

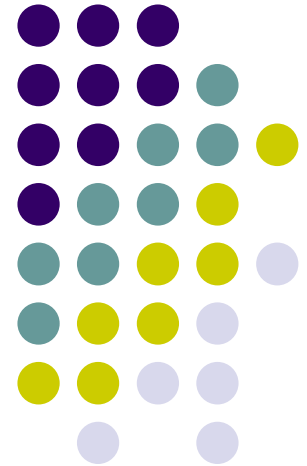


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

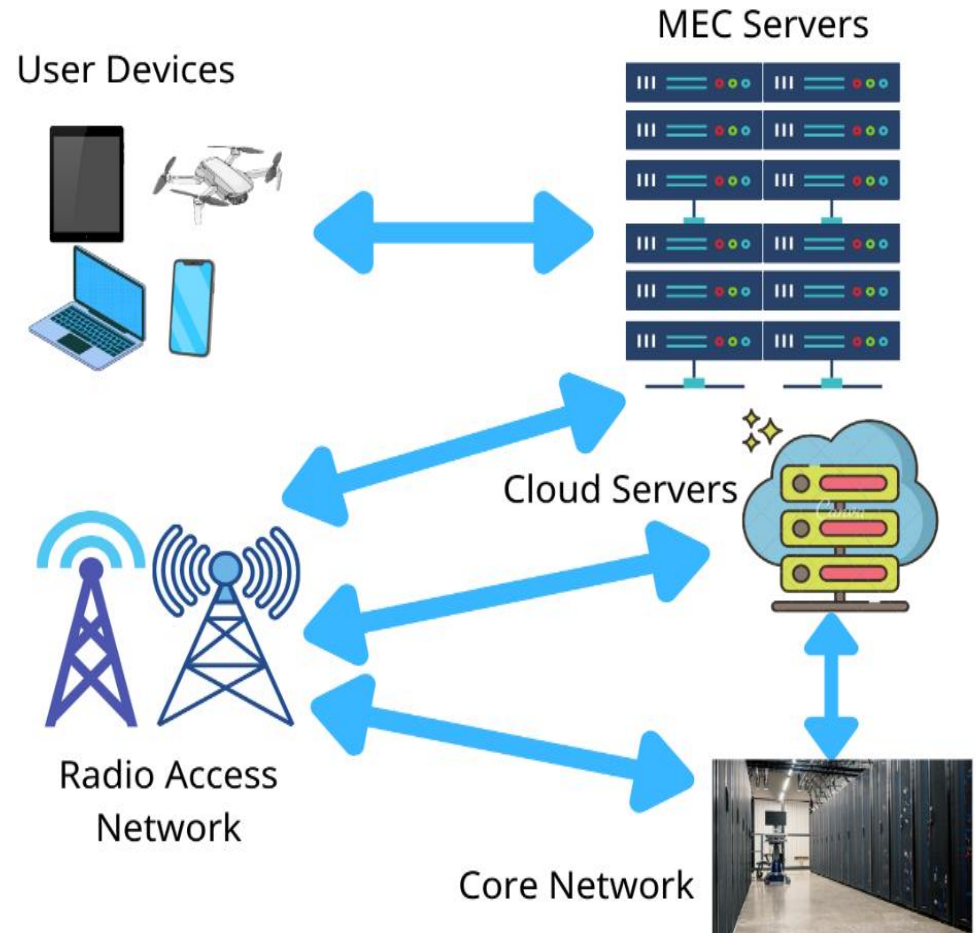
Τεχνολογίες Mobile και Edge Computing (MEC) –
Παραδείγματα και Εφαρμογές σε κυψελωτά δίκτυα

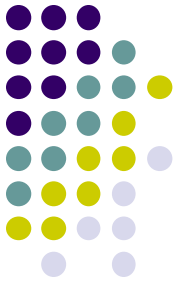




Τι είναι το Mobile Edge Computing;

- Υλοποίηση εφαρμογών, επεξεργασία δεδομένων και μεταφορά υπολογιστικής ισχύος στα άκρα του δικτύου [1]
 - κινητές συσκευές, αισθητήρες, χρήστες υπηρεσιών
 - αποσυμφόρηση δικτύου κορμού
 - μείωση καθυστέρησης, αύξηση ρυθμών μετάδοσης
- Ορισμός από τη Linux Foundation [2]:
“Η παροχή υπολογιστικών δυνατοτήτων στα άκρα ενός δικτύου με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης, του λειτουργικού κόστους και της αξιοπιστίας εφαρμογών και υπηρεσιών. Με τη μείωση της απόστασης μεταξύ των τερματικών συσκευών και των cloud-πόρων που τις εξυπηρετούν, και επίσης μειώνοντας τα άλματα δικτύου, ο υπολογισμός στα άκρα μετριάξει τους περιορισμούς καθυστέρησης και εύρους ζώνης του Διαδικτύου, εισάγοντας νέες κατηγορίες εφαρμογών”.





