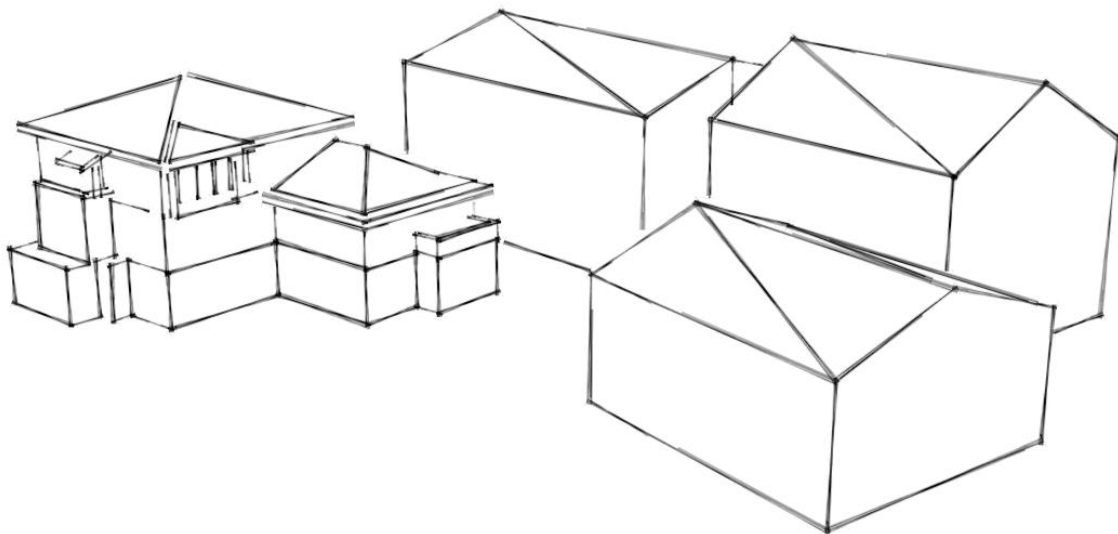


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ



ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ CityGML

Μεταπτυχιακή Εργασία



Χατζηνικολάου Έφη
Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ



ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ CityGML

Μεταπτυχιακή Εργασία

Εξεταστική Επιτροπή

| | | |
|----------------|-------------------|--------------------|
| Δημοπούλου Έφη | Καρέλλας Σωτήριος | Παπαδοπούλου Μαρία |
| | | |

Χατζηνικολάου Έφη
Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Copyright © Ευσταθία Χατζηνικολάου, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία με τίτλο «Δυνατότητα ενσωμάτωσης ενεργειακών δυναμικών δεδομένων στο CityGML» εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών στο ΔΠΜΣ “Γεωπληροφορική” της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη της κ. Δημοπούλου Ε., Καθηγήτριας Ε.Μ.Π.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει τις δυνατότητες ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων στα στατικά χαρακτηριστικά των τρισδιάστατων κτηριακών μοντέλων πόλης και ως εκ τούτου να υλοποιηθεί μια σημασιολογική επέκταση της πληροφορίας σύμφωνα με το ανοικτό πρότυπο CityGML. Μελέτη περίπτωσης της παρούσας διπλωματικής αποτελεί ο δυναμικός χαρακτήρας των ενεργειακών μοντέλων πόλης, τα οποία μπορούν να αναλυθούν μέσα από μοντέλα προσομοίωσης για την ανάκτηση δεδομένων χρονοσειράς. Εφαρμογή του πεδίου μελέτης της παρούσας εργασίας αποτέλεσε το κτήριο ξενώνων του κτηριακού συγκροτήματος του Μετσόβιου Κέντρου Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Κ.Δ.Ε.) του ΕΜΠ στο Μέτσοβο.

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην εκπόνησή της. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τόσο την επιβλέπουσα της εργασίας, Καθ. κ. Δημοπούλου Έφη για την πολύτιμη βοήθεια, υποστήριξη και καθοδήγησή της, όσο και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Καθ. κ. Καρέλλα Σ. και Καθ. κ. Παπαδοπούλου Μ. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πισπιδίκη Γ. για την βοήθεια και την τεχνική υποστήριξη ανάπτυξης της εφαρμογής και τον Μπαλάσκα Τ. για τη διάθεση πραγματικών δεδομένων μετρήσεων του ΜΕ.Κ.ΔΕ.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους και συνεργάτες, που με την υποστήριξη και αγάπη τους, με κάνουν να πραγματοποιώ στόχους και όνειρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|------------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | I |
| ABSTRACT | II |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1-1 |
| 1.1. Ερευνητικά ερωτήματα | 1-2 |
| 1.2. Στόχοι | 1-3 |
| 1.3. Περιγραφή Ενοτητών | 1-3 |
| 2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ | 2-1 |
| 2.1. Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα | 2-1 |
| 2.1.1. Ενεργειακό Ζήτημα..... | 2-2 |
| 2.1.2. Παραγωγή και αποθέματα καυσίμων στην Ευρώπη..... | 2-3 |
| 2.1.3. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα | 2-5 |
| 2.1.4. Κλιματική αλλαγή | 2-6 |
| 2.1.5. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας | 2-7 |
| 2.1.6. Ευρωπαϊκή και Εθνική Ενεργειακή Πολιτική..... | 2-7 |
| 2.2. Ενεργειακό Ισοζυγιο Κτηριακού τομέα..... | 2-10 |
| 2.2.1. Ενεργειακές Πρακτικές Εξοικονόμησης | 2-13 |
| 2.3. Πολιτική Έξυπνης Διαχείρισης | 2-14 |
| 3. INTERNET OF THING & ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ | 3-1 |
| 3.1. Έξυπνες Πόλεις | 3-1 |
| 3.2. Σηματολογικό Μοντέλο Πόλης & Έξυπνες πόλεις | 3-2 |
| 3.3. Εφαρμογές Ενσωμάτωσης Δυναμικών Δεδομένων στο CityGML..... | 3-5 |
| 3.3.1. Energy Atlas Berlin | 3-5 |
| 3.3.2. Υποδομή Δεδομένων για έξυπνες περιφέρειες (SDDI)..... | 3-7 |
| 3.3.3. OGC Future City Pilot Phase 1 (FCP1) | 3-12 |
| 4. ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ BIM – BES – CITYGML | 4-1 |
| 4.1. Μοντέλο Κτηριακής Πληροφορίας (BIM) | 4-1 |
| 4.2. Μοντέλο Κτηριακής Ενεργειακής Προσομοίωσης (BES) | 4-4 |
| 4.2.1. Εργαλεία μοντελοποίησης για BES | 4-5 |
| 4.2.2. Εργαλεία ανάλυσης BES | 4-6 |
| 4.2.3. Δημιουργία σηματολογικού μοντέλου gbXML..... | 4-10 |
| 4.3. Σηματολογικό Μοντέλο Πόλης CityGML | 4-20 |
| 4.3.1. Επίπεδα λεπτομέρειας (LoD) | 4-23 |
| 4.3.2. Γεωμετρικό και Τοπολογικό Μοντέλο..... | 4-25 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.3.3. | 3DCityDB και ADE plugin manager..... | 4-25 |
| 4.4. | Διαλειτουργικό Πλαίσιο Μοντέλων | 4-27 |
| 4.4.1. | BIM (IFC) – GBXML | 4-27 |
| 4.4.2. | IFC – CITYGML | 4-29 |
| 4.4.3. | GBXML – CITYGML | 4-31 |
| 5. | ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΤΗΡΙΩΝ CITYGML ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | 5-1 |
| 5.1. | Dynamizer ADE..... | 5-1 |
| 5.1.1. | Χαρακτηριστικά πρότυπα ενσωμάτωσης Dynamizer | 5-3 |
| 5.2. | Εννοιολογικό Μοντέλο Dynamizer ADE..... | 5-5 |
| 5.2.1. | Feature Dynamizer | 5-7 |
| 5.2.2. | Atomic Timeseries..... | 5-8 |
| 5.2.3. | Composite Timeseries | 5-10 |
| 5.2.4. | Sensor & Observations | 5-11 |
| 5.3. | Επέκταση του 3DCityDB με Dynamizer ADE..... | 5-12 |
| 5.3.1. | Dynamizer Core Module | 5-14 |
| 5.3.2. | Timeseries Metadata Module..... | 5-15 |
| 5.3.3. | Timeseries Module | 5-16 |
| 5.4. | Σενάρια Υλοποίησης Dynamizer ADE..... | 5-17 |
| 5.4.1. | Εισαγωγή/Εξαγωγή Dynamizer ADE μέσω 3DCityDB..... | 5-18 |
| 5.5. | Υπηρεσίες Ανάκτησης Δυναμικών Δεδομένων | 5-20 |
| 5.5.1. | Mini Sensor Observation Service (Mini SOS)..... | 5-21 |
| 5.5.2. | Intersensor service | 5-23 |
| 6. | ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ..... | 6-1 |
| 6.1. | Πεδίο Εφαρμογής – Δεδομένα Αξιοποίησης | 6-1 |
| 6.2. | Εργαλεία και Λογισμικά | 6-2 |
| 6.3. | Μεθοδολογικό Πλαίσιο | 6-2 |
| 6.4. | Ενσωμάτωση Ενεργειακών Δεδομένων χρονοσειρών στο CityGML..... | 6-6 |
| 6.4.1. | Γεωμετρικό Μοντέλο | 6-6 |
| 6.4.2. | Ενεργειακό Μοντέλο | 6-7 |
| 6.4.3. | Ενεργειακά δεδομένα χρονοσειρών | 6-14 |
| 6.4.4. | Χρήση Σημασιολογικού Μοντέλου CityGML..... | 6-15 |
| 6.4.5. | Υλοποίηση και επέκταση 3DCityDB – Dynamizer ADE | 6-22 |
| 6.4.6. | Ανάκτηση και οπτικοποίηση | 6-27 |
| 7. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 7-1 |
| 7.1. | Γενικά συμπεράσματα | 7-1 |
| 7.2. | Αξιολόγηση Εφαρμογής | 7-2 |
| 7.3. | Προτάσεις Εξέλιξης..... | 7-5 |
| 8. | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 8-2 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|------|
| Πίνακας 2.3-1: Πυλώνες μιας ευφυούς πόλης..... | 2-15 |
| Πίνακας 4.2-1: Στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου gbXML στο Revit..... | 4-13 |
| Πίνακας 4.3-1: Διαδοχικά επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs) | 4-23 |
| Πίνακας 5.5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας των διαφορετικών είδη δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη αποθήκευση, διαχείριση και ανάκτηση χρονοσειρών (Chaturverdi, Kolbe, 2019) | 5-20 |
| Πίνακας 6.4-1: Εξαγωγή ομάδων κατηγοριών σύμφωνα με τις κλάσεις που θέτει το πρότυπο CityGML | 6-16 |
| Πίνακας 6.4-2: Οριακές και σημασιολογικές συνθήκες στο CityEditor για κάθε κλάση του σημασιολογικού μοντέλου CityGML..... | 6-19 |
| Πίνακας 6.4-3: Σημασιολογικές ιδιότητες ορισμού στο CityEditor για κάθε επιφάνεια των κλάσεων του σημασιολογικού μοντέλου CityGML (GML Attributes)..... | 6-20 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|------|
| Σχήμα 2.1-1: Πηγές Πρωτογενούς ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο | 2-4 |
| Σχήμα 2.1-2: Τάσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμων CO ₂). Εκπομπές, προβλέψεις και στόχοι της ΕΕ (Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος) | 2-6 |
| Σχήμα 2.2-1: Ποσοστιαία κατανομή τελικής ενέργειας (αριστερά) και της ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης (δεξιά) ανά χρήση, έτος 2016 | 2-11 |
| Σχήμα 2.2-2: Κατάσταση κτηριακού τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση | 2-11 |
| Σχήμα 2.2-3: Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά νοικοκυριό (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2011).. | 2-12 |
| Σχήμα 2.2-4: Μέση κατανάλωση κτηρίου ανά χρήση και κλιματική ζώνη (Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)) | 2-13 |
| Σχήμα 2.3-1: Εφαρμογές έξυπνων συστημάτων στις πόλεις (VISION,2050) | 2-15 |
| Σχήμα 3.2-1: Αναπαράσταση αποτελεσμάτων υψηλής και χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας για τους μήνες Ιανουάριο (αριστερά) και Ιούλιο (δεξιά)..... | 3-3 |
| Σχήμα 3.2-2: Χρησιμότητα ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων προσομοιώσεις σε μοντέλα 3D CityGML για διάφορες εφαρμογές. | 3-3 |
| Σχήμα 3.2-3: Χρονική αλλαγή στην υφή του κτηρίου | 3-4 |
| Σχήμα 3.2-4: CityGML Προσομοίωση πλημμύρας σε 3D μοντέλο πόλης..... | 3-4 |
| Σχήμα 3.3-1: Περιβάλλον Εφαρμογής του Ενεργειακού Άτλαντα | 3-5 |
| Σχήμα 3.3-2: Καταγραφή μετρήσεων της ενεργειακής κατανάλωσης στο Ενεργειακό Άτλαντα με στατικό τρόπο (generic attributes) | 3-6 |

| | |
|--|------|
| Σχήμα 3.3-3: Περιβάλλον ανάκτησης δυναμικών τιμών χρονοσειρών από αισθητήρα ⁴ | 3-7 |
| Σχήμα 3.3-4: Η ιδέα του Smart District Data Infrastructure (SDDI) (Moshrefzadeh, M. et al., 2017)..... | 3-8 |
| Σχήμα 4.1-1: Εφαρμογές διαδικασίας BIM στο κατασκευαστικό τομέα | 4-2 |
| Σχήμα 4.1-2: Επίπεδα Ανάπτυξης (Levels of Development (LOD ^t)) των μοντέλων BIM κατά το IFC (TrueCADD) | 4-3 |
| Σχήμα 4.1-3: EXPRESS-G διάγραμμα της δομής του IFC (Dimyadi et al., 2014) | 4-4 |
| Σχήμα 4.2-1: Ροή εργασίας μετάφρασης γεωμετρίας κτηρίου σε gbXML..... | 4-5 |
| Σχήμα 4.2-2: Δυνατότητες προσομοίωσης και ανάλυσης Ladybug και Honeybee tool | 4-7 |
| Σχήμα 4.2-3: Σύνδεση LB, HB με διαδομένα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης και τη γλώσσα προγραμματισμού rython..... | 4-7 |
| Σχήμα 4.2-4: Παραμετρικό διάγραμμα ροής για ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας | 4-8 |
| Σχήμα 4.2-5: Διαδραστικό διαδικτυακό περιβάλλον Aragog gbXML Viewer | 4-8 |
| Σχήμα 4.2-6: Μέθοδος δημιουργίας συμπαγών όγκων (massing), (Autodesk.com) 4-11 | |
| Σχήμα 4.2-7: Μικτή σχεδίαση (massing και αρχιτεκτονικών στοιχείων) για τη δημιουργία ενεργειακού μοντέλου gbXML, (Autodesk.com) | 4-12 |
| Σχήμα 4.2-8: Αναγνώριση οντοτήτων που δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου, (Autodesk.com)..... | 4-13 |
| Σχήμα 4.2-9: Κατηγορία σκίασης στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com) | 4-15 |
| Σχήμα 4.2-10: Κατηγορία επικαλυπτόμενων επιφανειών στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com) | 4-15 |
| Σχήμα 4.2-11: Συνθήκες δημιουργίας ορόφου - οροφής και διαχωρισμού αυτών στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)..... | 4-16 |
| Σχήμα 4.2-12: Παραπέτα ενός τοίχου ή η προεξοχή μιας οροφής στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)..... | 4-17 |
| Σχήμα 4.2-13: Δημιουργία αναλυτικών επιφανειών χωρίς κενά ή παραλείψεις (#2) κατά την εξαγωγή της ενεργειακής ανάλυσης στο Revit εφαρμόζοντας κατάλληλες οριακές συνθήκες, (Autodesk.com) | 4-18 |
| Σχήμα 4.3-1: Διαδοχική Αναπαράσταση επιπέδων λεπτομέρειας (Biljecki, F.,2016)..... | 4-20 |
| Σχήμα 4.3-2: Αρχιτεκτονική του CityGML 2.0 (OGC,2012 B) | 4-22 |
| Σχήμα 4.3-3: Εννοιολογικό διάγραμμα των κύριων και βασικών κλάσεων, η κλάση CityObject αποτελεί την κύρια κλάση όλων των θεματικών επιπέδων (Kolbe,2009) 4-22 | |
| Σχήμα 4.3-4: Εννοιολογικό διάγραμμα UML diagram του CityGML's building model. Προθέματα χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν τα XML namespaces που σχετίζονται με στοιχεία του μοντέλου.(OGC,2012) | 4-22 |

| | |
|--|------|
| Σχήμα 4.3-5: Αναπαράσταση επιπέδων λεπτομέρειας (LoD), κατά το πρότυπο CityGML, όπου η γεωμετρική και σημασιολογική πολυπλοκότητα σταματά το LoD 4 που περιγράφει μέχρι και στοιχεία εσωτερικού χώρου. (Biljecki, F. et al., 2016) | 4-23 |
| Σχήμα 4.3-6: Ανάλυση επιπέδων λεπτομέρειας LoD (1-3) | 4-24 |
| Σχήμα 4.3-7: Μοντέλο μετάφρασης χρήση Graph Transformation System (Yao & Kolbe, 2017) | 4-26 |
| Σχήμα 4.4-1: Οριακές συνθήκες χώρων ή ζωνών (Weise et al.,2016)..... | 4-27 |
| Σχήμα 4.4-2: Ροή εργασίας βελτίωσης BIM σε ενεργειακό μοντέλο (Ryo, H.; Park, K., 2016)..... | 4-28 |
| Σχήμα 4.4-3: Διάγραμμα ροής μετάφρασης BIM (IFC) σε CityGML, LoD 4 χρήση του λογισμικού Safe FME (Floros; Dimoroulou, et al.,2018)..... | 4-30 |
| Σχήμα 4.4-4: Δομή σημασιολογικού μοντέλου ενεργειακού κτηρίου gbXML..... | 4-31 |
| Σχήμα 4.4-5: Δομή σημασιολογικού μοντέλου κτηρίου CityGML..... | 4-31 |
| Σχήμα 4.4-6: Βαθμονόμηση επιπέδων ανάλυσης LoD του CityGML για ενεργειακή προσομοίωση (++πολύ καλό, --πολύ κακό) (A. Geiger, et al., 2018)..... | 4-32 |
| Σχήμα 5.1-1: Πεδία εφαρμογής προσομοιώσεων για ανάκτηση δυναμικών δεδομένων | 5-1 |
| Σχήμα 5.1-2: Εννοιολογική αναπαράσταση των Dynamizers, επιτρέποντας τόσο (i) την ενσωμάτωση μετρήσεων από αισθητήρες, τιμές προσομοίωσης από ΒΔ και εξωτερικά αρχεία, όσο (ii) την ενίσχυση των αντικειμένων της πόλης μεταφράζοντας τις στατικές τους τιμές (Chaturvedi & Kolbe,2016) | 5-2 |
| Σχήμα 5.1-3: Παράδειγμα μετάφρασης – αντικατάστασης στατικής τιμής στο CityGML με δυναμική τιμή του Dynamizer για το αντικείμενο του κτηρίου (Chaturvedi & Kolbe,2016)..... | 5-3 |
| Σχήμα 5.2-1: Μοντέλο UML του Dynamizer ADE, με μπλε χρώμα οι νέες κλάσεις, οι κλάσεις με πράσινο και κόκκινο αντιπροσωπεύουν τα πρότυπα TimeseriesML 1.0 και Sensor Observation Service, ενώ με κίτρινο οι κλάσεις των GML και CityGML. (Chaturvedi, Kolbe, 2016)..... | 5-6 |
| Σχήμα 5.2-2:Τροποποιημένο μοντέλο UML του Dynamizer ADE του Σχήματος 5.2-1. Τα AtomicTimeseries περιλαμβάνουν δύο νέες κατηγορίες: GenericTimeseries και BasicFileTimeseries. (Chaturvedi, et al., 2019)..... | 5-7 |
| Σχήμα 5.2-3: Παράδειγμα σε χρονοσειρές ζεύγη χρόνου/ τιμής (dynamicdataTVP) 5-8 | |
| Σχήμα 5.2-4: Παράδειγμα σε χρονοσειρές ζεύγη περιοχής τομέα (domain-range), (dynamicDataDR) | 5-9 |
| Σχήμα 5.2-5: Παράδειγμα ανάκτησης χρονοσειρών από αισθητήρα με κωδικοποίηση κατά Observations and Measurements (O&M) | 5-9 |
| Σχήμα 5.2-6: Παράδειγμα ενσωμάτωσης χρονοσειρών με πρότυπα για τις εργασίμες μέρες τις εβδομάδας | 5-11 |
| Σχήμα 5.2-7: Διάγραμμα προτύπων για κάθε μήνα (Chaturvedi, Kolbe, 2015) | 5-11 |
| Σχήμα 5.3-1: Διαχείριση και απεικόνιση στατικών και δυναμικών δεδομένων με τη χρήση δυναμικών CityGML (Chaturvedi & Kolbe, 2019) | 5-13 |

| | |
|--|------|
| Σχήμα 5.3-2:Σχεσιακό μοντέλο βάσης δεδομένων του Dynamizer ADE. Το σχήμα δείχνει μεμονωμένους πίνακες του Dynamizer μαζί με τις στήλες τους και πρωτεύοντα και “εξωτερικά” κλειδιά (Chaturvedi & Kolbe, 2019)..... | 5-14 |
| Σχήμα 5.4-1: Υλοποίηση σύνδεσης στην 3DCityDB του σημασιολογικού μοντέλου CityGML και την επέκταση αυτής με Dynamizer ADE για ανάκτηση δεδομένων ... | 5-19 |
| Σχήμα 5.5-1: Η εννοιολογική απεικόνιση του αισθητήρα Mini SOS (Chaturvedi et al.,2017) | 5-21 |
| Σχήμα 5.5-2: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων της υπηρεσίας InterSensor. Η υπηρεσία χρησιμοποιεί αντάπτορες για να ανακτήσει δεδομένα από διάφορες πηγές (Chaturvedi, Kolbe,2019) | 5-23 |
| Σχήμα 6.4-1: Εξαγωγή μοντέλου χρήση ρυθμίσεων ενέργειας (πάνω) με διάφορες οριακές τιμές συνθήκης και ρυθμίσεων αναλυτικών χώρων και επιφανειών (κάτω) 6-9 | |
| Σχήμα 6.4-2: Συμπαγείς όγκοι των θερμικών ζωνών δωματίων για κάθε όροφο .. | 6-10 |
| Σχήμα 6.4-3: Διαδικτυακή εφαρμογή ανάκτησης μετεωρολογικών δεδομένων | 6-10 |
| Σχήμα 6.4-4: Παραμετρική ροή εργασίας για τη δημιουργία θερμικών ζωνών (HBZones) σε μη ελεγχόμενες συνθήκες | 6-11 |
| Σχήμα 6.4-5: Σχηματική αναπαράσταση των γειτονικών επιφανειών σύνδεσης που ορίζουν κάθε θερμική ζώνη | 6-12 |
| Σχήμα 6.4-6: Παραμετρική ροή εργασίας για τη δημιουργία οριακών συνθηκών στις γειτονικές επιφάνειες των θερμικών ζωνών | 6-12 |
| Σχήμα 6.4-7: Παραμετρική ροή εργασίας για τη εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων (.erw) στην ενεργειακή προσομοίωση..... | 6-13 |
| Σχήμα 6.4-8: Παραμετρική ροή εργασίας για την υλοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης μέσω του λογισμικού σύνδεσης OpenStudio και τα αποτελέσματα αυτής..... | 6-14 |
| Σχήμα 6.4-9: Σχηματική παρουσίαση των διαφορετικών θερμικών ζωνών εντός του λογισμικού OpenStudio..... | 6-14 |
| Σχήμα 6.4-10: Πίνακες του Dynamizer ADE που εμφανίζονται στο πίνακα objectclass του σχήματος citydb | 6-25 |
| Σχήμα 6.4-11: Πίνακες του Dynamizer ADE που ενσωματώνονται στο schema citydb της 3DCityDB κατά την διαδικασία επέκταση της 3DCityDB, μέσω του εργαλείου Manager ADE..... | 6-26 |
| Σχήμα 6.4-12: Δομή Ερωτημάτων SQL προς ανάκτηση σημασιολογικής πληροφορίας σχετικά με τα δωμάτια του μοντέλου από την 3DCityDB..... | 6-28 |
| Σχήμα 6.4-13: Δομή Ερωτημάτων SQL προς ανάκτηση σημασιολογικής πληροφορίας σύνδεσης των δωματίων ή κτηρίου με τα δυναμικά δεδομένα χρονοσειρών ενεργειακού περιεχομένου από την 3DCityDB..... | 6-29 |
| Σχήμα 6.4-14: Προσαρμογή CityObjectMember του Dynamizer ADE στο citygml αρχείο για την ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων στο μοντέλο CityGML | 6-30 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|------|
| Εικόνα 3.3-1: Διαδικασία υλοποίησης SDDI – Ομαδοποιημένα αντικείμενα προς εισαγωγή (Περίπτωση QEOP) (Moshrefzadeh, M. et al. 2017) | 3-10 |
| Εικόνα 3.3-2: Ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων από αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας στο Ολυμπιακό Πάρκο QEOP | 3-10 |
| Εικόνα 3.3-3: SDDI – αναπαράσταση του δικτύου σύνδεσης διαφορετικών πηγών (Chaturvedi, K.; Matheus, A., 2018) | 3-11 |
| Εικόνα 3.3-4: Ανάκτηση δυναμικών δεδομένων πραγματικού χρόνου από μετρητές μέσω της υπηρεσίας Sensor Observation Services | 3-12 |
| Εικόνα 3.3-5: Αναπαράσταση αλληλεξαρτώμενων μερών στο πλαίσιο εφαρμογής του FCP1 | 3-12 |
| Εικόνα 3.3-6: Πώς μπορούμε να κάνουμε πιο έγκαιρες παρεμβάσεις και να βελτιώσουμε την κατάσταση της στέγασης για να μειώσουμε τη ενεργειακή ένδεια από τα καύσιμα και να βελτιώσουμε τις υπηρεσίες φροντίδας ενηλίκων στο σπίτι (OGC, Annex B-FCP1, 2016) | 3-14 |
| Εικόνα 6.1-1: Όψη τρισδιάστατου μοντέλου του συγκροτήματος του ΜΕ.Κ.ΔΕ στο BIM λογισμικό Revit (Ράμφου, 2017) | 6-1 |
| Εικόνα 6.3-1: Διάγραμμα ροής εργασίας (τα dotted boxes αποτελούν εναλλακτικά σενάρια υπό εξέταση σε μελλοντική εργασία) | 6-5 |
| Εικόνα 6.4-1: Γεωμετρική και τοπολογική διαφοροποίηση ορισμού μεταξύ των αρχιτεκτονικών μοντέλων (BIM-IFC) και του προτύπου CityGML | 6-17 |
| Εικόνα 6.4-2: Ιεραρχική ομαδοποίηση γεωμετρίας για μετάφραση του αρχιτεκτονικού μοντέλου σε σημασιολογικό μοντέλο CityGML | 6-17 |
| Εικόνα 6.4-3: Σημασιολογική ταξινόμηση επιφανειών στις κλάσεις που ορίζει το πρότυπο CityGML και ομαδοποίηση των δωματίων (Bldg:Rooms) και του κτηρίου (Bldg:Building) (group – lodXSolid) | 6-20 |
| Εικόνα 6.4-4: Ορισμός σημασιολογικών ιδιοτήτων για τις ομάδες των χώρων (Bldg:Rooms) και για το σύνολο του κτηρίου (Bldg:Building) | 6-21 |
| Εικόνα 6.4-5: Παράδειγμα σημασιολογικού και τοπολογικού ορισμού του παραθύρου ως μέρος του εσωτερικού τοίχου (Opening Boundary SurfaceType) .. | 6-21 |
| Εικόνα 6.4-6: Προβολή μοντέλου CityGML LoD4, στο λογισμικό FZKViewer. | 6-22 |
| Εικόνα 6.4-7: Εξαγωγή του μοντέλου στο Google Earth (kml) | 6-31 |
| Εικόνα 6.4-8: Δημιουργία pop-up balloon με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου και τη χρήση των δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών για ένα δωμάτιο του κτηρίου | 6-31 |
| Εικόνα 6.4-9: Δημιουργία διαδραστικού διαγράμματος σύγκρισης (.html) των παραμέτρων θερμικής ζώνης με δυνατότητα παραμετρικής προσαρμογή των απεικονιζόμενων δεδομένων χρονοσειράς από τον χρήστη | 6-32 |
| Εικόνα 7.1-1: Δυνατότητα διαλειτουργικής Dynamizer ADE με Energy ADE, στο σημασιολογικό μοντέλο πόλης CityGML. (Chaturverdi & Kolbe, 2017) | 7-2 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έννοια των έξυπνων πόλεων αφορά την αποτελεσματική σύνδεση των ανθρώπινων, φυσικών και ψηφιακών συστημάτων που λειτουργούν στο δομημένο περιβάλλον με στόχο την ανάπτυξη καλύτερων υπηρεσιών και υποδομών για τους πολίτες. Μια έξυπνη πόλη αξιοποιεί τεχνολογικά μέσα, με στόχο την βελτίωση του αστικού χώρου και των αστικών υπηρεσιών. Οι έξυπνες πόλεις αποτελούν ένα σύστημα από διαφορετικά ενδιαφερόμενα μέρη, εφαρμογές, έξυπνους μετρητές και συσκευές IoT (Internet of Things). Με στόχο την υλοποίηση της διαλειτουργικότητας των ετερογενών δεδομένων, συστημάτων και πλατφορμών, οι υποδομές χωρικών δεδομένων μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μιας έξυπνης πόλης. Στο πλαίσιο αυτό, τα μοντέλα πόλεων που περιγράφουν χωρικές και θεματικές πτυχές των αστικών αντικειμένων, αναπτύσσονται σύμφωνα με το σημασιολογικό μοντέλο 3D CityGML, που αποτελεί ένα ανοιχτό μοντέλο δεδομένων, βασισμένο σε XML δομή για την αποθήκευση και ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν 3D μοντέλα πόλεων.

Τα σημασιολογικά τρισδιάστατα μοντέλα πόλης CityGML, δίνουν χωρικό περιεχόμενο σε όλες τις οντότητες των φυσικών χαρακτηριστικών της πόλης και μπορούν να αποτελέσουν τα γεωμετρικά μοντέλα πολλών εφαρμογών για την ενσωμάτωση δυναμικών παραμέτρων, όπως προσομοιώσεις περιβάλλοντος, η διαχείριση καταστροφών ή και οι προσομοιωτές κυκλοφορίας. Συνεπώς κάθε αντικείμενο της πόλης μπορεί να σχετίζεται από μια σειρά από δυναμικά χαρακτηριστικά όπως μετρήσεις αναγκών σε ενέργεια, θερμοκρασία, επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, χωρικές ιδιότητες όπως αλλαγή γεωμετρίας ή από παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες και συσκευές IoT.

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην αξιοποίηση του πρόσθετου Dynamizer ADE επεκτείνοντας το σημασιολογικό μοντέλο CityGML στοχεύοντας στην ενσωμάτωση δυναμικών ενεργειακών δεδομένων χρονοσειρών στα στατικά χαρακτηριστικά των γεωμετρικών πόλεων με πεδίο εφαρμογής την κτηριακή μονάδα στο ΜΕ.Κ.ΔΕ.

ABSTRACT

The concept of Smart Cities allows the effective integration of human, physical and digital systems operating in the built environment, thus, improving the support of citizens and city governance. Smart Cities are complex distributed systems which may involve services,, applications, sensors, and IoT devices. In order to be able to link and use such heterogeneous data, spatial data infrastructures for Smart Cities can play an important role in establishing interoperability between systems and platforms. Semantic 3D city models describe spatial, graphical and thematic aspects of the cityscapes by decomposing and classifying the occupied physical space according to the semantic data model 3D CityGML, which is an international standard issued by the Open Geospatial Consortium (OGC). CityGML facilitates the integration and structure of heterogeneous data from multiple sources and allows the representation of their geometrical and semantic attributes at different levels, also providing interrelations among the various objects.

The requirement to support time-dynamic properties within CityGML objects arises from the fact that many application and simulation scenarios (e.g. environmental simulations, disaster management, and traffic simulation simulators) require dealing with dynamic variations of object properties, e.g. variations of thematic attributes such as changes of physical quantities (energy demands, temperature, solar irradiation levels), spatial properties such as change of a feature's geometry and real-time observations from sensors and IoT devices like Smart Meters. In order to support such time-varying properties concerning city objects, recent extensions of the CityGML in the form of Application Domain Extensions (ADEs) are developed, such as the Energy ADE (Aguriano et al., 2018) and the Dynamizer ADE (Chaturvedi, Kolbe, 2016). This thesis aims to empathize on the latter ADE in order to extend the static 3D city models by supporting energy variations of individual feature properties and associations over time.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστικοποίηση (urbanization) αποτελεί μια σύνθετη κοινωνικοοικονομική διαδικασία που μετατρέπει πρώην αγροτικές περιοχές σε αστικούς οικισμούς μετατοπίζοντας τη χωρική κατανομή του πληθυσμού από αγροτικές περιοχές σε αστικές περιοχές. Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη (UN, 2018), 54% του σημερινού πληθυσμού ζει σε πόλεις και μέχρι το 2050 ακολουθούμενη την ίδια τάση άλλοι 2,5 δισεκατομμύρια άνθρωποι θα προστεθούν στον αστικό πληθυσμό. Η αυξανόμενη αυτή τάση προς αστικοποίηση, δημιουργεί προκλήσεις σχετικά με τον εντοπισμό αποτελεσματικών στρατηγικών για τον μελλοντικό τρόπο εξασφάλισης των βασικών υπηρεσιών (π.χ. νερό, ενέργεια κ.λπ.) με έναν οικονομικά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο στοχεύοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σήμερα, ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 71% των εκπομπών του αερίου θερμοκηπίου συμβάλλοντας σημαντικά στην κλιματική αλλαγή και στην ρύπανση του αέρα. Αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις αυξάνονται ολοένα οι απαιτήσεις σχεδιασμού στο αστικό περιβάλλον σύμφωνα με τους πυλώνες της βιώσιμης ανάπτυξης πάνω στο οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό τομέα. Σε αυτό το πλαίσιο, εντείνεται η ανάγκη συντονισμένου σχεδιασμού και υλοποίησης περιβαλλοντικών στόχων για τη μείωση της ζήτησης ενέργειας και των εκπομπών CO₂, και την αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο πλαίσιο ότι ο κτηριακός τομέας φαίνεται να αποτελεί έναν ενεργειακό καταναλωτή, η Οδηγία 2010/31/ΕΕ της Ευρωπαϊκής επιτροπής για την θέσπιση της Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων στοχεύει στη μείωση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος του τομέα μέσω της δημιουργίας κτηρίων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών έως το 2050, εφαρμόζοντας εθνικούς κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα στα κτήρια αλλά και τη δημιουργία Ευφυέστερων κτηρίων – μέσω αυτοποιημένων συστημάτων ελέγχου ώστε να λειτουργούν περισσότερο αποτελεσματικά (smarter buildings). Στην εκτίμηση των απαιτήσεων σε ενέργεια αλλά και ανεύρεσης ευκαιριών αναβάθμισης κάθε κτηρίου σημαντική παράμετρος είναι η χωρική καθώς οι μικροκλιματικές συνθήκες του δομημένου περιβάλλοντος επηρεάζονται άμεσα από την γεωμετρική κατανομή του χώρου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σηματοδοτείται η τάση εξέλιξης και δημιουργίας ευφών συστημάτων πόλεων μέσω της αξιοποίηση των διατιθέμενων τεχνολογικών μέσων. Η προτεραιότητα ανάπτυξης των Ευφών Πόλεων εντάσσεται στην «Ψηφιακή Ατζέντα 2020» της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με στόχο τη διάχυση της γνώσης και των καινοτόμων λύσεων στις Ευρωπαϊκές πόλεις για την εξοικονόμηση ενέργειας, τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα των πόλεων, την άμβλυση των κυκλοφοριακών προβλημάτων και τη μείωση των εκπομπών αερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μέχρι το 2020 τα «έξυπνα κτήρια»

ακολουθούν τα υποχρεωτικά πρότυπα για τη θερμική ακεραιότητα και τα συστήματα θέρμανσης και αφορούν όλες τις χώρες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης, ενώ μέχρι το 2030 εφαρμόζονται παγκοσμίως και γίνονται ολοένα και αυστηρότερα (Vision, 2050)

Με τον όρο Ευφυείς Πόλεις (Smart Cities) εννοούμε την επέκταση κοινόχρηστων δικτύων και υπηρεσιών (μεταφορών, ύδρευσης και αποχέτευσης, ενέργειας, φωτισμού, θέρμανσης/ κλιματισμού κτηρίων) αστικών και περιαστικών κοινωνιών μέσω ενοποιημένων υποδομών και εργαλείων Τεχνολογιών Πληροφορικής & Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Στόχος είναι η αποτελεσματική αντιμετώπιση και διαχείριση των σύγχρονων αστικών προβλημάτων (αυξημένοι ρύποι, συσσώρευση αποβλήτων, σπατάλη ενέργειας, κυκλοφοριακό, φθορά οδικού δικτύου κλπ.) για την εξυπηρέτηση βασικών αναγκών όπως: (1) η βελτίωση των υπηρεσιών προς τους πολίτες/ επισκέπτες, (2) η αποδοτικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων, (3) η προστασία του περιβάλλοντος, (4) η ενίσχυση της τοπικής οικονομικής ανάπτυξης, (5) η ανάδειξη της τοπικής πολιτισμικής κληρονομιάς και (6) η ενεργοποίηση του πολίτη μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας με λειτουργίες της πόλης.

Η ψηφιακή πόλη παρέχει ένα 3D γεωχωρικό υπόβαθρο και ουσιαστικά περιέχει όλη εκείνη την πληροφορία που στοχεύει σε μία πόλη που να λειτουργεί ομαλά και αποδοτικά. Έχει ως σκοπό να οργανώνει όλη την πληροφορία που δέχεται σε ένα ενοποιημένο σύστημα αναφοράς, στο οποίο είναι δυνατή η οπτικοποίηση των φυσικών και κοινωνικών συσχετίσεων που προκύπτουν στο περιβάλλον της πόλης.

1.1. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Ο ερευνητικός άξονας της παρούσας μελέτης, στο πλαίσιο ανάπτυξης της τεχνολογίας των έξυπνων πόλεων είναι να διερευνήσει, αναλύσει και αναδείξει τις δυνατότητες και αναγκαιότητα ενσωμάτωσης των δυναμικών ενεργειακών χαρακτηριστικών χρονοσειρών στα στατικά σημασιολογικά μοντέλα 3D πόλης CityGML. Στα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

1. Πώς ένα σημασιολογικό μοντέλο 3D πόλης μπορεί να πλαισιώσει την υλοποίηση εφαρμογής έξυπνων πόλεων;
2. Ποιες ανάγκες των σύγχρονων πόλεων εξυπηρετούνται από την ενσωμάτωση των ενεργειακών δεδομένων στα σημασιολογικά μοντέλα πόλης;
3. Ποια η διαλειτουργική σύνδεση των τεχνολογικών εργαλείων και μοντέλων BIM-BEM-CityGML για την δημιουργία αποδοτικών κτηρίων στο πλαίσιο εφαρμογής βιώσιμων και ευφυών πόλεων;

1.2. ΣΤΟΧΟΙ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση ενός πλαισίου το οποίο περιλαμβάνει την μελέτη και ανάπτυξη υφιστάμενων εργαλείων με σκοπό την παραγωγή μοντέλων που μπορούν να εισαχθούν στο περιβάλλον μίας έξυπνης πόλης. Στο πλαίσιο ότι οι πόλεις υφίστανται συνεχώς μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες εξελίξεις, η παρούσα εργασία διερευνά τρόπους ενσωμάτωσης της δυναμικής αυτής ταυτότητας τους στο σύστημα πόλεων. Η δυναμική ταυτότητα της ενεργειακής κατάστασης των κτηρίων αλλά και των ενεργειακών παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με το κέλυφος του κτηρίου όσο και με το εσωτερικό αυτού δημιουργούν την ανάγκη ανάλυσης και αξιολόγησης αυτών σε σχέση με τη γεωμετρία του κτηρίου και τον περιβάλλοντα χώρο με στόχο την εξομοίωση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Η χρήση έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και η ανάπτυξη εργαλείων ενεργειακής διαχείρισης σε σχέση με το χώρο και το κτήριο, μπορούν να δημιουργήσουν ενεργειακές ευκαιρίες αναβάθμισης. Στόχος λοιπόν της παρούσας μελέτης είναι η ενσωμάτωση των δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών μετρήσεων, ενεργειακών παραμέτρων, στα στατικά γεωμετρικά και σημασιολογικά μοντέλα πόλης. Η χρήση του σημασιολογικού μοντέλου 3D CityGML που βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα διαλειτουργικότητας στην εφαρμογή και η ενίσχυση αυτού με δυναμικά δεδομένα είναι στο πλαίσιο υλοποίησης μιας δυναμικής πόλης μέσω της ανάπτυξης της κατάλληλης τεχνολογίας.

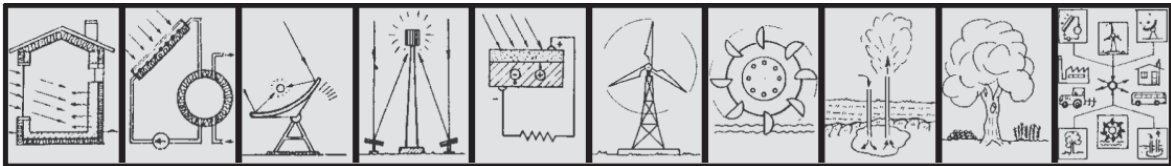
1.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΟΤΗΤΩΝ

Η δομή της παρούσας μελέτης εκτείνεται σε 6 Ενότητες. Στην **Ενότητα 2** αναλύεται το Ευρωπαϊκό και Εθνικό πλαίσιο ενεργειακής πολιτικής και παρουσιάζεται η ανάγκη για εξομάλυνση της ενεργειακής ένδειας μέσω στρατηγικής ορθολογικής διαχείρισης και εφαρμογής εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Επιπλέον, αναλύεται το πώς η κατανάλωση ενέργειας από τον κτηριακό τομέα συμβάλλει και εντείνει το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα και πως η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων στοχεύει στην αντιμετώπιση σχετικών ζητημάτων, δημιουργώντας προϋποθέσεις εφαρμογής μιας ευφυούς πόλης. Στην **Ενότητα 3**, γίνεται εισαγωγή στην έννοια της έξυπνης πόλης ως τρόπου αποτελεσματικής σύνδεσης του ανθρώπου, της φύσης και των ψηφιακών συστημάτων με στόχο τη δημιουργία έξυπνων υποδομών που να μπορούν στηρίζουν τη σωστή λειτουργία των πόλεων. Παράλληλα, η ενότητα παρουσιάζει βέλτιστες εφαρμογές σημασιολογικών μοντέλων πόλεων (CityGML) που δημιουργήθηκαν για να στηρίξουν το δυναμικό χαρακτήρα των αλλαγών που οι πόλεις υφίστανται στο πέρασμα του χρόνου και έχουν ως στόχο τη δημιουργία έξυπνων εργαλείων για τη δυναμική διαχείριση αυτών για την ορθολογική λήψη αποφάσεων και την προσαρμογή σε μελλοντικές εξελίξεις/ τάσεις. Επιπλέον, ο δυναμικός χαρακτήρας

που εμφανίζουν τα ενεργειακά μοντέλα πόλης δημιουργούν κατάλληλες προϋποθέσεις για μια ολιστική εξέταση της κατανάλωσης ενέργειας, των ενεργειακών αναγκών, των δυνατοτήτων παραγωγής και εξοικονόμησης μέσα από τεχνολογικές υποδομές που υποστηρίζουν την σύνδεση των πόλεων με δεδομένα από smart meters ή προσομοιώσεις ενεργειακού υποβάθρου. Στο πλαίσιο ενσωμάτωσης της χωρικής υπόστασης εντός των smart cities, η **Ενότητα 4** αναλύει τα διαφορετικά σημασιολογικά μοντέλα που συνθέτουν τα εργαλεία δημιουργίας τρισδιάστατων πόλεων με σημασιολογικό χαρακτήρα αλλά και ενεργειακή ιδιότητα ενώ επισημαίνεται η διαλειτουργικότητα μεταξύ αυτών. Τα μοντέλα αυτά αφορούν το μοντέλο κτηριακής πληροφορίας (BIM) και το πρότυπο IFC που εφαρμόζει BIM διεργασίες, το ενεργειακό μοντέλο κτηρίου (BEM) και το σημασιολογικό πρότυπο gbXML και το σημασιολογικό μοντέλο πόλης CityGML. Στην **Ενότητα 5** αναλύεται το πώς το σημασιολογικό μοντέλο CityGML μπορεί να επεκταθεί για να στηρίξει δυναμικά δεδομένα χρονοσειράς, εισάγοντας τη μετατροπή των στατικών μοντέλων σε δυναμικά. Η **Ενότητα 6** περιλαμβάνει τη διερευνητική μεθοδολογική προσέγγιση της μελέτης εφαρμογής στο κτήριο ξενώνων του ΜΕΚΔΕ και τέλος η **Ενότητα 7** δίνει τα συμπεράσματα της εφαρμογής και της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τις δυνατότητες και προοπτικές εξέλιξης της παρούσας μελέτης.

2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ

«Προτεραιότητα και κορυφαίος στόχος της ενεργειακής πολιτικής είναι η εξεύρεση, η εξασφάλιση και η διαχείριση ενεργειακών πόρων, με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής, ομαλή, αδιάλειπτη και αξιόπιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας, σε όλη της την επικράτεια, και με τους καλύτερους δυνατούς όρους για τους πολίτες.»¹



- ❖ Δεύτερος στόχος είναι η δημιουργία ενεργειακών αποθεμάτων, συμμαχιών και εναλλακτικών οδών για την κάλυψη των αναγκών της εγχώριας ενεργειακής αγοράς σε περιόδους ενεργειακών κρίσεων και η προστασία των καταναλωτών μέσω εφαρμογής μηχανισμών εξομάλυνσης εξωγενών, έκτακτων αποσταθεροποιητικών φαινομένων και τάσεων.
- ❖ Τρίτος στόχος είναι η βιώσιμη και αειφόρος ανάπτυξη του φάσματος του ενεργειακού τομέα, σε όλες του τις μορφές, από την παραγωγή μέχρι την τελική χρήση, μέσα από το πρίσμα της προστασίας της φύσης και της διαφύλαξης του περιβάλλοντος.

2.1. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ

Η παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση στη σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται από τη συνεχιζόμενη αύξηση της ζήτησης ενέργειας και ειδικότερα της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία αυξάνει με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με τη ζήτηση στον υπόλοιπο ενεργειακό τομέα. Παράλληλα λόγω της ανασφάλειας που προκύπτει από την αυξανόμενη ζήτηση, τα κράτη οδηγούνται στην **αναζήτηση νέων ενεργειακών πηγών και νέων πιο αποδοτικών μεθόδων μετατροπής της ενέργειας**. Το ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν σήμερα οι περισσότερες χώρες έγκειται στην αύξηση των τιμών του πετρελαίου, αλλά και στη συνεχή μείωση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης κ.λπ.) οι οποίες καλύπτουν προς το παρόν τις ενεργειακές μας ανάγκες. Την ίδια στιγμή, επικρατεί μεγάλη ανησυχία για τη ρύπανση του περιβάλλοντος κατά την παραγωγή ενέργειας. **Η καύση των ορυκτών καυσίμων επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του άνθρακα στην ατμόσφαιρα η οποία προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου.**

¹ <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=272&language=el-GR>

Αναμφίβολα το επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας διαφέρει σημαντικά από χώρα σε χώρα καθώς επηρεάζεται από το επίπεδο οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, από την αποδοτικότητα του ενεργειακού τομέα, από τον βαθμό ενεργειακής αυτοδυναμίας και σίγουρα από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Βασικός στόχος όλων των κρατών είναι **η μείωση κατανάλωσης ενέργειας και κατά κύριο λόγο, αυτής του πετρελαίου**. Βέβαια, εξίσου σημαντικός είναι **ο έλεγχος και η διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού κατανάλωσης καθώς το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν σήμερα την κύρια πηγή πρωτογενούς ενέργειας**.

2.1.1. Ενεργειακό Ζήτημα

Η στρατηγική για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών και την επίλυση του ενεργειακού ζητήματος στην Ελλάδα, επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση του αναγκαίου ρυθμιστικού και νομικού καθεστώτος, το οποίο επικεντρώνεται σήμερα στις εξής γενικές κατευθύνσεις:

- ✓ δυνατότητα χρήσης ποικίλων ενεργειακών πόρων
- ✓ κατασκευή αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου στα πλαίσια διεθνών δικτύων
- ✓ αυξημένη εκμετάλλευση ενδογενών ενεργειακών πηγών και αποθεμάτων
- ✓ απεξάρτηση από μεμονωμένες εισαγόμενες μορφές ενέργειας υψηλού ρίσκου
- ✓ ανάπτυξη εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παροχή κινήτρων
- ✓ χρήση και διάδοση καθαρών και αποδοτικών τεχνολογιών που σέβονται το περιβάλλον
- ✓ απελευθέρωση της αγοράς, διεύρυνση της ανταγωνιστικότητας, κατάργηση των μονοπωλίων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου
- ✓ δημιουργία θετικού επενδυτικού κλίματος σε ιδιώτες και επιχειρήσεις στους τομείς παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ εξοικονόμηση ενέργειας σε βιομηχανία, μεταφορές, κτήρια και κατοικίες
- ✓ θέσπιση εθνικών στόχων για αύξηση της διείσδυσης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, την μείωση των αερίων θερμοκηπίου και την εξοικονόμηση ενέργειας

Σήμερα, μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα τα οποία **καταναλώνονται εκατό χιλιάδες φορές ταχύτερα** από τον χρόνο που απαιτείται για να ξαναδημιουργηθούν. Επομένως, τα ενεργειακά αποθέματά τους, είναι περιορισμένα και αναμένεται η μελλοντική τους εξάντληση. Η **αλόγιστη χρήση συμβατικών** καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, οδήγησε στην αρχική διατύπωση του ενεργειακού προβλήματος στις αρχές της δεκαετίας του 1950' και στη γενικότερη

συνειδητοποίησή του, λίγα χρόνια αργότερα, με την εμφάνιση της ενεργειακής κρίσης, το 1973.

Το ενεργειακό πρόβλημα συνίσταται κυρίως στην στροφή της κοινωνίας στον υλισμό και στην έλλειψη ενέργειας, ενώ, βασικές συνιστώσες του είναι αφορούν την ανοδική τάση των τιμών της ενέργειας, την αβεβαιότητα επάρκειας και σταθερότητας της ενεργειακής τροφοδοσίας, την εξάντληση των ενεργειακών πόρων του γαιάνθρακα, του πετρελαίου (< 52 χρόνια), του φυσικού αερίου <54 χρόνια, την ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτινων αποδεκτών καθώς και η συμβολή της ενέργειας στο φαινόμενο του Θερμοκηπίου (**ανάγκη για ενέργεια με το μικρότερο περιβαλλοντικό κόστος**).

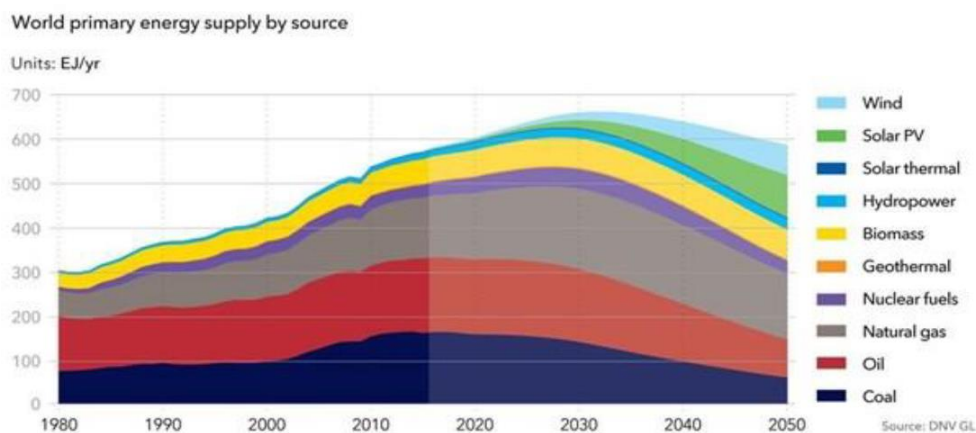
Ειδικότερα, προς αυτή την κατεύθυνση, έχει γίνει αποδεκτή η ανάγκη υλοποίησης των δύο ακόλουθων στρατηγικών. Η πρώτη είναι η **στρατηγική ορθολογικής διαχείρισης** ή στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας η οποία περιλαμβάνει τον περιορισμό της σπατάλης και την αποδοτική χρησιμοποίηση της ενέργειας, ώστε να επιτυγχάνεται το ίδιο (οικονομικό-κοινωνικό) αποτέλεσμα με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Σήμερα, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας στους περισσότερους τομείς, καθώς οι συνήθειες της καθημερινής ζωής όπως και η τεχνολογία αναπτύχθηκαν σε περιόδους που το κόστος της ενέργειας αποτελούσε παράγοντα περιορισμένης σημασίας. Με τη συγκεκριμένη στρατηγική, εξυπηρετούνται οι στόχοι της διατήρησης των φυσικών πόρων και της προστασίας του περιβάλλοντος. Η δεύτερη στρατηγική αφορά τη **στρατηγική υποκατάστασης των συμβατικών ενεργειακών πηγών με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)**. Με τη χρήση των ΑΠΕ, μπορούμε να πετύχουμε μείωση της κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων με ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος. Βέβαια, οι ήπιες μορφές ενέργειας που προέρχονται από τις ΑΠΕ, δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τις συμβατικές πηγές και επομένως δεν αποτελούν λύση για τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν. Ωστόσο, με τη δυναμική που παρουσιάζουν, μπορούν να μειώσουν δραστικά τη σοβαρότητά τους και το κόστος παραγωγής τους.

2.1.2. Παραγωγή και αποθέματα καυσίμων στην Ευρώπη

Πολλά από τα κράτη της Ευρώπης ανέκαθεν είχαν εξάρτηση από εισαγόμενες πηγές ενέργειας με σκοπό να εξασφαλίσουν την κάλυψη των εσωτερικών ενεργειακών αναγκών τους. Σύμφωνα με στοιχεία της **Eurostat η Ευρωπαϊκή Ένωση χρειάζεται να εισάγει περίπου το 55% της ενέργειας που καταναλώνει**, δηλαδή κάτι παραπάνω από το μισό της συνολικής ενέργειας. Παρατηρείται ότι από το 1990 υπάρχει μια συνεχής αύξηση της ενεργειακής εξάρτησης, ενώ επίσης από το 2000 το ποσοστό αυτό βρίσκεται **σταθερά πάνω από το 50%**. Σύμφωνα με μελέτες της Ε.Ε. το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί αισθητά τα επόμενα χρόνια και να φτάσει στα επίπεδα του 80% σε βάθος εικοσαετίας.

Μια πιο εποπτική δυνατότητα παρουσίασης του **ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος είναι υιοθετώντας την κατηγοριοποίηση με βάση τους ενεργειακούς πόρους, εξετάζοντας τα αποθέματα, τη ζήτηση και την παραγωγή του.**

Το πετρέλαιο είναι ευρέως γνωστό πως έχει το σημαντικότερο μερίδιο στην αγορά ενέργειας από κάθε άλλο καύσιμο, αν και τα τελευταία χρόνια η αναλογία αυτή μειώνεται. Η Ευρώπη έχει ωφεληθεί από την εκμετάλλευση των εγχώριων αποθεμάτων πετρελαίου, αν και είναι λιγότερο ελκυστικά οικονομικά και περιορισμένα. Το πετρέλαιο παραμένει το βασικό καύσιμο στον τομέα των μεταφορών και αν μερικά χρόνια νωρίτερα οι δυνατότητες να αντικατασταθεί ήταν πολύ περιορισμένες, σήμερα βλέπουμε πως η άνοδος στην παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων δείχνει δυνατότητες απεξάρτησης.



Σχήμα 2.1-1: Πηγές Πρωτογενούς ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο

Το φυσικό αέριο είναι ένα ιδιαίτερης σημασίας καύσιμο καθώς αυξάνεται σημαντικά η χρήση του και κυρίως στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνοντας ένα μεγάλο μερίδιο από το πετρέλαιο και τον άνθρακα. Αυτό συμβαίνει καθώς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φυσικό αέριο απαιτείται χαμηλότερο κόστος επένδυσης, ενώ την ίδια στιγμή λόγω της χημικής του σύστασης εκπέμπει μικρότερες ποσότητες των αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα σε πολλά είδη ενεργειακών εφαρμογών. Η παραγωγή φυσικού αερίου έχει αυξηθεί τα τελευταία 15 χρόνια, ώστε να ανταπεξέλθει στην αυξημένη ζήτηση, έστω κι αν αυτό συνέβη με ανομοιόμορφο ρυθμό.

Στα στερεά καύσιμα περιλαμβάνονται ο **λιθάνθρακας, ο ασφαλτούχος άνθρακας και ο λιγνίτης που χρησιμοποιείται κατά κύριο στην Ελλάδα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.** Τα καύσιμα αυτά είναι ελκυστικά διότι παρέχουν ασφάλεια τροφοδοσίας στην Ευρώπη λόγω των μεγάλων εγχώριων αποθεμάτων και ιδιαίτερα του λιθάνθρακα. Ωστόσο, παρατηρείται μια πτώση παραγωγής τα τελευταία χρόνια και ως επακόλουθο αυτού αυξάνεται η εξάρτηση της Ευρώπης

από εισαγωγές. Παράλληλα η προτίμηση στα στερεά καύσιμα έχει περιοριστεί λόγω **των έντονων εκπομπών (CO₂) που παράγονται σε μεγάλη κλίμακα από τη χρήση τους**. Αναμφίβολα, η ευρεία απομάκρυνση του άνθρακα από τον οικιακό τομέα, αλλά και η αλλαγή της δομής του τομέα του χάλυβα, έχουν συνεισφέρει και αυτά στην πτωτική αυτή τάση που παρατηρείται σήμερα.

2.1.3. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Ο παγκόσμιος ενεργειακός τομέας βιώνει σήμερα μια νέα ενεργειακή κρίση, η οποία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες. Τη σημερινή κρίση επιβάλλει η αλλαγή του κλίματος της γης, αφού χρειάζεται να εξευρεθούν οικονομικοί πόροι, για επενδύσεις στη προώθηση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. **Αυτό κρίνεται αναγκαίο καθώς η περιβαλλοντική επιβάρυνση, λόγω των καυσαερίων που εκπέμπονται από την χρήση των ορυκτών καυσίμων**, είναι πολύ μεγάλη και επιδεινώνει το πρόβλημα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο σε λίγα χρόνια θα είναι μη αναστρέψιμο.

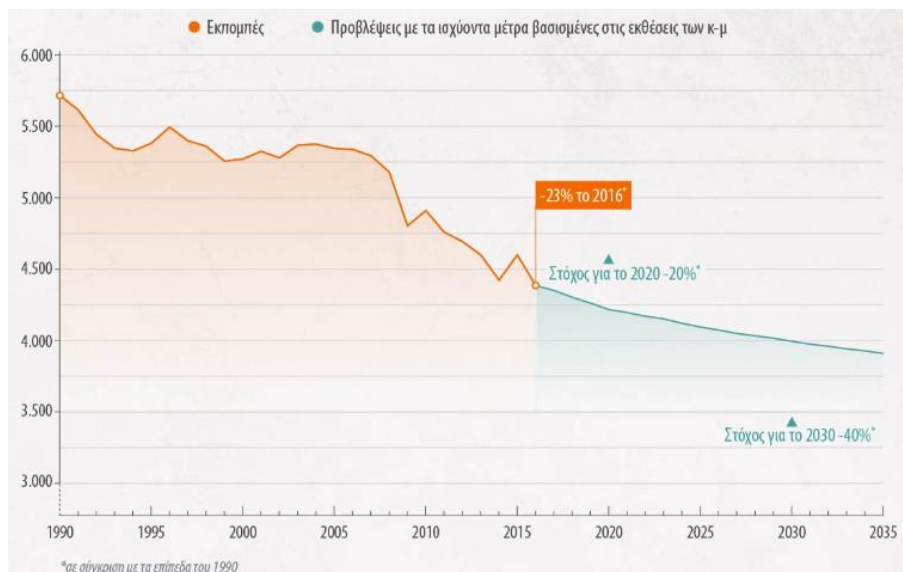
Σε ό,τι έχει να κάνει με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζεται ότι για το **2010 ο τομέας παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ευθύνεται για το 25% των παγκόσμιων εκπομπών**, όπου χρησιμοποιούνται κυρίως γαιάνθρακες, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Αμέσως μετά ακολουθεί ο **τομέας της γεωργίας** στον οποίο καταλογίζεται το 24% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, ο **βιομηχανικός τομέας (21%)**, ο τομέας των **μεταφορών (14%)**, ο **κτηριακός τομέας (6%)** και **άλλες καταναλώσεις ενέργειας (10%)**. Παράλληλα, οι πολύ **αυξημένες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα συνεισφέρουν στην όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου**. Κατά το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά την ατμόσφαιρα και θερμαίνει την επιφάνεια της γης. Αυτή η θερμότητα εκπέμπεται ξανά πίσω προς το διάστημα, με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας μακρών κυμάτων. Η θερμότητα διατηρείται και απορροφάται από αέρια του θερμοκηπίου, ενώ εκπέμπεται εκ νέου θερμαίνοντας τη γη και την κατώτερη ατμόσφαιρα.

Στις αρχές του 18ου αιώνα, το επίπεδο συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO₂ ήταν 280 ppm², ενώ προς το παρόν είναι ήδη 402 ppm και αυξάνεται με ρυθμό άνω των 2 ppm / έτος. Σε αυτό το πλαίσιο τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν ως στρατηγικό στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, στον εφικτό βαθμό με βάση τα σημερινά δεδομένα, καθώς και τη θέσπιση αυστηρών μέτρων για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Παράλληλα, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη διείσδυση των ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μερίδιο που έχουν αυξάνεται με αργούς ρυθμούς (αντιπροσωπεύοντας το 18% της πρωτογενούς παροχής ενέργειας το 2012). Σε αυτό το πλαίσιο υπάρχει ξεκάθαρος στόχος οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να φτάσουν στα επίπεδα του 20% μέχρι το 2020,

γεγονός που σημαίνει ότι θα μειωθεί η εξάρτηση της ΕΕ από τα ορυκτά καύσιμα και σίγουρα σε κάποιο βαθμό θα περιοριστούν οι ανεπιθύμητες εκπομπές CO₂.

2.1.4. Κλιματική αλλαγή

Είναι φανερό πως η ανθρώπινη επίδραση στο κλίμα της γης είναι έντονη και ελάχιστοι επιστήμονες αγνοούν πλέον το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη (global warming). Στις τελευταίες δεκαετίες ο όρος αυτός συνδέθηκε με την αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Με βάση προβλέψεις για τα επόμενα τριακόσια χρόνια εκτιμάται πως η **θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 1,5-5 C μέχρι το 2050** με μεγαλύτερη αύξηση στους πόλους, ενώ παράλληλα θα πραγματοποιείται με έντονο ρυθμό λιώσιμο των πάγων με αποτέλεσμα την ανύψωση του επιπέδου της θάλασσας **κατά 0,1-0,5 m μέχρι το 2100**. Επίσης, προβλέπεται πως θα μειωθεί δραματικά η ανακλασιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και θα ερημοποιηθούν ορισμένες περιοχές λόγω των εκτεταμένων πλημμυρών και των έντονων καιρικών φαινομένων.



Σχήμα 2.1-2: Τάσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμων CO₂). Εκπομπές, προβλέψεις και στόχοι της ΕΕ (Πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος)

Με σκοπό την άμεση αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου κρίνεται αναγκαίο να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων ρύπων κατά 30%, να προωθηθεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανάπτυξη αποδοτικότερων συσκευών και αυτοκινήτων, φύτεμα και ανάπτυξη φυτικών ειδών.

