**Αρχιτεκτονικές 5G, Τεχνολογίες,**

**Εφαρμογές και Βασικοί**

**Δείκτες Απόδοσης**

Τμήμα Μηχανικών Η / Υ και Πληροφορικής

**Πολυτεχνική Σχολή**

Εαρινό Εξάμηνο 2025

19 Μαΐου 2025

[**Τομέας Υλικού και Αρχιτεκτονικής των Υπολογιστών**](https://www.ceid.upatras.gr/el/research/divisions/tomeas-efarmogon-kai-themelioseon-tis-epistimis-ton-ypologiston)

**Επιλεγόμενο Μάθημα – CEID\_NE577**

**Στοιχεία Ομάδας**

**Όνομα:** Χρυσαυγή, Μηλτιάδης

**Επώνυμο:** Πατέλη**,** Μαντές

**Α.Μ.:** 1084513, 1084661

**E – mail:** up1084513@ac.upatras.gr, up1084661@ac.upatras.gr

**Εξάμηνο:** 10ο, 10ο

**Διδάσκων**: Χρήστος Βερυκούκης

**Επιβλέπων**: Παναγιώτης Μαράντης

**ΘΕΜΑ: Πρόβλεψη Downlink Bitrate (Throughput) Με Βάση Μετρικές Ποιότητας**

**Περιεχόμενα**

**0 Εισαγωγή** 2

**1**  **Σημασία της πρόβλεψης του downlink bitrate συσκευών στα σύγχρονα**

**δίκτυα 5G** 3

**2**  **Προεπεξεργασία** 4

**3**  **Υλοποίηση XGBoost Regressor**

**4**  **Υλοποίηση XAI**

**5**  **Υλοποίηση LSTM**

**6**  **Bonus**

**7**  **Παράσρτημα**

<https://github.com/miltiadiss/CEID_NE577-5G-Architectures-Technologies-Applications-and-Key-Performance-Indicators>

**0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

**1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ DOWNLINK BITRATE ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G**

Η πρόβλεψη του throughput (ρυθμού μετάδοσης καθοδικής ζεύξης) στις υποδομές 5G αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, τη βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και τη δυναμική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Με τη ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων για αξιόπιστες και υψηλής ταχύτητας συνδέσεις, η ικανότητα ενός δικτύου να προβλέπει και να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες είναι ζωτικής σημασίας.

* **Βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων και αποφυγή συμφόρησης**

Η ακριβής πρόβλεψη του throughput επιτρέπει στα δίκτυα να κατανέμουν δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τους ραδιοπόρους με αποδοτικό τρόπο, εξισορροπώντας τα φορτία και αποφεύγοντας τη συμφόρηση. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων όπως η μείωση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και το αυξημένο latency, που μπορεί να επηρεάσουν κρίσιμες εφαρμογές.

* **Βελτίωση εμπειρίας χρήστη και ποιότητας υπηρεσίας (QoS)**

Η πρόβλεψη των απαιτήσεων μετάδοσης επιτρέπει στο δίκτυο να προσαρμόζει δυναμικά τις παραμέτρους του, μειώνοντας τη λανθάνουσα κατάσταση (latency) και εξασφαλίζοντας σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή διαθεσιμότητα και ελάχιστες καθυστερήσεις, όπως το cloud gaming, η εικονική/επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR), η τηλεϊατρική και τα αυτόνομα οχήματα.

* **Υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών και δικτυακών τεχνολογιών**

Η ακριβής πρόβλεψη του throughput αποτελεί βασικό συστατικό για τη λειτουργία καινοτόμων τεχνολογιών, όπως:

* **Network Slicing**: Δυνατότητα δημιουργίας εξειδικευμένων υποδικτύων που εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες, με το throughput να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις κάθε slice.
* **Edge Computing**: Προσαρμογή της κατανομής υπολογιστικών πόρων βάσει των αναγκών throughput, βελτιώνοντας την απόδοση των αποκεντρωμένων συστημάτων.
* **Διαχείριση Massive IoT**: Η μαζική διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών απαιτεί αξιόπιστες προβλέψεις throughput ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα του δικτύου.
* **Οικονομικά και ενεργειακά οφέλη**

Η σωστή διαχείριση του throughput μειώνει το λειτουργικό κόστος των παρόχων δικτύου, επιτρέποντας καλύτερο σχεδιασμό επενδύσεων σε υποδομές. Επιπλέον, συμβάλλει στην ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς η δυναμική προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης και η βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, τόσο στις ίδιες τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές όσο και στις συσκευές των χρηστών.