Mobile Edge Computing - Εισαγωγή

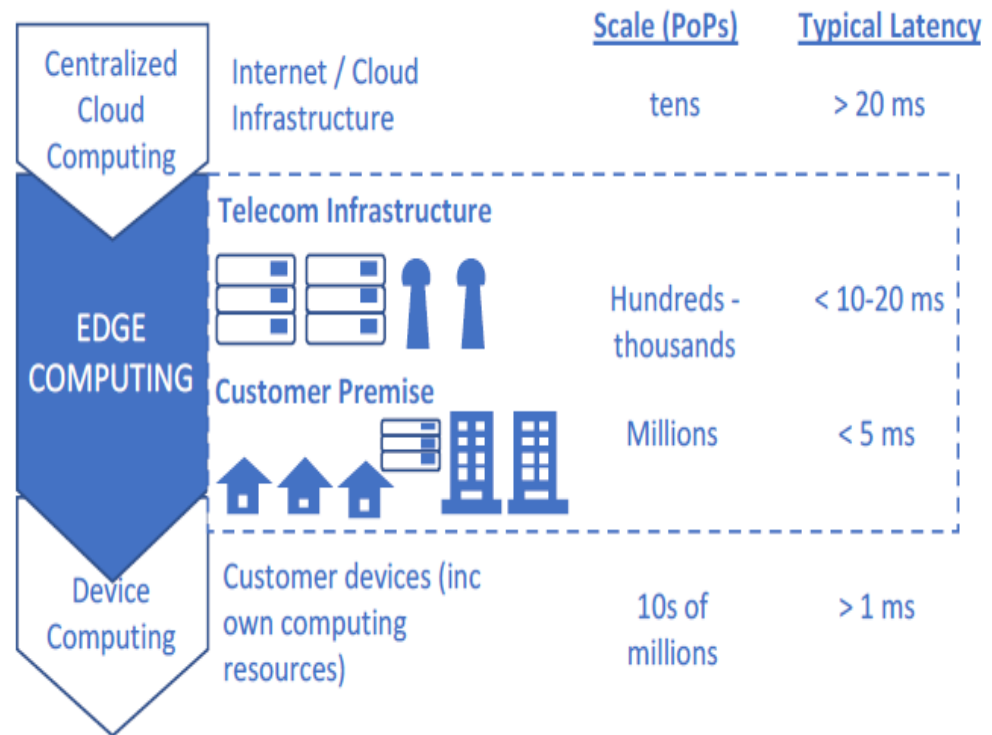
Γιατί στα άκρα;

- εγγύτητα στο χρήστη (1 ή 2 άλματα δικτύου)
- χωροκεντρική προσέγγιση
- υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (1-10 Gbps)
- χαμηλή καθυστέρηση (1 ms)
- υψηλή αξιοπιστία (διαθεσιμότητα της τάξης του 99,9999%)
- ενεργειακά αποδοτικότερα δίκτυα (90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας λόγω αποσυμφόρησης της ζεύξης)
- λιγότερη συμφόρηση δικτύου backhaul

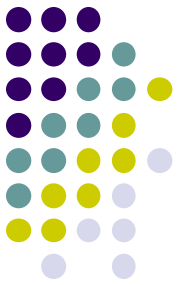
Ποια είναι τα άκρα του δικτύου;

Συσκευές με:

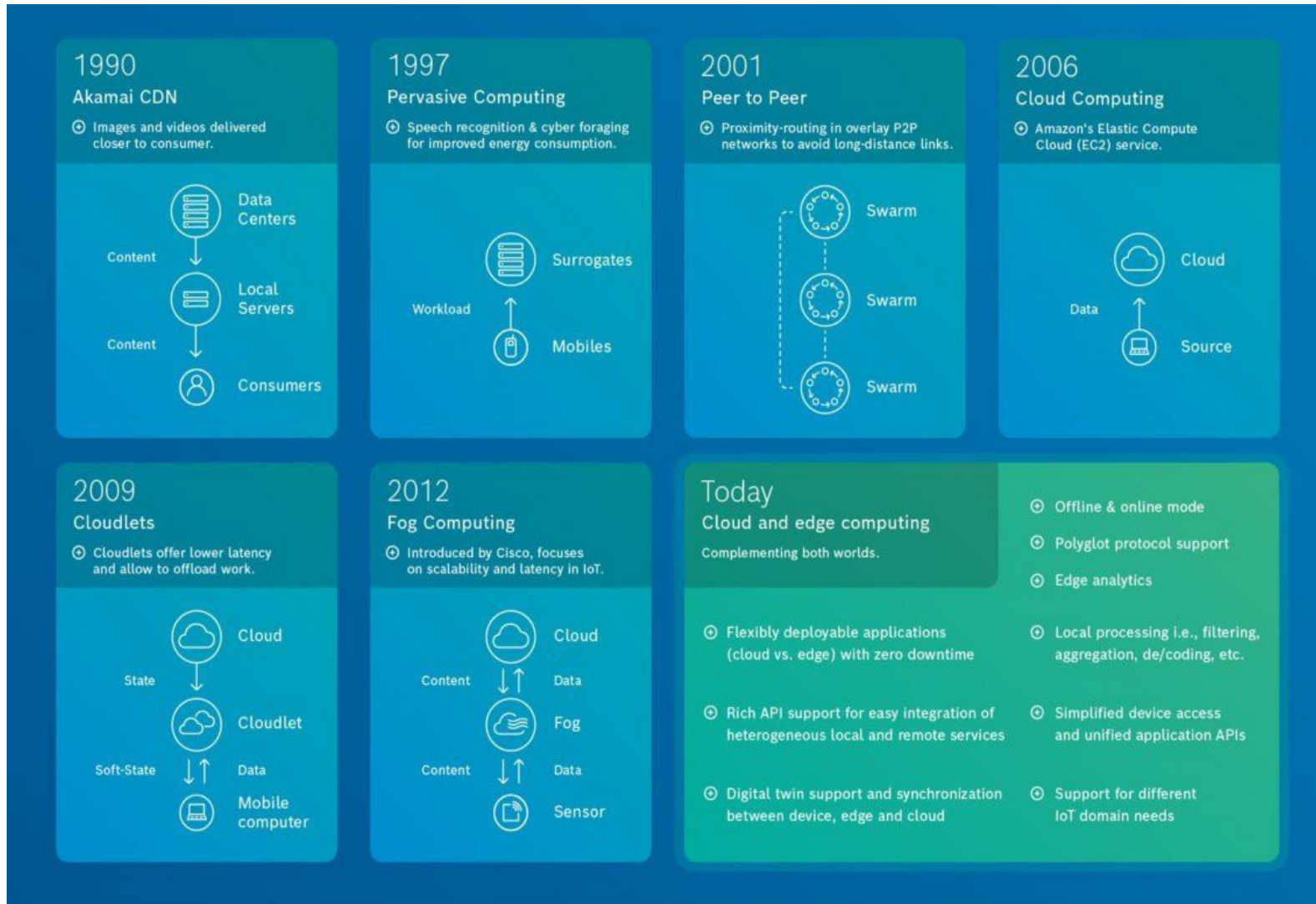
- υπολογιστική ισχύ κοντά στο χρήστη, με δυνατότητα επεξεργασίας και εκτέλεσης υπολογιστικού φορτίου



