίζονται αναφορές όπου διατυπώνονται ενστάσεις σε επίπεδο στρατηγικής με τους (Lovell et al., 2023) να απορρίπτον την αρχή «*one-size-fits-all*» όπου ένα μοντέλο εργασίας (*Scan-to-BIM*) θα μπορούσε να επιτύχει καθολικά και άρα πρέπει να διερευνηθούν και όλε οι δυνατές εναλλακτικές προτάσεις. Η ιδέα της αυτοματοποίησης και των τεχνικών ενσωμάτωσης μηχανικής και βαθιάς μάθησης, που αποτελεί μία βασική αρτηρία για την κάμψη των δυσκολιών στον τομέα, απορρίπτεται εν τοις πράγμασι από την Cotella, (2023) όταν αυτές θεωρούνται σε αντιπαραβολή με την ακρίβεια που τελικά επιτυγχάνουν, αποτιμούμενη σε επίπεδο πληρότητας αναπαράστασης βάσει δεικτών *LOD*. Αυτή η έλλειψη σύγκλισης μεταξύ των ειδικών, τροφοδοτεί τον διάλογο περί της βέλτιστης στρατηγικής αυτοματοποίησης του τρέχοντος πλαισίου για την δημιουργία μοντέλων *HBIM*.

Κατά μία έννοια, φαίνεται πως τα συστήματα *HBIM* έχουν φθάσει σε ένα κρίσιμο σημείο καμπής όπου αμφισβητείται η ευρύτερη δυνατότητα πλήρους ενσωμάτωσης των μεθόδων αυτών σε επίπεδο αρχαιολογίας και εφαρμογών Πολιτιστικής κληρονομίας (Paris et al., 2022). Προς επίρρωση, οι Forster et al., (2024), αναλογίζονται κατά πόσο η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας καταγραφής της πραγματικότητας (*Reality Capture*) ενδέχεται να συσχετίζεται αρνητικά με την ποιότητα της ερμηνείας της τοπογραφικής μελέτης, στο πεδίο, δεδομένου ότι ο ερευνητής πλέον δεν απαιτείται να «εξετάζει την αρχιτεκτονική» με την ίδια σχολαστικότητα όπως θα έκανε εάν χρησιμοποιούσε τις παραδοσιακές μεθόδους τεκμηρίωσης και καταγραφής.

Κεφάλαιο 3. Ερευνητικό κενό

3.1. Μεθοδολογία ΜΚΙΠ (HBIM) και προκλήσεις στον χώρο της μοντελοποίησης για εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Τα συστήματα *HBIM* παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομίας, όπως την δυνατότητα δημιουργίας 3Δ μοντέλων τα οποία συνδυάζουν γεωμετρικά δομημένη πληροφορία (tangible) με μη δεδομένη πληροφορία (intangible) υψηλής πολυπλοκότητα, επιτρέποντας έτσι την σε βάθος κατανόηση του συγκροτήματος και την καλύτερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση (Dore & Murphy, 2013; Penjor et al., 2024). Εάν και αυτή η μέθοδος αρχικά αποτέλεσε μία βελτίωση στον τομέα της αντίστροφης μηχανικής με το κύριο βάρος να δίδεται στην χρήση του νέφους δεδομένων σε συνδυασμό με τα φωτογραφικά αρχεία για την καλύτερη και πιο αναλυτική περιγραφή και αποτύπωση των μνημείων (Murphy et al., 2009), σήμερα αποτελεί ένα από τα πλέον βασικότερα εργαλεία στην εφαρμογή κοινών πρωτοκόλλων και κανονικοποίησης στον χώρο των κατασκευών με τα αρχεία τύπου .IFC, τα οποία και προτάθηκαν από την Διεθνή Συμμαχία για την Διαλειτουργικότητα (*International Alliance for Interoperability*) να αποτελούν την βάση επάνω στην κοινή αυτή πορεία προς την ευελιξία και την συνεργασία μεταξύ όλων των εμπλεκομένων φορέων και παρόχων λογισμικού .

Το συστήματα *BIM*, εν μέσω και της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης αποτελούν την πλέον προσιτή λύση προς την πορεία της Βιωσιμότητας και της Αειφορίας όπως αυτή διατυπώνεται από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) revolution (Fernández-Mora et al., 2022). Συγχρόνως, το υψηλό διαχειριστικό κόστος και η υψηλή πολυπλοκότητα του αρχαιολογικού γίγνεσθαι συγκρούεται ευθέως με την στοχοθεσία του ΟΗΕ στο θέμα της διάσωσης και διατήρησης των στοιχείων πολιτιστικής κληρονομίας, στόχος 11.4 της Ατζέντας για την Αειφορία και την Βιωσιμότητα (Cotella, 2023). Παρά την κοινώς αποδεκτή ανυπέρβλητη ανάγκη για διατήρηση των μνημείων αυτών για τις μελλοντικές γενεές (Maravelakis et al., 2023; Penjor et al., 2024) η σύσταση των μοντέλων HBIM περιορίζεται σε λίγους μεγάλους οργανισμούς διαχείρισης (Lovell et al., 2023), παρά την ταχύτατη ανάπτυξη της ΤΝ και των αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης (ΜΜ) που θεωρητικά θα μπορούσαν να επιταχύνουν τις εξελίξεις στον χώρο (Cotella, 2023).

Ζητούμενο παραμένει το βασικό εμπόδιο της περαιτέρω εξάπλωσης του αντικειμένου της μοντελοποίησης *HBIM* με τις απόψεις να εντοπίζονται σε ορισμένους βασικούς άξονες. Η έλλειψη κοινού πλαισίου αναφοράς (Poux et al., 2017) και κανόνων ή πρωτοκόλλων στην λήψη και αποτύπωση των δεδομένων αποτελούν μία βασική συνιστώσα (Mania et al., 2021; Maravelakis et al., 2023). Επιπλέον η μεθοδολογία ή η προσήλωση προς μία κοινή

μεθοδολογία Σάρωσης-προς-ΜΚΠ (*Scan-to-BIM*) αποτελεί επίσης βασικό σημείο διερεύνησης (Costa et al., 2024; Cotella, 2023; Gil et al., 2024; Lovell et al., 2023; Pocobelli et al., 2018; Yang et al., 2023; Yang et al., 2020). Η έλλειψη κοινού πλαισίου αναφοράς σε σχέση με το δείκτη πληρότητας πληροφορίας *LOD* στον χώρο των εφαρμογών της αρχαιολογίας προβληματίζει τους ειδικούς καθώς φαίνεται όχι μόνο να μην έχει λάβει έναν κοινά αποδεκτό λειτουργικό ορισμό αλλά να θεωρείται διαφορετικά κατά μήκος των διαφορετικών εφαρμογών (Adegoriola et al., 2021; Cotella, 2023; Penjor et al., 2024). Οι δε προκλήσεις και δυσκολίες στην επέκταση του αντικειμένου του HBIM σχετίζονται τόσο με τον δείκτη *LOD*, ο οποίος καθορίζει και την απαιτούμενη λεπτομέρεια για τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μοντέλου (Yang et al., 2023), και παραμένει σε χαμηλά επίπεδα για ΕΠΚ (*LOD100 – LOD300*) (Cotella, 2023), όσο και με την ανεύρεση του κοινού παρονομαστή μεταξύ των διαφορετικών εφαρμογών αντίστροφης μηχανικής (Adegoriola et al., 2021; Cotella, 2023; Penjor et al., 2024).

Σε απόκριση όλων των παραπάνω η παρούσα εργασία καλείται να απαντήσει σωρευτικά και με στοιχεία καινοτομίας στα παρακάτω ερωτήματα, ακολουθώντας αυστηρώς δομημένες ερευνητικές στρατηγικές τόσο από τον κλάδο της θετικιστικής (Positivism) κατεύθυνσης (Carminati, 2018) όσο και από τον κλάδο της ανάλυσης των θεωρητικών δεδομένων και της Θεμελιωμένης Θεωρίας (*Grounded Theory*). Σκοπός της έρευνας είναι να διερευνηθούν οι δυσκολίες και οι προκλήσεις, στο χώρο της μοντελοποίησης για εφαρμογές Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ) ή *H-BIM* ή *HBIM*, να παρουσιαστεί ένα πλαίσιο κανονικοποίησης σε σχέση με την αναζήτηση και την ανίχνευση της διεθνούς βιβλιογραφίας σε αντικείμενα τα οποία διακατέχονται από έντονη συνέργεια μεταξύ διαφορετικών κλάδων και εγκάρσια αλληλοεπικάλυψη ορολογιών και μεθοδολογιών, όπως στην περίπτωση των εφαρμογών αντίστροφης μηχανικής στον χώρο αρχαιολογικής και αρχιτεκτονικής συντήρησης και διάσωσης των στοιχείων πολιτισμικής κληρονομίας. Τέλος, μετά και τον εντοπισμό και καταγραφή των βασικών δυσκολιών και εμποδίων στον χώρο, προτείνονται λύσεις που βασίζονται σε τεχνολογία αιχμής από τον χώρο της μηχανικής μάθησης, της μηχανικής όρασης και της βαθιάς μάθησης με χρήση οπτικών μετασχηματιστών (*Visual Transformers - ViT*) και μοντέλων θεμελίωσης (*foundation models*). Έμφαση δίδεται στην εισαγωγή πρωτοκόλλων και μεθόδων που να μπορούν να γενικευθούν, να έχουν ευελιξία ως προς το εύρος εφαρμογής (*transferability*) και να φέρουν την ιδέα της δομημένης και αιτιολογημένης προσέγγισης υιοθετώντας έτσι την ρητή ανάγκη για κανονικοποίησης (*standardization*) στον χώρο.

Αναλυτικά τα ερευνητικά ερωτήματα που καθοδηγούν την έρευνα:
Ερώτημα 1: Ποιες είναι οι προκλήσεις και οι δυσκολίες στο κομμάτι της αντίστροφης μηχανικής για εφαρμογές Μοντελοποίησης Ιστορικών Κτηρίων (HBIM) ανά πεδίο εφαρμογών

Ερώτημα 2: Ποιες είναι οι διαφορές, σε επίπεδο μεθοδολογιών και τεχνικών λήψης δεδομένων και μοντελοποίησης, ανά πεδίο εφαρμογών

Ερώτημα 3: Ποιοι συνδυασμοί λέξεων – κλειδιών μπορούν να προσεγγίσουν το πρόβλημα της κατάτμησης του νέφους δεδομένων με βάση την επιλεγείσα εφαρμογή

Ερώτημα 4: Με ποιον τρόπο μπορεί η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης και των προσφάτων εξελιγμένων Μοντέλων Θεμελίωσης να ενσωματωθεί στη ροή εργασιών κατάτμησης των 3Δ δεδομένων

Ερώτημα 5: Ποιες οι δυνατότητες και αδυναμίες των προτεινόμενων συστημάτων μηχανικής μάθησης και βαθέως μάθησης (ΒΜ) στην ανίχνευσης και στον σημασιολογικό εμπλουτισμό αντικειμένων

Ερώτημα 6: Πως η χρήση της ΤΝ και των αλγορίθμων ΜΜ και ΒΜ μπορούν να συνδράμουν στην εξάπλωση των μοντέλων απεικόνισης των δυναμικών και στατικών δομικών χαρακτηριστικών των κτηριακών μνημείων

Ερώτημα 7: Με ποιον τρόπο δύναται να επιτευχθεί η ανάλυση των δομικών στοιχείων των ναών και μνημείων πολιτισμικής κληρονομίας στα θεμελιώδη στοιχεία τους

Ερώτημα 8: Ποια χαρακτηριστικά πρέπει να φέρουν οι προτεινόμενες αλγοριθμικές λύσεις, στον χώρο της αποικοδόμησης των στοιχείων δόμησης, για τις εφαρμογές Μοντελοποίησης Ιστορικών Κτηρίων

Ερώτημα 9: Ποιες είναι οι εναλλακτικές που διερευνώνται στον χώρο της μοντελοποίησης HBIM, με γνώμονα την επιθυμητή πληρότητα της γεωμετρικής και λειτουργικής πληροφορίας, δείκτης LOD

Ερώτημα 10: Με ποιον τρόπο η επιλογή του δείκτη LOD και της μεθόδου συλλογής των 3Δ δεδομένων μπορεί να επηρεάσει τον βαθμό αυτοματοποίησης με χρήση αλγορίθμων ΤΝ και ΜΜ

Κεφάλαιο 4. Πολυδιάστατη ανάλυση των μεθοδολογικών εφαρμογών για ΜΚΠ Ιστορικών Κτηρίων

4.1. Μεικτή Ερευνητική στρατηγική

Ερευνητικά εντοπίζονται διεθνείς εργασίες ανασκόπησης που εστιάζουν στην τεχνολογία *HBIM*, είτε ευθέως όπως στην περίπτωση των (Yang et al., 2020) είτε εμμέσως όπως οι (Zhao et al., 2023) όπου η μοντελοποίηση BIM εκφέρεται μέσα από την ευρύτερη ιδέα των Εφαρμογών Πολιτιστικής Κληρονομίας (ΕΠΚ). Παράλληλα, το ερευνητικό ενδιαφέρον των (Cotella, 2023) στρέφεται στην αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτοματισμού μέσω ΤΝ στον τελικό αποτέλεσμα των μοντέλων HBIM, όπως αυτό μετριέται σε όρους πληρότητας πληροφορίας από τον δείκτη *LOD*. Οι Gil et al., (2024) εστιάζουν στο κομμάτι της κατάτμησης του νέφους. Σε πλήρη ευθυγράμμιση, οι Vinodkumar et al., (2023) εξετάζουν συστήματα τμηματοποίησης αιχμής με ΒΜ (*DL*), δίδοντας ιδιαίτερη προσοχή στα διαθέσιμα δεδομένα αναφοράς (*Benchmarks*), τα οποία και κατηγοριοποιούν με βάση την εσωτερική τους διάρθρωση και την γεωμετρία εισόδου (πλέγμα, νέφος, φωτογραφίες με αλληλοεπικάλυψη, κ.τ.λ.). Οι Yang et al., (2023) ελέγχουν αλγορίθμους κατάτμησης με μεταβλητή ελέγχου την τεχνική λήψης των ψηφιακών δεδομένων (*Digital data Acquisition media*). Στην εργασία τους ταξινομούν τις διατάξεις αυτές ως προς τον τύπο εισόδου δεδομένων (*2D/3D*), την πλατφόρμα καταγραφής (φορητή ή επίγεια) *Terrestrial LASER Scanners (TLS)* ή την τεχνολογία 3Δ ανακατασκευής που μπορεί να βασίζεται στην Μηχανική Όραση (ΜΟ), και αλγορίθμους *Structure from Motion (SfM)* και *Multi-View Stereo (MVS)* (Yang et al., 2023). Τέλος, οι Penjor et al., (2024) εξετάζουν την συνήθη ροή εργασιών που ακολουθείται σε συστήματα HBIM και προσπαθούν να εντοπίσουν τις βασικές προκλήσεις ανά στάδιο μοντελοποίησης.

Υπό αυτήν την έννοια σωρευτικά στην βιβλιογραφία εντοπίζονται συγκλίσεις και αποκλίσεις σε ό,τι αφορά την μοντελοποίηση *HBIM* (Lovell et al., 2023), το λογισμικό μοντελοποίησης (Lovell et al., 2023), την κατάτμηση του νέφους (Lovell et al., 2023; Yang et al., 2023), την πορεία και την τακτική της αυτοματοποίησης (Cotella, 2023; Gil et al., 2024; Vinodkumar et al., 2023; Yang et al., 2023; Zhao et al., 2023), την μέθοδο και τα μέσα απόκτηση των 3Δ δεδομένων (Yang et al., 2023), τύπος δεδομένων (Lovell et al., 2023 & Yang et al., 2023), μέσα καταγραφής τρισδιάστατης πραγματικότητας , το αναμενόμενο ή εφικτό επίπεδο ΠΠ (*LOD*) (Cotella, 2023; Gil et al., 2024; Lovell et al., 2023), το λογισμικό διαχείρισης της βάσης δεδομένων *BIM* (Lovell et al., 2023), την μορφή τελικής αποθήκευσης των δεδομένων (Lovell et al., 2023), την χρήση πρόσθετων πακέτων εργαλείων (*Plugins*) (Penjor et al., 2024), χωρίς ωστόσο

να υπάρχει ένας συγκεντρωτικός οδηγός επιλογής των παραμέτρων αυτών που να ευθυγραμμίζεται με την γενικότερη ιδέα της κανονικοποίησης που είναι βασική παράμετρος των συστημάτων *HBIM* και της 3Δ μοντελοποίησης ιδιαίτερα για εφαρμογές αρχαίων μνημείων σε ένα περιβάλλον ταχύτατα αναπτυσσόμενων μέσων μαζικής καταγραφής και αποτύπωσης (Maravelakis et al., 2013).

Στην συνέχεια της εργασίας επιχειρείται μία μελέτη εντοπισμού και καταγραφής της κείμενης κατάστασης στον χώρο τόσο σε επίπεδο εμποδίων και προκλήσεων όσο και σε επίπεδο αλγορίθμων κατάτμησης και μοντελοποίησης για εφαρμογές *HBIM*. Σκοπός είναι να παρουσιαστεί ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που να ακολουθεί μία δομημένη στρατηγική προσέγγιση, τόσο στην συλλογή των βιβλιογραφικών δεδομένων όσο και στη στατιστική μετα-ανάλυση με βάση και τις συνήθεις ερευνητικές στρατηγικές όπως αυτές αναφέρονται στην βιβλιογραφία (Snyder, 2019). Η εξαγωγή των θεματικών βασίζεται στην εργασία των (Gil et al., 2024) με την κωδικοποίηση να ακολουθεί επαγωγική συλλογιστική πορεία. Το πλαίσιο της Θεματική Ανάλυση που είναι γνωστό κυρίως στον χώρο των ποιοτικών ερευνητικών μελετών συνίσταται σε μια συστηματική προσέγγιση για την εξαγωγή θεματικών εννοιών σε μη δομημένα δεδομένα, όπως αυτά που μπορεί να προκύψουν από μία ανοικτού τύπου συνέντευξη (Naeem et al., 2023). Στο αμέσως επόμενο βήματα της ανάλυσης ενσωματώνονται καθαρά ποσοτικά εργαλεία όπως η πολυδιάστατη ανάλυση και η ιεραρχική ομαδοποίηση συμβάλλοντας έτσι στην ενίσχυση της φορητότητας της μελέτης (*transferability*) και της αξιοπιστίας (*validity*), που κατά κανόνα είναι αμφισβητήσιμες σε ποιοτικά σχήματα έρευνας (Vaismoradi et al., 2013).

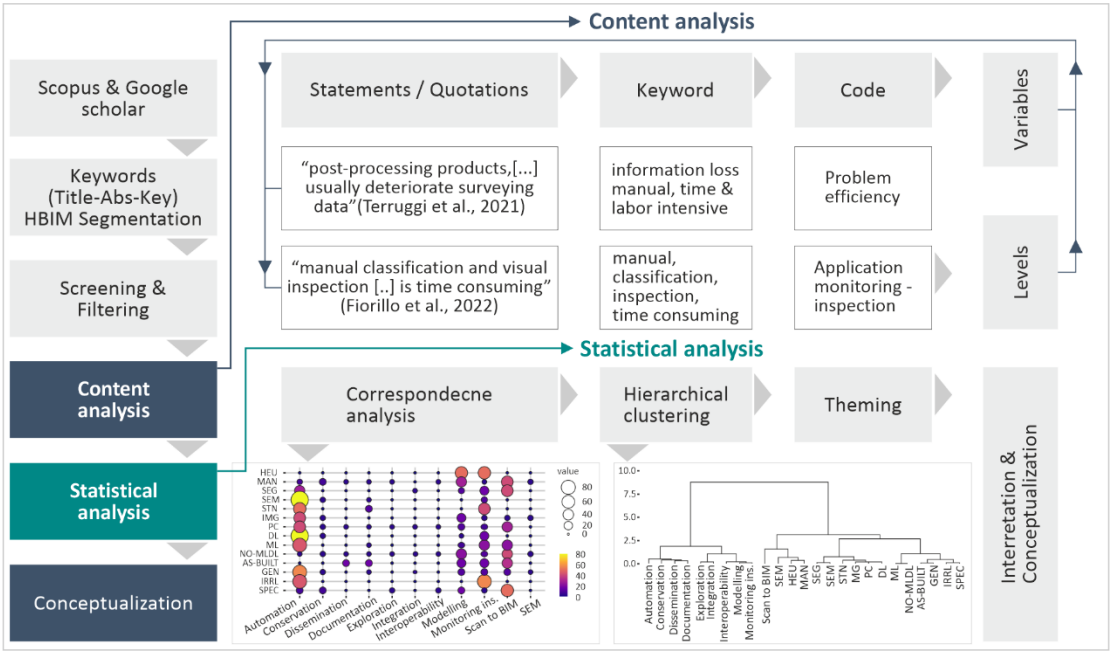
4.2. Ποιοτική έρευνα

4.2.1. Εντοπισμός Βιβλιογραφίας (Literature identification)

Στην προσπάθεια απάντησης των ερευνητικών ερωτημάτων επιχειρείται μία βιβλιογραφική επισκόπηση κατά την οποία συγκεντρώνεται όλο το υλικό, φιλτράρεται και σε μια φάση προ-αξιολόγησης εκτιμάται κατά πόσον πληρούνται τα κριτήρια ένταξης ή όχι κατά τα συνήθη για τις δομημένες βιβλιογραφικές αναλύσεις (Carrera-Rivera et al., 2022; Khan et al., 2003; Snyder, 2019). Στη συνέχεια, κάθε άρθρο υποβάλλεται σε ανάλυση περιεχομένου (*Thematic Content Analyisis*) (Naeem et al., 2023) όπου σύντομες φράσεις ή παράγραφοι αντιστοιχίζονται σε κωδικοποιημένες εκφράσεις. Η απαγωγική από-κωδικοποίηση σε αυτή τη φάση αποσκοπεί στην εξαγωγή των ονομάτων των λειτουργικών εκείνων μεταβλητών, οι οποίες και θα αποτελέσουν τις διαστάσεις ή τους προγνωστικούς παράγοντες του τελικού εννοιολογικού μοντέλου (Gil et al., 2024). Αφού προσδιοριστούν τα ονόματα και

οι τύποι των μεταβλητών, ξεκινά μια δεύτερη επανάληψη για τον προσδιορισμό των διαφορετικών τιμών ή επιπέδων (levels) κατά την ορολογία της στατιστικής, κάθε ξεχωριστής μεταβλητής, για κάθε άρθρο που έχει περάσει την διαδικασία του φιλτραρίσματος (Εικ. 8).

Στο τέλος της θεματικής ανάλυσης, σχηματίζεται ένα στοιχείο πίνακα όπου οι στήλες περιέχουν τα ονόματα των προβλεπτικών μεταβλητών και οι γραμμές περιέχουν τις τιμές που αποδίδονται σε κάθε μεταβλητή για κάθε ξεχωριστή παρατήρηση. Σε αντίθεση με τη συμβατική θεματική ανάλυση, το στάδιο της διασύνδεσης του ειδικού νοήματος σε μία δομημένη θεματική, όπως περιγράφεται και στους Naeem et al., (2023), οροθετείται με ένα μη παραμετρικό στατιστικό εργαλείο ικανό για ανάλυση μεικτών δεδομένων με έναν τρόπο που να είναι διαφανής και να επιτρέπει την ιχνηλασιμότητα (Dhalmahapatra et al., 2019; Drago et al., 2023; Van Dam et al., 2021). Αναλυτικότερα, όπως παρατίθεται και στο αλγοριθμικό διάγραμμα της εικόνας 8, η έξοδος της ποιοτικής ανάλυσης αποτελεί την είσοδο στην Παραγοντική Ανάλυση των Αντιστοιχιών (*Correspondence Analysis - CA*) η οποία και συγκεντρώνει τα προφίλ των διαφορετικών εφαρμογών με βάση ένα μοντέλο ιεραρχικής ομαδοποίησης (*Hierarchical Clustering - HC*).



Εικόνα 8. *Μεθοδολογία συγκέντρωσης και ανάλυσης μεικτών ερευνητικών δεδομένων (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

Η βιβλιογραφική αναζήτηση για τις διαφορετικές μεθοδολογίες παραμετροποίησης και κατάτμησης των 3Δ δεδομένων για μοντέλα *HBIM* διενεργήθηκε με τη χρήση λέξεων-κλειδιών που επιλέχθηκαν βάσει σχετικών

διεθνών μελετών στον χώρο, ή σε εφαρμογές άμεσα συναφείς με το αντικείμενο αλλά ελαφρώς διαφοροποιημένες ως προς το τελικό παράγωγο (Artopoulos et al., 2023; Barrile & Fotia, 2022a; Battini et al., 2024; Billi et al., 2023; Croce et al., 2021; Croce, Caroti, Piemonte, et al., 2021; Forster et al., 2024; Galanakis, Maravelakis, et al., 2023; Ibrahim et al., 2020; Idjaton et al., 2023; Loverdos & Sarhosis, 2023; Matrone et al., 2020; Moyano et al., 2021; Juan Enrique Nieto-Julián et al., 2020, 2022; Paris et al., 2022; Pellis et al., 2022b; Pepe et al., 2022; Poux et al., 2017; Teruggi et al., 2020).

Ο κατάλογος λέξεων-κλειδιών που σχετίζονται με την έννοια της κατάτμησης των δεδομένων που εισήχθη στην βάση αναφοράς ήταν ο εξής;

> *TITLE-ABS-KEY: «(»Historic building information Modeling» OR "HBIM" OR "cultural heritage" OR "Built heritage" OR "digital cultural heritage" OR "H-BIM" OR "masonry wall" OR "digital cultural heritage" AND " segmentation" OR "semantization" OR "classification" OR "Semantic annotation" OR "Semantic Segmentation" OR "point cloud classification" OR "Structural analysis" OR "Automatic segmentation" OR "Mesh segmentation" OR "Segmentation algorithm").*

Η *Scopus* επιλέχθηκε ως η κύρια βάση δεδομένων για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας, δεδομένου ότι θεωρείται πλέον η μεγαλύτερη σε όγκο διαθεματική βάση δεδομένων, η οποία προσφέρει εκτεταμένη κάλυψη περιοδικών και δημοσιεύσεων με κριτές (Carrera-Rivera et al., 2022). Η βάση *Scopus*, κατά την ημερομηνία της αναζήτησης της βιβλιογραφίας, ήτοι 9 Ιανουαρίου του 2025, συγκέντρωνε περισσότερα από 3500 συναφή με τα κριτήρια αναζήτησης. Ακόμη και μετά τον περιορισμό των άρθρων με βάση τα κριτήρια «γλώσσα» στα αγγλικά και του «τύπου εγγράφου», με περιορισμό στα άρθρα με κριτές, τα αποτελέσματα ξεπερνούσαν τα 1500. Παρ' όλα αυτά, αν το *HBIM* τεθεί ρητά ως αναγκαίο στοιχείο τότε για έτος δημοσίευσης μετά το 2020, εντοπίζονται κάτι περισσότερο από 20 έγγραφα. Αυτή η απότομη πτώση του αριθμού των πηγών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δημοσιευμένο έργο διακεκριμένων στον χώρο ερευνητών, κυρίως στο τομέα της ΤΝ για την κατάτμησης του νέφους δεδομένων, δεν περιλάμβαναν ρητά το ακρωνύμιο HBIM (Matrone et al., 2020; Poux et al., 2017; Teruggi et al., 2020), οδήγησε στην χρήση της μη-συστηματικής μεθόδου επισκόπησης (*semi-systematic*). Η συγκεκριμένη μορφή επισκόπησης είναι κατάλληλη για την αντιμετώπιση πολύπλευρων εννοιών, με μεγάλο βαθμό σημασιολογικής ανομοιογένειας και αλληλοεπικάλυψης σε πολλαπλά επιστημονικά πεδία, κάτι που καθιστά δύσκολο το αντικειμενικό του εντοπισμού όλης της σχετικής βιβλιογραφίας από τον ερευνητή (Snyder, 2019). Στην προκειμένη περίπτωση ο τομέας ενδιαφέροντος ήταν οι διάφορες τεχνικές και μεθοδολογίες κατάτμησης για εφαρμογές μοντελοποίησης ΕΚΠ με έμφαση στο στοιχείο *HBIM* χωρίς ωστόσο να αποκλείονται a priori έρευνες που δεν περιείχαν τον όρο *HBIM* ή δεν κατέληγαν σε αντικείμενα *.IFC*.

4.2.2. Κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού ερευνητικών άρθρων

Τα κριτήρια επιλογής των μελετών περιλάμβαναν την περίοδο δημοσίευσης, τη γλώσσα, τον τύπο της πηγής και τη συνάφεια με τουλάχιστον ένα από τα ερευνητικά ερωτήματα. Όσον αφορά την περίοδο δημοσίευσης, τα άρθρα πριν από το 2020 αποκλείστηκαν από τον κατάλογο, καθώς ήταν πιθανότερο να περιλαμβάνουν μεθόδους που κατά κανόνα υλοποιούν την κατάτμηση του νέφους χειροκίνητα. Οι Cotella, (2023), εν έτει 2023, υπογραμμίζει ότι δεν υπάρχουν μελέτες περίπτωσης που να πληρούν τις απαιτήσεις της γεωμετρικής ακρίβειας που χρειάζεται ο χώρος της αρχαιολογίας και εξακολουθούν οι περισσότερες από τις εντοπισμένες περιπτώσεις να βασίζονται σε χειροκίνητες διαδικασίες. Οι Gil et al., (2024) & Penjor et al., (2024) εντοπίζουν αμφότεροι μια αντιστροφή τάσης, με πτωτική πορεία, στην υιοθέτηση της μηχανικής μάθησης (*ML*) και της βαθιάς μάθησης (*DL*) για εφαρμογές *HBIM* το 2020 και στην συχνότητα των κατ' έτος δημοσιεύσεων στο αντικείμενο *HBIM*. Όσον αφορά τον βαθμό απόκρισης στα επιλεγέντα ερευνητικά ερωτήματα, από την ανάλυση παραλείφθηκαν οι μελέτες που δεν εξέταζαν κανένα είδος αυτοματοποίησης τμηματοποίησης ή ενσωμάτωσης εφαρμογών (Adán et al., 2023; Heesom et al., 2021; Moyano et al., 2023; Rocha et al., 2020) και εκείνες που ασχολήθηκαν με την αυτοματοποίηση αλλά δεν σχετίζονταν με εφαρμογές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Ali et al., 2021; Billi et al., 2023). Συνολικά, 54 εργασίες συλλέχθηκαν από την βάση δεδομένων *Scopus* και 40 από την βάση δεδομένων *Google Scholar*, το οποίο είναι επίσης μια κοινώς αποδεκτή βάση ανάσυρσης πηγών σε παραλληλία με την πρωτεύουσα πηγή (Penjor et al., 2024) καταλήγοντας έτσι σε 79 άρθρα τα οποία και παρέχονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. *Πίνακας Εντοπισμού Βιβλιογραφίας & Λειτουργικοί Ορισμοί*

#	Variable	Levels	Description	Abbreviation
1	**Problem**	Labelling	Labelling automation procedure aims to classify each available point or pixel in a given scene (Pellis et al., 2022)	LABELLING
2		Resolution	Information per unit area (Bacharidis et al., 2020)	RESOLUTIO N
3		Complexity	Time and resource-intensive process with increased vulnerability to human errors (Barrile & Fotia, 2022)	COMPLEXITY
4		Collaboration	Data interchangeability between software and liveware (Nieto-Julián et al., 2021)	COLLABORA TION
5		Efficiency	Optimization in resource allocation (S. Teruggi et al., 2021)	EFFICIENCY
6		Scarcity	Dataset availability for AI training and experimentation (Pellis et al., 2021)	SCARCITY
7		Reliability	Metric precision of the acquired data (Teruggi et al., 2020)	RELIABILITY
8		Numerical analysis	Simulate and model the static and dynamic behavior of building structures (Funari et al., 2021)	NUMERICAL-ANALYSIS

9	3D Reality Capture (3DRC) technology exploitation	Validate automation alternatives within the Scan-to-BIM framework (Buldo et al., 2023)	3DRC-TECH-EXPLOITATION
10	Documentation	Collect tangible and intangible data in an efficient pipeline that alleviates loss of information, unnecessary duplicates and redundant work (Fornos & Castellano-Román, 2020)	DOCUMENTATION
11	Interoperability	Export modeling output in a cross-vendor cross-platform format that ensures interoperability among different users and software (Barrile et al., 2022)	INTEROPERABILITY
12	Segmentation	Data clustering in an unsupervised manner can act directly on colour attributes, geometry, backscattered intensity, or various combinations of all of the above (Musicco et al., 2021)	SEGMENTATION
13	Monitoring – Inspection	Automated mapping and identification of various types of building pathologies (Fiorillo et al., 2022)	MONITORING-INSPECTION
14	Modelling	Refers to a process that results in a model that can simulate a real case phenomenon. Within the BIM's concept, simulation addresses the shape of the building or in each best-case scenario functionality, materiality and topology of all of its constituent elements (Paris et al., 2022).	MODELING
15	Debate	Focus researchers on a specific topic of great significance in a comprehensive and informative manner (Matrone et al., 2020)	DEBATE
16	Stone-by-stone segmentation	Can refer to a binary classification problem as in the case of (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023; Idjaton et al., 2021) or a segmentation algorithm that resolves to instance recognition at the last execution step (Loverdos & Sarhosis, 2023)	STONE-BY-STONE
17	Interpretation	Analytical recording is conducted objectively leading to a better understanding and interpretation of the building structure as a whole (Forster et al., 2024)	INTERPRETATION
18	Suitability	Assess BIM's potential in a use-case that strongly diverges from the conventional ones (Paris et al., 2022)	SUITABILITY
19	Integration	Data enhancement either in terms of visual representation accuracy or exploration and exploitation capabilities (Pocobelli et al., 2018)	INTEGRATION
20	Maintenance & Conservation	Design and develop Asset Information Model (AIM) that facilitates maintenance and conservation activities (Martinelli et al., 2022)	CONSERVATION
21	Parametric modeling	Build mathematically defined objects that have their functionality or morpho-typological characteristics dependent on user-set rules and constraints (Calvano et al., 2022)	PARAMETRIC-MODELING
22	Standardization	Establish a structured framework that defines concepts, categories and workflows enabling thus	STANDARDIZATION

			data interoperability and data comparison (Moyano et al., 2022)	
23	**Segmentation** [-]	Heuristic	Ad-hoc diligent segmentation algorithms usually lark behind in terms of cross-domain generalization (Costantino et al., 2021)	HEU
24		Manually	Segmentation automation is happening with a BIM authoring tool (Croce, Caroti, Piemonte, et al., 2021)	MAN
25		When no segmentation is required	Mesh is not decomposed to meaningful entities but is optimized for computer graphics-related applications (Templin & Popielarczyk, 2020)	None
26		Segmentation	Segmentation automation mostly relying on region growing, edge detection or model-fitting clustering algorithms (Zhao et al., 2023)	SEG
27		Semantization	Identification and annotation of all the constituents' architectural elements in the scene (Morbidoni et al., 2020)	SEM
28		Software assisted	Segmentation is performed by third-party software and then decimated elements are re-imported back to HBIM handling platforms (Barrile & Fotia, 2022)	SOFT
29		Stone-by-stone	Segmentation targets consist of individual stones rendering a masonry wall construction (Valero, Bosché, & Forster, 2018)	STN
30	**Data acquisition** [DATA.ACQ]	Fusion	Use of TLS along with photogrammetry (Matrone et al., 2020)	FUS
31		Photogrammetry	Computer vision-based technique that considers multiple overlapping photos from different angles and returns a 3D model along with its color and texture attributes (Liu et al., 2022)	PGRM
32		Benchmark	Deploy DL and ML techniques and validated dataset (Cao & Scaioni, 2021)	BNC
33		Terrestrial LASER scanner	Deploy 3DRC range finders (Balado et al., 2023)	TLS
34		Synthetic data	Generated data using already available 3D objects (Christian Morbidoni et al., 2020)	SYN
35		Retrieved from the Web/Cloud	Retrieve image data through crowdsourcing (Ibrahim et al., 2020)	WEB
36		Benchmark data enriched with augmentation	Enrich benchmark data through augmentation	BNC-SYN
37	**Machine Learning (ML)/ Deep Learning (DL)-based automation** [ML.DL]	Deep Learning	Deep learning of Transferred learning implementations for pc/images segmentation	DL
38		Machine learning	Machine learning-driven automation	ML

39		Combination of both ML & DL	Combination or comparison of different modalities (Matrone et al., 2020)	BOTH
40		None	No use of statistical inference for segmentation purposes	NONE
41	**Input** [-]	Images	Segmentation applied to 2D data (Idjaton et al., 2021)	IMG
42		Images & PC	Segmentation runs on 2D and then results transferred back to 3D space (Pellis et al., 2022)	IMG-PC
43		Mesh	Segmentation performed by mesh editing software (Lombardi & Rizzi, 2024)	MESH
44		Point cloud	Segmentation consumes PC	PC
45		360o Images & Point cloud	Segmentation relies on 360 panoramas and maps result back to PC in a one-to-one correspondence (Angeloni et al., 2023)	PC-IMG360
46		Point Cloud & Radiometric Intensity	Segmentation requires 3D spatial data along with backscattered intensity (Croce, Caroti, Luca, et al., 2021)	PC-INSTY
47	**Application** [APP]	Automation	Automation may refer to any of the entailed steps in the Scan-to-BIM reversed engineering framework (Arnold et al., 2021; Artopoulos et al., 2023; Bacharidis et al., 2020; Battini et al., 2024; Boyko & Rizhko, 2021; Buldo et al., 2023; Cao & Scaioni, 2021; Croce et al., 2021; Galanakis et al., 2023; Güneş et al., 2024; Haznedar et al., 2023; Ibrahim et al., 2020; Kutlu et al., 2023; Kyriakaki-Grammatikaki et al., 2022; Liu et al., 2022; Matrone et al., 2020; Matrone & Martini, 2021; C. Morbidoni et al., 2020; Morbidoni et al., 2020; Musicco et al., 2024; Pellis et al., 2021, 2022, 2022; Pepe et al., 2022; Pierdicca et al., 2020; Ponciano et al., 2021; Teruggi et al., 2020; Croce et al., 2023; Jianghong Zhao et al., 2024)	AUTOMATION
48		Semantization	Serialize production of semantically rich PCs (Betsas & Georgopoulos, 2022)	SEM
49		Dissemination	Embrace data dissemination and stakeholders collaboration (Juan E. Nieto-Julián et al., 2021; Poux et al., 2017)	DISSEMINATION
50		Documentation	Documentation as mentioned herein refers to rigorous data cataloguing and data interpretation (Forster et al., 2024; Nieto-Julián et al., 2020; Teruggi et al., 2021)	DOCUMENTATION
51		Modelling	Modeling comprises parametric modeling and numerical modelling (Abbate & Invernizzi, 2022; Domenica Costantino et al., 2021; Escudero et al., 2024; Funari et al., 2021; Leonardi et al., 2024; Martinelli et al., 2022; Paris et al., 2022; Patrucco & Setragno, 2021; Yang et al., 2021)	MODELING
52		Scan-to-BIM	Present and validate various Scan-to-BIM modalities (Angeloni et al., 2023; Aricò et al., 2023; Avena et al., 2021; Barrile et al., 2022; Barrile & Fotia, 2022b; Calvano et al., 2022; Colucci et al.,	Scan-to-BIM

			2021; V. Croce et al., 2021; Croce, Caroti, Luca, et al., 2021; Croce, Caroti, Piemonte, et al., 2021; Dong et al., 2022; Intignano et al., 2021; Moyano et al., 2021, 2022; Nieto-Julián et al., 2022; Özkan et al., 2022; Vieira et al., 2024)	
53		Monitoring – Inspection	Automate visual inspections and overcame practical implications (Alshawabkeh & Baik, 2023; Balado et al., 2023; Błaszczak-Bąk et al., 2020; Fiorillo et al., 2022; Galantucci et al., 2023; Gong et al., 2021; Idjaton et al., 2021, 2023; Loverdos & Sarhosis, 2023; Musicco et al., 2021; Robador González et al., 2023)	MONITORING-INSPECTION
54		Conservation	Exploit Segmentation algorithms within the context of Conservation and preservation (Angulo-Fornos & Castellano-Román, 2020; Massafra et al., 2020; Réby et al., 2023)	CONSERVATION
55		Integration	Develop a real time asset management system that utilizes both HBIM and GIS capabilities (Sammartano et al., 2023)	INTEGRATION
56		Exploration	CH maintenance and conservation enhancement using Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) and Mixed Reality (MR) (Nguyen et al., 2023)	EXPLORATION
57		Interoperability	Developing and presenting flexible workflows that utilize open standards and open-source alternatives (Lombardi & Rizzi, 2024)	INTEROPERABILITY
58	**Level of Detail** [LOD] (Pocobelli et al., 2018)	As-Built (Level 2)	Output data consists of parametric models	AS-BUILT
59		Generic (Level 0)	Unstructured pc data. In contrast to the definition provided in (Pocobelli et al., 2018), data have not been collected using manual surveys	GEN
60		Specific (Level 1)	Data obtained from a 3D survey are transferred to a 3D editing and visualization tool	SPEC
61		Irrelevant		IRRL
62	**Level of Maturity** [LOM] (Pocobelli et al., 2018)	Level 2	3D data managed by a BIM-compatible software	BIM
63		Level 3	BIM data shared in a collaborative environment	FLO
64		Level 1	Data stored in 3D data handling software	MNGD
65	**Challenges** [-]	Class diversity	Class diversity accounts for the heterogeneity which is endogenous to the CH domain (Pellis et al., 2022a)	CLASS DIVERSITY
66		Efficiency	As described in the Problem identification section above	EFFICIENCY
67		Modeling	As described in the Problem identification section above	MODELING
68		Generalization	Addresses cross-discipline and up-scaling generalization potential (Morbidoni et al., 2020)	GENERALIZATION