Συμπερασματικά, η πρόβλεψη του downlink bitrate στα δίκτυα 5G δεν αποτελεί απλά μια τεχνική βελτιστοποίησης αλλά έναν θεμελιώδη παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία των δικτύων επόμενης γενιάς. Συμβάλλει στη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, τη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα υποστηρίζει τις απαιτήσεις προηγμένων τεχνολογιών, όπως το network slicing, το edge computing και η μαζική διασύνδεση IoT συσκευών. Μέσω έξυπνων αλγορίθμων και τεχνικών ανάλυσης δεδομένων, τα σύγχρονα δίκτυα μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στις απαιτήσεις των χρηστών, διασφαλίζοντας μια γρήγορη, αξιόπιστη και αποδοτική σύνδεση.

**2 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ**

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

* **pandas:** χρησιμοποιεί DataFrames για την ανάλυση και διαχείριση δεδομένων.
* **numpy:** χρησιμοποιείται για επιστημονικούς υπολογισμούς.
* **os:** χρησιμοποιείται για την διαχείριση αρχείων.
* **matplotlib:** χρησιμοποιείται για την δημιουργία γραφημάτων (συνάρτηση **pyplot**).
* **statsmodels:** παρέχει εργαλεία για στατιστική ανάλυση χρονοσειρών. Η συνάρτηση **seasonal\_decompose** χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση της χρονοσειράς σε trend, seasonality και residual. Επίσης, χρησιμοποιείται η συνάρτηση **plot\_acf**, η οποία δημιουργεί ένα γράφημα που απεικονίζει την αυτοσυσχέτιση της χρονοσειράς για διάφορες τιμές lag.
* **seaborn:** χρησιμοποιείται για την δημιουργία στατιστικών γραφημάτων όπως heatmaps, boxplots.
* **scipy.stats:** περιλαμβάνει πολλές στατιστικές συναρτήσεις: υπολογισμό p-values, κατανομές (π.χ., normal distribution), στατιστικά τεστ (t-test, chi-square test κτλ.).
* **math**: χρησιμοποιείται για μαθηματικές πράξεις.
* **sklearn**: χρησιμοποιείται:
* **pca** για την μείωση διαστατικότητας στα δεδομέναχρησιμοποιείται
* **oneHotEncoder** για την μετατροπή κατηγορικών μεταβλητών σε αριθμητικά διανύσματα.
* **MinMaxScaler** για την κανονικοποίηση δεδομένων
* **train\_test\_split** για τη διαχωρισμό σε σύνολα εκπαίδευσης και δοκιμής,
* συναρτήσεις **mean\_squared\_error**, **mean\_absolute\_error** για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων.
* **xgboost**: χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης με gradient boosting trees.
* **itertools**: χρησιμοποιείται η συνάρτηση **product** για την παραγωγή όλων των δυνατών συνδυασμών παραμέτρων κατά την αναζήτηση υπερπαραμέτρων (**grid search**).
* **shap**: χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των προβλέψεων των μοντέλων μέσω της ανάλυσης της σημασίας των χαρακτηριστικών (feature importance) με βάση τις τιμές SHAP (SHapley Additive exPlanations).

1. **Προεπεξεργασία**

Το dataset περιέχει διαφορετικούς φακέλους με ονόματα train, pedestrian, static, car, bus τα οποία αποτελούν το σενάριο κίνησης. Κάθε φάκελος αποτελείται από διαφορετικό πλήθος csv αρχείων. Αρχικά, από κάθε CSV αρχείο εξαλείφθηκαν διπλότυπες εγγραφές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο **drop\_duplicates()**, ώστε να παραμείνουν μοναδικές εγγραφές σε όλα τα πεδία. Επίσης, με την μέθοδο **drop()** αφαιρέθηκαν στήλες όπως **Longitude**, **Latitude**, **ServingCell\_Lon**, **ServingCell\_Lat,** καθώς σχετίζονται με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της κινητής συσκευής και του σταθμού βάσης και δεν περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την πρόβλεψη του downlink bitrate. Άλλωστε η ίδια πληροφορία αποτυπώνεται και στη στήλη **ServingCell\_Distance** που μετράει την απόσταση ανάμεσά τους. Επιπλέον, στις αριθμητικές στήλες οι κενές σειρές που σημειώνονται με "-" αντικαταστάθηκαν με NaN χρησιμοποιώντας την **replace()** και οι στήλες μετατράπηκαν σε αριθμητικό τύπο με την **to\_numeric()**.

Στην συνέχεια, όλα τα επιμέρους DataFrames από τους φακέλους συνενώθηκαν με τη μέθοδο **pd.concat()** σε ένα ενιαίο DataFrame (**combined\_data**). Προκειμένου να διατηρηθεί η πληροφορία που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες καταγραφής, δεδομένου ότι το όνομα κάθε φακέλου υποδηλώνει το είδος της κίνησης δημιουργήθηκε μια νέα στήλη με την ονομασία **scenario**. Έπειτα, για την πραγματοποιήθηκε καθαρισμός της στήλης **Timestamp** με αντικατάσταση του χαρακτήρα “\_” με το κενό. Επιπλόν, η στήλη μετατράπηκε σε τύπο **datetime** χρησιμοποιώντας τη μέθοδο **pd.to\_datetime()** Τέλος, το συνολικό DataFrame ταξινομήθηκε σε αύξουσα χρονολογική σειρά βάσει της στήλης **Timestamp** χρησιμοποιώντας τη μέθοδο **sort\_values()**.