Cloud/Edge και Device Computing σύμφωνα με το European Telecommunications Standards Institute (ETSI)



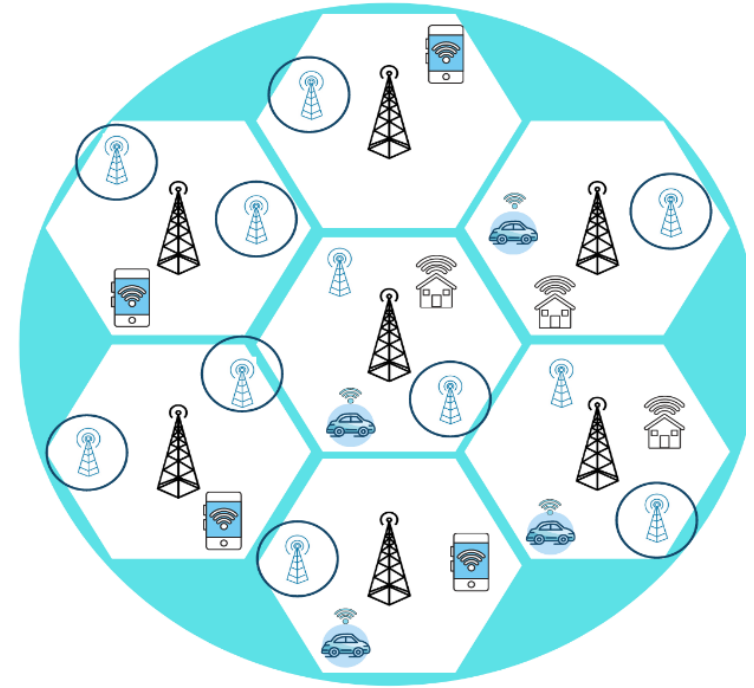
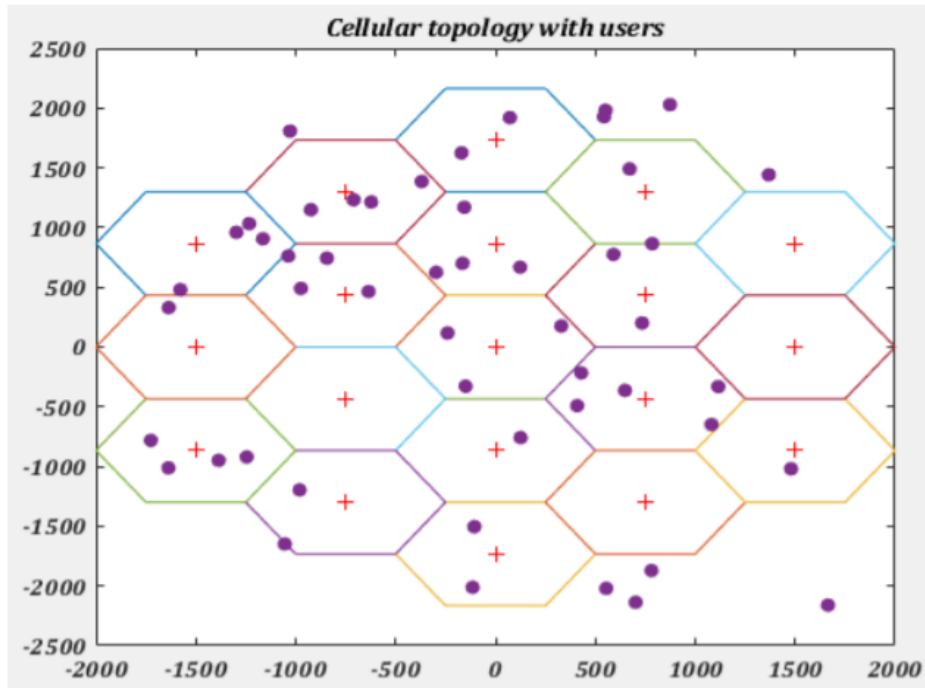
Decentralized Computing Evolution [3]