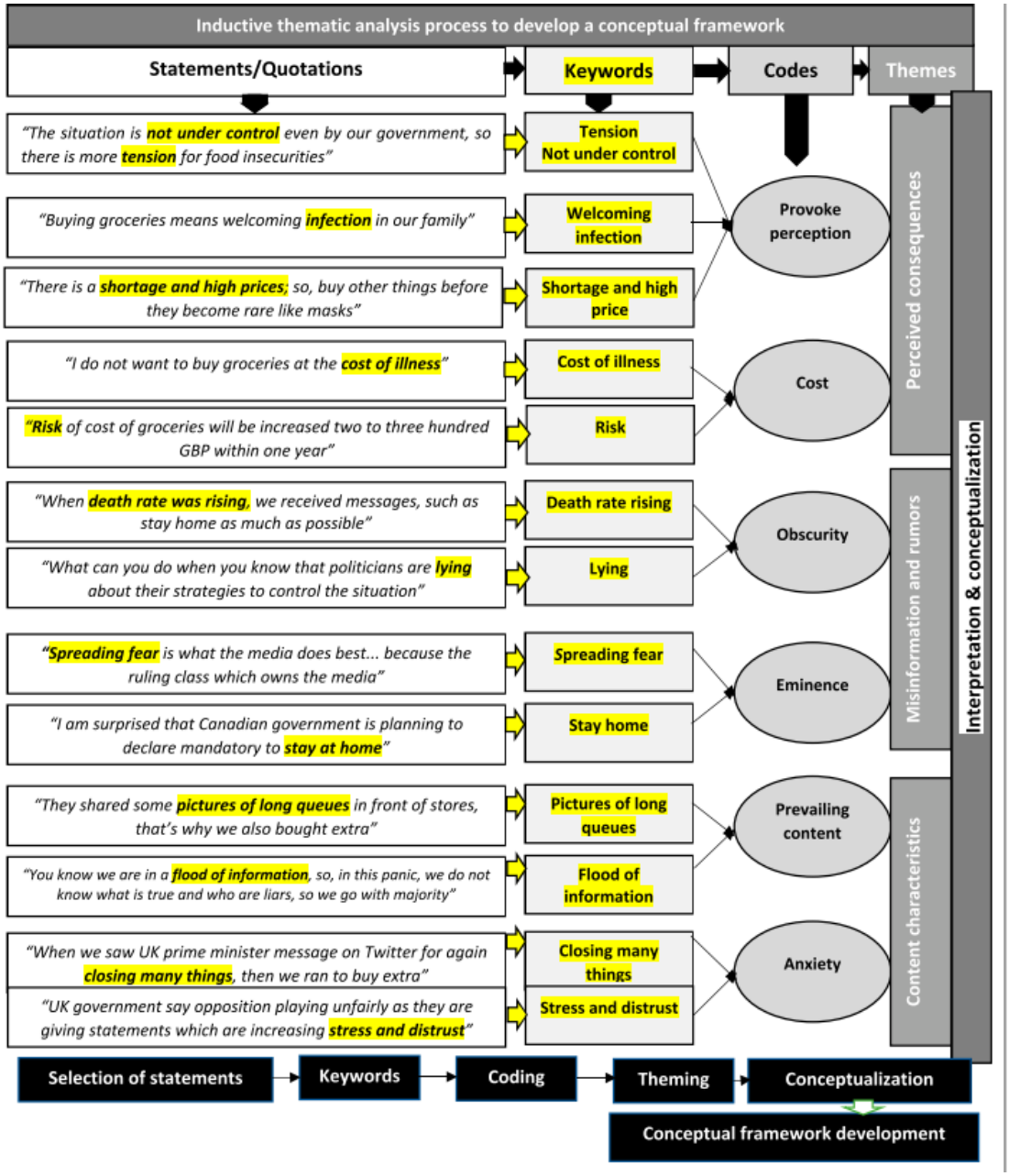
69	Improve suggested algorithm	Considers fine-tuning of the same algorithm (Barrile et al., 2022)	IMPROVE-ALGORITHM
70	2D label transferring	Underscores information loss attributed to inefficient label propagation algorithms (Pellis et al., 2022)	BACK-PROJECTION
71	Data availability	Raises issues regarding insufficient data for AI training data (Pellis et al., 2021)	DATA-AVAILABILITY
72	Scene recognition	Addresses object detection problems within a 2D or 3D environment (Musicco et al., 2021)	SCENE-UNDERSTANDING
73	Artifacts elimination	Considers noise reduction usually attributed to instance segmentation problems (Musicco et al., 2021)	ARTIFACTS ELIMINATION
74	Discrimination power	Streamline segmentation of hard to discern objects (Idjaton et al., 2023)	DISCRIMINATION
75	Fragmentation	Raises concerns about fragmentation in terms of storing formats or processing workflows which leads to inefficient digitizing plans (Angeloni et al., 2023)	FRAGMENTATION
76	Management	HBIM's potential for management and maintenance is sought (Avena et al., 2021)	MANAGEMENT
77	Integration	As described in the Problem identification section above	INTEGRATION
78	Accuracy	Considers modeling accuracy which poses a threat to efficiency	ACCURACY EVALUATION
79	Label-automation	Streamline manual annotations (Patrucco & Setragno, 2021)	LAB-AUT
80	Standardization	As described in the Problem identification section above	STANDARDIZATION
81	Segmentation automation	As described in the Problem identification section above	SEG-AUT
82	Future proofing	Emphasizes the HBIM intrinsic peculiarities that undermine HBIM's applicability (Lombardi & Rizzi, 2024)	FUTURE-PROOFING
83	Compatibility	Cross-platform, cross-vendor and cross-discipline compatibility (Templin & Popielarczyk, 2020)	COMPATIBILITY
84	User-friendliness	Democratization of state-of-the-art execution workflows so as to be inclusive and manageable by non-AI experts (Matrone & Martini, 2021)	USER-FRIENDLINESS

4.2.3. Θεματική ανάλυση

Για την εξαγωγή θεματικών και την μετέπειτα ποιοτική ανάλυση, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στους (Naeem et al., 2023) μέχρι το τρίτο βήμα (Εικ. 9). Η θεματική ανάλυση ή ανάλυση περιεχομένου είναι μια ημι-δομημένη μέθοδος για την ερμηνεία ποιοτικών σύνθετων δεδομένων με διαυγή και συστηματικό τρόπο και χρησιμοποιείται ευρέως ως εργαλείο για τη διερεύνηση και την κατηγοριοποίηση κειμενικών πληροφοριών ή συνεντεύξεων (Vaismoradi

et al., 2013). Περιλαμβάνει έξι διαφορετικά στάδια, 1) απομαγνητοφώνηση δεδομένων (*transcription*), 2) εξοικείωση με τα δεδομένα (familiarize), 3) αναγνώριση προτύπων (*pattern detection*), 4) απόδοση κωδικών (code attribution), 5) εξαγωγή θεμάτων (*theme extraction*) και 6) διαμόρφωση και επικύρωση θεωριών (*conceptualization*) με τη χρήση των προηγουμένως εξαχθέντων σχημάτων κωδικοποίησης. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία που διαμορφώνει ένα εννοιολογικό μοντέλο με συγκεκριμένο και ανιχνεύσιμο τρόπο (Naeem et al., 2023).

Η θεματική κωδικοποίηση χρησιμοποιήθηκε εδώ για 1) τον προσδιορισμό των μεταβλητών, δηλαδή για τον εντοπισμό των ανεξαρτήτων μεταβλητών (*explanatories*) στα τελικά δεδομένα, και για 2) την συμπλήρωση των κενών (*Non Available - NAs*), όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις που οι συγγραφείς δεν ανέφεραν ρητά το σκοπό της εργασίας ή τις προκλήσεις και τα προβλήματα που συνάντησαν. Στη συνέχεια, για κάθε άρθρο, ή ανεξάρτητη παρατήρηση (*independent observation*), οι τιμές των μεταβλητών εξήχθησαν με επαναλαμβανόμενο τρόπο. Ορισμένα ονόματα μεταβλητών (Πίνακας 1) είναι ευρέως διαδεδομένα στον ακαδημαϊκή ονοματολογία, όπως η «Διατύπωση προβλήματος» (*Problem Statement*), «Σχεδιασμός μελέτης» (*Research study design*), «Περιορισμοί», «Κενά και προκλήσεις» και «Μελλοντική έρευνα» είναι μετρικά χαρακτηριστικά παραδείγματα. Άλλες ορίζονται με σαφήνεια εντός του HBIM τομέα (Buldo et al., 2023; Pocobelli et al., 2018), όπως το επίπεδο ΠΠ (*Level of Detail*) και τέλος, η τρίτη κατηγορία αποτελείται από κωδικούς που προέκυψαν από την ανάλυση περιεχομένου, όπως στην περίπτωση των « *Segmentation targets*» που αφορά στο αντικείμενο στόχο της κατάτμησης, «Input» που είναι η είσοδος στον μηχανισμό αυτοματοποίηση, «*Projection Method*» που εμπεριέχει την μεθοδολογία προβολής των μεταδεδομένων από τις δύο διαστάσεις στις τρεις ή από τον χώρο μικρότερης ανάλυσης στον χώρο μεγαλύτερης ανάλυσης. Η διεργασία κυκλικής αναγνώρισης και εξαγωγής θεματικών ολοκληρώθηκε όταν πλέον δεν ανέκυπταν νέα δεδομένα από τα επιστημονικά περιοδικά σε σχέση με την βασική μεθοδολογία.



Εικόνα 9. *Θεματική ανάλυση κατά τους Naeem et al., (2023). Η διαδικασία εκκινεί με κομμάτια που εξάγονται από το περιεχόμενο, έπειτα ακολουθεί η κωδικοποίηση χρησιμοποιώντας λέξεις κλειδιά ή μικρές εκφράσεις. Στο τρίτο βήμα δημιουργούνται οι κατηγορίες και τέλος οι κατηγορίες ενώνονται με σκοπό να συγκροτήσουν ένα νοητικό οικοδόμημα (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

Ο Πίνακας 1 εξυπηρετεί διττό σκοπό, πρώτον, περιλαμβάνει τον πίνακα αναγνώρισης άρθρων (*Research Identification Matrix - RIM*), και δεύτερον συγκεντρώνει του «λειτουργικούς» ορισμούς των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρακάτω ανάλυση. Τα αναδυόμενα θέματα – μεταβλητές (*Segmentation method, Data acquisition, Input, ML.DL automation, Output type, Segmentation targets, Challenges, Problems, etc..),* μαζί με τις

τιμές τους ή τα επίπεδά τους, συγκεντρώνονται στις στήλες δύο και τρία. Η σύντομη περιγραφή και ο κωδικός που χρησιμοποιήθηκε στην στατιστική επεξεργασία παρατίθενται στις δύο τελευταίες στήλες.

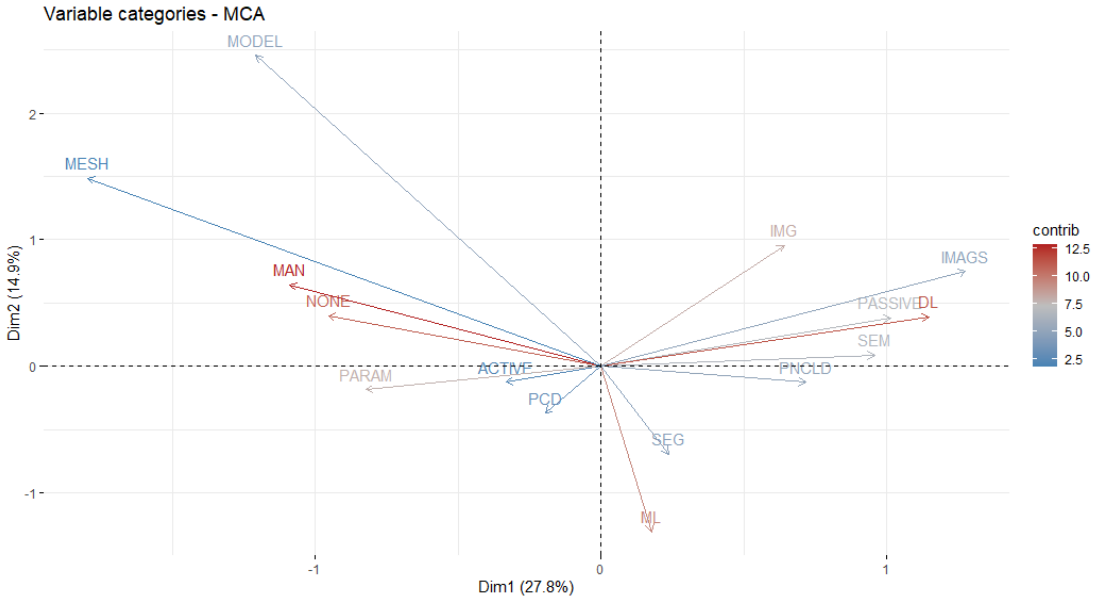
4. 3. Ποσοτική ανάλυση

Η Παραγοντική Ανάλυση των Αντιστοιχιών – ΠΑ (*Correspondence Analysis - CA*) είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως ως εργαλείο διαστασιακής μείωσης (Dhalmahapatra et al., 2019; Drago et al., 2023; Greenacre, 1993; Van Dam et al., 2021) και αποτελείται από μια μέθοδο οπτικοποίησης ενός αμφίδρομου πίνακα συχνοτήτων (two-way samples-by-variables *contingency table*) (Greenacre, 1993). Υποθέτοντας ότι ο πίνακας περιέχει n το πλήθος παρατηρήσεις κατανεμημένες σε p προγνωστικές μεταβλητές, τότε κάθε γραμμή του πίνακα αυτού αντιπροσωπεύει ένα σημείο σε ένα χώρο p-διαστάσεων (Greenacre, 1993). Ωστόσο στη περίπτωση των κατηγορικών μεταβλητών (nominal values) οι διαφορετικές τιμές μίας μεταβλητής δεν αποτελούν ένα συνεχές (continuum) αλλά στην ουσία δημιουργούν νέες διαστάσεις στον χώρο. Για παράδειγμα, εφόσον η μορφή της εισόδου των δεδομένων (*Input*), λάβει τις τιμές «φωτογραφίες», «φωτογραφίες και νέφος δεδομένων», «φωτογραφίες 360^0 και νέφος δεδομένων» (Πίνακας 2) δημιουργείται, στατιστικά, ένας χώρος ο οποίος διαθέτει τρείς ξεχωριστές διαστάσεις, μία για κάθε τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής, ακριβώς όπως πολλαπλασιάζονται οι διαστάσεις των δεδομένων με τις διχοτομικές μεταβλητές σωστού λάθους στην κωδικοποίηση τύπου «*one-hot encoding»* (Xu et al., 2021).

Σε αντίθεση με ορισμένες άλλες ευρέως αξιοποιημένες μεθόδους μείωσης διαστάσεων, όπως η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (*Principal Component Analysis*) (Greenacre, 1993), η ανάλυση *CA* και η Πολλαπλή Παραγοντική Ανάλυση των Αντιστοιχιών (*Multiple Correspondence Analysis - MCA*), είναι υλοποιήσιμες απευθείας σε κατηγορικά δεδομένα ή δεδομένα μεικτού τρόπου. Η *MCA* έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιο πλαίσιο, από τους (Drago et al., 2023) σε μία προσπάθεια αποκωδικοποίησης των πολύπλοκων μοτίβων στον χρηματοπιστωτικό τομέα (fintech). Αντίστοιχα οι Van Dam et al., (2021) εφάρμοσαν τη *MCA* σε μελέτες περίπτωσης, εξετάζοντας την διακριτική ικανότητα της μεθοδολογίας υπό διαφορετικά πεδία εφαρμογών με θετικά αποτελέσματα.

Οι διαφορετικές εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (*APPs*) οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση περιεχομένου, θεωρούνται τα «ανεξάρτητα» δείγματα και οι μεταβλητές είσοδος (*Input*), κατάτμηση (*Segmentation*), μηχανική ή βαθειά μάθηση (*Machine Learning / Deep Learning Implementation, ML.DL*) και ΠΠ (*Level of Detail - LOD*) είναι οι μεταβλητές ελέγχου. Η βασική ιδέα είναι ότι οι διαφορετικές εφαρμογές περιγράφονται από κοινού από αυτές

τις μεταβλητές. Η μεταβλητή είσοδος (*Input*) απλοποιήθηκε περαιτέρω σε μια δυαδική μεταβλητή που αποτελείται από τα επίπεδα νέφος δεδομένων (*Point Cloud*) ή εικόνα (*Image – IMG*), η τιμή «*NO-MLDL*» αποδόθηκε στο *NONE* εντός της μεταβλητής ελέγχου ενσωμάτωσης ΤΝ (*ML.DL*) και η ένδειξη «μη-σχετικό» (*Irrelevant – IRRL*) συστάθηκε με σκοπό να ενσωματώσει περιπτώσεις όπου η έννοια ΠΠ (*LOD*) δεν έχει πρακτικά καμία φυσική σημασία, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ελέγχου της ακρίβειας κατάτμησης ενός αντικειμένου που τελικά καταλήγει σε αρχεία εικόνας. Η προϋπόθεση πίσω από αυτές τις αντικαταστάσεις είναι ότι οι μικρές υπο-εκπροσωπούμενες κατηγορίες τείνουν να διαχωρίζονται έντονα από το κοινό διάγραμμα (*Biplot*) που παράγεται στην έξοδο της Παραγοντικής Ανάλυσης. Η τελευταία υπόθεση ελέγχθηκε μέσω της *MCA* η οποία είναι ταχύτερη, ως προς την διαδικασία αφού μπορεί να υλοποιηθεί απευθείας σε μεικτού τύπου δεδομένα (Drago et al., 2023) (Εικ.10). Για την ανάλυση CA απαιτείται ένα ενδιάμεσο βήμα που είναι η δημιουργία πινάκων συχνοτήτων και η κανονικοποίηση (normalization) των δεδομένων, το οποίο βιβλιογραφικά συνδέεται με εσφαλμένο υπολογισμό της συνολικής «αδράνειας» (*inertia*), δηλαδή του σταθμισμένου μέσου όρου των τετραγώνων το συντεταγμένων, επί των διαστάσεων προβολής (Greenacre, 1993). Πρακτικά, στη ανάλυση συνιστωσών *CA* η προβολή των αξόνων γίνεται με στόχο την ενσωμάτωση της μέγιστης διακύμανσης του δείγματος ή αδράνειας όπως αυτή υπολογίζεται από τις ιδιοτιμές (*eigenvalues*) του πίνακα (Van Dam et al., 2021)



***Εικόνα 10**. Έλεγχος επίδρασης τιμών μεταβλητών με μικρή εκπροσώπηση στο δείγμα , με την μέθοδο MCA. Το υπόμνημα στα δεξιά δείχνει το μέγεθος της επίδρασης στο δείγμα με το κόκκινο να αντιστοιχεί σε μεγάλες τιμές συσχέτισης. Είναι εμφανές ότι η μέθοδος πλέμα (Mesh, μπλέ χρώμα στο 2ο τεταρτημόριο), η μέθοδος (MAN, κόκκινο χρώμα στο 2ο τεταρτημόριο) που αντιστοιχεί σε χειροκίνητη κατάτμηση και η μεθοδολογία λήψης εικόνων (IMAGS, μπλε χρώμα στο 1ο τεταρτημόριο) διαφοροποιούνται εντόνως στο δείγμα μέσω της απομάκρυνσης τους από*

την αρχή των αξόνων. Και οι τρεις είναι δειγματοληπτικά πιο απίθανες σε μια μελέτη που αναζητά μεθοδους αυτοματοποίησης με ενσωμάτωση ΤΝ για μοντελοποίηση HBIM.

Ακολουθώντας την μεθοδολογία των Drago et al., (2023), ο ακριβής αριθμός των διαστάσεων επιλέχθηκε με τη χρήση ενός διαγράμματος που αποτιμά την συνολικά αποτιμούμενη διακύμανση του δείγματος ανά αυξανόμενο βαθμό θεωρούμενων συνιστωσών (*Scree Plot)*. Η ιεράρχηση και μετέπειτα ομαδοποίηση εκτελέστηκε με την χρήση της στατιστικής γλώσσας R, έκδοση 4.4.2 2 (R Core Team, 2024) εντός του περιβάλλοντος ανάπτυξης εφαρμογών (*Integrated Data Environment IDE*) *RStudio* (Posit team, 2024). Για τον υπολογισμό της ιεραρχίας έγινε επίκληση της συνάρτησης *hclust*() με επιλογή της μεθόδου σύνδεσης «ward.2», όπως αναφέρεται στους (Murtagh & Legendre, 2011). Ο ακριβής αριθμός των ομάδων εκτιμήθηκε σύμφωνα με την ημι-ντετερμινιστική μέθοδο της κάμψης της κλίσης ή κανόνας του γονάτου – *Elbow's rule* (Dhalmahapatra et al., 2019). Η λογική πίσω από τον κανόνα αυτόν είναι ότι η πολυπλοκότητα του μοντέλου λαμβάνεται ως ποινή και έτσι το βέλτιστο είναι η μεγαλύτερη ενσωμάτωση της διακύμανσης (*Within Sum of Squares - WSS*) στον μικρότερο δυνατό αριθμό ανεξαρτήτων ομάδων. Μετά τον βρόχο βελτιστοποίησης συστάδων, οι ομάδες εφαρμογών (*Clusters*) αποτελούν τον κοινό παρονομαστή για την συγκέντρωση και την εξαγωγή των μοτίβων στα μεθοδολογικά χαρακτηριστικά που τελικά παραμετροποιούν τις εφαρμογές μοντελοποίησης *HBIM*. Για την γρηγορότερη και ευκρινέστερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων δημιουργούνται διαγράμματα «αράχνης» (*spider plots*) ή ραντάργράμματα (*Radarplots*),τα οποία συνοψίζουν τις διαφορές μεταξύ-και-εντός-ομάδων με την σχετική συχνότητα να τοποθετείται κατά μήκος των αξόνων - μεταβλητών.

4.4. Αποτελέσματα ποσοτικής ανάλυσης

Η επικείμενη ανάλυση επιχειρεί να δώσει απαντήσεις, σε πρώτο βαθμό στο σύνολο των ερευνητικών ερωτημάτων. Αναλυτικότερα, αρχικά το κεφάλαιο αυτό θα αντιμετωπίσει τα ερωτήματα 2, 5, 10 που σχετίζονται με τις διαφορές σε επίπεδο μεθοδολογιών, τις δυνατότητες και τις αδυναμίες των συστημάτων ΤΝ για εφαρμογές μοντελοποίησης σε ΕΠΚ και της συμβολής του δείκτη ΠΠ στην επιλογή της μεθόδου συλλογής και επεξεργασίας των 3Δ δεδομένων. Στην συνέχεια θα αναζητηθούν οι απαντήσεις στα ερωτήματα 1,4,6,8 και 9 που σχετίζονται με τις προκλήσεις της αντίστροφης μηχανικής και της ενσωμάτωσης της ΤΝ στην μοντελοποίησης *HBIM* καθώς και τα χαρακτηριστικά των αναζητούμενων λύσεων σε επίπεδο αλγορίθμων και τεχνολογιών ώστε να επιταχυνθεί ο κρίσιμος αυτός επιστημονικός χώρος. Αναπτύσσεται μία δομημένη μεθοδολογία για την διασύνδεση των λέξεων κλειδιών με βάση και τα ευρήματα της βιβλιογραφικής έρευνας η οποία θα αποτελέσει τον χάρτη για την μετέπειτα ανίχνευση της σχετικής βιβλιογραφίας. Τέλος, το σύνολο των ερευνητικών ερωτημάτων θα αντιμετωπιστούν στο κεφάλαιο των

συμπερασμάτων ενώ τα ερωτήματα 4, 5, 8 και 10 θα αναλυθούν ακόμα περισσότερο στα επόμενα κεφάλαια με βάση και τις δοκιμαζόμενες τεχνικές κατάτμησης και αυτοματοποίησης. Σκοπός είναι με βάση τα χαρακτηριστικά και τις προκλήσεις και αδυναμίες που εντοπίζονται σε αυτό το κεφάλαιο, να «σκιαγραφηθεί» το προφίλ των αλγορίθμων και μεθοδολογιών που πρέπει να προστεθεί στην «φαρέτρα» των εργαλείων του ερευνητή στον χώρο των *HBIM* εφαρμογών.

4.4.1. Διάγραμμα Biplot

Όσον αφορά το προφίλ των μεθοδολογιών, ερωτήματα 2,4 και 10, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα *Biplot* (Εικ. 11), το οποίο απεικονίζει τα δεδομένα σε δισδιάστατο χώρο, που υποδεικνύεται από τη Διάσταση-1 και τη Διάσταση-2. Οι δύο αυτές διαστάσεις προκύπτουν από την ανάλυση *PCA*, και όπως αναγράφεται στους άξονες, αντιπροσωπεύουν το 69,3% της συνολικής διακύμανσης του δείγματος. Κάθε σημείο στο διάγραμμα διασποράς αποτελείται από την κάθετη προβολή των σημείων στο δισδιάστατο επίπεδο (Greenacre, 1993) και αντιστοιχεί σε διάφορα επίπεδα (levels) των κατηγορικών μεταβλητών. Από τη στιγμή που τα δεδομένα προβάλλονται σε ένα χώρο 2Δ, γίνεται ευκολότερο να συναχθούν και να οπτικοποιηθούν οι συσχετίσεις «εντός του συνόλου» (Van Dam et al., 2021). Το υπόμνημα, στα δεξιά, διαχωρίζει τις στήλες με τις μεθοδολογίες *HBIM* (*Input ~ DAC ~ LOD ~ ML.DL*) από τις γραμμές που περιέχουν τις κωδικοποιημένες από την θεματική ανάλυση εφαρμογές *HBIM*.

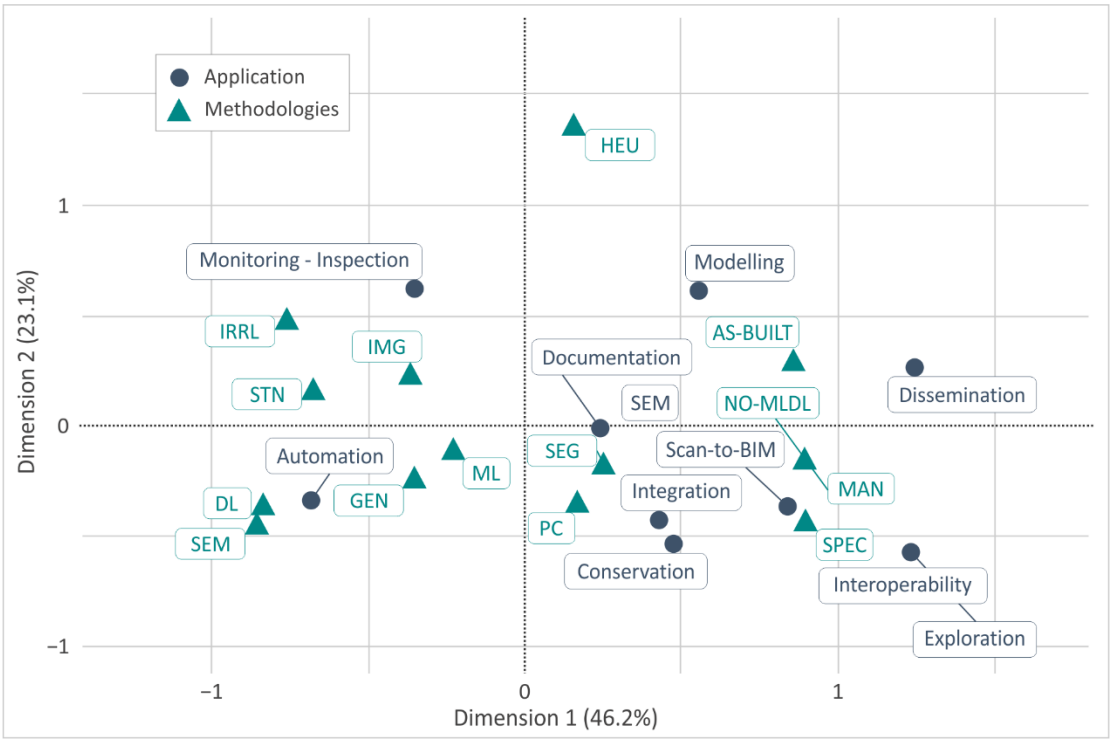
Η ερμηνεία αυτών των διαγραμμάτων έχει ως εξής:

- τα σημεία που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους και ανήκουν στην ίδια κλάση (ίδιο χρώμα), μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ όπου τα σημεία είναι απομακρυσμένα τότε παρουσιάζουν έντονη ανομοιογένεια (Greenacre, 1993)
- όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ενός μεμονωμένου σημείου από την αφετηρία, τόσο πιο διακριτό είναι το προφίλ του στο σύνολο δεδομένων
- οι σειρές (*APPs*) και οι στήλες (*methodologies*) μπορούν είτε να εμφανίζουν θετική είτε αρνητική συσχέτιση ανάλογα με το είδος της γωνίας που σχηματίζουν τα διανύσματα θέσης τους. Για γωνίες κάτω των 90^{o} οι συσχετίσεις λαμβάνονται θετικές ενώ αντίστοιχα για γωνία άνω των 90^{o} οι συσχετίσεις νοούνται αρνητικές.

Η ανάλυση *CA* και τα *Biplots* υπολογίστηκαν με την χρήση του ανοικτού λογισμικού πακέτου εργαλείων *FactoMineR* (Lê et al., 2008) και της γλώσσας *R* (R Core Team, 2024).

Έτσι σύμφωνα με την παραπάνω ερμηνεία, από το διάγραμμα της εικόνας 11, μπορούν να παραχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο σημασιολογικός εμπλουτισμός «*SEM*» συσχετίζεται θετικά με τις εφαρμογές «Αυτοματοποίηση (*Automation*)» και αντίστροφα
2. Οι χειροκίνητες εργασίες συσχετίζονται αρνητικά με την «Παρακολούθηση-Επιθεώρηση (*Monitoring - Inspection*)»
3. Η «Εξερεύνηση (*Exploration*)», η «Διαλειτουργικότητα (Interoperability)» και η «Σάρωση-σε-ΜΚΠ (*Scan-to-BIM*)» σχετίζονται θετικά και ισχυρά με τη χειροκίνητη τμηματοποίηση «MAN»
4. Η «Μοντελοποίηση (*Modelling*)» αποτελεί μια ανεξάρτητη ομάδα
5. Η μέθοδος χειροκίνητης τμηματοποίησης, «*MAN*» διαφοροποιείται εντόνως από την πιο σύνθετη μορφή κατάτμηση με σημασιολογικό εμπλουτισμό, «*SEM*» και τις κατά ευρετικές (*Heuristics*) υλοποιήσεις, «*HEU*», με τις τρεις μαζί (*MAN-SEM-HEU*) να σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο
6. Η κατανομή των μεθοδολογιών τμηματοποίησης συσχετίζεται με τη συνδυασμένη επίδραση των δεικτών ΠΠ «*LOD*» και της μορφής της εισόδου «*Input*»
7. Η ανάγνωση του γραφήματος, οριζοντίως, από αριστερά προς τα δεξιά, δείχνει ότι οι στρατηγικές αυτοματοποίησης με βάση την αρχιτεκτονική βαθέως μάθησης «*DL*» καταλήγουν σε μοντέλα χαμηλότερης αναπαραστατικής ακρίβειας, «*GEN*», ενώ, στην ακριβώς αντίθετη κατεύθυνση, ο χειροκίνητος διαχωρισμός του νέφους υπερτερεί αποδίδοντας καλύτερα από τις εναλλακτικές αυτοματοποιημένων λύσεων σε όρους «*LOD*» με το νέφος να αποτελεί την βασική μορφή δεδομένων εισόδου.
8. Λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της απόστασης από την αρχή, η κατάτμηση, «*SEG*», και οι εφαρμογές που βασίζονται κυρίως σε μηχανική μάθηση «*ML*» μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά.
9. Στην αντίθετη πλευρά του φάσματος, οι τεχνικές κατάτμησης σε επίπεδο δομικών στοιχείων, λίθο-προς-λίθο «*STN*», διαφοροποιούνται κυρίως ως προς την μορφή των δεδομένων εισόδου και …
10. Οι ευρετικές μέθοδοι, «*HEU*», έχουν τον πλέον ανομοιογενές προφίλ εμφανίζοντας τον μεγαλύτερο διαχωρισμό από όλες τις άλλες κατηγορίες (Εικ. 11).

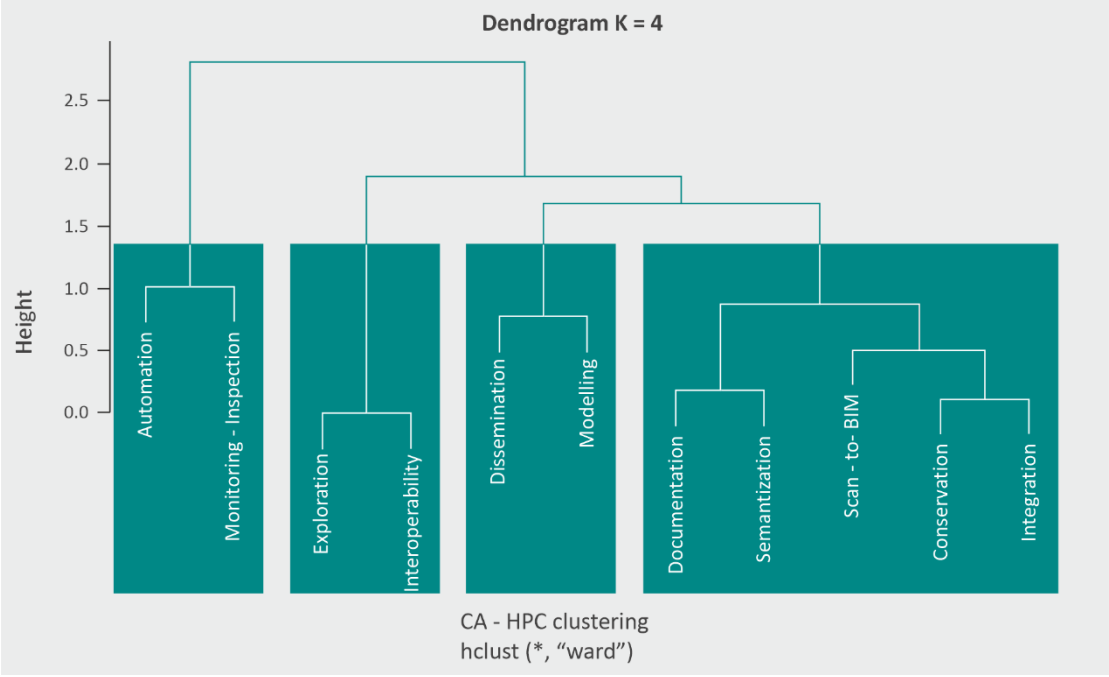


Εικόνα 11. *Διάγραμμα Biplot, των αποτελεσμάτων της ανάλυσης CA. Οι «ανεξάρτητες» μεταβλητές είναι με ανοιχτό πράσινο χρώμα και τριγωνική ένδειξη, ενώ οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι με σκούρο πράσινο χρώμα και κυκλική ένδειξη. Οι άξονες με τις ονομασίες «Dimension» προέκυψαν από την ανάλυσης συνιστωσών και οι τιμές αντιστοιχούν στον βαθμό συσχέτισης (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

4.4.2. Ιεραρχική ομαδοποίηση

Για την διερεύνηση των μοτίβων διαφοροποίησης των εφαρμογών *HBIM* σε σχέση με τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις έγινε εφαρμογή της ιεραρχικής ομαδοποίησης (Εικ. 12) που εκτελείται αμέσως μετά την ανάλυση *CA*. Οι εφαρμογές που μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά λογικά θα διαμορφώνουν ένα παρόμοιο προφίλ μεθοδολογιών και θα εντάσσονται στην ίδια ομάδα, καθιστώντας ευκολότερη την ανάδειξη των διαφορών και ομοιοτήτων στις μεθοδολογικές προσεγγίσεις, τόσο εντός της ομάδας (within group) όσο και μεταξύ των ομάδων (between groups). Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης που υιοθετήθηκε είναι η συσσωρευτική ιεραρχική ομαδοποίηση (*Agglomerative Hierarchical Clustering*) και εκτελέστηκε με χρήση της *R* ακολουθώντας ήδη δημοσιευμένες εργασίες στον τομέα όπως των (Murtagh & Legendre, 2011). Ο αλγόριθμος ιεραρχικής ομαδοποίησης, με την χρήση της μεθόδου μέτρησης της απόστασης Ward, αρχικά θεωρεί κάθε στοιχείο ως μία ομάδα, και στην συνέχεια ενώνει ιεραρχικά στοιχεία με βάση το εκάστοτε κριτήριο ομοιογένειας δημιουργώντας μία γραφική αναπαράσταση σε δενδροειδές σχήμα, Το στοιχείο τοποθετείται εντός της ομάδας με την μικρότερη ομοιογένεια και ο αλγόριθμος υπολογίζει εκ νέου τη ανομοιογένεια μεταξύ της συσσωματωμένης συστάδας και όλων των υπολοίπων, βάσει των νέων κεντρο-

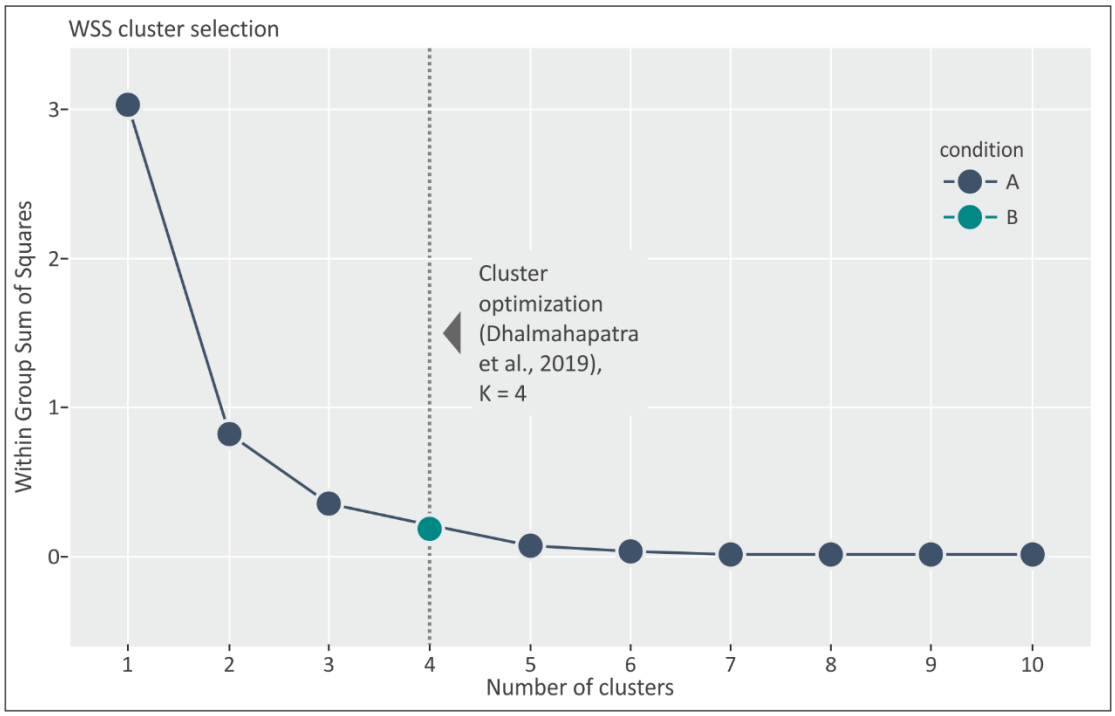
ειδών (*centroids*), μέχρι να σχηματιστεί μία μόνο ομάδα (Miyamoto et al., 2016). Τα δενδρογράμματα με την μέθοδο αποστάσεων *Ward* είναι προτιμητέα, καθώς μπορεί να αποδώσουν καλύτερα σε όρους ερμηνευσιμότητας από τις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης ομοιογένειας (metrics) που βασίζονται στην ευκλείδεια απόσταση. Τα φύλλα στον οριζόντιο άξονα (Εικ. 12) αντιπροσωπεύουν τις διακριτές ομάδες και ο κατακόρυφος άξονας περιέχει τον βαθμό ανομοιογένειας (Miyamoto et al., 2016).



***Εικόνα 12**. Εξαγωγή ομάδων από ιεραρχικά δέντρα, με χρήση της συνάρτησης hclust και της μεθόδου αποστάσεων "ward.D". Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του στοιχείο από το κεντροειδές τη ομάδας τόσο πιο ψηλά βρίσκεται στο ιεραρχικό δέντρο και αντίστροφα όσο ο αριθμός των ομάδων μεγαλώνει, τόσο μειώνεται η ανομοιογένεια και άρα η απόσταση (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

Ο κανόνας του Elbow (Εικ. 13) χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό του βέλτιστου αριθμού των k-συστάδων (Dhalmahapatra et al., 2019), δηλαδή των ομάδων 1) Αυτοματισμός – Παρακολούθηση (Automation - Monitoring), 2) Εξερεύνηση – Διαλειτουργικότητα (*Exploration - Interoperability*), 3) Διάχυση – Μοντελοποίηση (*Dissemination - Modelling*) και 4) Τεκμηρίωση – Σημασιολογικός Εμπλουτισμός - Σάρωση-σε-ΜΚΠ – Συντήρηση – Ολοκλήρωση (*Documentation – Semantization – Scan-to-BIM – Conservation - Integration*). Ο άξονας «y» δείχνει το εκτιμώμενο μέτρο συνεκτικότητας, που σε αυτήν την περίπτωση είναι η ελαχιστοποίηση των αποστάσεων των τετραγώνων (*WSS*), σε αντιπαραβολή με τον αριθμό των ομάδων που δίδεται από την τιμή k, που στην προκειμένη περίπτωση μεταβάλλεται από ένα έως δέκα. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ η μέση απόσταση αρχικά

μειώνεται σημαντικά, μετά περεταίρω αύξηση του αριθμού των ομάδων δεν συνεισφέρει σημαντικά στην ομοιομορφία των ομάδων. Έτσι, θεσπίζεται ένας ημι-εμπειρικός κανόνας ο οποίος τοποθετεί ένα κατώφλι στον αριθμό των θεωρούμενων ομάδων στην τιμή εκείνη πέραν από την οποία το κέρδος δεν δικαιολογεί την προστιθέμενη πολυπλοκότητα.