Πραγματοποιήθηκε απεικόνιση της χρονοσειράς του **DL\_bitrate** σε συνάρτηση με το **Timestamp**, αντιμετωπίζοντας το timestamp ως κατηγορική μεταβλητή, δεδομένου ότι οι χρονικές στιγμές δεν είναι συνεχόμενες και τα διαστήματα μεταξύ τους μπορεί να διαφέρουν.

Εικόνα που περιέχει στιγμιότυπο οθόνης, γράφημα, γραμμή, διάγραμμα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Παρατηρείται ότι το **DL\_bitrate** εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου από τα τέλη του 2017 έως τις αρχές του 2018. Στις αρχικές ημερομηνίες οι τιμές του **DL\_bitrate** είναι σχετικά χαμηλές και εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά. Με την πάροδο του χρόνου το **DL\_bitrate** αυξάνεται σταδιακά, με πολύ υψηλές τιμές στα τέλη Δεκεμβρίου. Στις αρχές του 2018 διακρίνεται μια σχετική πτώση και σταθεροποίηση των τιμών. Το γεγονός ότι υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις δείχνει ότι το δίκτυο παρουσίαζε περιόδους αιχμής όπου το downlink bitrate αυξανόταν απότομα, πιθανώς λόγω μεταβολών στις συνθήκες κίνησης, στη χρήση δεδομένων ή στις παραμέτρους του δικτύου.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε εποχιακή αποσύνθεση της χρονοσειράς του **DL\_bitrate** με τη μέθοδο **seasonal\_decompose()**. Ορίστηκε περίοδος 3600 δευτερολέπτων, ώστε να ανιχνευθούν επαναλαμβανόμενα μοτίβα σε ωριαία βάση. Μέσω της αποσύνθεσης, η χρονοσειρά χωρίστηκε σε:

* **Trend (τάση):** η μακροπρόθεσμη κατεύθυνση του DL\_bitrate,
* **Seasonality (εποχικότητα):** περιοδικά μοτίβα που επαναλαμβάνονται σε βάθος ώρας,
* **Residual (υπόλοιπο):** τυχαίες διακυμάνσεις ή θόρυβος.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, γραμματοσειρά, γραμμή

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η εποχιακή αποσύνθεση της χρονοσειράς του **DL\_bitrate**

* Στο **Trend**, φαίνεται η μακροπρόθεσμη τάση του σήματος. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια ανοδική τάση μέχρι περίπου το μέσο της περιόδου και έπειτα μικρές διακυμάνσεις με περιοδικές αυξομειώσεις.
* Το **Seasonality**, απεικονίζει ένα καθαρό περιοδικό μοτίβο, σχεδόν συμμετρικό, με υψηλές και χαμηλές τιμές που επαναλαμβάνονται σε σταθερό χρονικό διάστημα. Αυτό υποδεικνύει ισχυρή εποχικότητα στη χρήση ή στη συμπεριφορά του δικτύου, πιθανότατα λόγω κυκλικών ημερησίων μοτίβων (π.χ., ώρες αιχμής/ηρεμίας).
* Τα **Residuals**, έχουν μεγάλη διασπορά και υψηλή μεταβλητότητα ανα περιόδους, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχουν απρόβλεπτες, τυχαίες μεταβολές που επηρεάζουν το DL bitrate.

Συνολικά, η αποσύνθεση αποκαλύπτει ότι το σήμα του **DL\_bitrate** έχει και σαφή **τάση** και ισχυρή **εποχικότητα**, αλλά επηρεάζεται και από σημαντικό **τυχαίο θόρυβο**.

Προκειμένου να εντοπιστούν τα χαρακτηριστικά (**features**) που συμβάλλουν περισσότερο στην πρόβλεψη του **DL\_bitrate**, πραγματοποιήθηκε ανάλυση συσχέτισης μεταξύ των εισόδων και της μεταβλητής στόχου. Oι μη αριθμητικές στήλες (**Timestamp**, **State**, **NetworkMode**, **Operatorname**, **scenario**, **CellID**) αφαιρέθηκαν και υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των αριθμητικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας τη μετρική **Kendall Tau**. Η επιλογή της Kendall Tau έγινε λόγω της ικανότητάς της να καταγράφει σωστά μη γραμμικές μονοτονικές σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές. Για τα κατηγορικά χαρακτηριστικά (**State**, **NetworkMode**, **Operatorname**, **scenario**, **CellID**) εφαρμόστηκε **target encoding**, όπου σε κάθε εγγραφή ανατέθηκε ο μέσος όρος του DL\_bitrate για την αντίστοιχη κατηγορία. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της **pearson correlation** μεταξύ των κατηγορικών χαρακτηριστικών και του DL\_bitrate.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, διάγραμμα, ορθογώνιο παραλληλόγραμμο