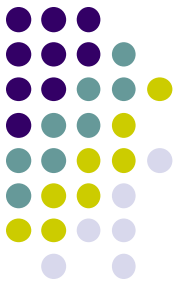




Κυψελωτά Συστήματα – Τοπολογία

- **Κυψέλη (cell):** Η συνολική περιοχή εξυπηρέτησης μελετάται ως μια τοπολογία ομόκεντρων περιφερειών (tiers) κυψελών (συνήθως εξαγωνικών). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των tiers, τόσο αυξάνεται ακτινικά η περιοχή κάλυψης και συνεπώς η χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες.
- **Σταθμός Βάσης (Base Station – BS):** Βασικές μονάδες της αρχιτεκτονικής των ασύρματων δικτύων, καθώς εκτελούν τη διασύνδεση του χρήστη με το δίκτυο κορμού.
- **Τερματικά χρηστών (User Equipment – UEs ή User Terminals - UTs)**





Κυψελωτά Συστήματα – Παρεμβολές

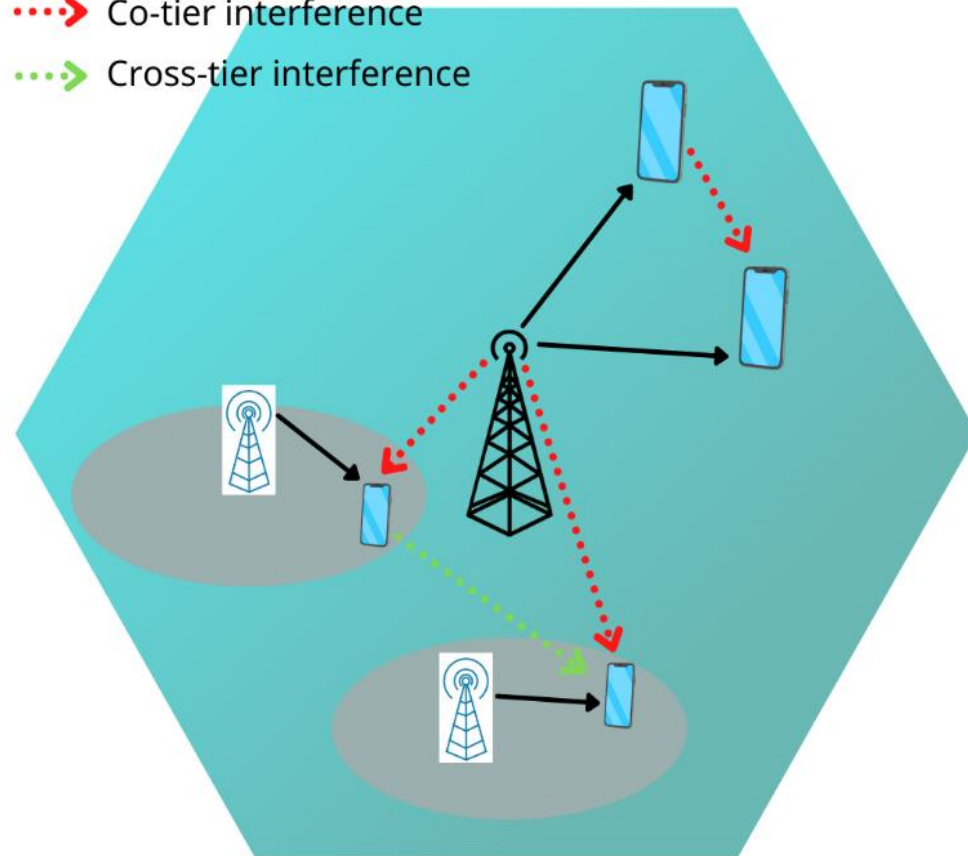
Παρεμβολές: Καθορισμός ποιότητας ζεύξης

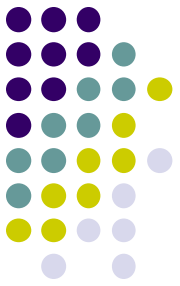
- **Ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference):** Εκπομπή από δύο ή περισσότερους διαφορετικούς ραδιοπομπούς που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι.
- **Παρεμβολή γειτονικών διαύλων (Adjacent-channel interference):** Εκπομπή σήματος σε παρακείμενα κανάλια.
- **Παρεμβολή μεταξύ χρηστών σε διαφορετικές βαθμίδες (Cross-tier interference).**