***Εικόνα 13**. Κανόνας του «Elbow» (Dhalmahapatra et al., 2019). Η συνεκτικότητα των ομάδων που προκύπτουν από τον διαμερισμό, με βάση τον δείκτη WSS για μεταβαλλόμενο αριθμό ομάδων. Όπως γίνεται εμφανές πέραν του αριθμού k =4 η κλίση είναι σχεδόν αμελητέα και άρα το κέρδος σε όρους συνεκτικότητας αμελητέο (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

4.4.3. Δημιουργία γραφημάτων κοινών μεθοδολογικών χαρακτηριστικών / ανά συστάδα εφαρμογών

Η μοντελοποίηση (Lovell et al., 2023), η αυτοματοποίηση στην κατάτμηση του νέφους (Lovell et al., 2023; Yang et al., 2023), η μορφή των δεδομένων εισόδου και τα μέσα συλλογής των 3Δ νεφών (Yang et al., 2023), *LOD* (Cotella, 2023; Gil et al., 2024; Lovell et al., 2023) αποτελούν τις κύριες συνιστώσες της διαδικασίας HBIM και η κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ των μεθοδολογικών αυτών παραμέτρων δύναται να διευκολύνει την έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των ΕΠΚ. Σε αυτό το πεδίο, χρησιμοποιούνται αναπαραστάσεις με διαγράμματα «αράχνης» (Εικ. 14) τα οποία και υλοποιούνται μέσα από την βιβλιοθήκη *FMSB* των Nakazawa, (2010). Οι βασικές παράμετροι, ανά συστάδα εφαρμογών, μετά και την ιεραρχική ομαδοποίηση και την διαμόρφωση των ομάδων, θα αποτελέσουν το δείγμα για την ανάλυση συχνοτήτων και την εξαγωγή των τάσεων εντός και εκτός ομάδας. Η λογική είναι ότι τα κοινά

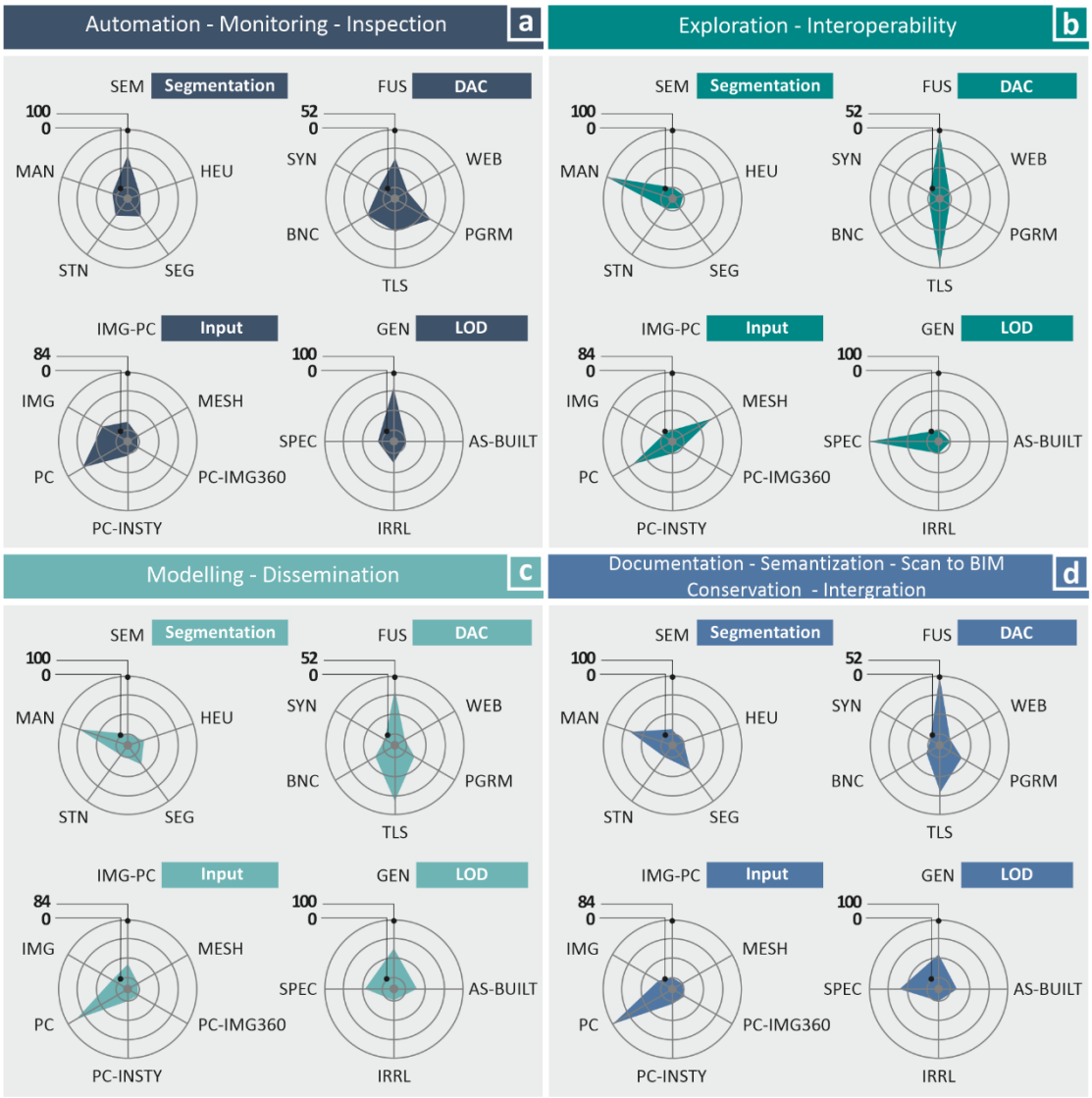
χαρακτηριστικά μεταξύ μίας ομάδας εφαρμογών μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τις διάφορες μεθοδολογικές παραμέτρους που λαμβάνουν χώρα στην συγκεκριμένα ομάδα εφαρμογών. Παράλληλα, λόγω και της ομαδοποίησης των εφαρμογών, τα όποια αποτελέσματα σε επίπεδο επαγωγής (*inference*) θα βασίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δείγματος.

Από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά, τα επιμέρους σχήματα φιλοξενούν τις μεταβλητές «*Segmentation*», «*DATA.ACQ*», «*Input*» και «*LOD*» (Πίνακας 1). Για κάθε συστάδα, τα αποτελέσματα συχνότητας οργανώνονται σε αυτή την κυκλοειδής (*polar plot, rho~theta distribution*) διαμόρφωση διευκολύνοντας έτσι την οπτική σύγκριση. Κάθε άξονας του πολικού διαγράμματος αντιστοιχίζεται σε διαφορετικές τιμές των ονομαστικών μεταβλητών (*nominals*). Ομοίως, στην εικόνα 15**,** η κατανομή των προκλήσεων στον τομέα των ΕΠΚ διαφοροποιούνται ανά ομάδα εφαρμογών.

Τα παρακάτω διαγράμματα (Εικ. 14 & 15) απαντούν συνολικά σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα κατατάσσοντας τις διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις ανά ομάδα εφαρμογών. Οι εφαρμογές υψηλής αυτοματοποίησης χαρακτηρίζονται από την υψηλή απαίτηση για σημασιολογικό εμπλουτισμό (*semantization*). Οι εφαρμογές εξερεύνησης (*exploration*), διάδοσης (*dissemination*) και μοντελοποίησης (*modelling*) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από χειροκίνητες διαδικασίες, με την ομάδα εξερεύνησης να παρουσιάζει την υψηλότερη χρήση χειροκίνητων μεθόδων διαμερισμού των δεδομένων του νέφους. Όσον αφορά την απόκτηση δεδομένων, μεταβλητή «*DAQ*», η ομάδα αυτοματοποίησης-παρακολούθησης και παρακολούθησης (automation-monitoring-inspection) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευελιξία, ενσωματώνοντας τόσο δισδιάστατα όσο και τρισδιάστατα δεδομένα από διάφορες πηγές σε πολυτροπικά συστήματα (*multi-modal*) συλλογής δεδομένων. Αντιθέτως, η κατηγορία των εφαρμογών εξερεύνησης (*exploration*) και διαλειτουργικότητας (*interoperability*), εμφανίζεται ως η πλέον απαιτητική με υψηλή διασύνδεση σε μεθόδους συλλογής δεδομένων μεικτού τύπου και με μέσα σάρωσης που βασίζονται στην τεχνολογία *LIDAR*.

Η δομή των δεδομένων εισόδου (Input) επίσης αποτελεί διάσταση διαχωρισμού των εφαρμογών, μεταξύ των ομάδων εξερεύνηση-διαλειτουργικότητα (*Exploration – Interoperability*) και τεκμηρίωση – σημασιολογικός εμπλουτισμός – Σάρωση-σε-BIM – Συντήρηση – Ολοκλήρωση (*Documentation-Semantization - Scan-to-BIM - Conservation – Integration*) (Εικ. 14). Οι πρωταρχικές πηγές δεδομένων είναι το νέφος και το πλέγμα στην πρώτη περίπτωση ενώ στην δεύτερη πηγή δεδομένων είναι σχεδόν αποκλειστικά το νέφος. Η ΠΠ (*LOD*) διαφοροποιεί έντονα την ομάδα δύο, που ενσωματώνει εφαρμογές εξερεύνησης, και την ομάδα ένα, που αφορά σε εφαρμογές υψηλού αυτοματισμού και παρακολούθησης. Το *LOD* φαίνεται να συσχετίζεται ισχυρά με τη επιλεχθείσα μεθοδολογία κατάτμησης. Τέλος, η λεπτομέρεια

αναπαράστασης κλίνει προς την τιμή «*AS-BUILT*» στις ομάδες τρία και τέσσερα, οι οποίες προτεραιοποιούν την έμφαση στην διάχυση των δεδομένων και την λεπτομερή μοντελοποίηση για χρήσης *BIM*.



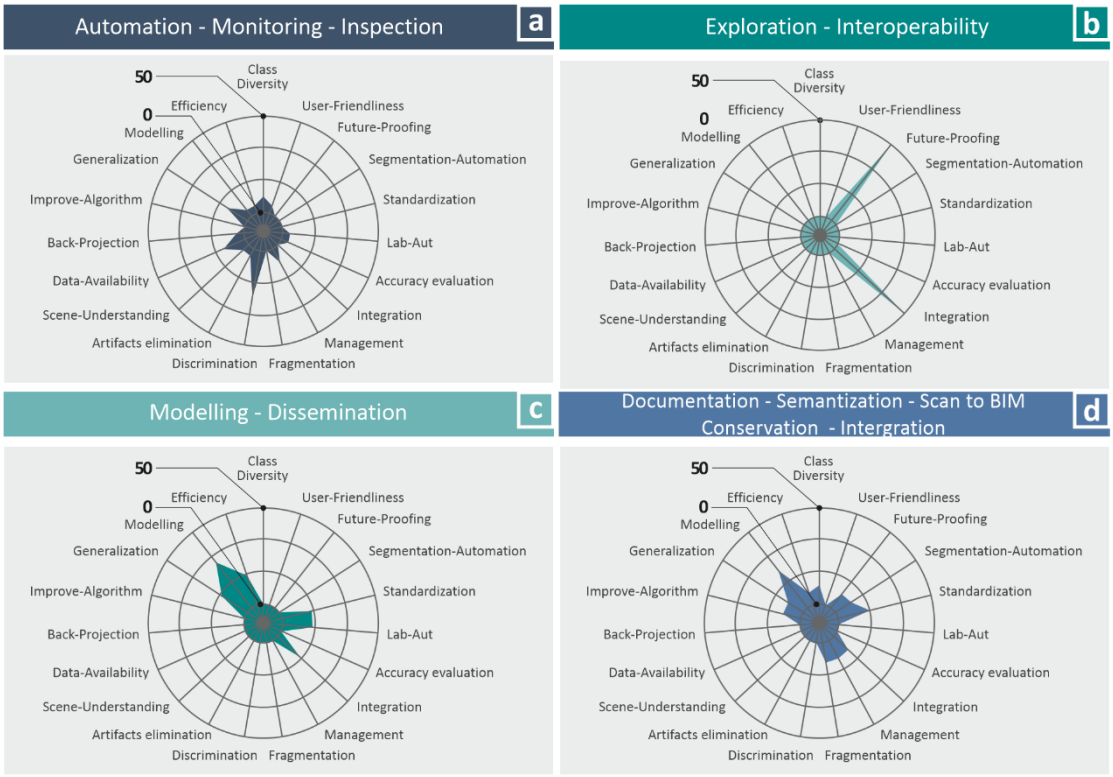
Εικόνα 14. *Διαγράμματα αράχνης (ραντάρ) που απεικονίζουν τις μεθοδολογικές παραμέτρους, έτσι όπως αυτές συγκεντρώνονται ανά συστάδα εφαρμογών. Για κάθε γκρουπ, οι μεταβλητές «Segmentation», «DATA.ACQ», «Input» και «LOD» τοποθετούνται σε κάθε ένα τεταρτημόριο, με τις τιμές των μεταβλητών να αποτελούν τους άξονες των γραφημάτων και την σχετική συχνότητα να χρησιμοποιείται για την κατανομή των επιπέδων κατά μήκος της ονομαστικής μεταβλητής (ακτίνες του διαγράμματος) (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

Οι προκλήσεις στην ευρύτερη υιοθέτηση των μοντέλων *HBIM*, έτσι όπως «εκμαιεύονται» από την θεματική ανάλυση ή δηλώνονται κατηγορηματικά από τους συγγραφείς ερευνητές παρατίθεται στην εικόνα 15. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω:

- Ομάδα 1 - Αυτοματισμός – Παρακολούθηση (*Automation - Monitoring*) (Σχήμα 15a)
    - Στην ομάδα ένα εντοπίζονται μέτριες αλλά διαφορετικές προκλήσεις, με προεξέχουσα αυτή που αποδίδεται στη ικανότητα διάκρισης (*discrimination*) των μεθόδων αυτόματης αναγνώρισης και εξαγωγής αντικειμένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάκριση, που είναι η κορυφαία πρόκληση στην ομάδα των αυτοματισμών, ενδεχομένως συνδέεται με την ποικιλομορφία (*diversity*), η οποία και αποτελεί μέτρο ελέγχου της ανομοιογένειας των αντικειμένων σάρωσης, που είναι έμφυτη στον αρχαιολογικό αρχιτεκτονικό χώρου (Cotella, 2023; Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Lovell et al., 2023; Pierdicca et al., 2020).
- Ομάδα 2 - Εξερεύνηση – Διαλειτουργικότητα (*Exploration - Interoperability*) (Σχήμα 15b)
    - Η διαχρονικότητα (*future proofing*) και η ενσωμάτωση (integration) είναι οι μόνες προκλήσεις που επισημαίνονται στην ομάδα 2
- Ομάδα 3 - Διάχυση – Μοντελοποίηση (*Dissemination - Modelling*) (Σχήμα 15c)
    - Η ομάδα τρία, οι βασικές ανησυχίες εντοπίζονται στον άξονα της μοντελοποίησης (*modelling*) και σε μικρότερο βαθμό, στην ικανότητα γενίκευσης (*generalization*) της υιοθετούμενης προσέγγισης, ενώ ελάσσονος σημασίας είναι οι δυσκολίες στην αποτελεσματικότητα (*efficiency*), τον βαθμό ολοκλήρωσης νέων τεχνολογικών εργαλείων (integration), την τυποποίηση και τη μεταφορά ετικετών
- Ομάδα 4- Τεκμηρίωση – Σημασιολογικός Εμπλουτισμός - Σάρωση-σε-ΜΚΠ – Συντήρηση – Ολοκλήρωση (*Documentation – Semantization – Scan-to-BIM – Conservation - Integration*) (Σχήμα 15d)
    - Η τέταρτη ομάδα, που είναι και η πολυπληθέστερη αντιμετωπίζει πολλαπλές αλλά ήπιες προκλήσεις, με κυρίαρχη, από άποψη συχνότητας, την μοντελοποίηση και έπεται η τυποποίηση (*standardization*). Σε μικρότερο βαθμό απαντώνται προκλήσεις στην γενικευσιμότητα, την ικανότητα ολοκλήρωσης, την διαχείριση (*management*), την διάκριση και την αποτελεσματικότητα.

Συνοψίζοντας, η μοντελοποίηση, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες τυποποίησης και ολοκλήρωσης, διχοτομεί το δείγμα που συλλέχθηκε (Εικ. 11). Η ικανότητα αναγνώρισης των αντικειμένων εντός του νέφους (διάκριση) ανιχνεύει τις εφαρμογές που συσχετίζονται θετικά με μεθοδολογίες αυτοματοποίησης. Η ικανότητα ολοκλήρωσης και η διαχρονικότητα (*future-proofing*) αποτελούν

«προβλεπτική» παράμετρο για εφαρμογές που είναι ενδημικές στην ιδέα των ΕΠΚ απαιτώντας συνεργασία τόσο μεταξύ των προϊόντων όσο και μεταξύ των ειδικών. Η έλλειψη γενικευσιμότητας, οι προκλήσεις στην διαχείριση, η ικανότητα διάκρισης, η ποικιλομορφία και η διαχρονικότητα εντοπίζονται, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, στην πλειοψηφία των ΕΠΚ (Εικ. 15).



Εικόνα 15. *Κατανομή των προκλήσεων ανά συστάδα ΕΠΚ (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*

Όσον αφορά το ερώτημα για την διάρθρωση των λέξεων κλειδιών (key-words), με στόχο της οργάνωση συστηματικών επισκοπήσεων, σε ένα ευρύ πεδίο όπως στην προκειμένη περίπτωση, ακολουθήθηκε μία πρωτότυπη μέθοδο η οποία βασίζεται στην ιεραρχική οργάνωση των ομάδων και μεθοδολογιών για την μετέπειτα συγκέντρωση των παρεμφερών λέξεων κλειδιών. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Οι λέξεις-κλειδιά που προσδιορίζονται φιλτράρονται προς αποφυγή επαναλήψεων και οργανώνονται ανά πεδίο εφαρμογών. Οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, οφείλουν να ακολουθούν ένα πρωτόκολλο για τον εντοπισμό και τον καθορισμό της συνάφειας των δεδομένων (Carrera-Rivera et al., 2022) και υπό αυτήν την έννοια η ιεραρχική ανάλυση μπορεί να αποτελέσει μονάδα αναφοράς τόσο για τις λέξεις-κλειδιά όσο και τους συγγραφείς που δραστηριοποιούνται σε ένα πεδίο. Εναλλακτικά, η ομαδοποίηση με χρήση *CA* και *HC* θα μπορούσε να προσδιορίσει συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών, ακόμη και σε επικαλυπτόμενους επιστημονικούς τομείς, με λογικό και ανιχνεύσιμο τρόπο.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, σε σχέση με την πληρότητα των αρκτικόλεξων γύρω από τις ΕΠΚ με την ανωτέρω μεθοδολογία εντοπίστηκαν μία σωρεία διαφορετικών συντμήσεων όπως οι λέξεις «*HBH* (Ιστορική Δομημένη Κληρονομιά), *HBIM*, Η-*BIM, HBIM, HBIM* για συντήρηση και διατήρηση, διαλειτουργικότητα *HBIM*, πολιτιστική κληρονομιά, αρχιτεκτονική κληρονομιάς, κληρονομιά σε κίνδυνο, Μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων, *Heritage-BIM*, ιστορικές δομές κτιρίων, ιστορική ψηφιακή έρευνα, ιστορικά αστικά κέντρα» και «κατάτμηση, σημασιολογικός σχολιασμός, σημασιολογικός εμπλουτισμός, σημασιολογική τμηματοποίηση». Σε ό,τι αφορά την ενσωμάτωση ΤΝ οι λέξεις-κλειδιά είναι τα Συνελικτικά Δίκτυα τύπου *Dynamic Graph Convolutional Neural Networks* (Güneş et al., 2024) *,* τα δίκτυα ανίχνευσης αιχμών *EdgeConv* (Battini et al., 2024)*,* ο αλγόριθμος πλήρωσης τύπου *Watershed* (Ibrahim et al., 2020)*,* Ο αλγόριθμος Random Sample Consensus - *RANSAC* (Musicco et al., 2024) τα δέντρα τυχαιότητας*, Random Forest – RF* (Croce, Caroti, Luca, et al., 2021) η κατάτμηση λίθο-προς-λίθο *Stone-by-Stone* (Idjaton et al., 2021).Σε σχέση με την ανταλλαγή αρχή και την διαλειτουργικότητα, ανέκυψαν τα ανοιχτού τύπου λογισμικά *OpenBIM* (Nieto-Julián et al., 2021), το πρωτόκολλο *OpenSees* (Leonardi et al., 2024), και τα σχέδια συνεργασίας, *TeamWork* των (Nieto-Julián et al., 2021) τα οποία και σε συνδυασμό με τις ολοκληρωμένης βάσεις διαχείρισης πόρων και συνεργατών, *Asset Management Systems (AMS)* των Sammartano et al., (2023), και τις λύσεις με ενσωμάτωση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (*GIS*), και διαδικτυακό *webGIS* (Sammartano et al., 2023) οριοθετούν τον χώρο της διάχυσης, Τέλος, η επισκόπηση και εξερεύνηση νέων τεχνολογικών και καινοτόμων πρακτικών μοντελοποίησης αποδίδεται με τις λέξεις κλειδιά «*Augmented Reality, HoloLens, Mixed Reality (Teruggi et al., 2021),* και *BlenderBIM (Lombardi & Rizzi, 2024)*».

Πίνακας 2*. Λέξεις-κλειδιά ομαδοποιημένες ανά συστάδα εφαρμογών*

Ομάδα 1 – Παρακολούθηση – Αυτοματισμός
3D point cloud; 2D/3D annotation transfer; 3D acquisition; 3D architectural heritage; 3D façade reconstruction; 3d heritage; 3D Point Cloud; Aioli; Architecture; Artificial Intelligence; Autoencoder; benchmark; Brick segmentation; Building Information Modelling; Buildings with linear repetitive sym-metrical stru; Built heritage; Classification; Computer vision; Convolutional neural networks; Cultural heritage; Cultural heritage management; damage detection; Damage Survey; dataset; Deep learning; deep neural networks; DGCNN; diagnostic; Diagnostic Analysis; digital archive; Digital cultural heritage; Digital Heritage; Dilated convolution; Documentation application; dynamic; Dynamic graph convolutional neural network; edge extraction from relief; edgeconv; Facades; Finite element modelling FEM; Geo-referenced data; graph convolutional neural networks; H-BIM; Heritage Buildings; Heritage Management; Historic building information modeling; Historical building; Image processing; Image processing; Image Segmentation; Imagery data; Information

Technologies; Knowledge model; Label Transfer; Label-efficient; Laser scanner; Level of Detail; Linked open data; LOD3 Building; Loss of material; Machine Learning; Masonry; Mesh Reconstruction; Mesh segmentation; Missing object localization; Monitoring; Multi-resolution; Object extraction; Object recognition; OptD method; Orthomosaic; patrimonio cultural; Photogrammetry; Point cloud; Point Cloud Processing; point cloud segmentation; Point cloud semantic segmentation; Point clouds; primitive extraction; Python; Quantitative damage evaluation; Radius distance; Random forest; Random forest; RANSAC; Reduction; Remote sensing; Risk-Informed Systems; round chimneys; Scan-to-BIM; Segmentation; Semantic annotation; Semantic enrichment; Semantic segmentation; Singular value decomposition; Stone deterioration; Stone-by-stone; Structural analysis; Structure from Motion; Style classification; supervised learning; surface damage; Symmetry surface extraction; Synthetic data; Synthetic point cloud; terrestrial laser scanning; Threats; Transfer learning; UAV photogrammetry; UAVs; U-Net; VPL; Watershed; Weakly supervised; Weathering forms; 3D; 3d point clouds; 3D point clouds; 3D reality capture of architecture; 3D survey of cultural heritage; Aerial oblique image; Architectural heritage; Artificial Intelligence; As-is modeling; Automatic Segmentation; Borobudur reliefs; Brick segmentation; Bricks; Built Heritage; Classification; Colour-based segmentation; Computer Graphics Forum; Crowdsourced image processing; Defect detection; Image; Unsupervised Deep Learning;

Ομάδα 2 - Εξερεύνηση και διαλειτουργικότητα

3D Laser Scanning; BIM; Hi-tech; Scan-to-BIM; cultural heritage preservation; Blender; BlenderBIM; Digital archaeology; Extended matrix; Semantic modelling;

Ομάδα 3 - Διάδοση και μοντελοποίηση

3D model; Aerial hybrid sensors; Automatic masking; Built heritage; Church of the Company of Jesus; City model; Close-range photogrammetry; Complex geometry; Conservation; cultural heritage documentation; deep learning; Digital survey; Digitalization; FEM; finite element modelling; Free-form; Generative programming; Information modeling; Intervention in the architectural heritage; k-means; lidar clouds; Masonry structures; Model-driven; Modeling; movable heritage; Point cloud; Ruins; Scanning laser; Scan-to-BIM; Scan-to-FEM; semantic segmentation; structural assessment; Sustainability; TeamWork project; Valencia cathedral; VPL; 3D models; analysis; Built; Cataloguing; Database; DBSCAN; Digital twin; Element; Interoperability; LiDAR clouds; OpenBIM; OpenSees; Seismic; Structural assessment;

Ομάδα 4 - Τεκμηρίωση, Σημασιολογικός Εμπλουτισμός, Σάρωση-σε-ΜΚΠ, Συντήρηση & Ενσωμάτωση

3D BIM model; 3D classification; 3D Edge Detection; AMS; Architectural modeling; artificial intelligence; Augmented Reality; BIM; churches; Classification; Conservation and Management; Cultural management; damage assessment; Deep learning; digital; Digital documentation; digital reality capture; Digital replica; digital toolkit; Foundation models; Generative algorithms; GIS; GIS-BIM visualisation; HBH (historical built heritage); HBIM; H-BIM; HBIM (historical building modelling); HBIM for conservation and maintenance; HBIM interoperability; Heritage; Heritage architecture; Heritage at risk; Heritage building information modeling; Heritage-BIM; Historic building information Modelling (HBIM); Historic building structures; historic digital survey; historical urban centres; HoloLens; Image segmentation; implementation of deformations; information management; Information models; Information system; interoperability; Laser scanning and photogrammetry; machine learning; management of deformations; masonry buildings; masonry interpretation; Metamodelling; Mixed Reality; multi-scale documentation; Multi-sensor 3D survey; MVS; Ontology; Parametric modelling; Parametric models; Parametric objects; Photogrammetry; Point cloud; Point cloud classification; Point cloud processing; Point Cloud Segmentation; Point clouds; Preventive conservation; Procedural modeling;

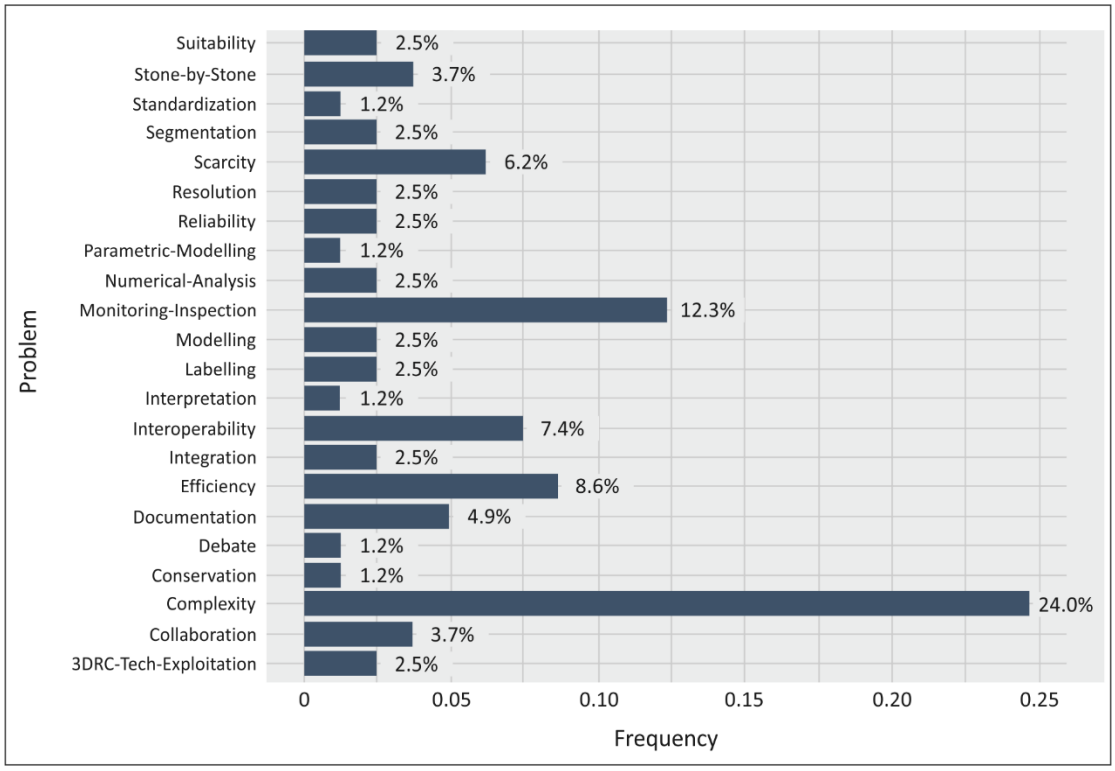
Random Forest; rapid mapping; Restoration project; Revit; scan-to-BIM; Segmentation; Segmentation algorithm CANUPO; Seismic analysis; Semantic annotation; semantic segmentation; SfM; shape descriptor; stone geometry; stratigraphic study; Structural systems reverse engineering; teamwork; Terrestrial laser scanning; UAV clouds; UAVs; Urban heritage; Visual programming in BIM; VPL; VPL scripting; vulnerability; webGIS; 3D Edge Comparison; 3D geodatabase; 3D modelling; 3d models; 3D Point cloud; 3D survey; Architectural Heritage; Automatic segmentation; CAD; Cloud to 3D model comparison; Clouds segmentation; Conceptualisation; Cultural heritage; Digital twin; HBIM applications;

4.4.4. Δυσκολίες και προκλήσεις στο σύνολο των μελετών

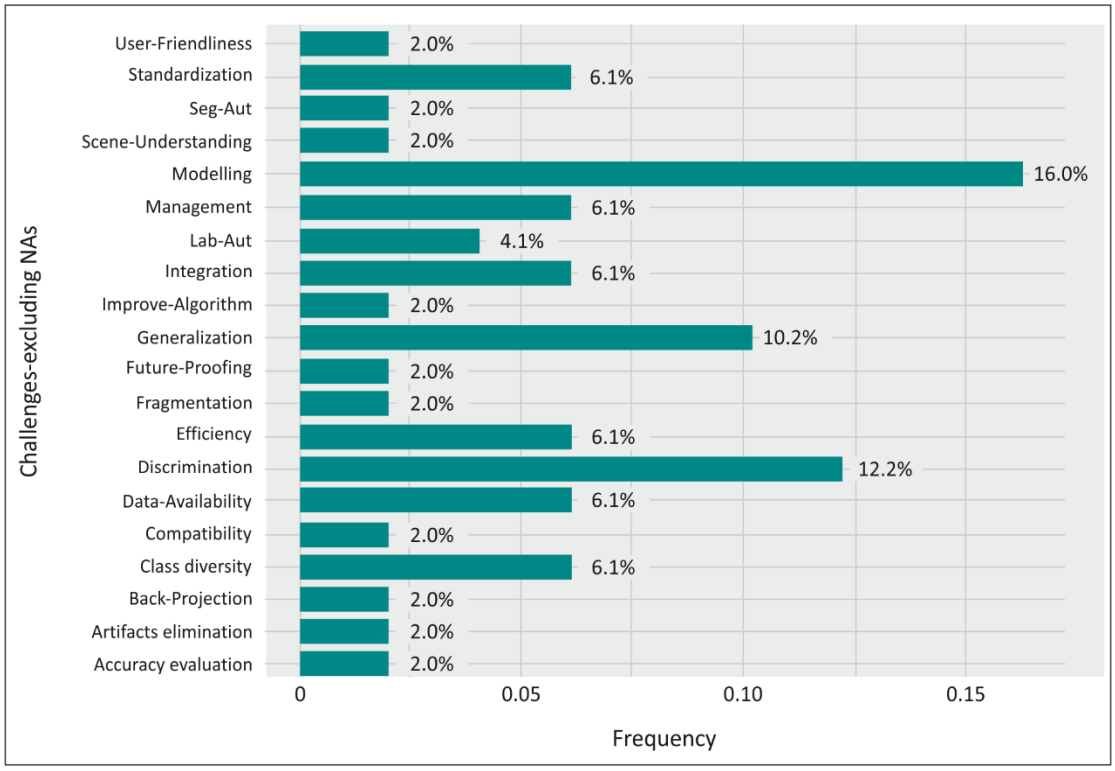
Σε αυτό το προτελευταίο βήμα, παρατίθενται δύο ακόμα διαγράμματα (Εικ. 16 & 17), με στοιχεία περιγραφικής στατιστικής, των προκλήσεων (εικ. 16) και προβλημάτων κατά την προσπάθεια αυτοματοποίησης και μοντελοποίησης σε ΕΠΚ. Οι θεματικές έχουν ανασυρθεί από το κείμενο ή έχουν υπογραμμισθεί από την ανάλυση περιεχομένου. Στο πολικό διάγραμμα της εικόνας 16 τονίζεται η πολυπλοκότητα των εφαρμογών *HBIM*, η οποία ενσαρκώνεται μέσα από τις θεματικές «*labor intensive*» και «*time-consuming*». Όπως φαίνεται από πρώτο διάγραμμα της εικόνας 16, οι εφαρμογές παρακολούθησης-επιθεώρησης βρίσκονται στη δεύτερη θέση σε επίπεδο δυσκολιών ενώ η έλλειψη αποτελεσματικότητας, η διαλειτουργικότητα και η σπανιότητα (*scarcity*) συμπληρώνουν το μεσαίο τμήμα της κατανομής. Η ερμηνεία (*interpretation*), η παραμετρική μοντελοποίηση (parametric modelling), η τυποποίηση (standardization) αναδύονται συστηματικά ως τροχοπέδη. Όσον αφορά τις προκλήσεις (Εικ. 17), η μοντελοποίηση, σε ποσοστό 16% ξεπερνά όλες τις υπόλοιπες, με τη διακριτική ικανότητα και την έλλειψη γενίκευσης να αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 38% της συνολικής διακύμανσης Η τυποποίηση, η διαχείριση, η ενσωμάτωση, η αποδοτικότητα, η διαθεσιμότητα δεδομένων και η ποικιλομορφία των κλάσεων συγκεντρώνουν άλλο ένα 36% του ποσοστού, με το καθένα να εκπροσωπείται εξίσου στο δείγμα.

Τέλος, στην εικόνα 18 αποτυπώνονται συνοπτικά οι προσπάθειες αυτοματοποίησης της κατάτμησης του νέφους, είτε μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (*ML*), είτε βαθιάς μάθησης (*DL*), είτε μέσω συνδυασμών και των δύο (*BOTH*). Οι μεθοδολογίες αυτοματισμού τοποθετούνται εντός των μικρών κύκλων, στο εσωτερικό δακτύλιο, ενώ οι διαφορετικές εφαρμογές διασπείρονται ακτινωτά στον εξωτερικό δακτύλιο. Η μοντελοποίηση (modelling) διαχέεται σε όλες τις κατηγορίες αυτοματισμού, ενώ οι εφαρμογές «*Scan-to-BIM*», «*Exploration*» και «*Dissemination*» δεν εκπροσωπούνται σε ροές εργασίας με χρήση *DL* ή *DL* συνδυαστικά με *ML*. Ο σημασιολογικός εμπλουτισμός σε ΕΚΠ φαίνεται να κυριαρχείται από χειροκίνητες διαδικασίες, ενώ η Σάρωση-προς-ΜΚΠ και η τεκμηρίωση (*Documentation*) παρουσιάζουν θετικά σημάδια όσον αφορά την ενσωμάτωση *ML*. Η εφαρμογή «*Monitoring-inspection*» υπερέχει κάθε άλλης με ένα μικρό ποσοστό της να εκτελείται χειροκίνητα. Τέλος, οι εφαρμογές μοντελοποίησης βασίζονται σε μεγάλο βαθμό

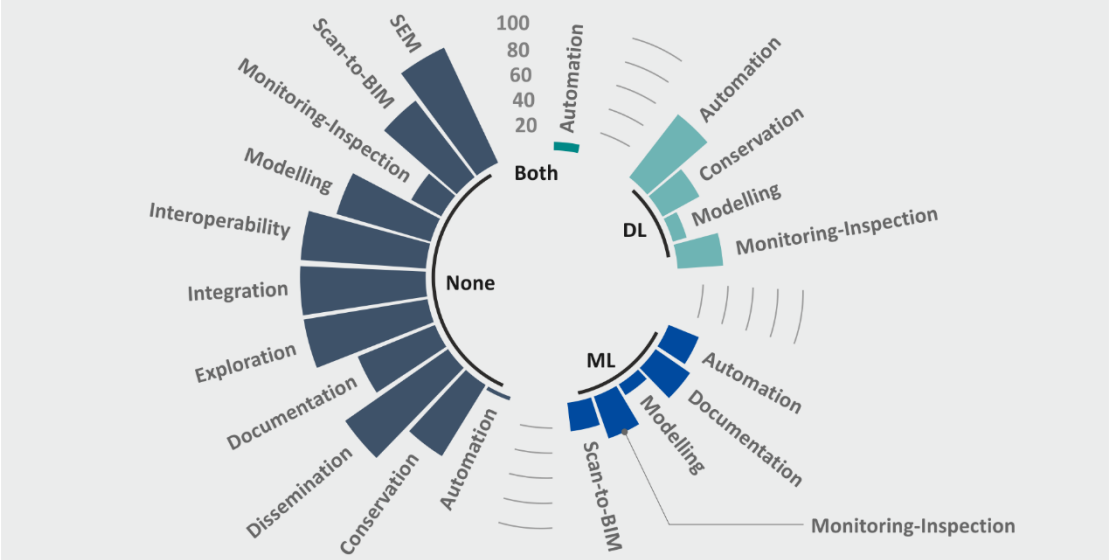
στην ανθρώπινη παρέμβαση και επίβλεψη, με λιγότερο από το 20% να εξετάζει πλήρως αυτοματοποιημένες εναλλακτικές λύσεις



Εικόνα 16. *Διάγραμμα συχνοτήτων προβλημάτων όπως αυτά ανέκυψαν από την θεματική ανάλυση (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*



Εικόνα 17. *Διάγραμμα συχνοτήτων προκλήσεων με βάση την θεματική ανάλυση (Galanakis et al., 2025, submitted in Journal of Cultural Heritage).*



Εικόνα 18. *Πολικό διάγραμμα που αντιπροσωπεύει τις σχέσεις μεταξύ της μεθόδου κατάτμησης του νέφους ανά προτιμητέα εφαρμογή.*

Κεφάλαιο 5. Μεθοδολογική προσέγγιση – Μοντέλα Θεμελίωσης (Foundation Models) στην ανάλυση των μνημείων Πολιτιστικής Κληρονομίας

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της κατάτμησης των δεδομένων στα θεμελιώδη δομικά τους αντικείμενα. Η ανάλυση αυτή ανταποκρίνεται στην προκλήσεις και τα κενά που εντοπίστηκαν από την παραπάνω ημι-δομημένη βιβλιογραφική επισκόπηση και ιεραρχεί ως βασική προϋπόθεση την χρήση μίας αρχιτεκτονικής η οποία να είναι εύκολο να επεκταθεί σε διαφορετικές εφαρμογές ΕΚΠ, να είναι συμπαγής ως προς την χρήση και την παραμετροποίηση και να έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα χωρικής ανάλυσης, εκκινώντας από τα βασικά αρχιτεκτονικά μέρη ενός κτηρίου και καταλήγοντας ει δυνατόν στα δομικά στοιχεία της τοιχοποιίας.

5.1. Το μοντέλο Segment Anything Model – SAM της Meta AI

Το μοντέλο βαθειάς μάθησης «*Segment Anything Model*» βιβλιογραφικά εντοπίζεται για πρώτη φορά στον τομέα των ΕΠΚ στην εργασία των (Réby et al., 2023), όπου οι συγγραφείς προτάσσουν ένα συνεργατικό μοντέλο εργασιών για την τεκμηρίωση του ναού της Παναγίας των Παρισίων (*Notre Dame de Paris*) έπειτα από το περιστατικό της πυρκαγιάς που ξέσπασε στις 15 Απριλίου 2019. Στην συλλογική αυτή προσπάθεια αποκατάστασης των ζημιών δημιουργείται ένα πληροφοριακό σύνολο δεδομένων με την ονομασία «*n_Dame_Heritage*», το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μια βάση δεδομένων εξασφαλίζοντας έτσι την από κοινού πρόσβαση και διαλειτουργικότητα. Η βασική ιδέα είναι να αξιοποιηθεί η ικανότητα του μοντέλου για αναγνώριση αντικειμένων χωρίς καμία *a priori* γνώση η οποία και αποδίδεται στην αγγλική ορολογία ως «*zero-shot segmentation*».

Το μοντέλο *SAM* σχεδιάστηκε ως ένα θεμελιώδες μοντέλο (*foundation model*) για την κατάτμηση εικόνων (Kirillov et al., 2023). Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε δίκτυα *BM* μεγάλης κλίμακας και έχουν εκπαιδευτεί σε τεράστιο όγκο δεδομένων αποκτώντας έτσι την ικανότητα να αποδίδουν εξαιρετικά καλά σε νέες κατανομές δεδομένων που δεν έχουν ξανά δει σε προηγούμενο στάδιο (Kirillov et al., 2023; Li et al., 2024; Réby et al., 2023). Στην προκειμένη περίπτωση το μοντέλο *SAM* την στιγμή της εκτέλεσης είχε εκπαιδευθεί και αξιολογηθεί σε ένα σύνολο δεδομένων, μεγαλύτερο από κάθε άλλη προηγούμενη εφαρμογή στον χώρο της ΤΝ, με πάνω από ένα δισεκατομμύριο μάσκες και 11 εκατομμύρια εικόνες (Kirillov et al., 2023).

Το *SAM* αποτελείται από έναν «βαρύ» κωδικοποιητή εικόνας που βασίζεται σε έναν *MaskedAutoEncoder (MAE)* βασισμένο σε έναν ελαφρώς τροποποιημένο μετασχηματιστή για αρχεία εικόνας (*Vision Transformer*), ακολουθούμενο από έναν ευέλικτο (*flexible*) κωδικοποιητή προτροπής (*prompt encoder*) και έναν γρήγορο αποκωδικοποιητή μάσκας (*mask decoder*) στην έξοδο. Αυτό το είδος αρχιτεκτονικής, κατά τους ισχυρισμούς των δημιουργών, ξεπερνά τα παραδοσιακά δίκτυα *CNN* σε ευελιξία, ταχύτητα και γενίκευση λόγω δύο βασικών αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών του. Πρώτον, κληρονομούν την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητα από την αρχιτεκτονική των μετασχηματιστών για εφαρμογής επεξεργασίας Φυσικής Γλώσσας *Natural Language Processing- NLP* (Dosovitskiy et al., 2021; Li et al., 2022) και δεύτερον, κάνουν χρήση του γρήγορου και μη δαπανηρού, σε όρους εκτελεστικής ισχύος, κωδικοποιητή / αποκωδικοποιητή προτροπής (*promptable encoder / decoder block*) που (Kirillov et al., 2023).