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, στιγμιότυπο οθόνης, γράφημα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Παρατηρείται ότι το **DL\_bitrate** παρουσιάζει ισχυρή θετική συσχέτιση με το **UL\_bitrate**, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι συνθήκες που ευνοούν τη μετάδοση δεδομένων προς το δίκτυο επηρεάζουν αντίστοιχα και τη λήψη δεδομένων. Επίσης, οι μεταβλητές **CQI** και **SNR**, που εκφράζουν την ποιότητα του καναλιού, σχετίζονται θετικά με το DL\_bitrate. Αντίθετα, η **ταχύτητα κίνησης** παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση, επιβεβαιώνοντας ότι η αυξημένη κινητικότητα επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του δικτύου. Όσον αφορά τις κατηγορικές μεταβλητές, το **CellID** αναδείχθηκε ως το χαρακτηριστικό με τη μεγαλύτερη επιρροή, γεγονός που φανερώνει ότι η γεωγραφική θέση και τα χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διακύμανση του DL\_bitrate. Επιπλέον, το **NetworkMode** και ο **Operatorname** φαίνεται να επηρεάζουν επίσης ουσιαστικά την ποιότητα της σύνδεσης.

**Διαχείριση αριθμητικών χαρακτηριστικών**

Δεδομένου ότι ορισμένα αριθμητικά χαρακτηριστικά του dataset περιείχαν ελλιπείς τιμές **Null**, εφαρμόστηκε η μέθοδος **interpolate()** για τη συμπλήρωση αυτών των κενών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή (**linear interpolation**), η οποία εκτιμά τις ελλιπείς τιμές υπολογίζοντας ενδιάμεσες τιμές με βάση τα γειτονικά υπάρχοντα δεδομένα της ίδιας στήλης. Με την επιλογή **limit\_direction='both'**, η μέθοδος επιτρέπει την παρεμβολή τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω μέσα στη χρονοσειρά, διασφαλίζοντας ότι οι ελλείπεις τιμές μπορούν να αντικατασταθούν ανεξάρτητα από τη θέση τους.

Για την κατανόηση της στατιστικής κατανομής των αριθμητικών χαρακτηριστικών, δημιουργήθηκαν **Q-Q Plots** (Quantile-Quantile Plots). Τα Q-Q plots συγκρίνουν την κατανομή των παρατηρούμενων δεδομένων κάθε χαρακτηριστικού με την ιδανική κανονική κατανομή (Gaussian distribution).

Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, γραμμή, γράφημα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Στα γραφήματα, αν τα σημεία ακολουθούν κατά μήκος της διαγωνίου γραμμής, τότε το χαρακτηριστικό προσεγγίζει την κανονική κατανομή. Αντίθετα, σημαντικές αποκλίσεις από τη γραμμή υποδεικνύουν την ύπαρξη ασυμμετρίας (skewness). Εφόσον τα περισσότερα features δεν ακολουθούν κανονική κατανομήεπιλέχθηκε τα outliers να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας την **IQR Method**.

Πιο συγκεκριμένα, για την ανίχνευση και τον χειρισμό ακραίων τιμών (**outliers**) στα αριθμητικά χαρακτηριστικά, δημιουργήθηκαν αρχικά **Density Plots** και **Boxplots**, ώστε να οπτικοποιηθεί η αρχική κατανομή των δεδομένων. Ο εντοπισμός των outliers βασίστηκε στον κανόνα του **Interquartile Range (IQR)**, όπου ορίστηκαν τα κάτω και άνω όρια των **whiskers** στα **boxplots** ως:

* **low = Q1 – 1.5 × IQR**
* **high = Q3 + 1.5 × IQR**

Οποιαδήποτε τιμή εκτός αυτών των ορίων θεωρήθηκε ακραία. Για τη διόρθωση των outliers εφαρμόστηκε **capping**, όπου οι τιμές κάτω από το κατώτερο όριο αντικαταστάθηκαν με το κατώτερο όριο και οι τιμές πάνω από το ανώτερο όριο αντικαταστάθηκαν με το ανώτερο όριο. Μετά το capping, αναπαραστάθηκαν εκ νέου τα Density Plots και τα Boxplots για κάθε χαρακτηριστικό, ώστε να επιβεβαιωθεί η μείωση των ακραίων τιμών.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, γραμματοσειρά, λευκό, απόδειξη

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, γράφημα, στιγμιότυπο οθόνης

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Παρατίθενται ενδεικτικά δύο παραδείγματα των χαρακτηριστικών speed, RSPR.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, γράφημα, στιγμιότυπο οθόνης