—→ Useful Signal


.....→ Co-tier interference

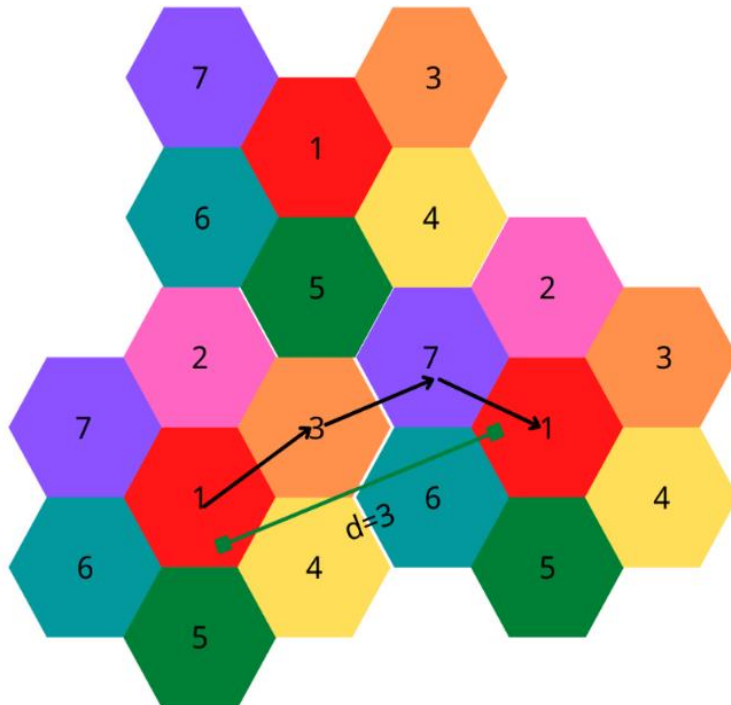
.....→ Cross-tier interference





Κυψελωτά Συστήματα – Αντιμετώπιση Παρεμβολών

- Επαναχρησιμοποίηση Συχνότητας:
 - αντιμετώπιση των ενδοκαναλικών παρεμβολών
 - απόσταση μεταξύ δύο περιοχών (κυψελών) που χρησιμοποιούν ίδιες συχνότητες
 - δημιουργία συστάδων (cluster) κυψελών
 - cluster  σύνολο κυψελών όπου κανένα κανάλι δεν επαναχρησιμοποιείται εντός αυτών

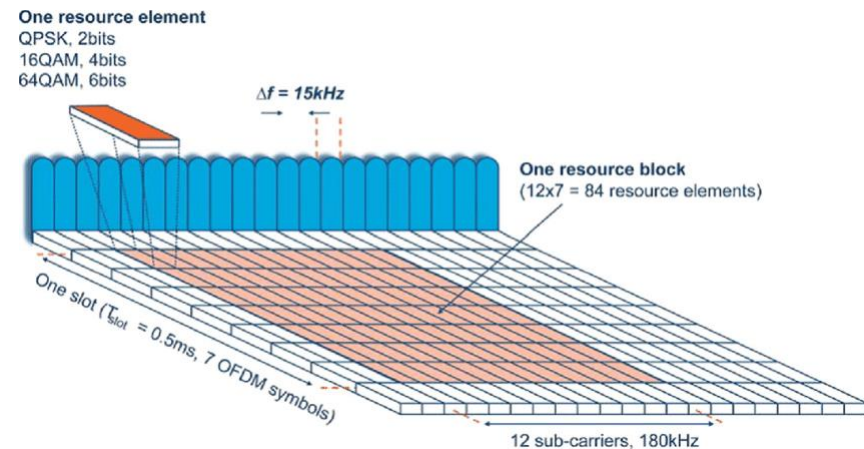
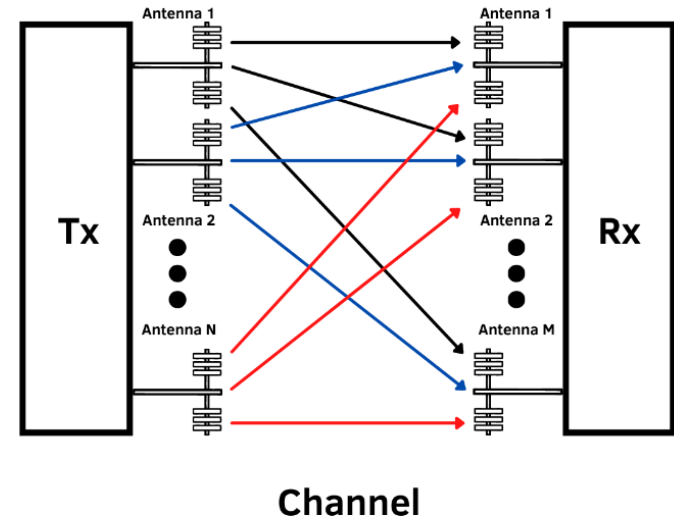


Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας με απόσταση επαναχρησιμοποίησης $d=3$

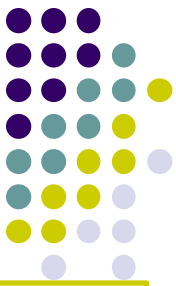


Κυψελωτά Συστήματα - Βασικές Τεχνικές

- **Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών (Multiple Input Multiple Output – MIMO):**
 - αύξηση χωρητικότητας συστήματος
 - διαφορετικά κέρδη (diversity gains)
 - κέρδη πολυπλεξίας (multiplexing gains)
 - χωρίς αύξηση στο χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης ή την ισχύ εκπομπής
- **Σχήματα Διαμόρφωσης και Πολλαπλής Πρόσβασης:**
 - QPSK, QAM, Adaptive Modulation
 - Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Non-orthogonal Multiple Access (NOMA)
- **Ανάθεση Ραδιοπόρων:**
 - παράμετροι εισαγωγής
 - εκχώρηση υποφερόντων (subcarriers) ανά χρήστη
 - παράμετροι περιορισμού: μέγιστος αριθμός υποφερόντων ανά χρήστη, μέγιστος αριθμός υποφερόντων ανά BS/cell/cluster, μέγιστη ισχύς εκπομπής ανά BS



Πηγή [4]