2.1.5. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρείται κάθε μορφής εναλλακτική πηγή ενέργειας όπως **είναι η αιολική, η ηλιακή, η υδραυλική** ενώ θεωρούνται ανανεώσιμες καθώς δεν εξαντλούνται. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η αξιοποίηση τους δεν επιβαρύνει το φυσικό περιβάλλον. Η εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελεί μια τάση που κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος σε ολόκληρο τον κόσμο, όπως και στην Ευρωπαϊκή Ένωση όπου χαράζονται πολιτικές που ορίζουν την χρήση των ΑΠΕ.

Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν σήμερα σε επίπεδο περίπου 18% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας. Σε παγκόσμια κλίμακα οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αντικαθιστούν τα συμβατικά καύσιμα κατά κύριο λόγο στους εξής τέσσερις τομείς, 1. Δυναμική παραγωγή, 2. Θέρμανση του νερού, 3. Θέρμανση του χώρου, 4. Καύσιμα μεταφορών

Η κύρια ώθηση για την αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι η περιβαλλοντική. Η παγκόσμια κοινότητα έχει αναγνωρίσει την ανάγκη ένταξης ανανεώσιμων πηγών τόσο στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής όσο **και στους τομείς της θέρμανσης/ψύξης** και μεταφορών. Σε αυτό το πλαίσιο χαράχθηκε και η Ευρωπαϊκή πολιτική για τις ΑΠΕ που με στόχο το 2020 έχει δώσει σαφή κατεύθυνση σε όλα τα κράτη μέλη. Ειδικότερα μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ.
- 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ.
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Ως εκ τούτου σε πολλές χώρες παγκοσμίως δίνονται κίνητρα για να ενισχύσουν τις ιδιωτικές επενδύσεις σε ΑΠΕ, αλλά και τα κράτη τα ίδια μέσω των κατάλληλων φορέων προχωρούν σε επενδύσεις τέτοιου τύπου. Για την επίτευξη των στόχων αναπτύχθηκε θεσμικό πλαίσιο με πληθώρα διατάξεων και φορέων. Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο **υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές.**

2.1.6. Ευρωπαϊκή και Εθνική Ενεργειακή Πολιτική

Για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα καθοριστικός είναι ο ρόλος της εγχώριας, ευρωπαϊκής και παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής. Η Ευρωπαϊκή

Επιτροπή έχει θεσπίσει την Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων (αναδιατύπωση της Οδηγίας 2002/91/ΕΕ) και την Οδηγία 2012/27/ΕΕ για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα. Οι δύο αυτές Οδηγίες υπογραμμίζουν την σπουδαιότητα του τομέα ενεργειακής αναβάθμισης των κτηρίων και μάλιστα τη σημασία της μακροπρόθεσμης θεώρησης των επενδύσεων για την ανακαίνιση του κτηριακού αποθέματος.

Οδηγία 2002/91/ΕΕ: - Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων: Απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, την ψύξη, τον φωτισμό και τη χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος στα κτήρια. Επίσης προέβλεπε τον έλεγχο της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων που θα συνοδεύονταν από την έκδοση αντίστοιχου πιστοποιητικού.

Οδηγία 2010/31/ΕΕ: (αναδιατύπωση της Οδηγίας 2002/91/ΕΕ): Υπάρχουσα νομοθετική πράξη σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων. Η οδηγία αυτή λαμβάνει υπόψη διάφορες κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες, θέτει μια κοινή μεθοδολογία και καθορίζει εκ νέου τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, ψύξη, ανανέωση αέρα και φωτισμό.

Ακόμα περιλαμβάνει και ορισμένους μακροπρόθεσμους στόχους, όπως είναι η δημιουργία κτηρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (**nearly Zero-Energy Buildings-nZEB**), θέτοντας τα χαρακτηριστικά αυτών (δομικά στοιχεία υψηλών ενεργειακών προδιαγραφών, Η/Μ υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ποσοστό κάλυψης από ΑΠΕ). Βάσει του άρθρου 2 της κοινοτικής Οδηγίας, ως κτήριο με σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση ορίζεται ένα κτήριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση του οποίου η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται επιτόπου ή πλησίον του κτηρίου. Τα κράτη-μέλη οφείλουν να καταρτίσουν εθνικά σχέδια για την αύξηση του αριθμού των κτηρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB), τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικούς στόχους ανάλογα με την κατηγορία του κτηρίου. Επίσης, τα κράτη-μέλη οφείλουν να αναπτύξουν πολιτικές και να λαμβάνουν μέτρα που θα ενθαρρύνουν τη μετατροπή των κτηρίων σε κτήρια nZEB. Τέλος, τα υπάρχοντα κτήρια που υφίστανται ανακαίνιση σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει να αναβαθμίζουν την ενεργειακή τους απόδοση σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οδηγία 2012/27/ΕΕ (Ν.4342/2015, ΦΕΚ 143 Α/9.11.15) για την ενεργειακή απόδοση, προσδιορίζει ένα κοινό πλαίσιο μέτρων για την αναβάθμιση της ενεργειακής απόδοσης στην ΕΕ προκειμένου να διασφαλιστεί η επίτευξη του πρωταρχικού στόχου 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση 20% στην τελική κατανάλωση και

να προετοιμάσει το έδαφος για περαιτέρω βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης στο μέλλον. Για την επίτευξη των στόχων, τα κράτη μέλη της ΕΕ θα πρέπει να θεσπίσουν μακροπρόθεσμη στρατηγική για την κινητοποίηση επενδύσεων με στόχο την ανακαίνιση του αποτελούμενου από κατοικίες και εμπορικά κτήρια, δημόσια και ιδιωτικά, εθνικού κτηριακού αποθέματος.

Στην Ελλάδα, η πρώτη προσπάθεια που σημειώθηκε για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα ήταν το 1979 μέσω του **Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτηρίων (ΦΕΚ 362Δ/1979)** που εφαρμόστηκε για τη χρονική περίοδο 1979-2010 χωρίς τροποποιήσεις. Αποτέλεσμα της εφαρμογής του κανονισμού ήταν η καθιέρωση της χρήσης διπλών υαλοπινάκων σε νέα κτήρια, με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεών του.

Ο **Ν. 3661/2008 (ΦΕΚ Α' 89/19-05-2008)**, αποτελεί την εναρμόνιση με την Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ της ΕΕ, που προέβλεπε την υποχρεωτική έκδοση του **«Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων» (Κ.Εν.Α.Κ.)** και αντικατέστησε τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτηρίων το 2010. Ο Κ.Εν.Α.Κ. έπρεπε μεταξύ άλλων να προσδιορίζει τις ελάχιστες τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των νέων και των ριζικά ανακαινιζόμενων κτηρίων, καθώς και την προβλεπόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων. Για την αποτελεσματική εφαρμογή του Κ.Εν.Α.Κ. το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ) κατάρτισε σε συνεργασία με την πολιτεία τις απαραίτητες Τεχνικές Οδηγίες (ΤΟΤΕΕ) αναφορικά με τις μελέτες και τις επιθεωρήσεις της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων, με βάση τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα. Επίσης ανέπτυξε κατάλληλο λογισμικό (ΤΕΕ-KENAK) για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης, την κατάταξη των κτηρίων στην κατάλληλη κατηγορία ενεργειακής απόδοσης (A+, A, B+, B, Γ, Δ, E, Z και H), τις μελέτες ενεργειακής απόδοσης και τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτηρίων.

Η Ελλάδα συμμετέχει μαζί με τα υπόλοιπα Κράτη Μέλη στην κοινή δέσμευση για την επίτευξη του στόχου της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) μείωσης κατά 20% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ έως το 2020 σε σύγκριση με τις προβλέψεις. Τον Νοέμβριο του 2016 η ΕΕ πρότεινε την περαιτέρω ενίσχυση του σημαντικού αυτού τομέα της ενεργειακής πολιτικής πέραν του 2020 στο να τεθεί δεσμευτικός στόχος 30% για την ενεργειακή απόδοση σε επίπεδο ΕΕ έως το 2030, σύμφωνα με την Οδηγία 2012/27/ΕΕ.

Στο πλαίσιο αυτό εγκρίθηκε το **Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης (ΕΣΔΕΑ)** στο οποίο εμπεριέχεται η έκθεση προόδου του έτους 2017 (ΦΕΚ Β' 1001/21.03.2018) σχετικά με την επίτευξη του εθνικού ενδεικτικού στόχου ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με την παρ. 5 του άρθρου 4 και την παρ. 2 του άρθρου 5 του Ν. 4342/2015. Πρόκειται για το τέταρτο κατά σειρά σχέδιο, στο οποίο παρουσιάζονται τα ήδη καθορισμένα μέτρα πολιτικής του προηγούμενου, ενώ

παρουσιάζονται αναλυτικά και τα μέτρα πολιτικής για την περίοδο 2015 έως και σήμερα. Συμπεριλαμβάνονται, ακόμη, και τα προγραμματισμένα μέτρα πολιτικής για την περίοδο 2017-2020. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τα κτήρια, τα μέτρα πολιτικής στοχεύουν κυρίως στις κατοικίες, με σύνολο νέων ετήσιων εξοικονομήσεων ίσο με περίπου 523 κΤΙΠ (6,1 TWh) μέχρι το 2020.

2.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

«Για κάθε κιλοβατώρα (kWh) που εξοικονομείται σε ηλεκτρικό ρεύμα, εκπέμπεται ένα κιλό (kg) λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα».²

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε μία σημαντική ενίσχυση της ευαισθητοποίησης του κοινού αναφορικά με τη σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος για την υγεία και την άνεση των κατοίκων. Τα κτήρια, τόσο του οικιακού όσο και του τριτογενή τομέα, παίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη τόσο των εθνικών, όσο και των ευρωπαϊκών στόχων.

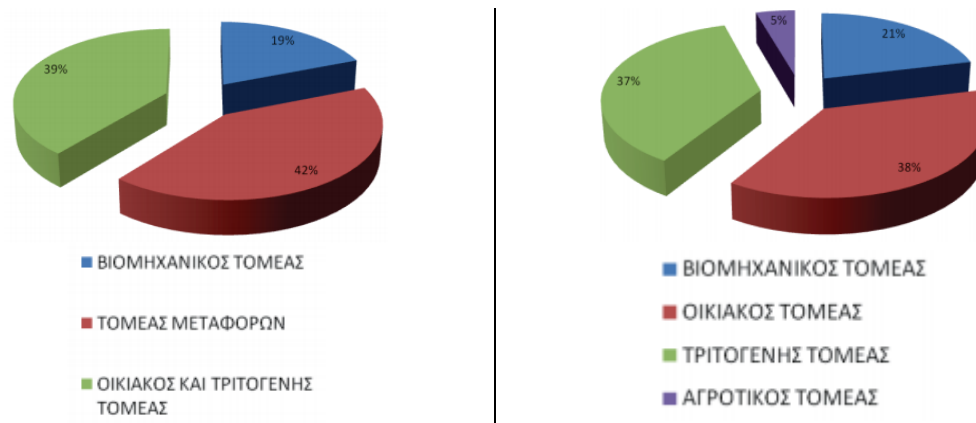
Ο κτηριακός τομέας χωρίζεται σε δύο (2) επιμέρους τομείς κτηρίων, στον οικιακό που περιλαμβάνει μονοκατοικίες και πολυκατοικίες (μόνιμη κατοικία ή παραθερισμού) και στον τριτογενή που περιλαμβάνει χρήσεις όπως γραφεία, ξενοδοχεία, καταστήματα, σχολεία και νοσοκομεία, καθώς και εκκλησιαστικοί χώροι, αθλητικά κέντρα, εργαστηριακοί, βιομηχανικοί και αποθηκευτικοί χώροι, σταθμοί αυτοκινήτων και λοιποί συναφή χώροι.

Σύμφωνα με το άρθρο 4 της οδηγίας 2012/27/ΕΕ και την Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την κινητοποίηση επενδύσεων για την ανακαίνιση του αποτελούμενου από κατοικίες και εμπορικά κτήρια, δημόσια και ιδιωτικά, εθνικού κτηριακού αποθέματος (Έκδοση 2^η, Απρίλιος 2018) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ο κτηριακός τομέας αντιστοιχεί σε ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και αντιπροσώπευε το 39% (2016) και το 45% (2012) της εγχώριας κατανάλωσης ενέργειας, (Σχήμα 2.2-1, αριστερά). Ενώ, συμβάλλει κατά 10% στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), για το 2012.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η κατανάλωση ενέργειας στα πλαίσια των κτηρίων αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 40% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Επιπλέον, πολύ υψηλό είναι και το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στα κτήρια της Ελλάδας, καθώς το 74,2% της ηλεκτρικής ενέργειας

² <http://www.cres.gr/cres/index.html>

που καταναλώθηκε για το 2016 αφορά τον οικιακό (37,6%) και τον τριτογενή τομέα (36,6%), (Σχήμα 2.2-1, δεξιά).



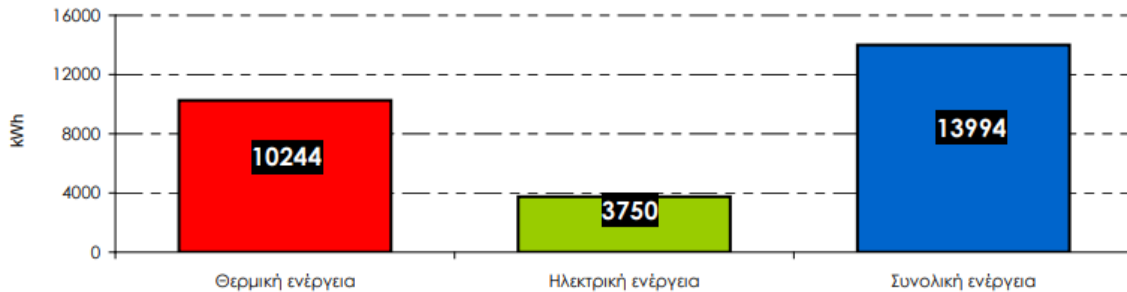
Σχήμα 2.2-1: Ποσοστιαία κατανομή τελικής ενέργειας (αριστερά) και της ηλεκτρικής ενεργειακής κατανάλωσης (δεξιά) ανά χρήση, έτος 2016



Σχήμα 2.2-2: Κατάσταση κτηριακού τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση

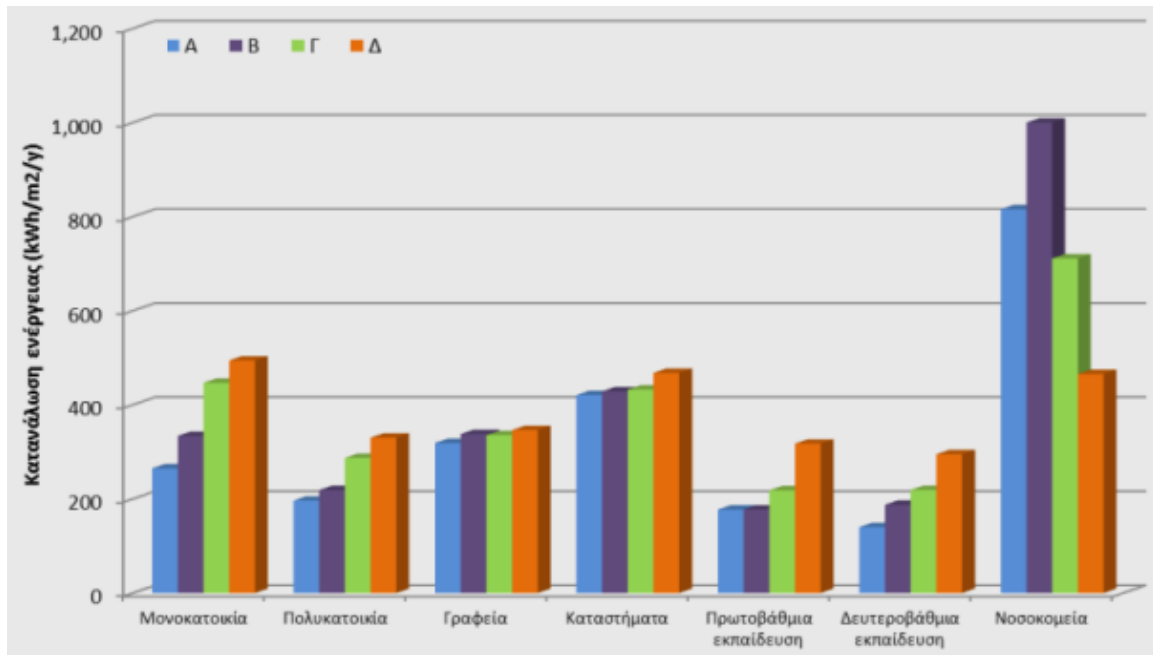
Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από την ενεργειακή κατανάλωση σε κτήρια αποτελούν μία από τις αιτίες υπερθέρμανσης του πλανήτη. Συνεπώς, η εξοικονόμηση ενέργειας θα πρέπει να αποτελεί το επίκεντρο τόσο των ενεργειακών πολιτικών, όσο και των αποφάσεων που λαμβάνονται αναφορικά με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των σύγχρονων κτηρίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας της ΕΛ.ΣΤΑΤ. σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας (2011-2012) οι ανάγκες ενός νοικοκυριού για θέρμανση χώρων και μαγείρεμα αποτελούν το 81% της συνολικής ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειάς του (η ψύξη, ο φωτισμός, η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) και οι ηλεκτρικές συσκευές καταλαμβάνουν το υπόλοιπο 19%), ενώ συνολικά για την κάλυψη των ετήσιων ενεργειακών αναγκών του καταναλώνει πετρέλαιο θέρμανσης και ηλεκτρισμό σε ποσοστό 44,1% και 26,8%, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, κατά μέσο όρο, κάθε νοικοκυριό της χώρας καταναλώνει 13.994 kWh ετησίως για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του (Σχήμα 2.2-3), όπου το 85,9% της θερμικής ενέργεια καταναλώνεται για τη κάλυψη των αναγκών θέρμανσης των κατοικιών, με κύριο καύσιμο το πετρέλαιο (60,3%), τα καυσόξυλα (23,8%) και η

χρήση του φυσικού σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (7,4%). Ενώ κατά μέσο όρο, το 38,4% της συνολικής ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από ένα νοικοκυριό είναι για το μαγείρεμα, το 14,7% για τη λειτουργία του ψυγείου, το 10,6% για τη λειτουργία του πλυντηρίου ρούχων και, μόλις, το 6,6% για το φωτισμό και το 4,9% για την ψύξη της κατοικίας.



Σχήμα 2.2-3: Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά νοικοκυριό (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2011)

Επίσης, με βάση τα δεδομένα από την έκδοση των Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) μέχρι σήμερα, στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι διαφορετικές μέσες καταναλώσεις ενέργειας (kWh/m²/y) που προκύπτουν ανά χρήση κτηρίου, σε κάθε κλιματική ζώνη. Παρατηρείται ότι στην ψυχρότερη κλιματική ζώνη Δ, όλα τα κτήρια διαφορετικής χρήσης, είναι πιο ενεργοβόρα από ό,τι σε άλλες περιοχές της χώρας, με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας να καταγράφεται στις μονοκατοικίες (494 kWh/m²/y). Τα κτήρια γραφείων και τα καταστήματα εμφανίζουν παρόμοιες ενεργειακές καταναλώσεις σε όλες τις κλιματικές ζώνες, σε αντίθεση με τις κατοικίες και τα σχολεία, που παρουσιάζουν αυξητική τάση προς τις ψυχρότερες ζώνες, λόγω των θερμικών αναγκών τους. Αντίθετα, τα νοσοκομεία εμφανίζουν μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση στις πιο θερμές ζώνες (Α, Β), εξαιτίας των μεγάλων αναγκών τους για δροσισμό. Μάλιστα, η υψηλότερη τιμή στην κατανάλωση ενέργειας καταγράφεται στην κλιματική ζώνη Β, στις 1000 kWh/m²/y.



Σχήμα 2.2-4: Μέση κατανάλωση κτηρίου ανά χρήση και κλιματική ζώνη (Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ))

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η τελική ενεργειακή κατανάλωση των κτηρίων έχει αυξηθεί από το 1990 κατά 1% ανά έτος και συγκεκριμένα για την ηλεκτρική ενέργεια κατά 2,4% ανά έτος. Η ετήσια μονάδα κατανάλωσης ανά τετραγωνικό μέτρο για τα κτήρια είναι περίπου 220 kWh/m² για το 2009, με μία διαφορά της τάξης των 100 kWh/m² μεταξύ των κατοικιών (200 kWh/m²) και των μη κατοικιών (περίπου 300 kWh/m²). Παρόλα αυτά, εκτιμήθηκε ότι τα 2/3 των ευρωπαϊκών χωρών έχουν μειώσει τη μέση ενεργειακή κατανάλωση ανά κατοικία. Η μείωση αυτή είναι σημαντική αν ληφθεί υπόψη ότι η κατηγορία των κατοικιών αντιπροσωπεύει το 76% του συνόλου του κτηριακού τομέα. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης έπαιξε η μείωση του ενεργειακού κλάσματος για τη θέρμανση χώρων, η οποία οφείλεται εν μέρει στη σχετική αύξηση της κατανάλωσης των, πλέον τεχνολογικά εξελιγμένων, ηλεκτρικών συσκευών.

2.2.1. Ενεργειακές Πρακτικές Εξοικονόμησης

Ο ελληνικός κτηριακός τομέας παρουσιάζει έντονο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω χρήσης πρωτογενών υλών, κατανάλωσης φυσικών πόρων και παραγωγής ρύπων και αποβλήτων. Τα ελληνικά κτήρια χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα ενεργοβόρα κυρίως λόγω της παλαιότητάς τους και της μη ενσωμάτωσης σε αυτά των σύγχρονων τεχνολογιών. Τα περισσότερα παρουσιάζουν προβλήματα όπως έλλειψη θερμομόνωσης, καθώς 60% των ελληνικών κτηρίων κατασκευάστηκαν πριν από το 1980 και παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ παράλληλα στην πλειοψηφία τους διαθέτουν παλιές Η/Μ εγκαταστάσεις, παλιά κουφώματα. Επιπλέον, υπάρχει ελλιπή ηλιοπροστασία των

νότιων και δυτικών όψεών τους, ανεπαρκή αξιοποίηση του υψηλού ηλιακού δυναμικού της χώρας και ανεπαρκή συντήρηση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού με αποτέλεσμα τη χαμηλή τους απόδοση.

Αυτό ακριβώς το γεγονός καθιστά άμεσα απαραίτητο τον σχεδιασμό κτηρίων τα οποία θα είναι φιλικά προς το περιβάλλον, μέσω του περιορισμού των ενεργειακών απαιτήσεών τους με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση και την εξοικονόμηση ενέργειας. Βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων είναι εφικτή η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 5% έως 6%, αλλά και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 5%. Εκτιμάται ότι η νέα γενιά κτηρίων μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση κατά μέσο όρο από 20% έως και 50% μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλων σχεδιαστικών παρεμβάσεων στο κτηριακό κέλυφος.

Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτηρίων και συνεπώς η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση εξαρτάται από (1) την περιοχή (κλιματολογικές συνθήκες), (2) την ηλικία (διαφορετική νομοθεσία – τεχνολογίες κατασκευής), (3) τον τύπο και μέγεθος του κτηρίου (κατοικίες και μη- κατοικίες).

Οι επεμβάσεις με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτήριο μπορεί να αφορούν:

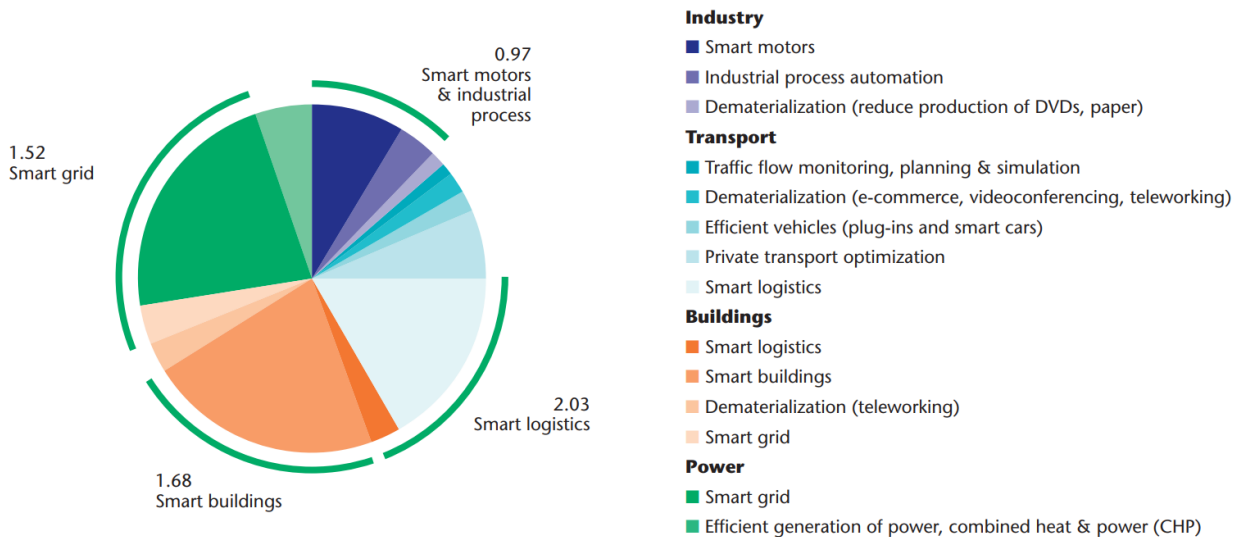
1. Την ορθολογική χρήση του κτηρίου και την εκμετάλλευση των δομικών του στοιχείων (ενεργειακή διαχείριση, φυσικός αερισμός)
2. Το κτηριακό κέλυφος (θερμομόνωση, κατάλληλα συστήματα ανοιγμάτων)
3. Τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, ζεστού νερού και ηλεκτρικές συσκευές.

2.3. ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΞΕΥΠΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Στο πλαίσιο ότι ο κτηριακός τομέας φαίνεται να αποτελεί το μεγαλύτερο ενιαίο ενεργειακό καταναλωτή στην ΕΕ,. Ωστόσο ο ίδιος παρουσιάζει και δυνατότητες αύξησης της ενεργειακής του απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, η ΕΕ έχει εγκρίνει νέους κανόνες. Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων στοχεύει στην αντιμετώπιση σχετικών ζητημάτων, με την δημιουργία οικονομικών ευκαιριών στον κατασκευαστικό κλάδο με αποτέλεσμα την εξομοίωση της ενεργειακής φτώχειας. Με γνώμονα την οδηγία αυτή, τα κράτη - μέλη της ΕΕ θα πρέπει πλέον να προετοιμάσουν εθνικά μέτρα πολιτικής για την επίτευξη των νέων στόχων, όπως αναπτύσσονται παρακάτω:

- ✓ Πορεία προς δημιουργία κτηρίων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών στην ΕΕ έως το 2050, εφαρμόζοντας εθνικούς κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα στα κτήρια

- ✓ Ευφύστερα κτήρια – εφαρμόζοντας αυτοπονημένα συστήματα ελέγχου ώστε να λειτουργούν περισσότερο αποτελεσματικά (**smarter buildings**)
- ✓ Ένας έξυπνος δείκτης ετοιμότητας που θα μετράει την πληρότητα του κτηρίου χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες και ηλεκτρονικά συστήματα, προσαρμόζοντας κάθε φορά στις ανάγκες του καταναλωτή με στόχο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κτηρίου και την αλληλεπίδραση με τις εκάστοτε συνθήκες περιβάλλοντος.
- ✓ Ηλεκτρονική κινητικότητα στα κτήρια – ανάπτυξη υποδομών ηλεκτρονικής κινητικότητας, όπως τα σημεία ηλεκτρονικής χρέωσης σε κτήρια
- ✓ Χρηματική υποστήριξη για την ανακαίνιση - με την κινητοποίηση δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης - επενδύσεις για δραστηριότητες ανακαίνισης, και ενίσχυση των στρατηγικών μακροχρόνιας ανακαίνισης κτηρίων
- ✓ Καταπολέμηση της ενεργειακής ένδειας και μείωση του νοικοκυριού τους λογαριασμούς ενέργειας μέσω της ανακαίνισης και της βελτίωσης ενεργειακών επιδόσεων παλαιότερων κτηρίων



Σχήμα 2.3-1: Εφαρμογές έξυπνων συστημάτων στις πόλεις (VISION,2050)

Οι βασικοί πυλώνες μιας ευφυούς πόλης κατά την Ευρωπαϊκή Επιτροπή αφορούν τους παρακάτω έξι (6) τομείς:

Πίνακας 2.3-1: Πυλώνες μιας ευφυούς πόλης

| | | | |
|---------------------|--|------------------|--|
| Ευφύης Διακυβέρνηση | | Ευφύης Οικονομία | |
| Ευφύης Περιβάλλον | | Ευφύης Διαβίωση | |
| Ευφύης Κινητικότητα | | Ευφύεις Πολίτες | |

3. INTERNET OF THING & ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Μια έξυπνη πόλη είναι ένα σύστημα που ενσωματώνει τις τεχνολογικές υποδομές που βασίζονται σε μια προηγμένη επεξεργασία δεδομένων στους στόχους μιας αποτελεσματικής πόλης, με ευτυχισμένους πολίτες, ευημερία στις επιχειρήσεις και πιο βιώσιμο περιβάλλον (Yin et al., 2015).

3.1. 'ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Οι έξυπνες πόλεις ενσωματώνουν ως έννοια την αποτελεσματική σύνδεση του ανθρώπου, της φύσης και των ψηφιακών συστημάτων που λειτουργούν για το δομημένο περιβάλλον με στόχο την βελτιωμένη υποστήριξη των πολιτών και τη διακυβέρνηση των πόλεων (Degbelo et al., 2016). Αυτή η έννοια αναδύεται τα τελευταία χρόνια πολύ γρήγορα ενώ η εφαρμογή της σε όλο τον κόσμο συνεπάγεται την δημιουργία έξυπνων υποδομών που να στηρίζουν τις πόλεις. Εφαρμογές της Microsoft για έξυπνες πόλεις είναι IBM Smarter Cities (IBM, 2016) και το City Next (CityNext, 2015), ενώ ορισμένες εφαρμογές υλοποιούνται σε συνεργασία με πανεπιστήμια και εταιρείες, όπως το Smart Sustainable Districts (SSD, 2015), του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτο (EIT) Climate-KIC και το CitySDK (CitySDK, 2015).

Οι περισσότερες εφαρμογές για έξυπνες πόλεις εστιάζουν στο Internet of Things (IoT), στις μετρήσεις από αισθητήρες αλλά και στα Big Data. Παράλληλα όμως είναι σημαντικό να εξετάζονται και οι γεωγραφικές πληροφορίες του περιβάλλοντος καθώς πολλές εφαρμογές πρέπει να εφαρμοστούν στη γεωμετρία πραγματικών μοντέλων πόλης (π.χ. περιβαλλοντικές προσομοιώσεις, διαχείριση καταστροφών, προσομοιωτές κατάρτισης κ.α.). Συνεπώς, τα σημασιολογικά τρισδιάστατα μοντέλα πόλης αποτελούν ένα συμπληρωματικό στοιχείο ανάλυσης τέτοιων εφαρμογών, καθώς δίνουν το χωρικό περιεχόμενο σε όλες τις οντότητες των φυσικών χαρακτηριστικών της πόλης και αποτελούν το μέσο για μια διαδραστική συσχέτιση με χώρο-σημασιολογικά ερωτήματα.

Παράλληλα, μια άλλη σημαντική πλευρά των Smart Cities από τεχνολογική άποψη, είναι ότι μπορούν να συνδεθούν διαφορετικοί ενδιαφερόμενοι που χρησιμοποιούν μετρήσεις από διαφορετικούς αισθητήρες και ΒΔ, δημιουργώντας/ προκαλώντας προβλήματα διαλειτουργικότητας. Γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η υλοποίηση διαλειτουργικότητας μεταξύ των συστημάτων ώστε να μπορούν να συνδεθούν όλα σε ένα σύστημα υποδομής. Στο πλαίσιο της επίτευξης διαλειτουργικότητας, η Open Geospatial Consortium (OGC) παρέχει αρκετά ανοικτά πρότυπα στην παγκόσμια γεωγραφική κοινότητα προς αξιοποίηση.

Αναγνωρίζοντας τη σημασία των ανοικτών προτύπων, η OGC προτείνει το πλαίσιο "Smart Cities Spatial Information Framework" (Percivall, 2015) για τα αστικά συστήματα και τις χωρικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Το πλαίσιο αυτό τονίζει την σημασία της χωρικής υπόστασης εντός των smart cities βασιζόμενο στην σύνδεση των ανοικτών προτύπων της OGC με την γεω-πληροφορική. Γεωγραφικά ανοικτά πρότυπα αποτελούν το CityGML (Groger et al., 2012), το IndoorGML (Lee et al., 2014), και τα Building Information Models (Eastman, 1999). Αντίστοιχα, πρότυπα διαδικτύου αποτελούν τα: Catalogue Service, Web Feature Service, Web Coverage Service, Web Mapping Service, και Web Processing Service, ενώ το OGC Sensor Web Enablement initiative (SWE) (SWE, 2015) για sensor τεχνολογίες εντός των έξυπνων πόλεων επιτρέπει την ενσωμάτωση περιγραφικών χαρακτηριστικών και παρατηρήσεων από αισθητήρες και την διαλειτουργική σύνδεση αυτών των πληροφοριών με τις υπηρεσίες διαδικτύου.

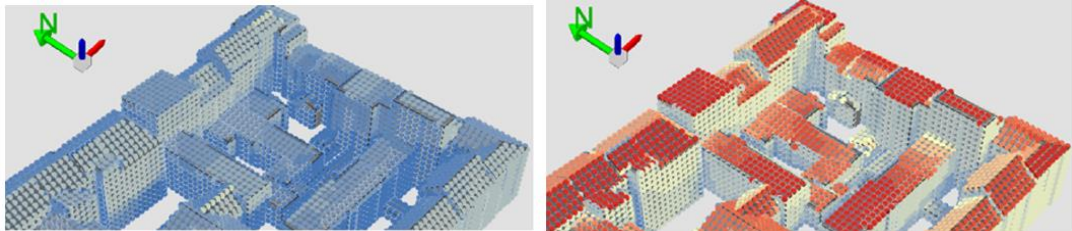
3.2. ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΗΣ & 'ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Στο πλαίσιο εφαρμογής έξυπνων πόλεων, η χρήση ενός σημασιολογικού μοντέλου τρισδιάστατης πόλης φαίνεται να είναι απαραίτητη και χρήσιμη, ώστε τα στατικά χαρακτηριστικά των πόλεων να μετατραπούν και να υποδεχθούν δυναμικές παραμέτρους. Το CityGML είναι ένα διεθνές πρότυπο του OGC που αποδίδει σημασιολογία στα τρισδιάστατα μοντέλα πόλης. Το σημασιολογικό μοντέλο 3D πόλης (Kolbe, 2009) παρέχει μια καταγραφή και περιγραφή των φυσικών οντοτήτων αυτής, όπως κτήρια, δρόμους, βλάστηση, υδάτινα σώματα, υπηρεσίες κοινής ωφέλειας και εδάφη, τα οποία είναι δομημένα με οντολογική δομή περιλαμβάνοντας κλάσεις ιεραρχίας, ιδιότητες και τις δυσλειτουργικές συνδέσεις μεταξύ αυτών. Καλύπτονται θεματικές πτυχές, όπως 3D γεωμετρία, 3D τοπολογία και εμφάνιση του φυσικού περιβάλλοντος, ενώ μπορούν να αναπαριστούν σε διάφορες κλίμακες ανάλυσης, από γενικευμένους τρισδιάστατους όγκους μέχρι σύνθετα λεπτομερή κτήρια.

Τα σημασιολογικά μοντέλα πόλης σύμφωνα με το CityGML είναι στατικά εκ φύσεως και δεν υποστηρίζουν την παράμετρο του χρόνου. Παράλληλα όμως, υπάρχει μια ποικιλία εφαρμογών και σεναρίων προσομοιώσεων (π.χ. περιβαλλοντικές προσομοιώσεις, διαχείριση καταστροφών, προσομοιωτές κατάρτισης) όπου η παράμετρος του χρόνου παίζει μεγάλο ρόλο. Μια πόλη υφίσταται διαρκή εξέλιξη στο χρόνο, με αλλαγές που παρατηρούνται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα ή σε σύντομο χρόνο. Για παράδειγμα, ιστορικά περιστατικά σχετικά με πόλεις ή εξέλιξη των πόλεων, συμπεριλαμβανομένου ανέγερσης κτηρίων ή κατεδάφισης και διαχείριση πολλαπλών εκδοχών των μοντέλων πόλεων παρατηρούνται με την πάροδο μεγάλου χρονικού διαστήματος, ενώ χαρακτηριστικά δυναμικών αλλαγών σε σύντομο χρονικό διάστημα αποτελούν (i) οι αλλαγές θεματικών χαρακτηριστικών όπως οι αλλαγές μεγεθών σε απαιτήσεις ενέργειας, θερμοκρασία,

επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, (ii) οι χωρικές ιδιότητες όπως η αλλαγή της γεωμετρίας ενός χαρακτηριστικού, σε σχέση με το σχήμα και τη θέση (κινούμενα αντικείμενα) και (iii) οι παρατηρήσεις αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο.

Η στατική/ στιγμιαία αποθήκευση των τιμών διάχυτης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από προσομοίωση ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται εντός των γενικών ιδιοτήτων του σημασιολογικού μοντέλου CityGML (Zahn,2015), Σχήμα 3.2-1.



Σχήμα 3.2-1: Αναπαράσταση αποτελεσμάτων υψηλής και χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας για τους μήνες Ιανουάριο (αριστερά) και Ιούλιο (δεξιά)

Οι Bildstein, 2005 και Randt et al., 2007, αναφέρουν τις δυνατότητες εφαρμογής των σημασιολογικών τρισδιάστατων μοντέλων πόλης σε προσομοιωτές κατάρτισης, ειδικά σε σχέση με την κατάρτιση αυτόματου οδηγού αυτοκινήτων σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, το άρθρο αναφέρει την χρήση του CityGML σε διαφορετικές εφαρμογές προσομοιώσεων πραγματικού χρόνου, όπως σε προσομοιώσεις πτήσεων, ναυτιλίας και την οδήγηση. Η χρησιμότητα θα βελτιωθεί αν τα σημασιολογικά μοντέλα πόλης υποστήριζαν ιδιότητες πραγματικού χρόνου όπως κινούμενα αντικείμενα και πληροφορίες αισθητήρων.

| | | | Flight simulation | Maritime simulation | Driving simulation | Emergency & MOUT |
|-------|--|--|-------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| LOD 0 | | Regional 2.5D Digital Terrain Model | | | | |
| LOD 1 | | City/Site „block model“ w/o roof structure | | | | |
| LOD 2 | | City/Site model textured, with roof structures | | | | |
| LOD 3 | | City/Site model detailed architecture model | | | | |
| LOD 4 | | Interior model „walkable“ architecture model | | | | |

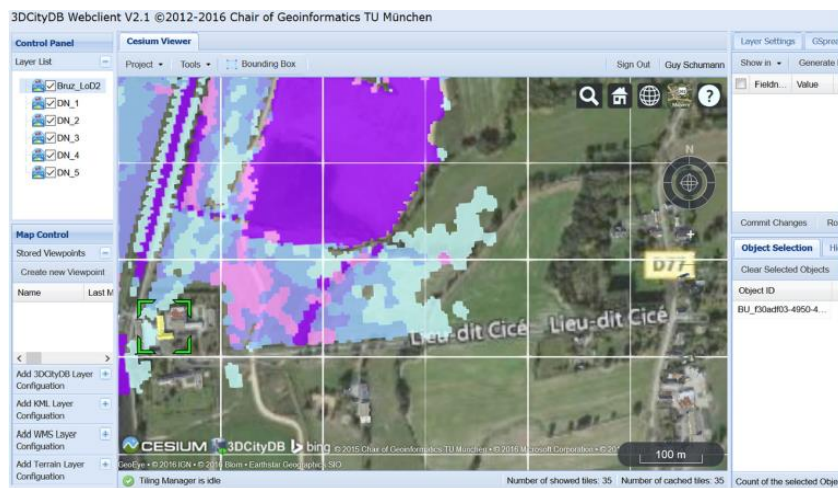
Σχήμα 3.2-2: Χρησιμότητα ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων προσομοιώσεις σε μοντέλα 3D CityGML για διάφορες εφαρμογές.

Εκτός από τις σημασιολογικές και χωρικές ιδιότητες, η ιδιότητα της εμφάνισης του αντικειμένου θεωρείται αναπόσπαστο μέρος των σημασιολογικών τρισδιάστατων μοντέλων πόλης που μπορεί να αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου. Η εμφάνιση του αντικειμένου αφορά τις παρατηρούμενες ιδιότητες των επιφανειών, σε σχέση με το υλικό και τις υφές. Στο Σχήμα 3.2-3 φαίνεται η χρονική αλλαγή σε σχέση με την υφή του κτηρίου. Άλλα σενάρια μπορεί να περιλαμβάνουν τη αλλαγή των υφών σε σχέση με τη σκίαση ημέρα/νύχτα ή την αλλαγή σε σχέση με την εποχή για εκτίμηση ενεργειακών αναγκών των κτηρίων, τη θερμοκρασία κτηρίων και τις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.2-3: Χρονική αλλαγή στην υφή του κτηρίου

Άλλες περιπτώσεις χρήσεων για τη μοντελοποίηση δυναμικών χαρακτηριστικών εντός μοντέλων πόλης μπορεί να είναι ο σχεδιασμός διαδρομής επείγουσας ανάγκης για εσωτερική πλοήγηση αλλά και η δυναμική 3D προσομοίωση πλημμύρας (Σχήμα 3.2-4).



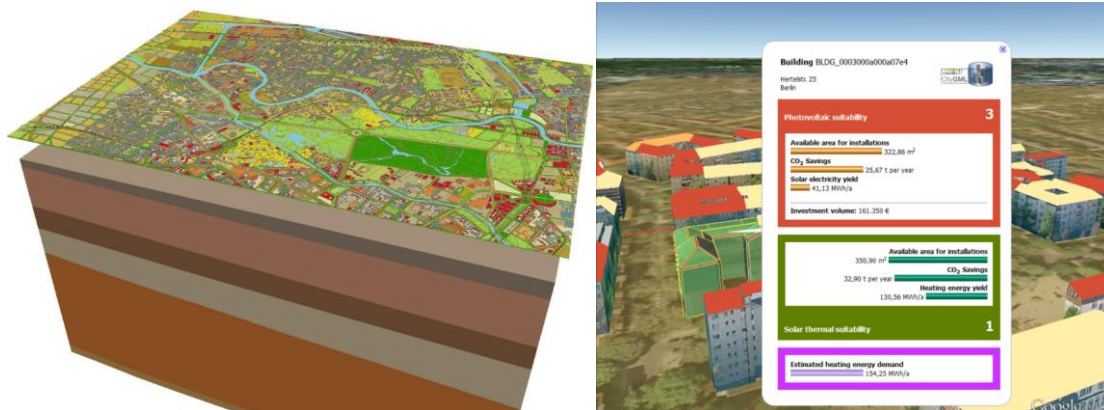
Σχήμα 3.2-4: CityGML Προσομοίωση πλημμύρας σε 3D μοντέλο πόλης

3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ CITYGML

Στο πλαίσιο ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων στα στατικά χαρακτηριστικά των σημασιολογικών τρισδιάστατων πόλεων για την δημιουργία smart cities, παρακάτω αναλύονται τόσο εφαρμογές που απαιτούν εκ φύσεως την ενσωμάτωση αυτή, όσο και προγράμματα της OGC που αναπτύχθηκαν για την εφαρμογή έξυπνων πόλεων με στόχο την δυναμική ενσωμάτωση ενεργειακών χαρακτηριστικών στις πόλεις. Στο πλαίσιο δημιουργίας εφαρμογών smart cities με ανοικτά πρότυπα, στηρίζεται το Smart District Data Infrastructure (SDDI). Αντίστοιχα, το OGC Future City Pilot Phase 1 (FCP1, 2016) αποτελεί πιλοτικό πρόγραμμα για έξυπνες πόλεις, που αναλύει πως πρότυπα όπως το CityGML και το Industry Foundation Classes (IFC) μπορούν σε συνεργασία να βελτιώσουν τις πόλεις με γνώμονα οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους.

3.3.1. Energy Atlas Berlin

Οι πόλεις αποτελούν τον κύριο καταναλωτή των πόρων και των παγκόσμιων εκπομπών, πράγμα που καθιστά απαραίτητη την βελτίωση της χρήσης της αστικής ενέργειας για να υποστηριχθεί ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής. Στόχος του Energy Atlas³ είναι λοιπόν να καταγράψει στο σύνολο τον ενεργειακό εφοδιασμό, τη χρήση και την αποτελεσματικότητα της πόλης του Βερολίνου, προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να διερευνήσουν το που μπορούν να δημιουργήσουν δυνατότητες βελτίωσης και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Σχήμα 3.3-1: Περιβάλλον Εφαρμογής του Ενεργειακού Άτλαντα

Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής: Η βελτιστοποίηση της χρήσης της αστικής ενέργειας και η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στις πόλεις είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό του κλίματος. Ωστόσο, οι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη πόλεων συχνά δεν διαθέτουν επαρκή εργαλεία ή γνώσεις για να

³ <https://www.lrg.tum.de/ais/projekte/energieatlas-berlin/>

μπορούν να εκτιμήσουν εύλογα τις επιλογές χαμηλών εκπομπών άνθρακα όταν πραγματοποιούν αλλαγές στην ενεργειακή υποδομή. Για την επίτευξη χαμηλών εκπομπών και βιώσιμου ενεργειακού εφοδιασμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι στρατηγικές ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε νέες και υφιστάμενες μονάδες εφοδιασμού και υποδομές. Για να γίνει αυτό αποτελεσματικά, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων χρειάζονται επαρκείς πληροφορίες και συνεργασία με τους προμηθευτές ενέργειας για την υλοποίηση των αναγκαίων εξελίξεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο ενεργειακός άτλαντας αναπτύχθηκε ως εργαλείο για μια ολιστική εξέταση της κατανάλωσης ενέργειας, των ενεργειακών αναγκών, των δυνατοτήτων παραγωγής και εξοικονόμησης σε αστική και περιφερειακή κλίμακα, με ιδιαίτερη έμφαση στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο Energy Atlas παρέχεται ένα εικονικό μοντέλο 3D πόλης με περισσότερα από 550.000 κτήρια δομημένα σε σχέση με το μοντέλο σημασιολογικών δεδομένων του CityGML. Για το σύνολο των κτηρίων η εφαρμογή παρέχει το ποσοστό καταλληλότητας κάθε οροφής για την παραγωγή φωτοβολταϊκών και ηλιακής θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνει μεθόδους για τον υπολογισμό ενεργειακών αναγκών (θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και ζεστού νερού) ενώ αξιολογεί τις δυνατότητες ενεργειακής αναβάθμισης για κάθε ένα κτήριο, ωστόσο όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.3-2 οι τιμές αποθηκεύονται ως στατικές τιμές καθώς δεν υποστηρίζεται η δυναμική αποθήκευση δεδομένων στο χρόνο.



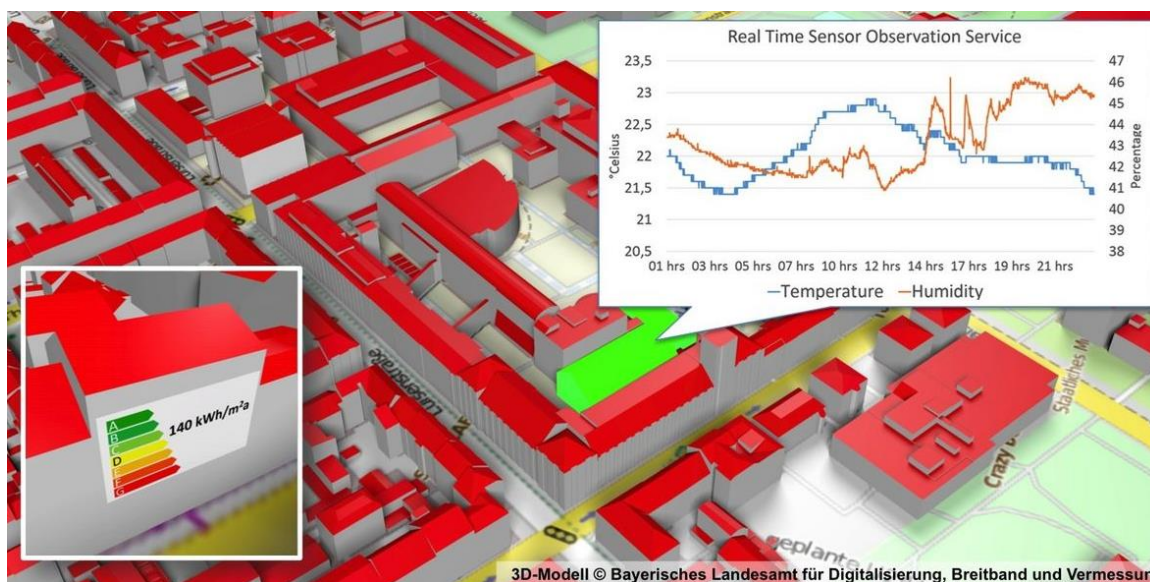
Σχήμα 3.3-2: Καταγραφή μετρήσεων της ενεργειακής κατανάλωσης στο Ενεργειακό Άτλαντα με στατικό τρόπο (generic attributes)

Συγκεκριμένα, το εργαλείο αυτό ενσωματώνει υψηλής ανάλυσης δεδομένα σχετικά με τους ενεργειακούς πόρους και την κτηριακή υποδομή σε μια κλίμακα πόλης. Χρήση των διαθέσιμων πληροφοριών, ο ενεργειακός άτλαντας αποτυπώνει την κατανάλωση ενέργειας και την αποδοτικότητα των κτηρίων, τους υπάρχοντες προμηθευτές ενέργειας και τις συνθήκες δικτύου, δημιουργώντας μια απογραφή της υφιστάμενης χρήσης της αστικής ενέργειας. Εκτός από τη καταγραφή της

υπάρχουσας χρήσης ενέργειας, ο ενεργειακός άτλαντας χρησιμοποιείται και ως εργαλείο ανάλυσης για την εκτίμηση π.χ. των ενεργειακών απαιτήσεων, των φωτοβολταϊκών και των γεωθερμικών δυνατοτήτων και των βέλτιστων δικτύων ισχύος, επιτρέποντας στους χρήστες να σχεδιάζουν αντίστοιχα σενάρια. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μοντέλο αυτό για έξυπνη διαχείριση αστικών περιοχών και σχεδιασμό ενεργειακής υποδομής. Οι μεταφορές, η διαχείριση των υδάτων και των αποβλήτων συμπεριλαμβάνονται επίσης στον ενεργειακό άτλαντα, επιτρέποντας ένα ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδιασμού, σχεδίασης και κατασκευής συστημάτων βιώσιμης ενέργειας σε μια πόλη. Το μοντέλο Energy Atlas του Βερολίνου έχει ανατηχθεί για να εξετάσει ιδιαίτερα θέματα όπως η γεωθερμική ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά, οι μεταφορές και η αποδοτικότητα των κτηρίων.

3.3.2. Υποδομή Δεδομένων για έξυπνες περιφέρειες (SDDI)

Όλο και περισσότεροι άνθρωποι μετακινούνται προς τις μητροπόλεις, με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα προβλήματα σχετικά με τον θόρυβο και την ρύπανση εντός αυτών. Στοιχώντας λοιπόν στην δημιουργία βιώσιμων συνθηκών εντός των πόλεων, ο βέλτιστος και αξιόπιστος σχεδιασμός αυτών είναι απαραίτητος. Η ιδέα "Smart District Data Infrastructure " (SDDI⁴) παρέχει στους χρήστες εργαλεία για την δυναμική διαχείριση των μοντέλων πόλεων με στόχο την λήψη αποφάσεων και την προσαρμογή σε μελλοντικές εξελίξεις/ τάσεις.

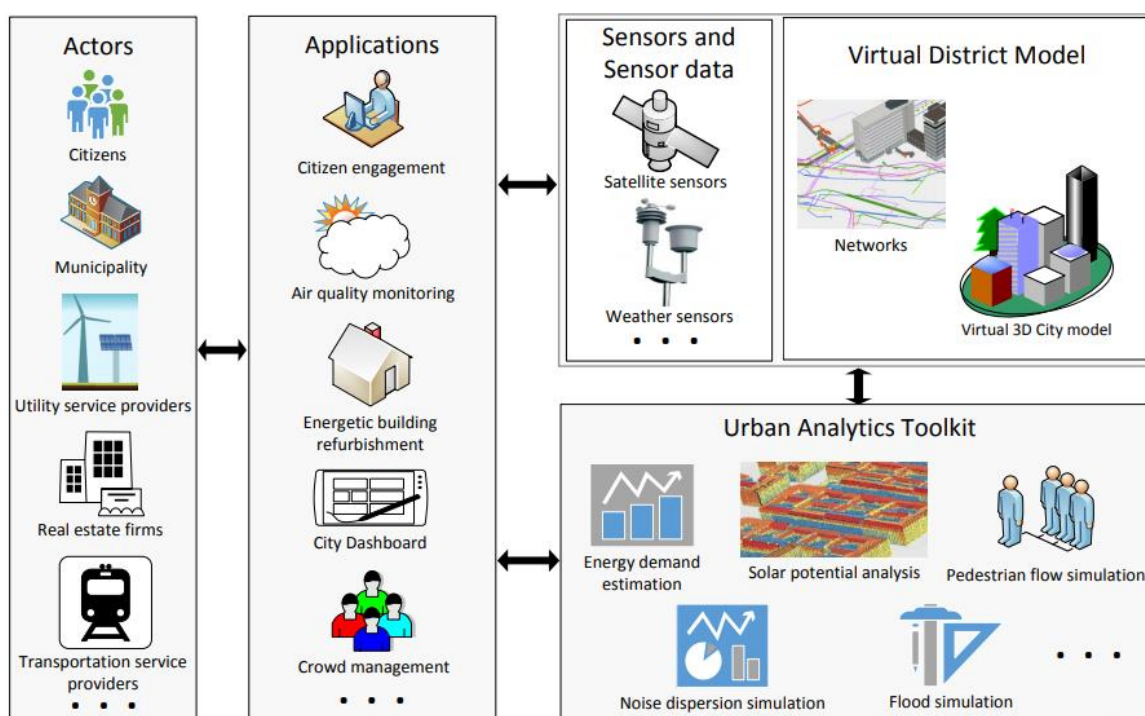


Σχήμα 3.3-3: Περιβάλλον ανάκτησης δυναμικών τιμών χρονοσειρών από αισθητήρα⁴

⁴ <https://www.lrg.tum.de/ais/projekte/sddi/>

Η Smart District Data Infrastructure (SDDI) βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα και αποτελείται από παράγοντες, εφαρμογές, αισθητήρες, αστικά εργαλεία ανάλυσης και ένα εικονικό μοντέλο περιοχής. Οι αισθητήρες μπορούν να αποτελούν σημεία μέτρησης του αστικού κλίματος, ραντάρ καιρού, μετρητές κατανάλωσης / έξυπνους μετρητές, βιντεοκάμερες και αισθητήρες κυκλοφορίας. Τα εργαλεία ανάλυσης αστικών περιοχών είναι λογισμικά που, για παράδειγμα, εκτιμούν τις ενεργειακές απαιτήσεις ή το δυναμικό ηλιακής ενέργειας για όλα τα κτήρια, προσομοιώνουν την πυκνότητα κυκλοφορίας και τις ροές ανθρώπων ή πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάδοσης θορύβου και πλημμύρας.

Η χρησιμότητα του SDDI είναι ότι όλες οι πληροφορίες, οι αισθητήρες και οι εφαρμογές από διαφορετικούς κλάδους βρίσκονται σε ένα κοινό, λεγόμενο σημασιολογικό μοντέλο 3D πόλης, το οποίο βασίζεται στο διεθνές πρότυπο CityGML. Αυτό το 3D μοντέλο πέρα του ότι είναι ένα εργαλείο οπτικοποίησης, είναι επίσης ένας διανομέας δεδομένων και μια βάση για πραγματοποίηση προσομοιώσεων και ανάλυσης. Για παράδειγμα, οι ενεργειακές ανάγκες των κτηρίων μαζί με την κατάσταση των υλικών τους και τους κοινωνικοοικονομικούς δείκτες μπορούν να συγκριθούν στο SDDI για να εξεταστούν ταυτόχρονα οι επιπτώσεις των προγραμματισμένων έργων ανακαίνισης σε διάφορους τομείς όπως το περιβάλλον, η κινητικότητα, η ενέργεια και τα κοινωνικά ζητήματα.



Σχήμα 3.3-4: Η ιδέα του Smart District Data Infrastructure (SDDI) (Moshrefzadeh, M. et al., 2017)

Το SDDI αναπτύχθηκε κυρίως στο πλαίσιο του έργου "Smart Sustainable Districts" (SSD), στηριζόμενο από το κορυφαίο ευρωπαϊκό ερευνητικό ίδρυμα Climate-KIC.

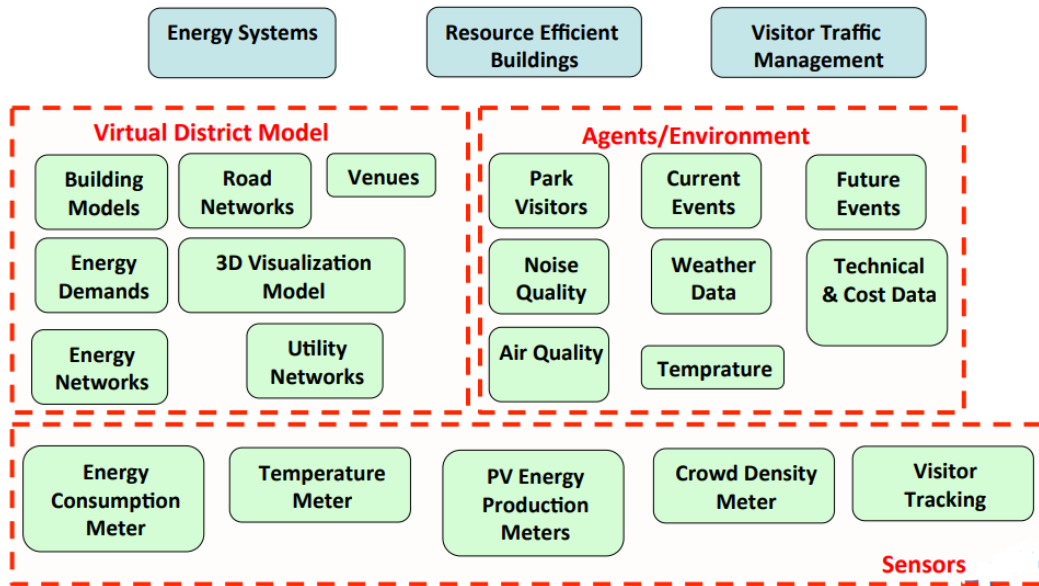
Στόχος είναι η μείωση των εκπομπών, η αύξηση ενεργειακής απόδοσης και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και η γενικότερη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις πόλεις. Η ιδέα SDDI χρησιμοποιείται ήδη σε τρία έργα αστικής ανάπτυξης, όπου σε αυτά συμπεριλαμβάνονται:

- (1) Το Ολυμπιακό Πάρκο της Βασίλισσας Ελισάβετ στο Λονδίνο (QEOP) με στόχο τη μετατροπή του πρώην Ολυμπιακού χώρου του 2012 σε μικτή ζωή και αναψυχή, με βιώσιμα κτήρια με ενεργειακά συστήματα (Εικόνα 3.3-1,2). Επίσης,
- (2) το Docks de St. Ouen στο Παρίσι, όπου στόχος είναι μια κατοικημένη και επιχειρηματική περιοχή να αναδειχθεί μέσα από μια βιομηχανική ζώνη. Τέλος,
- (3) το Green Moabit, στο Βερολίνο όπου πρόκειται για την ενεργειακή ανακαίνιση μεγάλου μέρους κτηρίων που συνάδει με βιώσιμες έννοιες για τη διαχείριση των υδάτων.

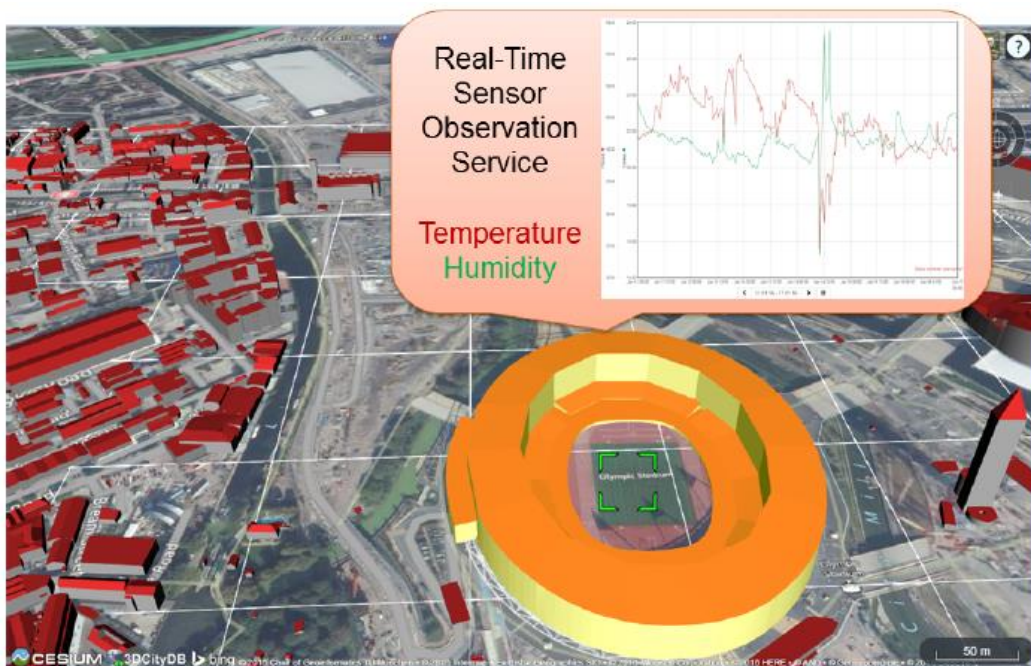
Το SDDI εισάγει την έννοια ενός εικονικού μοντέλου πόλης, το οποίο μοντελοποιεί τα φυσικά αντικείμενα της πόλης και μπορεί να εμπλουτιστεί με σημασιολογικές πληροφορίες. Το εικονικό αυτό μοντέλο (Virtual District Model) αποτελείται από τρία (3) στοιχεία:

- (i) Μοντέλο Πληροφοριών Τοπογραφίας, το οποίο παρέχει περιγραφή και απογραφή του φυσικού περιβάλλοντος, όπως κτήρια, δρόμοι, βλάστηση κ.λπ. με βάση το CityGML,
- (ii) Μοντέλα δικτύου, τα οποία ορίζουν λειτουργικές συμπεριφορές, τους πόρους και τις ροές τους (π.χ. δίκτυο μεταφορών, ενέργεια, νερό, δίκτυα επικοινωνίας και
- (iii) Μοντέλο απεικόνισης, το οποίο περιλαμβάνει 3D μοντέλα γραφικών (χωρίς σύνδεση ή σε πρόγραμμα περιήγησης) για την απόδοση των αντικειμένων περιοχής ή 2D χάρτες (εικόνες χαρτών ή χάρτες ιστού).

Τέτοια εικονικά μοντέλα είναι επεκτάσιμα για διαφορετικές εφαρμογές ενώ παράλληλα μπορούν να συνδεθούν και με άλλα δεδομένα / βάσεις δεδομένων. Κύριος στόχος είναι η σύνδεση τους με δυναμικά δεδομένα πραγματικού χρόνου από έξυπνους μετρητές εγκατεστημένους στα κτήρια, όπως για παράδειγμα μετρήσεις καταναλώσεων ή ροές κυκλοφορίας σε δρόμους ή πεζοδρόμια.