Προηγούμενες μελέτες απέδειξαν την ευελιξία και ικανότητα για ολοκλήρωση του μοντέλου *SAM* (Réby et al., 2023) μέσω συνδυαστικής χρήσης του με άλλο ένα σύστημα στην κατηγορία των μοντέλων θεμελίωσης γνωστό και ως «*Grounding DINO*» το οποίο και είναι ικανό να ανιχνεύει και να υποδεικνύει (detection) αντικείμενα ενδιαφέροντας υπό καθεστώς υψηλής αβεβαιότητας και χωρίς καμία προηγούμενη γνώση του δείγματος. Το μοντέλο *Grounding Dino* σε αντίθεση με το *SAM* δημιουργεί ορθογώνια καρέ (*bounding boxes*) ή μάσκες γύρω από τα αντικείμενα ενδιαφέροντος, υποβοηθώντας έτσι την ικανότητα πρόβλεψης του *SAM*. Στην συγκεκριμένη εργασία η ικανότητα του μοντέλου *SAM* για σημασιολογικό εμπλουτισμό εμπλουτίστηκε και από την ικανότητα απόδοσης κλάσεων στα αντικείμενα μέσα από ένα ακόμα μοντέλο θεμελίωσης γνωστό ως *Contrastive Language-Image Pre-Training* (CLIP) (Gupta & Hayes, 2000) το οποίο επιτρέπει την εκπαίδευση ενός συστήματος ΒΜ για την αναγνώριση αντικειμένων εικόνας μέσα από προτροπές κειμένου που εισάγει ο χρήστης ή το λογισμικό επιτήρησης (Gupta & Hayes, 2000).

Στην παρούσα μελέτη (Galanakis et al., 2023) η βασική επιδίωξη είναι να ελεγχθεί η ικανότητα (*potential*) του μοντέλο *SAM* για εφαρμογές κατάτμησης σε ΕΠΚ και ειδικά σε ό,τι αφορά στην ικανότητα εντοπισμού και εξαγωγής των θεμελιωδών αρχιτεκτονικών στοιχείων που είναι οι λίθοι σε δομές τοιχοποιίας. Δεδομένου ότι το SAM προτείνεται ως ένα δίκτυο τμηματοποίησης (*segmentation*) ευρέος φάσματος με επίγνωση της αμφισημίας (*ambiguity aware*), στην παρακάτω ανάλυση ελέγχεται η ικανότητά για αναγνώριση δομών σε φυσικές συνθήκες πεδίου και φωτισμού, χωρίς καμία προ-εκπαίδευση. Το μοντέλο που επιλέχθηκε ήταν το *ViT-H SAM* καθώς ήταν, την στιγμή της εργασίας, το πιο λεπτομερώς μοντέλο ως εκ τούτου η βασική επιλογή (*default*) για εφαρμογές γενικού περιεχομένου (Kirillov et al., 2023).

Η βασική ιδέα βασίζεται και στα ευρήματα της προηγούμενης ανάλυσης, όπου σκιαγραφείται το προφίλ των κοινών χαρακτηριστικών που θεωρητικά αναζητούνται στον χώρο. Εφόσον η μοντελοποίηση, η ικανότητα ανίχνευσης αντικειμένων, η έλλειψη γενικευσιμότητας και τυποποίησης (standardization) επηρεάζουν σημαντικά την πρόοδο στο χώρο των ΕΠΚ, οι όποιες προτεινόμενες λύσεις οφείλουν να είναι ικανές να ανιχνεύουν αντικείμενα που είτε εντοπίζονται σε μικρό ποσοστό, ως οντότητας εντός της συνολικής κατασκευής, σε σχέση με άλλα αντικείμενα, για παράδειγμα οι σκάλες σε ένα συγκρότημα σε σχέση με τα παράθυρα και τις πόρτες, είτε είναι μικρά σε μέγεθος, γεγονός που θα καθιστά δυσδιάκριτα σε επίπεδο ΤΝ λόγω της αρχής λειτουργίας των ΣΝΔ. Παράλληλα, για τον στόχο της διαχρονικότητας και της γενικευσιμότητας, η λύση σε επίπεδο αυτοματοποίησης πρέπει να υιοθετεί αρχιτεκτονικές που είναι ευέλικτες, δεδομένης της ποικιλομορφίας στο χώρο των ΕΠΚ (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023) και της πιθανής έλλειψης προηγούμενης γνώσης της εφαρμογής στόχου (Maravelakis et al., 2023; Pocobelli et al., 2018).

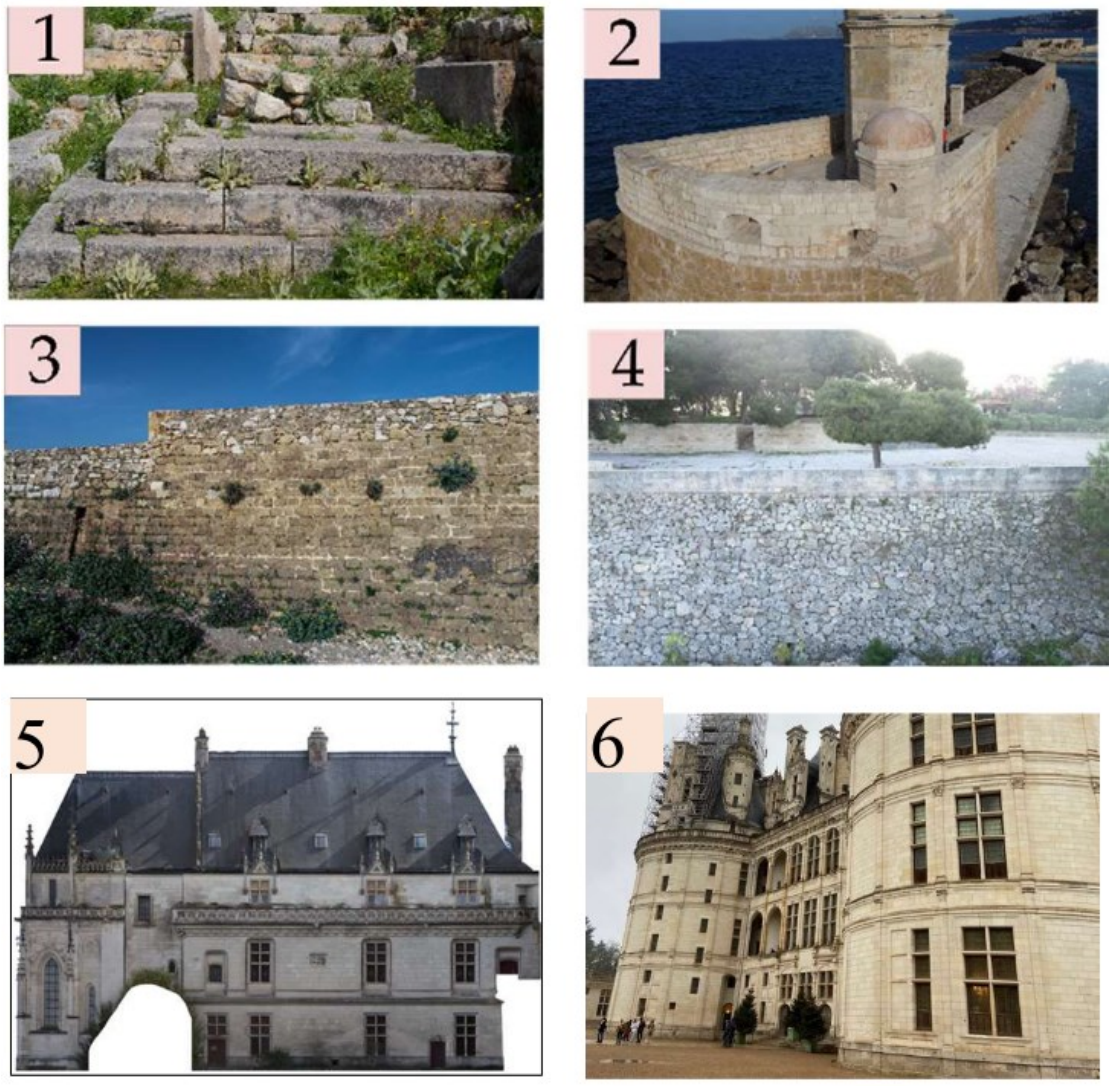
Η πολυπλοκότητα του χώρου των ΕΠΚ αναδεικνύεται συνεχώς στον ερευνητικό χώρο, όπως στο έργο των (Kutlu et al., 2023) οι οποίοι συγκρίνουν διάφορα μοντέλα DL προκειμένου να αποτιμηθεί η συνολική απόδοση με κριτήριο την γενικευσιμότητα. Συγκρίνοντας το SAM με άλλα ευρέως διαδεδομένα μοντέλα, όπως το *U-Net,* το *UFO-Net* και το *GCoNet+*, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το *SAM* υπερτερεί κάθε άλλης αρχιτεκτονικής, στην ανίχνευση περιγράμματος (*contour detection*), υπό την παραδοχή ωστόσο της ανίχνευσης του αντικειμένου σε πρώτο χρόνο. Η μάσκα 2Δ εικόνας για τρισδιάστατη ανακατασκευή έχει μακρά ιστορία και έχει εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις χρήσης σε ΕΠΚ (Gong et al., 2021; Idjaton et al., 2023; Liu et al., 2022) και η ανάγκη για ευελιξία και απλότητα στην αρχιτεκτονική του δικτύου βαθέως μάθησης στρέφει το ενδιαφέρον των ερευνητών σε μοντέλα θεμελίωσης όπως το SAM, τα οποία επιτυγχάνουν εργασίες κατάτμησης χωρίς την απαίτηση δεδομένων εκπαίδευσης και χωρίς την συνήθη αδυναμία σε εφαρμογές μεικτής χωρικής ανάλυσης (Prado et al., 2023).

Για την πληρέστερη αξιολόγηση του συστήματος, τόσο σε επίπεδο χωρικής ακρίβειας όσο και σε επίπεδο εύρους εφαρμογών, παρακάτω παρουσιάζεται η επίδοση του μοντέλου *SAM* σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος από την πόλη των Χανίων, στην Κρήτη και δύο περιπτώσεις ιδιαίτερου ενδιαφέροντος από την Πολιτιστική Κληρονομιά της Γαλλίας. Το σύνολο των δεδομένων περιλαμβάνει φωτογραφίες με διάφορες αναλύσεις, υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, διαφορετικούς τύπους τοιχοποιίας και διαφορετική χωρική ανάλυση. Τα δε μέσα λήψης περιλαμβάνουν τόσο φορητές κάμερες *DSRL* όσο και ΣμηΕΑ (*UAV*), καθώς και τα δύο είναι σήμερα εξίσου διαδεδομένα στην ψηφιακή τεκμηρίωση και ανακατασκευή μέσω των λογισμικών φωτογραμμετρίας (Isailović et al., 2020; Poux et al., 2017).

5.2. Πολιτιστική Κληρονομιά των Χανίων, Περιγραφή των αρχαιολογικών χώρων

5.2.1. Άπτερα

Η Άπτερα (Εικ. 19/1) υπήρξε μια από τις μεγαλύτερες πόλεις της Δυτικής Κρήτης τον 7ο αιώνα π.Χ. και παρέμεινε ενεργή μέχρι τη ρωμαϊκή και την πρώτη βυζαντινή εποχή μέχρι ένα μεγάλο σεισμό που φέρεται να διέκοψε την κατοίκησή της. Στην ένδοξη εποχή της, η Απτέρα ήταν καλά οχυρωμένη με τεράστια τείχη που είναι ακόμη και σήμερα αισθητά, τα οποία έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν ως προς τα μηχανικά και στατικά τους χαρακτηριστικά (Moisidi et al., 2004).



Εικόνα 19. *Αντιπροσωπευτικά στοιχεία Πολιτιστικής Κληρονομίας από τον Ελληνικό και Διεθνή χώρο (Γαλλία). Διάσπαρτα στον αρχαιολογικό χώρο της Άπτερα στη βόρεια πλευρά της κορυφής του λόφου που δεσπόζει κατά την έξοδο από την πόλη των Χανίων με κατεύθυνση ανατολικά (Εικ.1). Όπως μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό, η θέση αυτή επιδεικνύει υψηλή πολυπλοκότητα τόσο στην αρχιτεκτονική δομική (Moisidi et al., 2004) όσο και στην οπτική της αναγνώριση από*

αλγορίθμους μηχανικής όρασης. Παρ' όλα αυτά, πρόκειται για έναν τυπικό εκπρόσωπο του χώρου των ΕΠΚ κυρίως σε ότι αφορά την εκτέλεση σεναρίων στατικότητας (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023; Motsa et al., 2020). *Στα δεξιά υπάρχει ο φάρος των Χανίων (Εικ. 2), που αποτελεί διάσημο ορόσημο της πόλης και των Χανίων. Ξεκινώντας από τον φάρο και περπατώντας κατά μήκος του λιμανιού, βόρεια – βόρειο-δυτικά εντοπίζεται η πύλη Σαμπιονάρα (Εικ. 3, κάτω αριστερά) και, έξω από την πόλη, με κατεύθυνση ανατολικά, οι τάφοι του Βενιζέλου οι οποίοι παρέχουν μία πανοραμική όψη της πόλης των Χανίων (Εικ. 4). Τέλος, στην τελευταία γραμμή, δύο εμβληματικά κάστρα αναγεννησιακού ρυθμού στην κοιλάδα του Λίγηρα, Γαλλία: μια ορθοφωτογραφία μιας πρόσοψης του Château de Chaumont (Εικ. 5, στα αριστερά) και μια λήψη με έξυπνο κινητό τηλέφωνο της εσωτερικής πρόσοψης του Château de Chambord (Εικ.6, στα δεξιά)* (Galanakis et al., 2024).

5.2.2. Βενετσιάνικος φάρος

Ο Ενετικός Φάρος (Εικ. 19/2, πάνω και δεξιά) αποτελεί την βορειοανατολική πλευρά της εισόδου του Ενετικού λιμανιού στα Χανιά και αποτελεί ιστορικό ορόσημο της πόλης. Δέχεται πολλούς επισκέπτες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ εξακολουθεί να λειτουργεί ως σημείο σταθμός για την εξυπηρέτηση μικρών ημερήσιων εξορμήσεων σε κοντινούς θαλάσσιους προορισμούς. Το λιμάνι χτίστηκε τον 14ο αιώνα και εκτείνεται σε μήκος 650 μέτρων κατά μήκος της ακτής, ενώ ο καθαρά βόρειος προσανατολισμός του το καθιστά ευάλωτο σε ισχυρούς ανέμους με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνεχώς έργα οχύρωσης του από την έντονη παράκτια δραστηριότητα (Foteinis & Synolakis, 2018).

5.2.3. Πύλη Sabbionara

Η πύλη Sabbionara (Εικ. 19/3, κάτω- αριστερά), ή Πύλη της Άμμου βρίσκεται στα δυτικά στην περιοχή με την ονομασία Κουμ Καπί στα Χανιά της Κρήτης και σηματοδοτεί την αρχή του προμαχώνα που περνούσε γύρω από την αρχαία πόλη των Χανίων τον 15ο αιώνα. Οι ιστορικές μαρτυρίες συνδέουν την προέλευσή της με μια αλλαγή στη στάθμη της θάλασσας, πίσω στη ρωμαϊκή εποχή, η οποία οδήγησε σε αυτό το σχηματισμό της αμμώδους ακτής (Gertwagen, 2000).

5.2.4. Τάφοι Βενιζέλου

Οι Βενιζέλοι τάφοι (Εικ. 19/4, πάνω - δεξιά) απέχουν περίπου 5 χλμ. από το σύγχρονο κέντρο της πόλης των Χανίων και προσελκύουν πολλούς τουρίστες οι οποίοι μπορούν να έχουν καθαρή θέα της πόλης και του ηλιοβασιλέματος. Οι τάφοι Βενιζέλου πήραν το όνομά τους από τον Ελευθέριο Βενιζέλο που ήταν ένας από τους σημαντικότερους πρωθυπουργούς της Ελλάδας (Kohlmann, 2019).

5.3. Πολιτιστική Κληρονομία σε διεθνές επίπεδο – Μνημεία Αναγεννησιακού Ρυθμού από την περιοχή της Γαλλίας

5.3.1. Château de Chaumont

Το Château de Chaumont (Εικ. 19/5) αποτελεί μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς της *UNESCO* εξαιτίας της αναγεννησιακής αρχιτεκτονικής του και την εξαιρετική πανοραμική του θέση με θέα τον ποταμό Λίγηρα, σε ένα φυσικό τοπίο που παρέμεινε ανέγγιχτο για αιώνες. Το κάστρο χρονολογείται στον 16ο αιώνα στη βασίλισσα Αικατερίνη των Μεδίκων και αργότερα στην αντίζηλό της Νταϊάν ντε Πουατιέ, φιλοξένησε πολλές διάσημες προσωπικότητες, όπως τον Νοστράδαμο και τον Βενιαμίν Φραγκλίνο (Galanakis et al., 2024).

5.3.2. Château de Chambord

Το κάστρο Chambord (Εικ. 19/6) επίσης ανήκει στην παγκόσμια κληρονομιά της *UNESCO* από το 1981, το Château de Chambord είναι ένα από τα πιο εκπληκτικά κτίρια της Αναγέννησης σε μια απέραντη φυσική κυνηγετική περιοχή, με μια ευφυή αρχιτεκτονική που φαντάστηκαν ο Φρανσουά ο 1ος και ο Λεονάρντο ντα Βίντσι, όπως η σκάλα διπλής έλικας. Είναι το μεγαλύτερο κάστρο στην κοιλάδα του Λίγηρα, με 426 δωμάτια, 156 μέτρα μήκος, 56 μέτρα ύψος, 77 σκάλες και 282 τζάκια (Galanakis et al., 2024).

Κεφάλαιο 6. Μεθοδολογική προσέγγιση – Η Ανάλυση Ιδιαζουσών Τιμών (Singular Value Decomposition – SVD) στον αρχαιολογικό χώρο των Δελφών

Σε απάντηση των ερωτημάτων Ερ. {4, 5, 6 , 7 & 8} στην συνέχεια παρατίθεται η μελέτη περίπτωσης του αρχαιολογικού χώρου των Δελφών και πιο συγκεκριμένα στο ναό του Απόλλωνα όπου διερευνώνται οι τεχνικές ενσωμάτωσης της μηχανικής μάθησης και της μηχανικής όρασης στην ροή εργασιών κατάτμησης αντικειμένων αρχαιολογικού και ιστορικού ενδιαφέροντος με έναν τρόπο που να υποστηρίζει την ανάπτυξη μοντέλων στατικής για την δομική συμπεριφορά του μνημείου. Μεταξύ άλλων, επιμέρους στοχεύσεις είναι:

1. Η ανίχνευση και ανάλυση των δομικών στοιχείων με έναν τρόπο που να είναι δυνατόν να επεκταθεί, σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές, συμπαγής, ως προς την παραμετροποίηση του και την ικανότητα προτυποποίησης (standardization),
2. Η εξαγωγή των θεμελιωδών δομικών στοιχείων που συνιστούν τους κίονες του ναού
3. Η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων σε ό,τι αφορά τα εμπόδια που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωση εφαρμογών ΤΝ στην κατάτμηση του νέφους καθώς και στα χαρακτηριστικά που εν πρέπει να φέρουν οι όποιες προσπάθειες αυτοματισμού.

6.1. Ανάλυση και αποσύνδεση σε επίπεδο θεμελιωδών δομικών στοιχείων (Stone-by-Stone Segmentation)

Η κατάτμηση λίθο-προς-λίθο, ένας όρος που δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά από τους συγγραφείς (Idjaton et al., 2021) και αναφέρεται σε μια εντελώς νέα έννοια όπου η τεχνολογία κατάτμησης των νέφους δεδομένων ή των φωτογραφικών αρχείων επεκτείνεται σε ακρίβεια επιπέδου θεμελιωδών συστατικών, ήτοι λίθων. Αυτή η υψηλής ακρίβειας, υψηλής ανάλυσης τμηματοποίηση βρίσκεται στα όρια του δυναμικού των αρχιτεκτονικών Βαθιάς Μάθησης, τα οποίο είναι εγγενώς δυσλειτουργικά στον εντοπισμό μικρών, σε γεωμετρικές διαστάσεις, αντικειμένων (Liu et al., 2022). Παρά ταύτα, οι νέες εξελίξεις στον χώρο της ΤΝ, στρέφουν τους ερευνητές σε αυτές τις εφαρμογές πλήρους από-συναρμολόγησης των μοντέλων των μνημειακών μοντέλων (Idjaton et al., 2021a; Liu et al., 2022; Nieto-Julián et al., 2022; Poux et al., 2017; Valero et al., 2019; Valero, Bosché, & Forster, 2018a; Valero, Bosché, Forster, et al., 2018). Η κατάτμηση λίθο-προς-λίθο (*stone-by-stone*) μπορεί να εκτελείται:

1. Χειροκίνητα με υποβοήθηση από κατάλληλα ενσωματωμένα εργαλεία λογισμικού στα πακέτα διαχείρισης και δημιουργίας Μοντέλων Πληροφοριών Ιστορικών Κτιρίων (ΜΠΙΚ) (Nieto-Julián et al., 2022),
2. Αυτόματα μέσω μετασχηματισμών στο πεδίο της συχνότητας όπως είναι οι αλγόριθμοι *Watershed* (Valero et al., 2019; Valero, Bosché, & Forster, 2018)
3. Μέσα από προβολές πίσω στον δισδιάστατο χώρο και χρήση πολλαπλών θεάσεων ή ορθο-φωτογραφιών του μνημείου (*2D Multiview*) που ακολουθείται από την προβολή των στοιχείων κατάτμησης πίσω στις τρεις διαστάσεις μέσω μίας διεργασίας γνωστής ως *3D back-propagation* (Liu et al., 2022),
4. Μέσα από την δημιουργία ενός γεω-αναφερμένου καμβά (*3D rasterization*) (Poux et al., 2017).
5. Τμηματοποίηση με την ενσωμάτωση επαναληπτικών αλγορίθμων σε γλώσσα προγραμματισμού με αντικειμενοστραφή (*Object Oriented Programming - OOP*) όπου τα δομικά στοιχεία του κτιρίου (τοίχος, κολώνα, δοκός, παράθυρο, κ.τ.λ..) εντοπίζονται μεν με παρέμβαση του χειριστή, αλλά τα κομμάτια που συνιστούν κάθε ένα δομικό στοιχείο, ανιχνεύονται και ταξινομούνται (sectorization and cataloguing) με ημιαυτόματο τρόπο. Η τελευταία αυτή κατηγορία συνήθως συνδυάζει ένα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών BIM σε συνδυασμό με ένα εργαλείο υποβοήθησης των επαναληπτικών διεργασιών τύπου *Visual Programming Language – VPL* (Calvano et al., 2022; Nieto-Julián et al., 2022)

Οι Idjaton et al., (2021) και Liu et al., (2022) αναπτύσσουν μεθοδολογίες κωδικοποίησης - αποκωδικοποίησης με χρήση δικτύων *CNN* για τμηματοποίηση αρχείων εικόνας και έπειτα με βάση και την γωνίας παρατήρησης αλλά για την επίτευξη εφαρμογών μοντελοποίησης πίσω στον τρισδιάστατο χώρο (*Scan-to-BIM*) τα αποτελέσματα κατάτμησης των εικόνων προβάλλονται πίσω στον αρχικό τρισδιάστατο χώρο μέσω της στερεοσκοπικής μεθόδου *SfM photogrammetry* (Liu et al., 2022). Οι (Idjaton et al., 2021) επιβεβαιώνουν την δυνατότητα επίτευξης ακρίβεια σε επίπεδο ξεχωριστής λίθου σε αντίθεση με τους (Liu et al., 2022) όπου η κατάτμηση λίθο-προς-λίθο προβάλλεται μόνο ως πιθανό αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας τους.

Σε πιο παραδοσιακές λύσεις, από τον χώρο της επεξεργασίας εικόνας, οι (Valero et al., (2019) & Valero, Bosché, & Forster, (2018) χρησιμοποιούν Συνεχείς Μετασχηματισμούς *Wavelet (Continuous Wavelet Transformation - CWT)* σε στοιχεία 2,5 διαστάσεων που σχηματίζονται από τις προβολές των δεδομένων νέφους σημείων σε ένα υπερ-επίπεδο (*Hyperplane*) το οποίο και

υπολογίζεται βάσει αλγορίθμων *RANSAC*. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος *Convex Hull* εισάγεται ως φίλτρο εξάλειψης θορύβου. Ομοίως, οι Poux et al., (2017) προσαρμόζουν ένα υπερ-επίπεδο μέσω *RANSAC* και στην συνέχεια προβάλει κάθε στοιχείο ενδιαφέροντος, ψηφίδες στην προκειμένη περίπτωση, με βάση και την προοπτικής κάθε εικονικής κάμερας (virtual camera). Σε ένα τελευταίο στάδιο, φιλτράρει τις σχηματιζόμενες ισοϋψείς μέσω του αλγορίθμου *CH* και στην συνέχεια, εμπλουτίζει το σημασιολογικό του χάρτη με βάση το προκαθορισμένο οντολογικό του κανόνα.

6.2. Ο χώρος των Δελφών

Όπως εμφανίζεται παρακάτω (Εικ. 20), τα ερείπια του ναού του Απόλλωνα περιέχουν έξι κίονες δωρικού ρυθμού σε άρτια σχεδόν κατάσταση και δύο κατεδαφισμένες, ελάχιστα ορατές κυρίως στην βάση τους. Το κατώτερο τμήμα του ναού που αποτελεί το δάπεδο ή κρηπίδωμα, αποτελείται τρία διακριτά επίπεδα σε μια βαθμιδωτή διάταξη που διαχωρίζει το ιερό από τον παρακείμενο χώρο και παρέχει στήριξη στους ανεγειρόμενους κίονες. Όπως φαίνεται, το ανώτερο τμήμα του ναού, η στέγη δηλαδή, έχει καταστραφεί εντελώς και διάσπαρτα τμήματα του εντοπίζονται στην κορυφή των στηλών. Ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί ένα μνημειώδες στοιχείο Διεθνούς Πολιτιστικής Κληρονομιάς και αντιπροσωπεύει μία σημαντική τυπολογία κατασκευών από ασβεστόλιθο ενώ κατά το παρελθόν έχει αποτελέσει πεδίο μελέτης για την ανάπτυξη μοντέλων ανίχνευσης της δομικής συμπεριφοράς με χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (*FEM*) (Maravelakis et al., 2023).



Εικόνα 20. *Αρχαιολογικός χώρος των Δελφών. a) Φωτογραφικές όψεις από το πεδίο, b) 3Δ μοντέλο επιφάνειας με υφή με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

Στην εικόνα 20 εμφανίζεται στα αριστερά (Εικ. 20a) η φωτογραφική λήψη του μνημείου και στα δεξιά (Εικ. 20b) το αποτέλεσμα της διαδικασίας μετά την ψηφιακή του αποκατάσταση με την χρήση συνδυασμένων τεχνικών λήψης και σάρωσης μνημείων για ΕΠΚ. Αναλυτικά η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση

του Ναού του Απόλλωνα, στους Δελφούς, η οποία παρουσιάζεται μεγεθυμένη στην εικόνα 21 υλοποιήθηκε από το εργαστήριο *Design & Manufacturing Laboratory* του ΕΛΜΕΠΑ και αποτέλεσε την επίσημη συμμετοχή της Ελλάδας στην εκδήλωση «*TwinIt! 3D For Europe's Culture - a call to EU Member States for a pan-European collection of 3D-digitised heritage assets*» που έγινε στα πλαίσια της συνόδου των Υπουργών Πολιτισμού της ΕΕ. Το 3Δ μοντέλο βρίσκεται δημοσιευμένο στην πλατφόρμα *https://skfb.ly/oQxpA* και παρουσιάστηκε από την Υπουργό Πολιτισμού Λίνα Μενδώνη ως ένα από τα σημαντικά αποτελέσματα του ερευνητικού έργου *3D4Delphi (https://3d4delphi.gr/)*



Εικόνα 21. *Ο Ναός του Απόλλωνα στον αρχαιολογικό χώρο των Δελφών. Η αναπαράσταση του 3Δ μοντέλου, παρήχθη στα πλαίσια του έργου 3D4DELPHI.*

Προκειμένου να ληφθεί ένα γεωμετρικά ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο του ναού του Απόλλωνα με ρεαλιστικές υφές, συνδυάστηκαν η επίγεια τρισδιάστατη σάρωση με *LASER* και η εναέρια φωτογραμμετρία. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν έναν τρισδιάστατο σαρωτή *Faro X130* και ένα πτητικό σκάφος ΣμηΕΑ της *DJI* μοντέλο *Phantom Four* εφοδιασμένο με *Rear Ttime Knematic - RTK*, το οποίο κατέγραψε συνολικά 930 εικόνες υψηλής ανάλυσης. Αυτές οι τεχνικές συγχώνευσης (*fusion*) δεδομένων παράγουν δεδομένα νέφους σημείων με αξιοσημείωτη ταχύτητα και ακρίβεια, αλλά απαιτούν διεξοδική μετα-επεξεργασία (Allen et al., 2003). Η αντιστοίχιση πυκνών εικόνων χρησιμοποιήθηκε μέσω του εμπορικού πακέτου *Reality Capture https://www.capturingreality.com/*.

Στο τελευταίο βήμα, ένα υψηλής ανάλυσης νέφος σημείων που δημιουργείται μέσω *TLS* συγχωνεύθηκε με το πλέγμα υψηλής ευκρίνειας από το *Reality Capture* για να παραχθεί το τελικό μοντέλο του ναού του Απόλλωνα. Το σύνολο

δεδομένων αποτελείτο από ένα τρισδιάστατο μοντέλο επιφάνειας με υφή, αποτελούμενο από περίπου 828,7 χιλιάδες πολύγωνα, αναπαριστώντας τον αρχαίο ναό του Απόλλωνα στους Δελφούς (Εικ. 20b), ο οποίος βρίσκεται στο κεντρικό ηπειρωτικό τμήμα της χώρας. Αυτός ο τύπος αρχαιολογικού χώρου, εκτός από βασικό τυπολογικό στοιχείο για την Ελληνική Πολιτισμική Κληρονομία (Mania et al., 2021; Maravelakis et al., 2023) αποτελεί και συνήθη τυπολογία για εφαρμογές μηχανικής μάθησης με στόχο την εξαγωγή των θεμελιωδών δομικών στοιχείων με χρήση σημασιολογικού εμπλουτισμού και κατάτμησης (Barsanti et al., 2017; Kyriakaki-Grammatikaki et al., 2022; Pepe et al., 2022), ή ακόμα και εφαρμογές περιήγησης με ενσωμάτωση εικονικής πραγματικότητα και μεικτής επαυξημένης πραγματικότητας (*Extended Reality - XR*) (Teruggi et al., 2021). Το 3Δ μοντέλο πλέγματος, είναι σε μορφή αρχείων .obj (object) και η υφή του δίδεται μέσω αρχείων *.mtl (material)* και *.png (bitmap).* Ωστόσο, το προτεινόμενο μοντέλο οφείλει να μπορεί να εκτελείται ακόμα και χωρίς τα συνοδά αρχεία τα οποία κυρίως συνεπικουρούν την αναπαραστατική πληροφορία του 3Δ αντικειμένου.

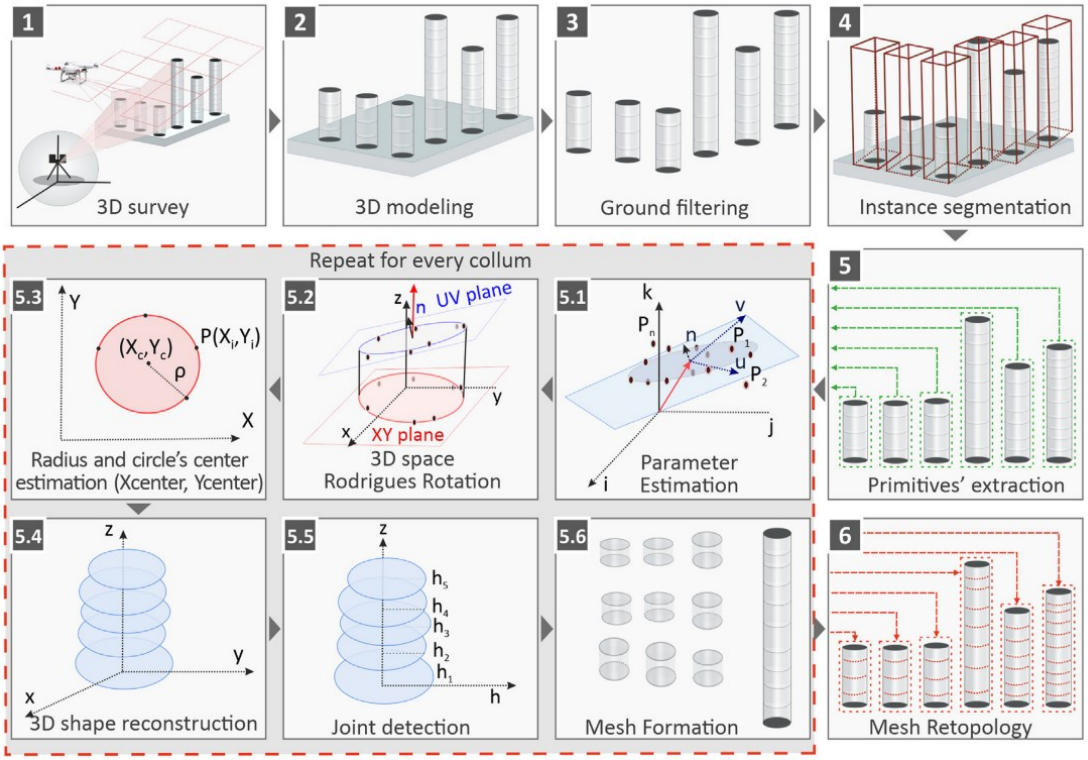
6.3.1. Πειραματικός Σχεδιασμός - Developed methodology

Ο πειραματικός σχεδιασμός (Εικ. 22) επικεντρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο γίνεται η κατάτμηση των στηλών, ως ενιαία δομή και την εξαγωγή των επαναλαμβανόμενων στοιχείων από τη σκηνή (instance segmentation). Στη συνέχεια, η δεύτερη φάση, αποτελείται από μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία όπου κάθε αντικείμενο στήλης αποσυντίθεται στα στοιχεία που την απαρτίζουν φτάνοντας έτσι την επιθυμητή ανάλυση σε επίπεδο θεμελιωδών δομικών στοιχείων κατά τους (Idjaton et al., 2021; Valero, Bosché, & Forster, 2018). Υιοθετώντας μία οπτική ανάπτυξης λογισμικού η είσοδος αποτελείται από ένα νέφος σημείων, που φέρει κατ' ελάχιστο τις καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης $\{x^{(i)}y^{(i)}z^{(i)}\}$ με i=1:N όπου N, το μέγεθος του νέφους (συνολικές γραμμές του τετραγωνικού πίνακα) μετρικές, και η τελική έξοδος είναι αντικείμενα τα οποία είναι κλειστές μαθηματικά επιφάνειες με όγκο. (*water-tight solids*). Τέτοια αντικείμενα επιτρέπουν την μετέπειτα διενέργεια μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων *FEM* (Abbate & Invernizzi, 2022; Castellazzi et al., 2015; Motsa et al., 2020). Το τελευταίο βήμα είναι η επανα-τοποθέτηση κάθε λίθου στην ακριβή του θέση πίσω στο μνημείο (*topology restitution*). Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η «αρχιτεκτονική» που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει έξι διακριτές υπο-ρουτίνες, οι οποίες είναι:

1. Η τρισδιάστατη αποτύπωση του αρχαιολογικού χώρο
2. Η ψηφιακή ανακατασκευή του (μοντελοποίηση με υφή)
3. Η απομάκρυνση του εδάφους θεμελίωσης
4. Η ανίχνευση και εξαγωγή των κιόνων

5. Η εκτίμηση των γεωμετρικών παραμέτρων κάθε δομικού συστατικού κάθε στήλης καθώς και ο εντοπισμός των ενώσεων μεταξύ των κυλινδρικών τυμπάνων
6. Η επανένωση των λίθινων δομών και αποστολή τους πίσω στο αληθή γεωγραφικό τους χώρο

Εκτός από το πρώτο βήμα, το λήψης των πρωτογενών 3Δ δεδομένων το οποίο τοποθετείται για λόγους πληρότητας, όλα τα υπόλοιπα στάδια αναλύονται λεπτομερώς στην συνέχεια της παρακάτω ενότητας. Εν συντομία, όπως φαίνεται στην γραφική αναπαράσταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, το βήμα ένα αντιστοιχεί στην έρευνα αποτύπωσης με χρήση τηλεματικής και μεθόδων φωτογραμμετρίας. Το βήμα δύο είναι η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου με την μέγιστη δυνατή γεωμετρική και αναπαραστατική πληροφορία,. Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την απομάκρυνση του εδάφους, το οποίο επιτρέπει την ευκολότερη ανίχνευση των στηλών, που είναι και τα δομικά στοιχεία ενδιαφέροντος. Στην συνέχεια, το τέταρτο βήμα επιλαμβάνεται της κατάτμησης όλων των κλάσεων αντικειμένων που ανήκουν στην κατηγορία στήλες, ακολουθούμενο από μία επαναλαμβανόμενη ρουτίνα η οποία και καταλήγει στην μέγιστη δυνατή ανάλυση. Στο βήμα πέντε, εντοπίζεται η εξαγωγή των δομικών στοιχείων κάθε στήλης και την εκτίμηση των μαθηματικών παραμέτρων, ακτίνα, ύψος τομής και κέντρο συμμετρίας, με βάση τα τοπικά χαρακτηριστικά τους (*local features*). Για την εξαγωγή των μαθηματικών παραμέτρων χρησιμοποιείται η μέθοδος ανάλυσης 3Δ δεδομένων Ανάλυσης ή Παραγοντοποίησης Ιδιαζουσών Τιμών (*Singular Value Decomposition - SVD*) όπως περιγράφεται στο έργο (*Fitting a Circle to Cluster of 3D Points*, 2016; Söderkvist, 2009; Xing et al., 2019). Για την ορθή προβολή των δεδομένων στο 2Δ επίπεδο της ανάλυσης SVD γίνεται η διόρθωση Rodrigues Rotation (Dai, 2015; *Fitting a Circle to Cluster of 3D Points*, 2016). Στο τελικό στάδιο, βήμα έξι, τα 3Δ δεδομένα τα οποία είναι πλήρως ορισμένα μαθηματικά, αποκαθίστανται με βάση τα παγκόσμια χαρακτηριστικά τους (*global features*) επιστρέφοντας στις θέσεις τους.