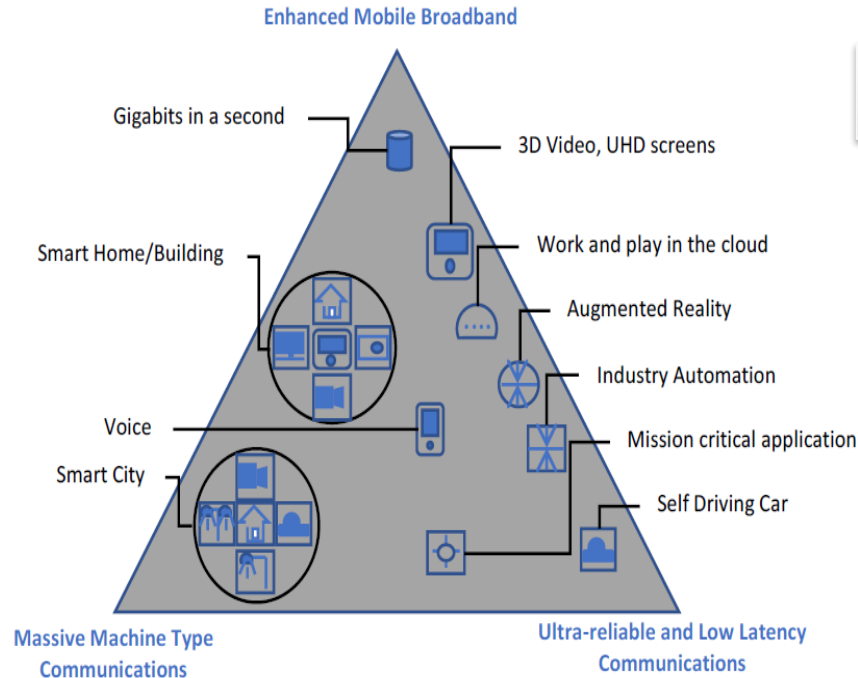
Κυβελωτά Συστήματα 5ης Γενιάς (5G) – Απαιτήσεις απόδοσης

- Σύμφωνα με τη CISCO [5]:
 - διπλασιασμός μηνιαίας ζήτησης δεδομένων (100 exabytes)
 - περίπου 31,6 δισεκατομμύρια ενεργές συσκευές μέχρι το 2023
- Δίκτυα 5G:
 - υποστήριξη υψηλής διέλευσης (throughput) και πυκνότητας συνδέσεων
 - έντονη κινητικότητα των τερματικών συσκευών
 - διατήρηση υψηλών επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και ποιότητας εμπειρίας (Quality of Experience - QoE)
- Κατηγορίες εφαρμογών, υπηρεσιών και επιχειρησιακών μοντέλων → μετάβαση στο World-Wide Wireless Web (WWWW):
 - Ασύρματη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας για υπηρεσίες ευρυεκπομπής (Enhanced Mobile Broadband - eMBB, up to 20GHz - ITU MIT-2020 specification) [6]. Εφαρμογές: HD videos, AR/VR applications, 3D online gaming.
 - Ultra-Reliable-Low-Latency communications (URLLC). Εφαρμογές: critical scenarios (τηλεϊατρική, φυσικές καταστροφές), δίκτυα οχημάτων (Vehicular Communications), επικοινωνίες μηχανών (Machine **Type** Communications), αυτόνομα δίκτυα (εφαρμογές ρομποτικής).
 - Υποστήριξη Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), αύξηση διασυνδεδεμένων IoT συσκευών και ανάπτυξη αντίστοιχων δικτύων και εφαρμογών.



Κυψελωτά Συστήματα 5ης Γενιάς (5G) – Παραδείγματα χρήσης

5G Usage Scenarios



Πηγή: International Telecommunications Union (ITU)

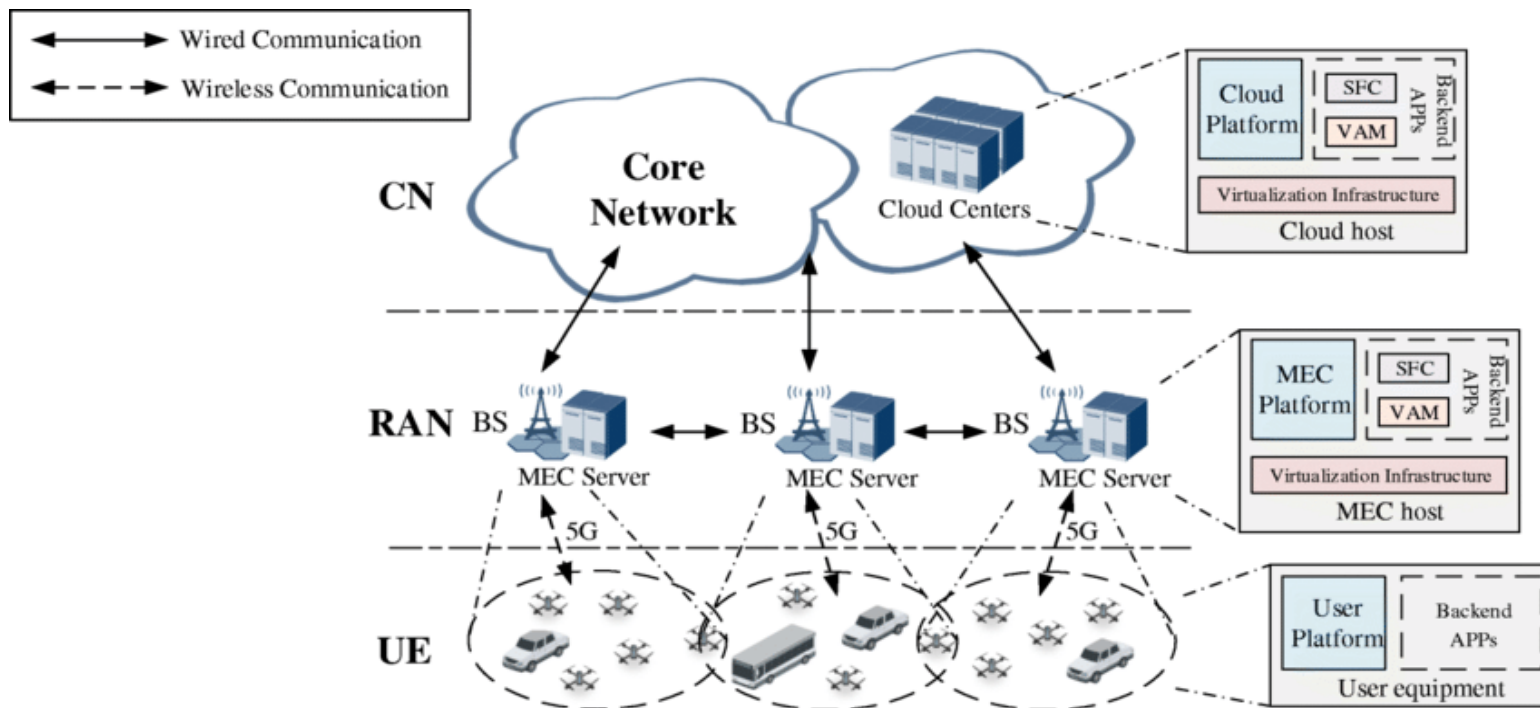
- IoT εφαρμογές → δημιουργία μεγάλου όγκου δεδομένων.
- Τερματικά χρηστών → περιορισμένοι πόροι
- Βελτιστοποίηση και διατήρηση QoS → αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένο (cloud) data centers
- Υποβάθμιση της απόδοσης σε Latency-sensitive apps