Εικόνα 3.3-1: Διαδικασία υλοποίησης SDDI – Ομαδοποιημένα αντικείμενα προς εισαγωγή (Περίπτωση QEOP) (Moshrefzadeh, M. et al. 2017)

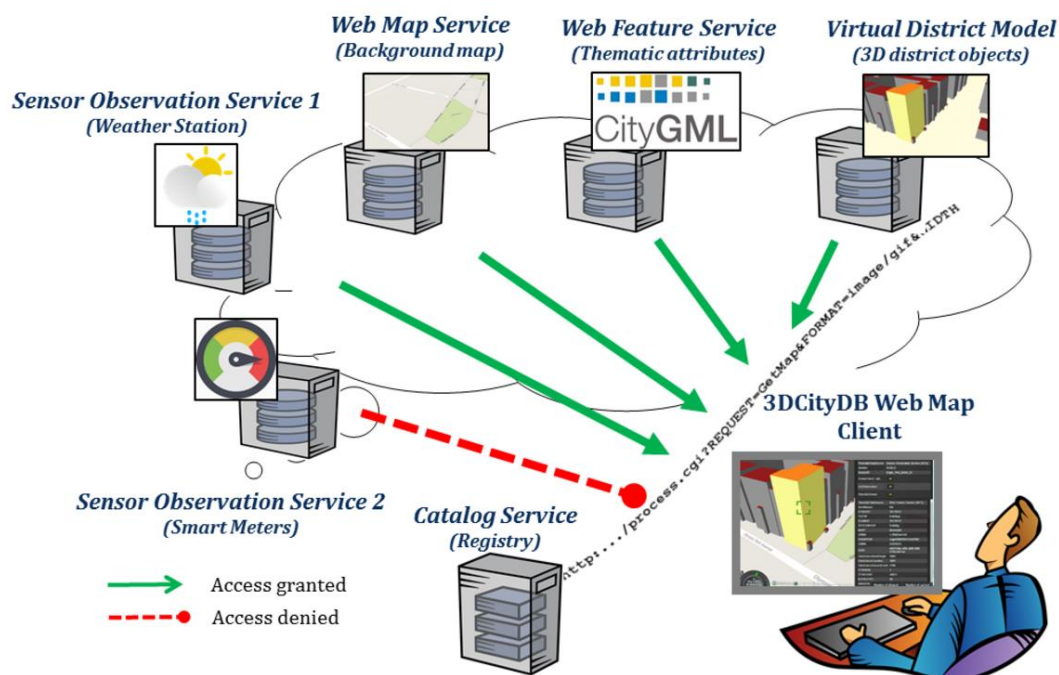


Εικόνα 3.3-2: Ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων από αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας στο Ολυμπιακό Πάρκο QEOP⁵

Βασικά συνθετικά μέρη υλοποίησης του SDDI, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, είναι τα αντικείμενα πόλης δομημένα σε σχέση με το μοντέλο σημασιολογικών δεδομένων του CityGML (3D district objects). Υπηρεσίες όπως η Web Feature Service που επιτρέπουν στους χρήστες μέσω interface να

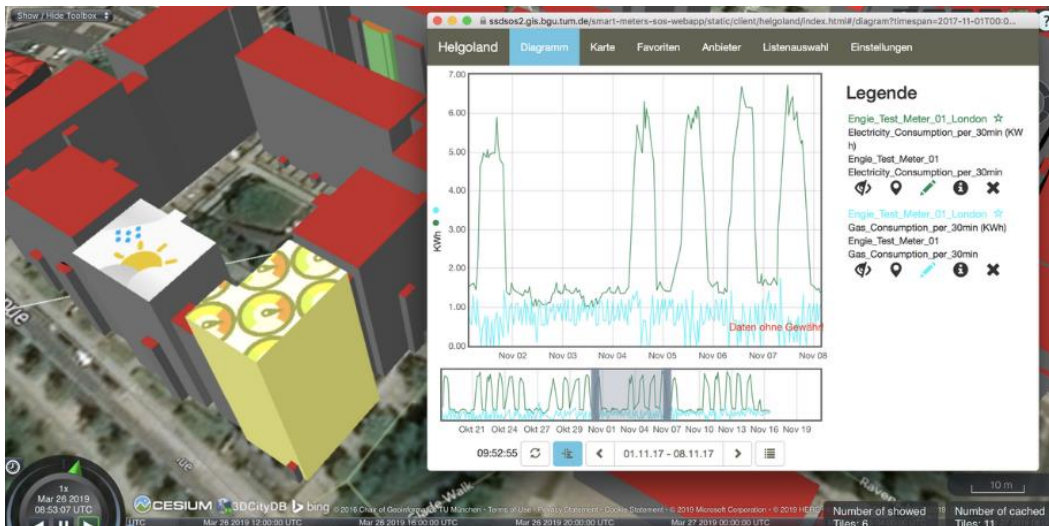
⁵ <https://www.lrg.tum.de/ais/projekte/sddi/>

ανακτήσουν θεματικά αντικείμενα πόλης αποθηκευμένα σε 3D βάση δεδομένων, ενώ αντίστοιχα υπηρεσίες όπως η Web Map Service επιτρέπουν την ανάκτηση χαρτογραφικού υπόβαθρου. Επιπλέον, μαζί με τις υπηρεσίες ανάκτησης μετεωρολογικών και μετρητικών δεδομένων από smart meters μέσω των Sensor Observation Service μπορούν να αποτελέσουν τα συνθετικά μέρη για την από κοινού διαχείριση και οπτικοποίηση του σημασιολογικού μοντέλου πόλης με δυναμικό χαρακτήρα εντός του 3D CityDB Web Map Client.



Εικόνα 3.3-3: SDDI – αναπαράσταση του δικτύου σύνδεσης διαφορετικών πηγών (Chaturvedi, K.; Matheus, A., 2018)

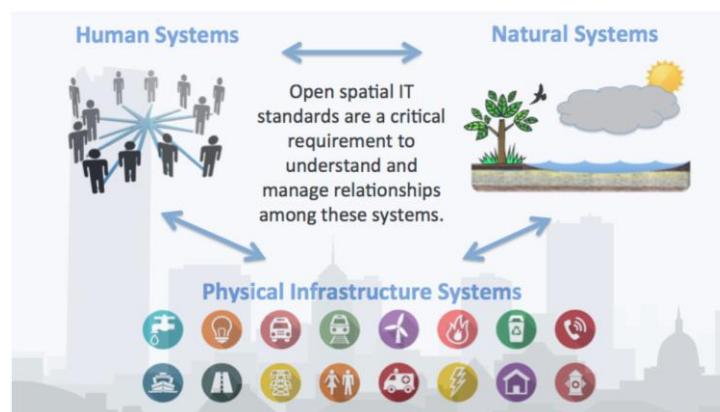
Στην παρακάτω εικόνα 3.3-4 φαίνεται η ανάκτηση δεδομένων χρονοσειρών από «Εξυπνο» μετρητή που είναι εγκαταστημένος στο κτήριο και η γραφική παρουσίαση αυτών στο χρονικό πλαίσιο μιας εβδομάδας. Η ανάκτηση αυτή πραγματοποιείται μέσω του Sensor Observation Service για αυτόν τον εκάστοτε μετρητή. Ουσιαστικά, τα Sensor Observation Services χρησιμοποιούνται για την σύνδεση και ανάκτηση πραγματικού χρόνου δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς (καταγραφή θερμοκρασίας, υγρασίας, ταχύτητας αέρα) ή μετρητές για την παρακολούθηση ενεργειακών καταναλώσεων ή κατανάλωσης αερίου.



Εικόνα 3.3-4: Ανάκτηση δυναμικών δεδομένων πραγματικού χρόνου από μετρητές μέσω της υπηρεσίας Sensor Observation Services⁶

3.3.3. OGC Future City Pilot Phase 1 (FCP1)

Το Future City Pilot Phase 1 (FCP1, 2016) είναι μια πρωτοβουλία του OGC για τη διαλειτουργικότητα και τα ανοιχτά πρότυπα, σε συνεργασία με το buildingSMART International (bSI), οργανισμός που υποστηρίζει το πρότυπο Industry Foundation Class (IFC) και το Building Information Model (BIM). Το πιλοτικό αυτό πρόγραμμα στοχεύει στο να επιδείξει και να βελτιώσει την ικανότητα των υποδομών χωρικών δεδομένων να υποστηρίζουν την ποιότητα ζωής, τις πρωτοβουλίες πολιτών και την αστική προσαρμοστικότητα. Επιπλέον, στοχεύει στο πως τα δύο πρότυπα IFC και CityGML σε συνεργασία μπορούν να παρέχουν στα ενδιαφερόμενα μέρη πληροφορίες, γνώση για να βελτιώσουν παραμέτρους όπως οικονομία, περιβάλλον και κοινωνία μέσα στις πόλεις.



Εικόνα 3.3-5: Αναπαράσταση αλληλεξαρτώμενων μερών στο πλαίσιο εφαρμογής του FCP1⁷

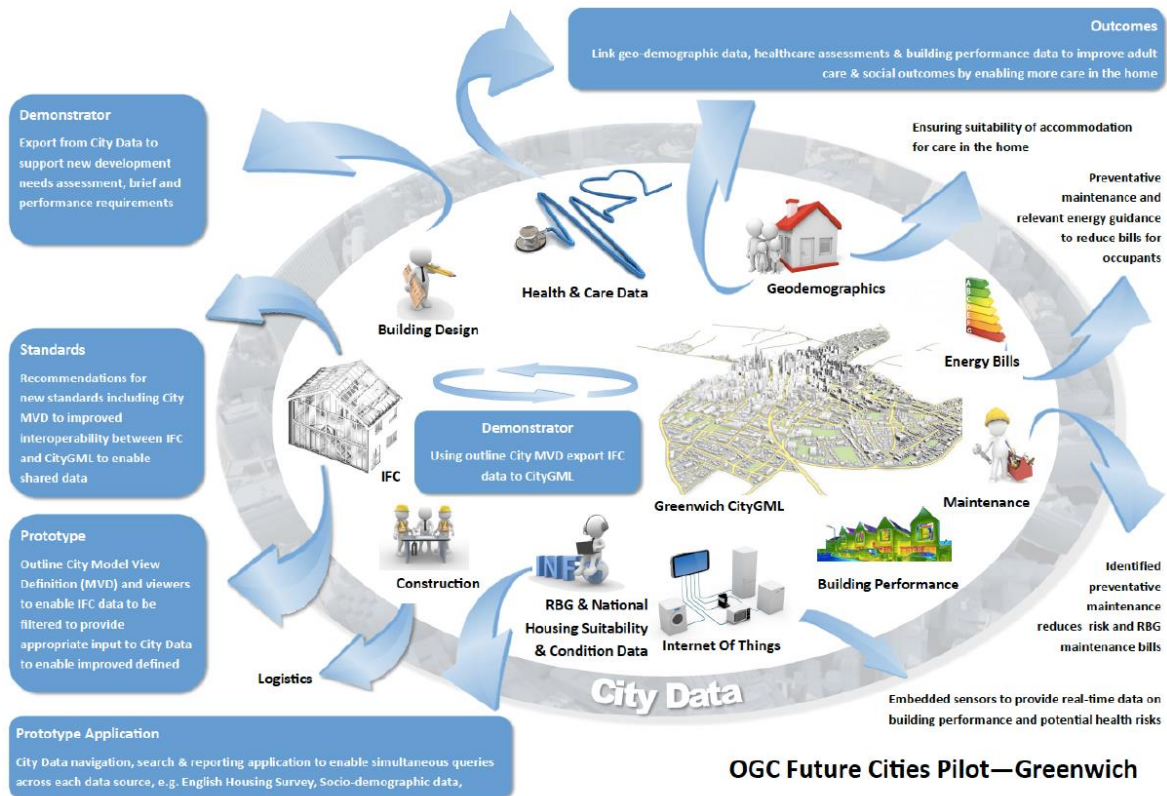
⁶ <https://www.lrg.tum.de/ais/projekte/sddi/>

Κατά τη διάρκεια του πιλοτικού προγράμματος, δημιουργήθηκαν πολλαπλά σενάρια βάσει πραγματικών απαιτήσεων που επικεντρώθηκαν στην:

- (i) διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο διεθνών προτύπων: Industry Foundation Classes (IFC) και CityGML; Το CityGML [OGC 12-019] είναι πρότυπο για την αναπαράσταση τρισδιάστατων πόλεων και τοπολογικών χαρακτηριστικών αυτών, ενώ το IFC είναι πρότυπο ανταλλαγής πληροφοριών του κτηριακού μοντέλου.
- (ii) προσομοίωση πλημμυρών για 3D πόλεις, όπου περιγράφονται διάφορα σενάρια προσομοίωσης πραγματικού χρόνου των χαρακτηριστικών της ροής του νερού σε σχέση με το χρόνο και το χώρο σε διάφορα επίπεδα ανάλυσης (από cm σε km απόσταση πλέγματος). Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνεται ποια αντικείμενα που αφορούν τον κτηριακό τομέα θα επηρεαστούν σε περίπτωση πλημμυρικού φαινομένου.
- (iii) υποστήριξη την καταγραφής μετρήσεων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και άλλων ιδιοτήτων που αφορούν την παράμετρο του χρόνου σε τρισδιάστατα μοντέλα πόλης. Η σημασία αυτού του σεναρίου έγκειται στο πως δυναμικά μοντέλα πόλης μπορούν να αποδοθούν και να χρησιμεύσουν κατά τη λήψη αποφάσεων και εφαρμογής καλύτερης ανάλυσης σε κάθε περίπτωση.

Η έκθεση Engineering Report (ER) του Future City Pilot Phase 1, 2017 εστιάζει κατά κύριο λόγο στο τρίτο (iii) σενάριο, επισημαίνοντας την έννοια των Dynamizer που αναλύεται εκτενώς στην Ενότητα 6 της παρούσας μελέτης. Η έννοια των 'Dynamizer' επιτρέπει την αναπαράσταση δυναμικών δεδομένων με διαφορετικούς και γενικούς τρόπους και παρέχει μια μέθοδο για την έγχυση των δυναμικών ιδιοτήτων των αντικειμένων πόλεως στις στατικές αναπαραστάσεις τους. Επιπλέον, παρέχει τρόπους σύνδεσης των μετρήσεων και παρατηρήσεων από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένα με τα αντίστοιχα αντικείμενα που αντιπροσωπεύουν. Η εφαρμογή των Dynamizers υλοποιείται στην έκδοση CityGML 2.0 ως Application Domain Extension (ADE), επιτρέποντας στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των σημασιολογικών τρισδιάστατων αντικειμένων να αποκτήσουν δυναμικό χαρακτήρα, χωρίς να χρειαστεί να αλλάξει το αρχικό σημασιολογικό μοντέλο κατά CityGML. Τα Dynamizers προγραμματίζεται στην καινούργια έκδοση του CityGML v3, να ενσωματωθούν στο κύριο μοντέλο του CityGML.

⁷ <https://www.lrg.tum.de/gis/projekte/future-cities-pilot/>



Εικόνα 3.3-6: Πώς μπορούμε να κάνουμε πιο έγκαιρες παρεμβάσεις και να βελτιώσουμε την κατάσταση της στέγασης για να μειώσουμε τη ενεργειακή ένδεια από τα καύσιμα και να βελτιώσουμε τις υπηρεσίες φροντίδας ενηλίκων στο σπίτι (OGC, Annex B-FCP1, 2016)

4. ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ BIM – BES – CITYGML



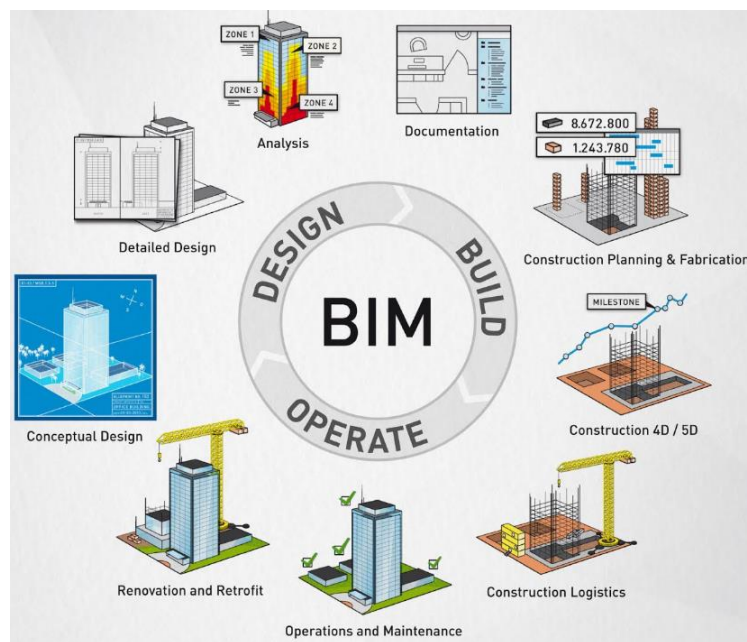
4.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ (BIM)

Το Building Information Modeling (BIM) αφορά μια ευφυής διαδικασία 3D μοντελοποίησης που παρέχει σε αρχιτέκτονες, μηχανικούς και κατασκευαστές την πληροφόρηση και τα εργαλεία για μια πιο αποτελεσματική σχεδιαστική διαδικασία, κατασκευή και διαχείριση της κτηριακής υποδομής (autodesk.com)

Τα μοντέλα κτηριακής πληροφορίας (BIM) είναι μια διαδικασία τρισδιάστατης μοντελοποίησης που περιγράφει τις γεωμετρικές και σημασιολογικές ιδιότητες του κτηρίου και παρακολουθεί το κύκλο ζωής αυτού. Αποτελούν ένα αξιόπιστο εργαλείο για την διάχυση πληροφορίας σε σχέση με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων στο κατασκευαστικό κομμάτι καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του κτηρίου.

Ένα μοντέλο BIM αποτελείται από «έξυπνα» στοιχεία, «οπτικά ισοδύναμα» δομικών στοιχείων, τα οποία φέρουν τις ιδιότητές τους (θερμομονωτικές, ηχομονωτικές, κ.λπ.) υπό τη μορφή πληροφοριών. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα διαχείρισης των πληροφοριών σε οποιοδήποτε στάδιο του κύκλου ζωής του έργου, προκειμένου μέσω της προσομοίωσης και της ανάλυσης, να αποφευχθούν χρονοβόρα λάθη και να υποβοηθηθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Στις εφαρμογές BIM, τα κτήρια αποτελούνται από ένα σύνολο αντικειμένων που αντιπροσωπεύουν πραγματικά δομικά στοιχεία όπως τοίχους, παράθυρα, πλάκες, στέγες, κ.λπ., με αποτέλεσμα οι αλλαγές να ενημερώνονται αυτόματα σε όλες τις όψεις του κτηρίου. Το «πληροφοριακό» μοντέλο του κτηρίου (Building Information Model) δε βασίζεται μόνο σε ένα λογισμικό και μία τρισδιάστατη σχεδιαστική απεικόνιση, αλλά επαναπροσδιορίζει τις μέχρι τώρα παραδοσιακές φάσεις σχεδιασμού μέσω της αρχής της διαλειτουργικότητας, η οποία αναφέρεται στη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών μορφών αρχείων ή διαφορετικών ειδών λογισμικών. Μέσω αυτής, καθίσταται εφικτή η διαχείριση του έργου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, ενώ γεφυρώνεται η επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και διευκολύνεται η λήψη αποφάσεων.



Σχήμα 4.1-1: Εφαρμογές διαδικασίας BIM στο κατασκευαστικό τομέα⁸

Οι Howell & Batcheler (2005) διατύπωσαν τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας BIM ως εξής:

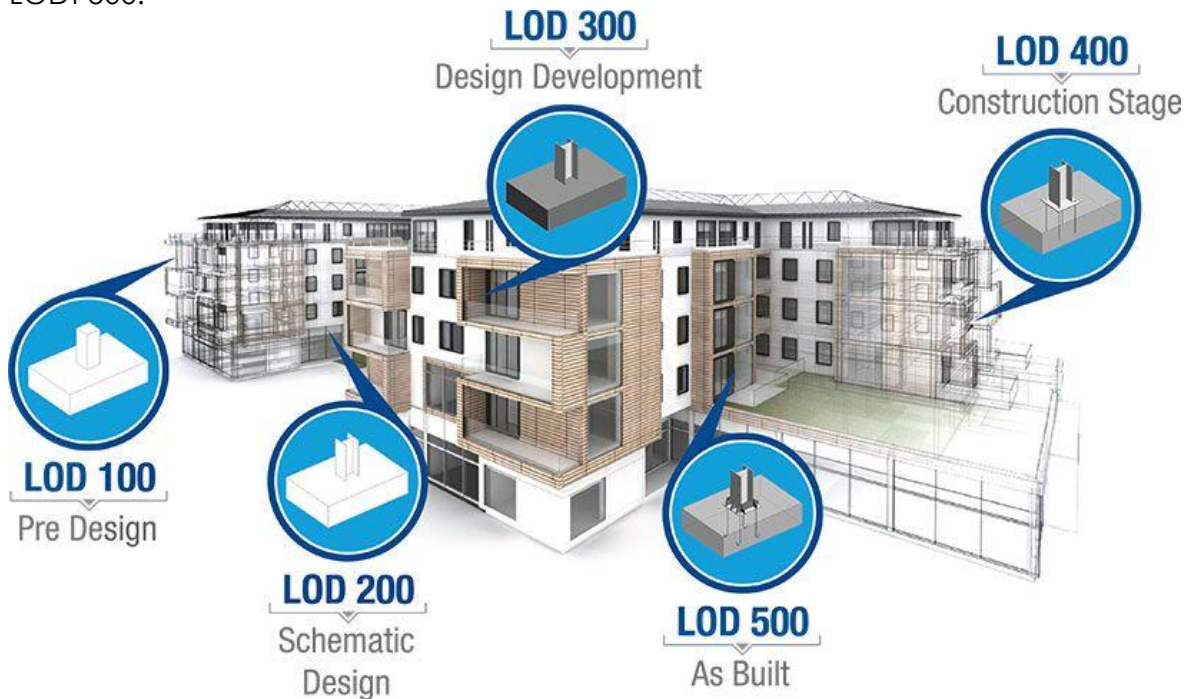
- Γεωμετρική ακρίβεια του μοντέλου
- Δυνατότητα δημιουργίας αντικειμένων διαφορετικών ειδικοτήτων σε ένα κοινό μοντέλο
- Δυνατότητα εύκολης αναβάθμισης των δομικών στοιχείων ενός μοντέλου (πόρτες, παράθυρα, κλπ), διατηρώντας το με αυτόν τον τρόπο σύγχρονο στις αλλαγές που δέχεται το πραγματικό κτήριο
- Η συγκέντρωση της πληροφορίας σε ένα αρχείο BIM δίνει τη δυνατότητα για την εύκολη προσθήκη ενδεχόμενης μελλοντικής πληροφορίας, καθιστώντας το μοντέλο ιδιαίτερα εύχρηστο.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο σημασιολογικό μοντέλο στην BIM μοντελοποίηση είναι το διεθνές πρότυπο ανταλλαγής δεδομένων Industry Foundation Classes (IFC). Το πρότυπο IFC είναι ένα μοντέλο ανοιχτού κώδικα το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον οργανισμό buildingSMART και βασίζεται στην γλώσσα EXPRESS ως μέλος του: Standard for the Exchange of Product model data (STEP) standard (ISO 103030) (buildingSMART, 2013). Το IFC σχήμα εξελίσσεται συνεχώς και η πιο πρόσφατη έκδοση να είναι η IFC4 το 2013, ενώ προηγούμενες εκδόσεις είναι οι 1.0, 1.5, 1.51 και 2x, 2x2, 2x3.

Το πρότυπο IFC χρησιμοποιείται ως μέσω περιγραφής, ανταλλαγής και διαμοιρασμού της αποθηκευμένης πληροφορίας με στόχο τη διαχείριση αυτής

⁸ <https://www.graebert.com/blog/tutorial/what-are-bim-standards/>

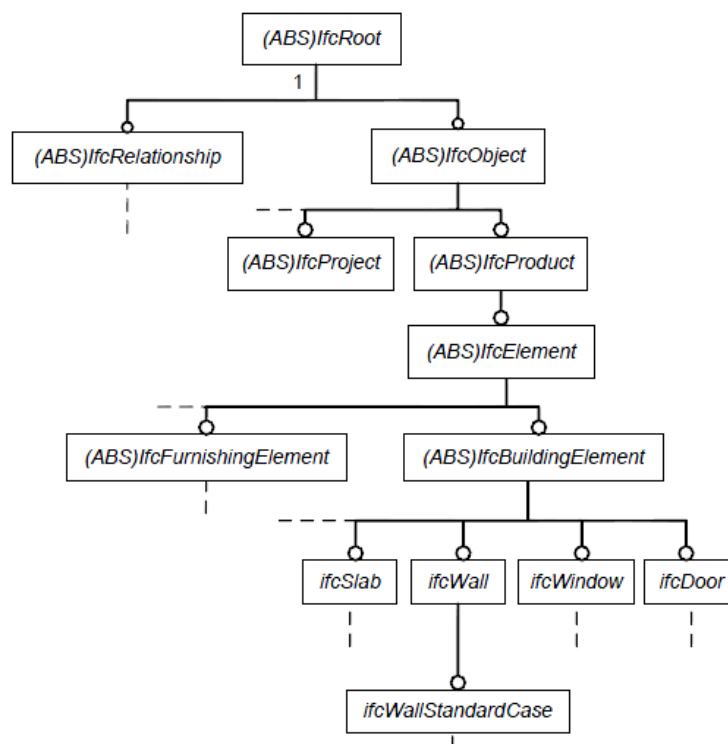
κατά τον κύκλο ζωής του κτηρίου (El-Mekawy et al., 2012). Χρησιμοποιείται ως μέσο πληροφόρησης των σημασιολογικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτηριακού μοντέλου και περιέχει όλη την πληροφορία και τις σχέσεις μεταξύ των δομικών του στοιχείων. Οι γεωμετρικές κατηγορίες που υιοθετεί το πρότυπο IFC 2X3 είναι οι ακόλουθες τρεις (3), b-rep (boundary representations), swept volumes και CSG (Constructive Solid Geometry). Το IFC ταξινομεί τα μοντέλα BIM σε πέντε ομάδες σύμφωνα με τις λεπτομέρειες που περιέχουν με βάση τα Επίπεδα Ανάπτυξης (Levels of Development (LOD)) όπως τα ονομάζει, από LOD 100 έως LOD 500.



Σχήμα 4.1-2: Επίπεδα Ανάπτυξης (Levels of Development (LOD)) των μοντέλων BIM κατά το IFC (TrueCADD)

Το IFC4 σχήμα περιγράφει σημαντικά μεγάλη σημασιολογική πληροφορία ενώ περιλαμβάνει σε αριθμό πολλές κλάσεις (130 ορισμένοι τύποι, 207 τύποι απαρίθμησης, 60 τύποι επιλογών, 776 οντότητες, 47 λειτουργίες και 2 κανόνες).

Το μοντέλο δεδομένων του προτύπου IFC ακολουθεί μια ιεραρχική δομή επιτρέποντας την κληρονομικότητα των χαρακτηριστικών μεταξύ των οντοτήτων. Η δομή του ιεραρχικά δομημένου μοντέλου στο IFC αναπαρίσταται χρήση γραφικών συμβόλων EXPRESS-G και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1-3: EXPRESS-G διάγραμμα της δομής του IFC (Dimyadi et al., 2014)

4.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΗΡΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (BES)

Το *Green Building XML (gbXML⁹)* είναι ένα ανοικτό πρότυπο διαλειτουργικότητας που βοηθά στη διευκόλυνση της μετάφρασης πληροφοριών από 3D μοντέλα πληροφοριών κτηρίων (BIM) σε εργαλεία ανάλυσης μηχανικών για ανάλυση θέρμανσης και ψύξης φορτίων, φωτισμό, υπολογιστική δυναμική ρευστού (CFD) αλλά και δυνατότητας προσομοίωσης ενέργειας.

Το πρότυπο gbXML schema βρίσκεται στην έκδοση 6.01 – Ιανουάριος 2017. Σχεδόν κάθε εργαλείο BIM αλλά και τα περισσότερα πακέτα λογισμικών μηχανικής υποστηρίζουν το πρότυπο gbXML, το πλήθος αυτών είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα¹⁰ του προτύπου. Το σχήμα gbXML δημιουργήθηκε για τους σχεδιαστές ως μέσο απόκτησης πληροφοριών των χαρακτηριστικών κατανάλωσης ενέργειας των οικοδομικών έργων.

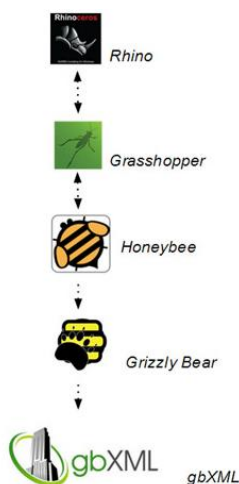
⁹ https://www.gbxml.org/schema/6-01/GreenBuildingXML_Ver6.01.xsd

https://www.gbxml.org/schema_doc/6.01/GreenBuildingXML_Ver6.01.html

¹⁰ https://www.gbxml.org/Software_Tools_that_Support_GreenBuildingXML_gbXML.html

4.2.1. Εργαλεία μοντελοποίησης για BES

Μερικά από τα εργαλεία BIM και CAD που στηρίζουν το πρότυπο gbXML για ενεργειακή μοντελοποίηση και προσομοίωση (Building Energy Simulation - BES) είναι το **AutoCAD Architecture**, το **AutoCAD MEP**, το **Revit** της Autodesk, το **Rhino 3D** και το **Grasshopper** της Rhinoceros 3D, όπου μπορεί να δημιουργεί, να επεξεργάζεται, να αναλύει, να εγγράφει, να απεικονίζει, να δημιουργεί animations και να μεταφράζει Nurbs (Non-Uniform Rational B-Splines), καμπύλες, επιφάνειες και στερεά, νέφος σημείων και πολυγωνικά πλέγματα (meshes). Το Rhino 3D παρέχει μέσω του Grasshopper εργαλεία plug-in (Ladybug και Honeybee tools) για περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Το Grasshopper διαθέτει επίσης το Grizzly Bear Plug-in, το οποίο χρησιμοποιεί αντικείμενα του Honeybee για να τα μεταφράσει σε gbXML schema. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει τη δημιουργία της δομής gbXML, επιτρέποντας να προσαρμοστούν μόνο τα απαραίτητα στοιχεία, όπως η απαραίτητη γεωμετρία, τα χρονοδιαγράμματα λειτουργίας, χαρακτηριστικά υλικών, χωρίς να χρειάζεται να γίνει η διαχείριση της σύνθετης γεωμετρίας BIM του κτηρίου, επιταχύνοντας την διαδικασία της προσομοίωσης ενέργειας και των υπολογισμών φορτίων θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου (Σχήμα 4.2-1).



Σχήμα 4.2-1: Ροή εργασίας μετάφρασης γεωμετρίας κτηρίου σε gbXML¹¹

Επιπλέον, το **SketchUp** της Trimble είναι ένα ακόμη πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης κτηρίου για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σχεδίασης όπως αρχιτεκτονική, εσωτερική διακόσμηση, αστικό και μηχανικό σχεδιασμό, animation και gaming. Το SketchUp διαθέτει το **Legacy OpenStudio SketchUp Plug-in**¹² του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) που δημιουργήθηκε για το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Το Plug-in του SketchUp διευκολύνει τη

¹¹ <http://core.thorntontomasetti.com/gbxml-meets-rhino-and-grasshopper/>

¹² <https://github.com/NREL/legacy-openstudio>

δημιουργία και την επεξεργασία της γεωμετρίας του κτηρίου στα αρχεία εισόδου EnergyPlus. Επιπλέον, επιτρέπει την εφαρμογή προσομοιώσεων EnergyPlus και την διαχείριση των αποτελεσμάτων εντός του προγράμματος σχεδίασης 3D SketchUp. Επιπλέον, το SketchUp διαθέτει ως plugin το **gModeller**¹³ της GreenspaceLive Ltd, το οποίο επιτρέπει στους αρχιτέκτονες, τους σχεδιαστές και τους σχεδιαστές ενεργειακών κτηρίων να χρησιμοποιούν το SketchUp για τη δημιουργία αρχείων gbXML και EnergyPlus που περιλαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για περαιτέρω ενεργειακή μοντελοποίηση. Το gModeller είναι συμβατό με τα περισσότερα συστήματα ενέργειας και μοντελοποίησης και απλοποιεί τη διαδικασία μοντελοποίησης για την ακριβή ανάλυση της ενέργειας και τα σενάρια πρώιμης φάσης "what-if".

4.2.2. Εργαλεία ανάλυσης BES

Κατά αντιστοιχία, εργαλεία ανάλυσης κτηρίων αποτελούν το **Green Building Studio**¹⁴ της Autodesk σε συνεργασία με τα εργαλεία **DOE-2.2**¹⁵ που αποτελεί μία από τις πιο προηγμένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μηχανές ανάλυσης κτηρίων, το **EnergyPlus**¹⁶ που αφορά τον διάδοχο του DOE-2 που έχει προηγμένες δυνατότητες ανάλυσης κτηρίων, το **eQuest** που αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο γραφικό εργαλείο ανάλυσης ενέργειας κτηρίου στον κόσμο και το **VRML & X3D**, που αφορά γλώσσα μοντελοποίησης εικονικής πραγματικότητας και η XML έκδοσή της που χρησιμοποιείται για την περιγραφή τρισδιάστατων περιβαλλόντων. Το **Autodesk Insight 360**¹⁷ είναι ένα cloud-based λογισμικό, το οποίο δίνει τη δυνατότητα σε αρχιτέκτονες και μηχανικούς να σχεδιάζουν πιο ενεργειακά αποδοτικά κτήρια με προηγμένες μηχανές προσομοίωσης και δεδομένα ανάλυσης επιδόσεων κτηρίων ενσωματωμένα στο Revit. Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση το Insight εξάγει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενέργεια σε gbXML schema. Η ανάλυση συστημάτων Revit 2020.1 Systems (**Revit Systems Analysis**¹⁸) παρέχει μια πλατφόρμα για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της μοντελοποίησης των συστημάτων HVAC, επιτρέποντας στους χρήστες να κάνουν αποφάσεις σχεδιασμού βάσει δεδομένων από την αρχή.

Το Rhino 3d παρέχει μέσω του γραφικού παραμετρικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος Grasshopper εργαλεία plug-in (Ladybug και Honeybee tools) για περιβαλλοντική ανάλυση, που μέσω από το 2D και 3D περιβάλλον βοηθούν στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη αλληλεπίδραση του δομημένου περιβάλλοντος με το περιβάλλοντα χώρο και τις συνθήκες του μικροκλίματος. Παρέχει δυνατότητες

¹³ <https://greenspacelive.com/site/products/gmodeller/>

¹⁴ <https://gbs.autodesk.com/GBS/>

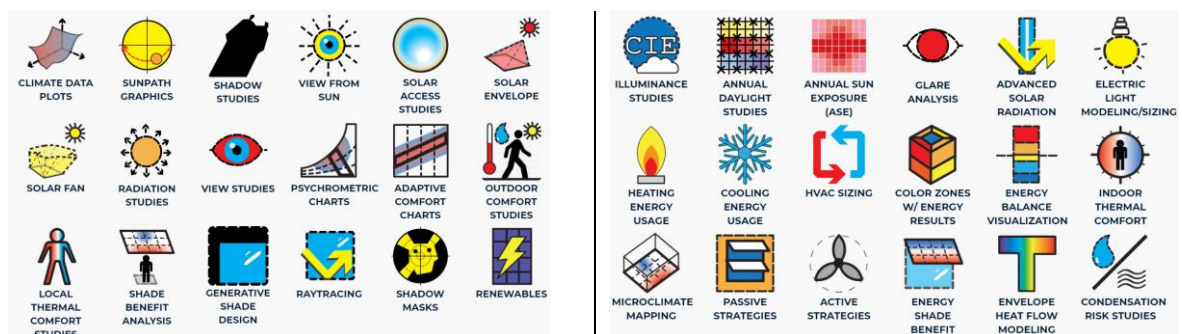
¹⁵ <http://www.doe2.com/>

¹⁶ <https://energyplus.net/>

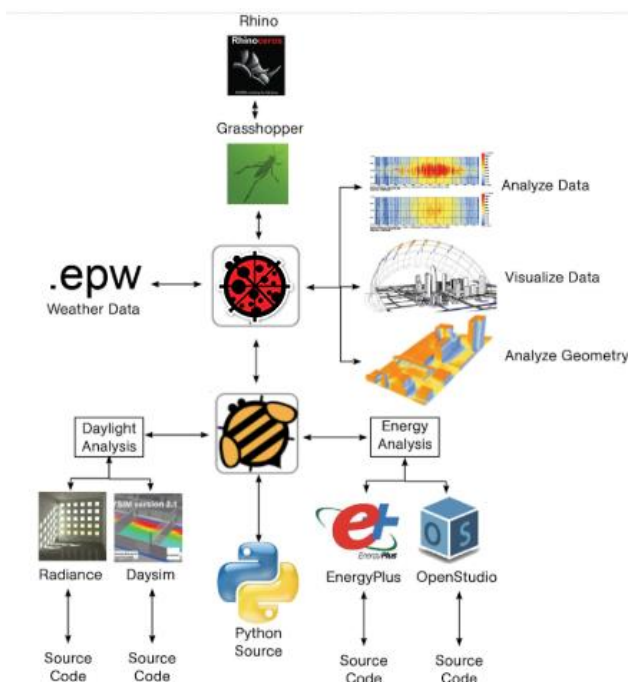
¹⁷ <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>

¹⁸ <https://blogs.autodesk.com/revit/2019/08/21/revit-systems-analysis/>

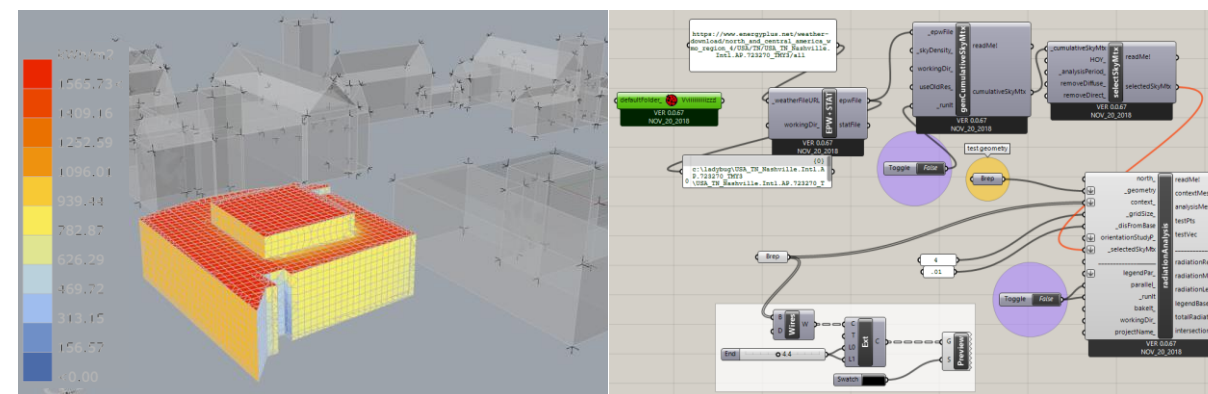
ενεργειακής προσομοίωσης και μοντελοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των διαδομένων λογισμικών EnergyPlus (US Department of Energy), RADIANCE (Ward, 2004) και Daysim (Reinhart and Walkenhorst, 2001), δίνοντας δυνατότητες τόσο απεικόνισης των αποτελεσμάτων αλλά και εκθέσεις σε .csv μορφότυπο (Σχήμα 4.2-3). Στο Σχήμα 4.2-4 φαίνεται το διάγραμμα σύνδεση στο παραμετρικό περιβάλλον του Grasshopper για την δημιουργία και ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κέλυφος του κτηρίου. Για την προσομοίωση τα εργαλεία αντλούν δεδομένα καιρού (.epw) καθώς επίσης διαβάζουν την γεωμετρία του κτηρίου δημιουργώντας πλέγμα σημείων προς ανάλυση.



Σχήμα 4.2-2: Δυνατότητες προσομοίωσης και ανάλυσης Ladybug και Honeybee tool

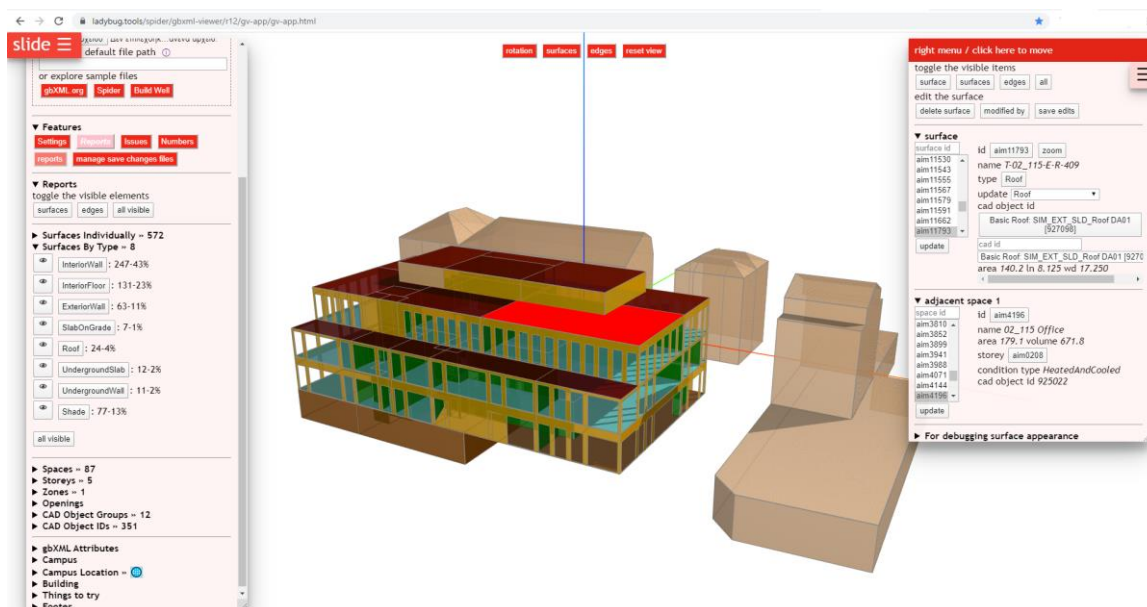


Σχήμα 4.2-3: Σύνδεση LB, HB με διαδομένα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης και τη γλώσσα προγραμματισμού python



Σχήμα 4.2-4: Παραμετρικό διάγραμμα ροής για ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας

Επιπλέον, το εργαλείο **Ladybug Tools**¹⁹ παρέχει ένα πρόγραμμα προβολής gbXML, με ονομασία Aragog gbXML Viewer (Σχήμα 4.2-5), που βασίζεται σε ανοιχτού κώδικα πρότυπα και επιτρέπει την θέαση οποιοδήποτε αρχείου gbXML των χαρακτηριστικών του και της γεωμετρίας του σε οποιοδήποτε πρόγραμμα περιήγησης στο διαδίκτυο αλλά και την διαδραστική σημασιολογική διόρθωση σημασιολογικών οντοτήτων του κτηρίου. Παρέχει δυνατότητες όπως αλλαγή του surface type κάθε σημασιολογικής ομάδας, διόρθωση των λανθασμένων γειτονικών επιφανειών και προσδιορισμό των vertex για κάθε οντότητα με διαδραστικό τρόπο. Στη παρακάτω εικόνα φαίνονται το πλήθος των διαφορετικών τύπων επιφανειών του κτηρίου σύμφωνα με την σημασιολογική δομή του gbXML (InteriorWall, InteriorFloor, ExteriorWall, SlabOnGrade, Roof, UndergroundSlab, UndergroundWall, Shade).



Σχήμα 4.2-5: Διαδραστικό διαδικτυακό περιβάλλον Aragog gbXML Viewer

¹⁹<https://www.ladybug.tools/spider-gbxml-tools/spider-gbxml-viewer/v-0-17-07/app-viewer/spider-gbxml-viewer.html>

Το **OpenStudio** είναι μια συλλογή από εργαλεία λογισμικού πολλαπλών πλατφορμών που υποστηρίζουν ολόκληρη την ενεργειακή μοντελοποίηση των κτηρίων χρησιμοποιώντας το **EnergyPlus** και την ανάλυση ημέρας (daylight) χρησιμοποιώντας **Radiance**²⁰. Οι γραφικές εφαρμογές που διαθέτει το OpenStudio είναι το OpenStudio SketchUp Plug-in, το OpenStudio Application, το ResultsViewer και το Parametric Analysis Tool. Το Plug-in OpenStudio SketchUp όπως αναλύεται παραπάνω είναι μια επέκταση στο εργαλείο μοντελοποίησης SketchUp του Trimble που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν γρήγορα τη γεωμετρία που απαιτείται για το EnergyPlus. Επιπλέον, το OpenStudio υποστηρίζει την εισαγωγή gbXML και IFC για δημιουργία γεωμετρίας. Η εφαρμογή OpenStudio είναι μια πλήρως εξοπλισμένη γραφική διεπαφή για τα μοντέλα του OpenStudio, συμπεριλαμβανομένων του κελύφους του κτηρίου (building envelope²¹), των φορτίων (loads), των χρονοδιαγραμμάτων (schedules) και του HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning System, σύστημα θέρμανσης - ψύξης - κλιματισμού). Το ResultsViewer επιτρέπει την περιήγηση, τη γραφική παράσταση και τη σύγκριση δεδομένων εξόδου προσομοίωσης, ειδικά χρονοσειρών. Επιπλέον, το OpenStudio είναι το μοναδικό λογισμικό που πληρεί τα κριτήρια επιπέδου 2 της πιστοποίησης gbXML Geometry και είναι ενημερωμένο σύμφωνα με τις τελευταίες ενημερώσεις γεωμετρίας στο πρότυπο gbXML.

Το EnergyPlus™ αφορά πρόγραμμα προσομοίωσης ενέργειας κτηρίου και μοντελοποίησης κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, εξαερισμό, φωτισμό και φορτία και χρήσης νερού σε κτήρια. Τα χαρακτηριστικά και δυνατότητες του EnergyPlus περιλαμβάνουν:

- Ολοκληρωμένη, ταυτόχρονη λύση συνθηκών σε θερμικές ζώνες και της απόκρισης του συστήματος HVAC, λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο κάθε ζώνης/χώρου σε ελεγχόμενες συνθήκες κλιματισμού ή μη (conditioned/unconditioned spaces). Οι ελεγχόμενες αυτές συνθήκες αφορούν τους χώρους που μπορούν να ψύχονται ή να θερμαίνονται εντός του κτηρίου, ενώ το αντίθετο ισχύει για τις μη ελεγχόμενες συνθήκες που υιοθετούν θερμοκρασίες εξωτερικών συνθηκών.
- Υπολογισμός θερμικής ισορροπία που βασίζεται στην επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμική αγωγιμότητας, παράγοντας θερμοκρασίες θερμικής άνεσης και υπολογισμούς συμπύκνωσης.
- Δημιουργία χρονικών διαστημάτων απόκρισης μεταξύ των συστημάτων HVAC - θερμικών ζωνών και περιβάλλοντος
- Μοντέλο συνδυασμού μεταφοράς θερμότητας και μάζας που αντιπροσωπεύει την κίνηση του αέρα μεταξύ των ζωνών
- Προηγμένα μοντέλα φεγγαρίσματος, συμπεριλαμβανομένων των ελεγχόμενων περσίδων παραθύρων, ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων και

²⁰ <https://www.radiance-online.org/about>

²¹ Ο περιβάλλον χώρος του κτηρίου είναι ο φυσικός διαχωριστής μεταξύ του διαμορφωμένου και μη περιβάλλοντος ενός κτηρίου, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης στον αέρα, το νερό, τη θερμότητα, το φως και τη μεταφορά θορύβου.

Θερμικής ισορροπίας των επιπέδων που υπολογίζουν την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τους υαλοπίνακες παραθύρων.

- Υπολογισμοί φωτεινότητας και αντανάκλασης για την ανάλυση οπτικής άνεσης και χειρισμού φωτισμού
- HVAC που βασίζεται σε εξαρτήματα και υποστηρίζει τόσο τυποποιημένες όσο και νέες διαμορφώσεις συστημάτων.
- Ενσωματωμένες στρατηγικές ελέγχου HVAC και φωτισμού
- Λειτουργική εισαγωγή και εξαγωγή διεπαφής Mockup Interface για συν-προσομοίωση με άλλους κινητήρες.
- Εξαγωγή reports των αποτελεσμάτων με δυνατότητα επιλογής του χρόνου από ετήσια έως υπο-ωριαία

4.2.3. Δημιουργία σημασιολογικού μοντέλου gbXML

Το λογισμικό Revit είναι ένα από τα πιο ολοκληρωμένα συστήματα δημιουργίας λεπτομερής κτηριακής πληροφορίας και ενεργειακής ανάλυσης αυτής. Τα εργαλεία ανάλυσης ενεργειακής πληροφορίας που παρέχει, όπως αναφέρθηκε, είναι το Autodesk Insight 360 που είναι ένα cloud-based λογισμικό, το οποίο δίνει τη δυνατότητα σε αρχιτέκτονες και μηχανικούς να σχεδιάζουν πιο ενεργειακά αποδοτικά κτήρια με προηγμένες μηχανές προσομοίωσης και δεδομένα ανάλυσης επιδόσεων κτηρίων ενσωματωμένα στο Revit. Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση το Insight, το Revit εξάγει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενέργεια σε gbXML schema. Χρήση του gbXML schema, το Revit μπορεί να επικοινωνεί με το OpenStudio και κατά συνέπεια με το EnergyPlus – που αποτελεί μηχανισμό εξομοίωσης ενεργειακών συστημάτων κτηρίων για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής ανάλυσης.

Για την περαιτέρω ενεργειακή ανάλυση σε ένα από τα προαναφερόμενα λογισμικά, το revit εξάγει το μοντέλο σε gbXML με δύο (2) διαφορετικούς τρόπους.

- 1. Χρήση των ρυθμίσεων ενέργειας:** Αυτή η μέθοδος εξάγει ένα αναλυτικό μοντέλο ενέργειας όπως δημιουργήθηκε στο Revit. Το αναλυτικό μοντέλο ενέργειας αποτελείται από αναλυτικούς χώρους και αναλυτικές επιφάνειες, οι οποίες δημιουργούνται με βάση τις παραμέτρους που ορίζονται εντός του λογισμικού.
- 2. Χρήση των όγκων δωματίων/ χώρων:** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τους όγκους που δημιουργούνται στο κτηριακό μοντέλο βάσει των δωματίων ή των χώρων. Οι όγκοι αυτοί μπορεί να μην είναι τόσο ακριβείς όσο αυτοί που δημιουργούνται με τον πρώτο τρόπο.

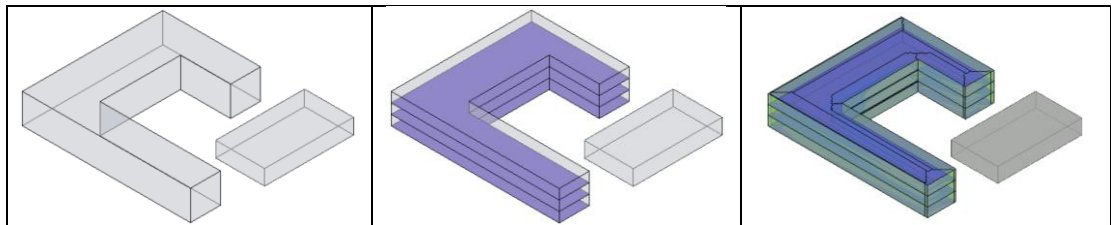
Για την βελτιστοποίηση της ενέργειας, στόχος είναι η αυτόματη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και ακριβούς ενεργειακού μοντέλου απευθείας από ένα

αρχιτεκτονικό μοντέλο, χωρίς να χρειάζεται ειδική δημιουργία γεωμετρίας για ενεργειακή ανάλυση.

Για αυτόν τον λόγο υπάρχει ένα φάσμα μορφών μοντελοποίησης και πρακτικών που το Revit μετατρέπει τα στοιχεία αρχιτεκτονικού μοντέλου σε στοιχεία ενεργειακού μοντέλου και πώς διαχειρίζεται την γεωμετρία για την δημιουργία ακριβούς και αξιόπιστου ενεργειακού μοντέλου. Οι τρεις (3) προσεγγίσεις για την αυτόματη παραγωγή ενός ενεργειακού μοντέλου από ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο περιγράφονται παρακάτω:

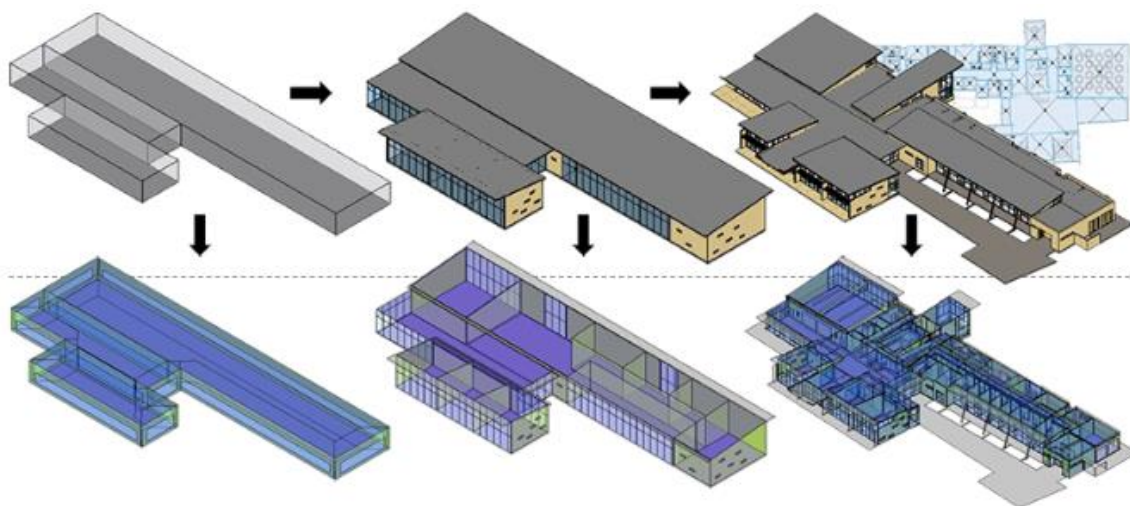
- 1. Massing:** Αυτή η μέθοδος είναι ο απλούστερος και ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους χρήσης του Revit για βελτιστοποίηση της ενέργειας στο σχεδιασμό του κτηρίου. Συνιστάται για τα πρώτα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν περιορίζεται σε εννοιολογικό σχεδιασμό καθώς μπορεί να παρέχει μια αποτελεσματική μέθοδο για λεπτομερή σχεδιασμό και στα υπάρχοντα κτήρια όταν ο χρόνος είναι περιορισμένος.

Πριν την υλοποίηση της ενεργειακής βελτιστοποίησης με Massing δημιουργείται ένα ενεργειακό μοντέλο με τους βασικούς όγκους (μάζες) που αντιπροσωπεύουν το αρχιτεκτονικό μοντέλο και το κέλυφος αυτού και τις γύρω δομές που θα αφορούν την σκίαση του υπό μελέτη αντικειμένου. Στη δημιουργία του κελύφους του κτηρίου περιλαμβάνονται και οι διάφοροι όροφοι αυτού.



Σχήμα 4.2-6: Μέθοδος δημιουργίας συμπαγών όγκων (massing), (Autodesk.com)

- 2. Μικτή σχεδίαση:** Ιδανικά, η Ενεργειακή Βελτιστοποίηση για το Revit θα πρέπει να χρησιμοποιείται από νωρίς και από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού έως το σχηματικό σχεδιασμό για τον σχεδιασμό της ανάπτυξης, σχετικά με το σχεδιασμό και τοποθέτηση παραθύρων, τοίχων, σκίασης και χώρων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, στοχεύετε συνεχώς και οδηγείτε προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί συνδυαστικά τις μεθόδους 1 και 3, στοιχείων μάζας και λεπτομερών αρχιτεκτονικών στοιχείων. Αναγνωρίζει την διαφορετική φύση της πραγματικής αρχιτεκτονικής μοντελοποίησης στο Revit και βοηθά στην πλήρη εκτίμηση του πώς λειτουργεί η αυτόματη δημιουργία ενεργειακού μοντέλου.



Σχήμα 4.2-7: Μικτή σχεδίαση (massing και αρχιτεκτονικών στοιχείων) για τη δημιουργία ενεργειακού μοντέλου gbXML, (Autodesk.com)

3. Λεπτομερές αρχιτεκτονικό μοντέλο: Η μέθοδος αφορά την Ενεργειακή Βελτιστοποίηση για ένα λεπτομερές αρχιτεκτονικό μοντέλο. Για αυτή τη μέθοδο, πρέπει να ακολουθηθούν κάποια βήματα διασφάλισης της ακρίβειας του ενεργειακού μοντέλου. Επειδή τα πιο λεπτομερή μοντέλα εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου, θα είναι χρήσιμο να έχουν ληφθεί υπόψη σε αυτή την μέθοδο και οι έννοιες της προσέγγισης μικτού σχεδιασμού.

Για την διασφάλιση της δημιουργίας ενός πλήρη και ακριβή ενεργειακού μοντέλου από ένα λεπτομερές αρχιτεκτονικό μοντέλο χρειάζεται ακολουθεί μια ροή εργασίας που αφορά:

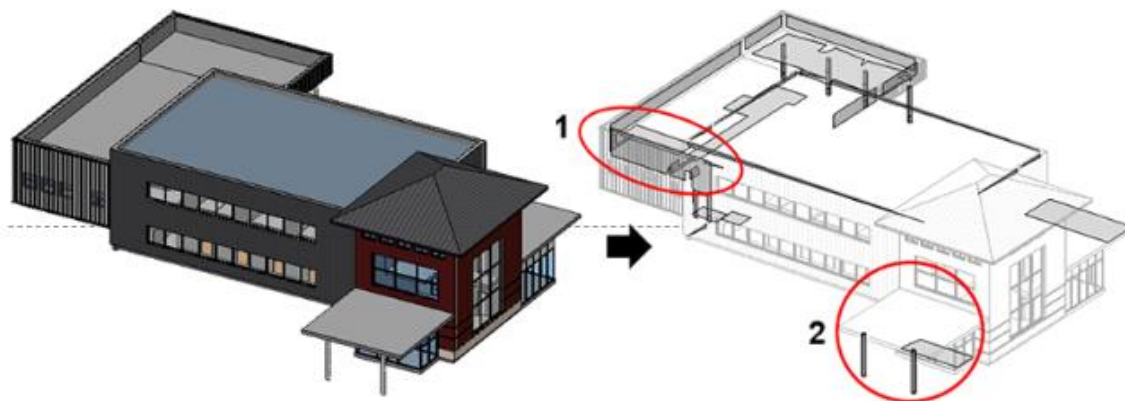
1. Απομόνωση των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου.
2. Εστίαση στο μοντέλο με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου επεξεργασίας
3. Προσδιορισμός και επίλυση ζητημάτων, όπως προφανή στοιχεία που λείπουν και μεγάλα κενά.
4. Δημιουργία ενεργειακού μοντέλου και αξιολόγηση αποτελεσμάτων
5. Σταδιακή μείωση των οριακών συνθηκών της ανάλυσης.
6. Επαναδημιουργία ενεργειακού μοντέλου

Κατά τον σχεδιασμό του κτηρίου στο Revit γίνεται η οριοθέτηση των δωματίων (room-bounding) για τον υπολογισμό του εμβαδού, της περιμέτρου και του όγκου τους. Παράλληλα, το Revit, για την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου, χρησιμοποιεί τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα, τα οποία θα πρέπει να απομονωθούν και εξεταστούν για τυχόν γεωμετρικές απώλειες.

Πίνακας 4.2-1: Στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου gbXML στο Revit

| Οροφές | Μάζα (Mass) |
|--------------------|--|
| Στήλες | Στέγες: κοινές άκρες, κρυμμένες γραμμές, εσωτερικές άκρες, σκεπές στέγης |
| Κουρτίνες πάνελ | Στέλεχος ανοίγματος |
| Κουρτίνα συστήματα | Θέση: μαξιλάρια |
| Κουρτινόξυλα | Δομικές στήλες |
| Πόρτες | Τοίχοι: κοινές άκρες, κρυμμένες γραμμές |
| Δάπεδα | Παράθυρα |

Στοχεύοντας λοιπόν στην μεγιστοποίηση της ακρίβειας του ενεργειακού μοντέλου είναι καθοριστικό να γίνουν κάποιες αλλαγές στο αρχιτεκτονικό μοντέλο, προσαρμόζοντας τα στοιχεία που βρίσκονται εκτός του κελύφους του κτηρίου και δεν πρόκειται να επηρεάσουν το ενεργειακό μοντέλο. Για παράδειγμα, στην μοντελοποίηση δρόμων, διαδρόμων ή αντικειμένων τοπίου μπορούν χρησιμοποιηθούν αντικείμενα όπως το δάπεδο ή τοίχοι. Για αυτά τα στοιχεία χρειάζεται να απενεργοποιηθεί η οριοθέτηση των δωματίων (Room Bounding) που τα ορίζει, ώστε να παραληφθούν από την διαδικασία δημιουργίας ενεργειακού μοντέλου. Για βελτιστοποίηση επεξεργασίας και χρόνου αυτής τα στοιχεία αυτά μπορούν και να «κρυφτούν».

**Σχήμα 4.2-8: Αναγνώριση οντοτήτων που δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου, (Autodesk.com)**

Για να δημιουργηθεί ένα ενεργειακό μοντέλο από ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο, τα δομικά στοιχεία πρέπει να είναι ευλόγως κλειστά. Το μοντέλο δεν χρειάζεται να είναι στεγανό, καθώς τα μικρά κενά και οι επικαλύψεις αποτελούν φυσικό μέρος των πραγματικών αρχιτεκτονικών μοντέλων, ενώ αναμένεται και επιτρέπεται κατά τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου. Ωστόσο, εάν λείπει ολόκληρη οροφή πάνω από ένα χώρο ή ένας τοίχος λείπει ή υπάρχει μεγάλο χάσμα, πρέπει να αντιμετωπιστεί το ζήτημα μέσω ρυθμίσεων στα οριακά κατώφλια των χώρων (Analytical Space Resolution). Για αυτό τον λόγο, γίνεται η επισκόπηση για εμφανή

στοιχεία που το revit αναγνωρίζει στην δημιουργία ενεργειακού μοντέλου τα οποία λείπουν ή αποτελούν μεγάλα κενά στο σύνολο του κελύφους και η κατάλληλη επεξεργασία αυτών με στόχο το μοντέλο να είναι εύλογα κλειστό.

Το αρχιτεκτονικό μοντέλο δεν χρειάζεται να περιέχει τα στοιχεία που ορίζουν το δωμάτιο ή τον χώρο (rooms/spaces) για τη δημιουργία ενός ενεργειακού μοντέλου. Ωστόσο, στην εξαγωγή του ενεργειακού μοντέλου επιλέγεται αν θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα δωματίου/χώρου σε κάθε περίπτωση. Η 3D γεωμετρία που σχηματίζει αναλυτικούς χώρους και επιφάνειες παράγεται απευθείας από τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που τα περιβάλλουν, ανεξάρτητα από τα δωμάτια ή τους χώρους σε 2D ή 3D. Εάν το αρχιτεκτονικό μοντέλο περιέχει δωμάτια ή χώρους που ανήκουν στους αναλυτικούς χώρους του ενεργειακού μοντέλου, οι αναλυτικοί χώροι υιοθετούν τα δεδομένα δωματίου/χώρου.

Σε ένα ενεργειακό μοντέλο, ο ορισμός των χώρων (spaces) αφορά τους χωριστούς όγκους (μάζες) αέρα που παρουσιάζουν απώλεια ή κέρδος θερμότητας. Αυτές οι αλλαγές θερμότητας οφείλονται σε εσωτερικές διαδικασίες όπως η πληρότητα, ο φωτισμός, ο εξοπλισμός και ο κλιματισμός, καθώς και η ανταλλαγή θερμότητας με άλλους χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον. Ο ρόλος των χώρων είναι να συλλάβει με ακρίβεια τη διακύμανση των εσωτερικών και εξωτερικών ανταλλαγών θερμότητας σε ολόκληρο το κτήριο.

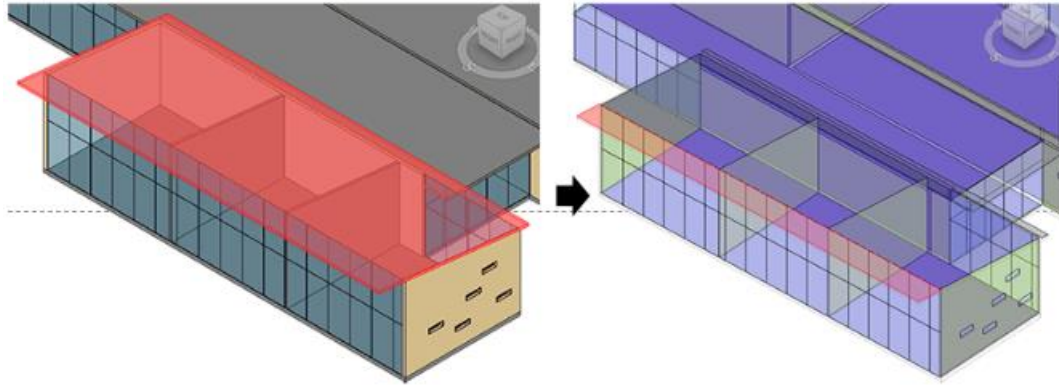
Αντίστοιχα, στο ορισμό δωματίων (rooms) για την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου ορίζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής, προσδιορίζοντας έτσι το Συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (U), τη θερμική αντίσταση (R) και θερμική μάζα. Για το ορισμό των χαρακτηριστικών φωτισμού, συσκευών και πληρότητας η επιλογή των δωματίων ακολουθεί μια πιο γενικευμένη προσέγγιση ορίζοντας τα σε σχέση με το είδος του κτηρίου (πχ πανεπιστήμιο, ξενοδοχείο, κατοικία κ.α.), ενώ η επιλογή χώρων αποδίδει μια πιο λεπτομερή ανάλυση των χώρων και ορισμό των παραπάνω παραμέτρων.