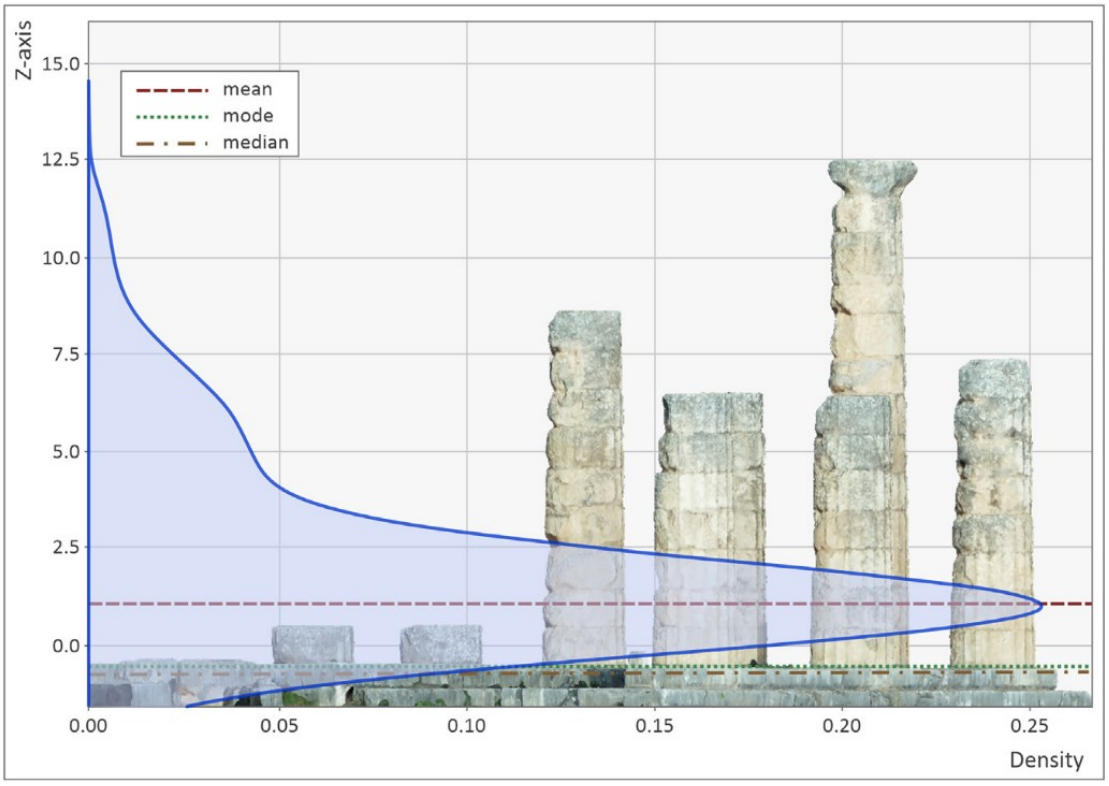


Εικόνα 22. *Πειραματικός σχεδιασμός για την κατάτμηση της 3Δ επιφάνειας σε επίπεδο θεμελιωδών στοιχείων. Όπως αποτυπώνεται στο γράφημα, τα βήματα είναι 1) λήψη των 3Δ συντεταγμένων με χρήση τηλεματικής επισκόπησης και φωτογραμμετρίας, 2) ανασύνθεση του ψηφιακού μοντέλου, 3) απαλοιφή του εδάφους, 4) ανίχνευση των στοιχείων ενδιαφέροντος (κίονες), 5) εξαγωγή των παραμέτρων των πρωτογενών σχημάτων (primitives) και 6) μοντελοποίηση τω δομικών αντικειμένων με αναδόμηση του πλέγματος και επανα-τοποθέτηση τους στην αρχική τους θέση (retopology). Το στάδιο 5 αναλύεται σε επιμέρους βήματα. Αρχικά δημιουργούνται εγκάρσιες τομές οι οποίες προσαρμόζονται στα δεδομένα μέσω της χρήσης γραμμικής άλγεβρας και της τεχνικής Singular Value Decomposition – SVD (5.1.) η οποία και υπολογίζει τα κάθετα ανύσματα που οριοθετούν τον χώρο προβολής, στην συνέχεια τα δεδομένα που κείτονται πέριξ του επιπέδου προβάλλονται επάνω σε αυτό, αφού πρώτα διορθωθούν ως προς την κλίση τους μέσω της διόρθωσης Rodrigues (5.2), και τέλος υπολογίζεται στον χώρο τον πολικών συντεταγμένων η ακτίνα και το κέντρο της κυκλικής τομής στο εκάστοτε ύψος κατάτμησης (5.3). Αφού έχουν υπολογιστεί για κάθε λίθο, η ακτίνα του κυλινδρικού τυμπάνου, το κέντρο συμμετρίας τους και το σημείο επαφής με το γειτονικό του, οι τομές ή σημεία ένωσης στους κίονες, επανα-τοποθετούνται κατακορύφως τα στοιχεία της στήλης (5.4 & 5.5) και στην συνέχεια δημιουργείται ένα μαθηματικά στεγανό (watertight) αντικείμενο το οποίο αποτελεί και το τελικό παράγωγο της μεθοδολογίας Τέλος, ο κλειστός αυτός όγκος μεταφέρεται πίσω στην σωστή θέση αναδομώντας τον ναό (στάδιο 6)* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

6.3.2. Εξαγωγή αντικειμένων ίδιας κλάσης - Instance Segmentation

Η τμηματοποίηση αντικειμένων της ίδιας κλάσης ή κατηγορίας βιβλιογραφικά αποδίδεται ως Instance Segmentation και στην προτεινόμενη μεθοδολογία (Εικ. 11) αποτελεί την προτελευταία διαδικασία του αλγορίθμου κατάτμησης του πλέγματος (mesh). Εκτελείται μετά την ανίχνευση των στηλών, και απαιτεί την απόδοση ενός δείκτη ώστε να μπορεί να εντοπιστεί κάθε ξεχωριστό αντικείμενο

που ανήκει στην ίδια αρχιτεκτονική κλάση (κατηγορία) μέσα στο 3Δ μοντέλο, όπως υποδεικνύεται από τους (Teruggi et al., 2020). Ωστόσο, σε απλές περιπτώσεις, με δύο μόνο κλάσεις στη επιφάνεια πλέγματος, όπως στην προκειμένη περίπτωση, η ανίχνευση των αντικειμένων που εμπίπτουν στην ίδια κατηγορία απλοποιείται σε ένα πρόβλημα διχοτόμησης (δυαδικό πρόβλημα) με στόχο τον διαχωρισμό της στήλης από το έδαφος θεμελίωσης (κρηπίδωμα) και η λογική είναι πως οτιδήποτε δεν ανήκει στο έδαφος, αποτελεί αντικείμενο στήλης. Η προσαρμογή (*fitting*) επιπέδων παραδοσιακά συντελείται μέσω του αλγορίθμου *RANSAC* (Kyriakaki-Grammatikaki et al., 2022; Poux et al., 2017) ή, αντίστροφα, μέσω των αλγορίθμων προσάρτησης γειτονικών σημείων (*Region Growing - RG*) εφόσον το σημείο εκκίνησης ήταν οι κυλινδρικές στήλες και τα κοινά χαρακτηριστικά η σφαιρικότητα ή όχι της τρέχουσας γεωμετρίας (Barsanti et al., 2017). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η παντελής έλλειψη οροφής οδηγεί σε μία πιο απλή επίλυση καθώς το σύνολο δεδομένων εμφανίζει μία κυρτότητα σε επίπεδο κατανομής, κατά τον κατακόρυφο άξονα Z, με την πυκνότητα των σημείων να μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος. Έτσι, είναι σαφές ότι ο διαχωρισμός δαπέδου – στηλών μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση της διαμέσου *median*(z) ή της επικρατούσας τιμής *mode*(z) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 23 παρακάτω.

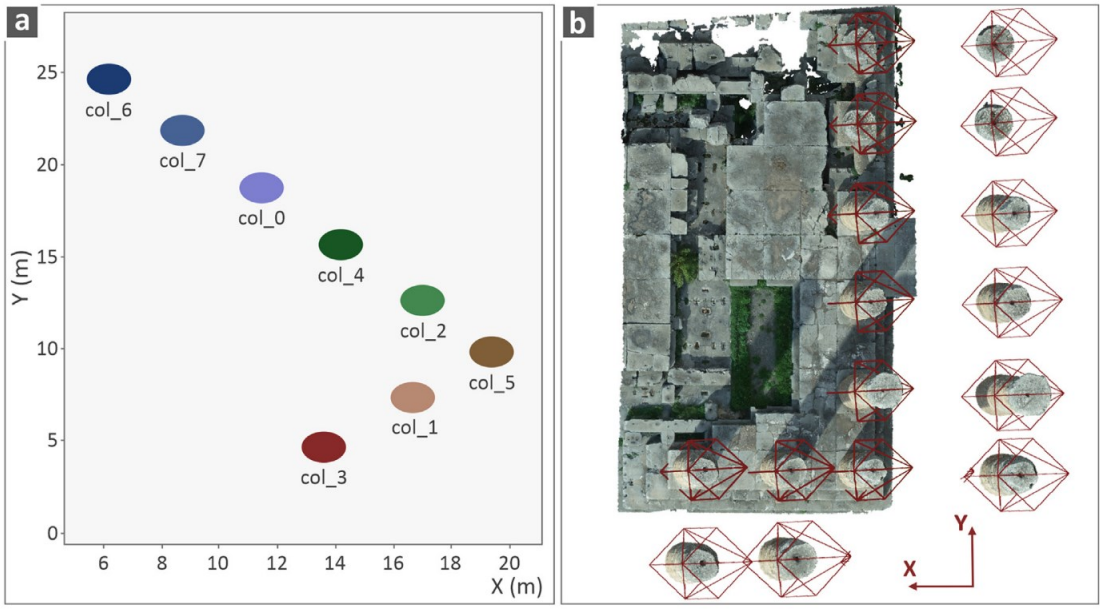


***Εικόνα 23**. Κατανομή σημείων κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα Z. Όπως φαίνεται υπάρχει σαφής λοξότητα της κατανομής προς τα δεξιά επιτρέποντας το εύκολο διαχωρισμό του δαπέδου*

από τους κίονες χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κριτήρια της διαμέσου ή της επικρατούσας τιμής (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

Η ομαδοποίηση *K-means* χρησιμοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού *Python* και της βιβλιοθήκης *Scikit-learn* (Pedregosa et al., 2011) στο υπόλοιπο σύνολο δεδομένων, μετά την αφαίρεση του εδάφους, με προκαθορισμένο τον ακριβή αριθμό των συστάδων. Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης και διαμερισμού K-means βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης η οποία βασίζεται στις αποστάσεις από τις μέσες τιμές ενός δεδομένου αριθμού ομάδων. Για ένα σύνολο n στοιχείων που πρόκειται να κατανεμηθούν σε k-ομάδες τα στοιχεία αρχικά κατανέμονται τυχαία και στην συνέχεια για κάθε ομάδα υπολογίζεται η μέση τιμή (κεντρο-ειδές). Έπειτα υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις όλων των στοιχείων από τα κεντρο-ειδή και επανα-κατανέμονται στις ομάδες. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία ολοκληρώνεται όταν πλέον δεν υπάρχει μεταβολή στην κατανομή των στοιχείων. Η αντικειμενική συνάρτηση J, για k συστάδες και n σημεία μετρά τις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ κάθε Pi ϵ $\mathbb{R}^3$ με i = {1,... n}, σε σχέση με κάθε κεντροειδές συστάδας Cj με j = {1,2,...,k} δίδεται στην παρακάτω εξίσωση. Αφού ολοκληρωθεί ο διαμερισμός (Εικ. 24), οι συντεταγμένες των εκτιμώμενων κεντροειδών (Εικ. 24.a) σε συνδυασμό με την διάμεσο ή της επικρατούσα τιμή, αναλόγως του στατιστικού κριτηρίου θέσης (location estimation) του άξονα z χρησιμοποιούνται για την αποκοπή κάθε στήλης από τα 3Δ (Εικ. 24.b).

$$J = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} \left\| x_i^{(j)} - c_j \right\|^2 \qquad \text{(εξ. 1)}$$



Εικόνα 24*. Μεθοδολογία διαμερισμού ομαδοποίησης με χρήση του αλγορίθμου K-means (α) Ομαδοποίηση K-means με χρήση των συνιστωσών (xy) και (b) κάτοψη του 3Δ μοντέλου με υπέρθεση των αντικειμένων εξαγωγής με στόχο την μετέπειτα επεξεργασία τους σε επίπεδο δομικών μονάδων* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

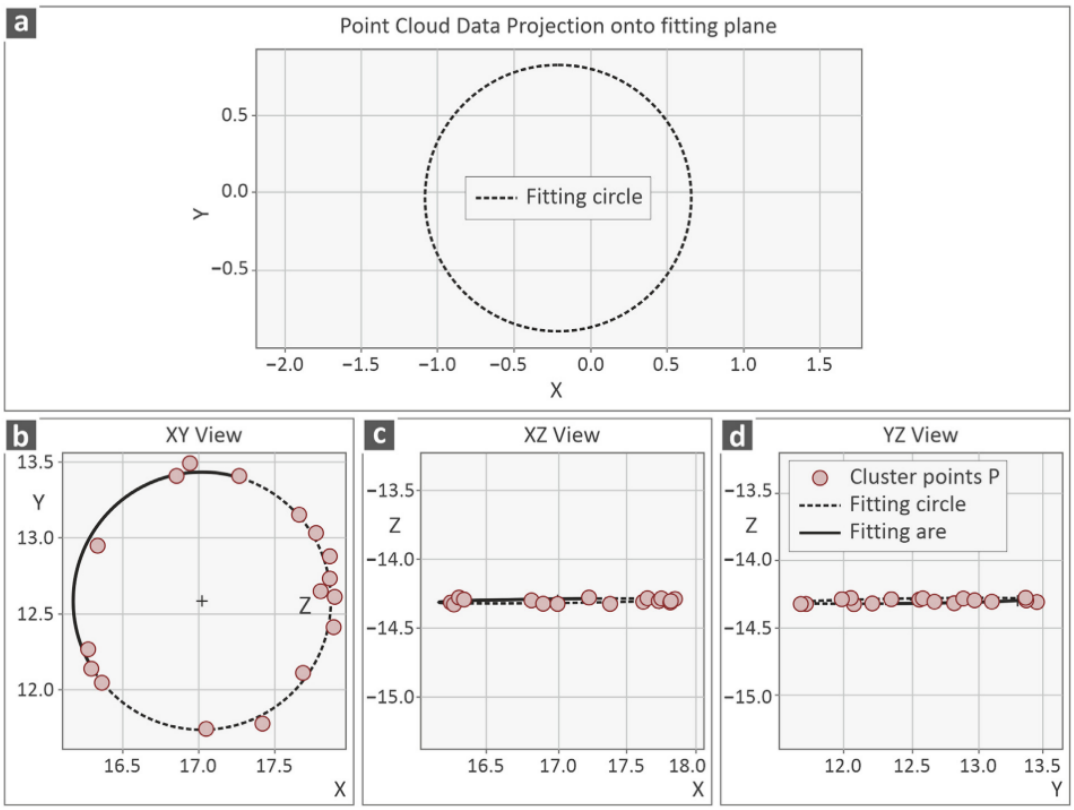
6.3.3. Εκτίμηση μαθηματικών παραμέτρων - Parameter Estimation

Η εκτίμηση παραμέτρων στα πλαίσιο των εφαρμογών για *HBIM* αντιστοιχίζεται με την διαδικασία της εισαγωγής «έξυπνων» αντικειμένων (Pocobelli et al., 2018; Poux et al., 2017) και την δημιουργία παραμετρικών μοντέλων (Moyano et al., 2021). Συγκεκριμένα στόχος εδώ είναι η δημιουργία μιας γεωμετρίας η οποία να είναι μαθηματικά οριζόμενη και άρα μικρότερη σε απαιτήσεις μνήμης και επεξεργαστικής ισχύος. Ο βαθμός αυτής της απλοποίησης έχει αποτελέσει σημείο ενδιαφέροντος και προβληματισμού καθώς πρέπει να συμβαδίζει με την επιθυμητή ΠΠ η οποία και αποδίδεται μέσω του δείκτη *LOD* (Pocobelli et al., 2018). Σε παραπλήσιες εφαρμογές αυτόματης αναγνώρισης και εξαγωγής των αντικειμένων από το νέφος δεδομένων, οι στήλες προσδιορίστηκαν από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ύψος και εγκάρσια ακτίνα (Croce et al., 2021). Ωστόσο, η επίτευξη ανίχνευσης κάθε ξεχωριστής λίθου (*stone-by-stone segmentation*) διακρίνεται από διαφορετικά ποιοτικά στοιχεία, όπως είναι η αδυναμία ανίχνευσης γεωμετρικών διαφοροποιήσεων, όπως στην περίπτωση των (Idjaton et al., 2021) ή η ύπαρξη μεγάλου βαθμού ανομοιογένειας μεταξύ των αντικειμένων της ίδιας κλάσης (Nieto-Julián et al., 2022; Teruggi et al., 2020). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αναζήτησης και εξαγωγής της δομής στηρίζεται σε τρεις βασικές παραδοχές:

1. Οι δομικές μονάδες μπορεί να μην συμμορφώνονται σε σχέση με τα μορφο-τυπικά χαρακτηριστικά τους

2. Η ύπαρξη περιορισμών δόμησης (building constrains) όπως η απαίτηση να είναι κάθετοι οι κίονες ή επίπεδο το έδαφος δεν μπορών να υιοθετούνται a priori σε ένα μνημείο σοβαρά αλλοιωμένο από το πέρασμα του χρόνου, όπως στο μνημείο των Δελφών
3. Η όποια λύση θα πρέπει να είναι εκτελέσιμη ακόμα και χωρίς την ύπαρξη υφής, λαμβάνοντας υπόψιν γεωμετρικές ανωμαλίες όπως η απότομη μείωση της διαμέτρου των στύλων η οποία μπορεί να υποκρύπτει μία ένωση μεταξύ των λίθων.

Βάσει της 2ης παραδοχής, η έλλειψη καθετότητας σημαίνει πως οι αρμοί των κιόνων δεν είναι κατά απαίτηση κάθετοι στον κατακόρυφο άξονα και παράλληλα ο διαμήκης άξονας της στήλης δεν είναι κατά απαίτηση παράλληλος με τον άξονα των Z και κάθετος με το έδαφος. Αυτό θα δημιουργούσε ένα πρόβλημα στην ανίχνευση των σημείων ελάττωσης της διαμέτρου της κολώνας καθώς κάνοντας δειγματοληψία κατά τον άξονα των Z θα αποτυπώνονταν όχι οι αληθινές διατομές αλλά η προβολή αυτών κατά το XY επίπεδο (Εικ. 25). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, υιοθετείται η αναζήτηση του βέλτιστου επιπέδου προσαρμογής των δεδομένων του νέφους, αμφίπλευρα των ακτινικών τομών, καθ' ύψος. Για την προσαρμογή των επιπέδων αυτών χρησιμοποιείται η μέθοδος Ανάλυσης / Παραγοντοποίησης Ιδιαζουσών Τιμών (*Singular Value Decomposition - SVD*) (Söderkvist, 2009). Στην συνέχεια με γνωστά τα ορθο-κανονικά διανύσματα βάσης συστρέφεται η προβολή των σημείων επί του επιπέδου ώστε να προκύψει μία κυκλική περιφέρεια αντί της κωνικής τομής που προκύπτει από την τομή ενός επιπέδου με την επιφάνεια ενός κυλίνδρου. Η στροφή αυτή γίνεται με την χρήση της μεθόδου *Rodriques* κατά τους (Dai, 2015). Συνοπτικά ο κώδικας βασίστηκε στην δημοσιευμένη παρουσίαση των (*Fitting a Circle to Cluster of 3D Points*, 2016) που αφορά στην προσαρμογή περιφέρειας κύκλου στον χώρο.



Εικόνα 25. *Εκτίμηση παραμέτρων για την μετατροπή των αντικειμένων σε παραμετρικά μοντέλα με μαθηματικά ορισμένες τιμές την ακτίνα του κυλίνδρου (r) και την κέντρο (Xc, Yc, Zc)* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

Η *SVD* παρέχει έναν συμπαγή αλγόριθμο για την προσαρμογή ενός επιπέδου με χρήση παλινδρόμησης και κριτηρίων ευκλείδειας απόστασης. Χρησιμοποιώντας τους μαθηματικούς φορμαλισμούς των (Söderkvist, 2009), για κάθε δεδομένο σημείο Pi ε $\mathbb{R}^{nx3}$ χώρο και κάθε σημείο C που ανήκει σε ένα επίπεδο με **n** το κανονικό μοναδιαίο διάνυσμα του, η ορθογώνια απόσταση μεταξύ κάθε σημείου Pi και του επιπέδου δίνεται από το εσωτερικό $(pi - c)^T n$ και το επίπεδο μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εξίσωση (εξ. 2).

$$\min_{,\|n\|=1} \|\boldsymbol{A^T n}\|^2 \quad \text{(εξ. 2)}$$

Όπου το $c = 1/n \sum_{i=1}^{n} p_i$ και ο πίνακας $A = [p_1 - c, p_2 - c, \ldots, p_n - c]$

Από την ανάλυσης SVD προκύπτει $\mathbf{A} = \mathbf{U\,S\,V^T}$ με $\mathbf{A}$ ε $\mathbb{R}^{3 \times n}$ και

$$\|\boldsymbol{A^T n}\|^2 = \|\boldsymbol{V S^T U^T n}\|^2 = \|\boldsymbol{S^T U^T n}\|^2 = (\sigma_1\, b_1)^2 + (\sigma_2\, b_2)^2 + (\sigma_3\, b_3)^2 \quad \text{(εξ. 3)}$$

Όπου το **b** ισούται με $\mathbf{b = U^T}$

Έτσι, η έκφραση στην εξίσωση (2) γίνεται ελάχιστη για **b** = $(0,0,1)^T$ που είναι ισοδύναμη με την χαμηλότερη ιδιάζουσα τιμή (*Singular Value*) (σ_3). Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα **n**, μπορεί να υπολογιστεί από την εξαγωγή της 3ης στήλης του μοναδικού πίνακα U (εξ. 4)

$$\boldsymbol{U^T n} = \boldsymbol{b}$$

$$\boldsymbol{U U^T n} = \boldsymbol{U b}$$

$$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{U}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} = \mathbf{U(:,3)} \text{ (εξ. 4)}$$

Έχοντας υπολογίσει το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα, τα σημεία του νέφους πέριξ του της περιοχής της εγκάρσιας τομής μπορούν να προβληθούν επάνω στο επίπεδο με βάση την περιστροφή Rodrigues (Dai, 2015).

Θεωρώντας διανυσματικό χώρο **P**r που περιέχει όλα τα διανύσματα που περιέχονται στην περιφέρεια του κύκλου, ο συστραμμένος διανυσματικός χώρος δίνεται από την εξίσωση (5).

$$\mathbf{Pr_{ot}} = \mathbf{P}\cos(\theta) + (\mathbf{k} \times \mathbf{P})\sin(\theta) + (\mathbf{k}\cdot\mathbf{P})\,\mathbf{k}\,(1 - \cos(\theta)) \text{ (εξ. 5)}$$

όπου **P**rot είναι το περιστρεφόμενο νέφος σημείων, k είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που ευθυγραμμίζεται με τον άξονα Z και P το αρχικό διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τα σημεία (p1, p2,…,pn) κατά μήκος της περιφέρειας ενός κύκλου ακτίνας $|R|$,, με μοναδιαίο διάνυσμα n, και κέντρο το C και στο χώρο {**u**, **nxu}** όπως προκύπτει από την εξίσωση 6:

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}\cos(t)\,\mathbf{u} + \mathbf{R}\sin(t)\,\mathbf{n} \times \mathbf{u} + \mathbf{C} \text{ (εξ.6)}$$

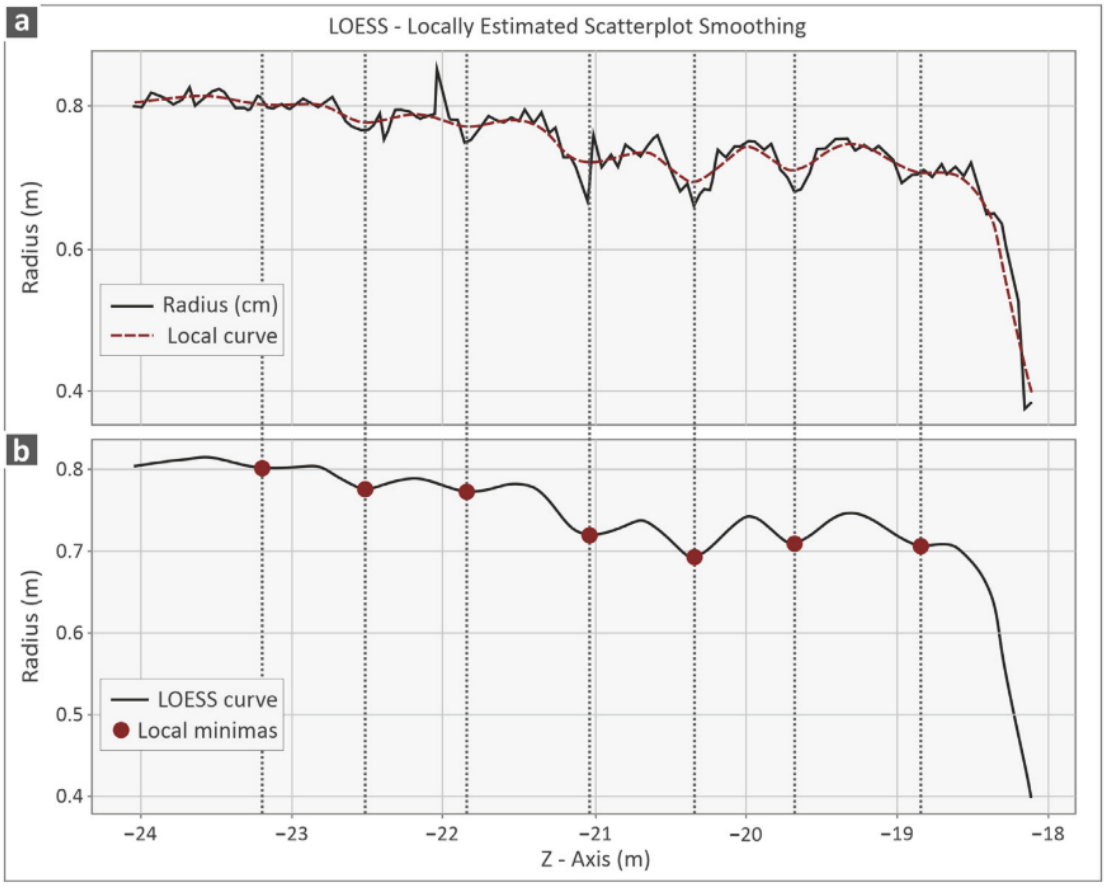
6.3.4. Εντοπισμός σημείων τομής - Joint detection

Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικ. 26) τα σημεία τομής μπορούν να εντοπιστούν με βάση τα τοπικά ελάχιστα κατά μήκος της καμπύλης που αναπαριστά την ακτίνα της στήλης κατά αυξανόμενο ύψος από το έδαφος. Αυτό το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τρεις επιμέρους φάσεις:

1. Τον κύριο βρόχο ανίχνευσης και εντοπισμού των αρθρώσεων
2. Την ανασύσταση του πολυγωνικού πλέγματος
3. Την αποκατάσταση των συντεταγμένων γεωαναφοράς του κάλε κυλινδρικού τυμπάνου ώστε να επιστρέψει πίσω στη αρχική του τοποθέτηση

Η μεταφορά από τον χώρο μοντελοποίησης (*model-space*) στον παγκόσμιο χώρο (*Global coordinates*) και αντιστρόφως επιτυγχάνεται με την διαδικασία της μετάφρασης (translation) σε όρους επεξεργασίας γραφικών (*Computer Graphics*). Η ανίχνευση των ορίων κάθε δομικού στοιχείου συμπίπτει με τα

σημεία έντονης πτώσης της διαμέτρου της στήλης (Εικ. 26). Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται σχεδόν ομοιόμορφα καθώς τα κομμάτια είχαν παρόμοιο ύψος και τα σημεία των τοπικών ελαχίστων υπογραμμίζονται με κόκκινες συμπαγείς βούλες στο διάγραμμα της πρώτης καμπύλης (Εικ. 26a). Για την εξάλειψη του θορύβου και την αντιμετώπιση φαινομένων εμφάνισης ψευδών θετικών (*artifacts*), εφαρμόστηκε ένα φίλτρο σταθμισμένης τοπικής εξομάλυνσης διασποράς με παλινδρόμηση (*Local Weighted Regression – LOESS*) (Seabold & Perktold, 2010). Τέλος, η μετατροπή του νέφους πίσω σε πολυγωνικό πλέγμα διενεργείται μέσω της βιβλιοθήκης *Open3D* (Zhou et al., 2018) και της γλώσσας *Python*.



Εικόνα 26. *Ανίχνευση των σημείων τομής (τοποθέτησης) των λίθινων τυμπάνων που συνιστούν τους κίονες του ναού. Στην πρώτη γραμμή παρουσιάζεται η καμπύλη της διαμέτρου των καθέτων τομών κατά αυξανόμενο ύψος από το έδαφος, όπως αυτό υπολογίζεται από τον άξονα των Z (25a). Με μαύρο χρώμα είναι η καμπύλη της διαμέτρου έτσι και με κόκκινο χρώμα είναι η εξομαλυμένη καμπύλη η οποία και προκύπτει με την μέθοδο LOESS. Στην 2η γραμμή η εξομαλυμένη καμπύλη παρατίθεται με μαύρο χρώμα και οι συμπαγείς βούλες με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν τα τοπικά ελάχιστα που αντιστοιχούν στα σημεία τομής της στήλης* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

6.4. Μετατροπή από νέφος σημείων σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων - Cloud2FEM

Η απαίτηση για δημιουργία μαθηματικά κλειστών μοντέλων συνδέεται εν πολλοίς με την πιθανότητα άμεσης εκτέλεσης προσομοιώσεων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Analysis - FEA*), διεργασία που ήδη έχει επιχειρηθεί και στο παρελθόν για τον συγκεκριμένο χώρο, ο οποίος βρίσκεται αντιμέτωπος με σοβαρές φθορές λόγω καιρικών και σεισμολογικών φαινομένων (Maravelakis et al., 2023). Όπως χαρακτηριστικά δηλώνεται στο παραπάνω άρθρο έως και σήμερα το πολυγωνικό πλέγμα υψηλής πιστότητας προορίζεται κυρίως για σκοπούς περιήγησης και οπτικοποίησης καθώς πρακτικά είναι δύσκολη η απευθείας ενσωμάτωση του σε διεργασίες FEM με τα συνήθη πακέτα λογισμικού. Το βασικό μειονέκτημα έγκειται στην έλλειψη συμβατότητας μεταξύ του πλέγματος επιφάνειας που παράγεται από την φωτογραμμετρία και του κλειστού και μαθηματικά ορισμένου πλέγματος που αναμένεται από την ανάλυση *FEM*. Ως εκ τούτου, η δημιουργία ενός αλγορίθμου, ικανού να εισάγει νέφος και να αποδίδει πίσω ευέλικτο και βελτιστοποιημένο πλέγμα, θεωρείται ιδιαίτερης αξίας αφού η όποια εναλλακτική μέθοδο περιλαμβάνει δυσκολίες που συνήθως οδηγούν στον κατακερματισμό της πορείας μοντελοποίησης με πολλά ενδιάμεσων βήματα και μετατροπές μεταξύ διαφορετικών μορφών δεδομένων σε ποικίλα προγραμμάτων λογισμικού τρίτων κατασκευαστών (Maravelakis et al., 2023).

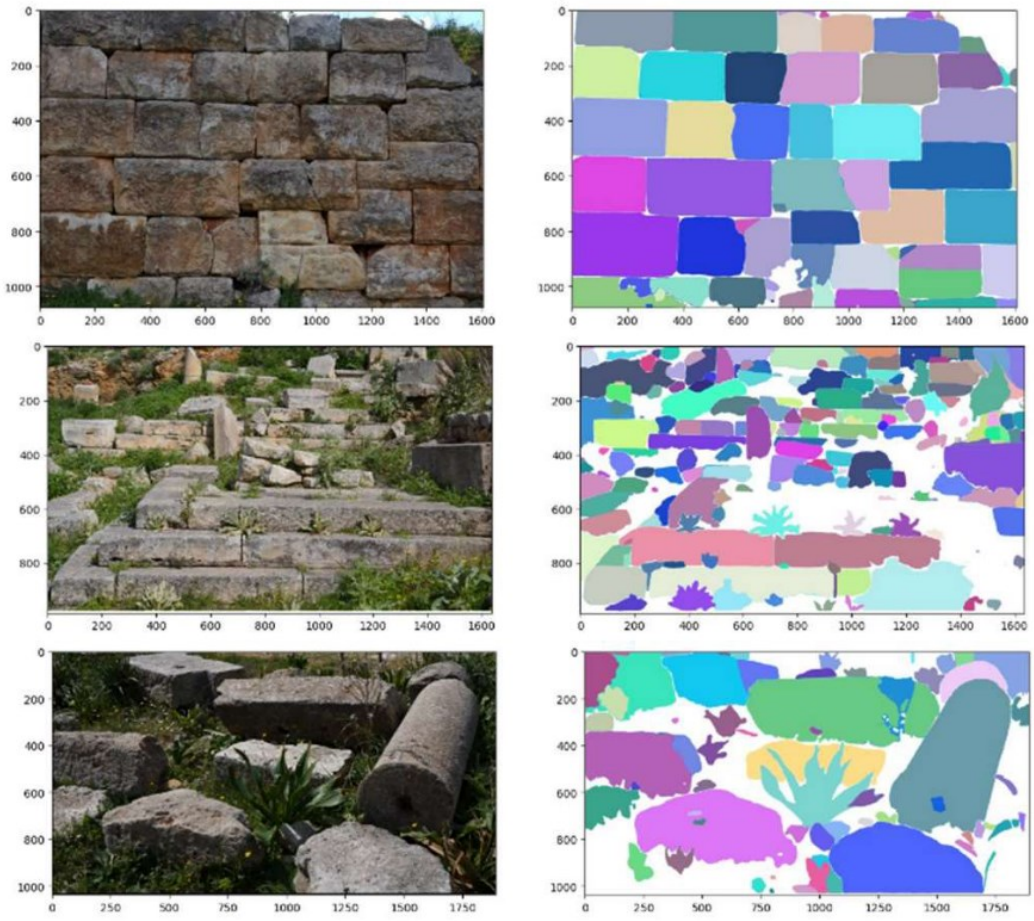
Το παραπάνω συμπέρασμα συμπίπτει και με διάφορες άλλες σημαντικές έρευνες οι οποίες αναδεικνύουν την σημασία της κατάτμησης του νέφους σημείων για τις ΕΠΚ, κυρίως μέσα από την ανάλυση της στατικότητας και τις αριθμητικές προσομοιώσεις (Barsanti et al., 2017). Η τμηματοποίηση, κατά τους ίδιους ερευνητές, θα πρέπει να θεωρείται η μόνη βιώσιμη λύση για τη συνεπή μεταφορά τόσων πολλών πληροφοριών σε διακριτές βαθμίδες ΠΠ (*LODs*) ενώ προβληματισμοί διατυπώνονται σε ό,τι αφορά την τμηματοποίηση του νέφους, ειδικά για εφαρμογές υψηλής διακριτικής ικανότητας με απαιτήσεις για κατάληξη σε «μεμονωμένα μπλοκ». Ομοίως, οι (Abbate & Invernizzi, 2022), στοχεύοντας τις μαθηματικές προσομοιώσεις για στατικές αναλύσεις, αναπτύσσουν και παρουσιάζουν μια εναλλακτική μεθοδολογία *CLOUD2FEM* που βασίζεται στις έμφυτες δυνατότητες των μοντέλων BIM για ενσωμάτωση επιφανειών μέσω της χρήσης επιφανειών *NURBS* οι οποίες δύναται μετά να μετατραπούν σε υδατοστεγείς όγκους μέσω του πακέτου *ClearEdge3D*.

Κεφάλαιο 7. Παρουσίαση και συζήτηση αποτελεσμάτων

7.1. Μοντέλα θεμελίωσης και ΕΠΚ

Η αποτελεσματικότητα και η προσαρμογή του *SAM* στον τομέα των ΕΠΚ ελέγχθηκε μέσω έξι διαφορετικών περιπτώσεων, οι οποίες ωστόσο αντιπροσωπεύουν σε μεγάλο βαθμό τα τυπολογικά χαρακτηριστικά των μνημείων πολιτιστικής κληρονομίας. Η εικόνα 27 παρουσιάζει την ικανότητα του μοντέλου Segment Anything της META AI ομάδας έρευνας και ανάπτυξης (Kirillov et al., 2023) να εκτελεί λειτουργίας εντοπισμού και κατάτμησης αντικειμένων σε πρακτικές εφαρμογές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Στην δημοσίευση των (Li et al., 2024) αναφέρονται ορισμένες παρατηρήσεις σε σχέση με την επίδοση του μοντέλου, όπως για παράδειγμα την έμφυτη τάση του να δίδει προτεραιότητα σε μικρά αντικείμενα, το οποίο αποτελεί μία στρατηγική «αδυναμία» χρήσιμη στην ικανότητα του μοντέλου για εξαγωγή όλων των πιθανών αντικειμένων στην σκηνή, υπό καθεστώς ασάφειας (ambiguity). Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 27, τρίτη σειρά κάτω και δεξιά στο γράφημα, η οπή για την τοποθέτηση του μετάλλου στήριξης της στήλης, γίνεται αντιληπτή και εντοπίζεται στον κατεδαφισμένο πυλώνα. Επίσης, στην ίδια σειρά, στα αριστερά, η περιοχή φθοράς της πέτρας δίπλα στην κατεδαφισμένη κολώνα, επίσης εντοπίζεται και επισημαίνεται από το μοντέλο. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί ότι η κατάτμηση των αντικειμένων εδώ έχει προκύψει χωρίς καμία επιλογή σε επίπεδο προτροπής (*zero-shot prompt*) το οποίο βιβλιογραφικά συνδέεται με μικρότερη πιθανότητα ακριβούς εντοπισμού και εξαγωγής των επιθυμητών αντικειμένων (Li et al., 2024).

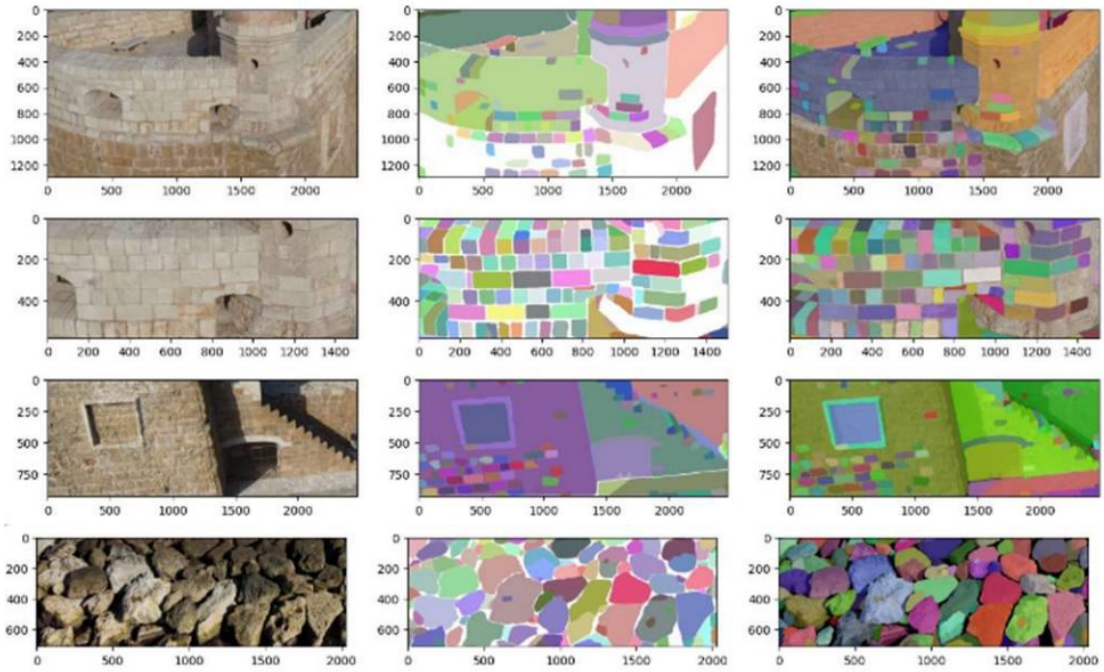
Στην περίπτωση της ανίχνευσης των δομικών λίθων στον πέτρινο τοίχο της αρχαίας Απτέρας (Εικ. 27, 1η και 2η σειρά), το μοντέλο επιτυχώς αντιλαμβάνεται την πλειοψηφία των δομικών αντικειμένων στον λίθινο τοίχο με εξαίρεση τον λίθο στο μέρος κάτω και δεξιά όπου η χρωματική διαφορά αντιλαμβάνεται ως διαφορετικό αντικείμενο από τον αλγόριθμο. Στο έδαφος, το οποίο φέρει έντονη βλάστηση (Εικ. 27, 2η σειρά) επίσης αναγνωρίζονται τα περισσότερα αντικείμενα, ενώ φαίνεται πως η πέτρινη συνεχόμενη επιφάνεια στο τρίτο επίπεδο, που αποτελεί και το τελικό δάπεδο, αντιλαμβάνεται ως θόρυβος και εξαλείφεται από τις προγνώσεις του συστήματος. Το ίδιο ισχύει και στο χώμα, εκεί όπου το χορτάρι καταλαμβάνει σημαντικό μερίδιο της εικόνας. Φαίνεται επομένως ότι το μοντέλο σε ορισμένες περιπτώσεις δεν ενσωματώνει αντικείμενα, παρά τις σχετικά μεγάλες διαστάσεις τους. Η 2η και η 3η σειρά επίσης συγκλίνουν στον συμπέρασμα ότι η βλάστηση, η οποία είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη σε επίπεδο κάλυψης στην φωτογραφία, αντιλαμβάνεται ως θόρυβος και αποκλείεται από τις μάσκες πρόβλεψης του μοντέλου.



***Εικόνα 27**. Εκτέλεση του μοντέλου SAM στον αρχαιολογικό χώρο της αρχαίας Απτέρας. Όπως φαίνεται στην πρώτη σειρά, είναι το κάθετο τοιχίο με κυβισμένες πέτρες και έντονα τα σημεία τομής. Στην δεύτερη σειρά είναι η υπό γωνία λήψη του ναού που περιλαμβάνει τόσο στοιχεία του δαπέδου όσο και των υπολειμμάτων της τοιχοποιίας. Στην τρίτη και τελευταία σειρά εντοπίζεται το κατεδαφισμένο σημείο μίας κολώνας η οποία έχει στο εσωτερικό της εμφανές το κανάλι που χρησιμοποιείτο για την ενίσχυση της στατικότητας. Εκκινώντας από την πρώτη γραμμή, οι λίθοι αναγνωρίζονται με σημεία αδυναμίας την περιοχή έντονης βλάστησης και το σημείο δημιουργίας ψευδών σωμάτων (artifact) κάτω και δεξιά, που συνδέεται ωστόσο με αλλαγή στην απόχρωση της πέτρας. Στην δεύτερη γραμμή, παρά το θόρυβο (occlusion) τα περισσότερα σώματα εντοπίζονται ενώ σημεία με εκτεταμένη βλάστηση ή επαναλαμβανόμενο χρώμα και υφή αποκλείονται από τις προβλέψεις του μοντέλου. Τέλος στην τρίτη σειρά, η κολώνα ανιχνεύεται και οριοθετείται μαζί με την μικρή οπή στο κέντρο της ενώ η βλάστηση που καταλαμβάνει μεγάλο μερίδιο της εικόνας απαλείφεται* (Galanakis et al., 2024).