- Μεταφορά πόρων στην άκρη του δικτύου
- MEC server στους BSs

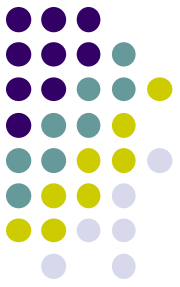


MEC σε Κυψελωτά Συστήματα (5G) - Αρχιτεκτονική

[7]



Στην παραπάνω αρχιτεκτονική, οι διακομιστές MEC και οι BS είναι ενσωματωμένοι στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) και αναπτύσσονται στη διεπαφή επιπέδου χρήστη, δηλαδή μεταξύ του δικτύου κορμού (Core Network - CN) και των τερματικών (User Equipment - UE). Κάθε BS είναι συνδεδεμένος με διακομιστή MEC, μέσω αποκλειστικών αξιόπιστων συνδέσεων για την παροχή υπηρεσιών υψηλού QoS προς τους ενεργούς χρήστες κοντινών κυψελών. Οι διακομιστές MEC συνδέονται με Cloud Data Centers μέσω του backhaul δικτύου, με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών, ώστε να λειτουργούν συνεργατικά.



Μετάδοση περιεχομένου υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης μέσω computation offloading

MEC \longrightarrow ελαχιστοποίηση υπολογιστικού χρόνου, κατανέμοντας την κίνηση σε διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας

Έστω:

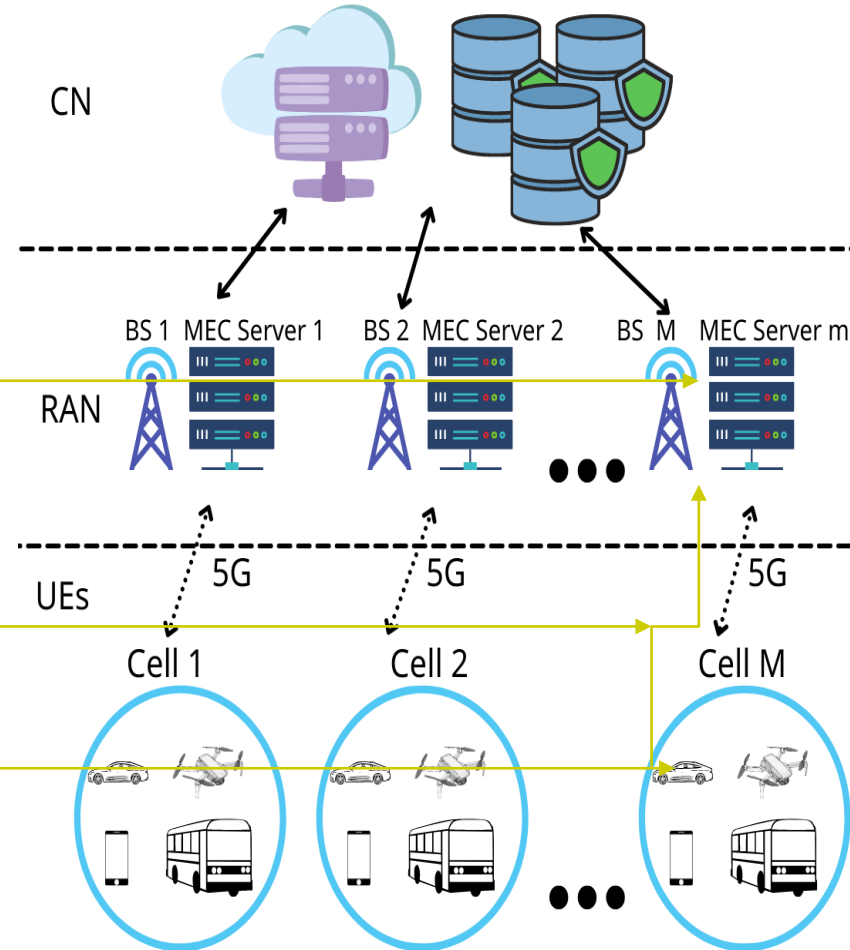
- χρήστης n ,
- υπολογιστική διεργασία (computing task) j
- MEC διαμεσολαβητής m (computation offloading)

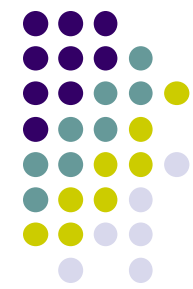
Η συνολική καθυστέρηση του συστήματος είναι [8]:

$$T_{m,n,j} = T_{m,n,j}^T + T_{m,n,j}^D + T_{m,n,j}^E$$

όπου:

- $T_{m,n,j}^T$ είναι ο χρόνος μετάδοσης της εργασίας j από το χρήστη n στη μονάδα επεξεργασίας m ,
- $T_{m,n,j}^D$ είναι η καθυστέρηση επεξεργασίας της εργασίας j από το χρήστη n , και
- $T_{m,n,j}^E$ είναι ο χρόνος εκτέλεσης της εργασίας j στο διαμεσολαβητή MEC m .