Οι χώροι ορίζονται ως οι χώροι ενός κτηρίου, ενώ συχνά υπάρχει άμεση συσχέτιση ανάμεσα στα δωμάτια και τους χώρους. Για παράδειγμα, μπορεί να χρειαστεί η υποδιαίρεση μεγάλων δωματίων (όπως γραφείο ανοιχτού σχεδίου ή αίθριο) έτσι ώστε οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας να εκφράζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτή η προσέγγιση αναφέρεται ως θερμική ζωνοποίηση, αποκοπή ή αποκλεισμός. Όλες αυτές οι έννοιες σχετίζονται με τη δημιουργία διακριτών χώρων σε ένα κτήριο για θερμική προσομοίωση.

Η σύνθετη γεωμετρία των αρχιτεκτονικών μοντέλων δημιουργεί την ανάγκη για κατάλληλη επεξεργασία και θεωρήσεις ώστε να μπορεί να αποδοθούν ορθά οι εννοιολογικές επιφάνειες αυτών. Τα στοιχεία σκίασης, επικαλυπτόμενων επιφανειών

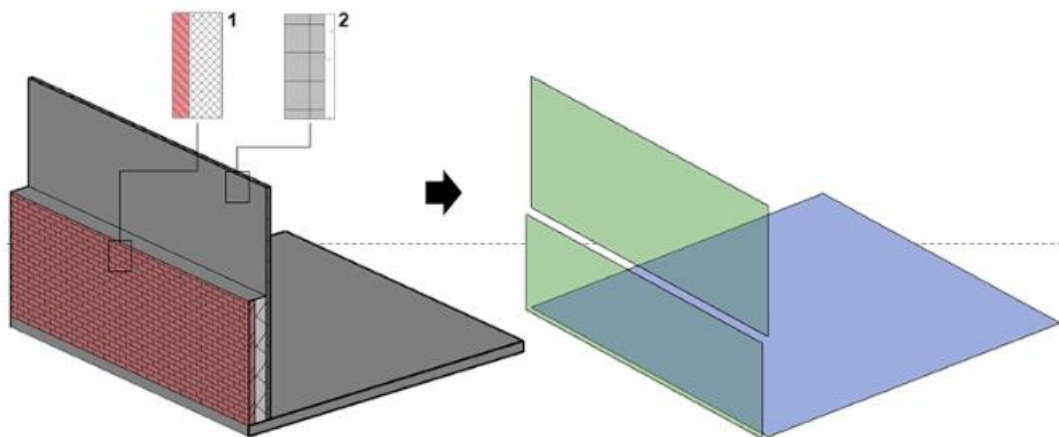
(Sandwich), τα κενά στην οροφή, οι κολώνες αλλά και τα ανοίγματα χώρων πρέπει να αξιολογούνται και ανάλογα να ρυθμίζονται τα όρια των επιφανειών τους.

Το Revit δεν διαθέτει κατηγορία αρχιτεκτονικών στοιχείων για σκίαση, αλλά διαθέτει μια κατηγορία αναλυτικού μοντέλου για τις αναλυτικές επιφάνειες Σκίασης. Αυτά τα στοιχεία σκίασης δημιουργούνται ως μέρος του ενεργειακού μοντέλου όπου (1) στοιχεία ή τμήματα στοιχείων που είναι εξωτερικά του κτηρίου και όπου (2) υπάρχουν εννοιολογικές μάζες χωρίς μαζικά πατώματα



Σχήμα 4.2-9: Κατηγορία σκίασης στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)

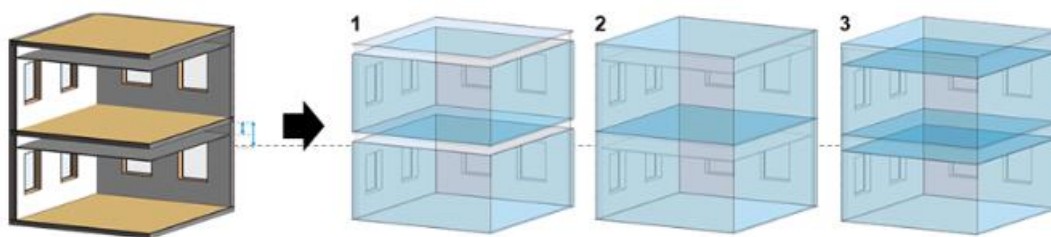
Αντίστοιχα, για τις επικαλυπτόμενες επιφάνειες, δύο ή περισσότερα στοιχεία είναι σάντουιτς όταν περνούν παράλληλα ή κοντά. Σε αυτές τις περιπτώσεις **δημιουργείται μια χωριστή αναλυτική επιφάνεια του κατάλληλου τύπου**. Εάν τα ξεχωριστά στοιχεία τύπου «Sandwich» έχουν θερμικές ιδιότητες υλικών, μετατρέπονται σε ένα κατάλληλο σύνολο στοιχείων δομών, στρωμάτων και υλικών στα αρχεία gbXML, DOE2 και EnergyPlus.



Σχήμα 4.2-10: Κατηγορία επικαλυπτόμενων επιφανειών στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)

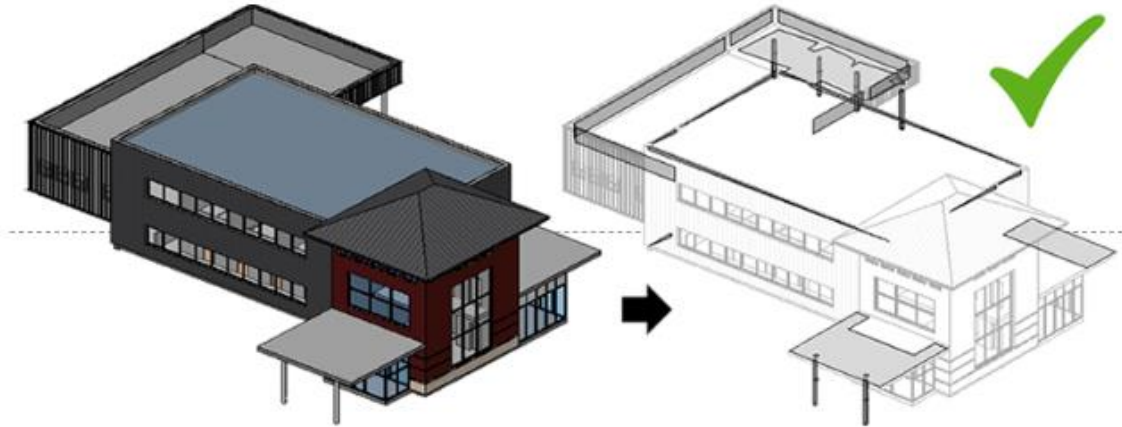
Κατά τη δημιουργία ενεργειακού μοντέλου, οι οροφές αντιμετωπίζονται όπως και άλλα στοιχεία κτηρίου για τη δημιουργία αναλυτικών επιφανειών. Αναλυτικοί χώροι δημιουργούνται επίσης για να αντιπροσωπεύουν τα κενά της οροφής. Το ακόλουθο παράδειγμα δείχνει μια τυπική διάταξη ψευδοροφής, το βάθος της οποίας διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Ανάλογα με αυτό το βάθος και τη ρύθμιση των ορίων Αναλυτικών χώρων, η επεξεργασία κάθε κενού οροφής είναι το αποτέλεσμα μιας από τις 3 συνθήκες:

1. Λιγότερο βάθος ή μικρότερη ανάλυση: Δεν δημιουργούνται χωριστοί αναλυτικοί χώροι για κενά στην οροφή.
2. Ο περιβάλλον χώρος είναι απενεργοποιημένος για την οροφή και συνεπώς δεν δημιουργούνται χωριστοί αναλυτικοί χώροι για κενά στην οροφή.
3. Μεγαλύτερο βάθος ή μεγαλύτερη ανάλυση: Δημιουργούνται χωριστοί αναλυτικοί χώροι για κενά οροφής.



Σχήμα 4.2-11: Συνθήκες δημιουργίας ορόφου - οροφής και διαχωρισμού αυτών στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)

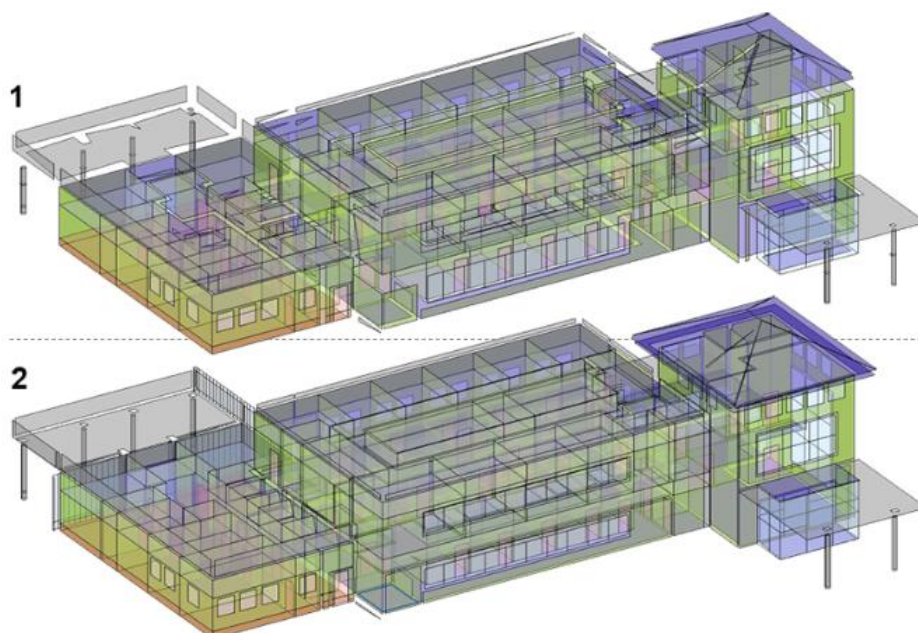
Στη συνέχεια υλοποιείται η δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου από την εργαλειοθήκη του Revit. Για να αντιμετωπιστούν τυχόν αστοχίες στην δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου, γίνεται η επισκόπηση των αναλυτικών επιφανειών που δημιουργεί επιλέγοντας μόνο την κατηγορία της Σκίασης. Οι επιφάνειες σκίασης εμφανίζονται όταν οποιοδήποτε αρχιτεκτονικό στοιχείο του Revit (ή μέρος αυτού) βρίσκεται εκτός της δομικής μεταφοράς θερμότητας του κτηρίου. Τέτοιες επιφάνειες είναι το παραπέτα ενός τοίχου ή η προεξοχή μιας οροφής. Για αυτόν τον λόγο οι επιφάνειες σκίασης θα πρέπει να υπάρχουν μόνο όταν έχουν νόημα. Συνεπώς αξιολογείται σε αυτό το στάδιο ποιες είναι οι επιφάνειες σκίασης που υπάρχουν εκεί όπου δεν ανήκουν. Σε αυτές τις επιφάνειες χρειάζεται μετέπειτα επισκόπηση στο αρχιτεκτονικό μοντέλο για τυχόν κενά ή στοιχεία που λείπουν, δίνοντας έμφαση στα στοιχεία που η ιδιότητα του Room Bounding έχει απενεργοποιηθεί, καθώς αυτά τα στοιχεία δεν εξετάζονται κατά τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου, όπως αναφέρθηκε, επομένως μπορεί να είναι η αιτία των λανθασμένων σκιάσεων που δημιουργούνται.



Σχήμα 4.2-12: Παραπέτα ενός τοίχου ή η προεξοχή μιας οροφής στο Revit για δημιουργία gbXML, (Autodesk.com)

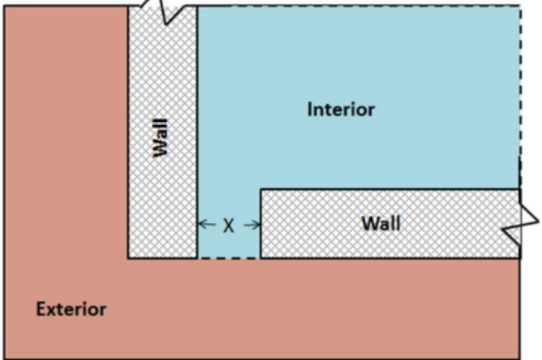
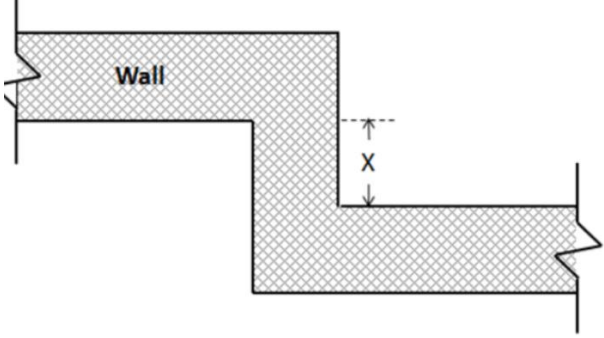
Στο στάδιο αυτό εφόσον έχει επιβεβαιωθεί ότι το ενεργειακό μοντέλο περιέχει όλους τους απαιτούμενους αναλυτικούς χώρους (Analytical Space Resolution) και όλες τις αναλυτικές επιφάνειες (Analytical Surface Resolution), εξετάζεται το ίδιο το ενεργειακό μοντέλο για κενά μεταξύ των στοιχείων. Μικρά κενά μεταξύ των στοιχείων του ενεργειακού μοντέλου αναμένονται και δεν έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ανάλυση. Αν όμως αυτά τα κενά είναι μεγάλα, ή δεν έχουν καταγραφεί πλήρως τμήματα του κτηρίου, πρέπει να γίνει αύξηση της ανάλυσης διαστήματος αναλύσεων και αναλυτικής επιφάνειας ανάλυσης, αυξάνοντας έτσι και το χρόνο επεξεργασίας. Η δημιουργία των αναλυτικών χώρων, μπορεί επίσης να αποκαλύψει και περισσότερα κενά ή παραλείψεις στο αρχιτεκτονικό μοντέλο.

Στην περίπτωση εντοπισμού απρόσμενων μεγάλων κενών μεταξύ των στοιχείων χρειάζεται να γίνει αλλαγή στα κατώφλια των οριακών συνθηκών των Analytical Space Resolution και Analytical Surface Resolution. Για παράδειγμα, στην παρακάτω εικόνα, το #1 δείχνει το αρχικό ενεργειακό μοντέλο και το # 2 δείχνει το βελτιωμένο ενεργειακό μοντέλο που προκύπτει μετά την επίλυση συγκεκριμένων ζητημάτων.



Σχήμα 4.2-13: Δημιουργία αναλυτικών επιφανειών χωρίς κενά ή παραλείψεις (#2) κατά την εξαγωγή της ενεργειακής ανάλυσης στο Revit εφαρμόζοντας κατάλληλες οριακές συνθήκες, (Autodesk.com)

Οι παράμετροι των Analytical Space Resolution και Analytical Surface Resolution, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο που παράγει το ενεργειακό αναλυτικό μοντέλο και αποτελούν τις κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια και το χρόνο επεξεργασίας του ενεργειακού μοντέλου.. Η αναλυτική ανάλυση χώρου ορίζει **το ελάχιστο χάσμα** μεταξύ των στοιχείων του Revit που θα **αγνοηθεί** κατά την ταυτοποίηση των χώρων μοντέλου ενέργειας. Ενώ, η αναλυτική ανάλυση Επιφάνειας οδηγεί την ικανότητα του αλγορίθμου να βρει επιμέρους αναλυτικές επιφάνειες και πρέπει να είναι μικρότερη από τη μικρότερη διάσταση οποιασδήποτε επιφάνειας που θα συμπεριληφθεί στο ενεργειακό μοντέλο. Στο ακόλουθο πίνακα φαίνεται η κάτοψη χώρων και τοίχου που οριοθετούν έναν εσωτερικό χώρο με ένα διάκενο μεταξύ τους της διάστασης X για την δημιουργία αναλυτικών χώρων και επιφανειών του ενεργειακού μοντέλου μέσω κατάλληλης ρύθμισης στα κατώφλια οριακών τιμών τους.

| Αναλυτική Ανάλυση Χώρου (AAX) | Αναλυτική Ανάλυση Επιφάνειας (AAE) |
|---|---|
|  |  |
| Προεπιλεγμένη τιμή = 18" (457,2 mm) Ελάχιστη τιμή = 6" (152,4 mm) Μέγιστη τιμή = 12" (3048 mm) | Προεπιλεγμένη τιμή = 12" (304,8 mm) Ελάχιστη τιμή = 3" (76,2 mm) Μέγιστη τιμή = 12" (3048 mm) |
| Αν AAX = 18" (457,2 mm), τότε: | AAE = 12" (304,8 mm) |
| <p>Εάν $X < 18"$, τότε το κενό θα αγνοηθεί και θα δημιουργηθεί ο αναλυτικός χώρος.</p> <p>Εάν $X > 18"$ και $< 36"$ (914.4 mm), τότε το κενό μπορεί να αγνοηθεί ή όχι.</p> <p>Εάν $X > 36"$, τότε το κενό δεν θα αγνοηθεί και ο αναλυτικός χώρος δεν θα δημιουργηθεί.</p> | <p>Εάν $X < 12"$, τότε δεν θα δημιουργηθεί μια αναλυτική επιφάνεια για αυτό το τμήμα τοίχου.</p> <p>Αν $X > 12"$ και $< 24"$ (609,6 mm), τότε μπορεί να δημιουργηθεί ή όχι η αναλυτική επιφάνεια για αυτό το τμήμα του τοίχου.</p> <p>Εάν $X > 24"$, τότε θα δημιουργηθεί μια αναλυτική επιφάνεια για αυτό το τμήμα του τοίχου.</p> |

Για να αγνοηθούν τα ανεπιθύμητα κενά και τη δημιουργία χώρων, η μέγιστη απόσταση των στοιχείων πρέπει να είναι μικρότερη της οριακής της τιμής AAX, ενώ για τη δημιουργία των επιφανειών, η μέγιστη απόσταση των στοιχείων πρέπει να είναι μεγαλύτερη της οριακής της τιμής AAE.

Οι προεπιλεγμένες τιμές για αυτές τις παραμέτρους παρέχουν μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας του ενεργειακού μοντέλου και του χρόνου επεξεργασίας για τα περισσότερα μοντέλα του Revit . Ωστόσο, επειδή το μέγεθος του μοντέλου και η πολυπλοκότητα αυτού μπορεί να ποικίλλουν ευρέως, ίσως χρειαστεί να τροποποιηθούν αυτές οι παράμετροι για μεγαλύτερη ακρίβεια ή να γίνει μείωση του χρόνου επεξεργασίας του ενεργειακού μοντέλου ή και τα δύο.

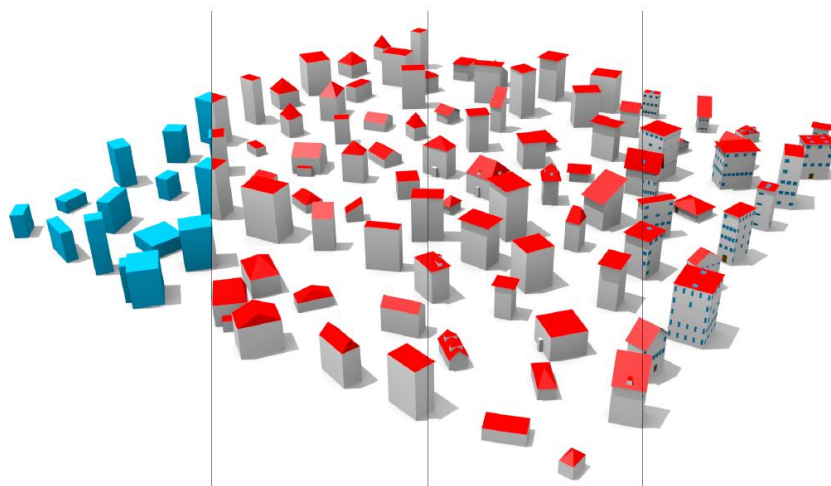
Όταν **αυξάνονται οι τιμές** για ανάλυση αναλυτικού διαστήματος και αναλυτική ανάλυση επιφάνειας, **μειώνεται σημαντικά ο χρόνος** επεξεργασίας που απαιτείται για τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου. Όταν μειώνονται οι τιμές για αυτές τις παραμέτρους, ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου αυξάνεται σημαντικά. Η μείωση αυτών των τιμών δεν συνεπάγεται απαραίτητα ένα πιο ακριβές ενεργειακό μοντέλο. Για παράδειγμα, ενώ μια χαμηλότερη τιμή αναλυτικού διαχωρισμού χώρου μπορεί να οδηγήσει σε

μικρότερα κενά μεταξύ των στοιχείων του Revit, μπορεί επίσης να οδηγήσει στην παράλειψη ορισμένων αναλυτικών χώρων λόγω κενών μεταξύ αρχιτεκτονικών στοιχείων που αγνοήθηκαν στην υψηλότερη ρύθμιση.

4.3. ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΛΗΣ CITYGML

Το CityGML αποτελεί ένα ανοιχτό μοντέλο δεδομένων, βασισμένο σε XML δομή για την αποθήκευση και ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν 3D μοντέλα πόλεων (Groger, Kolbe, Nagel, & Hafele, 2012). Επιπροσθέτως, αποτελεί διεθνές πρότυπο της OGC από το 2008 και σήμερα βρίσκεται στην έκδοση 2.0 (Groger & PICimer, 2012). Το CityGML είναι ένα κοινό σημασιολογικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση, μεταφορά και απεικόνιση 3D αντικειμένων του αστικού χώρου. Η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι αρκετά σημαντική και οικονομικά αποδοτική, δεδομένου ότι επιτρέπει στους αρμόδιους φορείς να πωλούν τα ίδια δεδομένα σε πελάτες από διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Τα τελευταία, μπορεί να αφορούν την πολεοδομία, την αρχιτεκτονική, τις τουριστικές και ψυχαγωγικές δραστηριότητες, την περιβαλλοντική προσομοίωση, τη διαχείριση καταστροφών, την εσωτερική ασφάλεια, τη διαχείριση ακινήτων, την πλοήγηση και την εκπαίδευση.

Καθορίζει τις βασικές οντότητες, τα χαρακτηριστικά και τις σχέσεις των οντοτήτων μιας πόλης. Όπως και με το IFC, το CityGML έχει ορισμούς για πέντε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας (Levels of Detail (LoDs)) από LoD0 έως LoD4 για να αντικατοπτρίζει την ποσότητα λεπτομέρειας που περιλαμβάνεται σε ένα μοντέλο. Ωστόσο, το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου κτηρίου στο CityGML είναι λιγότερο πλήρες και ώριμο από το IFC, ακόμη και στο LoD4.

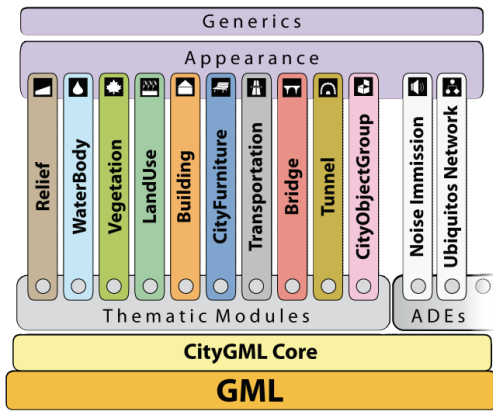


Σχήμα 4.3-1: Διαδοχική Αναπαράσταση επιπέδων λεπτομέρειας (Biljecki, F.,2016)

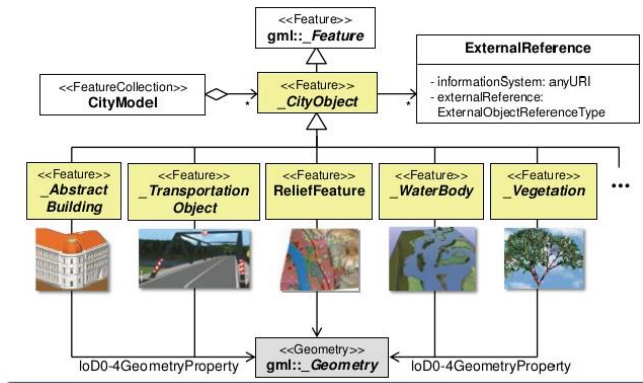
Το μοντέλο CityGML περιλαμβάνει συνεκτικότητα στη μοντελοποίηση σημασιολογιών, γεωμετρικών και τοπολογικών ιδιοτήτων (Groger, Kolbe, Nagel & Hafele, 2012). Το σημασιολογικό μοντέλο του CityGML συνίσταται σε ένα σύνολο

κλάσεων για τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αντικείμενα που υπάρχουν σε ένα ψηφιακό 3D μοντέλο πόλης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των τελευταίων είναι τα κτήρια, τα DTMs, τα υδάτινα σώματα, οι μεταφορές, η βλάστηση κ.α. Τα τελευταία, συνοδεύονται από χαρακτηριστικά και σχέσεις ιεραρχίας μεταξύ τους. Όσον αφορά το γεωμετρικό επίπεδο, τα αντικείμενα του CityGML αντιπροσωπεύονται από γεωμετρικά αντικείμενα που διαμορφώνονται με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του GML3, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο ISO 19107 (Stacker & Kolbe, 2007). Συνεπώς, το μοντέλο του CityGML έχει δύο ιεραρχίες: τη σημασιολογική και τη γεωμετρική, ενώ τα αντίστοιχα αντικείμενά τους συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλες σχέσεις.

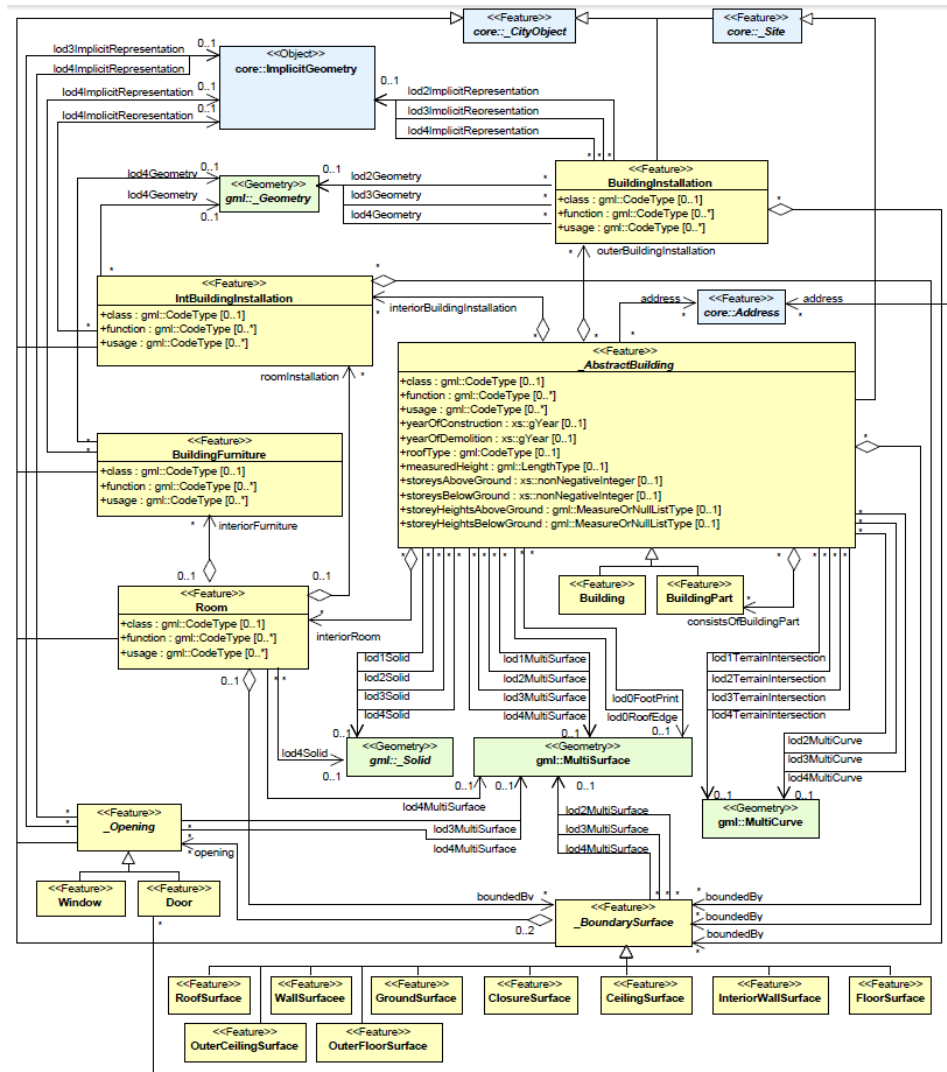
Η αρχιτεκτονική του CityGML διαμορφώνεται μέσω 5 βασικών συστατικών μερών. τον πυρήνα του CityGML (CityGML Core), το οποίο καθορίζει όλες τις βασικές κλάσεις για τη λειτουργία του και οι οποίες κληρονομούνται υποχρεωτικά από όλα τα χαρακτηριστικά του CityGML. Το CityGML οργανώνεται επίσης σε ενότητες (modules) και αποτελείται δηλαδή από 10 θεματικά μοντέλα τα οποία καθορίζουν τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά βασικών αντικειμένων μιας εικονικής 3D πόλης όπως πχ building, relief, city furniture, vegetation, land use, water body, transportation (Σχήμα 4.3-2). Το γεωμετρικό-τοπολογικό μοντέλο ακολουθεί το γεωμετρικό μοντέλο του GML3, ενώ συστατικό μέρος είναι το μοντέλο εμφάνισης (Appearance), το οποίο καθορίζει τις ιδιότητες των επιφανειακών αντικειμένων του CityGML. Με αυτή τη δομή επιτρέπεται τόσο η διατήρηση διαφόρων εφαρμογών όσο και η επέκταση των θεματικών μοντέλων. Η επεκτασιμότητα του CityGML επιτυγχάνεται με δύο τρόπους που καθιστούν εφικτή τη προσθήκη σημασιολογικών και περιγραφικών χαρακτηριστικών που δεν καλύπτει η παρούσα έκδοση. Οι εν λόγω τρόποι αναφέρονται στα μοντέλα Generics και ADE (AppLication Domain Extensions). Με την ανάπτυξη ενός ADE δημιουργείται ένα νέο σχήμα του CityGML με διαφορετικό XML namespace, το οποίο ορίζει νέα αντικείμενα με διαφορετικές ιδιότητες, γεωμετρίες και σχέσεις, που τις περισσότερες φορές αποτελούν υποκατηγορία των υπάρχουσών θεματικών κατηγοριών. Τέλος, το σημασιολογικό μοντέλο του CityGML υιοθετεί το πρότυπο ISO 19100 για τη μοντελοποίηση των γεωγραφικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 4.3-2: Αρχιτεκτονική του CityGML 2.0 (OGC,2012 Β)



Σχήμα 4.3-3: Εννοιολογικό διάγραμμα των κύριων και βασικών κλάσεων, η κλάση CityObject αποτελεί την κύρια κλάση όλων των θεματικών επιπέδων (Kolbe,2009)



Σχήμα 4.3-4: Εννοιολογικό διάγραμμα UML diagram του CityGML's building model. Προθέματα χρησιμοποιούνται για να υποδείξουν τα XML namespaces που σχετίζονται με στοιχεία του μοντέλου.(OGC,2012)

4.3.1. Επίπεδα λεπτομέρειας (LoD)

Τα επίπεδα λεπτομέρειας (LoD) συναντώνται με παρόμοιο τρόπο στα ΓΣΠ και στα 3D μοντέλα πόλεων. Τα LoDs εκφράζουν το πόσο καλά έχουν απεικονιστεί τα χαρακτηριστικά των κτηρίων σε σχέση με την πραγματική τους μορφή, βάσει της γεωμετρικής τους πολυπλοκότητας, αλλά και άλλων μετρήσεων, όπως η χωροσημασιολογική συνοχή τους και η ανάλυση της υψής τους. Το CityGML διαφοροποιεί 5 διαδοχικά επίπεδα λεπτομέρειας Levels of Detail – LoD, όπου τα αντικείμενα λαμβάνουν περισσότερη λεπτομέρεια όσο αυξάνεται και το επίπεδο λεπτομέρειας. Ενώ παράλληλα το ίδιο αντικείμενο μπορεί να αναπαριστάται σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας, για την ανάλυση και απεικόνιση αυτού σε διαφορετικές κλίμακες. Στα ΓΣΠ, τα επίπεδα λεπτομέρειας (LoD) αντιστοιχούν με την «γενίκευση» (generalization). Συγκεκριμένα, τα επίπεδα λεπτομέρειας διαχωρίζονται στα:

Πίνακας 4.3-1: Διαδοχικά επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs)

| | |
|--------------|---|
| LoD 0 | ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM), ίχνος 2.5D αποτύπωσης ορίων κτηρίων |
| LoD 1 | κύριοι όγκοι κτηρίων (block model), χωρίς στέγες. |
| LoD 2 | πρόσθετα γεωμετρικά στοιχεία, μπαλκόνια και στέγη |
| LoD 3 | πραγματική αρχιτεκτονική μορφή, με στέγη, παράθυρα, πόρτα και την υψή τους. |
| LoD 4 | ολοκληρωμένο μοντέλο, με εσωτερικές δομές, (δωμάτια, σκάλες, έπιπλα). |

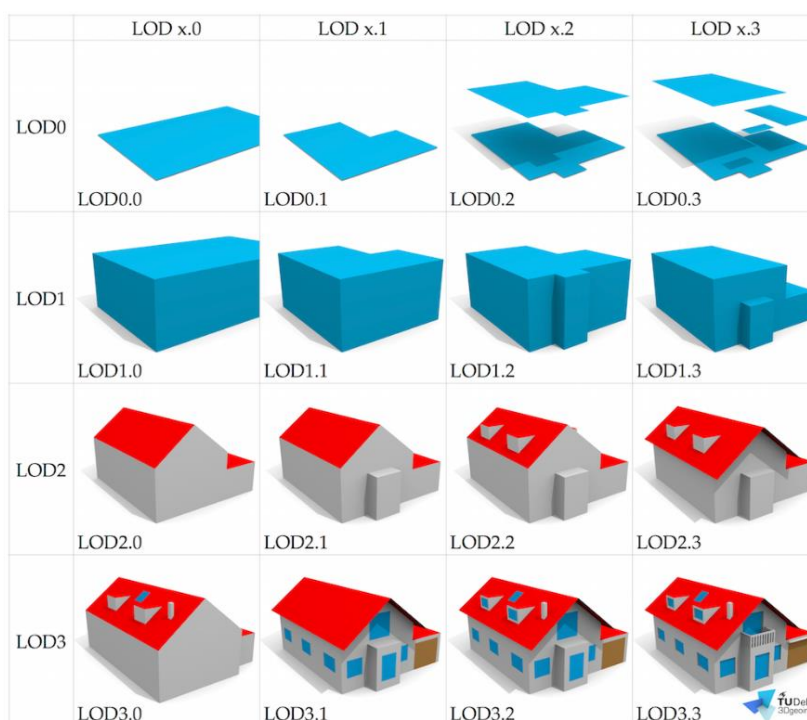


Σχήμα 4.3-5: Αναπαράσταση επιπέδων λεπτομέρειας (LoD), κατά το πρότυπο CityGML, όπου η γεωμετρική και σημασιολογική πολυπλοκότητα σταματά το LoD 4 που περιγράφει μέχρι και στοιχεία εσωτερικού χώρου. (Biljecki, F. et al., 2016)

- Το πρώτο και χαμηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD 0) αποτελεί ένα 2.5D Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM). Σε αυτό το επίπεδο δεν υπάρχει η έννοια του υψόμετρου, δηλαδή του όγκου του κτηρίου. Απεικονίζει τα περιγράμματα των κτηρίων όπως φαίνονται από τοπογραφικά διαγράμματα ή σχέδια κατόψεων. Η απεικόνιση των κτηρίων σε αυτό το επίπεδο αποτελεί τη βάση για την τρισδιάστατη αναπαράστασή τους.
- Στο δεύτερο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD 1) τα κτήρια αναπαρίστανται με έναν απλό όγκο, πρισματικά κτήρια με επίπεδες στέγες (blocks model). Οι όγκοι

των κτηρίων προκύπτουν από τα περιγράμματα τους, δηλαδή από το προηγούμενο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD 0), υψωμένα στο πραγματικό τους ύψος, το οποίο προκύπτει είτε από τοπογραφικές είτε από φωτογραμμετρικές εργασίες.

- Στο τρίτο επίπεδο (LoD 2) τα κτήρια απεικονίζονται με εξωτερικές γεωμετρικές δομές, για καλύτερη αναπαράσταση του σχήματος τους. Σε αυτό το επίπεδο αναπαρίστανται επίσης και οι στέγες, τα μπαλκόνια των κτηρίων για καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας τους.
- Στο επόμενο επίπεδο (LoD 3) απεικονίζονται κτήρια υψηλής λεπτομέρειας, καθώς δίνεται έμφαση στις υφές του αντικειμένου, δηλαδή οι όψεις και οι στέγες των κτηρίων απεικονίζονται όπως είναι στην πραγματικότητα (αρχιτεκτονική δομή) και όχι με την χρήση φωτουφών. Όσον περισσότερη λεπτομέρεια έχει το κτήριο, τόσο περισσότερη γεωμετρική πληροφορία προκύπτει, γεγονός που συντελεί στην πιο ρεαλιστική μορφή του.
- Στο τελευταίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD 4), δίνεται έμφαση πέρα της εξωτερικής μορφής του κτηρίου που έχει αποδοθεί σε προηγούμενο επίπεδο, στη εσωτερική δομή του κτηρίου. Έτσι, αποδίδονται οι εσωτερικοί χώροι, τα έπιπλα, το δώμα, οι σκάλες κ.α.



Σχήμα 4.3-6: Ανάλυση²² επιπέδων λεπτομέρειας LoD (1-3)

²² <https://osmbuildings.org/blog/2018-02-28-level-of-detail/>

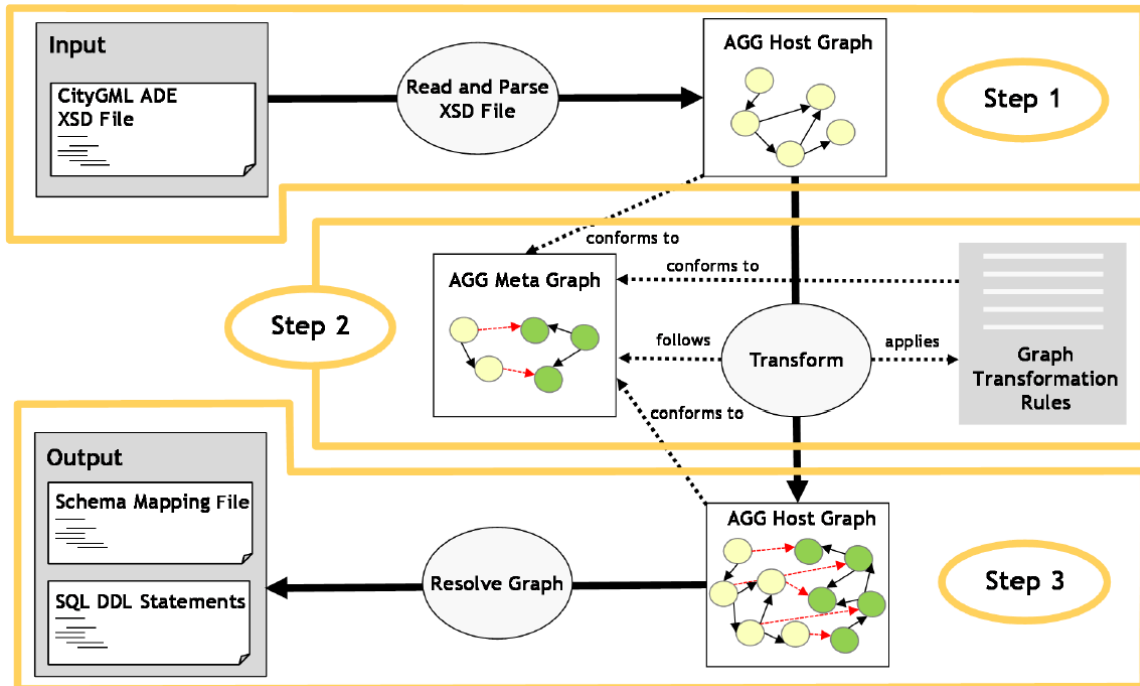
4.3.2. Γεωμετρικό και Τοπολογικό Μοντέλο

Η αναπαράσταση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του CityGML βασίζεται στο γεωμετρικό μοντέλο του GML 3.1.1 (Cox, Daisey, et al., 2003), το οποίο αποτελεί εφαρμογή του προτύπου ISO 19107. Το CityGML δεν υποστηρίζει όλες τις επιλογές που παρέχει το GML για τις επιφάνειες και τις καμπύλες. Συγκεκριμένα, περιορίζεται στα επίπεδα πολύγωνα, όπου οι συντεταγμένες των εξωτερικών και εσωτερικών ορίων των τελευταίων πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (Grogger & PLCimer, 2012), Επιπλέον, όσον αφορά τις καμπύλες, πρέπει να αποτελούνται από ευθύγραμμα τμήματα. Η γεωμετρική μοντελοποίηση των αντικειμένων γίνεται με βάση τη μέθοδο B-rep (Boundary representation) (FoLey, Van Dam, Feiner, & Hughes, 1995), Σύμφωνα με αυτήν, ένα στερεό οριοθετείται από επιφάνειες, οι οποίες με τη σειρά τους οριοθετούνται από καμπύλες. Το CityGML ακολουθεί μια ρητή μοντελοποίηση όσον αφορά τη διαμόρφωση της τοπολογίας. Αναλυτικότερα, κάθε μέρος του χώρου πρέπει να αντιπροσωπεύεται από ένα μόνο γεωμετρικό αντικείμενο, το οποίο στη συνέχεια αναφέρεται από άλλα χαρακτηριστικά αντικείμενα ή σύνθετες γεωμετρίες, που ορίζονται ή οριοθετούνται από το εν λόγω αντικείμενο. Προκειμένου να εφαρμοστεί η τοπολογία, το CityGML χρησιμοποιεί την έννοια των XML XLinks. Συγκεκριμένα, σε κάθε γεωμετρία πρέπει να αποδίδεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να υποδηλώνεται από άλλες γεωμετρίες με χρήση της ιδιότητας href. Παράδειγμα τοπολογικής σχέσης αποτελούν δύο γεωμετρίες που αναφέρονται στην ίδια γεωμετρία, η οποία αποτελεί κοινή επιφάνεια και των δύο, όπως ένα κτήριο που έχει γειτονικό γκαράζ με την κοινή επιφάνεια να καταχωρείται μόνο μια φορά και να χρησιμοποιείται ως αναφερόμενο στοιχείο και από τις δυο solid γεωμετρίες.

4.3.3. 3DCityDB και ADE plugin manager

Η τρέχουσα έκδοση του 3DCityDB (έκδοση 4.2) (3DCityDB, 2019) περιλαμβάνει ένα νέο ADE Plugin Manager για το δικό του Importer/Exporter. Επιτρέπει τη δυναμική επέκταση του 3DCityDB για διευκόλυνση της αποθήκευσης και της διαχείρισης των CityGML ADEs (Yao, Kolbe, 2017). Έχει υλοποιηθεί σύμφωνα με το Open Source Attributed Graph Grammar (AGG) μηχανισμό μετατροπής για την πραγματοποίηση αυτόματου μετασχηματισμού από το XSD (XML Schema Definition) του εκάστοτε CityGML ADE σε ένα συμπαγές σχήμα σχεσιακής βάσης δεδομένων (συμπεριλαμβανομένου πίνακες, ευρετήρια και περιορισμούς κ.λπ.). Επιπλέον, μπορεί επίσης να δημιουργήσει αυτόματα ένα XML-based schema mapping file, το οποίο περιέχει τα μεταδεδομένα πληροφοριών σχετικά με το παράγωγο σχήμα της ΒΔ καθώς την σχέση χαρτογράφησης μεταξύ της πηγής και του σχήματος, επιτρέποντας στους προγραμματιστές να υλοποιούν εφαρμογές για τη διαχείριση και την επεξεργασία των δεδομένων ADE που είναι αποθηκευμένα σε ΧΒΔ δομημένη σύμφωνα με το σχήμα 3DcityDB. Ο ADE Plugin Manager έχει

δοκιμαστεί και με διάφορα CityGML ADEs²³ όπως το Energy ADE (NOUVEL et al. 2015), το Noise ADE, και το UtilityNetwork ADE (Kutzner & Kolbe 2016) και Dynamizer ADE (Chaturvedi & Kolbe, 2016) χρήση των αντίστοιχων σχημάτων της σχεσιακής ΒΔ που δομούνται σε SQL ερωτήματα, για τον σχηματισμό νέων πινάκων στην 3DCityDB σύμφωνα το σχήμα των CityGML ADEs. Το Σχήμα 4.3-7 δείχνει την ροή εργασίας για την επέκταση της 3DCityDB με ADE που αποτελείται από τρία στάδια.



Σχήμα 4.3-7: Μοντέλο μετάφρασης χρήση Graph Transformation System (Yao & Kolbe, 2017)

Στο πρώτο βήμα επεξεργασίας, το αρχείο XSD (XML Schema Definition) του αντίστοιχου CityGML ADE διαβάζεται από το εργαλείο μετατροπής χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη XSOM της Java για ανάγνωση και ανάκτηση των δομικών και σημασιολογικών πληροφοριών από τα στοιχεία XML. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες που ενσωματώθηκαν αναπαρίστανται ως αντικείμενα Java, σχηματίζοντας μια γραφική αναπαράσταση γραφικών (AGG) για το αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων.

Στο επόμενο βήμα, το γράφημα AGG θα χρησιμοποιηθεί ως γράφημα εισαγωγής στο AGG προκειμένου να εφαρμόσει τους προκαθορισμένους κανόνες μετασχηματισμού του γραφήματος για την εκτέλεση του μετασχηματισμού του γραφήματος σύμφωνα με τους κανόνες χαρτογράφησης που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του σχήματος σχεσιακής βάσης δεδομένων 3DCityDB. Αυτοί οι κανόνες μετασχηματισμού γραφήματος μαζί με το εποπτικό μεταγράφημα τους μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν μέσω του προγράμματος γραφικών

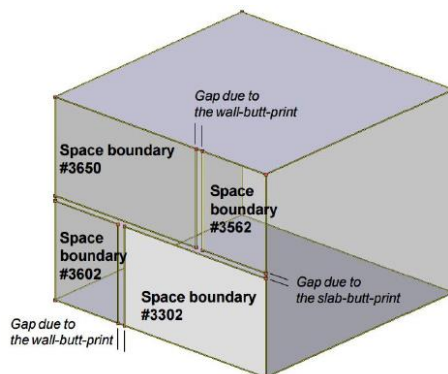
²³ <https://github.com/yaozhihang/3dcitydb-Extensions-for-CityGML-ADEs>

επεξεργαστών ώστε να ξανασχηματίσουν τη δομή των γραφημάτων και να τα αποθηκεύσουν σε XML μορφότυπο, ο οποίος μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλους AGG, σε διαφορετικές πλατφόρμες. Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία μετασχηματισμού, το γράφημα εισαγωγής μαζί με τα νέα nodes και edge θα δημιουργήσουν το γράφημα εξόδου που αφορά το αντικειμενοστραφές μοντέλο και το σχετιζόμενο μοντέλο της σχεσιακής ΒΔ, καθώς και την σχέση μεταξύ των δύο. Στο τελευταίο βήμα, το γράφημα εξόδου θα επιλυθεί μέσω του εργαλείου μετατροπής χρησιμοποιώντας το σχήμα της σχεσιακής βάσης δεδομένων, που είναι γραμμένο σε SQL για το εκάστοτε σύστημα ΒΔ, όπως Oracle ή PostgreSQL/PostGIS. Επιπλέον, παράγωγο της διαδικασίας είναι ένα XML-based mapping schema που χρησιμεύει μετασχηματισμό των δεδομένων μεταξύ του CityGML ADE και της ΒΔ μέσω διεπαφής WFS.

4.4. ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

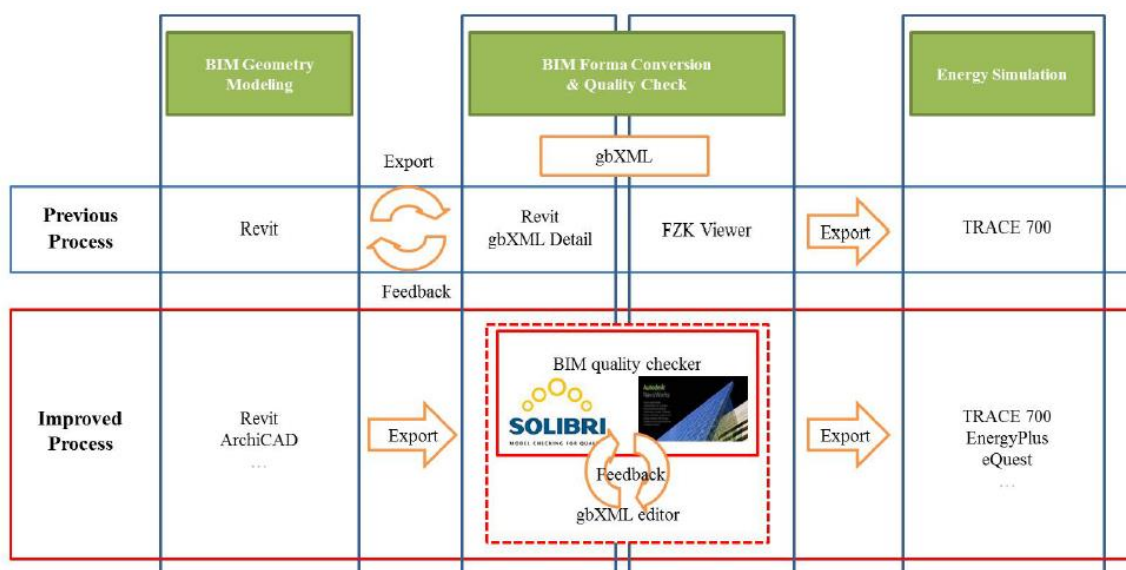
4.4.1. BIM (IFC) – GBXML

Η διαλειτουργική σύνδεση του προτύπου gbXML με μοντέλα BIM, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, γίνεται μέσω του λογισμικού Revit, όπου αξιοποιώντας την γεωμετρία του και εφαρμόζοντας τα απαραίτητα βήματα μετάφραση δημιουργούνται οι αναλυτικές επιφάνειες και χώροι των ενεργειακών μοντέλων. Η κατάλληλη γεωμετρική μετάφραση των αρχιτεκτονικών μοντέλων σε gbXML, χρειάζεται το καθορισμό σωστών οριακών συνθηκών στους αναλυτικούς χώρους και επιφάνειες, ώστε να δημιουργηθούν όλες οι γειτονικές επιφάνειες κάθε θερμικής ζώνης αλλά και οι οριακές συνθήκες αυτών. Σε επόμενο βήμα και πριν την εισαγωγή του gbXML μοντέλου σε κάποιο πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης για περαιτέρω ανάλυση, χρειάζεται ποιοτικός έλεγχος και γεωμετρική διόρθωση των οριακών συνθηκών κάθε επιφάνειας, που δεν δημιουργήθηκαν στη αυτοματοποιημένη μετάφραση του BIM λογισμικού. Στο σημασιολογικό μοντέλο gbXML η επιφάνεια τοίχου, αποτελεί την οριακή συνθήκη για δύο γειτονικές θερμικές ζώνες.



Σχήμα 4.4-1: Οριακές συνθήκες χώρων ή ζωνών (Weise et al.,2016)

Σύμφωνα με τους Ryo & Park, 2016, ένα ακριβές γεωμετρικό μοντέλο σύμφωνα με το πρότυπο gbXML μπορεί να ελεγχθεί για σφάλματα και να διορθωθεί πριν την εισαγωγή του σε κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης με δύο τρόπους. Ο εντοπισμός των σφαλμάτων μπορεί να γίνει εντός του ίδιου του λογισμικού Revit μέσω του εργαλείου Interface Check, ελέγχοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αρχιτεκτονικών στοιχείων για αλληλεπικαλύψεις ή παρεμβολή, ενώ μέσα από το εργαλείο gbXML Viewer στη διαδικασία εξαγωγής του μοντέλου μπορεί να ελεγχθεί το ύψος κάθε χώρου και αν ο κάθε χώρος ερμηνεύεται από της κατάλληλες γειτονικές επιφάνειες. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να γίνει και η αξιολόγηση για «air gaps», που δημιουργούνται είτε από τις γραμμές οριοθέτησης χώρων είτε από σφάλμα οριοθέτησης του ύψους. Αντίστοιχα, μέσω του λογισμικού FZK Viewer δίνεται η ιεραρχική δομή των σημασιολογικών οντοτήτων και ελέγχονται οι κλάσεις gbXML-AIR και gbXML-SHADE. Ωστόσο αυτή η διαδικασία υλοποιείται σε επίπεδο θέασης και ανίχνευσης κάθε περίπτωσης ξεχωριστά και είναι χρονοβόρα στην εύρεση σφαλμάτων, που το λογισμικό Solibri Model Checker μπορεί να αυτοματοποιήσει την διαδικασία εύρεσης σφαλμάτων και διόρθωσης αυτών. (Σχήμα 4.4-2)



Σχήμα 4.4-2: Ροή εργασίας βελτίωσης BIM σε ενεργειακό μοντέλο (Ryo, H.; Park, K., 2016)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και επισημαίνεται και από τους Chen.et al., 2018 υπάρχουν δύο τρόποι υλοποίησης της λειτουργικότητας μεταξύ του αρχιτεκτονικού μοντέλου BIM και του μοντέλου ενεργειακής προσομοίωσης κατά gbXML χρήση του λογισμικού Revit. Στη πρώτη προσέγγιση, ενώ έχει υλοποιηθεί η ενεργειακή ανάλυση, το gbXML μοντέλο παράγεται με χρήση των ρυθμίσεων ενέργειας, όπου δημιουργείται το αναλυτικό μοντέλο ενέργειας αποτελούμενο από αναλυτικούς χώρους και αναλυτικές επιφάνειες, υιοθετώντας τις μη-γεωμετρικές ιδιότητες που έχουν οριστεί κατά την δημιουργία θερμικών ζωνών, όπως η πληρότητα, ο φωτισμός, ο εξοπλισμός και ο κλιματισμός, τύπος συστημάτων θέρμανσης - ψύξης

- κλιματισμού (HVAC) καθώς και η ανταλλαγή θερμότητας με άλλους χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, η χρήση των ρυθμίσεων ενέργειας δεν κρατά την γεωμετρία των χώρων και δημιουργεί αρκετά αποσυνδεδεμένα γεωμετρικά στοιχεία του κτηρίου. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τον όγκο από τα δωμάτια και τους χώρους, διατηρώντας την γεωμετρική πληροφορία αυτών αλλά χάνοντας μέρος σημασιολογικής πληροφορίας των ενεργειακών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των αναλυτικών επιφανειών όπου η πρώτη προσέγγιση προσθέτει στο σημασιολογικό παραγόμενο μοντέλο gbXML.

4.4.2. IFC – CITYGML

Η διαλειτουργικότητα μεταξύ IFC και CityGML θα βοηθούσε στη αντιμετώπιση ζητημάτων σε σχέση με την αποδοτική διαχείριση των έργων και διευθέτηση σχέσης κτηρίου και πόλης. Παρ' όλα αυτά, καθιστά μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία λόγω ορισμένων παραμέτρων. Τα διάφορα εργαλεία μοντελοποίησης κτηριακής πληροφορίας (Autodesk Revit, Trimble sketchUp, ESRI Cityengine κλπ.), ακολουθούν διαφορετικούς κανόνες κατά τις διαδικασίες μοντελοποίησης και συχνά δημιουργούνται για διαφορετικά πεδία εφαρμογής και απευθύνονται σε διαφορετικούς τύπους χρηστών.

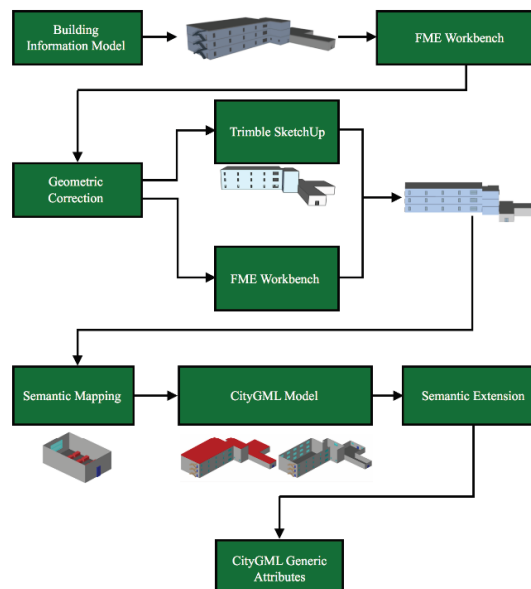
Η σημασιολογική πληροφορία του προτύπου IFC είναι σημαντικά περισσότερη και πιο σύνθετη σε σχέση με αυτή του προτύπου CityGML. Η μέχρι σήμερα έρευνα γύρω από τη διερεύνηση της διαλειτουργικότητας των δύο προτύπων εστιάζει στην επίλυση των σημαντικών γεωμετρικών διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ τους. Αναδεικνύεται όμως και η ανάγκη για διατήρηση της σημασιολογικής πληροφορίας, η οποία δεν μεταφέρεται κατά την μετατροπή του μοντέλου.

Για παράδειγμα, το πρότυπο IFC επικεντρώνεται στο κατασκευαστικό τμήμα ενός κτηρίου και παρέχει δομικά στοιχεία όπως δοκούς, πλακάκια και τοίχους. Αντίθετα, το CityGML περιγράφει τα κτήρια όπως καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, το πρότυπο IFC επικεντρώνεται αποκλειστικά στο κτήριο, ενώ το CityGML επεκτείνεται σε ένα σύνθετο πρότυπο πόλης που αποτελείται από χρήσεις γης, μεταφορικά αντικείμενα, βλάστηση, υδατικά συστήματα κλπ. Τέλος, αντίθετα με το CityGML, το πρότυπο IFC δεν υποστηρίζει τη μοντελοποίηση πολλαπλών κλιμάκων, καθώς τα αντικείμενα αντιπροσωπεύονται σε ένα επίπεδο λεπτομέρειας (Gröger & Plümer, 2012).

Δύο βασικές διαφοροποιήσεις των δύο προτύπων είναι στην γεωμετρική αντίληψη των αντικειμένων. Για παράδειγμα, οι τοίχοι στο πρότυπο IFC αφορούν τη κλάση IfcWall και αποτελούν συμπαγή όγκο, ενώ στο CityGML αναλύονται σε δύο κλάσεις την InteriorWallSurface και WallSurface. Κατ'αντιστοιχία το ίδιο ισχύει για το πάτωμα όπου το IFC το θεωρεί ενιαίο όγκο κατατάσσοντάς το στη κλάση IfcSlab, ενώ το

CityGML το αντιλαμβάνεται ως δύο διακριτές ενότητες: RoofSurface ή FloorSurface. Στη μελέτη ταύτισης των κλάσεων μεταξύ των προτύπων (L.A.H.M. van Berlo & de Laat, 2011) διερευνήθηκε ότι από τις 60-70 IFC κλάσεις που θα μπορούσαν να αντιστοιχηθούν με τις κλάσεις του CityGML, μόνο 17 ήταν ικανές να το πραγματοποιήσουν.

Για την υλοποίηση της διαλειτουργικής σύνδεσης των μορφότυπων και της μετάφρασης των δύο μοντέλων έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά που αξιοποιούν τη διαδικασία Extract Transform Load (ETL) στη διαδικασία μετάφρασης. Η διαδικασία ETL, εξάγει τα ομοιογενή δεδομένα από την πηγή και τα φορτώνει σε μια 'αποθήκη' δεδομένων μετασχηματίζοντάς τα σε κατάλληλη μορφή ή δομή. Τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται στις μελέτες των Rafiee et al., 2014, Kang & Hong, 2015). Λογισμικά που εφαρμόζουν τέτοιες διαδικασίες είναι το Safe FME, όπου επιτρέπει διπλής κατεύθυνσης λειτουργίες εγγραφής και ανάγνωσης από το IFC στο CityGML και ανάποδα. Όπως περιγράφεται στο διάγραμμα ροής (Floros; Dimoroulou, et al., 2018) η γεωμετρική διόρθωση μπορεί να ωφελήσει τη διαδικασία μετάφρασης διορθώνοντας σφάλματα όπως επιφάνειες από μέρη πόρτας που παραλείφθηκαν ή επικαλύψεις συμπαγών όγκων, ενώ η σημασιολογική πληροφορία που τα περιγράφει μπορεί κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης να ανακτηθεί και αποθηκευτεί σε ξεχωριστό αρχείο. Η προτεινόμενη διαδικασία ενισχύει επίσης την παραγωγή πολλαπλών επιπέδων διαφορετικής λεπτομέρειας (LoDs). Ωστόσο η διαδικασία μετάφρασης με χρήση του FME αποδεικνύεται απαιτητική για επίπεδο λεπτομέρειας 4 (LoD4).

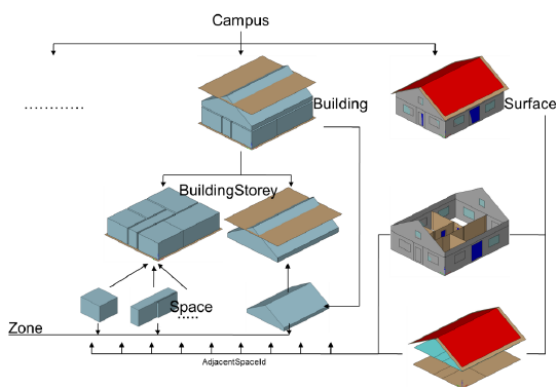


Σχήμα 4.4-3: Διάγραμμα ροής μετάφρασης BIM (IFC) σε CityGML, LoD 4 χρήση του λογισμικού Safe FME (Floros; Dimoroulou, et al., 2018)

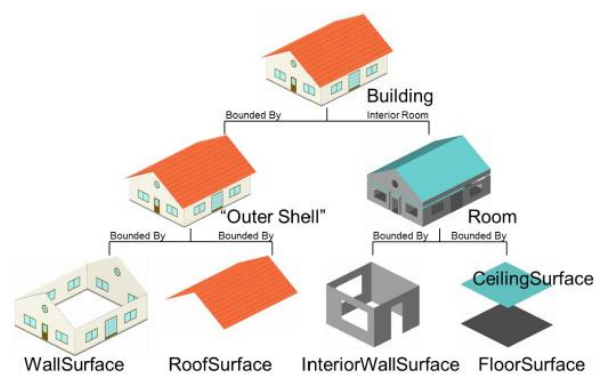
4.4.3. GBXML – CITYGML

Το σημασιολογικό μοντέλο για ενεργειακά κτήρια σύμφωνα με το πρότυπο gbXML συνίσταται από επιφανειακά αντικείμενα (τύπος επιφάνειας: ExteriorWall, Roof, Shade, Ceiling κλπ.), από μια γεωμετρική αναπαράσταση του εξωτερικού κελύφους (ShellGeometry) και των σχέσεων του με τους χώρους (gbXML class Space). Τα αντικείμενα των χώρων μπορούν να ομαδοποιηθούν οριζόντια ορίζοντας τον όροφο (BuildingStorey), ενώ επίσης μπορούν να αντιστοιχιστούν σε Ζώνες. Κάθε αντικείμενο επιφάνειας αντιπροσωπεύει το θερμικό όριο (thermal boundary) ενός χώρου και μπορεί να μοντελοποιηθεί τόσο ως RectangularGeometry (προέλευση, πλάτος, ύψος και προσανατολισμός) όσο και ως PlanarGeometry (πολύγωνα) με αποτέλεσμα κάθε χώρος να οριοθετείται από επιφανειακά αντικείμενα. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει σχηματικά τη δομή του μοντέλου κτηρίου gbXML.