Σε σχέση με την ικανότητα διάκρισης του συστήματος *SAM*, διερευνάται η επίδοση του μέσω της παραμέτρου της χωρικής ανάλυσης (*spatial resolution*) και τα αποτελέσματα παρατίθενται στην εικόνα 28. Όπως φαίνεται υπερβολικά πυκνές εικόνες που περιέχουν πολλές διαφορετικές τυπολογίες αντικειμένων από μεγάλη απόσταση περιορίζουν την ικανότητα του μοντέλου για αναγνώριση όλων των υποκείμενων αντικειμένων (Εικ. 28, σειρές ένα έως τρία). Αντιθέτως, το μοντέλο *SAM* λειτουργεί ικανοποιητικά σε περιπτώσεις έντονης αμφισημίας όταν η απόσταση λήψης είναι σχετικά μικρή (Εικ. 28, 4η

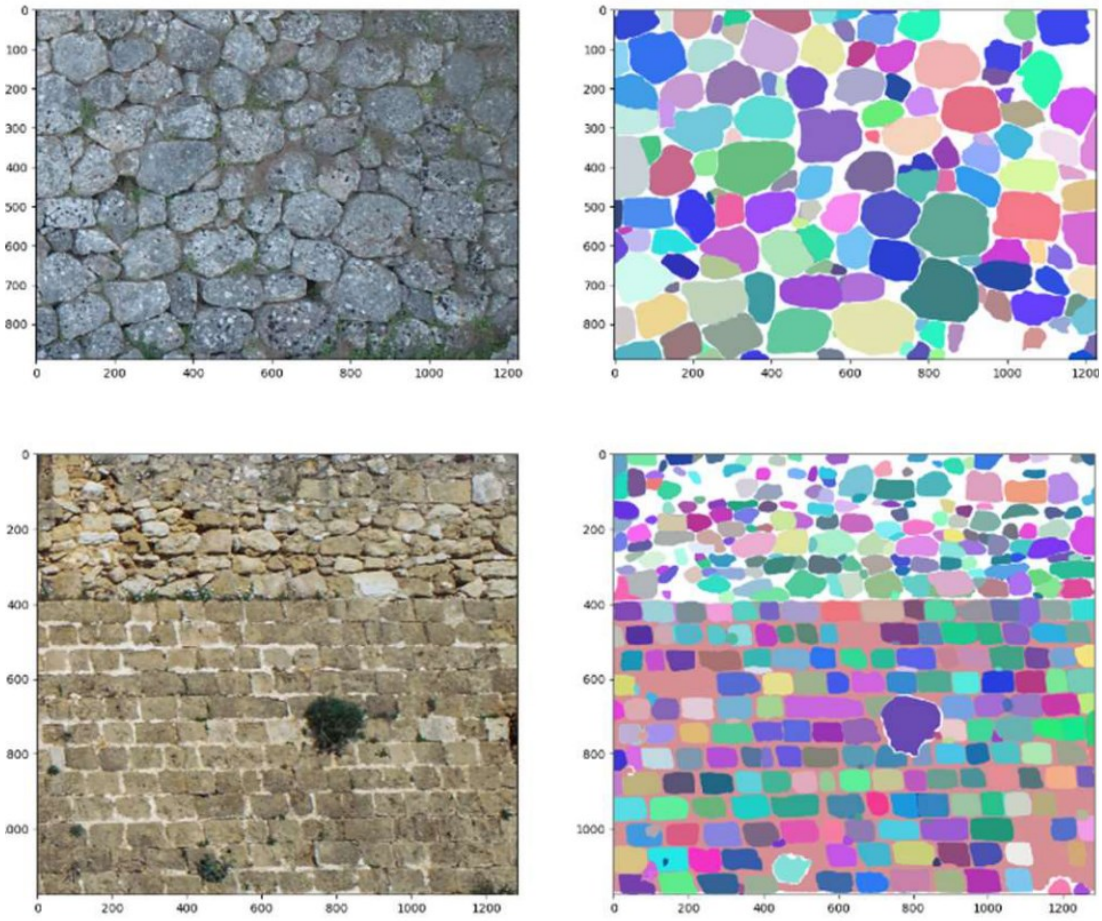
σειρά). Η σχέση αυτή μεταξύ απόστασης θέασης και χωρικής ανάλυσης έχει αναδειχθεί και από τους (Prado et al., 2023). Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται υπάρχει μία σχέση αντιστρόφου αναλογίας μεταξύ της απόστασης λήψης και της διακριτικής ικανότητας του μοντέλου που είναι ωστόσο αναμενόμενη. Όπως φαίνεται από την τελευταία σειρά, με τις πέτρες ακανόνιστου σχήματος που έχουν τοποθετηθεί σε μία λογική απόσβεσης της κυματικής ενέργειάς που συγκεντρώνεται στον Ενετικό φάρο, το μοντέλο *SAM* επιδίδεται με μεγάλη επιτυχία στην ανίχνευση όλων των αντικειμένων στην φωτογραφία και αυτό χωρίς καμία προηγούμενη επανεκπαίδευση.



Εικόνα 28. *Χωρική ανάλυση και διακριτική ικανότητα του μοντέλου Segment Anything SAM. Αριστερά σε κάθε στήλη είναι η αρχική φωτογραφία, στην μέση είναι η μάσκα πρόβλεψης και στα δεξιά η αρχική φωτογραφία με υπερτιθέμενη την πρόβλεψη του μοντέλου. Στην πρώτη σειρά: μακρινή λήψη του Ενετικού φάρου στο λιμάνι των Χανίων με ορατή την περίφραξη και το φυλάκιο. Το προηγούμενο επίπεδο εν πολλοίς αποδίδεται σε υπόβαθρο και απαλείφεται από τις προβλέψεις. Στην δεύτερη σειρά, μία κοντινότερη λήψη της ίδιας περιοχής αποκαλύπτει πολύ περισσότερα στοιχεία. Στην νότια όψη του φάρου (3η σειρά) όταν η φωτογραφία είναι απομακρυσμένη, τότε τα δομικά στοιχεία είναι οι σκάλα, το παράθυρο, και άλλα αυτοτελή αρχιτεκτονικά στοιχεία, ενώ όταν η λήψη είναι κοντινή (4η σειρά) κάθε αντικείμενο ανιχνεύεται ως ξεχωριστή οντότητα* (Galanakis et al., 2024).

Στην Εικόνα 29 ελέγχεται η άποψη των συγγραφέων (Kutlu et al., 2023) οι οποίοι υπογραμμίζουν ότι το *SAM* υπερτερεί όλων των παραδοσιακών (*CNN-based*) συστημάτων βαθέως μάθησης, σε σχέση με την κατάτμηση (*segmentation*), αλλά δεν είναι τόσο ευαίσθητο στην ενσωμάτωση όλων των αντικειμένων (*detection*) στις προβλέψεις του, ειδικά δε όταν το χρώμα του αντικειμένου ταιριάζει με αυτό του φόντου. Το παραπάνω γίνεται εμφανές στην

περίπτωση της δυτικής περίφραξης στους τάφους των Βενιζέλων **(**Εικ. 29). Στην προκειμένη περίπτωση η παντελής έλλειψη προβλέψεων στο κάτω και δεξιό μέρος της τοιχοποιίας συμπίπτει με το σημείο μέγιστης κάλυψης από βλάστηση η οποία έχει αλλοιώσει τόσο το σχήμα, τις αιχμές, όσο και το χρώμα της υποκείμενης περιοχής. Παρομοίως, στην δεύτερη σειρά, η λήψη από της περιοχής της Πύλης της Άμμου, στην Βόρεια – Βορειοανατολική πλευρά του ενετικού λιμένα στα Χανιά, τα σημεία στο επάνω μεταγενέστερο τμήμα του τοίχους εμφανίζονται λευκά στις μάσκες των προβλέψεων ενώ η βλάστηση ανιχνεύεται και ενσωματώνεται κανονικά στις προβλέψεις (Εικ. 28, 2η σειρά)

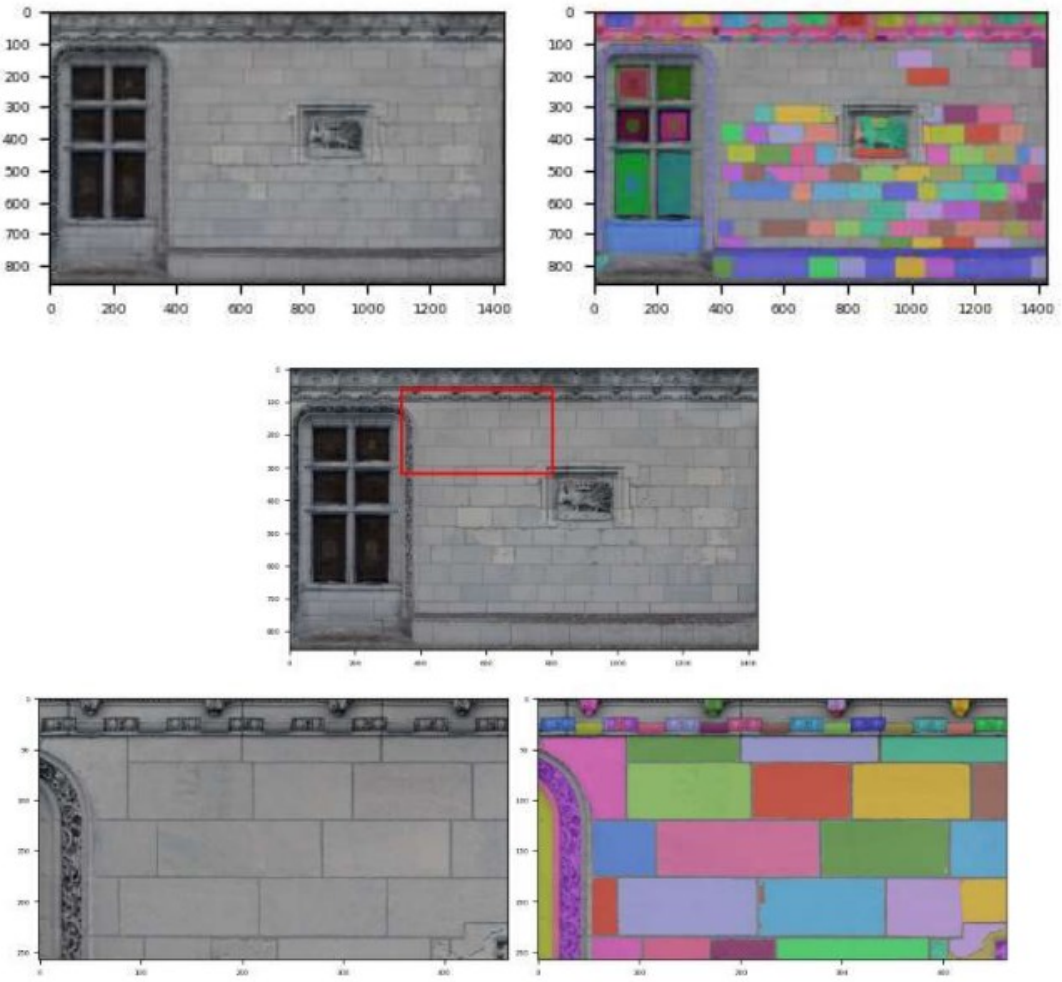


Εικόνα 29*. Εκτέλεση του μοντέλου SAM σε διαφορετικές περιπτώσεις φωτισμού, βλάστησης και τειχοποιίας. Η δυτική περίφραξη στους Τάφους των Βενιζέλων (πάνω) και η ανατολική άποψη της Πύλης της Άμμου (κάτω). Κοινός παρονομαστής και στις δύο περιπτώσεις είναι ότι οι περιοχές με ασαφή όρια και μικρές χρωματικής διαφοροποιήσεις απουσιάζουν από τις προβλέψεις του SAM* (Galanakis et al., 2024).

Το SAM δοκιμάστηκε επίσης σε δύο εμβληματικά κάστρα της Αναγέννησης στην κοιλάδα του Λίγηρα, στη Γαλλία. Το ύφος αυτών των κάστρων χαρακτηρίζεται από τοιχοποιία από *tuffeau*, έναν ασβεστολιθικό υλικό που επιτρέπει πολύ

λεπτές διακοσμήσεις και πολύ λείες προσόψεις με αρμούς που επιδιώκουν ένα χρώμα πολύ κοντά σε αυτό των λίθων, για ένα ομοιογενές οπτικό αποτέλεσμα. Η συγκεκριμένη τεχνοτροπία δεν διευκολύνει την κατάτμηση με ενσωμάτωση αλγορίθμων TN (Idjaton et al., 2021). Λόγω του μεγέθους της ορθο-φωτογραφίας του *Château de Chaumont* που παρουσιάζεται στην εικόνα 19/5 με ανάλυση 6768 x 4624 px, το μοντέλο *SAM* εφαρμόστηκε μόνο σε ένα τμήμα από το κέντρο της πρόσοψης, όπως φαίνεται στην εικόνα 30. Οι μάσκες εξόδου δεν ανήκουν μόνο σε πέτρες αλλά και σε παράθυρα, περιθώρια και άλλα στοιχεία. Ωστόσο, υπάρχουν τμήματα της εικόνας που δεν συμπεριλαμβάνονται

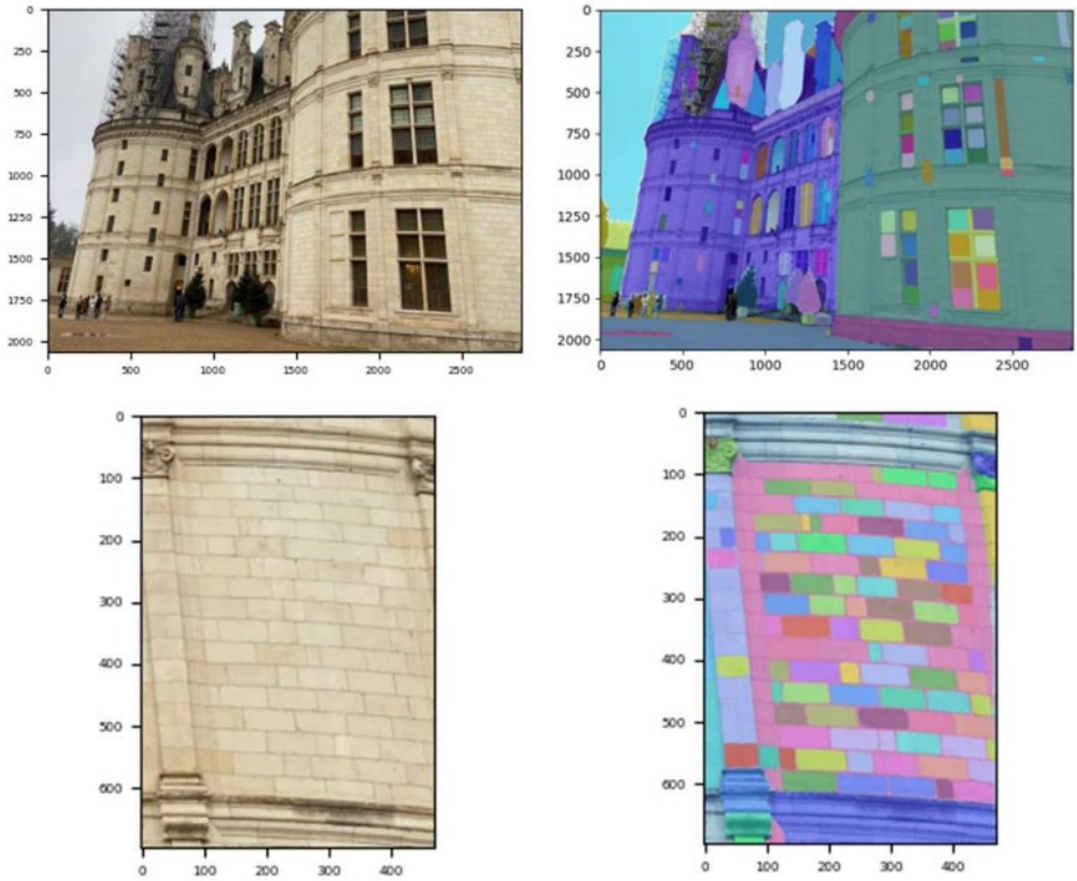
καθόλου, κοντά στην οροφή και στο διακοσμητικό στοιχείο κοντά στο έδαφος. Τέλος αρκετές πέτρες εκλαμβάνονται εσφαλμένα ως ενιαία δομή.



***Εικόνα 30**. Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομίας από την Περιοχή της Γαλλίας. Château de Chaumont: Στην πρώτη φωτογραφία η κάτοψη ενός τμήματος της αρχικής ορθογραφικής λήψης του μνημείου με ανάλυση 1452 x 836 px. Στην δεύτερη και τρίτη σειρά μία κοντινή λήψη του ίδιου μνημείου με την περιοχή εστίασης να υποδεικνύεται από το κόκκινο τετραγωνικό πλαίσιο στην μεσαία γραμμή. Σε αυτή την μεγεθυμένη εικόνα, από κοντά και στην ίδια ακριβώς θέση, ενώ η απομακρυσμένη λήψη (1η σειρά) απέτυχε να εντοπίσει όλα τα επί μέρους στοιχεία, η επανάληψη του SAM με μικρότερη εστιακή απόσταση επέτυχε την ανίχνευση όλων σχεδόν των πετρών, συμπεριλαμβανομένων και των ορίων του παραθύρου και της πρόσοψης, χωρίς αλληλεπικαλύψεις των ορίων κάθε αντικειμένου* (Galanakis et al., 2024).

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε σε μια φωτογραφία της εσωτερικής πρόσοψης του *Château de Chambord* που λήφθηκε με ένα *Smartphone*. Όπως φαίνεται στην εικόνα 31 (επάνω), ο αλγόριθμος είναι σε θέση να εξαγάγει τους τοίχους, τα παράθυρα, το έδαφος, την οροφή και άλλες λεπτομέρειες στην πλήρη φωτογραφία ευρέος πεδίου, αλλά δεν παρέχει ακριβή κατάτμηση λίθο-προς-

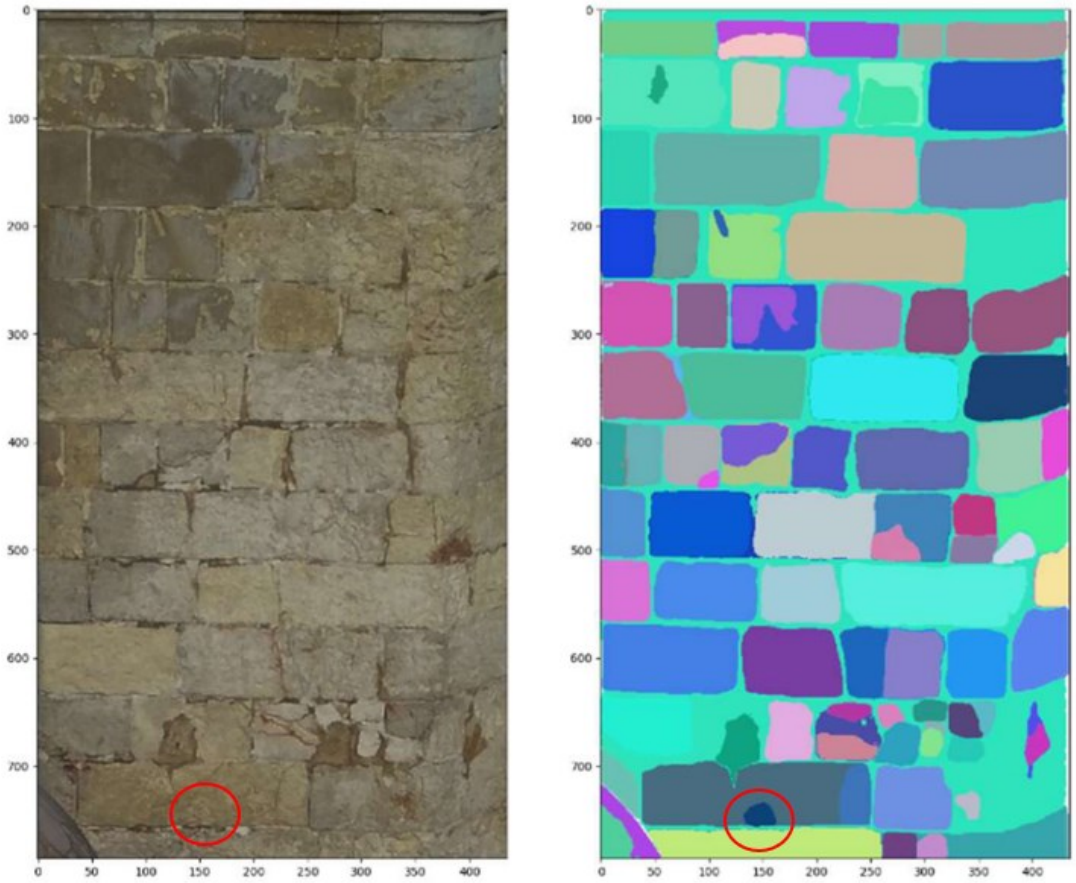
λίθο. Ωστόσο η επανεκτέλεση του με μικρότερη γωνία θέασης, για μία περικομμένη περιοχή της ίδιας λήψης (κάτω), παρουσιάζει μία ικανοποιητική κατάτμηση σε επίπεδα ξεχωριστών δομικών λίθων. Μία πρώτη ανάλυση δείχνει ότι δεν είναι μόνο η χωρική ανάλυση (αριθμός εικονοστοιχείων / cm2), που επηρεάζει τα αποτελέσματα αλλά είναι η σύνθεση της σκηνής και το μέγεθος των αντικειμένων σε σχέση με το μέγεθος της συνολικής εικόνας που καθορίζει και συνδιαμορφώνει τον ολικό αριθμό των μασκών που προβλέπει το μοντέλο (Galanakis et al., 2024).



Εικόνα 31*. Château de Chambord : Στην πρώτη σειρά η μεγάλη εικόνα με την ευρεία γωνία θέασης οδηγεί σε αποτυχία του συστήματος για εξαγωγή των θεμελιωδών δομικών στοιχείων. Στην κοντινή λήψη (2η γραμμή), μικρή γωνία θέασης, στην ίδια ακριβώς θέση, και με την ίδια ανάλυση σε επίπεδο εικονο-στοιχείων ανά τετραγωνικό px, το μοντέλο επιτυχώς εντοπίζει τα σύνορα κάθε πέτρας εμφανίζοντας έτσι σημαντική βελτίωση* (Galanakis et al., 2024).

Για την διαχείριση της αβεβαιότητας, το μοντέλο *SAM* σε κάθε σημείο προτροπής (*prompt*) δημιουργεί τρεις τουλάχιστον μάσκες οι οποίες αλληλεπικαλύπτονται, οι μάσκες αυτές αφορούν 1) «όλο το αντικείμενο», 2) «μέρος του αντικειμένου» και 3) «επιμέρους στοιχεία» (*whole, part and sub-part*) (Kirillov et al., 2023). Ωστόσο, αυτή η ίδια λειτουργία φαίνεται να οδηγεί σε μία τάση δημιουργίας ψευδών αντικειμένων (*artefacts*) στις προβλέψεις (Kirillov et al., 2023; W. Li et al., 2024; Prado et al., 2023). Όπως παρουσιάζεται και

στην εικόνα 32 η τάση για υπερεκτίμηση των αντικειμένων είναι ναι μεν εμφανής αλλά σε βαθμό που δεν μπορεί να θεωρηθεί μειονέκτημα για το μοντέλο καθώς είναι στα όρια της ανθρώπινης ικανότητας για αναγνώριση αντικειμένων *(Galanakis et al., 2024)*.

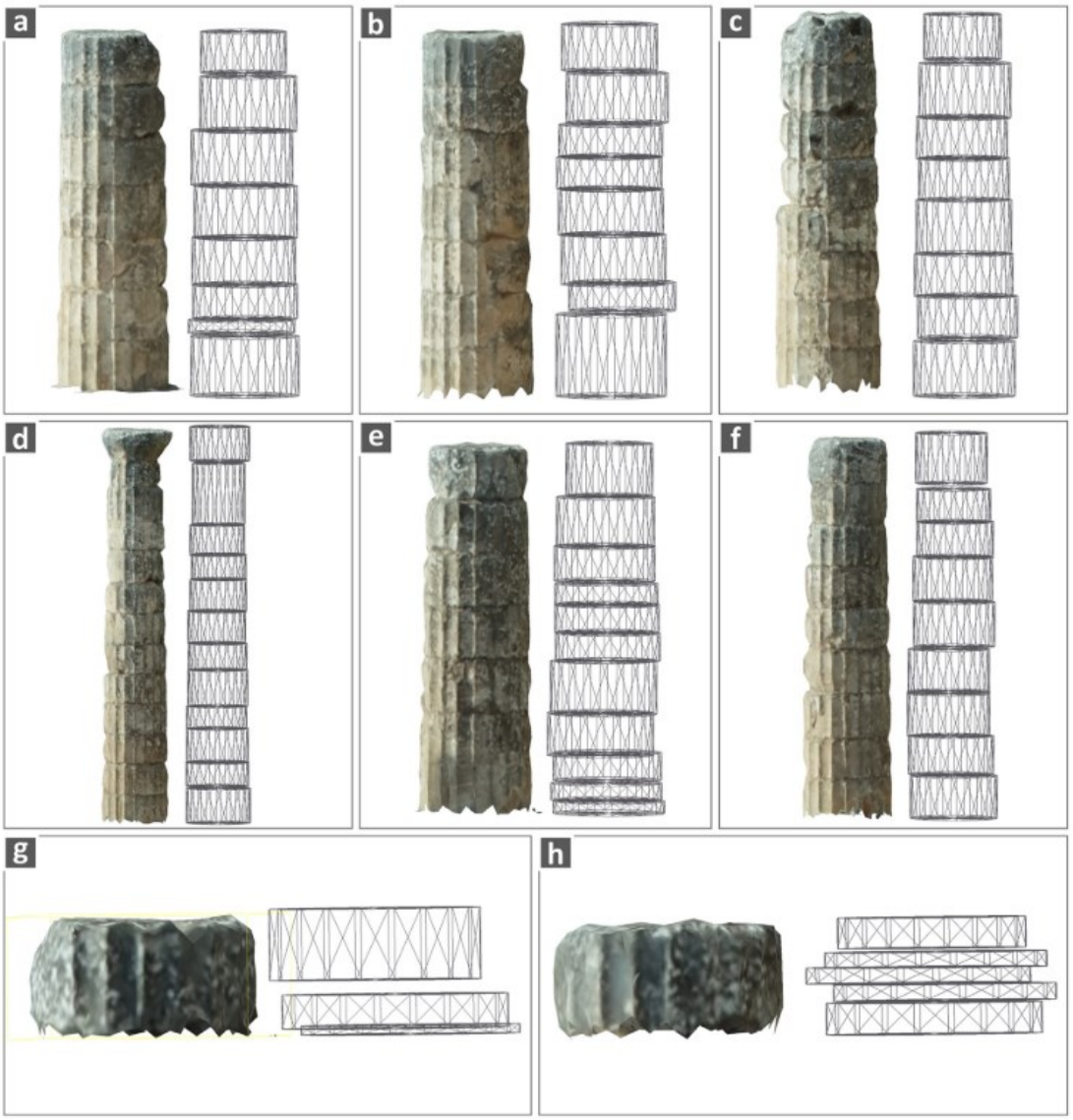


Εικόνα 32*. Η αυτόματη κατάτμηση αντικειμένων ελέγχεται σε σχέση με την εγκυρότητα με την οποία γίνεται αυτή η κατάτμηση. Όπως φαίνεται με την χαρακτηριστική κόκκινη υπογράμμιση, στο κάτω μέρος της φωτογραφίας, το μοντέλο SAM υπερ-εκτιμά ελαφρώς ορισμένες περιοχές διαφοροποίησης αλλά το σφάλμα αυτά είναι στα όρια της ανθρώπινης οπτικής αντίληψης* (Galanakis et al., 2024).

7.2. Ανάλυση SVD στο μνημείο των Δελφών

Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Ιδιαζουσών Τιμών (*Singular Value Decomposition*) (Söderkvist, 2009) έτσι όπως αυτή τροποποιείται από το έργο των (*Fitting a Circle to Cluster of 3D Points*, 2016) επικυρώνουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η προσαρμογή με βάση την μέθοδο *SVD* όπως περιγράφεται στους (*Fitting a Circle to Cluster of 3D Points*, 2016; Xing et al., 2019) συγκλίνει με επιτυχία για όλες τις περιπτώσεις (Εικ. 33) ανιχνεύοντας το σύνολο των κομματιών που συνθέτουν τους κίονες. Η

συχνότητα δειγματοληψίας κατά την κατακόρυφο ήταν 2cm, παρά ταύτα ένα ικανοποιητικό βήμα για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι τα 4cm. Η προσαρμογή των καθέτων κύκλων, για τον υπολογισμό της ακτίνας του κίονα και του κέντρου συμμετρίας (Εικ. 25) βασίζεται στην παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων που υπολογίζεται μέσω του ανοιχτού πακέτου λογισμικού *Numpy* στην γλώσσα *Python* (Harris et al., 2020). Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2. Το τελικό παράγωγο του προγράμματος (Εικ. 33), είναι αντικείμενα πλέγματος τα οποία έχουν πλήρως προσδιορισμένα όλα τα γεωμετρικά και τοπολογικά χαρακτηριστικά τους. Το αρχικό πλέγμα με την υφή παρατίθεται στα αριστερά κάθε εικόνας και στα δεξιά το ψηφιακό του αντίγραφο με σαφή τα όρια διαχωρισμού των πετρών κατά μήκος της στήλης.



Εικόνα 33*. Αποτελέσματα της μεθόδου εξαγωγής των θεμελιωδών δομικών στοιχείων με την μεθοδολογία SVD. Αριστερά σε κάθε εικονίδιο απεικονίζεται το 3Δ μοντέλο επιφάνειας και στα δεξιά το μαθηματικά οριζόμενο πολυγωνικό πλέγμα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων εκτελείται*

εντός του λογισμικού CloudCompare. Οι δείκτες (a) έως (h) αντιστοιχούν στις εναπομείνασες στήλες του ναού των Δελφών με αρίθμηση που αυξάνεται από αριστερά προς τα δεξιά και από κάτω προς τα επάνω, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 23b.. Συνολικά με βάση τα εμπειρικά δεδομένα και της βιβλιογραφική επισκόπηση (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023).

Για την μέτρηση της ακρίβειας κατάτμησης στην λογική της ανίχνευσης κάθε ξεχωριστής πέτρας δεν υπάρχει σαφής προκαθορισμένη μετρητική διαδικασία. Κατά κανόνα, σε εφαρμογές μηχανικής μάθησης μεγάλης κλίμακας, για την αποτελεσματικότητα των λύσεων που ενσωματώνουν ML και DL το πλαίσιο αναφοράς αξιολόγησης στηρίζεται σε προκαθορισμένα μετρητικά κριτήρια όπως η ακρίβεια (*Accuracy*), η ανάκληση (*Recall*), η τιμή η οποία αποτελεί ένα κριτήριο απόδοσης που λαμβάνει υπόψη τόσο την ακρίβεια όσο και την ανάκληση με περισσότερη ανοσία σε ακραίες τιμές και δίδεται στην εξίσωση (7) (Aliu et al., 2023), η συνολική ακρίβεια (*Overall Accuracy - OA*) (εξ.8) (Arnold et al., 2021; Pepe et al., 2022), η τομή έναντι της ένωσης (*Intersection over Union - IoU*) (Liu et al., 2022; Pellis et al., 2022b). Μία άλλη πιο συμπαγής τακτική είναι η ύπαρξη μίας σταθμισμένης μονάδας αναφοράς η οποία αποτελεί και την «αληθινή» μέτρηση και άρα το κριτήριο επί του οποίο αναφέρονται όλες οι εκτιμώμενες τιμές. Αυτή η λύση τυγχάνει ευρείας εφαρμογής βιβλιογραφικά (Moyano et al., 2021b; Poux et al., 2017) αλλά απαιτεί την ύπαρξη ειδικών οι οποίοι έχουν πιστοποιήσει τις μετρήσεις βάσης. Άλλες προσπάθειες αυτοματοποίησης με παρόμοιο προσανατολισμό, που κάνουν χρήση αλγορίθμων διαμερισμού ομαδοποίησης είτε δεν περιλαμβάνουν διαδικασίας μέτρησης και επαλήθευσης της ακρίβειας (Barsanti et al., 2017) ή δεν αντιμετωπίζουν την τμηματοποίηση των δεδομένων σε τόσο χαμηλό επίπεδο (S. Teruggi et al., 2021). Τέλος, η δυσκολία επιλογής της μεθόδου αξιολόγησης (*validation*) του αλγορίθμου κατάτμησης συχνά συσχετίζεται και εξαρτάται και από τον προ-καθορισμένο δείκτη *LOD* που τίθεται κατά την εκκίνηση του έργου στα πλαίσια των εφαρμογών *BIM* (Nieto-Julián et al., 2022; Pocobelli et al., 2018) που για εφαρμογές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος κινείται μεταξύ LOD 100 – 300 (Cotella, 2023)

$$\boldsymbol{F_1} = \frac{\boldsymbol{2TP}}{\boldsymbol{2TP + FP + FN}} \qquad \text{(εξ. 7)}$$

$$\mathbf{OA} = \frac{\mathbf{TP+TN}}{\mathbf{TP+FP+TN+FN}} \qquad \text{(εξ. 8)}$$

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος εδώ υιοθετείται μία προσέγγιση η οποία στηρίζεται τόσο στην μη ύπαρξη δεδομένων αναφοράς, η ακριβής θέση ή το ακριβές ύψος των κομματιών καθώς και τα ακριβή όρια ένωσης τους, όσο και στην λογική της χρήσης του αλγορίθμου για αναλύσεις *FEM*. Έτσι, η ακρίβεια προσδιορίζεται με τη σύγκριση του μετρούμενου αριθμού των στοιχείων που ανιχνεύονται σε αντιπαραβολή με τον αληθινό αριθμό των

στοιχείων που συνιστούν κάθε στήλη, έτσι όπως αυτό γίνεται αντιληπτό από το μοντέλο υπερ-υψηλής ευκρίνειας που είναι και η είσοδος στην συγκεκριμένη μεθοδολογία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακριβής θέση της ένωσης είναι ορατή διά μέσου της υφής του μοντέλου αλλά αυτό δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ότι αποτελεί τιμή του νέφους δεδομένων που εισάγεται στο πρόγραμμα. Επομένως υπάρχει ένα στοιχείο υποκειμενικότητας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά την αξιολόγηση της απόδοσης της παρούσας εφαρμογής.

Τα τέσσερα πρώτα δείγματα, που παρουσιάζονται στα εικονίδια (a), (b), (c) και (d) του σχήματος 33, παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ακρίβεια της τάξης του 91% (Πίνακας 3), η οποία πέφτει στο 43% για τα στοιχεία (e) μειώνοντας έτσι την συνολική απόδοση στο 84%. Για λόγους πληρότητας και συνέπειας, τα δείγματα (g) και (h) συμπεριλήφθηκαν επίσης στην ανάλυση παρά το γεγονός ότι δεν συνιστούν κίονες στην πράξη. Ορισμένα στοιχεία που αξίζει να τονιστούν και αποκαλύπτονται από τα αποτελέσματα της παρούσης ενότητας είναι ο αλγόριθμος αναγνώρισε με επιτυχία τις αρθρώσεις σε κολώνες που αποτελούνται από πολλαπλές κυλινδρικές πλάκες, ενώ, αντίθετα, αποτυγχάνει σε δομές που δεν έχουν καθόλου τομές όπως στις περιπτώσεις ενός μόνο εναπομείναντος στοιχείου, εικονίδια (g) και (h), γεγονός που είναι αναμενόμενο, δεδομένου του τρόπου λειτουργίας της συνάρτησης εξομάλυνσης *LOESS* υπολογίζει τον μετακινούμενο μέσο όρο με βάση πολλαπλές τιμές εισόδου και άρα υπολειτουργεί σε δειγματοληψία δεδομένων χαμηλής συχνότητα (Seabold & Perktold, 2010). Επίσης, από τοπολογική άποψη, κάθε τμήμα που ανιχνεύθηκε, στο τέλος της επεξεργασίας, ανέκτησε επιτυχώς τις συντεταγμένες θέσης του χωρίς να εισάγει παραμορφώσεις στο μνημείο. Για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων υπο-τίμησης της προσαρμογής (under-fitting) και υπερ-εκτίμησης, που οδηγούν σε λιγότερα ή περισσότερα κυλινδρικά τμήματα, το πρόγραμμα παρέχει στον χρήστη την ικανότητα προσαρμογής του βαθμού οξύτητας του αλγορίθμου κατάτμησης μέσα από ένα συντελεστή βαρύτητας στην συνάρτηση *LOESS*, ωστόσο στρατηγικά επιλέχθηκε όλες οι τομές να κάνουν χρήση των αρχικών παραμέτρων ως ένα μέτρο ενίσχυσης της ανθεκτικότητας και της διαχρονικότητας της παρούσας εφαρμογής.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που παρουσιάζεται βασίζεται σε μία γενική στρατηγικά ανίχνευσης αρθρώσεων και μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη εναλλακτική για τον σχηματισμό ευέλικτων και μαθηματικά «κλειστών» σωμάτων τα οποία και απαιτούνται σε εφαρμογές ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (*FEM*). Παράλληλα, αποτελεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση στον πρόβλημα της κατάτμηση ενός νέφους ή πλέγματος επιφάνειας σε αναλύσεις λογικής λίθο-προς-λίθο (stone-by-stone). Την στιγμή τη δημοσίευσης του άρθρου για την χρήση της *SVD* (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023) σε μνημεία χαρακτηριστικά στον Ελληνικό αρχαιολογικό χώρο όπως είναι το μνημείο του ναού των Δελφών (Maravelakis et al., 2023) η εναλλακτικές λύσεις για την αποδόμηση του νέφους είναι η χειροκίνητη τοποθέτηση κάθε στοιχείου

που με το χέρι, αξιοποιώντας τις έξυπνες λειτουργίες ανίχνευσης χαρακτηριστικών γεωμετρίας που είναι ενσωματωμένα σε λογισμικά πακέτα CAD (Castellazzi et al., 2015) για κάθε μία στήλη ξεχωριστά.

Παρ' όλα τα θετικά αυτά ευρήματα, απαιτούνται αυστηρότερες επαναληπτικές δοκιμές για την εξαγωγή συμπαγών αποτελεσμάτων όσον αφορά την ικανότητα γενίκευσης και επέκτασης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, τόσο ως προς το μνημείο εφαρμογής όσο και ως προς την δυνατότητα ενσωμάτωσης των παραγομένων μοντέλων σε εφαρμογές *FEM*. Η Ανάλυση Ιδιαζουσών Τιμών (*SVD*) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνική στον χώρο της μηχανικής μάθησης (Alessandrini et al., 2021; Söderkvist, 2009) και έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν και σε εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομίας όπως για παράδειγμα στην εργασία των (Xing et al., 2019) για τη βέλτιστη προσαρμογή επιπέδου στο πλαίσιο της αυτοματοποίησης της τμηματοποίησης του πλέγματος. Κλείνοντας ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν προϋποθέτει κάποιο σχήμα και επομένως μπορεί εύκολα να μεταφερθεί σε άλλες ΕΠΚ, οι οποίες όπως είναι γνωστό από την διεθνή βιβλιογραφία έχουν μία έμφυτη τάση έντονης ανομοιογένειας (Colucci et al., 2021; Nieto-Julián et al., 2022; Pocobelli et al., 2018; Poux et al., 2017).

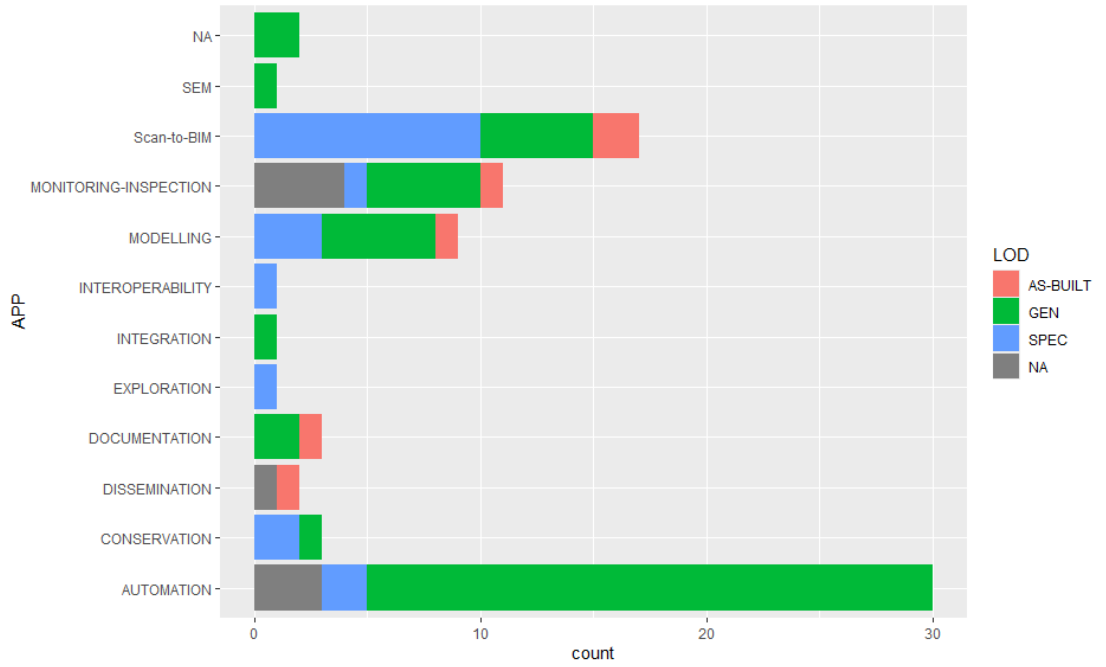
***Πίνακας 3**. Εκτίμηση ακρίβειας αλγορίθμου SVD για την λίθο-προς-λίθο κατάτμηση του πολυγωνικού πλέγματος των κιόνων του ναού*

Δεικτοδότηση Εικ. 33	**Μετρούμενα κομμάτια**	**Εκτιμώμενα κομμάτια**	**Ακρίβεια (%)**
a	7	8	85.7
b	7	8	85.7
c	8	8	100
d	13	12	92.3
e	7	11	42.9
f	9	9	100
g	1	3	NA
h	1	5	NA

7.3. Συνδυαστική ανάλυση αποτελεσμάτων

Συνολικά, σε ό,τι με αφορά το ερευνητικό ερώτημα για την βέλτιστη τεχνική κατάτμησης σε διαφορετικά σενάρια μοντελοποίησης για *HBIM* γίνεται αντιληπτό ότι η τμηματοποίηση στο νέφος σημείων, όταν στοχεύει σε εφαρμογές μοντελοποίησης υψηλής ακρίβειας αναπαραστάσεις, βασίζεται κυρίως σε χειροκίνητες λειτουργίες (Εικ. 11 & 18). Τα ευρήματα αυτά

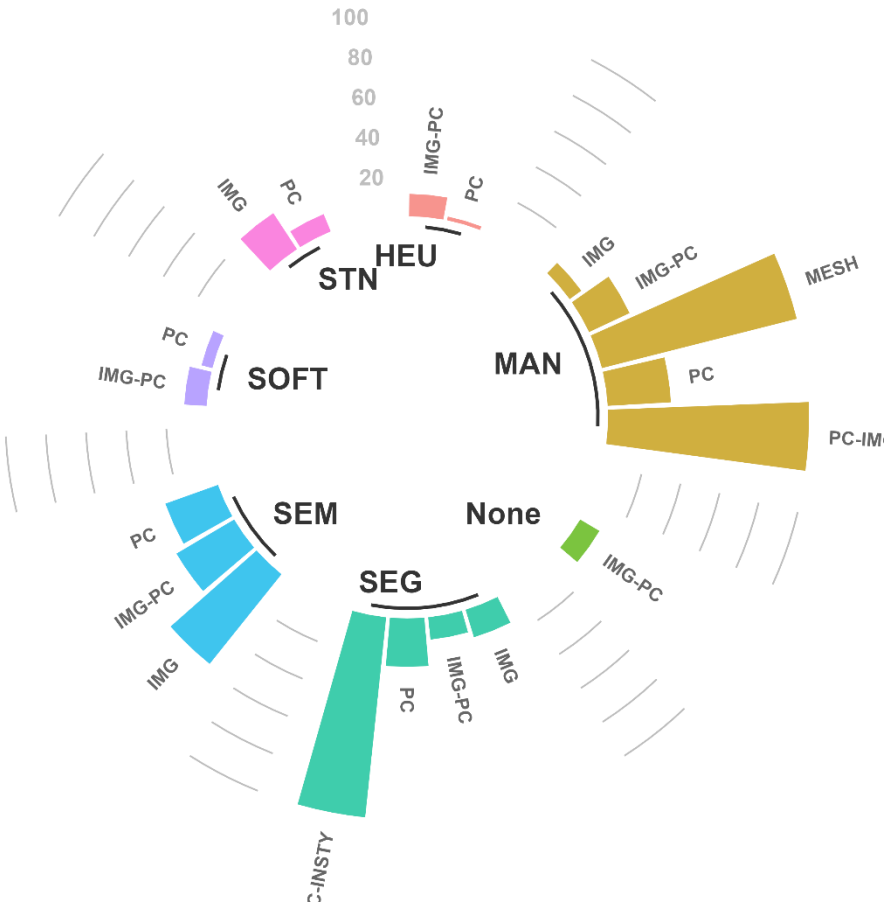
συμφωνούν και με βιβλιογραφικά ευρήματα προηγουμένων ερευνών στο αντικείμενο της εξαγωγής των θεμελιωδών δομικών μονάδων για μνημεία έντονου Πολιτιστικού ενδιαφέροντος (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023) και ευθυγραμμίζονται με διεθνή αποτελέσματα, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης της ΤΝ στις διεργασίες HBIM (Cotella, 2023). Εξετάζοντας τα ραβδόγραμμα της εικόνας 34 γίνεται εμφανές ότι ο βαθμός αυτοματοποίησης της επεξεργασίας του νέφους, σε επίπεδο ανίχνευσης και εξαγωγής αντικειμένων, είναι αντιστρόφως ανάλογος του τελικού επιπέδου ΠΠ. Η τελευταία οριζόντια στήλη του διαγράμματος αποδεικνύει ότι η συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών αυτοματοποίησης (Automation) καταλήγει σε επίπεδα ΠΠ *LOD* κατηγορίας Generic που αφορά στην χαμηλότερη δυνατή βαθμίδα. Οι εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις γεωμετρικής και λειτουργικής αναπαράστασης χαρακτηρίζονται με τον δείκτη «*AS-BUILT*» και όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα αποτελούν μία μικρή μειοψηφική ομάδα σε σύνολο 79 άρθρων.