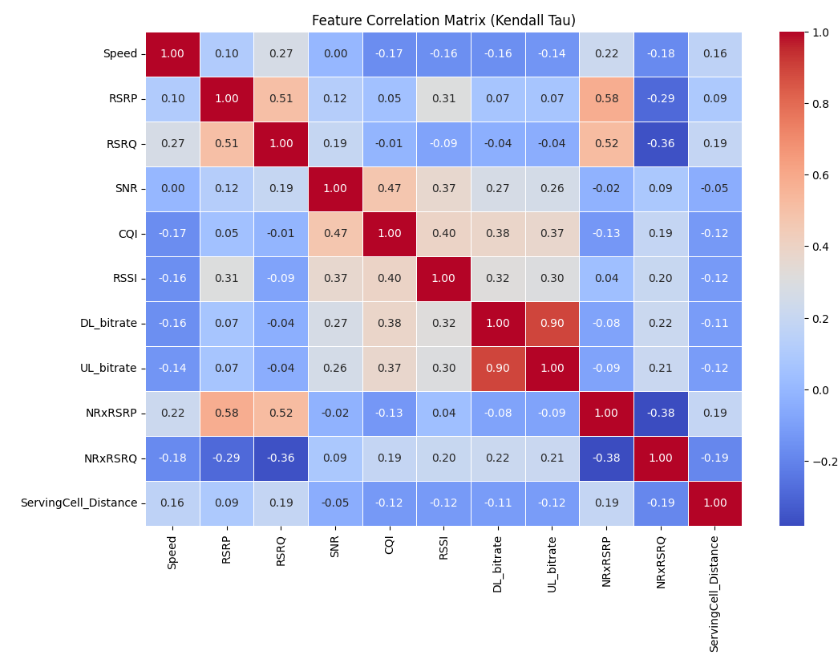
Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, στιγμιότυπο οθόνης, ορθογώνιο παραλληλόγραμμο

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Εικόνα που περιέχει κείμενο, διάγραμμα, στιγμιότυπο οθόνης, ορθογώνιο παραλληλόγραμμο

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.Εικόνα που περιέχει κείμενο, γραμματοσειρά, λευκό, απόδειξη

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Για την ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των αριθμητικών χαρακτηριστικών του dataset, υπολογίστηκε το correlation matrix με την μέθοδο **corr()** χρησιμοποιώντας τη μετρική **Kendall Tau**. Κατόπιν, η μήτρα συσχέτισης απεικονίστηκε μέσω **heatmap**.



Παρατηρείται ότι το **DL\_bitrate** έχει ισχυρή θετική συσχέτιση με το **UL\_bitrate** (0.90), γεγονός αναμενόμενο, καθώς οι συνθήκες του δικτύου που ευνοούν την άνοδο του downlink bitrate ευνοούν αντίστοιχα και το uplink bitrate. Επιπλέον, το **CQI** και το **SNR**, που αφορούν την ποιότητα του καναλιού, εμφανίζουν επίσης θετική συσχέτιση με το **DL\_bitrate** (~0.38 και ~0.27 αντίστοιχα), επιβεβαιώνοντας ότι καλύτερες συνθήκες επικοινωνίας οδηγούν σε υψηλότερες ταχύτητες. Αντίθετα, χαρακτηριστικά όπως η **Speed** και το **NRxRSRQ** δείχνουν ελαφρώς αρνητικές συσχετίσεις με το DL\_bitrate, υποδηλώνοντας ότι η κίνηση και οι χαμηλές ποιοτικές ενδείξεις δικτύου επηρεάζουν αρνητικά τη λήψη δεδομένων. Τέλος, τα χαρακτηριστικά ισχύος σήματος (**RSRP**, **RSRQ**, **NRxRSRP**, **NRxRSRQ**) έχουν μεταξύ τους μέτριες συσχετίσεις.

**Διαχείριση κατηγορικών χαρακτηριστικών**

Για τη μείωση της διάστασης και της πολυπλοκότητας του dataset όλες οι κατηγορικές μεταβλητές συνδυάστηκαν σε μία νέα μεταβλητή. Αρχικά, , οι μεταβλητές **State**, **NetworkMode**, **Operatorname**, **CellID** και **scenario** κωδικοποιήθηκαν με την μέθοδο **OneHotEncoder(),** όπου κάθε κατηγορία μετατράπηκε σε ξεχωριστό δυαδικό χαρακτηριστικό. Δεδομένου ότι η One-Hot κωδικοποίηση αυξάνει σημαντικά το πλήθος των χαρακτηριστικών, εφαρμόστηκε **Principal Component Analysis (PCA)** με στόχο τη μείωση των διαστάσεων και διατηρηθηκε μόνο η πρώτη κύρια συνιστώσα, η οποία εξηγεί τη μέγιστη διακύμανση των κωδικοποιημένων δεδομένων. Τέλος, οι αρχικές κατηγορικές μεταβλητές αντικαταστάθηκαν με τη νέα στήλη "**Categorical\_Impact**", η οποία περιέχει όλη τη σημαντική πληροφορία συμπυκνωμένη.