Εκτός από τη γεωμετρία και τις σχέσεις μεταξύ των οριακών συνθηκών (BoundarySurface) των επιφανειών και των χώρων, το μοντέλο κτηρίου gbXML περιέχει όλες τις σχετικές πληροφορίες για προσομοιώσεις ενεργειακών επιδόσεων. Κάθε αντικείμενο BoundarySurface μπορεί να έχει μια λεπτομερή περιγραφή της κατασκευής του, συμπεριλαμβανομένων των πολλαπλών επιπέδων κατασκευής όλων των σχετικών ιδιοτήτων κατασκευής και υλικών (Häfele et al., 2015).



Σχήμα 4.4-4: Δομή σημασιολογικού μοντέλου ενεργειακού κτηρίου gbXML



Σχήμα 4.4-5: Δομή σημασιολογικού μοντέλου κτηρίου CityGML

| | LoD1 | LoD2 | LoD3 | LoD4 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|
| Building volume | - | + | ++ | ++ |
| Boundary surfaces | n. a. | ++ | + | + |
| Openings | n. a. | n. a. | + | + |
| Interior structure | n. a. | n. a. | n. a. | + |
| Availability | ++ | + | - | -- |

Σχήμα 4.4-6: Βαθμονόμηση επιπέδων ανάλυσης LoD του CityGML για ενεργειακή προσομοίωση (++πολύ καλό, --πολύ κακό) (A. Geiger, et al., 2018)

Σύμφωνα με τους Geiger, et al., 2018, αποδεικνύεται ότι τα πιο συχνά διαθέσιμα μοντέλα LoD1 δεν παρέχουν άμεση πληροφόρηση σχετικά με ενεργειακά χαρακτηριστικά παρά μια κατά προσέγγιση αναπαράσταση του συνολικού όγκου κτηρίων. Τα μοντέλα της κατηγορίας LoD4 έχουν το υψηλότερο περιεχόμενο πληροφοριών και θα μπορούσε, ενδεχομένως – μετά από κατάλληλη γεωμετρική επεξεργασία – να δημιουργηθούν χώροι που να οριοθετούνται από επιφανειακά αντικείμενα οριακών συνθηκών για να αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές θερμικές ζώνες μέσα σε ένα κτήριο. Ωστόσο, τέτοια μοντέλα δεν υπάρχουν στην πράξη ή χρειάζονται αλγοριθμική προσαρμογή όπως προτείνεται από Lillis et al., 2016. Ως εκ τούτου, η διαδικασία εμπλουτισμού των περισσότερων ερευνών στα LoD2 και LoD3 μοντέλα. Η διαφορά της ιεραρχικά δομημένης δομής των σημασιολογικών μοντέλων είναι ότι στο CityGML για LoD1-3 οι οριακές επιφάνειες εκχωρούνται στο κτήριο ενώ στο gbXML οι επιφάνειες εκχωρούνται στο χώρο.

Τα περισσότερα συστήματα εξομίωσης ενεργειακών έργων λειτουργούν με απλουστευμένες υποθέσεις σε ότι έχει να κάνει με την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας μεταξύ του εσωτερικού του κτηρίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Επομένως, η γενικευμένη γεωμετρία οριακής επιφάνειας (boundary surface) που παρέχεται από τα μοντέλα LoD2 είναι συνήθως καλύτερη από την γεωμετρικά πιο λεπτομερή έκδοση των μοντέλων σε LoD3. Κεντρικό πρόβλημα σε πολλές περιπτώσεις είναι η γεωμετρική αναπαράσταση του εξωτερικού κελύφους του κτηρίου, καθώς ένα LoD3 μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες όπως τις προεξοχές οροφής, τα διακοσμητικά στοιχεία πρόσοψης, ή τα σύνθετα παράθυρα πλέγματος. Έτσι, ο όγκος του μοντέλου LoD3 και η οριακή γεωμετρία της επιφάνειας μπορεί να περιέχουν στοιχεία που είτε δεν αποτελούν μέρος της θερμικής ζώνης (thermal hull) του κτηρίου (π.χ. προεξοχή οροφής) ή παραδοχών γενίκευσης του χρησιμοποιούμενου φυσικού μοντέλου κτηρίου (π.χ., σταθερό πάχος των θερμικών ορίων, μετάδοση ενέργειας 1D μέσω ενός θερμικού ορίου). (Aguiriano et al., 2018) Ωστόσο, το κεντρικό μειονέκτημα των μοντέλων LoD2 είναι η

έλλειψη πληροφορίας για τα ανοίγματα, που πρέπει να προστίθενται στη διαδικασία εμπλουτισμού.

Ως μοντέλο δεδομένων γενικού σκοπού, το CityGML δεν προσφέρει προς το παρόν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες για τα κτήρια που σχετίζονται με την ενέργεια. Παρ' όλα αυτά, μερικές έννοιες και χαρακτηριστικά που ενσωματώνει είναι χρήσιμα για προσομοιώσεις ενέργειας (Häfele et al., 2015):

- Η γεωμετρική αναπαράσταση ενός κτηρίου ως στερεού επιτρέπει τον υπολογισμό του όγκου του κτηρίου.
- Λόγω της χρήσης παγκόσμιων γεωγραφικών συντεταγμένων, τα μοντέλα κτηρίων CityGML έχουν σωστή θέση και προσανατολισμό σε πραγματικό κόσμο. Έτσι, μπορούν να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις προσανατολισμού κτηρίου ή η επίδραση γειτονικών κατασκευών.
- Για την εκτίμηση του μεγέθους του κτηρίου και της ενεργειακής ποιότητάς του μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες ιδιότητες:
 - Αριθμός ορόφων, προαιρετικά συμπεριλαμβανομένων των υψών των ορόφων,
 - Έτος κατασκευής, λειτουργίας και χρήσης του κτηρίου.
- Την ταξινόμηση του εξωτερικού κελύφους του κτηρίου από διαφορετικά είδη οριακών επιφανειών (π.χ. επιφάνειες οροφής ή τοίχου).
- Εγκαταστάσεις εσωτερικού κτηρίου, π.χ. γεννήτρια θερμότητας ή καλοριφέρ, αντιπροσωπεύουν γεωμετρικά τις υπηρεσίες κτηρίων.

Η επέκταση του σημασιολογικού μοντέλου CityGML με το **Energy ADE** υλοποιεί την σημασιολογική επέκταση αυτού και υιοθετεί κλάσεις για την αποθήκευση χαρακτηριστικών ενεργειακού περιεχομένου για το κτήριο. Τα Modules – θεματικά επίπεδα που συνδέονται με το Energy ADE είναι τα παρακάτω:

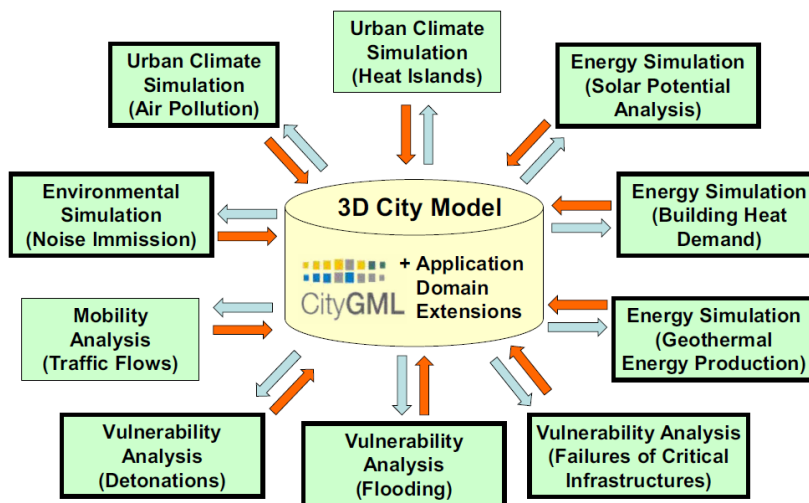
- Η ενότητα *Energy ADE Core*, ορίζει έναν αριθμό των αφηρημένων κατηγοριών του βασικού μοντέλου CityGML επεκτείνοντας τις κλάσεις *_AbstractBuilding* και *_CityObject* με νέες ιδιότητες.
- Η ενότητα της *Building Physics*, υποστηρίζοντας παραμέτρους για την ενέργεια κτηρίου μιας ή πολλών ζωνών προσομοιώσεις.
- Η ενότητα *Occupant Behaviour*, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση της πληρότητας του κτηρίου.
- Η ενότητα *Material & Construction*, παρέχοντας φυσικές παραμέτρους των δομικών υλικών.
- Η ενότητα *Energy Systems*, που επιτρέπει την αναπαράσταση της μετατροπής, διανομής και αποθήκευσης της ενέργειας, την εκπομπή ενέργειας από συσκευές και τη ροή ενέργειας μεταξύ τους;
- Διάφορες άλλες κατηγορίες υποστήριξης για την αναπαράσταση χρονοσειρών φυσικών δεδομένων, χρονοδιαγραμμάτων και δεδομένων καιρού

5. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΤΗΡΙΩΝ CITYGML ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

5.1. DYNAMIZER ADE

Τα στατικά μοντέλα πόλεων υφίστανται δυναμικές αλλαγές στο χρόνο, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 2. Οι δυναμικές αλλαγές μπορούν να σχετίζονται με:

- Αλλαγές των χωρικών χαρακτηριστικών: αλλαγή γεωμετρίας της οντότητας, σε σχέση τόσο με το σχήμα όσο και με την τοποθεσία (κινητά αντικείμενα)
- Αλλαγές θεματικών χαρακτηριστικών: αλλαγή σε ενεργειακή κατανάλωση, μέση θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, αλλαγή ιδιοκτήτη
- Αλλαγές από μετρητές αισθητήρων ή πραγματικού χρόνου αλλαγές

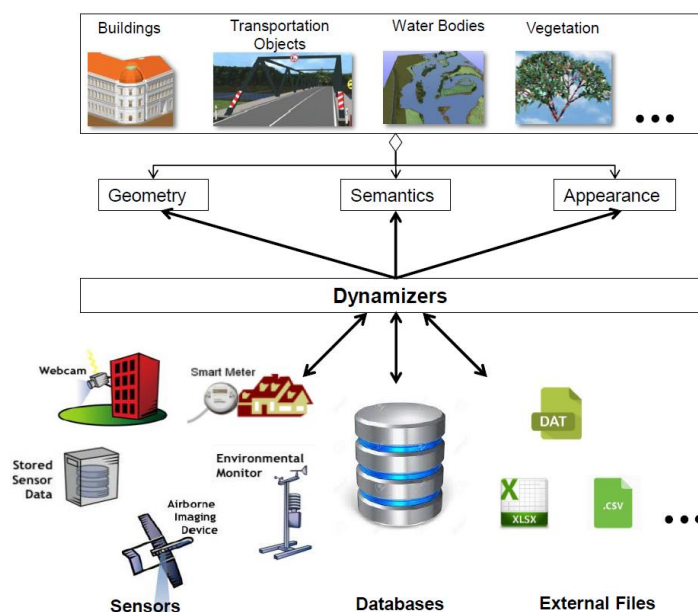


Σχήμα 5.1-1: Πεδία εφαρμογής προσομοιώσεων για ανάκτηση δυναμικών δεδομένων

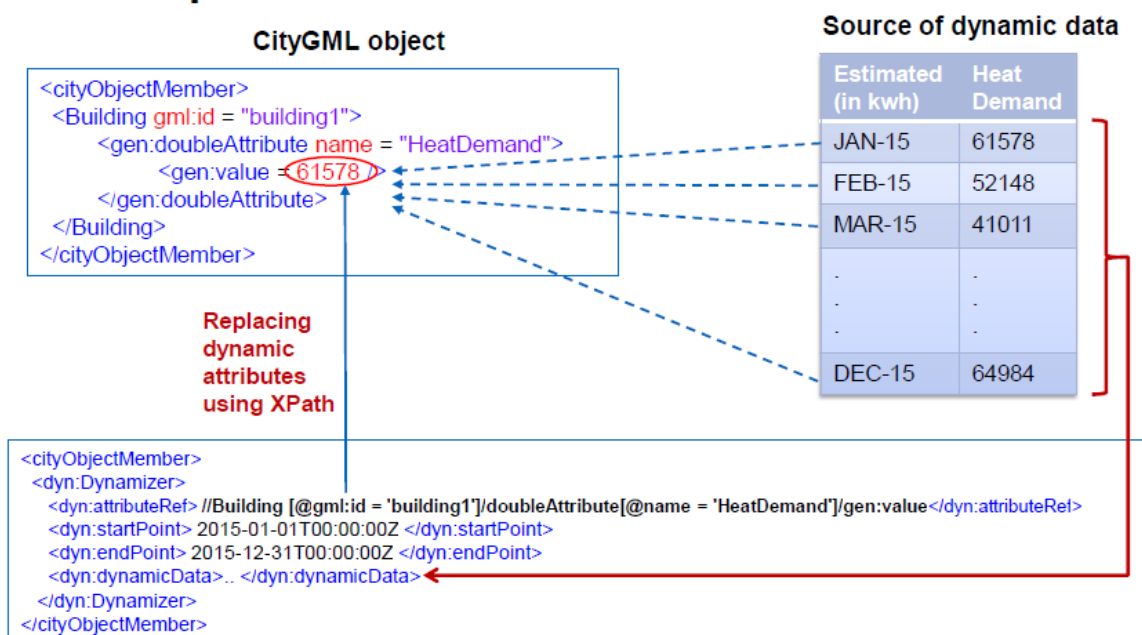
Τα Dynamizers (Chaturvedi & Kolbe, 2016) είναι μια νέα έννοια, η οποία στόχο έχει να επεκτείνει τα στατικά μοντέλα 3D πόλεων υποστηρίζοντας τις διάφορες παραλλαγές των ιδιοτήτων των χαρακτηριστικών τους και συσχετισμών αυτών με την πάροδο του χρόνου. Σηματοδοτεί μια μέθοδο για την ενίσχυση των στατικών μοντέλων πόλης με δυναμικές ιδιότητες. Αναφέρεται σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. γεωμετρία, θεματικά δεδομένα ή εμφάνιση) ενός αντικειμένου μέσα σε ένα μοντέλο 3D πόλης που παρέχει δυναμικές τιμές που αντιπροσωπεύουν την στατική τιμή του αντικειμένου αναφοράς. Τα Dynamizers έχουν υλοποιηθεί ως Application Domain Extension (ADE) για την έκδοση CityGML 2.0 και προγραμματίζεται να γίνει μέρος της επόμενης έκδοσης του CityGML (έκδοση 3.0).

Τα Dynamizers επιτρέπουν τη μοντελοποίηση και ενσωμάτωση των δυναμικών ιδιοτήτων σε σημασιολογικά μοντέλα 3D πόλης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1-2, και περιγράφεται παρακάτω τα Dynamizer εξυπηρετούν τρεις σκοπούς:

1. Τα Dynamizer αποτελούν μια δομή για την αναπαράσταση δυναμικών δεδομένων, όπου τα δυναμικά δεδομένα χρονοσειράς μπορεί να είναι πινακοποιημένα σε ζεύγη χρόνου τιμής (time/value pairs), πρότυπα σε ζεύγη χρόνου τιμής ή να αναφέρονται σε εξωτερικά αρχεία. Η ανάκτηση αυτών μπορεί να γίνει από σένσορες, ΒΔ από προσομοιώσεις ή εξωτερικά αρχεία μορφότυπου .csv ή excel Spreadsheets.
2. Τα Dynamizers αποτελούν μια μέθοδο βελτίωσης των στατικών μοντέλων ως δυναμικά μοντέλα. Αναφέρονται σε ιδιότητες όπως αλλαγές της χωρικής, θεματικής ή ιδιότητα εμφάνισης ενός στατικού αντικειμένου της 3D πόλης μεταφράζοντας την στατική ιδιότητα σε δυναμική. Ο μηχανισμός ενσωμάτωσης των δυναμικών τιμών πραγματοποιείται ξεχωριστά σε σχέση με τα αρχικά στατικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, λειτουργώντας ως «μεταφραστής» μιας στατικής τιμής στο βασικό σημασιολογικό μοντέλο του CityGML, με την δυναμική αυτή τιμή να αντικαθιστά κάθε φορά την στατική τιμή του μοντέλου στο χρόνο.
3. Τα Dynamizers υλοποιούν επίσης τη σύνδεση των ιδιοτήτων των αντικειμένων της πόλης με δεδομένα και παρατηρήσεις από μετρητές σε σένσορες. Με την σύνδεση αυτή, καθορίζεται η σημασιολογία των δεδομένων από αισθητήρες στο μοντέλο πόλης



Σχήμα 5.1-2: Εννοιολογική αναπαράσταση των Dynamizers, επιτρέποντας τόσο (i) την ενσωμάτωση μετρήσεων από αισθητήρες, τιμές προσομοίωσης από ΒΔ και εξωτερικά αρχεία, όσο (ii) την ενίσχυση των αντικειμένων της πόλης μεταφράζοντας τις στατικές τους τιμές (Chaturvedi & Kolbe, 2016)



Σχήμα 5.1-3: Παράδειγμα μετάφρασης – αντικατάστασης στατικής τιμής στο CityGML με δυναμική τιμή του Dynamizer για το αντικείμενο του κτηρίου (Chaturvedi & Kolbe, 2016)

5.1.1. Χαρακτηριστικά πρότυπα ενσωμάτωσης Dynamizer

Η γλώσσα Geography Mark-up Language (GML) επιτρέπει την έκφραση των χρονικών εξελίξεων του χρησιμοποιώντας ιδιότητες που προσδιορίζουν ιστορικότητα. Το ISO19123, 2005 Schema for coverages ορίζει την κάλυψη ως συνάρτηση του χώρου, του χρόνου ή του χωροχρόνου για ένα εύρος χαρακτηριστικών. Η χρονική θέση των δυναμικών δεδομένων καλύπτεται ως TM_Position με το ISO 19108, ενώ το ISO 19108 ορίζει ένα συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Τα δυναμικά δεδομένα ορίζονται σύμφωνα με το πρότυπό του OGC, **TimeseriesML 1.0** σε ζεύγη χρόνου-τιμής (time/value pair) και τομέα-σειράς (domain-range), ενώ για δεδομένα από σένσορες χρησιμοποιούν τα πρότυπα του OGC, **(i) Sensor Observation Services (SOS)** (Broring et al., 2012) που είναι μέρος του OGC Sensor Web Enablement (SWE) (Broring et al., 2011) υλοποιώντας την ανάκτηση πραγματικού χρόνου δεδομένων από αισθητήρες ενώ οι παρατηρήσεις αυτών κωδικοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο Observation and Measurements (O&M) και **OGC (ii) SensorThings API** (Liang et al., 2015) που βασίζεται στα αντίστοιχα πρότυπα SWE και O&M που υλοποιεί την σύνδεση με Internet of Things (IoT) συσκευές και δεδομένα διαδικτύου.

5.1.1.1. TimeseriesML 1.0

Το **TimeseriesML 1.0** (TimeseriesML, 2015) είναι ένα νέο OGC πρότυπο για την αντιπροσώπευση και την ανταλλαγή δεδομένων παρατήρησης ως χρονοσειρές. Το TimeseriesML είναι μια εξειδίκευση του ISO 19123, όπου αναλύει ένα σύνολο χρονικών στιγμών με κάθε μία εγγραφή να σχετίζεται με μία μόνο τιμή από τα

χαρακτηριστικά του χώρου. Το σχήμα TimeseriesML υποστηρίζει δύο τύπους κωδικοποιήσεων: (i) ένα ζεύγος κωδικοποίησης του χρόνου και τιμής (time-value pair), όπου χρόνος και τιμή συνδέονται και η σύζευξη αντιπροσωπεύει ρητά τη χαρτογράφηση και (ii) μια κωδικοποίησης περιοχής τομέα (domain-range), όπου ο τομέας και η περιοχή κωδικοποιούνται ξεχωριστά, με μια λειτουργία χαρτογράφησης που επιτρέπει την αναζήτηση της τιμής εύρους για μια δεδομένη τιμή του τομέα.

5.1.1.2. Observation and Measurements (O&M)

Το πρότυπο Observation and Measurements (O&M) αφορά ένα γενικό μοντέλο πληροφοριών για την περιγραφή παρατηρήσεων (observations). Η κάθε παρατήρηση έχει διαμορφωθεί ως χαρακτηριστικό γνώρισμα σύμφωνα με το πρότυπο ISO19101, 2014. Η παρατήρηση χρησιμοποιεί μια διαδικασία για τον προσδιορισμό της τιμής του αποτελέσματος, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τον αισθητήρα ή τον παρατηρητή, την αναλυτική διαδικασία, κάποια προσομοίωση ή άλλη αριθμητική διαδικασία. O&M είναι ένα από τα βασικά πρότυπα του OGC Sensor Web Enablement, που παρέχει μοντέλα σε υπηρεσίες όπως το **Sensor Observation Service (SOS)** (SOS,2012) και το **SensorThings API** (Liang, 2016).

5.1.1.3. Sensor Web Enablement

Το πρότυπο OGC SWE καθορίζει τον τρόπο διασύνδεσης και κωδικοποίησης των δεδομένων επιτρέποντας την δυναμική ενσωμάτωση δεδομένων από ετερογενείς αισθητήρες. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει αναζήτηση διαφορετικών τύπων αισθητήρων, καθώς και επαναχρησιμοποίηση αυτών για τη δημιουργία εφαρμογών με δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο και τις υπηρεσίες. Το SWE περιέχει δύο σημαντικά μοντέλα πληροφορίας: (i) το **Sensor Model Language (SensorML)**, το οποίο καθορίζει ένα σχήμα XML για την περιγραφή των διαδικασιών εντός του αισθητήρα και του συστήματος επεξεργασίας παρατηρήσεων, ενώ παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για αναζήτηση, γεωαναφορά και επεξεργασία παρατηρήσεων, και (ii) το **Observations & Measurements (O&M)** όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, το SWE παρέχει διαφορετικά μοντέλα διεπαφών και τις υπηρεσίες διαδικτύου.

5.1.1.4. Sensor Observation Service - SOS.

Η υπηρεσία **Sensor Observation Service - SOS**. Ορίζει μια ανοιχτή διεπαφή μέσω της οποίας ο client μπορεί να αποκτήσει δεδομένα παρατήρησης, καθώς και μια περιγραφή του αισθητήρα και της πλατφόρμας για έναν ή περισσότερους αισθητήρες.

5.1.1.5. SensorThings API OGC

Επιπλέον, το **API SensorThings OGC** είναι ένα πρόσφατο πρότυπο OGC, που παρέχει ένα ανοιχτό και ενοποιημένο τρόπο διασύνδεσης των Διαδικτυακών συσκευών IoT, των δεδομένων και των εφαρμογών μέσω του Διαδικτύου. Είναι ένα πρότυπο που βασίζεται σε Web πρωτόκολλα και το πρότυπο OGC SWE

χρησιμοποιώντας REST-ful περιβάλλον και κωδικοποιήσεις δεδομένων βασισμένες σε JSON.

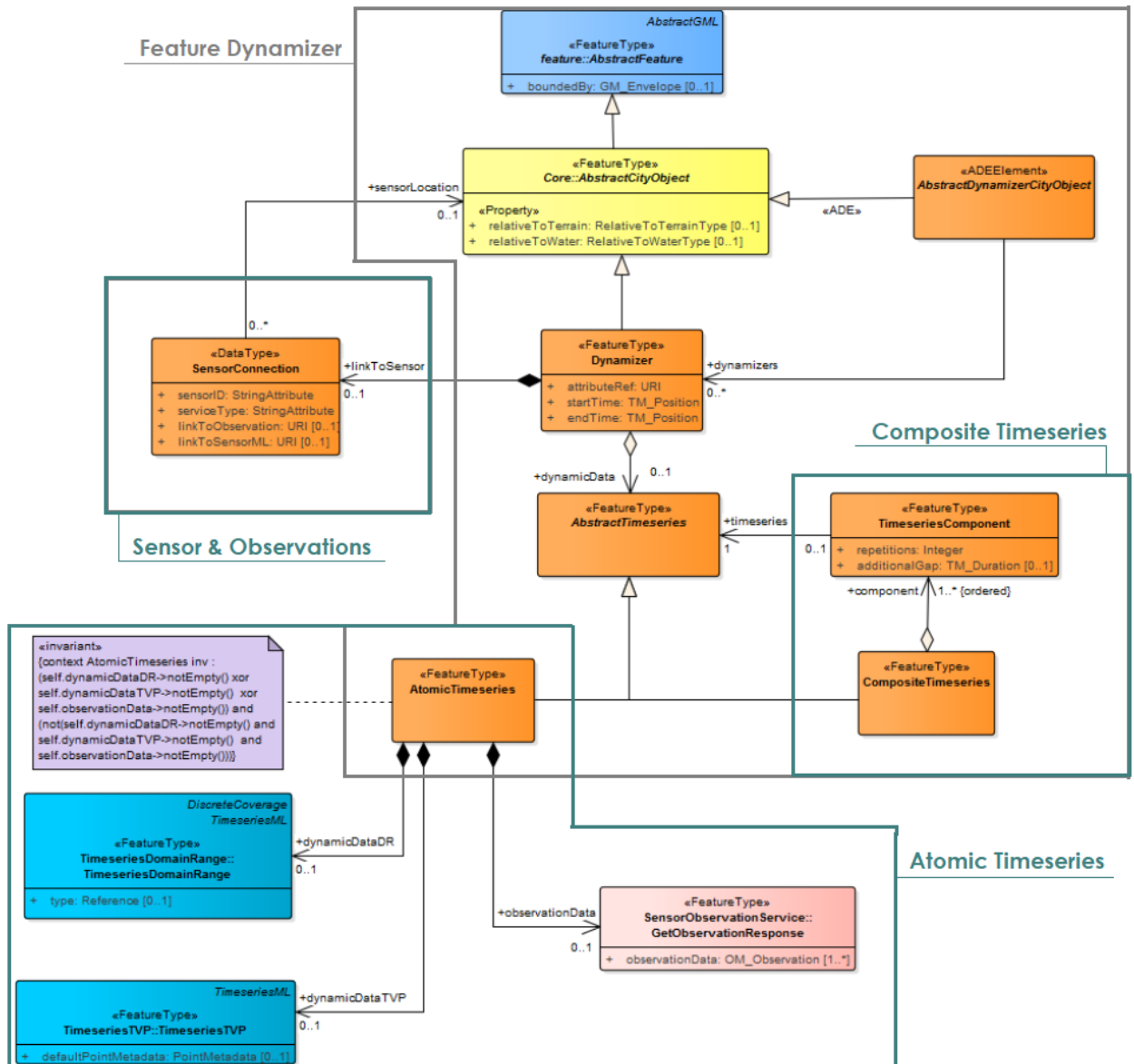
5.2. ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ DYNAMIZER ADE

Το εννοιολογικό μοντέλο (UML) του Dynamizer ADE με το αντίστοιχο XSD (XML Schema Definition) είναι διαθέσιμο στην έκθεση Future City Pilot Phase 1 Engineering Report (Chaturvedi, Kolbe, 2017) (Σχήμα 5.2-1) Ωστόσο, υπήρξαν μερικές προσθήκες στο μοντέλο UML του Dynamizer ως πρόταση ενσωμάτωσης στο CityGML (Σχήμα 5.2-2). Μέσα στα Dynamizer, τα δυναμικά δεδομένα διαμορφώνονται ως **AbstractTimeseries**, το οποίο αντιπροσωπεύει την χρονική αλλαγή ή δυναμική τιμή αυτών. Οι χρονοσειρές μπορούν να αποδοθούν/ανακτηθούν με τρεις (3) τρόπους μέσα από το Dynamizer ADE:

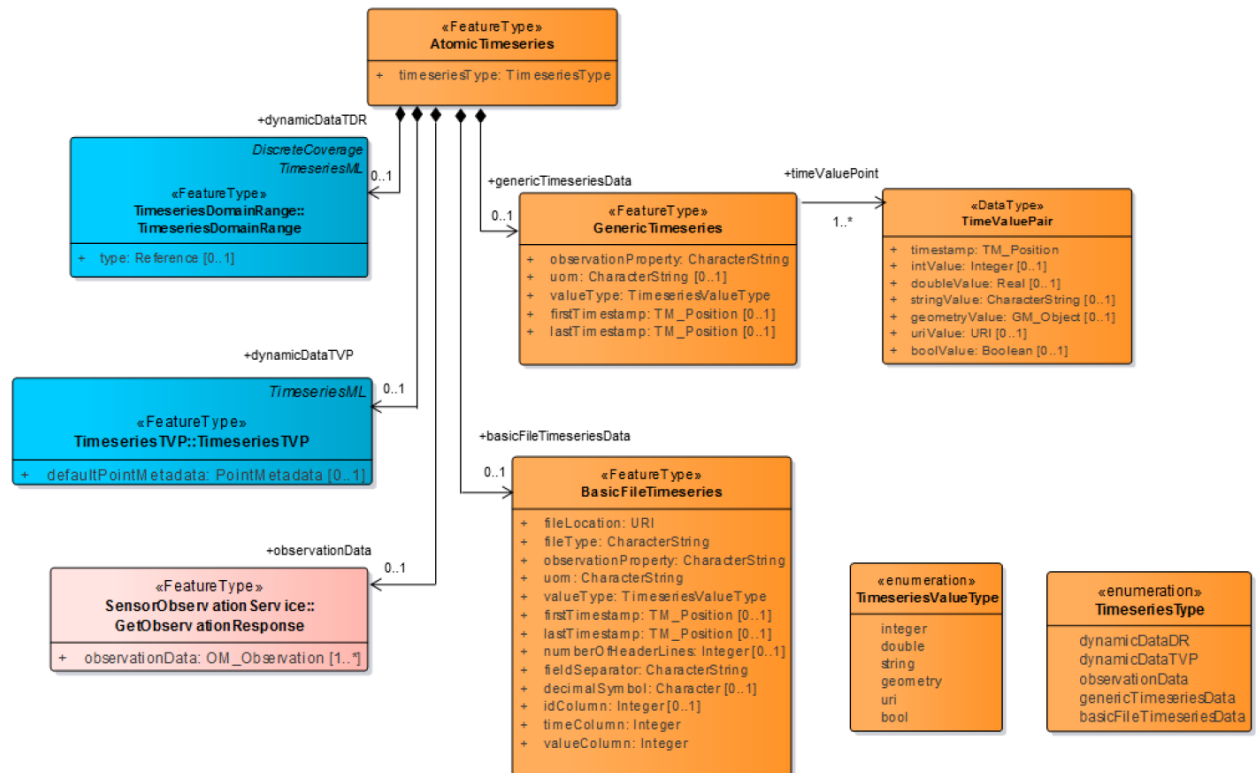
- (i) πινακοποίηση σε ζεύγη χρόνου-τιμής χρησιμοποιώντας την κλάση **AtomicTimeseries**: αποτελείται είτε από τα **dynamicDataDR/dynamicDataTVP** ή από το **observationData**.
- (ii) πρότυπα ζεύγους χρόνου-τιμής βάσει στατιστικών κανόνων χρησιμοποιώντας την κλάση **CompositeTimeseries**.
- (iii) ανάκτηση παρατηρήσεων απευθείας από εξωτερικές υπηρεσίες αισθητήρων ή πλατφόρμες IoT χρησιμοποιώντας την κλάση **SensorConnection**.

Εκτός από αυτές τις δύο αναπαραστάσεις, το **AtomicTimeseries** περιλαμβάνει πλέον και δύο (2) περισσότερες κατηγορίες, ως επέκταση του μοντέλου UML που προτάθηκε από (Chaturvedi, Yao, 2019) (όπως φαίνεται στο (Σχήμα 5.2-2):

- (i) **GenericTimeseries**, όπου παρέχει μια βασική δομή δεδομένων για την απεικόνιση δεδομένων χρονοσειρών. Το πλεονέκτημα αυτής της κλάσης έγκειται στο ότι δεν απαιτεί χρήση βάσεων δεδομένων για την υποστήριξη πολύπλοκων προτύπων όπως το TimeseriesML 1.0. Ωστόσο, σε αντίθεση με την TimeseriesML, η GenericTimeseries είναι δεν δίνει την δυνατότητα να αντιστοιχίσει ελλείπουσες ή πολλαπλές τιμές σε χρονοσειρές χρησιμοποιώντας λειτουργίες παρεμβολής και συνάθροισης
- (ii) **BasicFileTimeseries**, επιτρέπει την ανάκτηση χρονοσειρών από εξωτερικά αρχεία, όπως φύλλα CSV και Excel. Μια τέτοια λειτουργία είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις διαφορετικών σεναρίων όπου οι χρονοσειρές δεδομένων προέρχονται για παράδειγμα από λογισμικά προσομοίωσης. Η κλάση αυτή παρέχει κατάλληλα μεταδεδομένα για ανάγνωση / γραφή χρονοσειρών από ή προς εξωτερικά αρχεία.



Σχήμα 5.2-1: Μοντέλο UML του Dynamizer ADE, με μπλε χρώμα οι νέες κλάσεις, οι κλάσεις με πράσινο και κόκκινο αντιπροσωπεύουν τα πρότυπα TimeseriesML 1.0 και Sensor Observation Service, ενώ με κίτρινο οι κλάσεις των GML και CityGML. (Chaturvedi, Kolbe, 2016).



Σχήμα 5.2-2: Τροποποιημένο μοντέλο UML του Dynamizer ADE του Σχήματος 5.2-1. Τα AtomicTimeseries περιλαμβάνουν δύο νέες κατηγορίες: GenericTimeseries και BasicFileTimeseries. (Chaturvedi, et al., 2019).

5.2.1. Feature Dynamizer

Τα Dynamizer ορίζονται ως υποκλάση της AbstractCityObject, επεκτείνοντας την με την κλάση AbstractDynamizerCityObject. Επιτρέποντας έτσι σε κάθε αντικείμενο της πόλης, όπως κτήρια, δρόμοι, βλάστηση να συνδεθούν γραμμικά ή ως διασυνδέσεις με δυναμικά δεδομένα. Η κλάση Dynamizer περιλαμβάνει τρεις ιδιότητες (i) attributeRef, ως αναφορά σε συγκεκριμένο αντικείμενο με XPath αναφορά (ii) startTime, και (iii) endTime. Κάθε σημείο χρόνου μοντελοποιείται ως TM_Position σύμφωνα με το ISO19108:2002 και αναφέρεται σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς χρόνου (πχ Gregorian Calendar).

Επιπλέον, τα Dynamizer ενσωματώνουν χρονοσειρές στα δυναμικά δεδομένα και μοντελοποιούνται σύμφωνα με την κλάση AbstractTimeseries, που επιτρέπει την αναπαράσταση αλλαγών στο χρόνο ή δυναμικών τιμών με διαφορετικούς τρόπους. Συνεπώς οι χρονοσειρές μοντελοποιούνται είτε ως (i) AtomicTimeseries είτε ως CompositeTimeseries.

5.2.2. Atomic Timeseries

Τα Dynamizers μπορούν να αναπαραστήσουν δυναμικές τιμές με γενικό τρόπο. Πηγή των δυναμικών δεδομένων μπορεί να είναι (i) εξωτερικά αρχεία (πχ .csv) ή δεδομένα από αρχεία γραμμικών σειρών (ii) εξωτερικές ΒΔ (πινακοποιημένα αρχεία από προσομοιώσεις, ή (iii) πραγματικού χρόνου δεδομένα από σενσορες (μετρητές ποιότητας αέρα ή έξυπνους μετρητές). Η δυναμικές αλλαγές χρησιμοποιούν την κλάση AtomicTimeseries και κωδικοποιούνται σύμφωνα με το OGC TimeseriesML 1.0, σε χρονοσειρές ζεύγη χρόνου τιμής (dynamicdataTVP) ή περιοχής τομέα (domain-range), (dynamicDataDR) σύμφωνα με το ISO 19123:2005. Διακριτές καλύψεις προσδιορίζονται από σημεία θέση – χρόνου και μπορεί να είναι αριθμητικές τιμές, κατηγορίες, συντεταγμένες ή links σε εξωτερικά αρχεία. Χρήση του προτύπου OGC TimeseriesML 1.0, τα Dynamizers μπορούν να αποδώσουν τύπους παρεμβολής και συσσωμάτωσης για κάθε σημείο της χρονοσειρές, αναπαριστώντας ελλιπείς τιμές ή πολλαπλές τιμές σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία. Πρόσθετα, η κλάση AtomicTimeseries προσδιορίζει γραμμικές αναπαραστάσεις δεδομένων πραγματικού χρόνου, Observations and Measurements (O&M) από αισθητήρες, χρησιμοποιώντας την ιδιότητα observationData και σύμφωνα με τα πρότυπα του OGC Sensor Web Enablement (SWE) όπως το Sensor Observation Service

```

<cityObjectMember>
  <dyn:Dynamizer gml:id = "HeatDemandTimeseries" >
    <dyn:attributeRef>/Building[@gml:id = "building1"]/doubleAttribute[@name = "HeatDemand"]/gen:value </dyn:attributeRef>
    <dyn:startPoint>2016-01-01T00:00:00Z</startPoint>
    <dyn:endPoint>2016-12-01T00:00:00Z</endPoint>
    <dyn:dynamicData>
      <dyn:Timeseries>
        <dyn:dynamicDataTVP>
          <tsml:TimeseriesTVP gml:id="tsml.measurementtimeseries.heatdemand">
            <tsml:metadata>
              <tsml:TimeseriesMetadata>
                <tsml:baseTime>2016-01-01T00:30:00.000+12:00</tsml:baseTime>
                <tsml:spacing>PT30M</tsml:spacing> ← Spacing of 30 minutes
              </tsml:TimeseriesMetadata>
            </tsml:metadata>
            <tsml:point>
              <tsml:MeasurementTVP>
                <tsml:value>39.97</tsml:value>
              </tsml:MeasurementTVP>
            </tsml:point>
            <tsml:point>
              <tsml:MeasurementTVP>
                <tsml:value>40.12</tsml:value>
              </tsml:MeasurementTVP>
            </tsml:point>
            <tsml:point>
              <tsml:MeasurementTVP>
                <tsml:value>40.02</tsml:value>
              </tsml:MeasurementTVP>
            </tsml:point>
            .....
          </tsml:TimeseriesTVP>
        </dyn:dynamicDataTVP>
      </dyn:Timeseries>
    </dyn:dynamicData>
  </dyn:Dynamizer>
</cityObjectMember>

```

Metadata

Time-Value Pair Encoding
(Relative Time Points, equi-distant/ regular)

Σχήμα 5.2-3: Παράδειγμα σε χρονοσειρές ζεύγη χρόνου/ τιμής (dynamicdataTVP)

```

<cityObjectMember>
  <Building gml:id = "building1">
    <gen:doubleAttribute name = "HeatDemand">
      <gen:value>61578</gen:value>
    </gen:doubleAttribute>
  </Building>
</cityObjectMember>
<cityObjectMember>
  <dyn:Dynamizer gml:id = "HeatDemandTimeseries" >
    <dyn:attributeRef//Building[@gml:id="building1"]/doubleAttribute[@name="HeatDemand"]/gen:value </dyn:attributeRef>
    <dyn:startPoint>2016-01-01T00:00:00Z</startPoint>
    <dyn:endPoint>2016-12-01T00:00:00Z</endPoint>
    <dyn:dynamicData>
      <dyn:Timeseries>
        <dyn:dynamicDataDR>
          <tsml:TimeseriesDomainRange gml:id="timeseries">
            <gml:domainSet>
              <tsml:TimePositionList gml:id="temporal_domain">
                <tsml:timePositionList>2016-01-01T00:00:00Z 2016-02-01T00:00:00Z
                2016-03-01T00:00:00Z 2016-04-01T00:00:00Z 2016-05-01T00:00:00Z
                2016-06-01T00:00:00Z 2016-07-01T00:00:00Z 2016-08-01T00:00:00Z
                2016-09-01T00:00:00Z 2016-10-01T00:00:00Z 2016-11-01T00:00:00Z
                2016-12-01T00:00:00Z</tsml:timePositionList>
              </tsml:TimePositionList>
            </gml:domainSet>
            <gml:rangeSet>
              <gml:QuantityList uom="kwh"> 61578 52148 41011 missing 41199 48789 56767
              66554 76777 67665 missing 66552 </gml:QuantityList>
            </gml:rangeSet>
          </tsml:TimeseriesDomainRange>
        </dyn:dynamicDataDR>
      </dyn:Timeseries>
    </dyn:dynamicData>
  </dyn:Dynamizer>
</cityObjectMember>

```

CityGML Building

Overriding using XPath

Absolute Time Points

Domain-Range Encoding (Absolute Time Points, can also be irregular time points)

Σχήμα 5.2-4: Παράδειγμα σε χρονοσειρές ζεύγη περιοχής τομέα (domain-range), (dynamicDataDR)

```

<cityObjectMember>
  <dyn:Dynamizer gml:id = "SOSResponse" >
    <dyn:attributeRef> . . . . </attributeRef>
    <dyn:startTime>2015-01-01T00:00:00Z</startTime>
    <dyn:endTime>2015-12-01T00:00:00Z</endTime>
    <dyn:dynamicData>
      <dyn:AtomicTimeseries>
        <dyn:observationData>
          <sos:GetObservationResponse>
            <sos:observationData>
              <om:OM_Observation gml:id="o_1">
                <om:type xlink:href="OM_Measurement"/>
                <om:phenomenonTime>
                  <gml:TimeInstant gml:id="phenomenonTime_1">
                    <gml:timePosition>2015-11-10T09:00:18.000Z</gml:timePosition>
                  </gml:TimeInstant>
                </om:phenomenonTime>
                <om:resultTime xlink:href="#phenomenonTime_1"/>
                <om:procedure xlink:href="Solar_PV_Panel"/>
                <om:observedProperty xlink:href="HeatDemand"/>
                <om:featureOfInterest xlink:href="#building1_roofSurface1"/>
                <om:result>27.7</om:result>
              </om:OM_Observation>
            </sos:observationData>
            . . . .
          </sos:GetObservationResponse>
          . . . .
        </dyn:observationData>
      </dyn:AtomicTimeseries>
    </dyn:dynamicData>
  </dyn:Dynamizer>
</cityObjectMember>

```

Dynamizer

Observations encoded in O&M

Other observations

Σχήμα 5.2-5: Παράδειγμα ανάκτησης χρονοσειρών από αισθητήρα με κωδικοποίηση κατά Observations and Measurements (O&M)

5.2.3. Composite Timeseries

Εκτός από την δομή που ορίζεται με την κλάση AtomicTimeseries, οι χρονοσειρές μπορούν να αποδοθούν ως απόλυτα σημεία αρχής – τέλους με αναφορά το χρόνο, χρησιμοποιώντας την κλάση CompositeTimeseries και προσδιορίζοντας τα γνωρίσματα TM_OrdinalEras και M_OrdinalReferenceSystems που αναφέρονται σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς του χρόνου. Σε αυτή την περίπτωση αποδίδονται πρότυπα για να ορίσουν ένα μέρος της χρονοσειράς. Ο χρόνος δεν περιγράφεται ως απόλυτη τιμή, αλλά ως σχετική της απόλυτης τιμής. Για παράδειγμα, η αναπαράσταση των μέσων όρων τιμών για ένα εύρος χρόνου κάθε έτους, το άθροισμα μηνιαίων μετρήσεων καταναλώσεων «όλοι μήνες Ιανουάριος από 2001-2010» ή πρότυπα για τα σαββατοκύριακα ή τις εργάσιμες μέρες, ή τέλος εποχικά πρότυπα για ένα εύρος χρόνου «όλα τα καλοκαίρια» αποτελούν χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Χρήση του TimeseriesComponent που είναι μέρος της CompositeTimeseries, ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων για το μέρος των χρονοσειρών που μπορεί να είναι ακέραιος αριθμός που δείχνει πόσες φορές οι εμφωλευμένες χρονοσειρές πρέπει να επαναληφθούν. Για παράδειγμα, για προσδιοριστούν πρότυπα ενεργειακής κατανάλωσης για τις εργάσιμες μέρες μόνο (Δ-Π), το CompositeTimeseries περιλαμβάνει 5 επαναλήψεις των atomic timeseries για κάθε μοναδιαία καθημερινή κατανάλωση. Τα κενά μέσα στις χρονοσειρές αποδίδονται με την ιδιότητα additionalGap και τον τύπο TM_Duration. Στο προηγούμενο παράδειγμα, ως κενά μπορούν να αποδοθούν τα Σαββατοκύριακα για αναπαράσταση μόνο των ημερών της εβδομάδας.

```

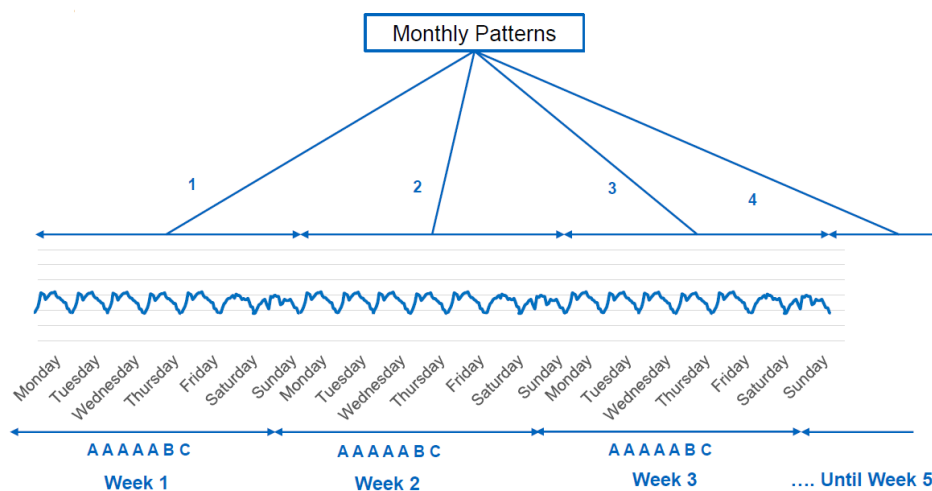
<!-- Example of a daily pattern schedule for a standard week composed of weekday and weekend days-->
<dyn:dynamicData>
  <dyn:CompositeTimeseries gml:id="Daily_Pattern_Schedule">
    <dyn:component>
      <dyn:TimeseriesComponent>
        <dyn:numberOfRepetitions>5</dyn:numberOfRepetitions>
        <dyn:timeseries>
          <dyn:AtomicTimeseries gml:id="Weekday">
            <dyn:dynamicDataTVP>
              <gml:TimeseriesTVP>
                <gml:description>Cooling timeseries for weekdays with 1 hour interval </gml:description>
                <tsml:metadata>
                  <tsml:TimeseriesMetadata>
                    <tsml:temporalExtent>
                      <gml:TimePeriod>
                        <gml:beginPosition>00:00:00</gml:beginPosition>
                        <gml:endPosition>23:59:59</gml:endPosition>
                      </gml:TimePeriod>
                    </tsml:temporalExtent>
                    <tsml:baseTime>00:00:00</tsml:baseTime>
                    <tsml:spacing>PT1H</tsml:spacing>
                  </tsml:TimeseriesMetadata>
                </tsml:metadata>
                <tsml:defaultPointMetadata>
                  <tsml:PointMetadata>
                    <tsml:quality xlink:href="http://www.opengis.net/def/tsml/1.0/quality/Estimate" xlink:title="Estimate"/>
                    <tsml:uom code="C"/>
                    <tsml:interpolationType
                      xlink:href="http://www.opengis.net/def/waterrml/2.0/interpolationType/continuous"
                      xlink:title="Continuous"/>
                  </tsml:PointMetadata>
                </tsml:defaultPointMetadata>
                <tsml:point>
                  <tsml:MeasurementTVP>
                    <tsml:value>25</tsml:value>
                  </tsml:MeasurementTVP>
                </tsml:point>
                <tsml:point>
                  <tsml:MeasurementTVP>
                    <tsml:value>25</tsml:value>
                  </tsml:MeasurementTVP>
                </tsml:point>
                <!-- ..... -->
                <!-- ..... -->
              </tsml:TimeseriesTVP>
            </dyn:dynamicDataTVP>
          </dyn:AtomicTimeseries>
        </dyn:timeseries>
      </dyn:TimeseriesComponent>
    </dyn:component>
  </dyn:CompositeTimeseries>
</dyn:dynamicData>

```

Annotations in the diagram:

- Component for weekdays**: Points to the `<dyn:TimeseriesComponent>` element.
- 5 repetitions**: Points to the `<dyn:numberOfRepetitions>5</dyn:numberOfRepetitions>` element.
- Timeseries Metadata**: Points to the `<tsml:TimeseriesMetadata>` block, including `<tsml:temporalExtent>` and `<tsml:baseTime>`.
- Regular spacing of 1 hour**: Points to the `<tsml:spacing>PT1H</tsml:spacing>` element.
- Metadata for point**: Points to the `<tsml:PointMetadata>` block, including `<tsml:quality>`, `<tsml:uom>`, and `<tsml:interpolationType>`.
- Time-Value Pair Encoding (Relative Time Points, equi-distant/ regular)**: Points to the `<tsml:MeasurementTVP>` elements.

Σχήμα 5.2-6: Παράδειγμα ενσωμάτωσης χρονοσειρών με πρότυπα για τις εργάσιμες μέρες τις εβδομάδας



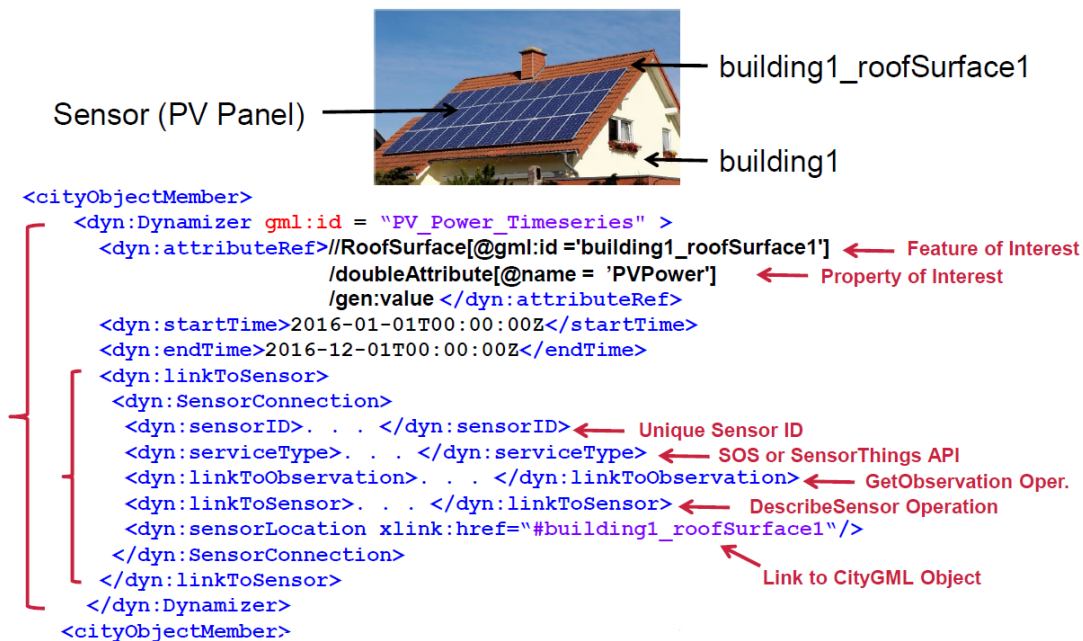
Σχήμα 5.2-7: Διάγραμμα προτύπων για κάθε μήνα (Chaturvedi, Kolbe, 2015)

5.2.4. Sensor & Observations

Τα Dynamizers πέρα από την αναπαράσταση των χρονοσειρών που ορίστηκε παραπάνω, μπορούν να παρέχουν συνδέσεις με μετρητές αισθητήρων χρήση του SensorConnection είδος δεδομένου (UML). Στο πρότυπο OGC SWE, τα περιγραφικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων κωδικοποιούνται σύμφωνα με το μορφότυπο του SensorML ενώ οι παρατηρήσεις αυτών σύμφωνα με το μορφότυπο του O&M. Οι υπηρεσίες διαδικτύου (Sensor Observation Service, SensorThings API) βοηθούν στην ανάκτηση των περιγραφών και μετρήσεων από τους αισθητήρες με ανάλογα ερωτήματα. Τα Dynamizers χρησιμοποιούν αυτά τα πρότυπα επιτρέποντας την σύνδεση των αισθητήρων με τα σημασιολογικά μοντέλα πόλης με δύο (2) τρόπους:

1. **Συμπεριλαμβάνοντας τις παρατηρήσεις από τους μετρητές εντός των Dynamizers.** Οι υπηρεσίες Sensor Observation Service και SensorThings API κωδικοποιούν τις παρατηρήσεις από σένσορες σύμφωνα με το μορφότυπο του O&M, όπου σύμφωνα με αυτό το μορφότυπο, οι παρατηρήσεις ενσωματώνονται για κάθε χαρακτηριστικό αντικείμενο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω με την κλάση AtomicTimeseries. Η περίπτωση αυτή βοηθάει στην σημασιολογική ενίσχυση των οντοτύπων με ιστορικές μετρήσεις. Ωστόσο σε περιπτώσεις συχνής καταγραφής (κάθε 30 δευτερόλεπτα) μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα αποθήκευσης αυτών εντός της ΒΔ.
2. **Συνδέοντας τα Dynamizer με σενσορες.** Αυτή η περίπτωση, αποτελεί λύση στο πρόβλημα αποθηκευτικής ικανότητας συχνών καταγραφών. Τα Dynamizers χρήση των υπηρεσιών Sensor Observation Service και

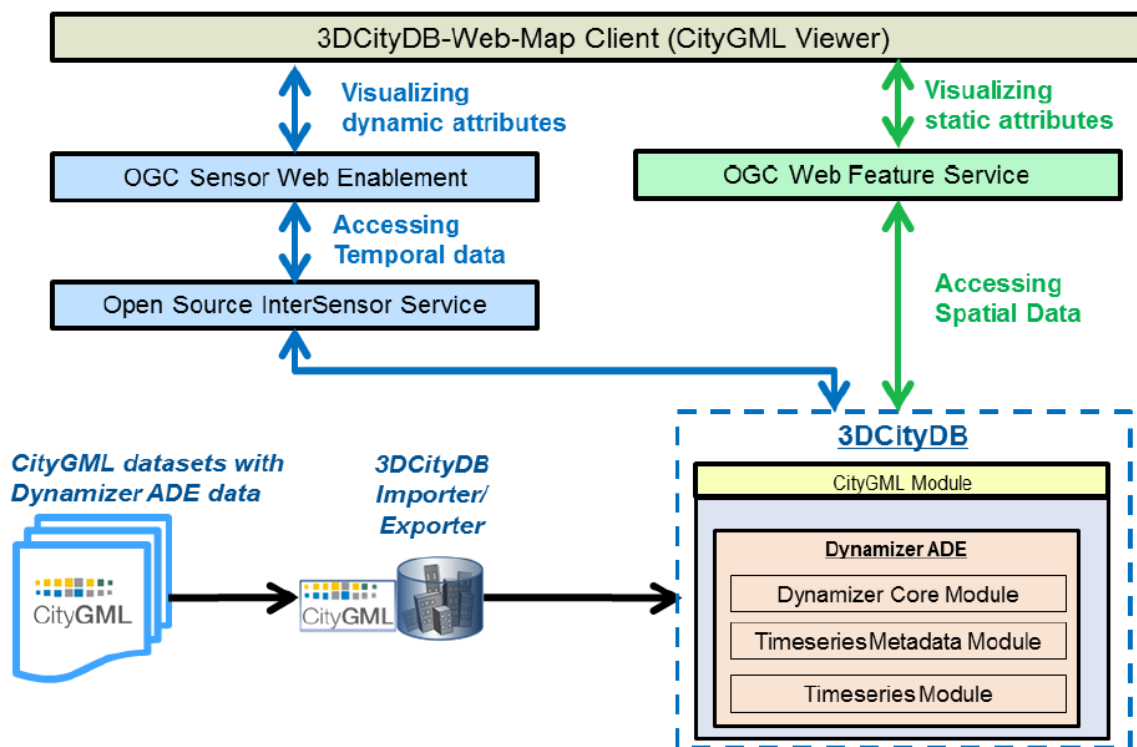
SensorThings API συνδέονται στους αισθητήρες. Υπηρεσίες όπως 52° North Sensor Observation Service υλοποιούν την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων από αισθητήρες. Απαραίτητα για την σύνδεση είναι ένα μοναδιαίο αναγνωριστικό ID (sensorID) του αισθητήρα, το είδος (serviceType) της υπηρεσίας αισθητήρων (SOS, SensorThings API) και ένα URL Link (linkToObservation) που αφορά την ανάκτηση των παρατηρήσεων και το linkToSensorML - URL link που αφορά την περιγραφή και τα μεταδεδομένα του αισθητήρα. Το link δημιουργείται από ερωτήματα (π.χ. DescribeSensor και GetObservation) των υπηρεσιών το οποίο μπορεί στη συνέχεια να ενσωματωθεί στο σημασιολογικό μοντέλο πόλης



Σχήμα 6.4 1: Παράδειγμα δομής της σύνδεσης αισθητήρων στο σημασιολογικό μοντέλο

5.3. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ 3DCITYDB ΜΕ DYNAMIZER ADE

Σύμφωνα με τους Chaturvedi, et al., 2019, προτείνεται μια αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου για τη διαχείριση και οπτικοποίηση των δυναμικών ιδιοτήτων μαζί με τη στατική ιδιότητα των Σημασιολογικών Μοντέλων 3D Πόλης. Η αρχιτεκτονική επεκτείνει τη βάση δεδομένων 3D City (3DCityDB) για αποθήκευση και διαχείριση δυναμικών ιδιοτήτων που κωδικοποιούνται στο CityGML Dynamizer ADE. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3-1, το 3DCityDB επεκτείνεται για να υποστηρίξει το Dynamer ADE. Η υλοποίηση αυτή γίνεται χρήση της εφαρμογής 3DCityDB ADE Plugin Manager, η οποία παρέχει ένα αυτόματο τρόπο για τη δυναμική επέκταση του 3DCityDB για να υποστηρίξει την αποθήκευση και τη διαχείριση μοντέλων CityGML με ADEs.

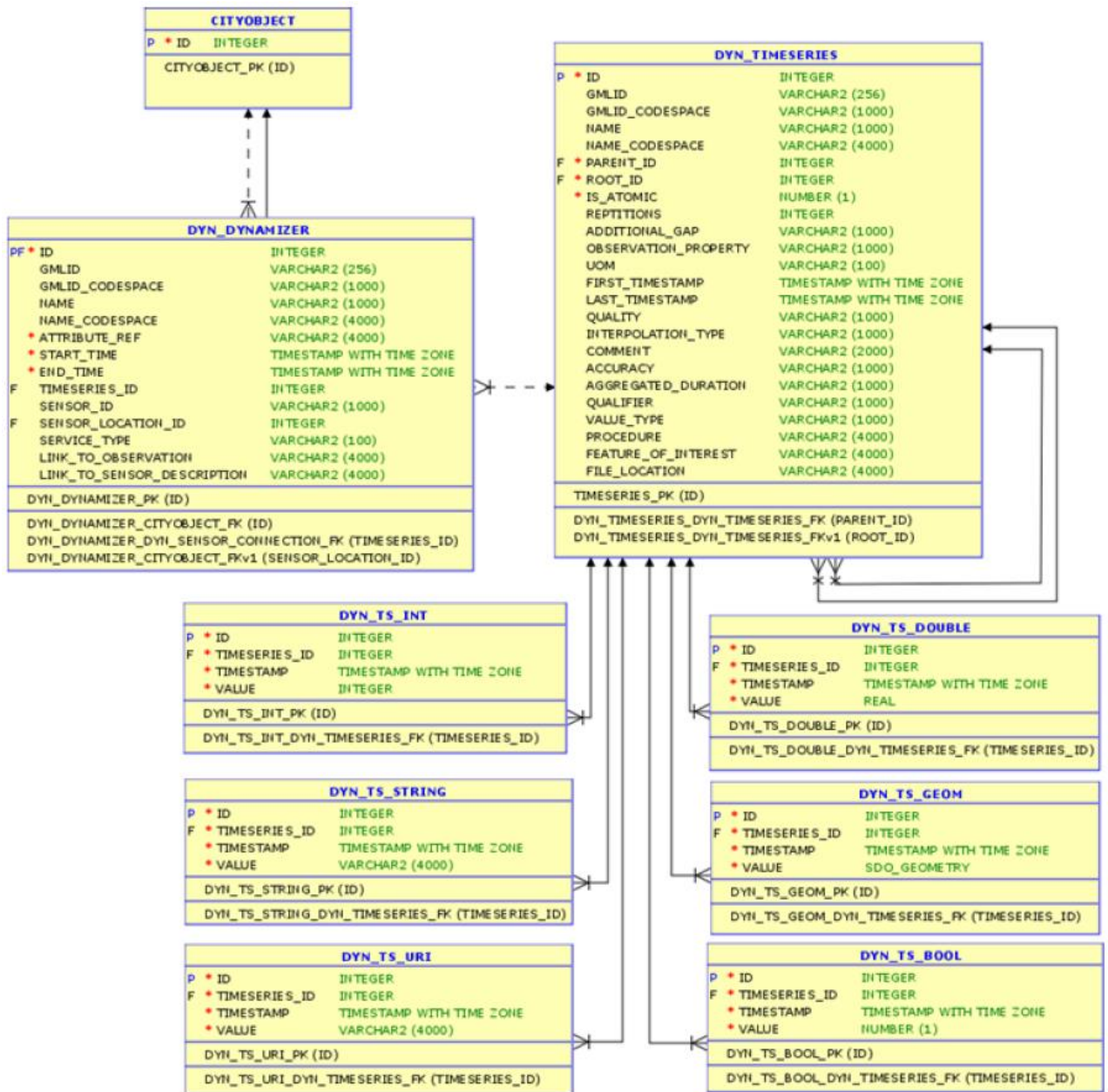


Σχήμα 5.3-1: Διαχείριση και απεικόνιση στατικών και δυναμικών δεδομένων με τη χρήση δυναμικών CityGML (Chaturvedi & Kolbe, 2019)

Ωστόσο, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των ερωτημάτων, το μοντέλο σχεσιακής βάσης δεδομένων του Dynamizer ADE αναπτύχθηκε σύμφωνα με τα παρακάτω τρία (3) modules:

1. **Dynamizer core Module** για την αποθήκευση των βασικών χαρακτηριστικών των Dynamizer,
2. **Timeseries Metadata Module** για την αποθήκευση των μεταδεδομένων των Timeseries) και
3. **Timeseries Module** για την αποθήκευση σημειακών τιμών χρόνου

Το πλεονέκτημα της διατήρησης του **Timeseries Module** ανεξάρτητο από το **Dynamizer core Module** είναι ότι επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του **Timeseries Module**, αποθηκεύοντας για παράδειγμα χρονοσειρές από άλλα ADEs όπως το Energy ADE. Επιπλέον, ο εισαγωγέας / εξαγωγέας 3DCityDB επεκτείνεται για να διευκολύνει την εισαγωγή και εξαγωγή CityGML αρχείων με δεδομένα Dynamizer ADE. Έτσι, επιτρέπεται η διαχείριση δυναμικών δεδομένων (όπως σημεία χρόνου εντός των χρονοσειρών) που σχετίζονται με αντικείμενα πόλης, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν με ερωτήματα χρήση SQL λειτουργιών.



Σχήμα 5.3-2: Σχισιακό μοντέλο βάσης δεδομένων του Dynamizer ADE. Το σχήμα δείχνει μεμονωμένους πίνακες του Dynamizer μαζί με τις στήλες τους και πρωτεύοντα και “εξωτερικά” κλειδιά (Chaturvedi & Kolbe, 2019)

5.3.1. Dynamizer Core Module

Η κλάση *Dynamizer* από το μοντέλο UML αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά που αποθηκεύονται στον πίνακα **DYN DYNAMIZER**:

- (i) το στοιχείο **Dynamizer_id**,
- (ii) το **attributeRef**, χρησιμοποιώντας μια έκφραση XPath, αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ενός συγκεκριμένου αντικειμένου πόλης,

που αποτελεί και την στατική ιδιότητα που γίνει η αντιστοίχιση με τα δεδομένα χρονοσειρών

- (iii) το **startTime** και **endTime**, αποτελούν τα απόλυτα χρονικά σημεία που υποδηλώνουν το χρονικό διάστημα για τα οποία τα Dynamizers παρέχουν δυναμικές τιμές.