Εικόνα 34. *Ραβδόγραμμα ΕΠΚ σε σχέση με το τελικό επίπεδο ΠΠ (LOD). Οι κατηγορίες εφαρμογών απεικονίζονται στον οριζόντιο άξονα ενώ στο ένθετο στα δεξιά παρατίθεται τα επίπεδα αναπαραστατικής λεπτομέρειας, από το ελάχιστο (SPEC) προς το μέγιστο επίπεδο AS-BUILT και την ένδειξη NA, να αποδίδεται σε εφαρμογές που η χρήση του δείκτη ΠΠ δεν έχει φυσική σημασία.*

Τα πλήρως αυτοματοποιημένα σχέδια τμηματοποίησης αποτελούν την επιλογή προτίμησης για εφαρμογές που σχετίζονται με την αυτοματοποίηση και την παρακολούθηση ή την επιθεώρηση και μπορούν να χρησιμοποιήσουν δίκτυα που βασίζονται σε *ML* ή *DL*. Δεδομένου ότι η «αρχιτεκτονική» βαθέως μάθησης (*DL*) καταναλώνει εγγενώς εικόνες 2D, δεν είναι τυχαίο ότι οι εικόνες αποτελούν σημαντική είσοδο στις λύσεις που αναζητούν εναλλακτικές επιτάχυνσης στον

χώρο της μοντελοποίησης με συνθήκες αντίστροφης μηχανικής. Όπως χαρακτηριστικά εμφανίζεται και στο πολικό διάγραμμα της εικόνας 35, οι φωτογραφίες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων σε εφαρμογές που στοχεύουν στην λογική της εξαγωγής θεμελιωδών δομικών στοιχείων (*STN*) όπως ακριβώς παρουσιάστηκε και στην εφαρμογή της χρήσης του μοντέλου *SAM* για την ανίχνευση δομικών στοιχείων σε μνημεία από τον Ελλαδικό και Διεθνή χώρο (Galanakis et al., 2024). Φυσικά πρέπει να τονιστεί ότι οι φωτογραφίες δεν μαρτυρούν κατ' ανάγκη επεξεργασία σε δύο διαστάσεις αφού πολύ συχνά γίνεται χρήση φωτογραμμετρίας για την ανασύνθεση του χώρου και την παραγωγή του 3Δ αρχείου.

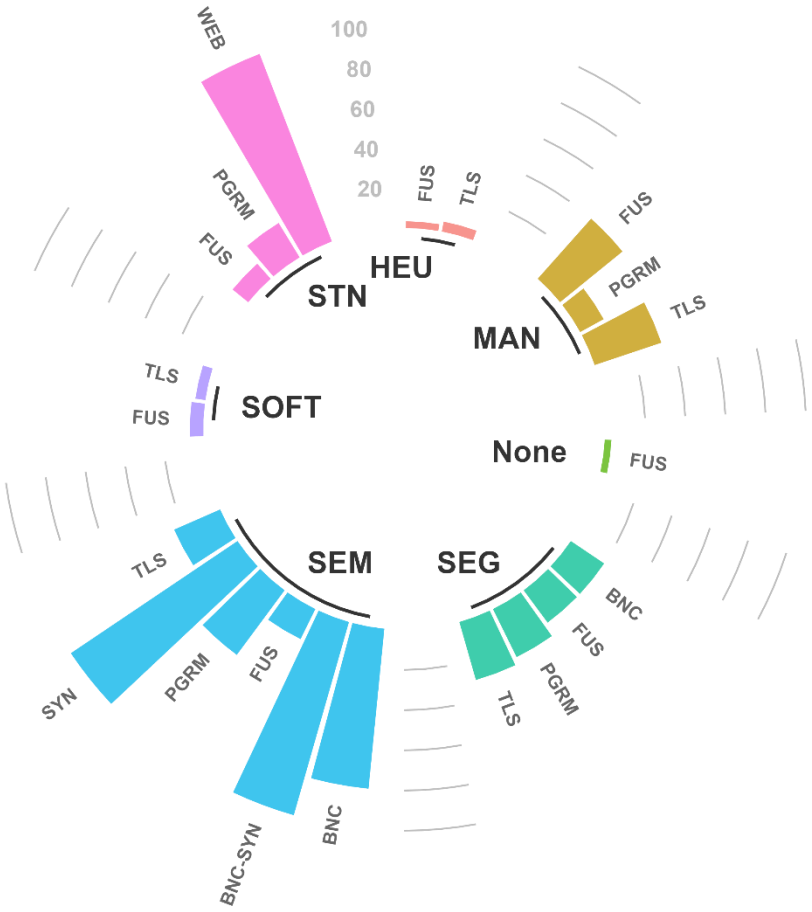


***Εικόνα 35**. Πολικό διάγραμμα που απεικονίζει τις διάφορες μεθόδους κατάτμησης σε αντιπαραβολή με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την συλλογή των πρωτογενών δεδομένων. Οι μέθοδοι είναι οι 1) χειροκίνητες με υποστήριξη από πακέτα λογισμικού (SOFT), 2) λίθο-προς-λίθο (STN), 3) Ευρετικές μέθοδοι (HEU), 4) μέθοδοι με χρήση λογισμικών κατάλληλων για HBIM εφαρμογές και μόνο (MAN), 5) μέθοδοι που αφορούν στην ομαδοποίηση και διαμερισμό (SEC), 6) μέθοδοι σημασιολογικού εμπλουτισμού και τέλος απουσίας οποιασδήποτε προσπάθειας κατάτμησης του νέφους (None).*

Η κατάτμηση ενός πλέγματος επιφάνειας στην λογική λίθο-προς-λίθο είναι ένα σχετικά νέο αντικείμενο, που πρωτο-εισάγεται στην βιβλιογραφία από τους (Idjaton et al., 2021) ως όρος και κυρίως στοχεύει σε δυσδιάκριτα αντικείμενα

με όρους παραδοσιακής επεξεργασίας νέφους σημείων. Όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 11, οι ευρετικές μέθοδοι από μόνες τους διαφοροποιούνται εντόνως σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ΕΠΚ, συνιστώντας μια δική τους ομάδα, με πολύ διακριτό προφίλ και αυτό είναι, ως ένα βαθμό, αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι στρατηγικές αυτές συνήθως προσαρμόζονται σε πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές (Galanakis et al., 2023). Με δεδομένη την παραπάνω διαπίστωση, η χρήση ενός αλγορίθμου που είναι όσο πιο γενικός σε σχέση με τις δομές που αναζητά (*shape-agnostic*) όπως στην περίπτωση της χρήσης της *SVD* από τους (Galanakis, Maravelakis, et al., 2023) αλλά και η χρήση των μοντέλων θεμελίωσης που δεν προϋποθέτουν εκπαίδευση, όπως το *SAM* στο άρθρο των (Galanakis et al., 2024), συνδράμουν στην προτυποποίηση και επαναχρησιμοποίηση των μεθόδων κατάτμησης, και μέσω αυτού, στην διαχρονικότητα και την ενίσχυση της διακριτικής ικανότητας που είναι συνήθεις προκλήσεις στον χώρο των ΕΚΠ (Εικ. 15),

Όσον αφορά τη διαφοροποίηση των εφαρμογών, η ιεραρχική ανάλυση με την χρήση του κριτηρίου *Ward.D* δείχνει υψηλή συσχέτιση σε εφαρμογές που έχουν ως κύρια στόχευση την παραγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ευκρίνειας ή στοχεύουν σε σκοπούς αρχαιολογικής τεκμηρίωσης (Εικ. 11 & 12). Αντίθετα, οι εφαρμογές αυτοματισμού και παρακολούθησης ή επιθεώρησης διαχωρίζονται καλά από το υπόλοιπο νέφος σημείων, (Εικ. 11). Η απαίτηση για υψηλό δείκτη πληρότητας πληροφορίας *LOD* είναι η συνιστώσα με τη μεγαλύτερη επιρροή στον διαχωρισμό των εφαρμογών και ακολουθεί η μεθοδολογία κατάτμησης (Εικ. 11). Τα μέσα λήψης, τα οποία κωδικοποιούνται με το ακρωνύμιο *DAC* (Εικ. 36), είναι ευρύτερα στην περίπτωση των εφαρμογών που αφορούν στον αυτοματισμό, την παρακολούθηση και την επιθεώρηση (*Automation – Monitoring – Inspection*). Από την παρούσα ανάλυση προέκυψε ότι η ίδια η διαδικασία της μοντελοποίησης αποκλίνει έντονα από τις λοιπές εφαρμογές (Εικ. 11). Εξετάζοντας τη συστάδα μοντελοποίησης, κάτω αριστερό τεταρτημόριο στο διάγραμμα αράχνης της εικόνας 15, φαίνεται ότι είναι η πιο εξέχουσα μεταξύ όλων των άλλων προκλήσεων, ακολουθούμενη από την ικανότητα διάκρισης με 12,2% και τη γενίκευση με 10,2%. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με προηγούμενα αποτελέσματα που θέτουν τη μοντελοποίηση ως ένα επίμονο πρόβλημα της επέκτασης του *HBIM* (Cotella, 2023).



Εικόνα 36. *Πολικό διάγραμμα που εμφανίζει τις διάφορες μεθόδους κατάτμησης του νέφους ή πλέγματος σε σχέση με την τεχνική λήψης των δεδομένων. Οι τεχνικές είναι: 1) χρήση φωτογραμμετρίας (PGRM), 2) χρήση επίγειων σαρωτών LASER (TLS), 3) χρήση μεικτών μεθόδων που συνδυάζουν παραπάνω από μία τεχνική ή όργανο, 4) χρήση σταθμισμένων δεδομένων (BNC) και τέλος 5) χρήση συνθετικών δεδομένων (SYN) ή 6) συνδυασμού των δύο τελευταίων κατηγοριών (BNC-SYN).*

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήματα 16 και 17, καταδεικνύουν ότι η μοντελοποίηση, η γενίκευση και η διακριτική ικανότητα είναι τα σημαντικότερα εμπόδια για την αυτοματοποίηση της κατάτμησης του πλέγματος σε ΕΠΚ. Οι προκλήσεις αυτές, σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, συνδέονται με την εγγενή πολυπλοκότητα των στοιχείων αρχαιολογικού και πολιτιστικού ενδιαφέροντος, η οποία οδηγεί σε δυσκίνητες και χρονοβόρες διαδικασίες που απαιτούν πόρους και επεξεργαστική ισχύ (Barrile & Fotia, 2022b; Fiorillo et al., 2022; Pocobelli et al., 2018; Réby et al., 2023) και παράλληλα εγείρουν προκλήσεις σε σχέση με την διακριτική ικανότητα των αλγοριθμικών μεθόδων αυτόματης αναγνώρισης και εξαγωγής των δομικών στοιχείων. Όπως φάνηκε και από την εργασία στον χώρο των Χανίων η διακριτική ικανότητα πρέπει να εκλαμβάνεται όχι μόνο ως αριθμός εικο-στοιχείων ανά cm^2 αλλά με την ευρύτερη έννοια, της σύνθεσης του

μνημείου (Galanakis et al., 2024), που τελικά καλείται να επιλύσει η εκάστοτε μεθοδολογία βασιζόμενη σε ΜΜ και αλγορίθμους ΤΝ.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν κατ' αρχάς να διερευνήσει τις μεθοδολογίες κατάτμησης του νέφους σημείων ή του πολυγωνικού πλέγματος για την επιτάχυνση μοντέλων *HBIM* και σε επόμενο βήματα να εντοπίσει τις προκλήσεις και δυσκολίες ανά πεδίο ΕΠΚ. Η βιβλιογραφική επισκόπηση για τα προβλήματα, τις επιμένουσες προκλήσεις και τις μεθοδολογίες αντίστροφης μηχανικής για εφαρμογές ΜΠΙΚ βασίζεται σε ένα δείγμα 79 άρθρων με κριτές σε δύο από τις μεγαλύτερες βάσεις ερευνητικών δεδομένων, την Scopus, η οποία και αποτέλεσε την βασική πηγή και την Google Scholar η οποία χρησιμοποιήθηκε ως συμπληρωματική ακριβώς όπως υποδεικνύεται από το έργο των (Cotella, 2023; Fernández-Mora et al., 2022; Yang et al., 2020). Σε αντίθεση με όλες τις δημοσιευμένες εργασίες στην παρούσα εργασία η επισκόπηση δεν περιορίστηκε σε μία διεξοδική περιγραφή των βασικών ευρημάτων αλλά ανέπτυξε μία συμπαγή ερευνητική στρατηγική με μεικτές ερευνητικές μεθόδους. Για τον καθορισμό των κρίσιμων πεδίων και την διασύνδεση χρησιμοποιείται η θεματική ανάλυση περιεχομένου, όπως περιγράφεται στους (Naeem et al., 2023) και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε μία ενιαία θεματική υιοθετείται η Παραγοντική Ανάλυση Αντιστοιχιών (*Correspondence Analysis*) ακολουθώντας το έργων άλλων διεθνών δημοσιεύσεων (Drago et al., 2023; van Dam et al., 2021).

Όπως αποτυπώνεται και στον Πίνακα 1, βασικές μεταβλητές στην μοντελοποίηση για ΕΠΚ είναι η κατάτμηση ή διαμερισμός των 3Δ δεδομένων (*Segmentation*), η μέθοδος λήψης των δεδομένων (*Data acquisition*), η ενσωμάτωση ή μη ΤΝ (*ML.DL*) και συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης δομικών στοιχείων, η μορφή των δεδομένων εισόδου (Input) και το επίπεδο της αναπαραστατικής πληρότητας είτε αυτό δηλώνεται με την μορφή της γεωμετρικής πληροφορίας (*LOD*) είτε με τον βαθμό ολοκλήρωσης και διάχυσης των αποτελεσμάτων (*LOM*). Η μοντελοποίηση αποτέλεσε και εφαρμογή για την ανάπτυξη ΕΠΚ αλλά και πρόκληση και παρά την εξαιρετική πρόοδο στην τεχνολογία λήψης χωρικών και οπτικών δεδομένων (Axaridou et al., 2014;Valero, Bosché, & Forster, 2018) η μοντελοποίηση εξακολουθεί να περιλαμβάνει έναν αποφασιστικό παράγοντα επιτυχίας των συστημάτων *HBIM*, καταλαμβάνοντας την δεύτερη θέση μετά την ΠΠ (*LOD*).

Συνολικά, η βιβλιογραφική επισκόπηση οδηγεί στα κάτωθι συμπεράσματα:

- Οι προκλήσεις στην ανάπτυξη εφαρμογών *HBIM* δεν ισο-κατανέμονται μεταξύ των διαφορετικών εφαρμογών αλλά κάθε εφαρμογή αντιμετωπίζει διαφορετικά προβλήματα και προκλήσεις
- Ο δείκτης ΠΠ (LOD) συσχετίζεται με την μεθοδολογία κατάτμησης και διαμερισμού του νέφους και την μέθοδο συλλογής των 3Δ δεδομένων

(*DAC*) η οποία επίσης συσχετίζεται με την μορφή της εισόδου (νέφους, πλέγμα, εικόνες, εικόνες 360^0) (Εικ. 14**)**.

- Η ανάλυση αντιστοιχίας (*CA*) και η ιεραρχική ομαδοποίηση (HC) ανιχνεύουν με επιτυχία τις βασικές διαστάσεις που οφείλονται για τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ των εφαρμογών για μοντελοποίηση HBIM
- Η τμηματοποίηση εξακολουθεί, σε μεγάλο βαθμό, να βασίζεται σε χειροκίνητες λειτουργίες, ιδίως όταν αφορά σε εφαρμογές με υψηλές προδιαγραφές απαιτήσεων *LOD*.
- Οι ανησυχίες που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την πορεία ενσωμάτωσης της ΤΝ στην επιτάχυνση και ενίσχυση των ΕΠΚ (Cotella, 2023) είναι βάσιμες καθώς ακόμα και σήμερα υπάρχει σχέση αντιστρόφου αναλογίας μεταξύ αυτοματοποίησης και υψηλής αναπαραστατικής λεπτομέρειας στο τελικό μοντέλο μετρούμενη μέσω LOD
- Οι επίγειοι σαρωτές *LASER* τύπου *TLS* κερδίζουν δημοτικότητα στον χώρο των ΕΠΚ και αυτό σε αναντιστοιχία με την παραδοσιακή επικράτηση των δεδομένων φωτογραμμετρίας στον τομέα (S. Yang et al., 2023)
- Ο σημασιολογικός εμπλουτισμός (*Semantization*) και η διαθεσιμότητα δεδομένων συνδυαστικά με την ποικιλομορφία στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομίας αποτελούν τροχοπέδη στην περαιτέρω διεύρυνση των ΕΠΚ
- Η ακρίβεια και η χωρική ανάλυση του τελικού μοντελοποιημένου σώματος βρίσκονται στον πυρήνα του προβλήματος των συστημάτων *HBIM*
- Η έλλειψη τυποποιημένων μεθόδων και η ενσωμάτωση νέων τεχνολογικών δυνατοτήτων είναι δύο σημαντικοί άξονες για εφαρμογές που στοχεύουν στην τεκμηρίωση και την διαλειτουργικότητα των μοντέλων *HBIM*

Όσον αφορά τη διαφοροποίηση των εφαρμογών, το δίπτυχο διάγραμμα (Biplot) της παραγοντικής ανάλυσης *CA* (Εικ. 11**)** δείχνει ότι οι εφαρμογές υψηλής ακρίβειας για σκοπούς οπτικοποίησης ή τεκμηρίωσης εμφανίζουν μεγάλο βαθμό κοινών χαρακτηριστικών. Αντίθετα, οι εφαρμογές αυτοματισμού και παρακολούθησης-επιθεώρησης διαχωρίζονται καλά από το υπόλοιπο νέφος σημείων, συνιστώντας έτσι μία κοινή ομάδα στο δενδρόγραμμα (Εικ. 12). Η απαίτηση για πληρέστερη μοντελοποίηση, μεγάλο *LOD*, είναι ο άξονας με τη μεγαλύτερη επιρροή στην κατάτμηση των διαφορετικών εφαρμογών και ακολουθεί η μεθοδολογία κατάτμησης των δεδομένων (Εικ. 14). Τα μέσα λήψης χωρικών 3Δ , με κωδικό (*DAC*), είναι ευρύτερα στην περίπτωση των συστάδων (*1. Automation – Monitoring - Inspection) και (4. Documentation – Semantization – Scan to BIM – Conservation - Integration*), και επιδέχονται

μεγαλύτερης ποικιλομορφίας σε επίπεδο συσκευών και τεχνικών λήψης (Σχ. 14). Ωστόσο, αξίζει να υπογραμμιστεί πως οι προηγούμενες ομάδες είναι με την μεγαλύτερη εκπροσώπηση στο δείγμα.

Κάτι που προέκυψε από αυτή την ανάλυση, το οποίο τονίζεται τόσο στο διάγραμμα της εικόνας 11 όσο και στο διάγραμμα «αράχνη» (Εικ. 14) είναι ότι η μοντελοποίηση αποκλίνει έντονα από όλες τις άλλες εφαρμογές. Εξετάζοντας τη συστάδα μοντελοποίησης (κάτω αριστερό τεταρτημόριο στο διάγραμμα αράχνης), η χειροκίνητη μέθοδος κυριαρχεί των μεθοδολογιών επεξεργασίας σε εφαρμογές μοντελοποίησης κτιριακών πληροφοριών (*BIM*) και αυτό παρά το γεγονός ότι το *HBIM* αποτελεί μια εξέλιξη του Σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), ο οποίος με την σειρά του αποτελεί παραδοσιακά μία πλατφόρμα για τη δημιουργία, την τροποποίηση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση σχεδίων (Maravelakis et al., 2023). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης περιεχομένου (thematic analysis), τα οποία και παρουσιάζονται στην εικόνα 16 συγκλίνουν στην θέση πως η μοντελοποίηση είναι η πιο σημαντική μεταξύ όλων των προκλήσεων, ακολουθούμενη μόνο από την ικανότητα διάκρισης με 12,2% και τη γενίκευση με 10,2%. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με προηγούμενα δημοσιευμένα ευρήματα που θεωρούν την μοντελοποίηση ως ένα επίμονο πρόβλημα της επέκτασης του κλάδου των *HBIM* σε εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομίας (Cotella, 2023).

Οι ΕΠΚ διαφέρουν επίσης όσον αφορά τις αναμενόμενες προκλήσεις, όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 15. Οι ομάδες 2 (*Exploration - Interoperability*) και 4 (*Documentation – Semantization – Scan to BIM – Conservation - Integration*), που περιλαμβάνουν τις εφαρμογές Μοντελοποίηση, Διάδοση, Εξερεύνηση, Διαλειτουργικότητα και Σάρωση σε *BIM*, επιβραδύνονται από την ικανότητα μοντελοποίησης, ενώ οι εφαρμογές για Παρακολούθηση - Αυτοματοποίηση – και Σημασιολογικό εμπλουτισμό απαιτούν νέες μεθόδους ενίσχυσης της διακριτικής ικανότητας των αλγορίθμων αυτοματισμού. Η ομάδα τέσσερα, που είναι και η πολυπληθέστερη, αντιμετωπίζει ζητήματα μοντελοποίησης με δευτερογενείς λοβούς προσανατολισμένους στην ολοκλήρωση (*Integration*), την διαχείριση (*Management*) και την τυποποίηση (*Standardization*). Ομοίως, και στην συστάδα ένα, η διακριτική ικανότητα (*Discrimination*) εμφανίζει σημαντική συνεισφορά γένεσης δυσκολιών.

Σωρευτικά, τα βασικά εμπόδια στην ενσωμάτωση τεχνολογιών μηχανικής μάθησης και βαθέως μάθησης εντοπίζονται κυρίως στην έλλειψη δεδομένων που να είναι προ-σημειωμένα από ειδικούς (*Benchmarks*) τα οποία δυνητικά θα αποτελούσαν την βάση για την εκπαίδευση πιο αποτελεσματικών μοντέλων αναγνώρισης και ανίχνευσης 3Δ γεωμετρίας.(Boyko & Rizhko, 2021; Cao & Scaioni, 2021; Liu et al., 2022; Matrone et al., 2020; Matrone et al., 2020; Matrone & Martini, 2021; Morbidoni et al., 2020; Pellis et al., 2021, 2022;

Wysocki et al., 2022). Αναλυτικότερα, οι Wysocki et al., (2022) αναφέρουν ότι η δημιουργία δεδομένων εκπαίδευσης μπορεί να απαιτεί έως 23 ώρες ανά κτηριακή δομή και αναλόγως της υποκείμενης πολυπλοκότητας. Οι Pierdicca et al., (2020) υπογραμμίζουν ότι η αδυναμία του μοντέλου ΤΝ για ορθή αναγνώριση αντικειμένων σχετίζεται με την άνιση κατανομή συγκεκριμένων κλάσεων στην συνολικά εξεταζόμενη σκηνή, η οποία και οδηγεί σε μεροληψία του συστήματος στις τελικές του προβλέψεις. Οι Cao & Scaioni, (2021) προσπαθώντας να παρακάμψουν την ανωτέρων δυσκολία, αναπτύσσουν και παρουσιάζουν μια νέα αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή δύο σταδίων, ικανή να παράγει σημασιολογικό εμπλουτισμό δεδομένων 3Δ με χρήση ΒΜ με μόνο 10% του αρχικά απαιτούμενου όγκου προ-σημειωμένων δεδομένων εκπαίδευσης. Οι Wysocki et al., (2022) αναπτύσσουν νέα εργαλεία για την δημιουργία δεδομένων με ανύψωση (leverage) πληροφοριών που υπήρχαν σε πρωθύστερα δεδομένα ενώ οι Matrone & Martini, (2021) προτάσσουν την μεταφορά προ-εκπαιδευμένων συστημάτων (*Transfer Learning - TL*), ώστε να εξαλειφθεί η απαίτηση προ-σημειωμένων δεδομένων.

Σε αυτήν την τελευταία λογική, στην παρούσα μελέτη υιοθετείται η χρήση του μοντέλου Θεμελίωσης *Segment Anything Model* των (Kirillov et al., 2023) μετά και τα επιτυχή προηγούμενα παραδείγματα του στον τομέα των ΕΠΚ (Li et al., 2024; Réby et al., 2023, 2023). Η αρχιτεκτονική του μοντέλου *SAM* της *Meta AI* επιτρέπει γρήγορες και αποδοτικές εργασίες κατάτμησης βάσει της ευέλικτης αρχιτεκτονικής κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή εικόνας που στηρίζεται στην καινοτόμα τεχνολογίων των οπτικών μετασχηματιστών (*ViT*) (Dosovitskiy et al., 2021; Li et al., 2022). Η συνδυασμένη χρήση μετασχηματιστών με το σύστημα διαχείρισης της αβεβαιότητα μηδενικής προτροπής (*Zero-Shot*) επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή του αλγορίθμου σε νέα πεδία με αποδόσεις που είναι συγκρίσιμες ή και καλύτερες από αυτές άλλων παραδοσιακών μοντέλων τύπου *CNN* (Li et al., 2024; Prado et al., 2023).

Το μοντέλο *SAM* έχει ικανοποιητικές δυνατότητες όχι μόνο στην κατάτμηση όλων των αντικειμένων στην σκηνών αλλά και στην ανάλυση ζημιών και φθορών ή αλλοιώσεων μικρής εμβέλειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το SAM εκτελέστηκε χωρίς καμία υπόδειξη από τον χρήση (prompt) και χωρίς προηγούμενη γνώση ή εκπαίδευση σε παραπλήσιες σκηνές, γεγονός που υποδηλώνει την εξαιρετική του προσαρμοστηκότητα για γρήγορη επισήμανση και σημασιολογικό εμπλουτισμό. Παράλληλα, αποτελεί ένα εργαλείο γενικής χρήσης που μπορεί να εκτελείται χωρίς καμία παραμετροποίηση. Ως εκ τούτου η τεχνολογία αυτή απαντά σε αρκετές παραδοχές και προκλήσεις από τον χώρο των ΕΠΚ παρέχοντας απαντήσεις στην πολυπλοκότητα, την γενικευσιμότητα και την έλλειψη διακριτικής ικανότητας ακόμα και υπό καθεστώς έντονης αβεβαιότητα και μεγάλης διαφοροποίησης των στοιχείων πολιτιστικής κληρονομίας (Galanakis, Pocobelli, et al., 2023; Pocobelli et al., 2018).

Η βιβλιογραφική έρευνα απεκάλυψε ότι οι περισσότεροι αλγόριθμοι σημασιολογικής κατάτμησης και εμπλουτισμού συνολικά:

- Βασίζονται σε συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές προδιαγραφές, όπως είναι η απαίτηση για κάθετες δομές ή ημι-επίπεδες επιφάνειες (Idjaton et al., 2021; Poux et al., 2017; Valero, Bosché, & Forster, 2018).
- Απαιτούν περαιτέρω πληροφορίες όπως είναι τα χρωματικά κανάλια (Idjaton et al., 2021; Poux et al., 2017)
- Στηρίζονται σε ειδικά τροποποιημένα δεδομένα εισόδου, όπως οι χάρτες βάθους (depth maps) 2,5D (Valero, Bosché, & Forster, 2018), για την ανίχνευση των θεμελιωδών δομικών στοιχείων.
- Απαιτούν πολύπλοκους μετασχηματισμούς των διαστάσεων του χώρου είτε προς χαμηλότερη διάσταση (2Δ) (Pellis et al., 2022) είτε συνεχής μετακίνησης μεταξύ των διαφορετικών διαστάσεων για τον σημασιολογικό εμπλουτισμό όλων των δεδομένων στο δείγμα (Liu et al., 2022)

Σε ό,τι αφορά την κατάτμηση σε επίπεδα λίθου-προς-λίθου, η κατάτμηση λίθο-προς-λίθο, όταν δεν πραγματοποιείται χειροκίνητα (Nieto-Julián et al., 2022), εξακολουθεί να προϋποθέτει κατά βάση τη μετατροπή σε 2Δ αρχεία (Idjaton et al., 2021; Valero, Bosché, & Forster, 2018). Ενώ σε σχέση με την μοντελοποίηση, τα παραγόμενα μοντέλα υψηλής ακρίβειας και αυξημένης πολυπλοκότητας, μέχρι σήμερα, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τα πακέτα λογισμικού *FEM* (Abbate & Invernizzi, 2022; D'Altri et al., 2018), με αποτέλεσμα να δημιουργείται κατακερματισμός τόσο σε επίπεδο απλοποιήσεων όσο λογισμικών πακέτων για την κατάλληλη μετατροπή των δεδομένων (Barsanti et al., 2017).

Συνολικά και συνθετικά η παρούσα εργασία αντιπροτείνει και αξιολογεί ένα καινοτόμο εργαλείο με Ανάλυση Ιδιαζουσών Τιμών (Singular Value Decomposition – SVD) και μελέτη εφαρμογής στον αρχαιολογικός χώρου των Δελφών. Το εργαλείο αυτό εφαρμόστηκε για την κατάτμηση πλεγμάτων και είναι ικανό να εκτελεστεί σε έντονα αλλοιωμένες περιοχές, όπου ενδεχομένως παραβιάζονται όλοι οι κανόνες κλασικής αρχιτεκτονικής. Τα αποτελέσματά καταδεικνύουν τη χρησιμότητα και αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας στο πλαίσιο μιας πραγματικής περίπτωσης σε ένα από τα σπουδαιότερα μνημεία της Ελληνικής επικράτειας που συνάμα αποτελεί βασικό εκπρόσωπο των μνημειακών στοιχείων πολιτιστικής κληρονομίας (Alfio et al., 2022; Barsanti et al., 2017; Galanakis, Maravelakis, et al., 2023; Kyriakaki-Grammatikaki et al., 2022; Mania et al., 2021; Maravelakis et al., 2023; Pepe et al., 2022; Teruggi et al., 2021). Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα μέσα, που κυριαρχούν στη σύγχρονη βιβλιογραφία και βασίζονται στην μηχανική μάθηση (*ML*) (Arnold et al., 2021; Colucci et al., 2021; Croce et al., 2021; Grilli et al., 2020; Koo et al., 2021; Pepe et al., 2022; Poux et al., 2017; Teruggi et al., 2021; Teruggi et al., 2020), και

βαθέως μάθηση (*DL*) (Arnold et al., 2021; Boyko & Rizhko, 2021; Cao & Scaioni, 2021; Liu et al., 2022; Matrone & Martini, 2021; Morbidoni et al., 2020; Pellis et al., 2022), η προτεινόμενη εφαρμογή δεν απαιτεί σημαντικούς επεξεργαστικούς πόρους και δεν χρειάζεται καμία *a-priori* γνώση του πεδίου ή έτοιμα σημασιολογικά δεδομένα για εκπαίδευση.

Υπό αυτή την έννοια, αναπτύχθηκε και τεκμηριώθηκε μία ευέλικτη ροή κατάτμησης του νέφους, η οποία «συμμορφώνεται» στις απαιτήσεις για ανίχνευση σωμάτων με μεγάλη διακριτική ικανότητα, που μπορεί να εκτελεστεί σε μία σωρεία δεδομένων εισόδου, δεν προϋποθέτει καμία προηγούμενη παραμετροποίηση και δεν βασίζεται σε χρωματικά κανάλια ή μετατροπές μεταξύ των καναλιών αυτών (*RGB* σε *HSV*). Η νέα αυτή μορφή κατάτμησης πλέγματος, αφορά σε αρχαιολογικό μνημείο που φέρει έντονα στοιχεία ομοιότητας με πολλούς άλλους αρχαιολογικούς χώρους, τόσο εντός της Ελληνικής επικράτειας όσο και της ευρύτερης Μεσογείου. Συνδυαστικά, η μεθοδολογία που προτείνεται αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο στα χέρια των προγραμμάτων για ΕΠΚ διευκολύνοντας την εξαγωγή όλων των δομικών αντικειμένων σε συνθήκες παραβίασης των κοινών αρχιτεκτονικών κανόνων. Με αυτόν τον τρόπο συνολικά και συνθετικά η διατριβή αυτή συντελεί στην ενδυνάμωση των μεθοδολογιών κατάτμησης και αυτοματισμού σε εφαρμογές διαχείρισης και συντήρησης της πολιτιστικής κληρονομίας, απαντώντας στην ουσία των προκλήσεων, όπως αυτές ανιχνεύθηκαν στην βιβλιογραφική επισκόπηση**.** Ωστόσο, η προτεινόμενη μεθοδολογία σε καμία περίπτωση δεν επιδιώκει να αντικαταστήσει τις εναλλακτικές λύσεις αιχμής τεχνολογίας αλλά να εμπλουτίσει το «οπλοστάσιο» των ειδικών επιστημόνων με εργαλεία γενικής χρήσης, και υψηλής φορητότητας (transferability). Σε επίπεδο αποτελεσμάτων, η συνολική ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να ανέλθει το 90% ενώ η τάση για δημιουργία ψευδών θετικών είναι συχνή όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται εσφαλμένα. Τέλος, η χρήση της *SVD* καταλήγει σε ένα μαθηματικό οριζόμενο πλέγμα το οποία είναι εύκολα καταναλώσιμο από τα μοντέλα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (*FEM*).

Περιορισμοί – Μελλοντική έρευνα

Ορισμένες βασικές δυσκολίες της συγκεκριμένης έρευνες προέρχονται από τα εγγενή χαρακτηριστικά ορισμένων επιστημονικών τομέων, όπως για παράδειγμα η τμηματοποίηση. Η επιστήμη αυτή αφορά σε ένα ευρέως διαδεδομένο πρόβλημα, με μεγάλη «υπερφόρτωση» (over-loading), τόσο στον χώρο της μηχανικής όρασης όσο και στον τομέα της ΤΝ (Kirillov et al., 2023). Παρομοίως, η μοντελοποίηση Πληροφοριών Ιστορικών Κτηρίων μπορεί να ιδωθεί ως ένα κλάσμα της τρισδιάστατης αντίστροφης μηχανικής και λόγω της μη παγιωμένης μεθοδολογικής προσέγγισης συχνά υλοποιείται χωρίς να κατονομάζεται ρητά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το έργο των (Poux et al.,

2017) όπου αναπτύσσεται ο όρος «smart point cloud» για εφαρμογές πολιτιστικής κληρονομίας, χωρίς καμία αναφορά σε μοντέλα *HBIM*, ο οποίος μετέπειτα και υιοθετείται από άλλους ερευνητές ως δυνητική εναλλακτική στην ανάπτυξη παραμετρικών μοντέλων (*parametric modelling*) για ΕΠΚ (Yang et al., 2021).

Μελλοντική έρευνα στον τομέα της κατάτμηση νέφους σημείων για Εφαρμογές Πολιτιστικής Κληρονομιάς θα μπορούσε να βασιστεί στην συνδυαστική εφαρμογή του μοντέλου SAM με έναν αλγόριθμο επανα-προβολής των μασκών ανίχνευση πίσω στην 3Δ γεωμετρία. Με αυτήν την τεχνική γίνεται πλέον εφικτή η ανάλυση ενός μνημείου, στις θεμελιώδεις δομικές μονάδες του, χωρίς να προϋπάρχει γνώση του πεδίου ή ανάγκη επανεκπαίδευσης του αλγορίθμου ΤΝ. Επιπροσθέτως, αξίζει να διερευνηθεί σε πιο βαθμό και με ποια ακρίβεια ο αλγόριθμος SAM ή κάποιος άλλος παρεμφερείς (ViT & Zero-shot) επιτυγχάνει την κατάτμηση του νέφους σημείων στα βασικά δομικά συστατικά ή κατά πόσο αυτές οι νέες τεχνικές δύναται να επιτύχουν αποτελέσματα κατάτμησης σε πραγματικό χρόνο (real time detection and segmentation).

Βιβλιογραφία

Abbate, E., & Invernizzi, S. (2022). *HBIM parametric modelling from clouds to perform structural analyses based on finite elements : a case study on a parabolic concrete vault*. *14*, 79–96.

Adán, A., Ramón, A., Vivancos, J. L., Vilar, A., & Aparicio-Fernández, C. (2023). Automatic generation of as-is BEM models of buildings. *Journal of Building Engineering*, *73*(April), 106865. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106865

Adegoriola, M. I., Lai, J. H. K., Chan, E. H., & Amos, D. (2021). Heritage building maintenance management (HBMM): A bibliometric-qualitative analysis of literature. *Journal of Building Engineering*, *42*(March), 102416. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102416

Alessandrini, M., Biagetti, G., Crippa, P., Falaschetti, L., Manoni, L., & Turchetti, C. (2021). Singular value decomposition in embedded systems based on arm cortex-m architecture. *Electronics (Switzerland)*, *10*(1), 1–29. https://doi.org/10.3390/electronics10010034

Alfio, V. S., Costantino, D., Pepe, M., & Garofalo, A. R. (2022). A Geomatics Approach in Scan to FEM Process Applied to Cultural Heritage Structure: The Case Study of the “Colossus of Barletta.” *Remote Sensing*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/rs14030664

Ali, D., Verstockt, S., & Van De Weghe, N. (2021). Single image façade segmentation and computational rephotography of house images using deep learning. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, *14*(4). https://doi.org/10.1145/3461014

Aliu, A. A., Ariff, N. R. M., Ametefe, D. S., & John, D. (2023). Automatic classification and isolation of cracks on masonry surfaces using deep transfer learning and semantic segmentation. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *8*(1), 1–14. https://doi.org/10.1007/s41024-023-00274-6

Allen, P. K., Troccoli, A., Smith, B., Murray, S., Stamos, I., & Leordeanu, M. (2003). New Methods for Digital Modeling of Historic Sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *23*(6), 32–41. https://doi.org/10.1109/MCG.2003.1242380

Alshawabkeh, Y., & Baik, A. (2023). Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site. *Heritage Science*, *11*(1), 1–17. https://doi.org/10.1186/s40494-023-00997-2

Angeloni, R., Mariotti, C., Petetta, L., & Coppetta, L. (2023). Enabling scan-To-bim workflow for heritage conservation and management process. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(M-2–2023), 79–86. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-79-2023

Angulo-Fornos, R., & Castellano-Román, M. (2020). HBIM as support of preventive conservation actions in heritage architecture. experience of the renaissance quadrant facade of the cathedral of seville. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/app10072428

Antón, D., Medjdoub, B., Shrahily, R., & Moyano, J. (2018). Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models. *International Journal of Architectural Heritage*, *12*(5), 790–805. https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1415391

Arias, P., Armesto, J., Di-Capua, D., González-Drigo, R., Lorenzo, H., & Pérez-Gracia, V. (2007). Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge. *Engineering Failure Analysis*, *14*(8 SPEC. ISS.), 1444–1457. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.02.001

Aricò, M., Lo Brutto, M., & Maltese, A. (2023). A Scan-to-BIM Approach for the Management of Two Arab-Norman Churches in Palermo (Italy). *Heritage*, *6*(2), 1622–1644. https://doi.org/10.3390/heritage6020087

Arnold, N., Angelov, P., Viney, T., & Atkinson, P. (2021). Automatic extraction and labelling of memorial objects from 3D point clouds. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, *4*(1), 79–93. https://doi.org/10.5334/JCAA.66

Artopoulos, G., Maslioukova, M. I., Zavou, C., Loizou, M., Deligiorgi, M., & Averkiou, M. (2023). An artificial neural network framework for classifying the style of cypriot hybrid examples of built heritage in 3D. *Journal of Cultural Heritage*, *63*, 135–147. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.07.016

Avena, M., Colucci, E., Sammartano, G., & Spanò, A. (2021). HBIM modelling for an historical urban centre. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B2-2021), 831–838. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-831-2021

Axaridou, A., Chrysakis, I., Georgis, C., Theodoridou, M., Doerr, M., Konstantaras, A., & Maravelakis, E. (2014). 3D-SYSTEK: Recording and exploiting the production workflow of 3D-models in Cultural Heritage. *IISA 2014 - 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, 51–56. https://doi.org/10.1109/IISA.2014.6878745

Babacan, K., Chen, L., & Sohn, G. (2017). SEMANTIC SEGMENTATION of INDOOR POINT CLOUDS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4*(4W4), 101–108. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-101-2017

Bacharidis, K., Sarri, F., & Ragia, L. (2020). 3D building façade reconstruction using deep learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(5), 1–24. https://doi.org/10.3390/ijgi9050322

Baik, A., Boehm, J., & Robson, S. (2013). JEDDAH HISTORICAL BUILDING INFORMATION MODELING "JHBIM" OLD JEDDAH – SAUDI

ARABIA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-5/W2*(September), 73–78. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w2-73-2013

Balado, J., Díaz-Vilariño, L., Azenha, M., & Lourenço, P. B. (2023). Automatic Detection of Surface Damage in Round Brick Chimneys by Finite Plane Modelling from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds. Case Study of Bragança Dukes' Palace, Guimarães, Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*, *17*(2), 389–403. https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1925779

Banfi, F., & Mandelli, A. (2021). Interactive virtual objects (ivos) for next generation of virtual museums: From static textured photogrammetric and hbim models to xr objects for vr-Ar enabled gaming experiences. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *46*(M-1–2021), 47–54. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVI-M-1-2021-47-2021

Banfi, Fabrizio. (2021). The evolution of interactivity, immersion and interoperability in HBIM: Digital model uses, VR and AR for built cultural heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/ijgi10100685

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., & Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *57*, 71–87. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004

Barrile, V., Bernardo, E., & Bilotta, G. (2022). An Experimental HBIM Processing: Innovative Tool for 3D Model Reconstruction of Morpho-Typological Phases for the Cultural Heritage. *Remote Sensing*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/rs14051288

Barrile, V., & Fotia, A. (2022a). A proposal of a 3D segmentation tool for HBIM management. *Applied Geomatics*, *14*, 197–209. https://doi.org/10.1007/s12518-021-00373-4

Barsanti, S. G., Guidi, G., & Luca, L. De. (2017). *SEGMENTATION OF 3D MODELS FOR CULTURAL HERITAGE STRUCTURAL ANALYSIS – SOME CRITICAL ISSUES*. *IV*(September), 115–122. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-115-2017

Battini, C., Ferretti, U., De Angelis, G., Pierdicca, R., Paolanti, M., & Quattrini, R. (2024). Automatic generation of synthetic heritage point clouds: Analysis and segmentation based on shape grammar for historical vaults. *Journal of Cultural Heritage*, *66*, 37–47. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.10.003

Betsas, T., & Georgopoulos, A. (2022). 3D Edge Detection and Comparison Using Four-Channel Images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(2/W2-2022), 9–15. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W2-2022-9-2022

Bienvenido-Huertas, D., Nieto-Julián, J. E., Moyano, J. J., Macías-Bernal, J. M., & Castro, J. (2020). Implementing Artificial Intelligence in H-BIM Using the J48 Algorithm to Manage Historic Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, *14*(8), 1148–1160. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1589602

Billi, D., Croce, V., Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Pasqualetti, A., Piemonte, A., & Russo, M. (2023). Machine Learning and Deep Learning for the Built Heritage Analysis: Laser Scanning and UAV-Based Surveying Applications on a Complex Spatial Grid Structure. *Remote Sensing*, *15*(8). https://doi.org/10.3390/rs15081961

Błaszczak-Bąk, W., Suchocki, C., Janicka, J., Dumalski, A., Duchnowski, R., & Sobieraj-Żłobińska, A. (2020). Automatic threat detection for historic buildings in dark places based on the modified OPTD method. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(2), 1–14. https://doi.org/10.3390/ijgi9020123

Boyko, N., & Rizhko, M. (2021). Application of Semantic Segmentation of Clouds of Points for Preservation of Cultural Heritage. *CEUR Workshop Proceedings*, *3101*, 245–252.