Η τελική μορφή του dataset είναι:

**Bitrate-Related Features**

**Signal Quality Metrics**

**Categorical Features**

**Signal Quality Metrics**

**Timestamp**

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, γραμματοσειρά, αριθμός

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

**Target**

**3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ XGBOOST REGRESSOR**

Αρχικά, για την κατανόηση της χρονικής εξάρτησης των χαρακτηριστικών, σχεδιάστηκαν τα **Autocorrelation Functions (ACF)** για όλα τα αριθμητικά features του dataset. Το ACF κάθε χαρακτηριστικού υπολογίστηκε και απεικονίστηκε για έως και 1000 **lags**, επιτρέποντας την ανάλυση της συστηματικής συσχέτισης κάθε χαρακτηριστικού με παλαιότερες χρονικές του τιμές.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, διάγραμμα, παράλληλα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Από τα διαγράμματα ACF παρατηρείται ότι όλες οι μεταβλητές εμφανίζουν σημαντική αυτοσυσχέτιση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, φτάνοντας έως και περίπου 800 δευτερόλεπτα στο παρελθόν. Αυτό υποδηλώνει ότι η ιστορική πληροφορία των μεταβλητών έχει ουσιαστική συνεισφορά και μπορεί να βελτιώσει την πρόβλεψη του **DL\_bitrate**. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως το **Speed**, το **ServingCell\_Distance** και το **Categorical\_Impact** παρουσιάζουν βραδεία φθορά στη συσχέτιση, γεγονός που ευνοεί τη χρήση μεγαλύτερων χρονικών παραθύρων (time windows) κατά τη δημιουργία χαρακτηριστικών. Με βάση αυτή την παρατήρηση, επιλέχθηκαν να δειγματοληπτηθούν τιμές lags ανά 1 λεπτό (κάθε 60 δευτερόλεπτα), καθώς η πληροφορία δεν αλλάζει ουσιαστικά σε μικρότερα χρονικά βήματα.

Για να εντοπιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός υπερπαραμέτρων για το **XGBoost Regressor**, δημιουργούνται lags με χρονικό βήμα 60 δευτερολέπτων και δοκιμάζονται διαφορετικά πλήθη (5, 10, 20, 30), ώστε να ληφθεί υπόψη η χρονική εξάρτηση των μεταβλητών. Τα δεδομένα κανονικοποιούνται με χρήση **MinMaxScaler** και χωρίζονται σε σύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής, χωρίς ανάμειξη χρονικών στιγμών (**shuffle=False**), για διατήρηση της χρονικής σειράς. Στη συνέχεια πραγματοποιείται **grid search** σε διάφορους συνδυασμούς υπερπαραμέτρων (**n\_estimators**, **max\_depth**, **learning\_rate**) για την εκπαίδευση του μοντέλου και αξιολογείται η επίδοση σε σύνολο επικύρωσης με την χρήση **Mean Absolute Error (MAE)**. Τέλος, καταγράφεται και εμφανίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων και αριθμού lags που οδηγεί στο χαμηλότερο σφάλμα πρόβλεψης.