Επιπλέον, το Dynamizer μπορεί επίσης να παρέχει άμεση σύνδεση με εξωτερικές υπηρεσίες αισθητήρων και πλατφόρμες IoT, χρησιμοποιώντας την κλάση *SensorConnection*. Η κλάση *SensorConnection* περιλαμβάνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- (i) **sensorId** - μια μοναδική ID αναγνώριση της συσκευής αισθητήρα / IoT,
- (ii) **serviceType** - ο τύπος υπηρεσίας, όπως SOS και SensorThings API,
- (iii) **sensorLocation** – σχετικά με ένα συγκεκριμένο αντικείμενο της πόλης που φιλοξενεί τον αισθητήρα ή με το οποίο είναι συνδεδεμένο,
- (iv) **linkToObservation** – σύνδεση με την παροχή παρατηρήσεων (timeseries),
- (v) **linkToSensorDescription** - σύνδεση με τα περιγραφικά χαρακτηριστικά/μεταδεδομένα της συσκευής αισθητήρα / IoT.

Για παράδειγμα, το OGC SOS περιλαμβάνει διαφορετικά αιτήματα για ανάκτηση περιγραφικών χαρακτηριστικών αισθητήρων και παρατηρήσεων αυτών. Η εντολή *DescribeSensor* χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της περιγραφής του αισθητήρα σε μορφή SensorML. Η εντολή *GetObservation* χρησιμοποιείται για την ανάκτηση παρατηρήσεων από αισθητήρες που κωδικοποιούνται στη μορφή O & M. Η παράμετρος του αιτήματος επιτρέπει επίσης να εφαρμοστούν χωρικά ή χρονικά φίλτρα. Στόχος αυτών των συνδέσεων είναι να χρησιμοποιούνται ως μέρος του Dynamizer *SensorConnection*, χωρίς να υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης των παρατηρήσεων των χρονοσειρών στο CityGML Τα χαρακτηριστικά της κλάσης *SensorConnection* αποθηκεύονται επίσης στον πίνακα DYN DYNAMIZER.

5.3.2. Timeseries Metadata Module

Dynamizer υποστηρίζουν επίσης γραμμικές χρονοσειρές δεδομένων εντός αντικειμένων πόλης. Αυτές οι χρονοσειρές εντός των Dynamizers μπορούν να μοντελοποιηθούν σε δύο τρόπους: (i) *AtomicTimeseries*, και (ii) *CompositeTimeseries*. Όπως προαναφέρθηκε τα *AtomicTimeseries* μπορούν να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με

- (i) κωδικοποίηση κατά *TimeseriesML* σε ζεύγη χρόνου-τιμής
- (ii) κωδικοποίηση κατά *TimeseriesML* τομέα-σειράς
- (iii) *Observations&Measurements*,
- (iv) *Dynamizer Generic Timeseries*
- (v) *Dynamizer Basic File Timeseries*.

Σύμφωνα με τον τύπο των `AtomicTimeseries`, τα αντίστοιχα μεταδεδομένα των χρονοσειρών αποθηκεύονται στον πίνακα **DYN_TIMESERIES**. Για παράδειγμα, αν οι χρονοσειρές δεδομένων αναπαρίστανται σύμφωνα με το πρότυπο `TimeseriesML` και περιέχουν ένα συγκεκριμένο τύπο παρεμβολής, αποθηκεύονται με ιδιότητα **INTERPOLATION_TYPE**. Παρομοίως, αν οι χρονοσειρές δεδομένων ανακτώνται από εξωτερικό CSV, η θέση του εξωτερικού αρχείου αποθηκεύεται στο χαρακτηριστικό **FILE_LOCATION**. Η ιδιότητα **IS_ATOMIC** χρησιμοποιείται για να καθορίσει εάν οι χρονοσειρές είναι ατομικά (`atomic`) ή σύνθετα (`composite`). Για την διαχείριση `CompositeTimeseries`, η δομή της βάσης δεδομένων εμπνέεται από τον υπάρχοντα πίνακα **GEOMETRY_GEOMETRY** στο `3DCityDB`. Τα `CompositeTimeseries` αποτελούν μια διατεταγμένη λίστα των `AbstractTimeseries`, με αποτέλεσμα μέρος των `Atomic` ή των `Composite Timeseries` να μπορούν να σχηματίσουν σύνολο `Composite Timeseries`. Κάθε εμφωλευμένο σετ δεδομένων χρονοσειρών χρησιμοποιεί την ιδιότητα **ROOT_ID** ως αναφορά στην πηγή προέλευσης του. Αυτές οι πληροφορίες σχετίζονται άμεσα με την απόδοση του εκάστοτε ερωτήματος, καθώς επιτρέπει την αποφυγή αναδρομικών ερωτημάτων.

Εάν π.χ. η ανάκτηση χρονοσειρών για την δημιουργία ενός `CompositeTimeseries` μπορεί να υλοποιηθεί απλά καλώντας τα αναγνωριστικά ID τους χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες, **PARENT_ID** και **ROOT_ID**

Για παράδειγμα, στις ενεργειακές εφαρμογές, μια `Atomic` χρονοσειρά μπορεί να οριστεί για μια εργάσιμη ημέρα (**A**), ένα Σάββατο (**B**), και μια Κυριακή (**C**). Για να αντικατοπτριστεί ένα πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας μιας ολόκληρης εβδομάδας (εκπροσωπούμενη ως `Weekx`), ένα `CompositeTimeseries` μπορεί να περιέχει πέντε (5) επαναλήψεις των `AtomicTimeseries A` που ακολουθούνται με μοναδικές αναπαραστάσεις των χρονοσειρών **B** και **C** (αναπαριστάται ως **AAAAABC**). Ομοίως, για να αντικατοπτριστεί ένα πρότυπο ολόκληρου του μήνα (`Monthx`), οι `CompositeTimeseries` μπορεί να περιέχουν τέσσερις (4) παραστάσεις των χρονοσειρών `Week` (εκπροσωπούμενες ως `W1, W2, W3, W4`). Αντίστοιχα, για να αντικατοπτριστεί ένα ετήσιο μοτίβο (`Yearx`), το `Composite Timeseries` μπορεί να περιέχει 12 επαναλήψεις των χρονομετρήσεων `Month` (εκπροσωπούνται ως `M1, M2, ... M12`). Ως εκ τούτου, στην περίπτωση αυτή, το `Timeseries Year` θα έχει `ID = 1` και `ROOT_ID = 1`; οι `Timeseries M1` θα έχουν `ID = 2`, `PARENT_ID = 1` και `ROOT_ID = 1`. Οι `Timeseries W1` θα έχουν `ID = 3`, `PARENT_ID = 2`, και `ROOT_ID = 1`; και ούτω καθεξής.

5.3.3. Timeseries Module

Αυτή η ενότητα χρησιμεύει στην αποθήκευση τιμών πρωτογενών δεδομένων χρονοσειράς (ζεύγη χρόνου-τιμής). Ανάλογα την πηγή και τον τύπο, τα δεδομένα χρονοσειράς μπορούν να αναπαρασταθούν αναλόγως με διάφορους τύπους

δεδομένων. Για παράδειγμα, χρονοσειρές δεδομένων θερμοκρασίας από μετεωρολογικούς σταθμούς αφορούν τύπο δεδομένων *double*, χρονοσειρές δεδομένων από κάμερες κυκλοφορίας για καταμέτρηση των αυτοκινήτων σε μια διασταύρωση είναι ένας ακέραιος αριθμός (*integer*).

Συνεπώς, προκειμένου να διαχειριστούν χρονοσειρές διαφορετικών τύπων, το 3DCityDB επεκτείνεται σε μεμονωμένους πίνακες: DYN_TS_INT (Timeseries Ακέραιος), DYN_TS_DOUBLE (Timeseries Double), DYN_TS_STRING (Timeseries συμβολοσειράς), DYN_TS_GEOM (Timeseries Γεωμετρίας), DYN_TS_URI (Timeseries Link) και DYN_TS_BOOL (Timeseries Boolean).

5.4. ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ DYNAMIZER ADE

Τα Dynamizers εφαρμόζονται ως Domain Extension (ADE) στο πλαίσιο του OGC Future City Pilot Φάση 1 (Chaturvedi, Kolbe, 2017).

Τα αποτελέσματα εστιάζονται σε δύο σενάρια:

- (i) ενσωμάτωση ροής χρονοσειρών από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο σε Μοντέλα κτηρίων CityGML και
- (ii) εμπλουτισμό τρισδιάστατων στοιχείων (τοιχών και επιφανειών οροφής) με τα αποτελέσματα των χρονοσειρών προσομοίωσης ηλιακού δυναμικού.

Για το πρώτο σενάριο, οι τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας από αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο συνδέονται με το αντικείμενο CityGML Building χρησιμοποιώντας την κλάση **Dynamizer SensorConnection**. Συνδέει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του κτηρίου (π.χ. με μια γενική ιδιότητα με όνομα «θερμοκρασία») απευθείας με τη ροή του αισθητήρα μέτρηση της θερμοκρασίας για αυτό το κτήριο και καταγράφει την γενική ιδιότητα της παραμέτρου με το αποτέλεσμα του αισθητήρα ροής σε συγκεκριμένη ώρα. Η ροή δεδομένων του αισθητήρα μπορεί να βασιστεί στα (i) OGC SensorWeb πρότυπα (όπως SensorThings API ή Sensor Observation Service), (ii) οποιαδήποτε πλατφόρμα IoT (όπως Thingspeak, OpenSensors, TheThingsNetwork), ή κάποια άλλη (ιδιόκτητη) υπηρεσία.

Για το δεύτερο σενάριο, κάποιο αντικείμενο CityGML Building εμπλουτίζεται με τα αποτελέσματα από την εκτέλεση ηλιακής προσομοίωσης για την εκτίμηση της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας παραγωγή σε στέγες και επιφάνειες τοίχων κτηρίων. Σε αυτό σενάριο, οι μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας τη κλάση **Dynamizer AtomicTimeseries**. Οι τιμές ακτινοβολίας αναπαρίστανται ως παρεμβλλόμενα ζεύγη χρόνου-τιμής (time-value pair) σύμφωνα με το πρότυπο TimeseriesML. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, μια ενιαία γενική ιδιότητα (π.χ. άμεση ακτινοβολία) της επιφάνειας τοίχου του κτηρίου μπορεί να αντικατασταθεί σύμφωνα με τις μηνιαίες τιμές που

εκπροσωπούνται στο πλαίσιο του AtomicTimeseries. Επιπλέον, αυτό επιτρέπει την μοντελοποίηση της ακριβούς περιγραφής των δεδομένων των χρονοσειρών με τις ιδιότητες των μεταδεδομένων τους στο αντικείμενο CityGML. Ως αποτέλεσμα, είναι η ανταλλαγή μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης στα αντικείμενα πόλεων, επιτρέποντας την εκτέλεση λεπτομερής και ρεαλιστικών προσομοιώσεων. Τα αρχεία στιγμιότυπων της περίπτωσης αυτής αναλύονται στην έκθεση Future City Pilot Phase 1 Engineering Report (Chaturvedi, Kolbe, 2017).

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική επιτρέπει την εισαγωγή του προκύπτοντος συνόλου δεδομένων CityGML Dynamizer στο 3DCityDB. Για το σενάριο (i), τα χαρακτηριστικά του Dynamizer εισάγονται στον **πίνακα DYN_DYNAMIZER** με πληροφορίες σχετικά με τη ροή του αισθητήρα. Το μοναδικό αναγνωριστικό ID του αισθητήρα, συνδέει τα περιγραφικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα και τις παρατηρήσεις πραγματικού χρόνου αυτού. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή δεν υπάρχουν γραμμικά δεδομένα χρονοσειρών, δεν υπάρχει εισαγωγή δεδομένων στους Πίνακες που σχετίζονται με Timeseries. Ενώ, αντίστοιχα στο δεύτερο σενάριο (ii), τα **AtomicTimeseries** με τα αποτελέσματα προσομοίωσης ηλιακού δυναμικού εισάγονται στους πίνακες Timeseries. Τα μεταδεδομένα όπως ο τύπος παρατηρήσεων και η μονάδα μέτρησης εισάγονται στο **πίνακα DYN_TIMESERIES**. Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ακέραιες τιμές, οι τιμές χρονοσειρών εισάγονται στον πίνακα **DYN_TS_INT**. Η διαχείριση αυτή επιτρέπει την εκτέλεση χρονικών ερωτημάτων μέσα στη βάση δεδομένων, δημιουργώντας έτσι γραφήματα χρονοσειρών για τιμές άμεσης ακτινοβολίας μιας επιφάνειας τοίχου του κτηρίου για το χρονικό διάστημα Μαρτίου - Σεπτεμβρίου ενός συγκεκριμένου έτους.

5.4.1. Εισαγωγή/Εξαγωγή Dynamizer ADE μέσω 3DCityDB

Μόλις αναπτυχθεί το μοντέλο σχεσιακής βάσης δεδομένων, το επόμενο βήμα είναι η επέκταση της λειτουργίας εισαγωγής και εξαγωγής του 3DCityDB με στόχο την αντιστοίχιση των CityGML αρχείων με το Dynamizer ADE στους κατάλληλους πίνακες. Προκειμένου να υποστηρίξει το 3DCityDB το CityGML Dynamizer ADE τρία σημαντικά βήματα χρειάζεται να εκτελεστούν:

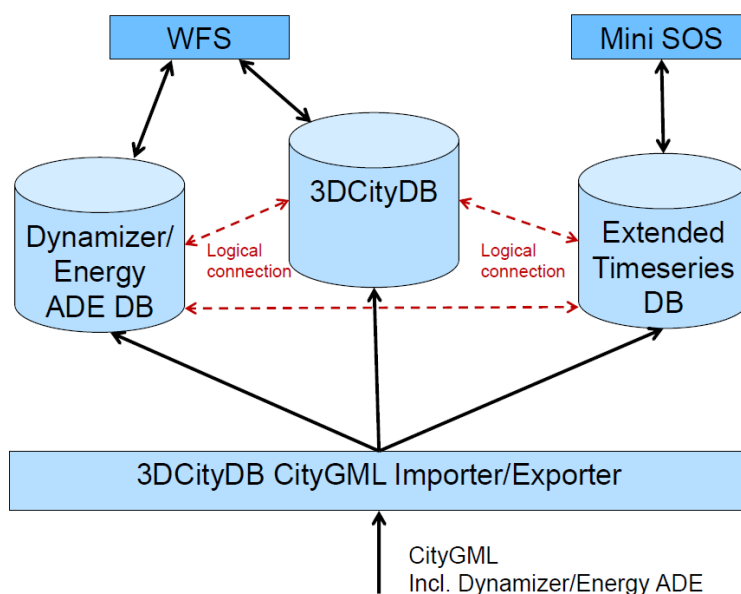
1. Αντιστοίχιση του XML Schema του ADE σε ένα σχεσιακό σχήμα που ενσωματώνεται στον πυρήνα του 3DCityDB σχήματος
2. Δημιουργία ενός αρχείου αντιστοίχισης σχήματος XML με στόχο την αντιστοίχιση μεταξύ των στοιχείων του σχήματος XML και των στοιχείων του σχεσιακού σχήματος
3. Καταχώρηση του ADE με τους πίνακες μεταδεδομένων του 3DCityDB

Η πρόσφατη έκδοση του 3DCityDB (v4.2) παρέχει ένα ADE Plugin Manager για αυτοματοποίηση αυτών των βημάτων. Το ADE Plugin Manager διαβάζει το σχήμα XML και εφαρμόζει έναν μετασχηματισμό βασισμένο σε κανόνες για να

δημιουργηθεί ένα σχεσιακό σχήμα για το εκάστοτε ADE, που ενσωματώνεται με το 3DCityDB. Με άλλα λόγια, το ADE Plugin Manager δημιουργεί αυτόματα τους πίνακες και τις συνδέσεις με βάση τις κλάσεις και τις σχέσεις που ορίζονται στο μοντέλο UML. Οι χρήστες μπορούν να επαναπροσδιορίσουν προεπιλεγμένους κανόνες ή ακόμη και να προσθέσουν νέους κανόνες έτσι ώστε να έχουν έλεγχο του αποτελέσματος χαρτογράφησης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των ερωτημάτων, το σχεσιακό μοντέλο βάσης δεδομένων του Dynamizer ADE περιλαμβάνει μόνο τρία (3) ανεξάρτητα Modules: (1) Dynamizer Core Module, (2) Timeseries Metadata Module και (3) Timeseries Module. Αυτό παρέχει την ευελιξία επαναχρησιμοποίησης των χρονοσειρών στα modules με άλλα ADEs όπως το Energy ADE και το UtilityNetwork ADE.

Ως εκ τούτου, η δομή της σχεσιακής βάσης δεδομένων είναι διαφορετική από το μοντέλο UML. Για το λόγο αυτό, προτείνεται να συμπεριληφθούν τα Timeseries και Metadata modules σαν ενσωματωμένο μέρος του 3DCityDB. Ωστόσο, στο μέλλον, το ADE Plugin Manager θα επεκταθεί για να χαρτογραφήσει το μοντέλο Dynamizer UML με τέτοιο τρόπο ώστε οι ιδιότητες του Dynamizer Core να αντιστοιχίζονται στο πίνακα του Dynamizer Core και οι σχετιζόμενες χρονοσειρές δεδομένων να αντιστοιχίζονται στα Timeseries και Metadata modules.

Μόλις γίνει η εγγραφή του ADE με το 3DCityDB σύμφωνα με τα παραπάνω βήματα, το εργαλείο Εισαγωγέας / Εξαγωγέας 3DCityDB απαιτεί επεκτάσεις για να (i) εισάγει δεδομένα χρονοσειρών από το Dynamizer ADE στους νέους πίνακες Dynamer ADE και (ii) εξάγει δεδομένα χρονοσειρών από τους πίνακες Dynamizer ADE προς το CityGML αρχείο.



Σχήμα 5.4-1: Υλοποίηση σύνδεσης στην 3DCityDB του σημασιολογικού μοντέλου CityGML και την επέκταση αυτής με Dynamizer ADE για ανάκτηση δεδομένων

5.5. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας 5.5-1: Συγκεντρωτικός πίνακας των διαφορετικών ειδών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη αποθήκευση, διαχείριση και ανάκτηση χρονοσειρών (Chaturverdi, Kolbe, 2019)

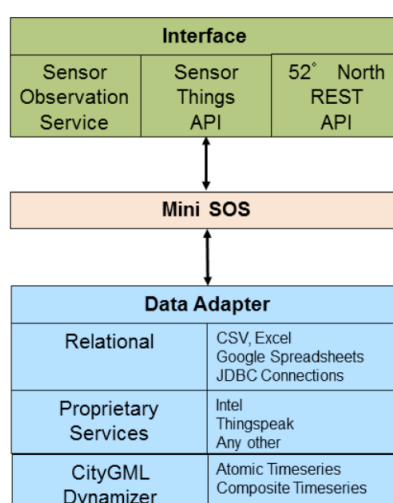
| Source Type | Description | Examples | |
|-------------------------|--|---|------------------------|
| Platforms & APIs | (i) επιτρέπουν την σύνδεση τους με σένσορες και IoT συσκευές (ii) επιτρέπουν την διαχείριση, ανάλυση και οπτικοποίηση πραγματικού χρόνου παρατηρήσεων από εφαρμογές διαδικτύου και APIs | ThingSpeak | bloTope |
| | | OpenSensors | BIG IoT |
| | | The Things Network | VICINITY |
| | | Weather Underground | syμβloTe |
| | | OGC Sensor Observation Service | Inter-IoT |
| | | OGC SensorThings API | Thingful |
| | | 52° North Timeseries API | Smart Emission |
| Databases | (i) αποθήκευση και ανάλυση παρατηρήσεων που διαφέρουν στο χρόνο από σένσορες και IoT συσκευές (ii) διαχείριση χρονοσειρών από προσομοιώσεις | Oracle | TimescaleDB |
| | | MySQL | InfluxDB |
| | | PostgreSQL | MongoDB |
| Basic Files | Χρησιμοποιεί στην αποθήκευσης χρονοσειρών με δομημένο τρόπο | Comma Separated Values | Microsoft Excel Sheets |
| Cloud-based Systems | Χρησιμοποιεί στην αποθήκευσης χρονοσειρών με δομημένο τρόπο στο cloud με εύκολη ανάκτηση αυτών | Google Fusion Table Google Spreadsheet | Microsoft OneDrive |
| Google Spreadsheet | Περιλαμβάνει σενάρια και εφαρμογές όπου η θέση του αντικειμένου δεν είναι σταθερή | GPS Exchange Format (GPX) | Cesium Language (CZML) |
| | | Keyhole Markup Language (KML) | Waze API |
| Social Media | Περιλαμβάνει πραγματικού χρόνου στοιχεία από κοινωνικά δίκτυα που χρησιμοποιούν σε αναλύσεις συμπεριφοράς και συναισθήματος | Twitter API | Flickr API |
| Semantic 3D City Models | Περιλαμβάνει χρονοσειρές δεδομένων και δυναμικά | CityGML Dynamizers | |

| | | |
|--|--|--|
| | δεδομένα από σένσορες και προσομοιώσεις που συνδέονται με 3d αντικείμενα πόλης | |
|--|--|--|

5.5.1. Mini Sensor Observation Service (Mini SOS)

Η υπηρεσία "Mini Sensor Observation Service" (Mini SOS) αποτελεί web service, το οποίο επιτρέπει τόσο την πρόσβαση σε χρονοσειρές δεδομένων από διαφορετικές πηγές δεδομένων όσο και την παρουσίαση τους χρησιμοποιώντας διεπαφές όπως το Sensor Observation Service, το SensorThings API και RESTful API που αναπτύχθηκαν από το 52 ° North. (Σχήμα 5.5-1) Αυτές οι διεπαφές επιτρέπουν να ανακτούν δυναμικές παρατηρήσεις αισθητήρων σύμφωνα με το μοντέλο OGC O&M. Επιπλέον, το RESTful API του 52 ° North είναι ένα API που παρέχει εύκολη πρόσβαση σε timeseries από την υπηρεσία SOS. Δεν παρέχει πλήρη πρόσβαση σε όλες τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες μέσω του SOS αλλά παρέχει τις πληροφορίες χρονοσειρών και παρατηρήσεων με αρκετά συμπυκνωμένο τρόπο. Το 52 ° North προσφέρει ένα SOS web client ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιεί το δικό του API.

Το πρότυπο Sensor Web Enablement (SWE) παρέχει ολοκληρωμένα μοντέλα διασύνδεσης και υπηρεσίες ιστού όπως το Sensor Observation Service (SOS) και το SensorThings API για ανάκτηση των περιγραφικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων και των παρατηρήσεων με τη βοήθεια τυποποιημένων ερωτημάτων. Σε σύγκριση με το SOS, το SensorThings API είναι σχετικά νέο πρότυπο, το οποίο είναι REST-ful και χρησιμοποιεί κωδικοποιήσεις δεδομένων JSON.



Σχήμα 5.5-1: Η εννοιολογική απεικόνιση του αισθητήρα Mini SOS (Chaturvedi et al.,2017)

Η υπηρεσία Mini SOS υποστηρίζει επίσης την σύνδεση με δεδομένα χρονοσειρών από διάφορες πηγές δεδομένων. Η σύνδεση με τις χρονοσειρές που παρέχονται από το CityGML Dynamizer γίνεται μέσω σύνδεσης σε CityGML αρχεία με δυναμικά αρχεία (πχ μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας επιφάνειας κτηρίου) και τα αναπαριστά μέσω διεπαφών ιστού. Βοηθά επιπλέον στην ανάγνωση, αναζήτηση και οπτικοποίηση των δυναμικών χρονοσειρών χωρίς να χρειάζεται να είναι αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων. Η υπηρεσία υποστηρίζει επίσης σχεσιακούς προσαρμογείς, οι οποίοι επιτρέπουν την πρόσβαση σε εξωτερικά αρχεία όπως φύλλα CSV ή Excel, cloud υπηρεσίες όπως το Google Spreadsheet και το Google Fusion Tables, καθώς και εξωτερικές βάσεις δεδομένων. Επιπλέον, υπάρχουν προσαρμογείς που επιτρέπουν την πρόσβαση σε χρονοσειρές από τις εξωτερικές υπηρεσίες ιστού όπως SOS, SensorThings API, καθώς και υπηρεσίες IoT όπως η Intel και το ThingSpeak. Με αυτόν τον τρόπο, η υπηρεσία Mini SOS υποστηρίζει πρόσβαση σε χρονοσειρές από διαφορετικές πηγές δεδομένων και παρέχει σαφώς καθορισμένα πρότυπα χωρίς να χρειάζεται να αποθηκευτούν.

52° North Sensor²⁴ Observation Service Implementation

Πρόκειται για μια πρωτοβουλία λογισμικού ανοικτού κώδικα που αναπτύχθηκε από την 52° North GmbH, το οποίο επιτρέπει την πραγματοποίηση των Sensor Web υποδομών. Είναι πιστοποιημένο από το Open Geospatial Consortium (OGC) για την υλοποίηση της σουίτας Sensor Web Enablement (SWE). Το λογισμικό χρησιμοποιεί μια εσωτερική βάση δεδομένων για την αποθήκευση / διαχείριση πληροφοριών αισθητήρων στη σχεσιακή βάση δεδομένων PostgreSQL / PostGIS και επιτρέπει:

- Ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων αισθητήρων.
- Ρύθμιση διαφορετικών υπηρεσιών αισθητήρων (π.χ. Sensor Observation Service).
- Παροχή πρόσθετων δυνατοτήτων για ανέβασα στο διαδίκτυο δεδομένων αισθητήρων, είτε χρησιμοποιώντας τη διεπαφή ιστού SOS είτε μέσω χρήση SOS importers που υποστηρίζουν ροές δεδομένων CSV / JSON.

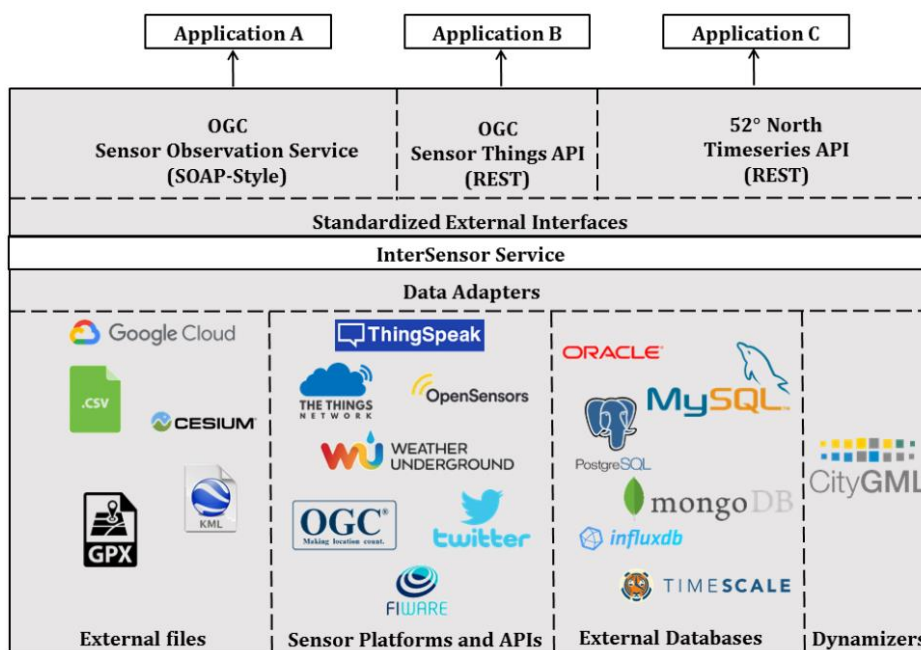
Αυτή η υλοποίηση περιλαμβάνει ένα μοντέλο σχεσιακών δεδομένων, το οποίο υλοποιεί το OGC O&M μοντέλο πληροφοριών. Με τη βοήθεια αυτού του μοντέλου δεδομένων, τα δεδομένα αισθητήρων διαφορετικών τύπων και πολλαπλών περιπτώσεων αισθητήρων αποθηκεύονται, διαχειρίζονται και διερωτώνται. Η εφαρμογή παρέχει επίσης ένα client για υλοποίηση της απεικόνισης που όχι μόνο δείχνει διαφορετικούς σταθμούς αισθητήρων σε έναν χάρτη, αλλά επιτρέπει και στους χρήστες να αλληλεπιδράσουν με τα γραφήματα χρονικών ερωτημάτων που δημιουργούνται δυναμικά από τις ιδιότητες παρατήρησης.

²⁴ <https://52north.org/research/research-labs/sensor-web/#sensor-web-interoperability>

5.5.2. Intersensor service

Η υπηρεσία InterSensor (Chaturvedi, Kolbe, 2019) είναι μια ανοιχτού κώδικα εφαρμογή, η οποία υλοποιεί επίσης τη διαλειτουργικότητα, με τυποποιημένο τρόπο, μεταξύ ετερογενών αισθητήρων, IoT πλατφόρμες και δεδομένων χρονοσειρών. Επιτρέπει τη δημιουργία συνδέσεων με πολλαπλές πηγές δεδομένων χρησιμοποιώντας προσαρμογείς δεδομένων. Οι προσαρμογείς μπορούν να αναπτυχθούν για να συνδεθούν όχι μόνο με διαφορετικές IoT Πλατφόρμες, αλλά και με εξωτερικές βάσεις δεδομένων, αρχεία CSV, υπολογιστικά φύλλα στο cloud, GPS στίγματα και δημοσιεύσεις πραγματικού χρόνου στο Twitter. Χρήση ερωτημάτων, η υπηρεσία δημιουργεί μια σύνδεση με τα δεδομένα (data source), ενώ χρήση παραμετρικού ερωτήματος (query) πραγματοποιείται η ανάκτηση παρατηρήσεων απευθείας από την πηγή δεδομένων που έγινε η σύνδεση. Η υπηρεσία μπορεί να κωδικοποιήσει αυτές τις παρατηρήσεις "on-the-fly" σύμφωνα με τις διεθνής τυποποιημένες διεπαφές όπως η OGC Sensor Observation Service και η OGC SensorThings API. Με αυτόν τον τρόπο, διάφορες εφαρμογές και εργαλεία μπορούν να αναπτυχθούν με βάση αυτά τα πρότυπα χωρίς την ανησυχία για το τι είδη πλατφόρμων αισθητήρων χρησιμοποιούνται. Έτσι, μπορούν να συνδεθούν πολλοί αισθητήρες σε αυτές τις υποδομές με τις διεπαφές τους να είναι πάντα κοινές για διαφορετικές εφαρμογές.

Η υπηρεσία ανοικτού κώδικα InterSensor χρησιμοποιεί ερωτήματα σύμφωνα με τα πρότυπα του OGC SOS και SensorThings API ώστε να αναλύσει ετερογενείς παρατηρήσεις και να οπτικοποιήσει με ενιαίο τρόπο.



Σχήμα 5.5-2: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων της υπηρεσίας InterSensor. Η υπηρεσία χρησιμοποιεί αντάπτορες για να ανακτήσει δεδομένα από διάφορες πηγές (Chaturvedi, Kolbe, 2019)

InterSensor Service για το Dynamizer ADE

Το 3DCityDB συνοδεύεται από την εφαρμογή υπηρεσιών ιστού για την πρόσβαση και την ανάκτηση των χαρακτηριστικών στοιχείων CityGML αρχείων. Ωστόσο, το WFS του δεν είναι κατάλληλο για την ανάκτηση δεδομένων χρονοσειρών. Για το σκοπό αυτό, η υπηρεσία InterSensor χρησιμοποιείται για την ανάκτηση δεδομένων χρονοσειρών από τα Dynamizers. Η υπηρεσία InterSensor απαιτεί την ανάπτυξη ενός προσαρμογέα δεδομένων²⁵ για το 3DCityDB. Αυτός ο προσαρμογέας δεδομένων είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία σύνδεσης με τους πίνακες 3DCityDB για τα αντίστοιχα αναγνωριστικά ID του Dynamizer χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες παραμέτρους:

```
{
  datasource-connection :
    name: "DynamizerConnection"
    description: ""
    connectionType: "Dynamizer"
    databaseType: "PostgreSQL"
    ipAddress: "127.0.0.1"
    port: 5432
    databaseName: "3DCityDB"
    username: "user"
    password: "*****"
    dynamizerId: "dyn_01_WS_1_globalRad"
}
```

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραμέτρους, η υπηρεσία InterSensor σχηματίζει το κατάλληλο αίτημα σύνδεσης με JDBC²⁶ υλοποιώντας την σύνδεση με το 3DCityDB. Βάσει του αναγνωριστικού Dynamizer ID, η υπηρεσία InterSensor ανακτά μεταδεδομένα χρονοσειρών (όπως τον τύπο παρατηρήσεων, τη μονάδα μέτρησης κ.λπ.), ενώ τα δεδομένα χρονοσειρών (timestamps και τιμές) μπορούν έπειτα να ανακτηθούν από τους αντίστοιχους πίνακες.

Επιπλέον, η υπηρεσία InterSensor παρέχει εξωτερικές υπηρεσίες διεπαφής μέσω των οποίων τα δεδομένα χρονοσειρών μπορούν να ανακτηθούν και σπικκοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα OGC Sensor Observation Service και SensorThings API. Για παράδειγμα, αν η υπηρεσία InterSensor αναπτύσσεται στον εξυπηρετητή 127.0.0.1 με θύρα 8080, τα δεδομένα χρονοσειρών Dynamizer μπορούν να ανακτηθούν για ένα συγκεκριμένο χρονικό εύρος χρησιμοποιώντας το πρότυπο API SensorThings με τον παρακάτω τρόπο:

²⁵ Ένα αντικείμενο που χρησιμοποιείται για την υποβολή δεδομένων και την ανάκτηση δεδομένων από βάσεις δεδομένων, υπηρεσίες Web και αρχεία XML (Extensible Markup Language).

²⁶ Η Συνδετικότητα Βάσης Δεδομένων JAVA (Java Database Connectivity, συντ.:JDBC) είναι μία διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (API) για την γλώσσα προγραμματισμού Java η οποία ορίζει πώς ένας χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων. Παρέχει συναρτήσεις για εξαγωγή, πρόσθεση, ανανέωση ή διαγραφή δεδομένων σε μια βάση.

```
http://127.0.0.1:8080/OGCSensorThingsApi/  
v1.0/Datastreams(1)/Observations?  
$filter=during  
(phenomenonTime,2019-01-01T00:00:00/  
2019-07-01T00:00:00)
```

Παρομοίως, το ίδιο ερώτημα στα δεδομένα χρονοσειρών Dynamizer μπορεί να υλοποιηθεί επίσης χρησιμοποιώντας την υπηρεσία Sensor Observation Service και το αίτημα GetObservation ως εξής:

```
http://127.0.0.1:8080/ogc-sos-webapp/service?  
service=SOS&version=2.0.0&  
request=GetObservation&  
temporalFilter=om:phenomenonTime,  
2019-01-01T00:00:00/  
2019-07-01T00:00:00
```

Με βάση τις παραμέτρους σύνδεσης που παρέχονται στην υπηρεσία InterSensor τέτοια ερωτήματα υλοποιούν σύνδεση με το 3DCityDB Dynamizer ADE. Οι παρατηρήσεις ανακτώνται απευθείας από το 3DCityDB με βάση το χρονικό φίλτρο που τίθεται στο ερώτημα. Έτσι, χρησιμοποιώντας τα OGC πρότυπα τα δεδομένα χρονοσειρών Dynamizers μπορούν να ανακτηθούν και να απεικονιστούν.

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΛΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ

6.1. ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης αποτελεί μέρος του κτηριακού συγκροτήματος του Μετσόβιου Κέντρου Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Κ.Δ.Ε.) του ΕΜΠ στο Μέτσοβο και συγκεκριμένα το δυτικό κτήριο που αποτελεί το κτήριο ξενώνων του συγκροτήματος. Το κτηριακό μοντέλο συγκροτήματος που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί αντικείμενο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας με θέμα «Συμβολή της Μοντελοποίησης της Κτηριακής Πληροφορίας στην παρακολούθηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτηρίων: η περίπτωση του κτηριακού συγκροτήματος του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. στο Μέτσοβο» (Ράμφου, 2017). Στόχος της μελέτης ήταν η μοντελοποίησης της κτηριακής πληροφορίας (BIM) προσαρμόζοντας τα υλικά κατασκευής μέσω του λογισμικού Revit και υλοποίηση ενεργειακής ανάλυσης μέσω του λογισμικού Green Building Studio της Autodesk μέσω του gbXML format. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη τους αναλυτικούς χώρους του κτηρίου, αντίθετα ο επιμερισμός αυτών σε θερμικές ζώνες και ο προσδιορισμός του συστήματος HVAC για κάθε ζώνη για τον υπολογισμό του φορτίου θέρμανσης και ψύξης δεν αποτέλεσε μέρος της ενεργειακής προσομοίωσης της μελέτης.



Εικόνα 6.1-1: Όψη τρισδιάστατου μοντέλου του συγκροτήματος του ΜΕ.Κ.ΔΕ στο BIM λογισμικό Revit (Ράμφου,2017)

Για την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου της παρούσας διπλωματικής αξιοποιήθηκαν δεδομένα καιρού από το μετεωρολογικό σταθμό στα Ιωάννινα που δίνονται κωδικοποιημένα στο μορφότυπου .epw (EnergyPlus Weather Format). Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται από το πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus και περιλαμβάνουν τα δεδομένα καιρού που χρειάζονται για την εκτέλεση της προσομοίωσης, ενώ διατίθενται από την βάση δεδομένων του EnergyPlus για πάνω από 2100 τοποθεσίες 100 χωρών. Περαιτέρω, στοχεύοντας στην ενσωμάτωση δεδομένων χρονοσειρών, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και

πραγματικά δεδομένα μηνιαίων καταναλώσεων πετρελαίου του συγκροτήματος του ΜΕ.Κ.ΔΕ, με την θεώρηση και ασαφή υποδιαίρεση αυτών στο επίπεδο του κτηρίου ξενώνων.

6.2. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

Συνεπώς, για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής αξιοποιήθηκε το BIM του ΜΕ.Κ.ΔΕ. με στόχο την αξιολόγηση των δυνατοτήτων επέκτασης και μετάφρασης του μοντέλου στο πρότυπο CityGML και την ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών με περίπτωση εφαρμογής τα ενεργειακά δεδομένα χρονοσειρών που μπορούν να αντληθούν είτε από ενεργειακή προσομοίωση, είτε από πραγματικά δεδομένα. Για την ανάκτηση της γεωμετρικής πληροφορίας του τρισδιάστατου κτηρίου χρησιμοποιήθηκε το BIM λογισμικό Revit, ενώ στη συνέχεια αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του σχεδιαστικού προγράμματος SketchUp για την περαιτέρω επεξεργασία και διόρθωση του μοντέλου με στόχο την μετάφραση του σε σημασιολογικό μοντέλο πληροφορίας CityGML, μέσω του πρόσθετου εργαλείου CityEditor. Για την ενσωμάτωση του σημασιολογικού μοντέλου και την μετάφραση της σημασιολογικής πληροφορίας που φέρει, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Importer/Exporter του 3DCityDB που συνδέεται με την σχεσιακή βάση δεδομένων PostgreSQL και η χωρική επέκταση αυτής PostGIS. Αντίστοιχα, όπως αναλύεται στη παρούσα μελέτη, το ίδιο πακέτο χρησιμοποιήθηκε για την ενσωμάτωση στη ΒΔ των πινάκων από το Dynamizer ADE.

Επιπλέον, στόχος δεν ήταν η δημιουργία ολοκληρωμένης ενεργειακής προσομοίωσης και η δημιουργία θερμικών ζωνών στο Revit ως πιθανή συνέχεια της μελέτης που αντλήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, αλλά η ανάκτηση δεδομένων προσομοίωσης σε ανάλυση χρονοσειράς για τους χώρους του κτηρίου. Γι'αυτό τον λόγο, στοχεύοντας στην αξιολόγηση παρόμοιων προγραμμάτων προσομοίωσης και δημιουργίας δεδομένων χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε το παραμετρικό εργαλείο του λογισμικού Rhino, Grasshopper, το οποίο με τα πρόσθετα LadyBug και Honeybee εργαλεία παρέχει δυνατότητες περιβαλλοντικής και ενεργειακής ανάλυσης και ανάκτησης αποτελεσμάτων.

6.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Τα μοντέλα προσομοίωσης που επικεντρώνονται σε ενεργειακά θέματα του κτηριακού τομέα αποτελούν μια από αρκετές περιπτώσεις ανάκτησης ποικιλίας δεδομένων χρονοσειρών για διαφορετικές παραμέτρους του αντικειμένου. Τέτοιες χρονοσειρές μπορεί να αφορούν παραμέτρους που ταυτίζονται με το εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου, όπως ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας (διάχυτης και άμεση ηλιακής ακτινοβολίας) αλλά και σκίασης του κτηρίου από γειτονικά κτήρια με στόχο την εκτίμηση των δυνατοτήτων ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίου, μέσω

εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και παραγωγή ηλιακής θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, στις προσομοιώσεις γίνεται εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου για ψύξη και θέρμανση (kWh) μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο, υπολογίζοντας τις καταναλώσεις που απαιτεί για θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και εκτιμώντας τα θερμικά φορτία της κάθε ζώνης, ενώ επίσης υπολογίζονται οι ανάγκες για κατανάλωση ζεστού νερού (ZNX). Υπολογίζεται επίσης η συνολική θερμική ενέργεια για κάθε ζώνη, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας για ψύξη και θέρμανση. Επιπλέον, αποδίδονται η ηλεκτρική ενέργεια για φωτισμό αλλά και ηλεκτρική ενέργεια από την χρήση ηλεκτρικών συσκευών για κάθε ζώνη. Εκτιμούνται ακόμη τα εσωτερικά κέρδη θερμότητας σε κάθε ζώνη που προκύπτουν από τους ανθρώπους, ενώ επίσης η απώλεια θερμότητας ή η θετική αύξηση αυτής σε κάθε ζώνη που προκύπτει από τον φυσικό εξαερισμό (kWh). Επιπλέον, εκτιμάται η θερμοκρασία αέρα, η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας και η σχετική υγρασία κάθε ζώνης. Μια ακόμη παράμετρος είναι ο συνολικός όγκος αέρα που ρέει μέσα στο δωμάτιο μέσω των παραθύρων και της διήθησης (m³/s) καθώς και ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στον αέρα λόγω του φωτισμού, των ηλεκτρικών συσκευών, των ανθρώπων, των επιφανειών της κάθε ζώνης και των κερδών μέσω του συστήματος θέρμανσης, με στόχο την εκτίμηση της θερμικής άνεσης του χώρου μέσω της στρωματοποίησης του αέρα εντός αυτού.

Λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα παραμέτρων που σχετίζονται με την ενέργεια στον κτηριακό τομέα ως παράγωγο από ενεργειακές προσομοιώσεις αλλά και το πλαίσιο της EE²⁷ για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη δημιουργία αποδοτικών κτηρίων αλλά και μηδενικής κατανάλωσης, ενδείνεται η ανάγκη για μετατροπή των στατικών μοντέλων 3D πόλης σε δυναμικά μοντέλα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, που σχετίζονται είτε με το κέλυφος αυτού είτε με την εσωτερική δομή του συνδέονται με ενεργειακά δυναμικά πρότυπα προς περαιτέρω ανάλυση. Η ενσωμάτωση λοιπόν των δυναμικών ενεργειακών αλλαγών με το χαρακτήρα χρονοσειρών σε ένα σημασιολογικό μοντέλο κτηρίου λειτουργεί ως άξονας αξιολόγησης αυτών, σε σχέση με το χώρο και τον χρόνο. Η παραμετρική ανάλυση των επιμέρους οντοτήτων ως αυτόνομα στοιχεία βοηθά στη περαιτέρω βελτίωση αλλά και εκτίμηση των δυνατοτήτων τους προς ενεργειακή αναβάθμιση. Παράλληλα, η δυναμική αντιμετώπιση του στατικού μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από προσομοιώσεις, αλλά και ικανότητα σύνδεσης με μετρητές σε σένσορες (μετεωρολογικών σταθμών ή μετρητών καταναλώσεων) δημιουργεί τις προϋποθέσεις υλοποίησης «έξυπνων κτηρίων» με σημασιολογικό χαρακτήρα.

Στόχος της παρούσας μεθοδολογικής προσέγγισης είναι η αξιολόγηση των δυνατοτήτων ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων χρονοσειράς εντός του σημασιολογικού μοντέλου CityGML. Η δημιουργία χρονοσειρών υλοποιήθηκε με τη χρήση των δυνατοτήτων που προσφέρει το BIM λογισμικό Rhino στο παραμετρικό

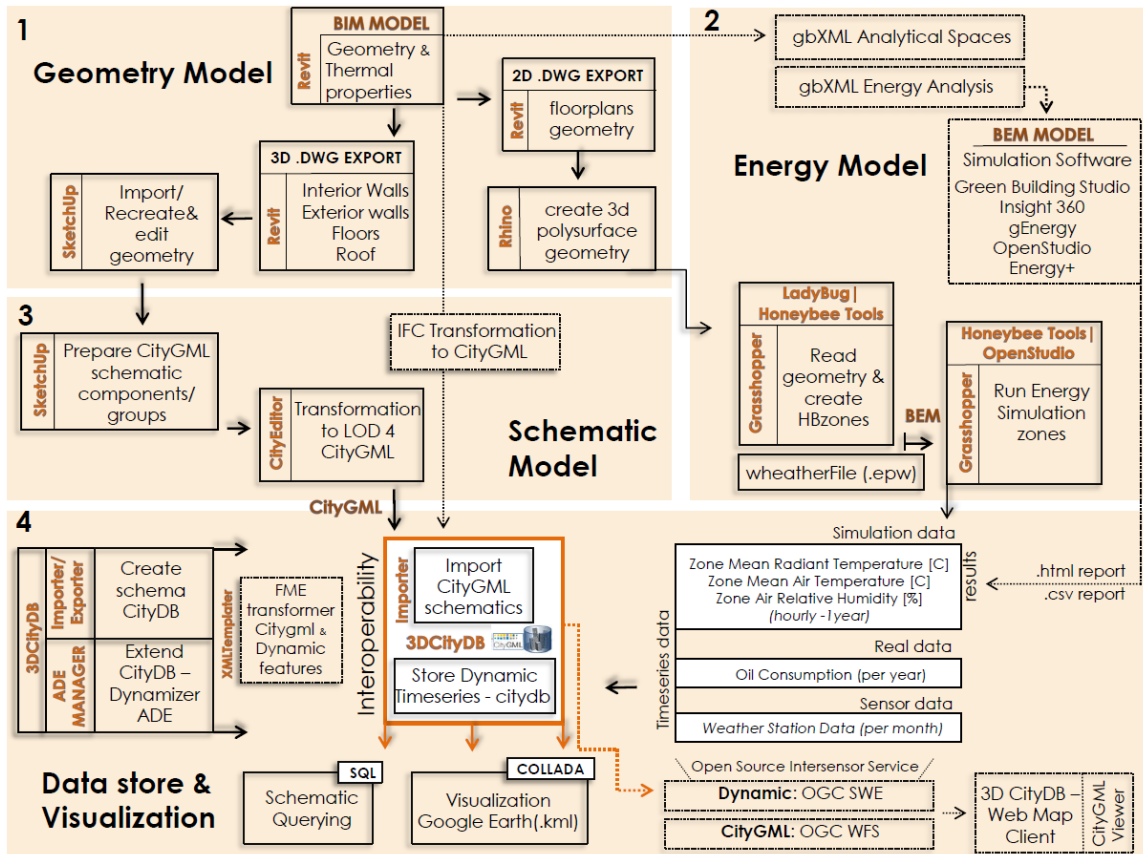
27

https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive?fbclid=IwAR09A4ifOSxFSgjLq_CR-hq3j5EQo9Yaj9B85Njrw6tmlgJ5FLK04f_UHY

γραφικό περιβάλλον του Grasshopper με τα εργαλεία LadyBug και HoneBee για ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου που ενσωματώνουν στην ανάλυση τις λειτουργίες ενεργειακής μοντελοποίησης του ανοικτού λογισμικού OpenStudio. Η δημιουργία του σημασιολογικού μοντέλου CityGML υλοποιήθηκε σε επίπεδο LoD 4, ως ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που παρέχει, εκτός από το κέλυφος του κτηρίου, τη βασική εσωτερική δομή αυτού αποτελούμενο από εσωτερικούς τοίχους και ανοίγματα σε αυτούς αλλά και το χαρακτηριστικό των χώρων, με στόχο την ταύτιση αυτών με τις ενεργειακές ζώνες που αποδίδονται στα ενεργειακά μοντέλα. Το διακριτό σημασιολογικό αντικείμενο των χώρων (room) στο CityGML, ενσωματώνει ένα επιπλέον επίπεδο ανάλυσης ενεργειακής κατανομής. Το επίπεδο λεπτομέρειας LoD 4 δίνει την δυνατότητα ενσωμάτωσης όλων των παραμέτρων των αποτελεσμάτων από ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ενέργειας, που τα χαμηλότερα επίπεδα ανάλυσης του CityGML αδυνατούν, χαρίζοντας έτσι ιδιότητες και δυνατότητες ανάλυσης συνθηκών θερμικής άνεσης εντός κάθε δωματίου.

Η ενεργειακή προσομοίωση έγινε σε πειραματικό επίπεδο καθώς στόχος ήταν η αξιολόγηση του λογισμικού στην υλοποίηση προσομοιώσεων μέσω του εικονικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος που προσφέρει για την αποτελεσματική ανάκτηση χρονοσειρών σε ετήσια μηνιαία βάση για κάθε μια ώρα και την ενσωμάτωση αυτών στο σημασιολογικό μοντέλο. Γι' αυτόν τον λόγο η μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε βασικό επίπεδο ροής εργασίας και δημιουργίας του ενεργειακού μοντέλου με κατεύθυνση προς την ενεργοποίηση του μηχανισμού προσομοίωσης του OpenStudio και την ανάκτηση των αποτελεσμάτων χρονοσειράς των εσωτερικών χώρων. Συνεπώς, στη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου αποδόθηκαν οι χώροι ή θερμικές ζώνες του κτηρίου χωρίς κάποια περαιτέρω πληροφορία θερμικών χαρακτηριστικών (πχ υλικά κατασκευής, ανοίγματα, θερμικά φορτία κ.α.). Στοχεύοντας λοιπόν στην δημιουργία χρονοσειρών και όχι ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού μοντέλου, οι παράμετροι που ανακτήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν από την παράγωγη εργασία αφορούσαν τη μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (°C), τη θερμοκρασία του αέρα (°C) και τη σχετική υγρασία (%) του κάθε δωματίου.

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής αποτυπώνονται σχηματικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ενσωμάτωση των δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών ενεργειακών παραμέτρων στο σημασιολογικό μοντέλο του κτηρίου που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο στάδιο. Τα σεσημασμένα πολύγωνα (dotted boxes) του διαγράμματος ροής σηματοδοτούν εναλλακτικά σενάρια ροής εργασίας προς μελλοντική υλοποίηση που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα αξιοποίησης.



Εικόνα 6.3-1: Διάγραμμα ροής εργασίας (τα dotted boxes αποτελούν εναλλακτικά σενάρια υπό εξέταση σε μελλοντική εργασία)

Αναλυτική περιγραφή του διαγράμματος ροής ανά θεματική ενότητα (Γεωμετρικό μοντέλο, Ενεργειακό μοντέλο, Σηματολογικό μοντέλο και ανάλυση και ανάκτηση πληροφορίας) γίνεται στις επόμενες ενότητες της παρούσας μελέτης. Τα βήματα που εφαρμόστηκαν συνοψίζονται στα παρακάτω έξης:

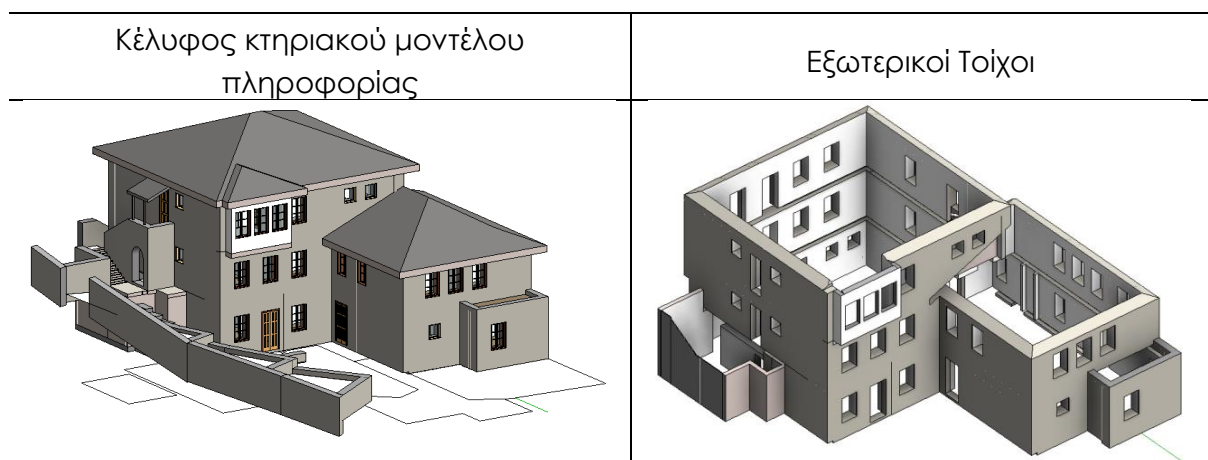
1. Ανάκτηση κτηριακής μονάδας του ΜΕΚΔΕ και εξαγωγή 2D και 3D γεωμετρίας κτηριακού μοντέλου πληροφορία κτηρίου από το Revit
2. Εισαγωγή 2D κατόψεων στο Rhino για επαναδημιουργία γεωμετρίας – προσαρμογή ενεργειακών ζωνών (HBZones) με το πρόσθετο εργαλείο Honeybee του παραμετρικού εργαλείου Grasshopper και υλοποίηση πιλοτικής ενεργειακής προσομοίωσης βασικών χαρακτηριστικών χρήση λειτουργιών που δίνονται από το OpenStudio – εξαγωγή αποτελεσμάτων χρονοσειρών (.csv)
3. Εισαγωγή 3D γεωμετρίας στο λογισμικό SketchUp για γεωμετρική διόρθωση και δημιουργία επίπεδων διαχείρισης της γεωμετρικής πληροφορίας των επιφανειών
4. Μετάφραση του γεωμετρικού κτηριακού μοντέλου στο πρότυπο CityGML με την χρήση του πρόσθετου εργαλείου CityEditor
5. Εισαγωγή CityGML στην 3DCityDB με το εργαλείο Importer/Exporter Tool στο σχήμα citydb της ΣΒΔ που δημιουργήθηκε

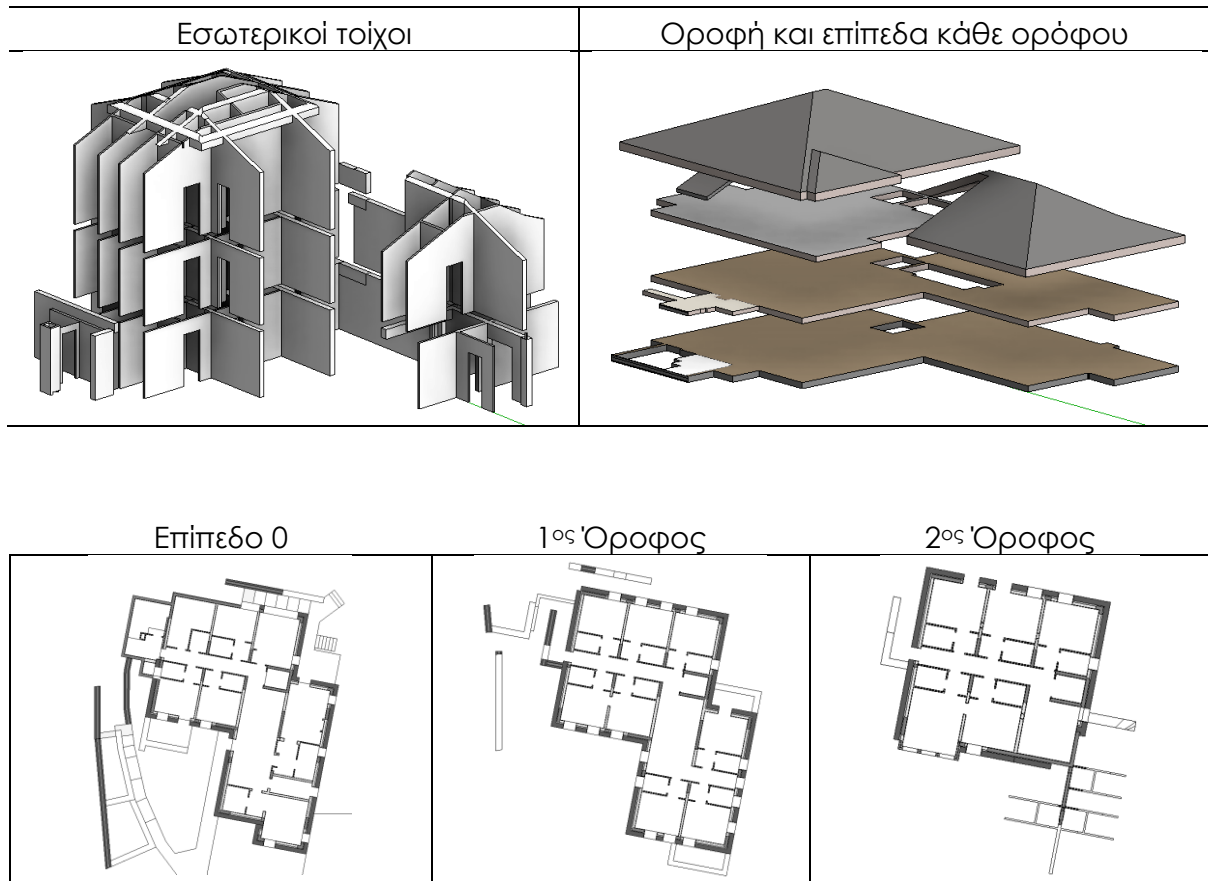
6. Επέκταση του σχήματος citydb της 3DCityDB για να στηρίξει το Dynamizer ADE μέσω του εργαλείου Manager ADE και την δημιουργία 6 πινάκων που φέρουν δυνατότητες αποθήκευσης χρονοσειρών
7. Πιλοτική δημιουργία πρόσθετου πίνακα για να στηρίξει την αποθήκευση των δυναμικών δεδομένων
8. Εισαγωγή των παραγόμενων από την ενεργειακή προσομοίωση δεδομένων χρονοσειρών και των πραγματικών μετρήσεων στην 3DCityDB
9. Πιλοτική δημιουργία CityGML αρχείου ενσωματωμένου του Dynamizer ADE
10. Ανάκτηση πληροφορίας με ερωτήματα SQL από ΒΔ
11. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων στο Google Earth με την δημιουργία .kml αρχείου από το εργαλείο KML/COLLADA/gITF export και ενσωμάτωση balloon με διάγραμμα διαδραστικής διαχείρισης χρονοσειρών

6.4. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΣΤΟ CITYGML

6.4.1. Γεωμετρικό Μοντέλο

Το κτηριακό μοντέλο πληροφορίας του κτηρίου ξενώνων του ΜΕ.Κ.ΔΕ. ανακτήθηκε, όπως αναφέρθηκε από προηγούμενη διπλωματική εργασία και επεξεργάστηκε κατάλληλα προς ανάκτηση μιας κτηριακής οντότητας εκ των τριών. Όπως φαίνεται παρακάτω με τις δυνατότητες θέασης που προσφέρει το λογισμικό Revit απομονώθηκε η προς ανάλυση γεωμετρική πληροφορία ανά θεματική κατηγορίας (εξωτερικοί τοίχοι, εσωτερικοί τοίχοι, δάπεδο, παράθυρα, πόρτες) είτε στο τρισδιάστατο χώρο για εισαγωγή και ανάλυση στο SketchUp είτε στο δισδιάστατο χώρο με την εξαγωγή των ορίων των τοίχων και την εισαγωγή τους στο Rhino για τη δημιουργία θερμικών ζωνών και ενεργειακή μελέτη.



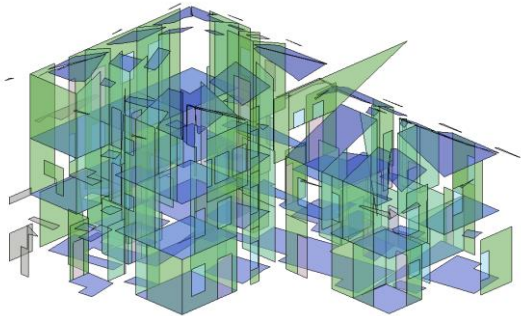
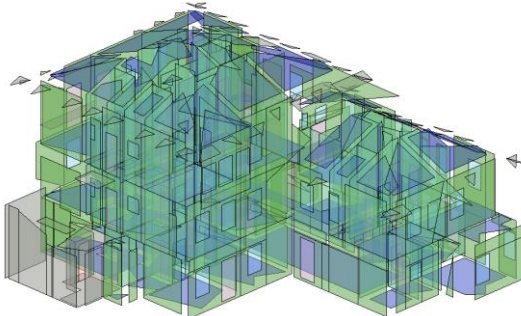
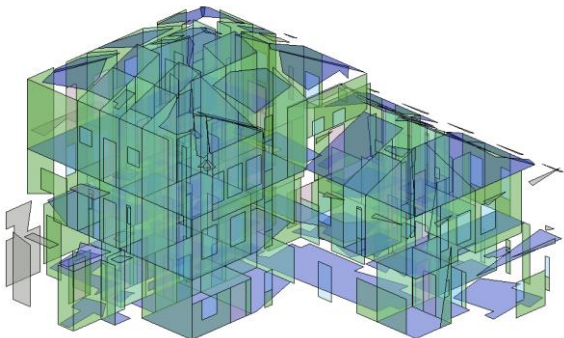
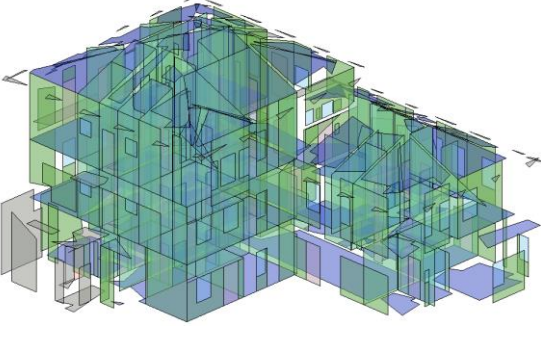


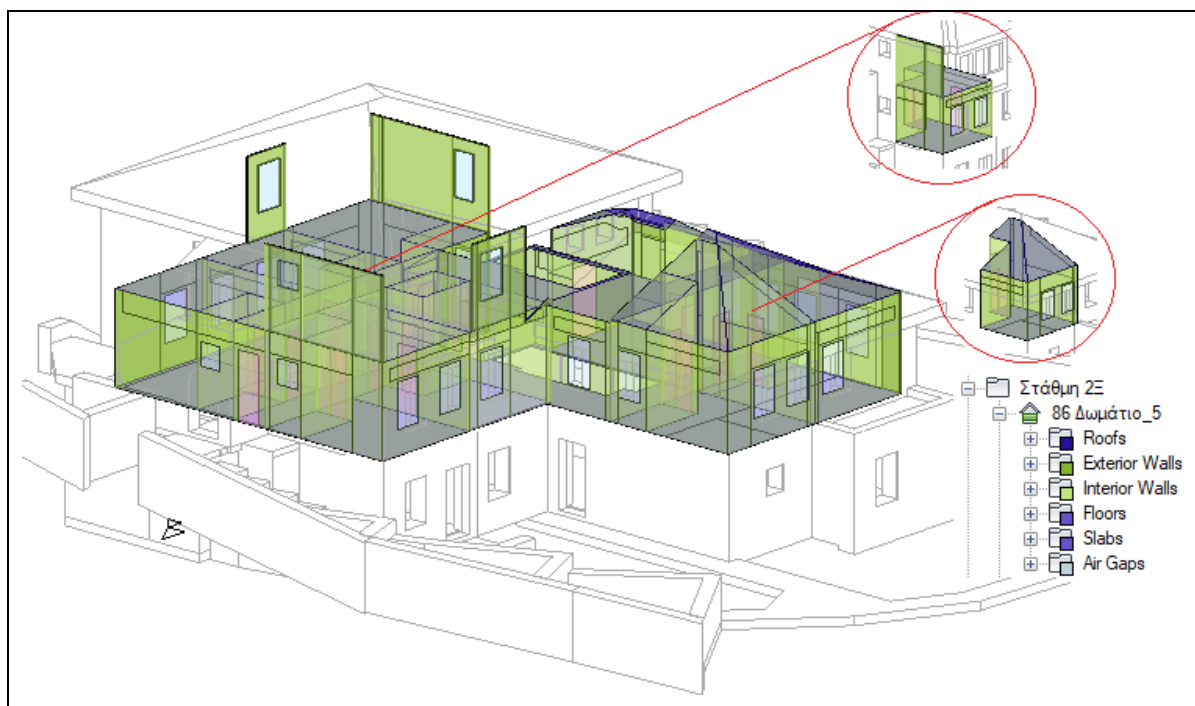
6.4.2. Ενεργειακό Μοντέλο

Το λογισμικό Revit δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής ενεργειακού μοντέλου σύμφωνα με το σχήμα gbXML, όπως αναφέρθηκε στις παραπάνω ενότητες με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος αφορά τη χρήση των ρυθμίσεων ενέργειας, όπου εξάγει ένα αναλυτικό μοντέλο ενέργειας όπως δημιουργήθηκε στο Revit. Ενώ ο δεύτερος τρόπος αφορά τη χρήση των όγκων δωματίων/ χώρων (rooms/spaces). Ωστόσο, εξετάζοντας τις δύο αυτές μεθόδους εξαγωγής στο μοντέλο εφαρμογής διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος χρήσεων ρυθμίσεων ενέργειας, ενώ μπορεί να δώσει ένα ενεργειακό μοντέλο gbXML που φέρει τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά υλικών κατασκευής και θερμικής ικανότητας τους, δεν μπορεί να αποδώσει την σωστή γεωμετρία των χώρων αυτών. Αντίθετα, η δεύτερη μέθοδος εξαγωγής χώρων μεταφέρει την γεωμετρία του κτηρίου αλλά όχι τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του στο σχήμα gbXML για περαιτέρω ενεργειακή ανάλυση σε κάποιο άλλο λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης.