Braun, A., & Borrmann, A. (2019). Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. *Automation in Construction*, *106*(June), 102879. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102879

Braun, A., Tuttas, S., Borrmann, A., & Stilla, U. (2020). Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision. *Automation in Construction*, *116*(February), 103210. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103210

Buldo, M., Agustin-Hernandez, L., Verdoscia, C., & Tavolare, R. (2023). A SCAN-TO-BIM WORKFLOW PROPOSAL FOR CULTURAL HERITAGE. AUTOMATIC POINT CLOUD SEGMENTATION AND PARAMETRIC-ADAPTIVE MODELLING OF VAULTED SYSTEMS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(M-2–2023), 333–340. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-333-2023

Calvano, M., & Guadagnoli, F. (2016). 3D reconstruction of the city of Amatrice. An “instant modelling” operation. *Disegnarecon*, *9*(17), 7.1-7.9.

Calvano, M., Martinelli, L., Calcerano, F., & Gigliarelli, E. (2022). Parametric Processes for the Implementation of HBIM—Visual Programming Language for the Digitisation of the Index of Masonry Quality. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/ijgi11020093

Cao, Y., & Scaioni, M. (2021). 3DLEB-Net: Label-Efficient Deep Learning-Based Semantic Segmentation of Building Point Clouds at LoD3 Level. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B2-2021), 449–456. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-449-2021

Carminati, L. (2018). Generalizability in Qualitative Research: A Tale of Two Traditions. *Qualitative Health Research*, *28*(13), 2094–2101. https://doi.org/10.1177/1049732318788379

Carrera-Rivera, A., Ochoa, W., Larrinaga, F., & Lasa, G. (2022). How-to conduct a systematic literature review: A quick guide for computer science research. *MethodsX*, *9*, 101895. https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101895

Castellazzi, G., D'Altri, A. M., Bitelli, G., Selvaggi, I., & Lambertini, A. (2015). From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure. *Sensors (Switzerland)*, *15*(8), 18360–18380. https://doi.org/10.3390/s150818360

Cheng, J. C. P., Chen, W., Chen, K., & Wang, Q. (2020). Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Automation in Construction*, *112*(December 2019), 103087. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087

Colucci, E., Xing, X., Kokla, M., Mostafavi, M. A., Noardo, F., & Spanò, A. (2021). Ontology-based semantic conceptualisation of historical built heritage to generate parametric structured models from point clouds. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(6). https://doi.org/10.3390/app11062813

Costa, A. P., Cuperschmid, A. R. M., & Neves, L. O. (2024). HBIM and BEM association: Systematic literature review. *Journal of Cultural Heritage*, *66*, 551–561. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008

Costantino, D., Pepe, M., & Restuccia, A. G. (2021). Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: the case study of San Nicola in Montedoro church (Italy). *Applied Geomatics*, *2019*. https://doi.org/10.1007/s12518-021-00359-2

Costantino, Domenica, Vozza, G., Alfio, V. S., & Pepe, M. (2021). Strategies for 3d modelling of buildings from airborne laser scanner and photogrammetric data based on free-form and model-driven methods: The case study of the old town centre of bordeaux (France). *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(22). https://doi.org/10.3390/app112210993

Cotella, V. A. (2023a). From 3D point clouds to HBIM: Application of Artificial Intelligence in Cultural Heritage. *Automation in Construction*, *152*(June), 104936. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104936

Croce, V., Bevilacqua, M. G., Caroti, G., & Piemonte, A. (2021). Connecting geometry and semantics via artificial intelligence: From 3D classification of heritage data to H-BIM representations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B2-2021), 145–152. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-145-2021

Croce, Valeria, Adeline, M., Gabriella, C., De Luce Livio, Piemonte, A., & Philippe, Veron. (2023). Semi-automatic classification of digital heritage on the Aïoli open

source 2D/3D annotation platform via machine learning and deep learning. *Journal of Cultural Heritage*, 187–197.

Croce, Valeria, Caroti, G., Luca, L. De, Jacquot, K., Piemonte, A., & Véron, P. (2021). From the semantic point cloud to heritage-building information modeling: A semiautomatic approach exploiting machine learning. *Remote Sensing*, *13*(3), 1–34. https://doi.org/10.3390/rs13030461

Croce, Valeria, Caroti, G., Piemonte, A., & Bevilacqua, M. G. (2021). From survey to semantic representation for cultural heritage: The 3D modelling of recurring architectural elements. *Acta IMEKO*, *10*(1), 98–108. https://doi.org/10.21014/ACTA_IMEKO.V10I1.842

Croce, Valeria, Caroti, G., Piemonte, A., De Luca, L., & Véron, P. (2023). H-BIM and Artificial Intelligence Classification.pdf. *Sensors*.

D'Altri, A. M., Milani, G., de Miranda, S., Castellazzi, G., & Sarhosis, V. (2018). Stability analysis of leaning historic masonry structures. *Automation in Construction*, *92*(November 2017), 199–213. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.003

Dai, J. S. (2015). Euler-Rodrigues formula variations, quaternion conjugation and intrinsic connections. *Mechanism and Machine Theory*, *92*, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.03.004

Dais, D., Bal, İ. E., Smyrou, E., & Sarhosis, V. (2021). Automatic crack classification and segmentation on masonry surfaces using convolutional neural networks and transfer learning. *Automation in Construction*, *125*(February). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103606

Dhalmahapatra, K., Shingade, R., Mahajan, H., Verma, A., & Maiti, J. (2019). Decision support system for safety improvement: An approach using multiple correspondence analysis, t-SNE algorithm and K-means clustering. *Computers and Industrial Engineering*, *128*(June 2018), 277–289. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.044

Dong, Y., Li, Y., & Hou, M. (2022). The Point Cloud Semantic Segmentation Method for the Ming and Qing Dynasties' Official-Style Architecture Roof Considering the Construction Regulations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *11*(4). https://doi.org/10.3390/ijgi11040214

Dore, C., & Murphy, M. (2013). Semi-automatic techniques for as-built BIM façade modeling of historic buildings. *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions FromCAA, Arqueologica 2.0 et Al.*, *1*, 473–480. https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743786

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). an Image Is Worth 16X16 Words: Transformers for Image Recognition

At Scale. *ICLR 2021 - 9th International Conference on Learning Representations*.

Drago, C., Minnetti, F., Di Nallo, L., & Manzari, A. (2023). Uncovering Patterns of Fintech Behavior in Italian Banks: A Multidimensional Statistical Analysis. *SSRN Electronic Journal*, *73*(PA), 102598. https://doi.org/10.2139/ssrn.4419616

Escudero, P. A., López González, M. C., & García Valldecabres, J. L. (2024). Optimising Floor Plan Extraction: Applying DBSCAN and K-Means in Point Cloud Analysis of Valencia Cathedral. *Heritage*, *7*(10), 5787–5799. https://doi.org/10.3390/heritage7100272

Fernández-Mora, V., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review. *Journal of Building Engineering*, *53*(April). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104318

Fiorillo, F., Perfetti, L., & Cardani, G. (2022). Automated Mapping of the roof damage in historic buildings in seismic areas with UAV photogrammetry. *Procedia Structural Integrity*, *44*(2022), 1672–1679. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.214

Fitting a Circle to Cluster of 3D Points. (2016). https://meshlogic.github.io/posts/jupyter/curve-fitting/fitting-a-circle-to-cluster-of-3d-points/

Forster, A., Valero, E., Bosché, F., Hyslop, E., & Wilson, L. (2024). Digital Toolkit to Assist the Interpretation of Traditional Masonry Construction. *International Journal of Architectural Heritage*, *18*(5), 725–739. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2182729

Foteinis, S., & Synolakis, C. (2018). Numerical Modelling for Coastal Structures Design and Planning. A Case Study of the Venetian Harbour of Chania, Greece. *International Journal of Geoengineering Case Histories ©*, *4*(4), 232–241. https://doi.org/10.4417/IJGCH-04-04-01

Funari, M. F., Hajjat, A. E., Masciotta, M. G., Oliveira, D. V., & Lourenço, P. B. (2021). A parametric scan-to-FEM framework for the digital twin generation of historic masonry structures. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(19). https://doi.org/10.3390/su131911088

Galanakis, D., Lucho, S., Maravelakis, E., Bolanakis, N., Konstantaras, A., Vidakis, N., Petousis, M., Treuillet, S., Desquesnes, X., & Brunetaud, X. (2024). Segment Anything Model for Scan-to-Structural Analysis in Cultural Heritage. *2024 5th International Conference in Electronic Engineering, Information Technology & Education (EEITE)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/eeite61750.2024.10654401

Galanakis, D., Maravelakis, E., Idjaton, K., Phaedra, D., Konstantaras, A., & Bolanakis, N. (2022). *Stone by stone segmentation from the orthophoto to the 3D CAD model of a masonry façade*. *2015*, 2–7.

Galanakis, D., Maravelakis, E., Phaedra, D., Vidakis, N., Petousis, M., Konstantaras,

A., & Tsakoumaki, M. (2023). SVD-based point cloud 3D stone by stone segmentation for cultural heritage structural analysis – The case of the Apollo Temple at Delphi. *Journal of Cultural Heritage*, *61*, 177–187. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.04.005

Galanakis, D., Pocobelli, D., Konstantaras, A., Mania, K., & Maravelakis, E. (2023). Introduction to BIM for heritage. In *Computer-Aided Design: Advances in Research and Applications* (pp. 23–42). https://doi.org/https://doi.org/10.52305/IMIY7382

Galantucci, R. A., Musicco, A., Verdoscia, C., & Fatiguso, F. (2023). Machine Learning for the Semi-Automatic 3D Decay Segmentation and Mapping of Heritage Assets. *International Journal of Architectural Heritage*, *00*(00), 1–19. https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2287152

Garagnani, S., & Manferdini, A. M. (2013). Parametric Accuracy: Building Information Modeling Process Applied To the Cultural Heritage Preservation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-5/W1*(February), 87–92. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w1-87-2013

Gertwagen, R. (2000). The Concept of Ports in the Medieval Eastern Mediterranean: Construction and Maintenance on Crete to the End of the Fifteenth Century. *International Journal of Maritime History*, *12*(1), 177–241. https://doi.org/10.1177/084387140001200108

Gil, A., Arayici, Y., Kumar, B., & Laing, R. (2024). Machine and Deep Learning Implementations for Heritage Building Information Modelling: A Critical Review of Theoretical and Applied Research. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, *17*(3), 1–22. https://doi.org/10.1145/3649442

Gong, Y., Zhang, F., Jia, X., Huang, X., Li, D., & Mao, Z. (2021). Deep neural networks for quantitative damage evaluation of building losses using aerial oblique images: Case study on the great wall (china). *Remote Sensing*, *13*(7), 1–19. https://doi.org/10.3390/rs13071321

Greenacre, M. J. (1993). Biplots in correspondence analysis. *Journal of Applied Statistics*, *20*(2), 251–269. https://doi.org/10.1080/02664769300000021

Grilli, E., Dininno, D., Remondino, F., & Studiorum, A. M. (2020). *FROM 2D TO 3D SUPERVISED SEGMENTATION AND CLASSIFICATION FOR CULTURAL HERITAGE APPLICATIONS*. *XLII*(June 2018), 4–7.

Güneş, M. C., Mertan, A., Sahin, Y. H., Unal, G., & Özkar, M. (2024). Semi-automated minimization of brick-mortar segmentation errors in 3D historical wall reconstruction. *Automation in Construction*, *167*(November 2023). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105693

Gupta, A., & Hayes, J. P. (2000). CLIP: Integer-programming-based optimal layout synthesis of 2D CMOS cells. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, *5*(3), 510–547. https://doi.org/10.1145/348019.348234

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., … Oliphant, T. E. (2020). Array programming with {NumPy}. *Nature*, *585*(7825), 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

Haznedar, B., Bayraktar, R., Ozturk, A. E., & Arayici, Y. (2023). Implementing PointNet for point cloud segmentation in the heritage context. *Heritage Science*, *11*(1), 1–18. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00844-w

Heesom, D., Boden, P., Hatfield, A., Rooble, S., Andrews, K., & Berwari, H. (2021). Developing a collaborative HBIM to integrate tangible and intangible cultural heritage. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *39*(1), 72–95. https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2019-0036

Ibrahim, Y., Nagy, B., & Benedek, C. (2020). Deep learning-based masonry wall image analysis. *Remote Sensing*, *12*(23), 1–28. https://doi.org/10.3390/rs12233918

Idjaton, K., Desquesnes, X., Treuillet, S., & Brunetaud, X. (2021). Stone-by-Stone Segmentation for Monitoring Large Historical Monuments Using Deep Neural Networks. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *12667 LNCS*, 235–248. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68787-8_17

Idjaton, K., Janvier, R., Balawi, M., Desquesnes, X., Brunetaud, X., & Treuillet, S. (2023). Detection of limestone spalling in 3D survey images using deep learning. *Automation in Construction*, *152*(April), 104919. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104919

Intignano, M., Biancardo, S. A., Oreto, C., Viscione, N., Veropalumbo, R., Russo, F., Ausiello, G., & Dell'acqua, G. (2021). A scan-to-bim methodology applied to stone pavements in archaeological sites. *Heritage*, *4*(4), 3032–3049. https://doi.org/10.3390/heritage4040169

Isailović, D., Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., Hajdin, R., & Döllner, J. (2020). Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction*, *112*(May 2019), 103088. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088

Ji, S., Pan, J., Li, L., Hasegawa, K., Yamaguchi, H., Thufail, F. I., Brahmantara, Sarjiati, U., & Tanaka, S. (2023). Semantic Segmentation for Digital Archives of Borobudur Reliefs Based on Soft-Edge Enhanced Deep Learning. *Remote Sensing*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/rs15040956

Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S., & Heo, J. (2014). Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, *42*, 68–77. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.021

Kellner, M., Stahl, B., & Reiterer, A. (2022). Fused Projection-Based Point Cloud

Segmentation. *Sensors*, *22*(3), 1–18. https://doi.org/10.3390/s22031139

Khan, K., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). RESEARCH METHODOLOGY Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, *96*(3), 118–121.

Khodeir, L. M., Aly, D., & Tarek, S. (2016). Integrating HBIM (Heritage Building Information Modeling) Tools in the Application of Sustainable Retrofitting of Heritage Buildings in Egypt. *Procedia Environmental Sciences*, *34*, 258–270. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.024

Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2023). *Segment Anything*.

Kohlmann, B. (2019). Venizelos Graves chania - the lost eleftheria statue. In *Meet Crete*. https://www.meetcrete.com/venizelos-graves-chania/

Koo, B., Jung, R., & Yu, Y. (2021). Automatic classification of wall and door BIM element subtypes using 3D geometric deep neural networks. *Advanced Engineering Informatics*, *47*(November 2020), 101200. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101200

Kutlu, H., Brucker, F., Kallendrusch, B., Santos, P., & Fellner, D. . (2023). AI Based Image Segmentation of Cultural Heritage Objects used for Multi-View Stereo 3D Reconstructions. *GCH 2023 - Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 75–79. https://doi.org/10.2312/gch.20231160

Kyriakaki-Grammatikaki, S., Stathopoulou, E. K., Grilli, E., Remondino, F., & Georgopoulos, A. (2022). Geometric Primitive Extraction From Semantically Enriched Point Clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *46*(2/W1-2022), 291–298. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-291-2022

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, *25*(1), 1–18. https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

León-Robles, C. A., Reinoso-Gordo, J. F., & González-Quiñones, J. J. (2019). Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/ijgi8030121

Leonardi, M. L., Granja, J., Oliveira, D. V., & Azenha, M. (2024). Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates. *Computers and Structures*, *297*(February). https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107321

Li, W., Hsu, C.-Y., Wang, S., Yang, Y., Lee, H., Liljedahl, A., Witharana, C., Yang, Y., Rogers, B. M., Arundel, S. T., Jones, M. B., McHenry, K., & Solis, P. (2024). *Segment Anything Model Can Not Segment Anything: Assessing AI Foundation Model's Generalizability in Permafrost Mapping*. *Llm*, 1–17.

http://arxiv.org/abs/2401.08787

Li, Y., Wu, C. Y., Fan, H., Mangalam, K., Xiong, B., Malik, J., & Feichtenhofer, C. (2022). MViTv2: Improved Multiscale Vision Transformers for Classification and Detection. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, *2022-June*, 4794–4804. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00476

Liritzis, I., Guibert, P., Foti, F., & Schvoerer, M. (1997). The temple of Apollo (Delphi) strengthens novel thermoluminescence dating method. *Geoarchaeology - An International Journal*, *12*(5), 479–496. https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6548(199708)12:5<479::AID-GEA3>3.0.CO;2-X

Liu, Z., Brigham, R., Long, E. R., Wilson, L., Frost, A., Orr, S. A., & Grau-Bové, J. (2022). Semantic segmentation and photogrammetry of crowdsourced images to monitor historic facades. *Heritage Science*, *10*(1), 1–17. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00664-y

Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *2*(5W3), 177–183. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015

Lombardi, M., & Rizzi, D. (2024). Semantic modelling and HBIM: A new multidisciplinary workflow for archaeological heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *32*(February), e00322. https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00322

López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2017). A Framework for Using Point Cloud Data of Heritage Buildings Toward Geometry Modeling in A BIM Context: A Case Study on Santa Maria La Real De Mave Church. *International Journal of Architectural Heritage*, *11*(7), 965–986. https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325541

Lovell, L. J., Davies, R. J., & Hunt, D. V. L. (2023). The Application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to Cultural Heritage: A Review. *Heritage*, *6*(10), 6691–6717. https://doi.org/10.3390/heritage6100350

Loverdos, D., & Sarhosis, V. (2023). Image2DEM: A geometrical digital twin generator for the detailed structural analysis of existing masonry infrastructure stock. *SoftwareX*, *22*, 101323. https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101323

Ma, J. W., Czerniawski, T., & Leite, F. (2020). Semantic segmentation of point clouds of building interiors with deep learning: Augmenting training datasets with synthetic BIM-based point clouds. *Automation in Construction*, *113*(September 2019), 103144. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103144

Macwilliam, K., & Nunes, C. (2019). *Structural Analysis of Historical Constructions*. *18*(January), 1949–1958. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3

Magnenat-thalmann, N., Fink, E., Žarni, R., & Hutchison, D. (2014). *Progress in Cultural Heritage :* https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0

Maietti, F., Di Giulio, R., Piaia, E., Medici, M., & Ferrari, F. (2018). Enhancing Heritage fruition through 3D semantic modelling and digital tools: The INCEPTION project. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *364*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/364/1/012089

Malinverni, E. S., Pierdicca, R., Paolanti, M., Martini, M., Morbidoni, C., Matrone, F., & Lingua, A. (2019). DEEP LEARNING for SEMANTIC SEGMENTATION of 3D POINT CLOUD. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *42*(2/W15), 735–742. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-735-2019

Mania, K., Psalti, A., Lala, D. M., Tsakoumaki, M., Polychronakis, A., Rempoulaki, A., Xinogalos, M., & Maravelakis, E. (2021). Combining 3D Surveying with Archaeological Uncertainty: The Metopes of the Athenian Treasury at Delphi. *IISA 2021 - 12th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, 13–16. https://doi.org/10.1109/IISA52424.2021.9555568

Maravelakis, E., Konstantaras, A., Kabassi, K., Chrysakis, I., Georgis, C., & Axaridou, A. (2014). 3DSYSTEK web-based point cloud viewer. *IISA 2014 - 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, *July*, 262–266. https://doi.org/10.1109/IISA.2014.6878726

Maravelakis, E., Konstantaras, A., Kritsotaki, A., Angelakis, D., & Xinogalos, M. (2013). Analysing user needs for a unified 3D metadata recording and exploitation of cultural heritage monuments system. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *8034 LNCS*(PART 2), 138–147. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41939-3_14

Maravelakis, Emmanuel, Andrianakis, M., Psarakis, K., Bolanakis, N., Tzatzanis, G., Bilalis, N., Antoniadis, A., Ioannides, M., Addison, A. C., Georgopoulos, A., & Kalisperis, L. (2008). *LESSONS LEARNED FROM CULTURAL HERITAGE DIGITISATION PROJECTS IN CRETE*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113256143

Maravelakis, Emmanuel, Giannioti, G., Psalti, A., Tsakoumaki, M., Pocobelli, D. P., Xinogalos, M., Galanakis, D., & Bilalis, N. (2023). *3D Modeling & Analysis Techniques for the Apollo Temple in Delphi*.

Martinelli, L., Calcerano, F., & Gigliarelli, E. (2022). Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built heritage. *Journal of Cultural Heritage*, *55*, 277–289. https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.016

Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L., & Agüera-Vega, F. (2020). Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). *Building Research and Information*, *48*(2), 140–159. https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1626213

Massafra, A., Prati, D., Predari, G., & Gulli, R. (2020). Wooden truss analysis,

preservation strategies, and digital documentation through parametric 3D modeling and HBIM workflow. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(12). https://doi.org/10.3390/su12124975

Matrone, F., Lingua, A., Pierdicca, R., Malinverni, E. S., Paolanti, M., Grilli, E., Remondino, F., Murtiyoso, A., & Landes, T. (2020). A BENCHMARK for LARGE-SCALE HERITAGE POINT CLOUD SEMANTIC SEGMENTATION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B2), 1419–1426. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1419-2020

Matrone, Francesca, Grilli, E., Martini, M., Paolanti, M., Pierdicca, R., & Remondino, F. (2020). Comparing machine and deep learning methods for large 3D heritage semantic segmentation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(9). https://doi.org/10.3390/ijgi9090535

Matrone, Francesca, & Martini, M. (2021). Transfer Learning and Performance Enhancement Techniques for Deep Semantic Segmentation of Built Heritage Point Clouds. *Virtual Archaeology Review*, *12*(25), 73–84. https://doi.org/10.4995/var.2021.15318

McArthur, J. J., Shahbazi, N., Fok, R., Raghubar, C., Bortoluzzi, B., & An, A. (2018). Machine learning and BIM visualization for maintenance issue classification and enhanced data collection. *Advanced Engineering Informatics*, *38*(June), 101–112. https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.06.007

Minh Dang, L., Wang, H., Li, Y., Nguyen, L. Q., Nguyen, T. N., Song, H. K., & Moon, H. (2022). Deep learning-based masonry crack segmentation and real-life crack length measurement. *Construction and Building Materials*, *359*(October), 129438. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129438

Miyamoto, S., Abe, R., Endo, Y., & Takeshita, J. I. (2016). Ward method of hierarchical clustering for non-Euclidean similarity measures. *Proceedings of the 2015 7th International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, SoCPaR 2015*, 60–63. https://doi.org/10.1109/SOCPAR.2015.7492784

Moisidi, M., Vallianatos, F., Makris, J., Soupios, P., & Nikolintaga, M. I. (2004). ESTIMATION OF SEISMIC RESPONSE OF HISTORICAL AND MONUMENTAL SITES USING MICROTREMORS: A CASE STUDY IN THE ANCIENT APTERA, CHANIA, (GREECE). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, *36*(3), 1441–1450. https://doi.org/10.12681/bgsg.16533

Morbidoni, C., Pierdicca, R., Quattrini, R., & Frontoni, E. (2020). GRAPH CNN with RADIUS DISTANCE for SEMANTIC SEGMENTATION of HISTORICAL BUILDINGS TLS POINT CLOUDS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *44*(4/W1), 95–102. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W1-2020-95-2020

Morbidoni, Christian, Pierdicca, R., Paolanti, M., Quattrini, R., & Mammoli, R. (2020). Learning from synthetic point cloud data for historical buildings semantic

segmentation. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, *13*(4). https://doi.org/10.1145/3409262

Motsa, S. M., Drosopoulos, G. A., Stavroulaki, M. E., Maravelakis, E., Borg, R. P., Galea, P., d'Amico, S., & Stavroulakis, G. E. (2020). Structural investigation of Mnajdra megalithic monument in Malta. *Journal of Cultural Heritage*, *41*, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.004

Moyano, J., Cabrera-Revuelta, E., Nieto-Julián, J. E., Fernández-Alconchel, M., & Fernández-Valderrama, P. (2023). Evaluation of Geometric Data Registration of Small Objects from Non-Invasive Techniques: Applicability to the HBIM Field. *Sensors*, *23*(3). https://doi.org/10.3390/s23031730

Moyano, J., Carreño, E., Nieto-Julián, J. E., Gil-Arizón, I., & Bruno, S. (2022). Systematic approach to generate Historical Building Information Modelling (HBIM) in architectural restoration project. *Automation in Construction*, *143*(March). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104551

Moyano, J., León, J., Nieto-Julián, J. E., & Bruno, S. (2021). Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: Point cloud segmentation for HBIM parameterisation. *Automation in Construction*, *130*(August). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103856

Murphy, M., Mcgovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, *27*(4), 311–327. https://doi.org/10.1108/02630800910985108

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *76*, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006

Murtagh, F., & Legendre, P. (2011). *Ward's Hierarchical Clustering Method: Clustering Criterion and Agglomerative Algorithm*. *June 2011*, 1–20. https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z

Musicco, A., Buldo, M., Rossi, N., Tavolare, R., & Verdoscia, C. (2024). Enhancing 3D Modeling Efficiency Via Semi-Automatic Point Cloud Segmentation and Multi-Lod Mesh Reconstruction. *Scires-It*, *14*(1), 233–250. https://doi.org/10.2423/i22394303v14n1p233

Musicco, A., Galantucci, R. A., Bruno, S., Verdoscia, C., & Fatiguso, F. (2021). AUTOMATIC POINT CLOUD SEGMENTATION for the DETECTION of ALTERATIONS on HISTORICAL BUILDINGS through AN UNSUPERVISED and CLUSTERING-BASED MACHINE LEARNING APPROACH. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *5*(2), 129–136. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2021-129-2021

Naeem, M., Ozuem, W., Howell, K., & Ranfagni, S. (2023). A Step-by-Step Process of Thematic Analysis to Develop a Conceptual Model in Qualitative Research. *International Journal of Qualitative Methods*, *22*(October), 1–18.

https://doi.org/10.1177/16094069231205789

Nakazawa, M. (2010). *fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data. R package version 0.7.6*. https://cran.r-project.org/web/packages/fmsb

Nguyen, T. A., Do, S. T., Le-Hoai, L., Nguyen, V. T., & Pham, T. A. (2023). Practical workflow for cultural heritage digitalization and management: a case study in Vietnam. *International Journal of Construction Management*, *23*(13), 2305–2319. https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2054268

Nieto-Julián, Juan E., Lara, L., & Moyano, J. (2021). Implementation of a teamwork-hbim for the management and sustainability of architectural heritage. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–26. https://doi.org/10.3390/su13042161

Nieto-Julián, Juan Enrique, Antón, D., & Moyano, J. J. (2020). Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models. *International Journal of Architectural Heritage*, *14*(9), 1384–1397. https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1610523

Nieto-Julián, Juan Enrique, Farratell, J., Bouzas Cavada, M., & Moyano, J. (2022). Collaborative Workflow in an HBIM Project for the Restoration and Conservation of Cultural Heritage. *International Journal of Architectural Heritage*, *00*(00), 1–20. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2073294

Özkan, T., Pfeifer, N., Styhler-Aydın, G., Hochreiner, G., Herbig, U., & Döring-Williams, M. (2022). Historic Timber Roof Structure Reconstruction through Automated Analysis of Point Clouds. *Journal of Imaging*, *8*(1). https://doi.org/10.3390/JIMAGING8010010

Pantoja-Rosero, B. G., Achanta, R., & Beyer, K. (2023). Automated image-based generation of finite element models for masonry buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01726-7

Papadopoulos, K., Vintzileou, E., & Psycharis, I. N. (2019). Finite element analysis of the seismic response of ancient columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *48*(13), 1432–1450. https://doi.org/10.1002/eqe.3207

Paris, L., Rossi, M. L., & Cipriani, G. (2022). Modeling as a Critical Process of Knowledge: Survey of Buildings in a State of Ruin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/ijgi11030172

Patrucco, G., & Setragno, F. (2021). Multiclass Semantic Segmentation for Digitisation of Movable Heritage Using Deep Learning Techniques. *Virtual Archaeology Review*, *12*(25), 85–98. https://doi.org/10.4995/var.2021.15329

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825–2830.

Pellis, E., Masiero, A., Tucci, G., Betti, M., & Grussenmeyer, P. (2021). Assembling an image and point cloud dataset for heritage building semantic segmentation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *46*(M-1–2021), 539–546. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-539-2021

Pellis, E., Murtiyoso, A., Masiero, A., Tucci, G., Betti, M., & Grussenmeyer, P. (2022). 2D To 3D Label Propagation for the Semantic Segmentation of Heritage Building Point Clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B2-2022), 861–

Penjor, T., Banihashemi, S., Hajirasouli, A., & Golzad, H. (2024). Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *35*(July), e00366. https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366

Pepe, M., Alfio, V. S., Costantino, D., & Scaringi, D. (2022). Data for 3D reconstruction and point cloud classification using machine learning in cultural heritage environment. *Data in Brief*, *42*, 108250. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108250

Pierdicca, R., Paolanti, M., Matrone, F., Martini, M., Morbidoni, C., Malinverni, E. S., Frontoni, E., & Lingua, A. M. (2020). Point cloud semantic segmentation using a deep learning framework for cultural heritage. *Remote Sensing*, *12*(6), 1–23. https://doi.org/10.3390/rs12061005

Pirchio, D., Walsh, K. Q., Kerr, E., Giongo, I., Giaretton, M., Weldon, B. D., Ciocci, L., & Sorrentino, L. (2021). Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. *Engineering Structures*, *241*(April), 112439. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112439

Pocobelli, D. P., Boehm, J., Bryan, P., Still, J., & Grau-Bové, J. (2018). BIM for heritage science: a review. *Heritage Science*, *6*(1), 23–26. https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4

Pocobelli, D. P., Melinis, A., Crabb, N., & Grau-Bové, J. (2022). Using Building Information Modelling to map the composition of glass panes in a historic house. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *26*(August). https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00232

Ponciano, J. J., Prudhomme, C., & Boochs, F. (2021). From acquisition to presentation—the potential of semantics to support the safeguard of cultural heritage. *Remote Sensing*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/rs13112226

Posit team. (2024). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. http://www.posit.co/

Pour Rahimian, F., Seyedzadeh, S., Oliver, S., Rodriguez, S., & Dawood, N. (2020). On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid

application of BIM and machine learning. *Automation in Construction*, *110*(November 2019), 103012. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103012

Poux, F., Neuville, R., & Billen, R. (2017). POINT CLOUD CLASSIFICATION of TESSERAE from TERRESTRIAL LASER DATA COMBINED with DENSE IMAGE MATCHING for ARCHAEOLOGICAL INFORMATION EXTRACTION. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4*(2W2), 203–211. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-203-2017

Poux, Florent, Neuville, R., Van Wersch, L., Nys, G. A., & Billen, R. (2017). 3D point clouds in archaeology: Advances in acquisition, processing and knowledge integration applied to quasi-planar objects. *Geosciences (Switzerland)*, *7*(4). https://doi.org/10.3390/geosciences7040096

Prado, L., Wu, Q., Lopes, E., Lemos, D., Nunes, W., Paula, A., Ramos, M., Li, J., & Marcato, J. (2023). The Segment Anything Model (SAM) for remote sensing applications : From zero to one shot. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *124*(July), 103540. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103540

R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. https://www.r-project.org/

Réby, K., Guilhelm, A., & De Luca, L. (2023). Semantic Segmentation using Foundation Models for Cultural Heritage: an Experimental Study on Notre-Dame de Paris. *Proceedings - 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops, ICCVW 2023*, 1681–1689. https://doi.org/10.1109/ICCVW60793.2023.00184

Robador González, M. D., Nieto-Julián, J. E., Millán-Millán, P. M., Galera-Rodríguez, A., Bruno, S., Debenedictis, D., & Moyano, J. (2023). Management properties and procedures in the information model of the historic building hbim on building facades. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *48*(M-2–2023), 1323–1330. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-M-2-2023-1323-2023

Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., & Ferreira, V. (2020). A scan-to-bim methodology applied to heritage buildings. *Heritage*, *3*(1), 47–65. https://doi.org/10.3390/heritage3010004

Romero-Jarén, R., & Arranz, J. J. (2021). Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds. *Automation in Construction*, *124*(December 2020). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103576

Sammartano, G., Avena, M., Fillia, E., & Spanò, A. (2023). Integrated HBIM-GIS Models for Multi-Scale Seismic Vulnerability Assessment of Historical Buildings. *Remote Sensing*, *15*(3). https://doi.org/10.3390/rs15030833

Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. *9th Python in Science Conference*.

Sifniotis, M., Jackson, B., Mania, K., Vlassis, N., Watten, P. L., & White, M. (2010). 3D visualization of archaeological uncertainty. *Proceedings - APGV 2010: Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, 162. https://doi.org/10.1145/1836248.1836284

Sifniotis, Maria, Watten, P., Mania, K., & White, M. (2007). Influencing Factors on the Visualisation of Archaeological Uncertainty. *VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, 79–85.

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *104*(August), 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Söderkvist, I. (2009). Using SVD for some fitting problems. *PhD Lectures*, *2*, 2–5.

Soilán, M., Justo, A., Sánchez-Rodríguez, A., & Riveiro, B. (2020). 3D point cloud to BIM: Semi-automated framework to define IFC alignment entities from MLS-acquired LiDAR data of highway roads. *Remote Sensing*, *12*(14). https://doi.org/10.3390/rs12142301

Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, *101*(June 2018), 127–139. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020

Tapkin, S., Tercan, E., Motsa, S., Drosopoulos, G., Stavroulaki, M., Maravelakis, E., & Stavroulakis, G. (2022). Structural Investigation of Masonry Arch Bridges Using Various Nonlinear Finite-Element Models. *Journal of Bridge Engineering*, *27*. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001870

Templin, T., & Popielarczyk, D. (2020). The use of low-cost unmanned aerial vehicles in the process of building models for cultural tourism, 3D web and augmented/mixed reality applications. *Sensors (Switzerland)*, *20*(19), 1–26. https://doi.org/10.3390/s20195457

Teruggi, S., Grilli, E., Fassi, F., & Remondino, F. (2021). 3D SURVEYING, SEMANTIC ENRICHMENT and VIRTUAL ACCESS of LARGE CULTURAL HERITAGE. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *8*(M-1–2021), 155–162. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VIII-M-1-2021-155-2021

Teruggi, Simone, Grilli, E., Russo, M., Fassi, F., & Remondino, F. (2020). A hierarchical machine learning approach for multi-level and multi-resolution 3d point cloud classification. *Remote Sensing*, *12*(16). https://doi.org/10.3390/RS12162598

Tkáč, M., Mesároš, P., & Mandičák, T. (2018). Terrestrial laser scanning - Effective technology for creating building information models. *Pollack Periodica*, *13*(3), 61–72. https://doi.org/10.1556/606.2018.13.3.7

Ursini, A., Grazzini, A., Matrone, F., & Zerbinatti, M. (2022). From scan-to-BIM to a

structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation. *Automation in Construction*, *142*(August), 104518. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518

Vaismoradi, M., Turunen, H., & Bondas, T. (2013). Content analysis and thematic analysis: Implications for conducting a qualitative descriptive study. *Nursing and Health Sciences*, *15*(3), 398–405. https://doi.org/10.1111/nhs.12048

Valero, E., Forster, A., Bosché, F., Renier, C., Hyslop, E., & Wilson, L. (2018). High level-of-detail BIM and machine learning for automated masonry wall defect surveying. *ISARC 2018 - 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things*. https://doi.org/10.22260/isarc2018/0101

Valero, Enrique, Bosché, F., & Forster, A. (2018). Automatic segmentation of 3D point clouds of rubble masonry walls, and its application to building surveying, repair and maintenance. *Automation in Construction*, *96*(May), 29–39. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.018

Valero, Enrique, Bosché, F., Forster, A., Wilson, L., & Leslie, A. (2018). Evaluation of historic masonry substrates: towards greater objectivity and efficiency. *Heritage Building Information Modelling*, *June*, 75–101. https://doi.org/10.4324/9781315628011-8

Valero, Enrique, Forster, A., Bosché, F., Hyslop, E., Wilson, L., & Turmel, A. (2019). Automated defect detection and classification in ashlar masonry walls using machine learning. *Automation in Construction*, *106*(December 2018), 102846. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102846

Van Dam, A., Dekker, M., Morales-Castilla, I., Rodríguez, M., Wichmann, D., & Baudena, M. (2021). Correspondence analysis, spectral clustering and graph embedding: applications to ecology and economic complexity. *Scientific Reports*, *11*(1), 8926. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87971-9

Vieira, M. M., Gonçalves, J. E., Dárcio, D. M., Mesquita, E. F. T., & Lima, J. M. (2024). Semi-automatic scan-to-BIM procedure applied to architectural ornaments of Nossa Senhora do Rosário Church, Aracati-CE. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.1007/s41024-024-00436-0

Vinodkumar, P. K., Karabulut, D., Avots, E., Ozcinar, C., & Anbarjafari, G. (2023). A Survey on Deep Learning Based Segmentation, Detection and Classification for 3D Point Clouds. *Entropy*, *25*(4), 1–35. https://doi.org/10.3390/e25040635

Volanis, G., Galanakis, D., Bolanakis, N., Maravelakis, E., Borg, R. P., & Stavroulakis, G. E. (2024). Modelling and Stability Assessment of the Rock Cliffs and Xrobb l-Ġħaġin Neolithic Structure in Malta. *Heritage*, *7*(6), 2944–2958. https://doi.org/10.3390/heritage7060138

Wysocki, O., Hoegner, L., & Stilla, U. (2022). Tum-Façade: Reviewing and Enriching Point Cloud Benchmarks for Façade Segmentation. *International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, *46*(2/W1-2022), 529–536. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-529-2022

Xing, X. F., Mostafavi, M. A., Edwards, G., & Sabo, N. (2019). An improved automatic pointwise semantic segmentation of a 3D urban scene from mobile terrestrial and airborne LiDAr point clouds: A machine learning approach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4*(4/W8), 139–146. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W8-139-2019

Xu, C., Yang, S., Galanti, T., Wu, B., Yue, X., Zhai, B., Zhan, W., Vajda, P., Keutzer, K., & Tomizuka, M. (2021). *Image2Point: 3D Point-Cloud Understanding with 2D Image Pretrained Models*. 1–29. http://arxiv.org/abs/2106.04180

Yang, S., Hou, M., & Li, S. (2023). Three-Dimensional Point Cloud Semantic Segmentation for Cultural Heritage: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, *15*(3), 1–25. https://doi.org/10.3390/rs15030548

Yang, S., Hou, M., Shaker, A., & Li, S. (2021). Modeling and processing of smart point clouds of cultural relics with complex geometries. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/ijgi10090617

Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., & Landes, T. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, *46*, 350–360. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008

Zhao, J., Hua, X., Yang, J., Yin, L., Liu, Z., & Wang, X. (2023). a Review of Point Cloud Segmentation of Architectural Cultural Heritage. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *X-1/W1-202*(September), 247–254. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-1-w1-2023-247-2023

Zhao, Jianghong, Yu, H., Hua, X., Wang, X., Yang, J., Zhao, J., & Xu, A. (2024). Semantic segmentation of point clouds of ancient buildings based on weak supervision. *Heritage Science*, *12*(1), 1–13. https://doi.org/10.1186/s40494-024-01353-8

Zhou, Q.-Y., Park, J., & Koltun, V. (2018). *Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing*. http://arxiv.org/abs/1801.09847

Μπιλάλης, Ν., & Μαραβελάκης, Ε. (2020). *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ* (3η). Κριτική ΑΕ. www.kritiki.gr