--- Best Configuration Based on Validation MAE ---

Num Lags : 30.0

n\_estimators : 200.0

max\_depth : 3

learning\_rate : 0.05

Validation MAE: 876.59

Ύστερα, για την δημιουργία **XGBoost Regressor**, δημιουργούνται **lagged features** με βάση τον βέλτιστο αριθμό lag (**30 lags** ανά 60 δευτερόλεπτα), ώστε να ενσωματωθεί η χρονική εξάρτηση των μεταβλητών στο πρόβλημα πρόβλεψης. Έπειτα, εξάγονται **χρονικά χαρακτηριστικά** από τη στήλη **Timestamp** (η ώρα της ημέρας, η ημέρα της εβδομάδας και ένας δυαδικός δείκτης για το αν η καταγραφή έγινε Σαββατοκύριακο (**Is\_weekend**)). Επιπλέον, υπολογίζονται **rolling means** για επιλεγμένες μεταβλητές (**RSRP, RSRQ, SNR, RSSI, Speed, DL\_bitrate, UL\_bitrate**) σε χρονικά παράθυρα **10 και 30 λεπτών**, με σκοπό να αποτυπωθούν τοπικές τάσεις και ομαλές μεταβολές. Τέλος, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός **log1p** στις μεταβλητές **DL\_bitrate** και **UL\_bitrate** για τη μείωση της ασυμμετρίας και τη σύγκλιση των κλιμάκων τους με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Τα χαρακτηριστικά διαχωρίζονται στο **X** το οποίο περιλαμβάνει όλα τα πεδία εκτός από το **Timestamp** και το **DL\_bitrate**, και στον στόχο **y** που αντιστοιχεί στη μεταβλητή-στόχο **DL\_bitrate**. Εφαρμόζεται κανονικοποίηση με **MinMaxScaler**, τόσο στα χαρακτηριστικά εσόδου όσο και στην έξοδο, ώστε οι τιμές τους να ανήκουν στο διάστημα **[0,1]** και να διασφαλιστεί ότι τα μοντέλα δεν θα επηρεαστούν από διαφορετικές κλίμακες των χαρακτηριστικών και θα συγκλίνουν πιο γρήγορα κατά την εκπαίδευση. Επίσης, τα δεδομένα χωρίζονται με την μέθοδο **train\_test\_split()** σε σύνολα εκπαίδευσης (70%), επικύρωσης (15%) και δοκιμής (15%), χωρίς ανάμειξη χρονικών στιγμών (**shuffle=False**) ώστε να διατηρείται η χρονική σειρά. Ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας την υλοποίηση του **XGBoost μέσω DMatrix**, με προκαθορισμένες υπερπαραμέτρους **(max\_depth=3,** **learning\_rate=0.05, n\_estimators=200**) και χρησιμοποιείται **early stopping** για να αποτραπεί το overfitting. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης αποθηκεύονται και απεικονίζονται οι μετρικές **RMSE** και **MAE** μέσω των **learning curves.** Μετά την εκπαίδευση, το μοντέλο πραγματοποιεί προβλέψεις στα σύνολα training, validation, test. Οι προβλεπόμενες και οι πραγματικές τιμές επαναμετασχηματίζονται στην αρχική τους κλίμακα μέσω **inverse transform και expm1**, ώστε να αντιστραφεί ο προηγούμενος λογαριθμικός μετασχηματισμός (log1p). Τέλος, οι προβλέψεις συγκεντρώνονται σε νέο DataFrame και υπολογίζονται τα τελικά **σφάλματα RMSE και MAE** για καθένα από τα τρία σύνολα.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, διάγραμμα, γράφημα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, διάγραμμα, γράφημα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Από τα learning curves παρατηρείται ότι το σφάλμα μειώνεται απότομα κατά τις πρώτες 20 εποχές εκπαίδευσης και στη συνέχεια σταθεροποιείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, κοντά στο μηδέν. Το γεγονός ότι οι καμπύλες του **training** και του **validation error** σχεδόν ταυτίζονται υποδηλώνει ότι **δεν εμφανίζεται overfitting** και ότι το μοντέλο **γενικεύει αποτελεσματικά**. Επιπλέον, το **test error** διατηρείται επίσης πολύ κοντά στο validation error, παρουσιάζοντας μόνο ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές, κάτι που είναι αναμενόμενο και αποδεκτό. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί σωστά και έχει ισχυρή γενίκευση σε άγνωστα δεδομένα.

Train RMSE: 1919.05

Train MAE : 1037.29

----------------------------------------

Validation RMSE: 3793.78

Validation MAE : 2324.01

----------------------------------------

Test RMSE: 2735.95

Test MAE : 1542.21

Εικόνα που περιέχει στιγμιότυπο οθόνης, γράφημα, γραμμή

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Σχολιασμος αποτελεσματων

**4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ XAI**

Εφαρμόστηκε SHAP για την ερμηνεία του XGBoost μοντέλου, προσφέροντας λεπτομερή ανάλυση του πώς κάθε χαρακτηριστικό συμβάλλει στην τελική πρόβλεψη. Αρχικά, το **X\_test** μετατρέπεται σε DataFrame ώστε να διατηρηθούν τα ονόματα των χαρακτηριστικών, και στη συνέχεια δημιουργείται ένας **SHAP Explainer**, ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο το εκπαιδευμένο μοντέλο (**bst**) και το **test set**. Ο Explainer υπολογίζει τα **SHAP values**, δηλαδή τις επιμέρους συνεισφορές κάθε χαρακτηριστικού στην έξοδο του μοντέλου για κάθε δείγμα. Τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το waterfall plot, το bar plot και το beeswarm plot.