Παραμετροποιώντας τις τιμές οριακών συνθηκών για την δημιουργία αναλυτικών χώρων και επιφανειών με στόχο την όσο καλύτερη δυνατή προσέγγιση ενός ολοκληρωμένου γεωμετρικά ενεργειακού μοντέλου προκύπτει ότι η λεπτομερής αναπαράσταση των αντικειμένων του αρχιτεκτονικού μοντέλου πολλές φορές δημιουργεί κενά και αστοχία δημιουργίας κλειστών και συμπαγών χώρων και

επιφανειών προς την αυτόματη δημιουργία ενεργειακού μοντέλου. Με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαίο κατά τον αρχικό σχεδιασμό της κτηριακής πληροφορίας BIM η προσαρμογή της γεωμετρίας των χώρων από το σχεδιαστή στην ανάλυση για BEM (Building Energy Model) με τη δημιουργία συμπαγών γεωμετριών και οντοτήτων. Η μέθοδος αυτή, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 4, αφορά την υλοποίηση της ενεργειακής βελτιστοποίησης με Massing, όπου δημιουργείται ένα ενεργειακό μοντέλο με τους βασικούς όγκους (μάζες) που αντιπροσωπεύουν το αρχιτεκτονικό μοντέλο και το κέλυφος αυτού και έπειτα η προσαρμογή λεπτομερειών κτηριακής πληροφορίας.

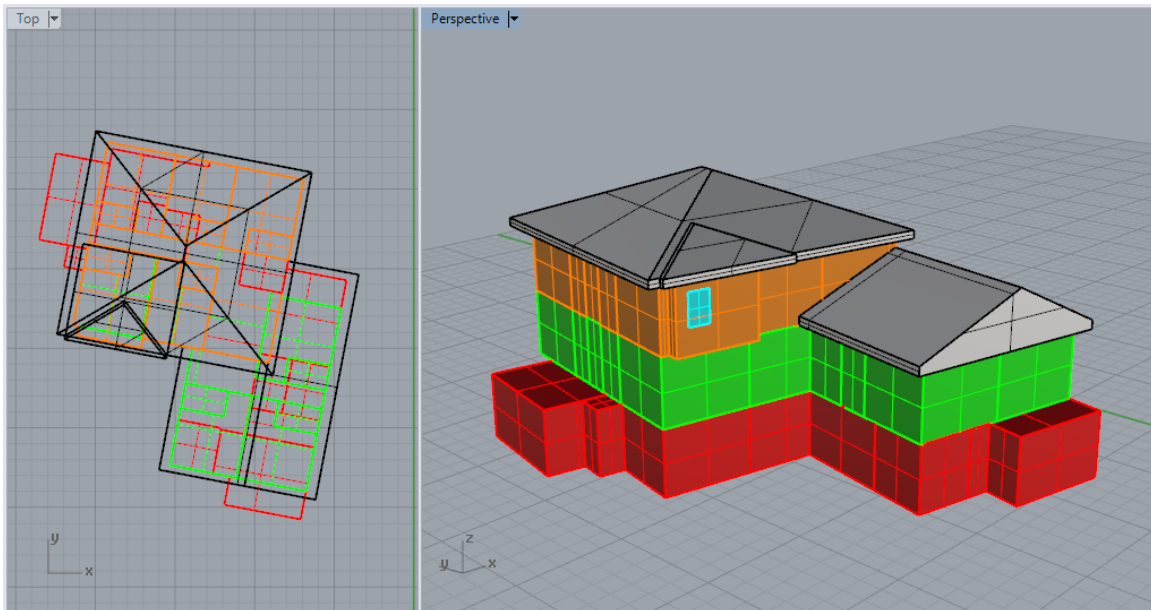
| | |
|---|--|
|  |  |
| Analytical Space Resolution: 0.8000m | Analytical Space Resolution: 0.2500m |
| Analytical Surface Resolution: 0.1000m | Analytical Surface Resolution: 0.8000m |
|  |  |
| Analytical Space Resolution: 0.6000m | Analytical Space Resolution: 0.4572m |
| Analytical Surface Resolution: 0.3048m | Analytical Surface Resolution: 0.3048m |



Σχήμα 6.4-1: Εξαγωγή μοντέλου χρήση ρυθμίσεων ενέργειας (πάνω) με διάφορες οριακές τιμές συνθήκης και ρυθμίσεων αναλυτικών χώρων και επιφανειών (κάτω)

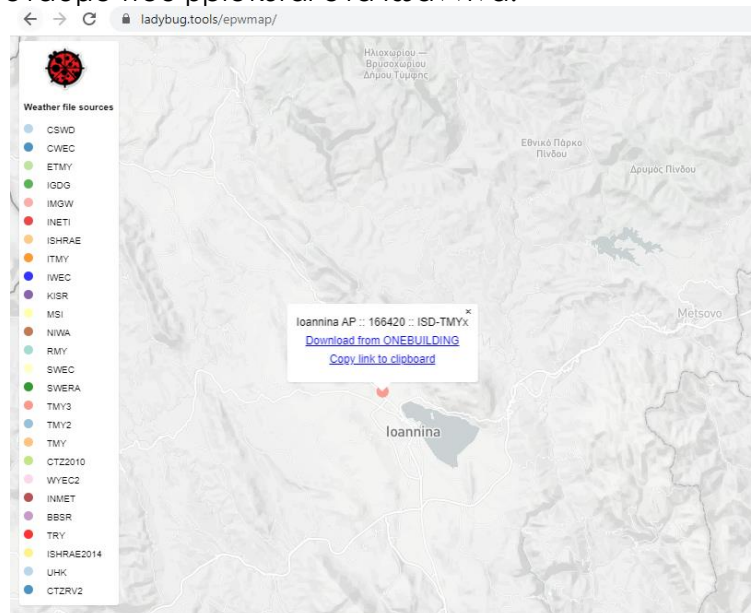
Επιπλέον, στις δύο μεθόδους ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει για την εξαγωγή του μοντέλου αναλυτικές επιφάνειες και χώρους είτε θερμικές ζώνες με τη προέκταση ρυθμίσεων που αυτές φέρουν για εκτίμηση απωλειών ή μη της ενέργειας και απόκρισης του συστήματος HVAC. Η ανάκτηση του μοντέλου δεδομένων από προηγούμενη μελέτη εφαρμογής, ανταποκρινόταν στην αναλύση και εξαγωγή μοντέλου με αναλυτικές επιφάνειες και χώρους και όχι θερμικές ζώνες. Συνεπώς, στοχεύοντας στην υλοποίηση ανάκτησης δεδομένων χρονοσειρών ενεργειακού περιεχόμενου η παρούσα μελέτη δεν είχε ως στόχο τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής μελέτης και κατ'επέκταση την εν δυνάμει προέκταση της προηγούμενης μελέτης. Γι' αυτό τον λόγο, έγινε η μεταφορά των σχεδίων του κτηρίου σε άλλο πρόγραμμα και εκτέλεση της βασικής ροής προσομοίωσης για την επίτευξη ανάκτησης χρονοσειρών, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Για την δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου προσομοίωσης των ενεργειακών ζωνών της μελέτης εφαρμογής της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ως αρχεία εισόδου (.dwg) οι κατόψεις των τοίχων για κάθε όροφο από το αρχιτεκτονικό μοντέλο στο λογισμικό Revit. Σύμφωνα με την δομή των δωματίων δημιουργήθηκαν διακριτοί συμπαγείς γεωμετρικοί όγκοι τύπου «multisurfaces» για την αναπαράσταση των θερμικών ζωνών/ χώρων κάθε δωματίου του κτηρίου οι οποίοι φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 6.4-2.



Σχήμα 6.4-2: Συμπαγείς όγκοι των θερμικών ζωνών δωματίων για κάθε όροφο

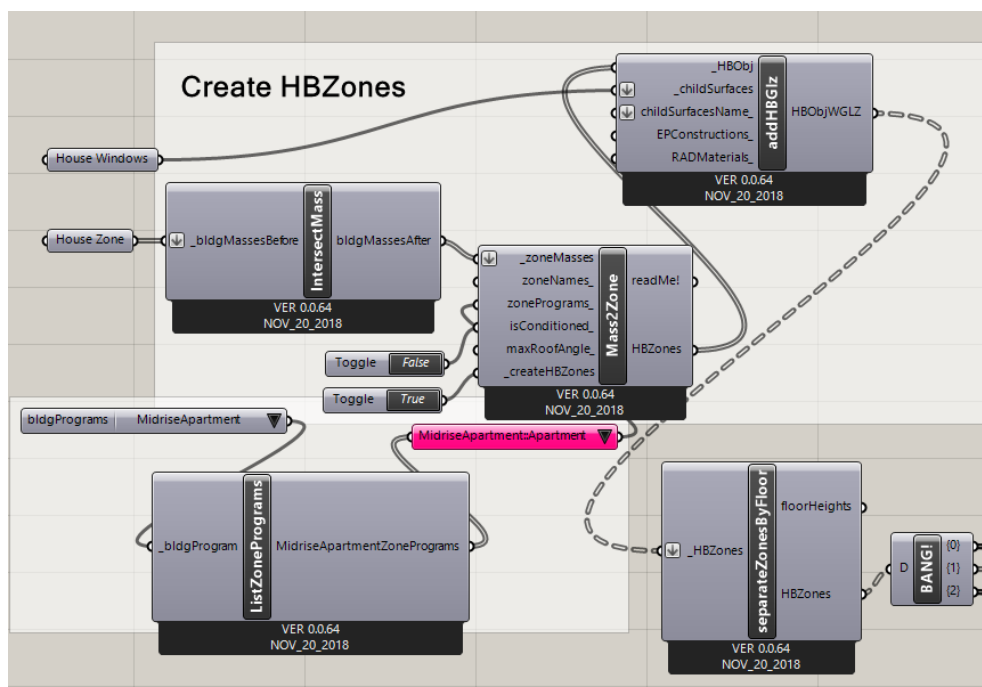
Για την υλοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Rhino 3d που παρέχει μέσω του γραφικού παραμετρικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος Grasshopper τα εργαλεία plug-in (Ladybug και Honeybee tools) για περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση. Επιπλέον στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα καιρού από την ΒΔ των εργαλείων Ladybug από σταθμό που βρίσκεται στα Ιωάννινα.



Σχήμα 6.4-3: Διαδικτυακή εφαρμογή ανάκτησης μετεωρολογικών δεδομένων²⁸

²⁸ <https://www.ladybug.tools/epwmap/>

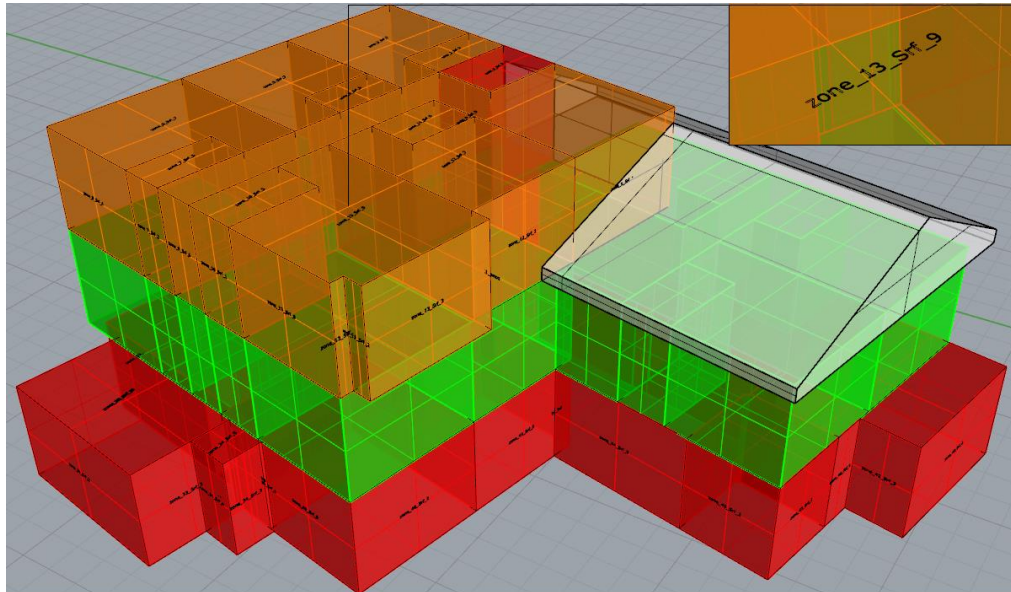
Η ενεργειακή μελέτη βασίστηκε στη θεώρηση και αξιολόγηση των δυνατοτήτων των εργαλείων στην υλοποίηση μιας ενεργειακής προσομοίωσης αλλά και αποτελεσματικής ανάκτησης χρονοσειρών για τις θερμικές ζώνες του κτηρίου και όχι στην υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού μοντέλου. Για την δημιουργία των θερμικών ζωνών και την μετατροπή τους σε HBZones, όπως ορίζονται από τα εργαλεία, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «IntersectMasses», όπου διαβάζει και μεταφράζει τους συμπαγείς όγκους σε όγκους με οριακές συνθήκες (boundary representations) – brep. Μεταξύ των γειτονικών επιφανειών και χώρων πρέπει να υπάρχει γεωμετρική σύνδεση και όχι επικάλυψη ώστε να δημιουργηθούν συμπαγείς θερμικές ζώνες επιβεβαιώνοντας ότι ο υπολογισμός της αγωγίμης ροής θερμότητας μεταξύ αυτών θα υλοποιηθεί σωστά στην προσομοίωση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν το εργαλείο «Mass2Zone» δημιουργούνται οι θερμικές ζώνες, HBZones. Σε αυτό το πλαίσιο, οι θερμικές ζώνες που δημιουργήθηκαν χαρακτηρίζονται από μη ελεγχόμενες συνθήκες κλιματισμού (unconditioned spaces), δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη η απόκριση του συστήματος HVAC και το φορτίο κάθε ζώνης/χώρου. Οι ζώνες υιοθετούν στη περίπτωση της εφαρμογής τις θερμοκρασίες εξωτερικών συνθηκών για την προσομοίωση της θερμοκρασίας των λειτουργικών χώρων.



Σχήμα 6.4-4: Παραμετρική ροή εργασίας για τη δημιουργία Θερμικών ζωνών (HBZones) σε μη ελεγχόμενες συνθήκες

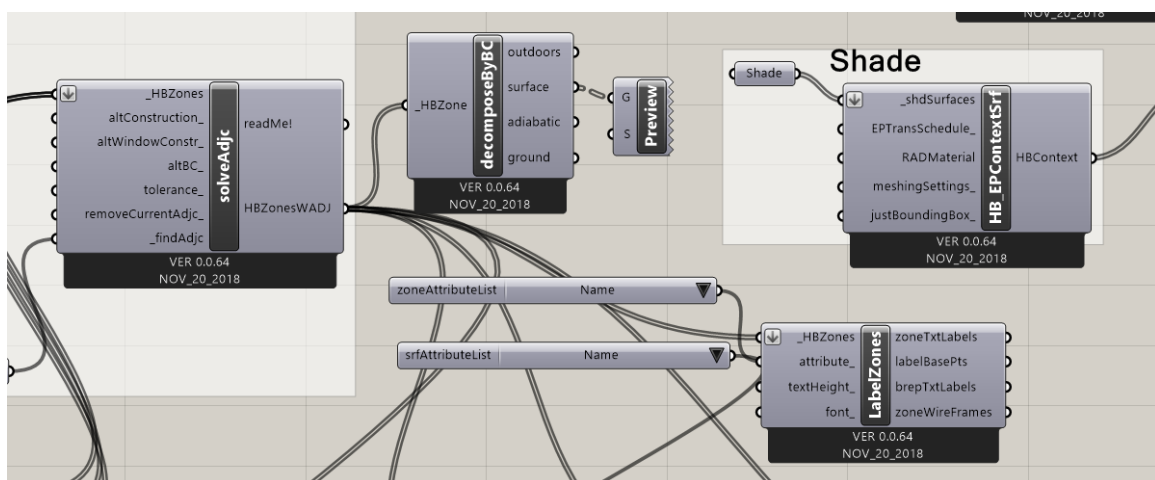
Ωστόσο, τα εργαλεία Ladybug και Honeybee δίνουν τη δυνατότητα προσαρμογής και παραμετροποίησης όλων απαραίτητων στοιχείων για την υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής ανάλυσης. Για κάθε επιφάνεια κάθε ζώνης, μπορούν να προσαρμοστούν χαρακτηριστικά σχετικά με το τα ανοίγματα, ορίζοντας glazing ration, το πάχος και τα υλικά κατασκευής αλλά και περαιτέρω επεξεργασία των

φορτίων (loads), των χρονοδιαγραμμάτων (schedules) και του συστήματος θέρμανσης - ψύξης – κλιματισμού, HVAC (Heating Ventilating and Air Conditioning System).



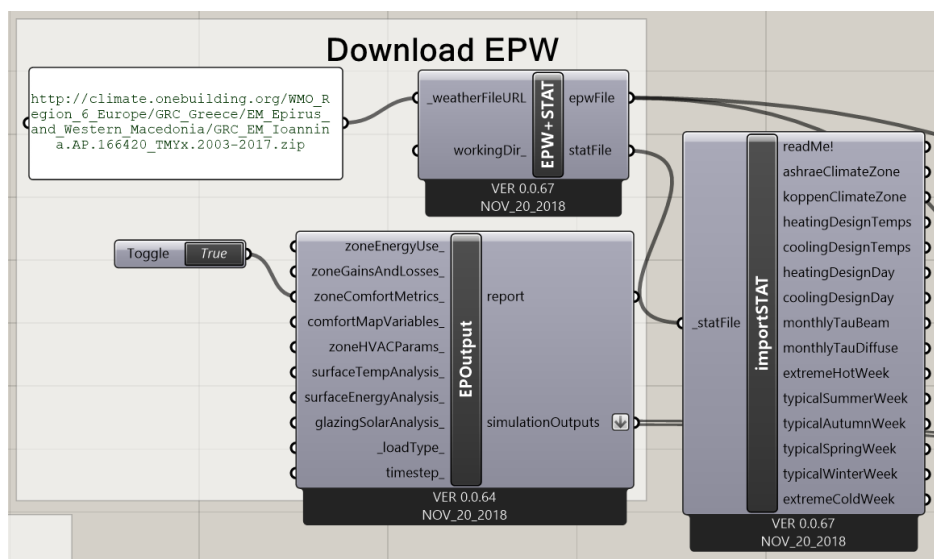
Σχήμα 6.4-5: Σχηματική αναπαράσταση των γειτονικών επιφανειών σύνδεσης που ορίζουν κάθε θερμική ζώνη

Επιπλέον, ως πρόγραμμα λειτουργίας του κτηρίου έγινε η θεώρηση τύπου “MidriseApartment”, καθώς το κτήριο αποτελεί τους ξενώνες του πανεπιστημίου. Στη συνέχεια το εργαλείο «Solve_Adjacencies», καθορίζει τις γειτονικές οριακές συνθήκες κάθε επιφάνειας, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η ροή θερμότητας γίνεται στις γειτονικές επιφάνειες των γειτονικών ζωνών, έτσι δημιουργούνται επιφάνειες εσωτερικού χώρου, εξωτερικές επιφάνειες και ορίζεται το δάπεδο του κτηρίου. Για την υλοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης δημιουργήθηκαν και επιφάνειες σκίασης κατ’αντιστοιχία με την οροφή του κτηρίου.



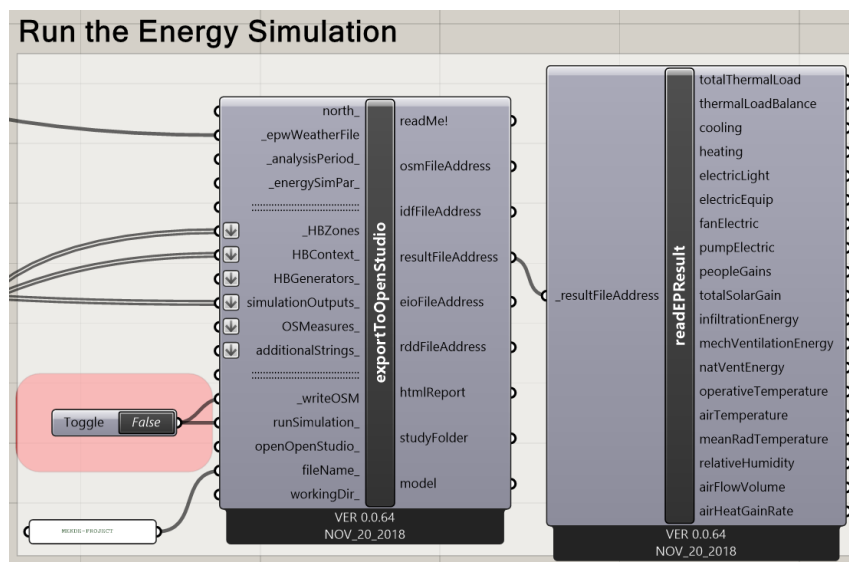
Σχήμα 6.4-6: Παραμετρική ροή εργασίας για τη δημιουργία οριακών συνθηκών στις γειτονικές επιφάνειες των θερμικών ζωνών

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε επιπλέον ως το αρχείο εισαγωγής το αρχείο μορφότυπου (.epw) που περιλαμβάνει μετεωρολογικά δεδομένα αλλά και χαρακτηριστικά του σταθμού, όπως τη θέση του, σε ποια ζώνη κατά ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ανήκει και χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης και κατά αναλογία του επιπέδου μόνωσης του κτηρίου. Ο σταθμός των Ιωαννίνων σύμφωνα με το αρχείο .stat ανήκει στην κλιματική ζώνη 3C ASHRAE. Επιπλέον χαρακτηριστικά του σταθμού είναι η κλιματική ζώνη korpen, όπου στηρίζεται στην θεωρία ότι η βλάστηση αποτελεί την βασική έκφραση του κλίματος. Συνεπώς η κλιματική ζώνη korpen αποτελεί συνδυασμό των ετήσιων και μηνιαίων θερμοκρασιών, βροχοπτώσεων και της εποχικότητας του τελευταίου. Ο σταθμός των Ιωαννίνων ανήκει στην ζώνη Cfa.

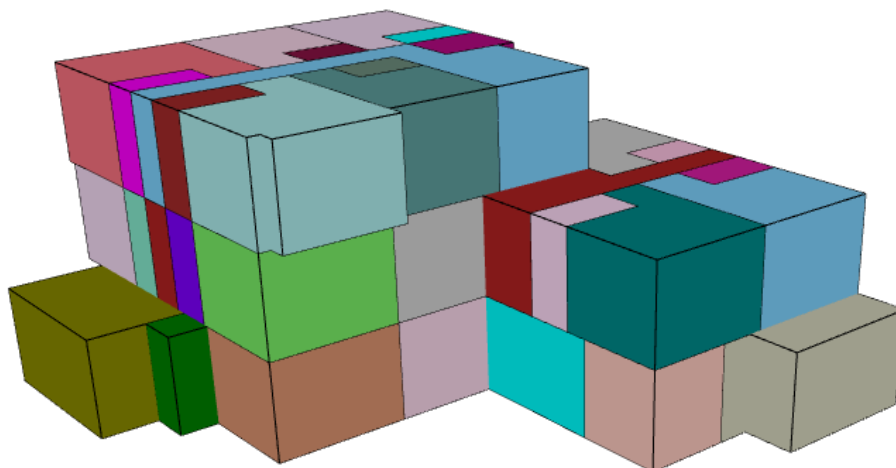


Σχήμα 6.4-7: Παραμετρική ροή εργασίας για τη εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων (.epw) στην ενεργειακή προσομοίωση

Τέλος, το εργαλείο Honebee για την υλοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης χρησιμοποιεί το λογισμικό Openstudio που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα EnergyPlus, συνεπώς τα παραγόμενα από την προσομοίωση αρχεία (.osm) μπορούν να επεξεργαστούν επιπλέον εάν είναι επιθυμητό εντός του λογισμικού.



Σχήμα 6.4-8: Παραμετρική ροή εργασίας για την υλοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης μέσω του λογισμικού σύνδεσης OpenStudio και τα αποτελέσματα αυτής.



Σχήμα 6.4-9: Σχηματική παρουσίαση των διαφορετικών θερμικών ζωνών εντός του λογισμικού OpenStudio

6.4.3. Ενεργειακά δεδομένα χρονοσειρών

Από την ενεργειακή προσομοίωση τα δεδομένα χρονοσειρών που αντλήθηκαν αφορούν παραμέτρους σχετικά με τις θερμικές ζώνες, ενώ συγκεκριμένα για κάθε θερμική ζώνη του κτηρίου αναλύθηκαν η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (MRT), η θερμοκρασία αέρα και η σχετική υγρασία. Οι τιμές των οποίων αφορούν ετήσιες μηνιαίες χρονοσειρές και κάθε μια ώρα της ημέρας.

Ανάλογα²⁹ με τη διαφορά επιφανειακής θερμοκρασίας και την ακτινοβολία, όλα τα σώματα ανταλλάσσουν θερμική ακτινοβολία με το περιβάλλον τους. Αυτή η ανταλλαγή ακτινοβολίας είναι σημαντικό συστατικό της θερμικής άνεσης που βιώνει ένας άνθρωπος, ιδιαίτερα σε μέρη όπου μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις θερμοκρασίες ακτινοβολίας και αέρα, για παράδειγμα κοντά σε μεγάλα παράθυρα. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι τόσο οι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του αέρα, η σχετική υγρασία και η ομοιομορφία των συνθηκών, όσο και ο ανθρώπινος παράγοντας όπως τα ρούχα, η μεταβολική θερμότητα, ο εγκλιματισμός.

Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (MRT) είναι το μέτρο της μέσης θερμοκρασίας των επιφανειών που περιβάλλουν ένα συγκεκριμένο σημείο, στο οποίο θα γίνει η ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας. Εάν το σημείο είναι εκτεθειμένο εξωτερικά, θα συμπεριλαμβάνεται και η εξωτερική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Η σχετική υγρασία (RH) αποτελεί το μέτρο της πυκνότητας υδρατμών του αέρα σε σύγκριση με την πυκνότητα υδρατμών για κορεσμένο αέρα στην ίδια θερμοκρασία και πίεση (δηλαδή τη μέγιστη ποσότητα υγρασίας που μπορεί να διατηρήσει ο αέρας σε αυτή τη θερμοκρασία και πίεση). Όταν ο αέρας δροσίζεται, είναι λιγότερο ικανός να "συγκρατεί" την υγρασία, δηλαδή, η πυκνότητα του ατμού του κορεσμού πέφτει και έτσι η σχετική υγρασία αυξάνεται. Όταν η σχετική υγρασία φθάσει το 100%, ο αέρας θα είναι κορεσμένος. Αυτό περιγράφεται ως το σημείο δρόσου. Αν ο αέρας συνεχίσει να ψύχεται, η υγρασία θα αρχίσει να συμπυκνώνεται. Συνεπώς, οι συνθήκες της θερμικής άνεσης επηρεάζονται άμεσα από τους παράγοντες της θερμοκρασίας του αέρα και της σχετικής υγρασίας. Όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία, τόσο λιγότερη θερμότητα χάνει ένα άτομο μέσω της εξάτμισης της υγρασίας στο δέρμα, και έτσι νιώθει θερμότερο. Αντίθετα, ο υπερβολικά ξηρός αέρας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως ξηροφθαλμία, μύτη, αυτιά και λαιμό. Συνήθως, η σχετική υγρασία 40 έως 60% είναι κατάλληλη σε πολλά κτήρια.

6.4.4. Χρήση Σημασιολογικού Μοντέλου CityGML

Για την υλοποίηση ενός σημασιολογικού μοντέλου 3D κτηρίου χρειάστηκε να δομηθεί ιεραρχικά η ροή της τρισδιάστατης πληροφορίας που αντλήθηκε από το λογισμικό Revit. Η εξαγωγή των επιπέδων πληροφορίας 3D γεωμετρίας του κτηρίου στο Revit έγινε ως ομάδες όμοιων 3D αντικειμένων και στη λογική της ιεραρχικής δομής κλάσεων που θέτει το CityGML για το υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης της κτηριακής πληροφορίας LoD4. Στον παρακάτω πίνακα ταύτισης γεωμετρίας φαίνεται η αντιστοίχιση μεταξύ των γεωμετρικών αντικείμενων στο Revit και των

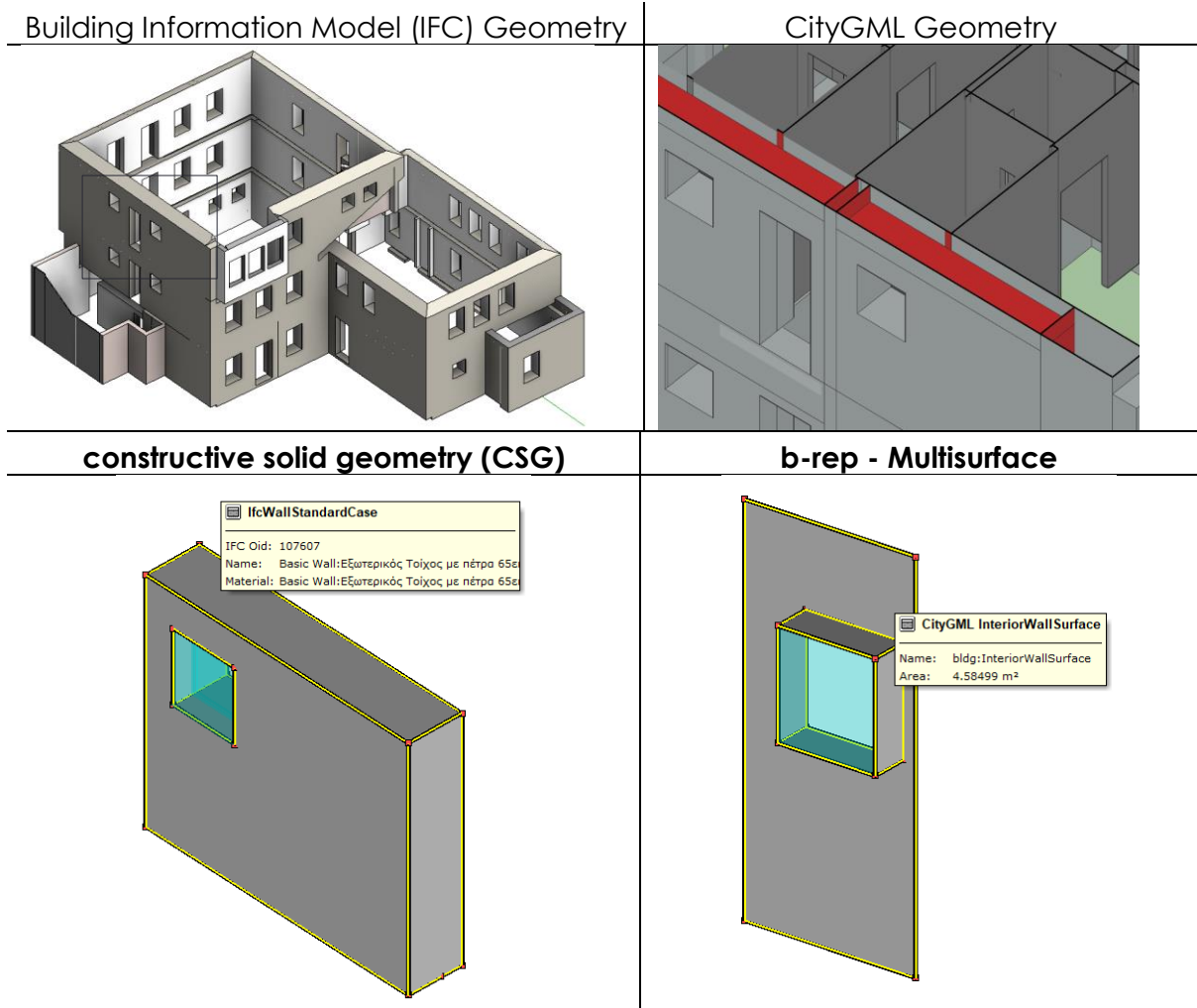
²⁹ https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Mean_radiant_temperature

κλάσεων του CityGML και η λογική εξαγωγής αυτών από το Revit σε μορφότυπο (.dwg).

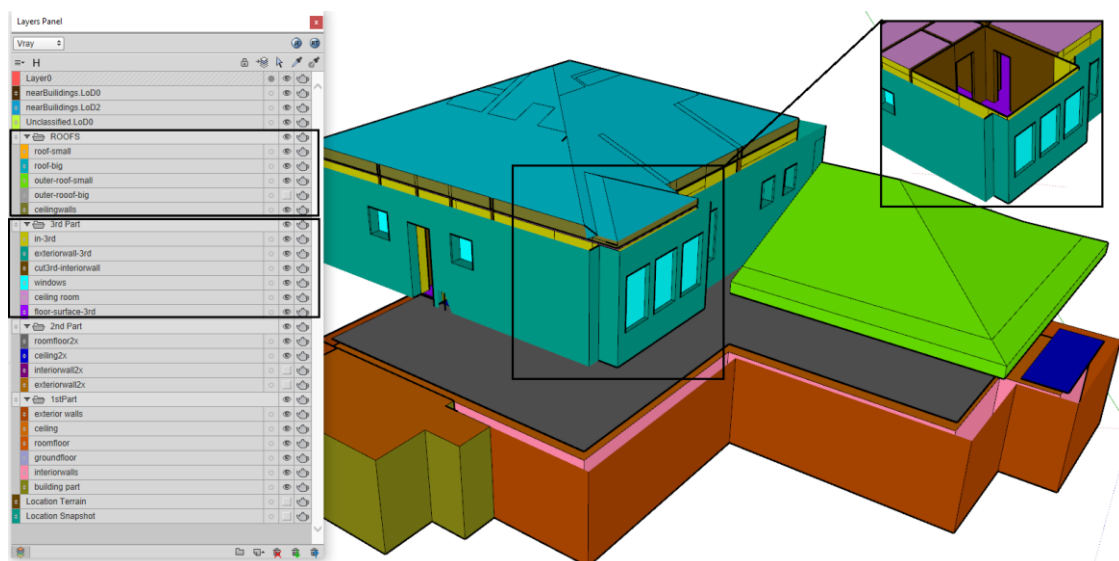
Πίνακας 6.4-1: Εξαγωγή ομάδων κατηγοριών σύμφωνα με τις κλάσεις που θέτει το πρότυπο CityGML

| Ομάδες κατηγοριών (Revit) | Κλάσεις κατά CityGML | | |
|---------------------------|--------------------------|-----------|----------------|
| Exterior Walls | Bldg:WallSurface | Bldg:Room | Bldg: Building |
| | Bldg:InteriorWallSurface | | |
| Interior Walls | Bldg:InteriorWallSurface | | |
| Windows | Bldg:Window | | |
| Doors | Bldg:Door | | |
| Floors | Bldg:CeilingSurface | | |
| | Bldg:FloorSurface | | |
| | Bldg:GroundSurface | | |
| | Bldg:OuterFloorSurface | | |
| | Bldg:OuterCeilingSurface | | |
| Roof | Bldg:RoofSurface | | |
| | Bldg:CeilingSurface | | |

Σε επόμενο στάδιο δημιουργήθηκαν τα διαφορετικά επίπεδα διαχείρισης (layers) της τρισδιάστατης πληροφορίας του κτηρίου με την βοήθεια του πρόσθετου εργαλείου «LayerPanel» στο SketchUp, που δίνει δυνατότητες ομαδοποίησης των επιφανειών σε επίπεδα (layers) για την λειτουργική θέαση ή μη κάθε ομάδας (τοιχοί, πατώματα κλπ). Για καλύτερη αντίληψη της γεωμετρία και υποδιαίρεση του κτηρίου έγινε επιπλέον ομαδοποίηση σε layers των επιμέρους θεματικών ομάδων ανά όροφο (Εικόνα 6.4-2). Ωστόσο, η θεματική ομάδα των εξωτερικών τοίχων στα αρχιτεκτονικά μοντέλα BIM (IFC) αποτελεί γεωμετρικά ένα συμπαγές όγκο που συμπεριλαμβάνει το εξωτερικό κέλυφος τοίχων του κτηρίου, το κομμάτι των εσωτερικών τοίχων αυτό αλλά και την γεωμετρική σύνδεση αυτών των δύο μερών (IfcWallStandardCase). Αντίθετα, σύμφωνα με την γεωμετρία και τοπολογία που θέτει το μοντέλο CityGML, αυτά τα κομμάτια σύνδεσης δεν ορίζονται (Εικόνα 6.4-1, κόκκινη ένδειξη) και υποσκελίζονται σε δύο διαφορετικές κλάσεις Bldg:WallSurface και Bldg:InteriorWallSurface. Ομοίως, στο πρότυπο IFC το πάτωμα κάθε ορόφου (IfcSlab) γίνεται αντιληπτό ως συμπαγής όγκος, αντίθετα στο CityGML διασπάται σε δύο βασικές κλάσεις, Bldg:CeilingSurface και Bldg:FloorSurface. Στοιχώντας στην δημιουργία ενός γεωμετρικά αρχιτεκτονικού μοντέλου σύμφωνα με την γεωμετρία που ορίζει το CityGML, τα κομμάτια αυτά αφαιρέθηκαν κατά το στάδιο της επεξεργασίας. Τέλος, κατά την γεωμετρική διόρθωση του αρχιτεκτονικού μοντέλου έγινε έλεγχος γεωμετρικών ελλείψεων και μερικός σχεδιασμός αλλά και αφαίρεση «κρυμμένων» ή μη γραμμικών στοιχείων χειροκίνητα ή με τη βοήθεια του πρόσθετου εργαλείου CleanUp³.



Εικόνα 6.4-1: Γεωμετρική και τοπολογική διαφοροποίηση ορισμού μεταξύ των αρχιτεκτονικών μοντέλων (BIM-IFC) και του προτύπου CityGML



Εικόνα 6.4-2: Ιεραρχική ομαδοποίηση γεωμετρίας για μετάφραση του αρχιτεκτονικού μοντέλου σε σημασιολογικό μοντέλο CityGML

Έπειτα η σημασιολογική μετάφραση του 3D κτηρίου CityGML καθορίστηκε από την ιεραρχημένη δομή των τρισδιάστατων γεωμετρικών οντοτήτων του αρχιτεκτονικού μοντέλου εντός του λογισμικού SketchUp, με χρήση του πρόσθετου εργαλείου CityEditor. Το επίπεδο λεπτομέρειας που αποδόθηκε στο κτήριο ήταν LoD4, δημιουργώντας λεπτομερείς εσωτερικούς χώρους για κάθε δωμάτιο του τρίτου ορόφου ενώ τα υπόλοιπα δωμάτια των άλλων δύο ορόφων γενικεύτηκαν ως ένα ενιαίο.

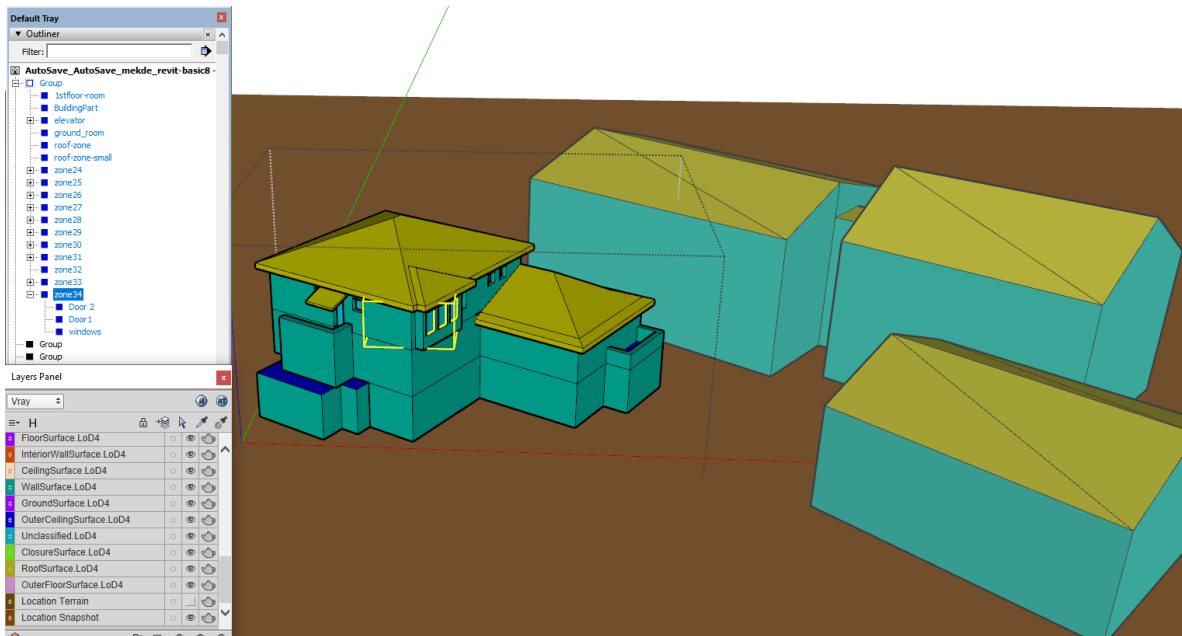
Στη σημασιολογική μετάφραση του μοντέλου σε CityGML, έγινε η ταξινόμηση των επιφανειών σύμφωνα με τις κλάσεις που ορίζει το CityGML (Classification SurfaceType) (Εικόνα 6.4-3). Η διαδικασία ομαδοποίησης των επιπέδων της τρισδιάστατης πληροφορίας και διόρθωσης αυτής που περιγράφηκε παραπάνω βόηθησε στην εύκολη και άμεση επιλογή και από-επιλογή των επιπέδων θέασης των γεωμετρικών οντοτήτων προς ταξινόμηση, γι' αυτό τον λόγο δεν χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο αυτόματης ταξινόμησης του λογισμικού (rule-based classification) καθώς η αυτόματη ταξινόμηση σε υψηλού επιπέδου ανάλυσης μοντέλα LoD 4, εμπεριέχει σφάλματα και απαιτείται χειροκίνητος επανέλεγχος.

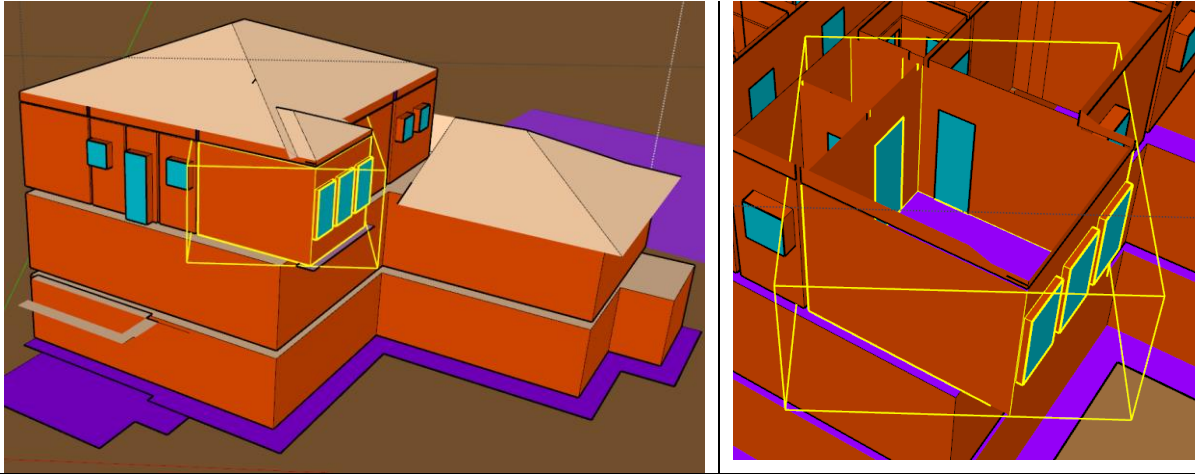
Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, κάθε γεωμετρική οντότητα χαρακτηρίστηκε από μια κλάση (σύμφωνα με το CityGML), ένα επίπεδο λεπτομέρειας (LoD4) και το γεωμετρικό είδος (SurfaceType), ενώ παράλληλα όλες οι επιφάνειες κάθε κλάσης ορίζονται ως BoundarySurfaces. Στη συνέχεια, για τη δημιουργία των δωματίων (bldg:Room) γίνεται ομαδοποίηση των επιφανειών που το ορίζουν (Bldg:InteriorWallSurface, Bldg:FloorSurface, Bldg:CeilingSurface, Bldg:Window, Bldg:Door), δημιουργώντας έτσι GroupType για την κλάση bldg:Room, με όμοιο τρόπο καθορίζεται και το GroupType του κτηρίου (Bldg: Building).

Τα ανοιγμάτων του μοντέλου (πόρτες, παράθυρα), για την σημασιολογική, τοπολογική και γεωμετρική μετάφραση σύμφωνα με το CityGML, αποτελούν μέρος της κλάσης που τα χαρακτηρίζει και διαχειρίζονται μόνο ως GroupType εντός του λογισμικού CityEditor. Σύμφωνα με το σημασιολογικό μοντέλο CityGML, κάθε άνοιγμα ορίζεται ως Opening Boundary SurfaceType του τοίχου που το περιλαμβάνει. Για αυτό τον λόγο, αποδόθηκε ίδιο BoundarySurfaceType ID τόσο στο άνοιγμα του τοίχου όσο και στον ίδιο τον τοίχο. (Εικόνα 6.4-5)

Πίνακας 6.4-2: Οριακές και σημασιολογικές συνθήκες στο CityEditor για κάθε κλάση του σημασιολογικού μοντέλου CityGML

| Boundary SurfaceType | GroupType | SurfaceType | Classification SurfaceType |
|------------------------------|--------------------------|---|--|
| Boundary SurfaceType | Building BuildingPart | lodXMultiSurface lodXFootPrint lodXRooEdge lodXSolid | CeilingSurface ClosureSurface FloorSurface GroundSurface InteriorWallSurface OuterCeilingSurface OuterFloorSurface |
| | Room | lodXMultiSurface lodXSolid | RoofSurface WallSurface |
| Opening Boundary SurfaceType | Door | lodXMultiSurface | |
| | Window | | |





Εικόνα 6.4-3: Σηματολογική ταξινόμηση επιφανειών στις κλάσεις που ορίζει το πρότυπο CityGML και ομαδοποίηση των δωματίων (Bldg:Rooms) και του κτηρίου (Bldg:Building) (group – lodXSolid)

Τέλος, πριν τη εξαγωγή του μοντέλου σε CityGML, αποδόθηκαν σε κάθε ομάδα (είτε δωματίου είτε όλου του κτηρίου) ιδιότητες (Πινάκας 6.4-3). Ο ορισμός της κωδικοποίησης αυτών έγινε σύμφωνα με το SIG 3D στο Παράρτημα C του CityGML 2.0 documentation. Ιδιότητες αποδόθηκαν επίσης στο κτήριο σε σχέση με την διεύθυνση αυτού. Επιπλέον, για τις επιφάνειες που δεν έχουν κάποιο άνοιγμα τα γνωρίσματα BoundarySurfaceType ID, polygonID, LinearRingID αποδίδονται αυτόματα από το λογισμικό.

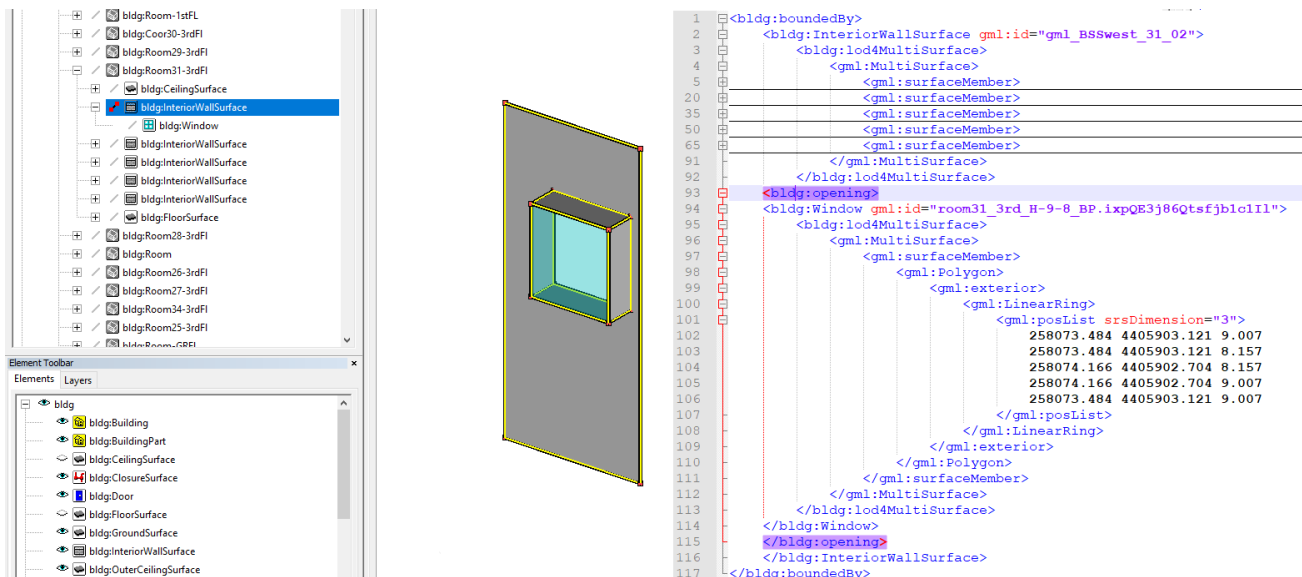
Πίνακας 6.4-3: Σηματολογικές ιδιότητες ορισμού στο CityEditor για κάθε επιφάνεια των κλάσεων του σηματολογικού μοντέλου CityGML (GML Attributes)

| Surface Object Attributes | |
|----------------------------------|---------------------------|
| BoundarySurfaceType ID | |
| Polygon ID | |
| LinearRing ID | |
| Grouped Object Attributes | |
| Id | Usage |
| metaDataProperty | yearOfConstruction |
| Description | yearOfDemolition |
| Name | roofType |
| creationDate | measuredHeight |
| terminationDate | measuredHeightUnit |
| relativeToTerrain | storeysAboveGround |
| relativeToWater | storeysBelowGround |
| Class | storeysHeightsAboveGround |
| Function | storeysHeightsBelowGround |

| Key | Value |
|-------------|-------------------|
| class | 1080 |
| description | R-Zone25 |
| id | room25_3rd_H-9-8 |
| name | bldg:Room25-3rdFl |
| usage | 1010 |

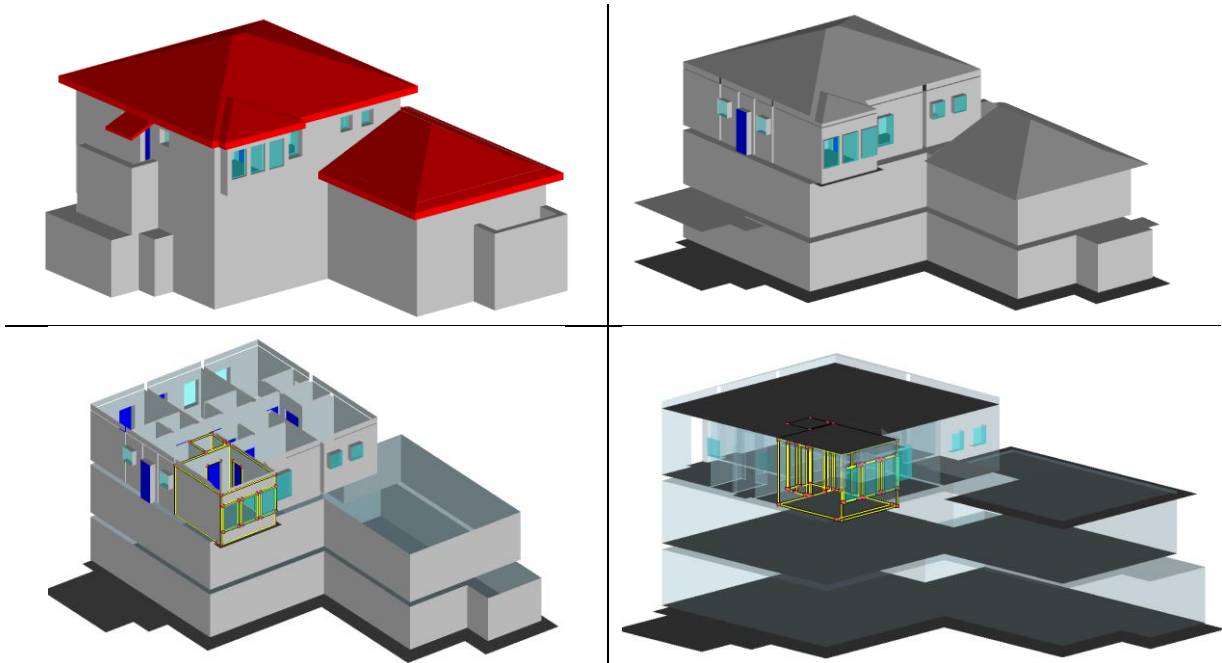
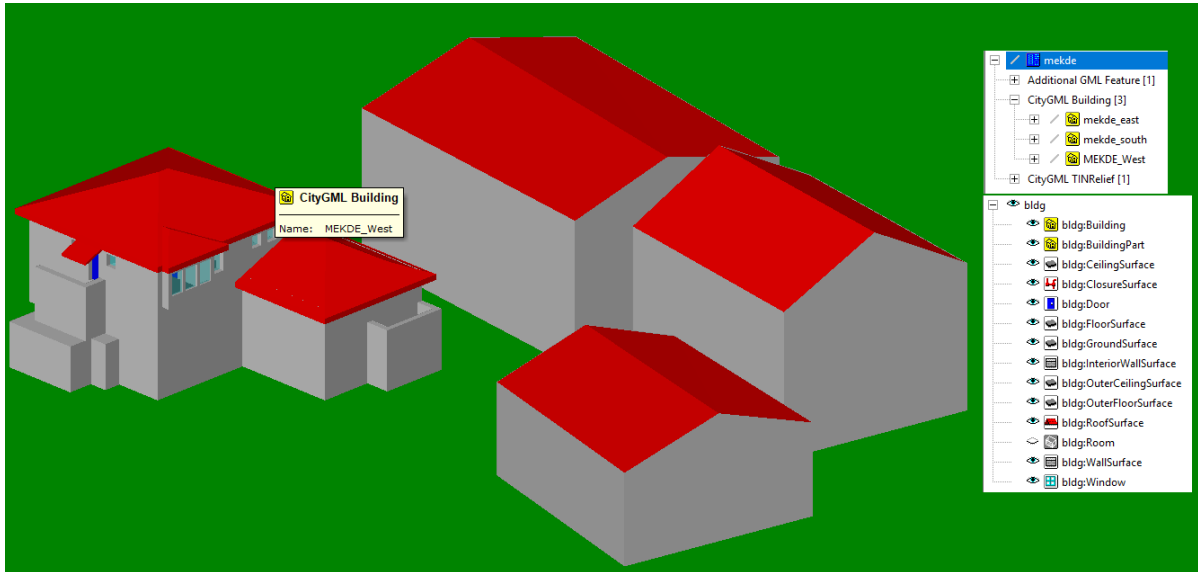
| Key | Value |
|--------------------------|------------|
| class | 1080 |
| description | MEKDE |
| id | mekde_bldg |
| measuredHeight | 13 |
| measuredHeightUnit | m |
| name | MEKDE_West |
| roofType | 1130 |
| storeyHeightsAboveGround | 3.2 |
| storeysAboveGround | 3 |
| usage | 2100 |
| yearOfConstruction | 2005 |

Εικόνα 6.4-4: Ορισμός σημασιολογικών ιδιοτήτων για τις ομάδες των χώρων (Bldg:Rooms) και για το σύνολο του κτηρίου (Bldg:Building)



Εικόνα 6.4-5: Παράδειγμα σημασιολογικού και τοπολογικού ορισμού του παραθύρου ως μέρος του εσωτερικού τοίχου (Opening Boundary SurfaceType)

Για την εξαγωγή του μοντέλου σε CityGML, το λογισμικό αντλεί την γεωαναφορά του μοντέλου που έχει οριστεί σε αρχικό στάδιο μέσα από το CityEditorImporter. Το λογισμικό SketchUp δεν είναι κατάλληλο στο να διαχειριστεί γεωαναφερόμενα μοντέλα σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Ωστόσο, μπορεί να προσδιορίσει χωρικά μέσα από το GeoLocator εργαλείο. Στην εξαγωγή του μοντέλου, το σύστημα αναφοράς και οι συντεταγμένες που έχουν οριστεί, όπως αναλύθηκε, αποθηκεύονται στα μετα-δεδομένα του gml αρχείου. Κατά την εισαγωγή του μοντέλου σε κάποιο πρόγραμμα θέαση επιλέγεται ως Σύστημα αναφοράς "EPSG:25834- ETRS89/UTM Zone 34N". Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το μοντέλο CityGML LoD4 και οι ιεραρχικά δομημένες κατηγορίες των κλάσεων που δημιουργήθηκαν. Η θέαση του μοντέλου έγινε με το λογισμικό FZKViewer.



Εικόνα 6.4-6: Προβολή μοντέλου CityGML LoD4, στο λογισμικό FZKViewer.

6.4.5. Υλοποίηση και επέκταση 3DCityDB – Dynamizer ADE

Για την εισαγωγή του σημασιολογικού μοντέλου CityGML, που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο βήμα, στην βάση δεδομένων της 3DCityDB, δημιουργήθηκε ΒΔ στην PostgreSQL, ενώ για να δημιουργηθούν οι πίνακες σχεσιακής πληροφορίας που θα στηρίξουν την αποθήκευση του CityGML αρχείου δημιουργήθηκε το σχήμα citydb, ορίζοντας ως σύστημα αναφοράς urn:ogc:def:crs:EPSG::2100.

Το πακέτο 3DCityDB διαθέτει εργαλείο εισαγωγής και εξαγωγής αρχείων CityGML από και προς την τρισδιάστατη ΣΒΔ που έχει δημιουργηθεί για την αποθήκευση αυτών. Συνεπώς κατά την εισαγωγή, έγινε πρώτα σύνδεση στην ΒΔ που είχε

δημιουργηθεί σε προηγούμενο βήμα και στη συνέχεια μέσω του εργαλείου 3DCityDB Import πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή όλων των οντοτήτων του κτηρίου στο Feature Type: CityObject - Building, ενώ του εδάφους στο Feature Type: CityObject – Relief. Παρακάτω, φαίνεται ο αριθμός οντοτήτων ανά κλάση στο CityGML του εισαγόμενου αρχείου καθώς και το σύνολο των πινάκων που δημιουργούνται στο σχήμα citydb και το πλήθος των εγγραφών εντός αυτών.

| | | | |
|--|---------------------------|---------------------------|------|
| app:Appearance: 1 | #ADDRESS | 1 | |
| bldg:Building: 3 | #ADDRESS_TO_BRIDGE | 0 | |
| bldg:BuildingPart: 1 | #ADDRESS_TO_BUILDING | 1 | |
| bldg:CeilingSurface: 49 | #APPEAR_TO_SURFACE_DATA | 14 | |
| bldg:ClosureSurface: 1 | #APPEARANCE | 1 | |
| bldg:Door: 15 | #BREAKLINE_RELIEF | 0 | |
| bldg:FloorSurface: 22 | #BRIDGE | 0 | |
| bldg:GroundSurface: 6 | #BRIDGE_CONSTR_ELEMENT | 0 | |
| bldg:InteriorWallSurface: 168 | #BRIDGE_FURNITURE | 0 | |
| bldg:OuterCeilingSurface: 4 | #BRIDGE_INSTALLATION | 0 | |
| bldg:OuterFloorSurface: 2 | #BRIDGE_OPEN_TO_THEM_SRF | 0 | |
| bldg:RoofSurface: 75 | #BRIDGE_OPENING | 0 | |
| bldg:Room: 16 | #BRIDGE_ROOM | 0 | |
| bldg:WallSurface: 95 | #BRIDGE_THEMATIC_SURFACE | 0 | |
| bldg:Window: 8 | #BUILDING | 4 | |
| dem:TINRelief: 1 | #BUILDING_FURNITURE | 0 | |
| Processed geometry objects: 2509 | #BUILDING_INSTALLATION | 0 | |
| Total import time: 01 s. | #CITY_FURNITURE | 0 | |
| Database import successfully finished. | #CITYMODEL | 0 | |
| | #CITYOBJECT | 466 | |
| | #CITYOBJECT_GENERICATTRIB | 22 | |
| | #CITYOBJECT_MEMBER | 0 | |
| | #CITYOBJECTGROUP | 0 | |
| | #SURFACE_DATA | 14 | |
| #EXTERNAL_REFERENCE | 3 | #SURFACE_GEOMETRY | 1477 |
| #GENERALIZATION | 0 | #TEX_IMAGE | 0 |
| #GENERIC_CITYOBJECT | 0 | #TEXTUREPARAM | 608 |
| #GRID_COVERAGE | 0 | #THEMATIC_SURFACE | 422 |
| #GROUP_TO_CITYOBJECT | 0 | #TIN_RELIEF | 1 |
| #IMPLICIT_GEOMETRY | 0 | #TRAFFIC_AREA | 0 |
| #LAND_USE | 0 | #TRANSPORTATION_COMPLEX | 0 |
| #MASSPOINT_RELIEF | 0 | #TUNNEL | 0 |
| #OPENING | 23 | #TUNNEL_FURNITURE | 0 |
| #OPENING_TO_THEM_SURFACE | 23 | #TUNNEL_HOLLOW_SPACE | 0 |
| #PLANT_COVER | 0 | #TUNNEL_INSTALLATION | 0 |
| #RASTER_RELIEF | 0 | #TUNNEL_OPEN_TO_THEM_SRF | 0 |
| #RELIEF_COMPONENT | 1 | #TUNNEL_OPENING | 0 |
| #RELIEF_FEAT_TO_REL_COMP | 0 | #TUNNEL_THEMATIC_SURFACE | 0 |
| #RELIEF_FEATURE | 0 | #WATERBOD_TO_WATERBND_SRF | 0 |
| #ROOM | 16 | #WATERBODY | 0 |
| #SOLITARY_VEGETAT_OBJECT | 0 | #WATERBOUNDARY_SURFACE | 0 |

Η τρέχουσα έκδοση της 3DCityDB (έκδοση 4.2) (3DCityDB, 2019) περιλαμβάνει ένα νέο ADE Plugin Manager για το δικό του Importer/Exporter. Επιτρέπει τη δυναμική επέκταση του 3DCityDB για διευκόλυνση της αποθήκευσης και της διαχείρισης των CityGML ADEs (Yao, Kolbe, 2017). Με χρήση αυτού του εργαλείου έγινε και η επέκταση της 3DCityDB για να στηρίξει το Dynamizer ADE.

Η εφαρμογή του ADE Manager αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος χρησιμοποιείται κυρίως για την επέκταση των ADE του CityGML στην ΧΒΔ δομημένη σύμφωνα με το σχήμα 3DCityDB. Ενώ το δεύτερο μέρος την δημιουργία ενός Java extension το εργαλείο Εισαγωγέας / Εξαγωγέας 3DCityDB να μπορεί να επεκταθεί για να (i) εισάγει αυτόματα δεδομένα χρονοσειρών από το Dynamizer ADE στους

νέους πίνακες Dynamizer ADE και (ii) εξάγει δεδομένα χρονοσειρών από τους πίνακες Dynamizer ADE προς το CityGML αρχεία. Το δευτερό μέρος της εφαρμογής του ADE Manager δεν αποτέλεσε ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας μελέτης

Συνεπώς, κατά τη διαδικασία επέκτασης Dynamizer ADE, στο ήδη υπάρχον σχήμα της ΧΒΔ 3DCityDB προστίθενται νέα αντικείμενα για την Dynamizer ADE ΒΔ όπως feature tables, foreign key constraints, sequences, simple και spatial indexes. Επίσης, οι πίνακες μετα-δεδομένων συμπληρώνονται με τις μετα-πληροφορίες σχετικά με την καταχωρισμένη ADE. Για να υλοποιηθεί η επέκταση Dynamizer ADE, τα αρχεία εισόδου χρειάζεται να οργανωθούν υπό δομή.

Ο φάκελος εισόδου πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον δύο υποχρεωτικούς υποφακέλους, συγκεκριμένα το 3dcitydb και το schema-mapping. Το αρχείο SQL_CREATE_ADE_DB.sql του υπο-φακέλου 3dcitydb μπορεί να εκτελεστεί από το ADE Manager Plugin για τη δημιουργία του ανάλογου 3DCityDB σχήματος ΒΔ για ADE σύμφωνα με τον τύπο ΒΔ (PostgreSQL) που χρησιμοποιείται. Το αρχείο SQL_DROP_ADE_DB.sql αφορά την κατάργηση του αντίστοιχου σχήματος βάσης δεδομένων Dynamizer ADE. Το περιεχόμενο των αναφερόμενων αρχείων εισάγονται στον πίνακα μεταδεδομένων Dynamizer ADE κατά τη διαδικασία εγγραφής ADE και επομένως αποθηκεύονται στην ΒΔ και χρησιμεύει στην πιθανή μετέπειτα κατάργηση/διαγραφή του ADE από την ΒΔ. Ο δεύτερος φάκελος schema-mapping περιλαμβάνει το XML αρχείο το οποίο περιέχει τις σχετικές μετα-πληροφορίες (π.χ. όνομα, περιγραφή, XML namespaces και εύρος τιμών του αναγνωριστικού ID αντικείμενου της κλάσης κ.λπ.) για το Dynamizer ADE καθώς και πληροφορίες για την αποτύπωση του σχήματος XML στο σχήμα της σχεσιακής ΒΔ. Αυτό το αρχείο αντιστοίχισης σχήματος δεν χρησιμοποιείται μόνο για τον σκοπό της επέκτασης αλλά χρειάζεται κατά την διαδικασία εισαγωγής/εξαγωγής και WFS στις αντίστοιχες εφαρμογές της 3DCityDB και την πραγματοποίηση ερωτημάτων και ανταλλαγής δεδομένων μέσα από την ADE, πράγμα που στη παρούσα διπλωματική δεν αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο, όπως αναφέρθηκε.

Μόλις αναπτυχθεί το μοντέλο σχεσιακής βάσης δεδομένων, το επόμενο βήμα είναι η επέκταση της λειτουργίας εισαγωγής και εξαγωγής του 3DCityDB με στόχο την αντιστοίχιση των CityGML αρχείων με το Dynamizer ADE στους κατάλληλους πίνακες. Προκειμένου να υποστηρίξει το 3DCityDB το CityGML Dynamizer ADE τρία σημαντικά βήματα χρειάζεται να εκτελεστούν:

1. Αντιστοίχιση του XML Schema του Dynamizer ADE σε ένα σχεσιακό σχήμα που ενσωματώνεται στον πυρήνα του 3DCityDB σχήματος (Transformation – XML Schema (XSD))
2. Δημιουργία ενός αρχείου αντιστοίχισης σχήματος XML με στόχο την αντιστοίχιση μεταξύ των στοιχείων του σχήματος XML και των στοιχείων του σχεσιακού σχήματος (δημιουργία schema-mapping.xml)

3. Καταχώρηση του Dynamizer ADE με τους πίνακες μεταδεδομένων του 3DCityDB

Η πρόσφατη έκδοση του 3DCityDB (v4.2) παρέχει μέσω του ADE Plugin Manager για αυτοματοποίηση αυτών των τριών (3) βημάτων. Το ADE Plugin Manager διαβάζει το σχήμα XML και εφαρμόζει έναν μετασχηματισμό βασισμένο σε κανόνες για να δημιουργηθεί ένα σχεσιακό σχήμα για το εκάστοτε ADE, που ενσωματώνεται με το 3DCityDB. Με άλλα λόγια, το ADE Plugin Manager δημιουργεί αυτόματα τους πίνακες και τις συνδέσεις με βάση τις κλάσεις και τις σχέσεις που ορίζονται στο μοντέλο UML. Οι πίνακες που δημιουργήθηκαν στο σχήμα citydb της 3DCityDB φαίνονται παρακάτω (Σχήμα)

| Name | Version | Database | Importer/Exporter |
|-----------|---------|----------|-------------------|
| Dynamizer | 1.0 | ✓ | ✗ |

Στο μέλλον, το ADE Plugin Manager θα επεκταθεί για να χαρτογραφήσει το μοντέλο Dynamizer UML με τέτοιο τρόπο ώστε οι ιδιότητες του Dynamizer Core να αντιστοιχίζονται στο πίνακα του Dynamizer Core και οι σχετιζόμενες χρονοσειρές δεδομένων να αντιστοιχίζονται στα Timeseries και Metadata modules (CityGML v3.)

```

1 select * from citydb.objectclass
2 where is_ade_class='1';

```

| | id | is_ade_class | is_toplevel | classname | tablename | superclass_id | baseclass_id | ade_id |
|---|--------------|--------------|-------------|-------------------------|-------------------------|---------------|--------------|---------|
| | [PK] integer | numeric | numeric | character varying (256) | character varying (30) | integer | integer | integer |
| 1 | 10000 | 1 | 0 | Dynamizer | dym_dynamizer | 3 | 3 | 1 |
| 2 | 10001 | 1 | 0 | AbstractTimeseries | dym_timeseries | 2 | 2 | 1 |
| 3 | 10003 | 1 | 0 | AtomicTimeseries | dym_atomictimeseries | 10001 | 2 | 1 |
| 4 | 10004 | 1 | 0 | CompositeTimeseries | dym_timeseries | 10001 | 2 | 1 |
| 5 | 10005 | 1 | 0 | TimeseriesComponent | dym_timeseriescomponent | 2 | 2 | 1 |
| 6 | 10002 | 1 | 0 | SensorConnection | dym_sensorconnection | 0 | 0 | 1 |

Σχήμα 6.4-10: Πίνακες του Dynamizer ADE που εμφανίζονται στο πίνακα objectclass του σχήματος citydb

| citydb.dym_cityobject | | |
|-----------------------|------------|--------|
| id | integer | « pk » |
| dym_cityobject_pkey | constraint | « pk » |

| citydb.dym_dynamizer | | |
|------------------------------|-------------------------|--------|
| id | integer | « pk » |
| attributeref | character varying(1000) | |
| cityobject_dynamizers_id | integer | « fk » |
| dynamicdata_id | integer | « fk » |
| endtime | character varying(1000) | |
| endtime_calendareraname | character varying(1000) | |
| endtime_frame | character varying(1000) | |
| endtime_indeterminatepositio | character varying(1000) | |
| linktosensor_id | integer | « fk » |
| starttime | character varying(1000) | |
| starttime_calendareraname | character varying(1000) | |
| starttime_frame | character varying(1000) | |
| starttime_indeterminateposit | character varying(1000) | |
| dym_dynamizer_pkey | constraint | « pk » |
| dym_dynami_cityob_dynam_fk | constraint | « fk » |
| dym_dynamizer_dynamicda_fk | constraint | « fk » |
| dym_dynamizer_linktosen_fk | constraint | « fk » |
| dym_dynami_cityo_dynam_fkx | index | |
| dym_dynamizer_dynamicd_fkx | index | |
| dym_dynamizer_linktose_fkx | index | |

| citydb.dym_timeseriescomponent | | |
|--------------------------------|-------------------------|--------|
| id | integer | « pk » |
| additionalgap | character varying(1000) | |
| repetitions | integer | |
| timeseries_component_id | integer | « fk » |
| timeseries_id | integer | « fk » |
| dym_timeseriescomponent_pkey | constraint | « pk » |
| dym_timese_timese_compo_fk | constraint | « fk » |
| dym_timeserie_timeserie_fk | constraint | « fk » |
| dym_timese_times_compo_fkx | index | |
| dym_timeserie_timeseri_fkx | index | |

| citydb.dym_atomictimeseries | | |
|-----------------------------|------------|-----------|
| id | integer | « pk fk » |
| dynamicdatadr | text | |
| dynamicdatatvp | text | |
| observationdata | text | |
| dym_atomictimeseries_pkey | constraint | « pk » |
| dym_atomictimeseries_fk | constraint | « fk » |

| citydb.dym_timeseries | | |
|----------------------------|------------|--------|
| id | integer | « pk » |
| objectclass_id | integer | « fk » |
| dym_timeseries_pkey | constraint | « pk » |
| dym_timeserie_objectcla_fk | constraint | « fk » |
| dym_timeserie_objectcl_fkx | index | |

| citydb.dym_sensorconnection | | |
|-----------------------------|-------------------------|--------|
| id | integer | « pk » |
| linktoobservation | character varying(1000) | |
| linktosensorml | character varying(1000) | |
| sensorid | character varying(1000) | |
| sensorlocation_id | integer | |
| servicetype | character varying(1000) | |
| dym_sensorconnection_pkey | constraint | « pk » |
| dym_sensorcon_sensorlo_fkx | index | |

Σχήμα 6.4-11: Πίνακες του Dynamizer ADE που ενσωματώνονται στο schema citydb της 3DCityDB κατά την διαδικασία επέκταση της 3DCityDB, μέσω του εργαλείου Manager ADE

Ωστόσο, σύμφωνα με το παραπάνω Σχήμα διαπιστώνεται ότι απουσιάζει ο πίνακας αποθήκευσης χρονοσειρών DYN_TS_DOUBLE που προτείνεται από τους Chaturvedi, et al., 2019 στο σχήμα της σχεσιακής βάσης δεδομένων του Dynamizer ADE (Ενότητα 5.3, Σχήμα 5.3-2). Το XML Schema του Dynamizer ADE που ενσωματώθηκε στο σχήμα της 3DCityDB και διαβάζει το sql αρχείο δημιουργίας των πινάκων στη ΒΔ ανακτήθηκε από ιστότοπο GitHub³⁰ και αποτελεί έκδοση του 2017,

³⁰https://github.com/yaozhihang/module-dynamizer_ade/blob/master/sql/postgreSQL/CREATE_ADE_DB.sql

ερμηνεύοντας ότι το Dynamizer ADE είναι υπό υλοποίηση ή πληρότητα αυτού ενδέχεται να υλοποιηθεί ως μέρος του CityGML v3.

Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εξετάστηκε πιλοτικά η δημιουργία του πίνακα αποθήκευσης χρονοσειρών με στόχο την υπό μελέτη ανάλυση ενσωμάτωση ενεργειακών δεδομένων χρονοσειρών στο CityGML. Με την υλοποίηση του πίνακα στην σχεσιακή βάση δεδομένων υλοποιείται και η σύνδεση με τους υπόλοιπους πίνακες και η ανάκτηση χρονοσειρών συνδεδεμένων πλέον στα στατικά χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου σημασιολογικού μοντέλου CityGML.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα, εφόσον δημιουργήθηκε ο πίνακας DYM_TS_DOUBLE αποθηκεύτηκαν οι χρονοσειρές δεδομένων και η σύνδεση τους με τους υπόλοιπους πίνακες των Dynamizer. Για να προσδιοριστούν τα στατικά αντικείμενα του σημασιολογικού κτηρίου CityGML με τα δεδομένα χρονοσειράς, ο πίνακας dym_cityobject συνδέεται με τον πίνακα cityobject του CityGML και κατ'επέκταση ενώνονται και οι υπόλοιποι πίνακες των Dynamizer.

| DYM_TS_DOUBLE | |
|---|------------------------------------|
| P | ID INTEGER |
| F | TIMESERIES_ID INTEGER |
| | TIMESTAMP TIMESTAMP WITH TIME ZONE |
| | VALUE REAL |
| DYM_TS_DOUBLE_PK (ID) | |
| DYM_TS_DOUBLE_DYM_TIMESERIES_FK (TIMESERIES_ID) | |

```
CREATE TABLE dym_ts_double(
  ID INTEGER NOT NULL,
  timeseries_ID INTEGER,
  cur_timestamp TIMESTAMP(6),
  value DOUBLE PRECISION
);
```

| | |
|--------------------------|------|
| #DYM_ATOMICTIMESERIES | 2 |
| #DYM_CITYOBJECT | 2 |
| #DYM_DYNAMIZER | 2 |
| #DYM_SENSORCONNECTION | 0 |
| #DYM_TIMESERIES | 2 |
| #DYM_TIMESERIESCOMPONENT | 0 |
| #DYM_TS_DOUBLE | 8772 |

Στη παρούσα μελέτη, ο πίνακας DYM_TS_DOUBLE φέρει τα δυναμικά δεδομένα από την ενεργειακή προσομοίωση και των πραγματικών μετρήσεων. Η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας (°C) αναλύεται σε ετήσιες μηνιαίες χρονοσειρές ανά μία ώρα της ημέρας, ενώ οι πραγματικές μετρήσεις καταναλώσεων σε ετήσιες μηνιαίες τιμές. Στη περίπτωση εφαρμογής, οι χρονοσειρές της μέσης θερμοκρασίας ακτινοβολίας (°C) αντιστοιχήθηκαν με το cityobject ενός από τα δωμάτια του κτηρίου (BuildingRoom), ενώ οι χρονοσειρές των πραγματικών μετρήσεων καταναλώσεων με το σύνολο του κτηρίου (Building).

6.4.6. Ανάκτηση και οπτικοποίηση

Η δημιουργία μιας ΒΔ τρισδιάστατης πληροφορίας (3DCityDB) δίνει τη δυνατότητα ανάκτησης πληροφορίας τόσο για τους χώρους του σημασιολογικού μοντέλου CityGML όσο και για τα δυναμικά δεδομένων χρονοσειρών που συνδέονται με τα αντικείμενα του κτηρίου μέσω ερωτημάτων SQL. Παρακάτω αποτυπώνεται με

παράδειγμα το ερώτημα ανάκτησης όλων των αντικειμένων με ιδιότητα «δωμάτιο» του σημασιολογικού μοντέλου.

| | id | objectclass_id | gmlid | name | description | area_m2 | class | usage |
|----|---------|----------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| | integer | integer | character varying (2) | character varying (100) | character varyin | double precision | character varyin | character var |
| 1 | 173 | 41 | room_3rd_H-9-8 | blgd.Room_el-3rdFL | elevator | 6.23190399884093 | 1080 | 1520 |
| 2 | 182 | 41 | room32_3rd_H-9-8 | blgd.Room32-3rdFl | WC_Z33 | .373375000096945 | 1080 | 1040 |
| 3 | 190 | 41 | room_1st_H-6-6 | blgd.Room-1stFL | 1stFloor | 6.21090999238686 | 1080 | 1000 |
| 4 | 201 | 41 | coor30_3rd_H-9-8 | blgd.Coor30-3rdFl | C-Zone30 | 0.78014199657598 | 1080 | 1100 |
| 5 | 224 | 41 | room29_3rd_H-9-8 | blgd.Room29-3rdFl | R-Zone29 | .449448000585257 | 1080 | 1010 |
| 6 | 256 | 41 | room31_3rd_H-9-8 | blgd.Room31-3rdFl | WC_Z34 | 5.9105579995716 | 1080 | 1040 |
| 7 | 266 | 41 | roof_big | blgd.Roof-B | [null] | 28.2351659932144 | 1080 | [null] |
| 8 | 287 | 41 | room28_3rd_H-9-8 | blgd.Room28-3rdFl | WC_Z29 | .627159999497268 | 1080 | 1040 |
| 9 | 297 | 41 | mekde_bldg_wes... | [null] | [null] | 0.89901800407375 | [null] | [null] |
| 10 | 321 | 41 | room26_3rd_H-9-8 | blgd.Room26-3rdFl | R-Zone26 | .903723999919823 | 1080 | 1010 |
| 11 | 352 | 41 | room27_3rd_H-9-8 | blgd.Room27-3rdFl | WC_Z26 | .422324999760907 | 1080 | 1040 |
| 12 | 362 | 41 | room34_3rd_H-9-8 | blgd.Room34-3rdFl | R-Zone34 | 3.28114199888595 | 1080 | 1010 |
| 13 | 381 | 41 | room25_3rd_H-9-8 | blgd.Room25-3rdFl | R-Zone25 | .192466000294093 | 1080 | 1010 |
| 14 | 399 | 41 | room_gr_H-3-5 | blgd.Room-GRFL | groundFloor | 6.34441998865884 | 1080 | 1100 |
| 15 | 414 | 41 | room33_3rd_H-9-8 | blgd.Room33-3rd | R-Zone33 | 6.26396500136767 | 1080 | 1010 |
| 16 | 447 | 41 | room24_3rd_H-9-8 | blgd.Room24-3rdFl | WC_Z25 | .910557999648464 | 1080 | 1040 |

Σχήμα 6.4-12: Δομή Ερωτημάτων SQL προς ανάκτηση σημασιολογικής πληροφορίας σχετικά με τα δωμάτια του μοντέλου από την 3DCityDB

Αντίστοιχα, η ανάκτηση πληροφορίας χρονοσειρών και η σύνδεση των πινάκων του Dynamizer ADE που δημιουργούνται υλοποιείται με το παρακάτω ερώτημα SQL.

```

SELECT cityobject.gmlid, objectclass.classname,
dym_dynamizer.attributeref,
dym_atomictimeseries.dynamicdatatvp,
dym_ts_double.cur_timestamp,
dym_ts_double.value,
dym_dynamizer.endtime, dym_dynamizer.starttime
FROM
cityobject,objectclass,dym_cityobject,dym_dynamizer,
dym_atomictimeseries,dym_timeseries,dym_ts_double
WHERE cityobject.id=dym_cityobject.id AND
objectclass.id=cityobject.objectclass_id AND
dym_cityobject.id = dym_dynamizer.cityobject_dynamizers_id AND
dym_dynamizer.dynamicdata_id=dym_timeseries.objectclass_id AND
dym_timeseries.objectclass_id=dym_atomictimeseries.id AND
dym_dynamizer.dynamicdata_id=dym_ts_double.timeseries_id;

```

| | gmlid character varying (256) | classname character varying (256) | attributeref character varying (1000) | dynamicdatatype text | cur_timestamp timestamp without time zone | value double precision | endtime character varying (1000) | starttime character varying (1000) |
|----|----------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------|--|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2016-01-01 00:00:00 | 11.85804447 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 2 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 23:00:00 | 12.08138566 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 3 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 22:00:00 | 12.20103485 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 4 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34_3rd_H-9-8']/doubleAttribute[@name='MRT']/genvalue | | | | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 5 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 20:00:00 | 12.01703371 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 6 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 19:00:00 | 11.81502099 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 7 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 18:00:00 | 11.60756314 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 8 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 17:00:00 | 11.42353631 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 9 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 16:00:00 | 11.25816933 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 10 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 15:00:00 | 11.06997298 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 11 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 14:00:00 | 10.7869322 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 12 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 13:00:00 | 10.47730154 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 13 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 12:00:00 | 10.23464022 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 14 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 11:00:00 | 10.07762908 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 15 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 10:00:00 | 10.00856893 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 16 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 09:00:00 | 10.03892867 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 17 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 08:00:00 | 10.04342264 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 18 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 07:00:00 | 9.960975612 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 19 | room34_3rd_H-9-8 | BuildingRoom | //bldg:Room[@gml:id='room34... | tsml.measurenttm.MRT | 2015-12-31 06:00:00 | 9.863660523 | 2015-12-31T24:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |

WHERE dym_atomictimeseries.dynamicdatatype = 'tsml.measurenttm.oilCons';

| | gmlid character varying (256) | classname character varying (256) | attributeref character varying (1000) | dynamicdatatype text | cur_timestamp timestamp without time zone | value double precision | endtime character varying (1000) | starttime character varying (1000) |
|----|----------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------|--|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-01-01 00:00:00 | 956.260305 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 2 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-02-01 00:00:00 | 905.788785 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 3 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-03-01 00:00:00 | 855.5326775 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 4 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde...']/doubleAttribute[@name='OilConMonth']/genvalue | | | | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 5 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-05-01 00:00:00 | 367.792425 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 6 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-06-01 00:00:00 | 61.2987375 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 7 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-07-01 00:00:00 | 0 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 8 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-08-01 00:00:00 | 0 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 9 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-09-01 00:00:00 | 0 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 10 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-10-01 00:00:00 | 185.64909 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 11 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-11-01 00:00:00 | 818.4546975 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |
| 12 | mekde_bldg_west | Building | //bldg:Building[@gml:id='mekde... | tsml.measurenttm.oil... | 2015-12-01 00:00:00 | 877.199895 | 2016-01-01T00:00:00Z | 2015-01-01T00:00:00Z |

Σχήμα 6.4-13: Δομή Ερωτημάτων SQL προς ανάκτηση σημασιολογικής πληροφορίας σύνδεσης των δωματίων ή κτηρίου με τα δυναμικά δεδομένα χρονοσειρών ενεργειακού περιεχομένου από την 3DCityDB

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πιλοτικό παράδειγμα, μη αυτοματοποιημένης ενσωμάτωσης δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών των ετήσιων καταναλώσεων πετρελαίου στο αρχείο CityGML. Η χρήση του αρχείου προσαρμογής σε συνδυασμό με το Java Extension Importer/Exporter του Dynamizer ADE θα έδινε τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης ενσωμάτωσης των δυναμικών χαρακτηριστικών στους αντίστοιχους πίνακες της 3DCityDB που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ωστόσο, η αυτοματοποιημένη υλοποίηση εισαγωγής ή εξαγωγής αρχείου CityGML με δυναμικά δεδομένα, αποτελεί μελλοντικό αντικείμενο προς εφαρμογή και δεν περιλαμβάνεται στο ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

```

</core:cityObjectMember>
<core:cityObjectMember>
  <dynamicizer:Dynamicizer gml:id="mekde_bldg_west_Oil_Consumption_Dynamizer">
    <dynamicizer:attributeRef //bldg:Building[gml:id='mekde_bldg_west']/doubleAttribute[@name = 'oilConMonth']/gen:value </dynamicizer:attributeRef>
    <dynamicizer:startTime frames="#ISO-8601">2015-01-01T00:00:00Z</dynamicizer:startTime>
    <dynamicizer:endTime frames="#ISO-8601">2016-01-01T00:00:00Z</dynamicizer:endTime>
    <dynamicizer:dynamicData>
      <dynamicizer:AtomicTimeseries>
        <dynamicizer:dynamicDataTVP>
          <tsml:TimeseriesTVP>
            <tsml:point>
              <tsml:MeasurementTVP>
                <tsml:time>2015-01</tsml:time>
                <tsml:value>956.260305</tsml:value>
              </tsml:MeasurementTVP>
            </tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:point>
            <tsml:MeasurementTVP>
              <tsml:time>2015-12</tsml:time>
              <tsml:value>977.199895</tsml:value>
            </tsml:MeasurementTVP>
          </tsml:TimeseriesTVP>
        </dynamicizer:dynamicDataTVP>
      </dynamicizer:AtomicTimeseries>
    </dynamicizer:dynamicData>
  </dynamicizer:Dynamicizer>
</core:cityObjectMember>
</core:cityModel>

```

Ετήσιες Μηνιαίες χρονοσειρές
κατανάλωσεων πετρελαίου

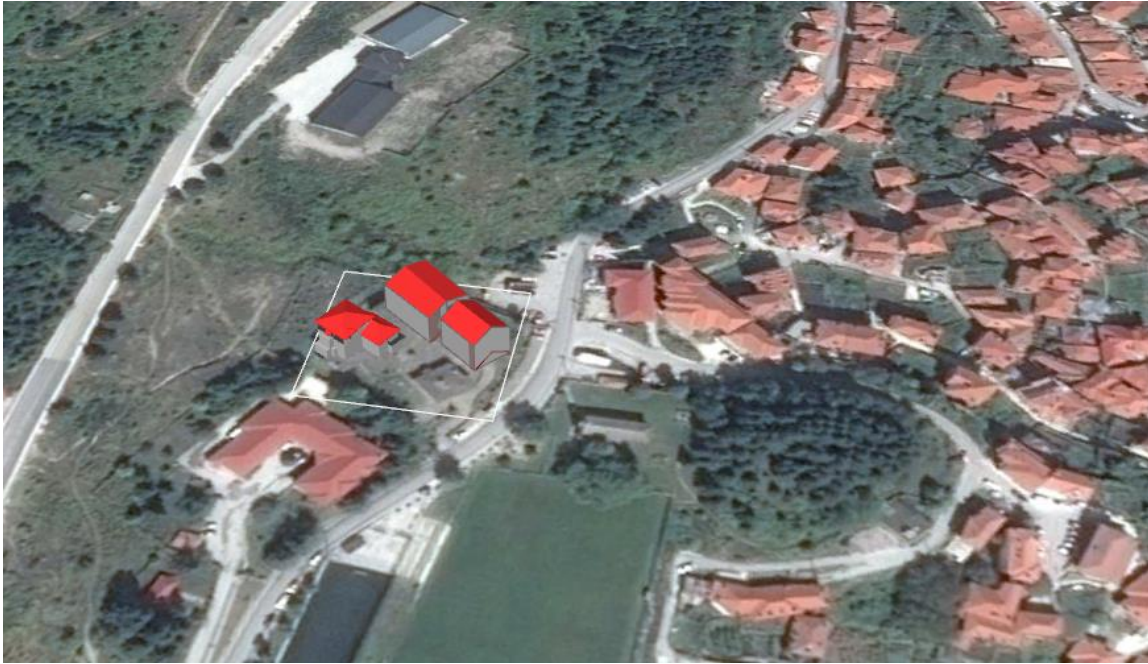
Σχήμα 6.4-14: Προσαρμογή CityObjectMember του Dynamizer ADE στο citygml αρχείο για την ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων στο μοντέλο CityGML

Το πακέτο 3DCityDB δίνει τη δυνατότητα θέασης του σημασιολογικού μοντέλου μέσω εξαγωγής του CityGML σε μορφώτυπα KML, COLLADA and glTF formats και εισαγωγή σε web-based λογισμικά θέασης όπως το Google Earth, Cesium, NASA World Wind. Το KML (Keyhole Markup Language) μορφώτυπο είναι ένα XML format που φέρει γεωγραφική πληροφορία για οπτικοποίηση στο Google Maps and Google Earth και αποτελεί πρότυπο του OGC. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που φέρει το KML είναι προσαρμοσμένα στο πρότυπο GML, αλλά η αναπαράσταση της γεωμετρικής πληροφορίας γίνεται χωρίς σημασιολογικό περιεχόμενο.

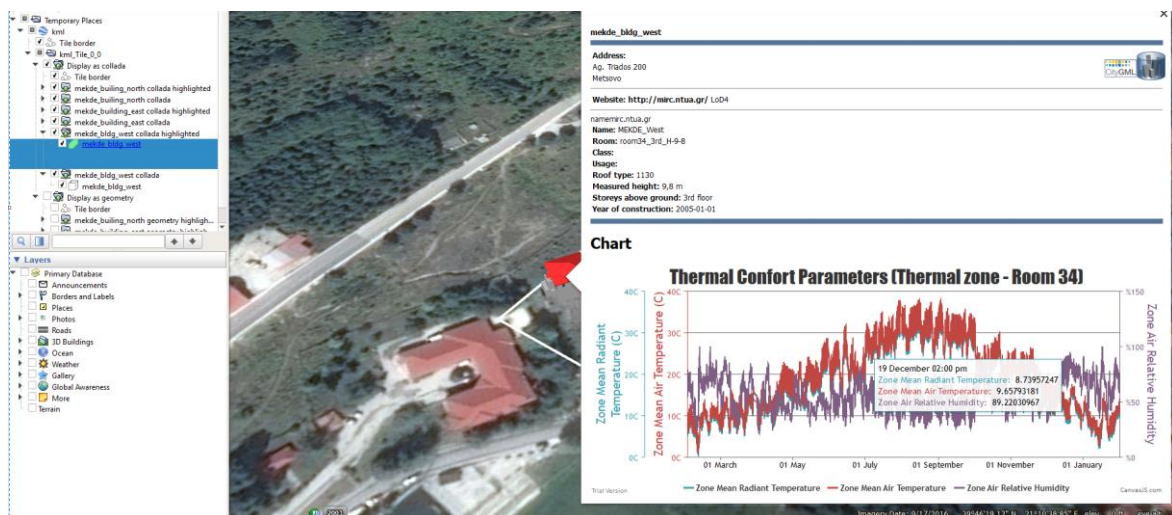
Αντίστοιχα το ανοικτό πρότυπο COLLADA (stands for COLLABorative Design Activity) διαθέτει δυσλειτουργικό χαρακτήρα με τα τρισδιάστατα μοντέλα και είναι και αυτό ένα XML format που χρησιμοποιείται κατεξοχήν από την Google για απεικόνιση 3D μοντέλων. Το πρότυπο χρησιμοποιεί μια object-based προσέγγιση, καθώς αποτελείται από B-Rep γεωμετρία, χρησιμοποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σημασιολογικού μοντέλου, υποστηρίζει διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας, αλλά και σύστημα αναφοράς (WGS84). Το πρότυπο COLLADA δίνει δυνατότητες υποστήριξης της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της εμφάνισης του μοντέλου αλλά δεν υποστηρίζει σημασιολογική πληροφορία.

Στην παρούσα μελέτη έγινε εξαγωγή του μοντέλου μέσα από την 3DCityDB σε μορφώτυπα KML, COLLADA and glTF formats για την οπτικοποίηση της γεωμετρικής πληροφορίας στο Google Earth. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν KML balloons προσαρμόζοντας αρχείο html που διαβάζει τα σημασιολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου από την βάση με κατάλληλα προσαρμοσμένα ερωτήματα SQL, τα οποία επιτρέπουν την διαδραστική εξερεύνηση των 3D μοντέλων πόλης και εν μέρει την απόδοση σημασιολογικής πληροφορίας του μοντέλου. Τέλος στο Balloon προσαρμόστηκε ένα διαδραστικό διάγραμμα

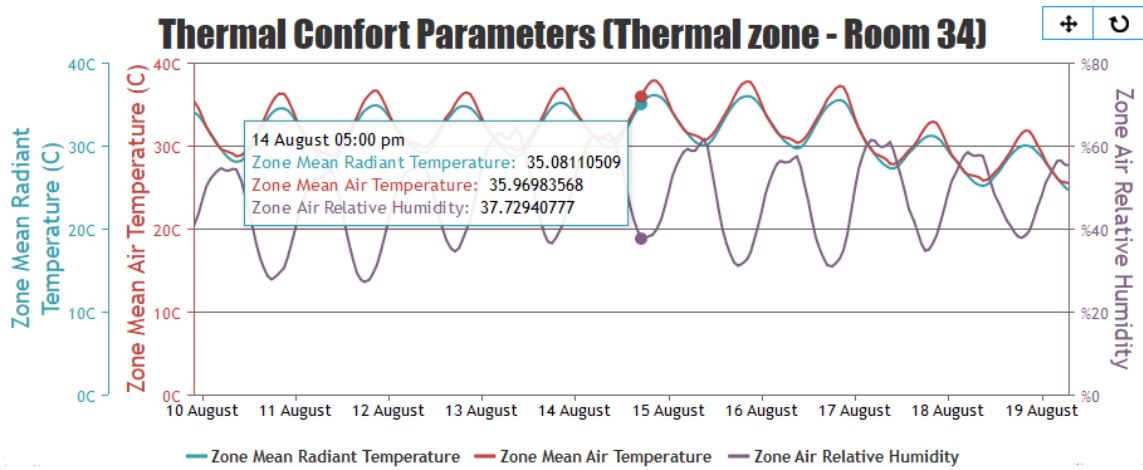
αναπαράστασης των χρονοσειρών, τα δεδομένα του οποίου δεν ανακτούνται από τη βάση δεδομένων. Η παρουσίαση αυτή αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση αναπαράστασης χρονοσειρών που θα γινόταν μέσω κάποιας υπηρεσίας που ανακτά χρονοσειρές δεδομένων και τις αποτυπώνει χρήση του προτύπου Sensor Web Enablement (SWE) που παρέχει υπηρεσίες διεπαφών όπως το Sensor Observation Service, το SensorThings API και RESTful API που αναπτύχθηκαν από το 52 ° North ή αντίστοιχα μέσω της υπηρεσίας InterSensor (Chaturvedi, Kolbe, 2019) που υλοποιεί αντίστοιχη διαλειτουργικότητα σύνδεσης με τα Dynamizers ADE.



Εικόνα 6.4-7: Εξαγωγή του μοντέλου στο Google Earth (kml)



Εικόνα 6.4-8: Δημιουργία pop-up balloon με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου και τη χρήση των δυναμικών δεδομένων χρονοσειρών για ένα δωμάτιο του κτηρίου



Εικόνα 6.4-9: Δημιουργία διαδραστικού διαγράμματος σύγκρισης (.html) των παραμέτρων θερμικής ζώνης με δυνατότητα παραμετρικής προσαρμογή των απεικονιζόμενων δεδομένων χρονοσειράς από τον χρήστη

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι προκλήσεις μέσα στην πόλη ποικίλουν και γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η εφαρμογή στρατηγικών συνδυαστικά με την χρήση της για την υλοποίηση αυτών. Η έννοια των smart cities φέρει τη λογική της συνεργασίας των ενδιαφερόμενων μερών μέσω της αξιοποίησης των τεχνολογικών μέσων για μια έξυπνη διαχείριση των παραμέτρων που σχετίζονται με αυτές. Τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορεί να είναι Δήμοι, Γραφεία Σχεδιασμού, Υπηρεσία Περιβάλλοντος, Ασφάλειας και Πολιτικής, πολίτες, υπηρεσίες παροχής κοινής ωφέλειας – δίκτυα μεταφορών κ.α., δημιουργώντας τη κοινότητα αλληλεπίδρασης με τις πόλεις. Κατά την ΕΕ³¹, οι παράμετροι που συνιστούν μια ευφυής πόλη είναι (i) η Ευφυής Οικονομία, (ii) η Ευφυής Διακυβέρνηση, (iii) ένα Ευφύες Περιβάλλον, (iv) η Ευφυής Διαβίωση, (v) η Ευφυής Κινητικότητα και (vi) Ευφύεις Πολίτες. Συνεπώς, βασική πτυχή για υλοποίηση της έννοιας των smart cities είναι ο μετριασμός ή η αντιμετώπιση της ασυμβατότητας των υπηρεσιών λόγω έλλειψης καλά σχεδιασμένων υποδομών πληροφόρησης. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της χρήσης ανοικτών προτύπων για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας αυτών. Η υλοποίηση της διαλειτουργικότητας των συστημάτων για την ανάλυση των πόλεων αφορά τη συλλογή δεδομένων από πολλές πηγές, τη διαχείριση αυτών, την διαλειτουργική σύνδεση των διαφορετικών μορφότυπων δεδομένων σε μια κοινή βάση δεδομένων, την αξιολόγηση του τρόπου συλλογής δεδομένων, τη διαχείριση των μοντέλων, την ανάλυση και οπτικοποίηση των υπηρεσιών και δεδομένων και τη δημιουργία μοντέλων πρόγνωσης από προσομοιωτές.

Μια ευφυής πόλη δομείται ως συνδυασμός των εννοιών ψηφιακής πόλης και τεχνολογικών μέσων όπως Internet of Things και υπηρεσίες cloud. Η έννοια της ψηφιακής πόλη καθορίζει και οφείλει να ανταποκρίνεται τις απαιτήσεις που θέτει μια πραγματική πόλη όσον αφορά τον κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα. Μια ψηφιακή πόλη αποτελείται τόσο από 2d/3d χάρτες και μοντέλα, όσο και χωροχρονικές 4d ΒΔ, ενώ οι τεχνικές δημιουργίας της αφορούν στη συλλογή παρατηρήσεων από αισθητήρες, πολλαπλών κλιμάκων ανάλυσης και αναπαραστάσεις.

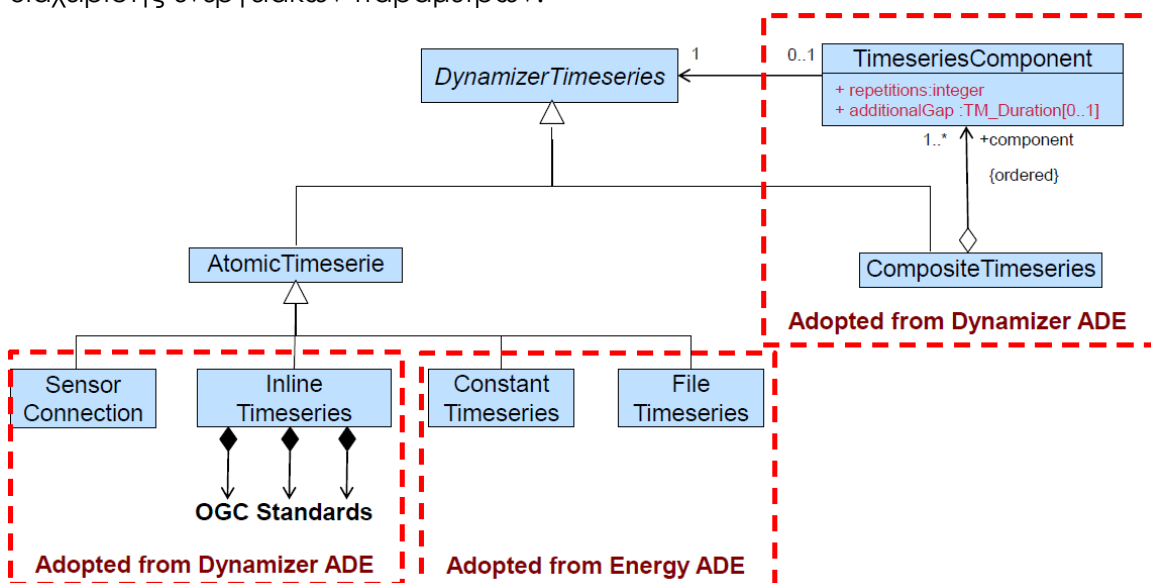
Τα μοντέλα κτηριακής πληροφορίας (BIM) και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) αποτελούν τα κύρια μέσα διαχείρισης της χωρικής πληροφορίας των πόλεων είτε στο δισδιάστατο είτε στο τρισδιάστατο χώρο. Τα BIM αφορούν την λεπτομερή γεωμετρική αναπαράσταση ενός 3D μοντέλου κτηρίου, ενώ τα GIS αποτελούν το μέσο διαχείρισης και ανάλυσης χωρικής (2D ή 3D) και μη

³¹ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2014/507480/IPOL-ITRE_ET\(2014\)507480_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2014/507480/IPOL-ITRE_ET(2014)507480_EN.pdf)

πληροφορίας. Τα σημασιολογικά πρότυπα που αναπαριστούν τα παραπάνω στο τρισδιάστατο χώρο είναι το πρότυπο ανταλλαγής IFC που εφαρμόζεται στη διαδικασία BIM και το σημασιολογικό μοντέλο πόλης CityGML, ως μέσο σημασιολογικής, τοπολογικής και γεωμετρικής διαχείρισης ολόκληρης της πόλης.

Η ενσωμάτωση των σημασιολογικών μοντέλων 3D CityGML για την υλοποίηση πολλαπλών τύπων προσομοίωσης στους διάφορους τομείς μπορεί να δημιουργήσει προϋποθέσεις ολοκληρωμένης διαχείρισης και αξιολόγησης μελλοντικών σεναρίων για ορθολογική λήψη αποφάσεων. Στο πλαίσιο της εφαρμογής Έξυπνων πόλεων, η σύνδεση αισθητήρων παρακολούθησης μπορεί να υλοποιηθεί αποτελεσματικά μέσω των σημασιολογικών μοντέλων πόλης CityGML. Η μετατροπή των στατικών μοντέλων πόλεων σε δυναμικά μοντέλα δημιουργεί συνθήκες παρακολούθησης τόσο των εξελίξεων σε μεγάλο χρονικό πλαίσιο όσο και των δυναμικών αλλαγών τους σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Το CityGML v3, μέσω της υλοποίησης των Dynamizers ως αναπόσπαστο κομμάτι αλλά και ως επέκταση ADE του σημασιολογικού μοντέλου σηματοδοτεί μελλοντικά την υποστήριξη αλλαγών που υφίσταται η πόλη λόγω εξέλιξης. Παράλληλα, τα Dynamizers προτείνεται να αποδοθούν για ανάκτηση δεδομένων και στο Energy ADE, χρησιμοποιώντας τα αποθηκευμένα δεδομένα χρονοσειρών ως κομμάτι διαχείρισης ενεργειακών παραμέτρων.



Εικόνα 7.1-1: Δυνατότητα διαλειτουργικής Dynamizer ADE με Energy ADE, στο σημασιολογικό μοντέλο πόλης CityGML. (Chaturverdi & Kolbe, 2017)

7.2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ο θεματικός επιμερισμός και η ανάκτηση της γεωμετρικής κτηριακής πληροφορίας από το πακέτο Revit της AutoDesk καθίσταται αποτελεσματική μέσω των δυνατοτήτων θέασης των γεωμετρικών αντικειμένων τόσο ανά θεματική ομάδα

(model categories) (τοιχοί εξωτερικοί και εσωτερικοί, πάτωμα, οροφή, παράθυρα κ.α.) όσο και ανά υλικό κατασκευής (Select All Instances). Επιπλέον οι πολλαπλές δυνατότητες θέασης δισδιάστατου (κατόψεις ανά όροφο) και τρισδιάστατου χώρου (3D, τομές, όψεις) επιτρέπουν την λειτουργική και αποτελεσματική διαχείριση των οντοτήτων.

Παράλληλα, η διαδικασία παραγωγής του ενεργειακού μοντέλου BEM σύμφωνα με το πρότυπο gbXML από το αρχιτεκτονικό μοντέλο κτηριακής πληροφορίας BIM με στόχο την ανάκτηση συμπαγών όγκων για κάθε θερμική ζώνη ή αναλυτικό χώρο με σημασιολογικά ενεργειακά χαρακτηριστικά οδηγεί στο συμπέρασμα της μη ικανοποιητικής διαλειτουργικότητας μεταξύ των μοντέλων. Τόσο η μέθοδος ανάκτησης ενεργειακού μοντέλου gbXML με χρήση ρυθμίσεων ενέργειας, όσο και η χρήση των όγκων δωματίων/ χώρων δημιουργεί αστοχίες. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρικής πληροφορίας του αρχιτεκτονικού μοντέλου στην περίπτωση ρυθμίσεων ενέργειας δημιουργεί μεν προβλήματα ασυνέχειας και γεωμετρικών-τοπολογικών κενών, αλλά σημασιολογικής πληρότητας σε ό,τι έχει να κάνει με τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του κτηρίου, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στη μέθοδο χρήσης χώρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη επαρκή δημιουργία ενός ολοκληρωμένου σημασιολογικά και γεωμετρικά ενεργειακού μοντέλου gbXML για περαιτέρω αξιοποίηση σε κάποιο λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων προϋποθέτει τη δημιουργία κατάλληλης γεωμετρίας μοντέλων κτηριακής πληροφορίας (BIM) συμπαγών όγκων με χρήση της τεχνικής massing και με γνώμονα πάντα την μοντελοποίηση αυτής για ενεργειακή ανάλυση από τα πρώτα στάδια δημιουργίας του κτηρίου. Επιπλέον, η δημιουργία θερμικών ζωνών πληροφορίας (zones) κατά τη μοντελοποίηση δημιουργεί δυνατότητες αντίληψης του φορτίου ενέργειας εντός αυτών και απόκρισης του συστήματος HVAC για μια ολοκληρωμένη ενεργειακή μοντελοποίηση.

Το λογισμικό Rhino 3d μέσω του γραφικού παραμετρικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος Grasshopper και τη χρήση των εργαλείων plug-in (Ladybug και Honeybee tools) για περιβαλλοντική και ενεργειακή ανάλυση δημιουργεί προϋποθέσεις διαδραστικής και παραμετρικής μοντελοποίησης του ενεργειακού μοντέλου. Ενώ η σύνδεση των εργαλείων αυτών με τα πλέον διαδεδομένα ενεργειακά προγράμματα OpenStudio και EnergyPlus δημιουργεί ελεγχόμενες συνθήκες γεωμετρικής μοντελοποίησης στο πλαίσιο εφαρμογής μια ενεργειακής προσομοίωσης αλλά και δυνατότητες επέκτασης της εφαρμογής εντός των προαναφερόμενων λογισμικών. Στο πλαίσιο αυτό να υπογραμμιστεί ότι τα ίδια εργαλεία (Ladybug και Honeybee tools) προσφέρονται ως plug-in στο όμοιο του Grasshopper γραφικού παραμετρικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος Dynamo που συνδέεται με το λογισμικό Revit. Ωστόσο, στο Dynamo δεν προσφέρεται όλο το εύρος εφαρμογών περιβαλλοντικής και ενεργειακής προσομοίωσης που δίνεται στο Grasshopper και είναι υπό μελέτη. Η χρήση των εργαλείων αυτών προϋποθέτει

εξοικείωση με τη δημιουργία κτηριακής πληροφορίας στο BIM λογισμικό Rhino, τη προγραμματιστική αντίληψη ενός παραμετρικού περιβάλλοντος αλλά και τη τεχνική γνώση των απαιτήσεων που φέρει μια ενεργειακή προσομοίωση στην ενσωμάτωση των απαραίτητων χαρακτηριστικών των θερμικών ζωνών.

Ωστόσο, στοχεύοντας στη ανάκτηση δεδομένων χρονοσειρών ενεργειακών χαρακτηριστικών του κτηρίου, τα εργαλεία Ladybug και Honeybee μπορούν με προεπιλεγμένες τιμές να εφαρμόσουν μια αποτελεσματική προσομοίωση και δημιουργία ενός εξωτερικού αρχείου τιμών σχέσης τιμής – χρόνου προς την μετέπειτα ενσωμάτωση αυτών σε αντικείμενα του κτηρίου.

Το λογισμικό SketchUp χρησιμοποιήθηκε στο να διορθώσει και να επιμερίσει σε περαιτέρω θεματικές ενότητες την τρισδιάστατη γεωμετρική πληροφορία του κτηριακού μοντέλου σύμφωνα με το πρότυπο CityGML. Οι δυνατότητες χειρισμού των επιπέδων πληροφορίας (layers) βοηθά στην άμεση ταξινόμηση των γεωμετρικών οντοτήτων ανά κλάση του CityGML, ώστε σε επόμενο στάδιο να οριστούν μαζικά το είδος κάθε επιφάνειας λεπτομέρειας και οι οριακές παραμέτροι αυτών, αλλά και το επίπεδο ανάλυσης (LoD) και να καθοριστούν οι τοπολογικές σχέσεις συμπερίληψης κάποιου ανοίγματος σε έναν τοίχο.

Παράλληλα, όσον αφορά τις δυνατότητες σχεδιαστικής διόρθωσης στο πλαίσιο μιας αυτοματοποίησης της διαδικασίας, οι δυνατότητες του SketchUp μειονεκτούν καθώς παρουσιάζουν εμφανή προβλήματα αδυναμίας σχεδίασης και διόρθωσης των εισαγόμενων γεωμετριών σε περιπτώσεις επιφανειών που μπορεί να είναι επικαλυπτόμενες ή να διχοτομούνται από μη ορατές στο σχεδιαστή επιφάνειες. Επιπλέον, χρειάζεται η διαγραφή των μη επιθυμητών γραμμικών στοιχείων (κρυμμένων ή μη) που ορίζονται σε μια επιφάνεια.

Παράλληλα, πλεονέκτημα του CityEditor είναι ότι κατά την εξαγωγή του μοντέλου σε CityGML δημιουργούνται αυτόματα για όλες τις οντότητες τα χαρακτηριστικά αναγνωριστικά ID (BoundarySurfaceType ID, Polygon ID, LinearRing ID). Εξαιρεση αυτού αποτελεί η διαχείριση των ανοιγμάτων, από τοπολογικής άποψης, ως μέρος του τοίχου και αποτελεί μια μη αυτοματοποιημένη διαδικασία, όπου χρειάζεται η οριοθέτηση όμοιων χαρακτηριστικών αναγνωριστικών ID σε κάθε οντότητα, ώστε στο τέλος να υλοποιηθεί η σωστή τοπολογική σχέση των δύο, στο CityGML αρχείο.

Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας μετάφρασης του σημασιολογικού μοντέλου είναι ανάλογη του βαθμού ιεράρχησης και ταξινόμησης των θεματικών επιπέδων, σε προηγούμενο στάδιο, αλλά και του βαθμού επεξεργασίας των γεωμετριών ώστε να συμβαδίζουν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του CityGML (πχ μη συμπαγείς όγκοι τοίχων και πατωμάτων (BIM) – δημιουργία b-reps γεωμετρίας (CityGML)). Ωστόσο, η σημασιολογική μετάφραση των γεωμετρικών επιφανειών του κτηριακού μοντέλου παραμένει μια χειροκίνητη διαδικασία, καθώς το CityEditor παρέχει έναν

ημιαυτόματο τρόπο σημασιολογικής μετάφρασης που χρήζει επανεξέτασης. Παρ'όλα αυτά, η κατάλληλη ομαδοποίηση των γεωμετριών σε επίπεδα είναι ο τρόπος για ελαχιστοποίηση σφαλμάτων και ασαφειών στην σημασιολογική μετάφραση κτηρίων υψηλού επιπέδου ανάλυσης (LoD4). Επιπλέον, το CityEditor μπορεί να αποδειχτεί αποτελεσματικό εργαλείο μετάφρασης επιπέδου LoD2 πληροφορίας για μεγάλης έκτασης πόλεις δημιουργώντας μια απόλυτα αυτοματοποιημένη διαδικασία σημασιολογικής μετάφρασης σύμφωνα με το πρότυπο CityGML.

Η επέκταση της 3DCityDB στο πλαίσιο ενσωμάτωσης των δυναμικών δεδομένων σε ένα στατικό σημασιολογικό μοντέλο πόλης CityGML δημιουργεί προϋποθέσεις μιας απόλυτα ελεγχόμενης ΒΔ, με δυνατότητες ανάκτησης πληροφορίας σημασιολογικού και δυναμικού περιεχομένου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει η χωρο-χρονική (4d) ανάλυση του μοντέλου, θέτοντας τις βάσεις για την υλοποίηση μιας ευφυούς πόλης στο εννοιολογικό πλαίσιο των "smart cities". Η ενεργειακή πληροφορία χρονοσειρών από το μοντέλο προσομοίωσης που ενσωματώθηκε στο σημασιολογικό μοντέλο μέσω της δημιουργίας πινάκων στη 3DCityDB, επεκτείνει το σημασιολογικό χαρακτήρα του κτηρίου δίνοντάς του ένα δυναμικό χαρακτήρα. Παράλληλα, δημιουργούνται προϋποθέσεις για τη καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων ενεργειακής προσομοίωσης σε σχέση με τη σύνδεση τους στο χώρο. Για κάθε οντότητα (cityobject) δίνεται η δυνατότητα επιλογής σύνδεσης ή και όχι με τα εκάστοτε δυναμικά δεδομένα. Η σύνδεση του χώρου με τη θεματική πληροφορία των χρονοσειρών μπορεί έπειτα να ανακτηθεί και να οπτικοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση και δυναμική σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν την ίδια χρονική ή χώρο-χρονική στιγμή.

7.3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

Αξιολογώντας την χρησιμότητα της τεχνολογίας BIM γίνεται αντιληπτό ότι προσφέρονται δυνατότητες τόσο της δημιουργίας κτηριακής πληροφορίας BIM προσαρμόζοντας χαρακτηριστικά και ιδιότητες υλικών κ.α και μετάφρασης της διαδικασίας στο σημασιολογικό μοντέλο του πρότυπου Industry Foundation Classes (IFC), όσο της δημιουργίας ενεργειακών μοντέλων, εφαρμόζοντας την μετάφραση αυτών στο πρότυπο gbXML. Οι προϋποθέσεις που δίνονται από το λογισμικό αποτελούν υπό διερεύνηση διαδικασία σύνδεσης και διαλειτουργικής επαφής με το σημασιολογικό πρότυπο CityGML. Ωστόσο, η σημαντικά περισσότερη σημασιολογική πληροφορία στο IFC, δημιουργεί ερευνητικές δυσκολίες μετάφρασής του στο CityGML και μη αυτοματοποιημένες διαδικασίες για κάποια επίπεδα λεπτομέρειας. Παράλληλα, η διαλειτουργική σύνδεση του πρότυπου gbXML και μετάφρασης αυτού στο σημασιολογικό μοντέλο CityGML, δημιουργεί τοπολογικές φύσεως δυσκολίες, ιδιαίτερα για υψηλά επίπεδα λεπτομέρειας. Επιπλέον, η ταύτιση των ενεργειακών σημασιολογικών χαρακτηριστικών του gbXML

προϋποθέτει την ενσωμάτωση του Energy ADE στη σχεσιακή βάση δεδομένων του CityGML. Ενώ αντίστοιχα, η αποτελεσματική μετάφραση του πρότυπου πληροφορίας IFC σε gbXML δημιουργεί περιορισμούς λόγω γεωμετρικής πολυπλοκότητας των αρχιτεκτονικών μοντέλων και τη μη αποτελεσματική δημιουργία συμπαγών όγκων θερμικών ζωνών πληροφορίας, που απαιτούν τα προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης. Συνεπώς, η διαλειτουργική σύνδεση των τριών αυτών επιμέρους μοντέλων, η μελέτη περιορισμών εφαρμογής ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας της εξαγόμενης πληροφορίας και η μελέτη επέκτασης του CityGML με το Energy ADE, αποτελούν άξονες μελλοντικής διερεύνησης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, όσον αφορά την επέκταση εφαρμογής και λειτουργίας των Dynamizers ADE, έγκειται στην μελέτη εφαρμογών των υπόλοιπων εννοιολογικών συνδέσεων που παρέχει το σχήμα. Τέτοιες εφαρμογές αποτελούν η αποθήκευση χρονοσειρών στην κλάση `AtomicTimeseries` και ενσωμάτωση τιμών σε ζεύγη χρόνου-τιμής (`dynamicDataTVP`) ή χώρου-τιμής (`dynamicDataDR`) για συγκεκριμένες τοποθεσίες. Ανάκτηση μέρους των `AtomicTimeseries` για την δημιουργία προτύπων (`patterns`) χώρο-χρονικής ιδιότητας και αξιολόγηση της κλάσης `CompositeTimeseries`. Παράδειγμα προτύπου θα μπορούσε να είναι η αξιολόγηση των καταναλώσεων ενέργειας μόνο για τα σαββατοκύριακα και για μια σειρά ετών. Επιπλέον, μεγάλης σημασίας στην μελλοντική εφαρμογή θα ήταν η ανάκτηση παρατηρήσεων απευθείας από εξωτερικές υπηρεσίες αισθητήρων ή πλατφόρμες IoT χρησιμοποιώντας την κλάση `SensorConnection`.

Στο πλαίσιο ανάπτυξης μιας δια-λειτουργικής και αυτοματοποιημένης σύνδεσης των στατικών χαρακτηριστικών του σημασιολογικού μοντέλου CityGML με τα δυναμικά δεδομένα από εξωτερικές πηγές ή σένσορες, θα μπορούσε να αναπτυχθεί Java Extension για το πακέτο `3DCityDB` και επέκταση αυτού με ένα `Importer/Exporter` εργαλείο για `Dynamizer ADE`. Η χρήση της επέκτασης αυτής θα είχε ως αποτέλεσμα την άμεση ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων ή δεδομένων χρονοσειράς στους πίνακες της σχεσιακής ΒΔ που αφορούν τα `Dynamizer` (με την εισαγωγή αρχείου CityGML με επιπλέον τις δυναμικές τιμές ως ένα νέο `CityObjectMember` του `Dynamizer ADE`) ή την εξαγωγή όμοιου αρχείου CityGML προσαρμόζοντας τις καταγεγραμμένες τιμές και μεταδεδομένα από τους πίνακες εντός αυτού. Ο εισαγωγέας / εξαγωγέας `3DCityDB` επεκτείνεται δηλαδή για την διευκόλυνση εισαγωγής και εξαγωγής CityGML αρχείων με δεδομένα `Dynamizer ADE`.

Τέλος, μελλοντική προς υλοποίηση ενέργεια είναι η οπτικοποίηση και ανάκτηση στατικών μοντέλων πόλεων με δυναμικά σημασιολογικά χαρακτηριστικά μέσω υπηρεσιών διαδικτύου και δημιουργία διαγραμμάτων σύγκρισης παραμέτρων προς αξιολόγηση στη λήψη αποφάσεων. Οι επεκτάσεις της υπηρεσίας `InterSensor`

βοηθούν στη δημιουργία συνδέσεων με τα συγκεκριμένα Dynamizers που έχουν αποθηκευτεί στη 3DCityDB, επιτρέποντας την δημιουργία ερωτημάτων και αναπαράστασης των δυναμικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας διεθνή πρότυπα όπως το OGC SensorThings API και OGC SOS. Τα στατικά χαρακτηριστικά (όπως η γεωμετρία των κτηρίων και τα θεματικά χαρακτηριστικά αυτών) μπορούν να ανακτηθούν και να απεικονιστούν χρησιμοποιώντας Web Feature Services. Αντίστοιχα, τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ίδιων των κτηρίων, όπως για παράδειγμα θερμοκρασία και υγρασία αισθητήρα ή τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της ηλιακής ενέργειας στους τοίχους μπορούν να ανακτηθούν και να απεικονιστούν σύμφωνα με τα πρότυπα OGC Sensor Web Enablement (SWE) με τη βοήθεια της υπηρεσίας InterSensor.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agugiaro, G. (2016). Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: Experiences from Trento (Italy). *Applied Geomatics*, 8(1), 41–56. <https://doi.org/10.1007/s12518-015-0163-2>
- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). GENERATION OF MULTI-LOD 3D CITY MODELS IN CITYGML WITH THE PROCEDURAL MODELLING ENGINE RANDOM3DCITY. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W1, 51–59. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W1-51-2016>
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (Eds.). (2018). *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>
- Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart Cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, 18(2), 65–82. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>
- Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2016). INTEGRATING DYNAMIC DATA AND SENSORS WITH SEMANTIC 3D CITY MODELS IN THE CONTEXT OF SMART CITIES. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W1, 31–38. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-31-2016>
- Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2019). A REQUIREMENT ANALYSIS ON EXTENDING SEMANTIC 3D CITY MODELS FOR SUPPORTING TIME-DEPENDENT PROPERTIES. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W9, 19–26. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W9-19-2019>
- Chaturvedi, K., Willenborg, B., Sindram, M., & Kolbe, T. H. (2017). SOLAR POTENTIAL ANALYSIS AND INTEGRATION OF THE TIME-DEPENDENT SIMULATION RESULTS FOR SEMANTIC 3D CITY MODELS USING DYNAMIZERS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W5, 25–32. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W5-25-2017>
- Chaturvedi, K., Yao, Z., & Kolbe, T. H. (2019). INTEGRATED MANAGEMENT AND VISUALIZATION OF STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES OF SEMANTIC 3D CITY MODELS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W17, 7–14. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W17-7-2019>
- Chaturvedi, Kanishk, & Kolbe, T. (2019). Towards Establishing Cross-Platform Interoperability for Sensors in Smart Cities. *Sensors*, 19(3), 562. <https://doi.org/10.3390/s19030562>
- Chaturvedi, Kanishk, & Kolbe, T. H. (2015). Dynamizers—Modeling and Implementing Dynamic Properties for Semantic 3D City Models. *Eurographics*

- Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*, 6 pages.
<https://doi.org/10.2312/UDMV.20151348>
- Chaturvedi, Kanishk, & Kolbe, T. H. (2018a). InterSensor Service: Establishing Interoperability over Heterogeneous Sensor Observations and Platforms for Smart Cities. *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2018.8656984>
 - Chaturvedi, Kanishk, & Kolbe, T. H. (2018b). InterSensor Service: Establishing Interoperability over Heterogeneous Sensor Observations and Platforms for Smart Cities. *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2018.8656984>
 - Chaturvedi, Kanishk, Matheus, A., Nguyen, S. H., & Kolbe, T. H. (2019). Securing Spatial Data Infrastructures for Distributed Smart City applications and services. *Future Generation Computer Systems*, 101, 723–736. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.002>
 - Chaturvedi, Kanishk, Matheus, A., Nguyen, S. H., & Kolbe, T. H. (2018). Securing Spatial Data Infrastructures in the Context of Smart Cities. *2018 International Conference on Cyberworlds (CW)*, 403–408. <https://doi.org/10.1109/CW.2018.00078>
 - Chaturvedi, Kanishk, Smyth, C. S., Gesquière, G., Kutzner, T., & Kolbe, T. H. (2017). Managing Versions and History Within Semantic 3D City Models for the Next Generation of CityGML. In A. Abdul-Rahman (Ed.), *Advances in 3D Geoinformation* (pp. 191–206). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25691-7_11
 - Chen, S., Jin, R., & Alam, M. (2018). Investigation of interoperability between building information modelling (BIM) and building energy simulation (BES). *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2), 137–144. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.2.9>
 - Fernald, H., Hong, S., Bucking, S., & O'Brien, W. (2018). *BIM to BEM translation workflows and their challenges: A case study using a detailed BIM model*. 10.
 - Floros, G. S., Ellul, C., & Dimopoulou, E. (2018). INVESTIGATING INTEROPERABILITY CAPABILITIES BETWEEN IFC AND CITYGML LOD 4 – RETAINING SEMANTIC INFORMATION. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W10, 33–40. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W10-33-2018>
 - *Future City Pilot 1 Engineering Report*. (n.d.). 59.
 - Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (2012). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) En- coding Standard*. 344.
 - Geiger, A., Benner, J. Hafele, H., Hagenmeyer V. (2018) Thermal Energy Simulation of Buildings Based on the CityGML Energy Application Domain

Extension. *Institute for Automation and Applied Informatics, Karlsruhe Institute for Technology, Karlsruhe, Germany*

- Jirka, S., Bröring, A., Kjeld, P., Maidens, J., & Wytzisk, A. (2012). A Lightweight Approach for the Sensor Observation Service to Share Environmental Data across Europe: A Lightweight Approach for the Sensor Observation Service. *Transactions in GIS*, 16(3), 293–312. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2012.01324.x>
- Krüger, A., & Kolbe, T. H. (2012). BUILDING ANALYSIS FOR URBAN ENERGY PLANNING USING KEY INDICATORS ON VIRTUAL 3D CITY MODELS – THE ENERGY ATLAS OF BERLIN. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B2, 145–150. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B2-145-2012>
- Lillis, G. N., Rovas, D. V., & Prieto, I. (n.d.). *SECOND-LEVEL SPACE BOUNDARY TOPOLOGY GENERATION FROM CITYGML INPUTS*. 8.
- Manville, C., Europe, R., Millard, J., Institute, D. T., & Liebe, A. (n.d.). *Mapping Smart cities in the EU*. 200.
- Morel, M., & Gesquière, G. (n.d.). *Managing temporal change of cities with CityGML*. 6.
- Moshrefzadeh, M., Chaturvedi, K., Hijazi, I., Donaubauer, A., & Kolbe, T. H. (n.d.). *Integrating and Managing the Information for Smart Sustainable Districts—The Smart District Data Infrastructure (SDDI)*. 19.
- Roudsari M., Pak, M. LadyBug: A Parametric Environmental Plugin for Grasshopper to help Designers Create an Environmentally - Consious Desing
- Naboni, E., Natanian, J., Brizzi, G., Florio, P., Chokhachian, A., Galanos, T., & Rastogi, P. (2019). A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109255>
- Nouvel, R., Kaden, R., Bahu, J.-M., Kaempf, J., Cipriano, P., Lauster, M., Benner, J., Tournaire, O., & Casper, E. (2015). *GENESIS OF THE CITYGML ENERGY ADE*. 6.
- Perinaud, C., Gay, G., & Gesquiere, G. (2015). Exploration of the changing structure of cities: Challenges for temporal city models. *2015 Digital Heritage*, 73–76. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419455>
- Ryu, H.-S., & Park, K.-S. (2016). A Study on the LEED Energy Simulation Process Using BIM. *Sustainability*, 8(2), 138. <https://doi.org/10.3390/su8020138>
- Saran, S., Wate, P., Srivastav, S. K., & Krishna Murthy, Y. V. N. (2015). CityGML at semantic level for urban energy conservation strategies. *Annals of GIS*, 21(1), 27–41. <https://doi.org/10.1080/19475683.2014.992370>
- *Space Boundaries for Energy Analysis*. (n.d.). 62.

- Yao, Z., & Kolbe, T. H. (2017). *Dynamically Extending Spatial Databases to support CityGML Application Domain Extensions using Graph Transformations*. 16.
- Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubaue, A., Adolphi, T., & Kolbe, T. H. (2018). 3DCityDB - a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0046-7>