Το **Waterfall Plot** παρουσιάζει αναλυτικά τη συμβολή κάθε χαρακτηριστικού σε μία συγκεκριμένη πρόβλεψη του μοντέλου, ξεκινώντας από τη **μέση προβλεπόμενη τιμή** του XGBoost (**E[f(x)]**, baseline) και την αυξάνεις ή την μειώνει να καταλήξει στο τελικό output. Οι **κόκκινες μπάρες** αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικά που αύξησαν την τιμή της πρόβλεψης, ενώ οι **μπλε** σε αυτά που τη μείωσαν. Από την ανάλυση, φαίνεται πως το μοντέλο στηρίζεται κυρίως στην **τρέχουσα τιμή του UL\_bitrate**, γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς συχνά υπάρχει συσχέτιση μεταξύ uplink και downlink λόγω συνθηκών του καναλιού ή της απόστασης από τη βάση. Το **rolling mean του DL\_bitrate (τελευταίων 10 λεπτών)** εμφανίζει μέτρια επίδραση, υποδηλώνοντας ότι το ιστορικό του DL\_bitrate είναι χρήσιμο για την πρόβλεψη της τρέχουσας τιμής. Άλλα χαρακτηριστικά, όπως το **Categorical\_Impact** και το **UL\_bitrate\_roll\_mean\_30**, είχαν μικρότερη (θετική ή αρνητική) επίδραση. Αν και συνολικά υπήρχαν **379 πρόσθετα χαρακτηριστικά**, η συλλογική τους επίδραση ήταν αμελητέα σε αυτή την πρόβλεψη.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, αριθμός, γραμματοσειρά

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Το **Bar Plot** δείχνει ποια χαρακτηριστικά είχαν τη μεγαλύτερη συνολική επίδραση στις προβλέψεις του μοντέλου. Συγκεκριμένα, η **μέση απόλυτη τιμή SHAP (mean |SHAP value|)** υπολογίζεται για κάθε feature και αποτυπώνει το μέγεθος της επιρροής του χαρακτηριστικού ανεξαρτήτως κατεύθυνσης (θετική ή αρνητική). Το χαρακτηριστικό **UL\_bitrate** αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο, με μέση SHAP τιμή περίπου **+0.15**, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε αυτό για την πρόβλεψη του **DL\_bitrate**. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το υψηλό bitrate στο uplink συχνά συνοδεύεται από καλές συνθήκες σύνδεσης. Ακολουθεί το **rolling mean του DL\_bitrate** (τελευταίων 10 λεπτών), το οποίο δείχνει την ύπαρξη αυτοσυσχέτισης στο σήμα — δηλαδή ότι η πρόσφατη ιστορία του DL\_bitrate αποτελεί ισχυρό δείκτη για την τρέχουσα τιμή. Αντίθετα, η πλειοψηφία των lagged, rolling και χρονικών χαρακτηριστικών φαίνεται να έχει χαμηλή σημασία, ενδεχομένως λόγω πλεονασμού πληροφορίας ή κάλυψής τους από θόρυβο. Συνολικά, τα **υπόλοιπα 379 χαρακτηριστικά** συνεισφέρουν ελάχιστα (συνολική SHAP επίδραση ~+0.01), γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο εστιάζει κυρίως σε λίγες κύριες μεταβλητές.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, γραμματοσειρά, αριθμός

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Το **Beeswarm Plot** παρουσιάζει τη διανομή των **SHAP values** για κάθε χαρακτηριστικό σε όλες τις παρατηρήσεις του dataset, απεικονίζοντας πώς οι διαφορετικές τιμές κάθε μεταβλητής επηρεάζουν τις προβλέψεις του μοντέλου. Στον άξονα Χ αποτυπώνεται το μέγεθος και η κατεύθυνση της επίδρασης κάθε χαρακτηριστικού: θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το χαρακτηριστικό αύξησε την πρόβλεψη του **DL\_bitrate**, ενώ αρνητικές τιμές δείχνουν μείωση. Παράλληλα, η **χρωματική κωδικοποίηση** (κόκκινο = υψηλή τιμή, μπλε = χαμηλή τιμή) δείχνει πώς οι διαφορετικές τιμές του χαρακτηριστικού συσχετίζονται με την πρόβλεψη. Από το γράφημα προκύπτει ότι το μοντέλο στηρίζεται κυρίως στο **UL\_bitrate** και στους **rolling μέσους όρους** του DL και του UL, καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά εμφανίζουν τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα και επιρροή στις προβλέψεις. Οι **rolling means** φαίνεται να παρέχουν σταθεροποιητική πληροφορία για την τάση του σήματος, ενώ τα υπόλοιπα 379 χαρακτηριστικά έχουν σχεδόν μηδενική συμβολή, γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο τελικά βασίζεται σε **πολύ λίγες, ουσιαστικές μεταβλητές**.

Εικόνα που περιέχει κείμενο, στιγμιότυπο οθόνης, γραμμή, γράφημα

Το περιεχόμενο που δημιουργείται από τεχνολογία AI ενδέχεται να είναι εσφαλμένο.

Αφαιρεση features

**5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ LSTM**

**6 BONUS**

**7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

**Πηγές**

**1 PREPROCESSING**

**[1]** <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/feature-engineering-how-to-detect-and-remove-outliers-with-python-code/#h-iqr-based-filtering>

**[2]** <https://www.geeksforgeeks.org/how-to-handle-categorical-variables-in-regression/>

**2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ XGBOOST REGRESSOR**

**[3]**