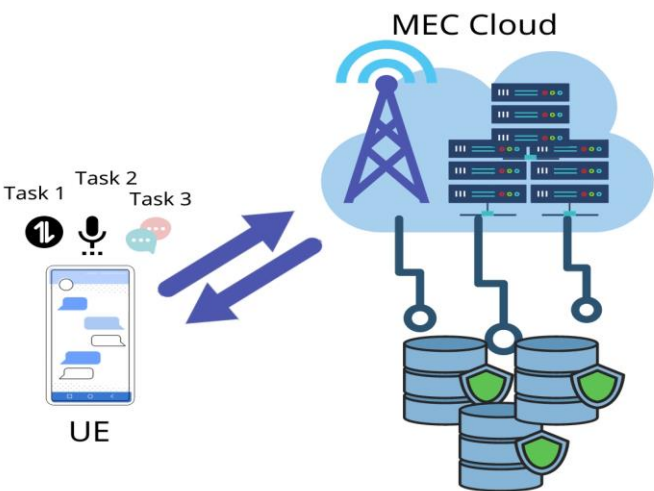




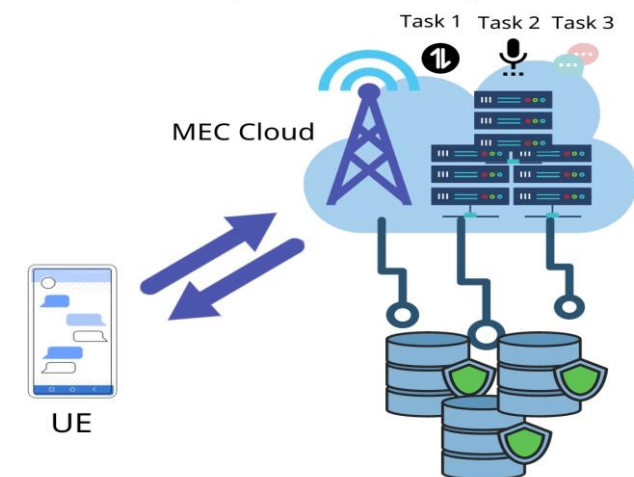
Μετάδοση περιεχομένου υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης μέσω computation offloading

Τύποι computation offloading [9]

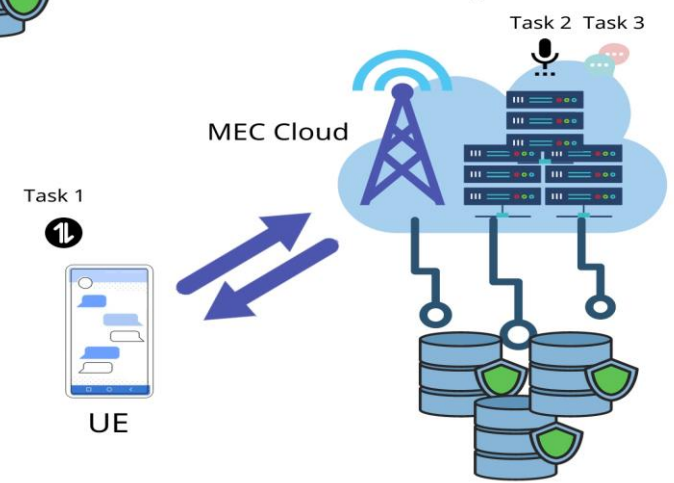
Local Computation



Complete Offloading



Partial Offloading

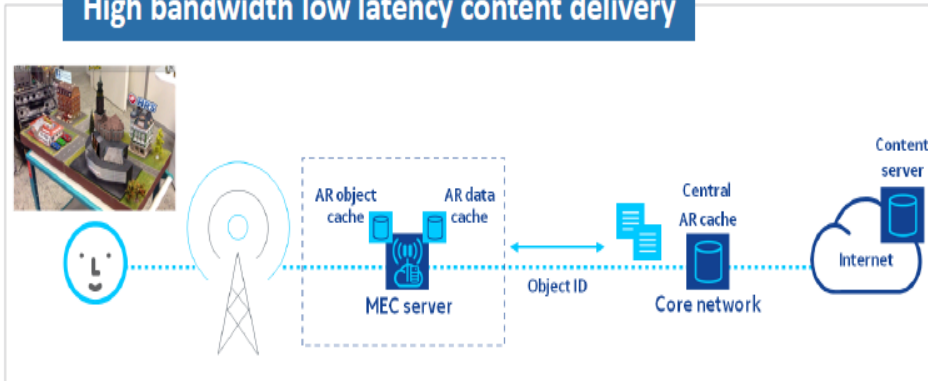




Παραδείγματα Χρήσης (Use cases) MEC σε 5G δίκτυα [1]

Εφαρμογές AR/VR

High bandwidth low latency content delivery

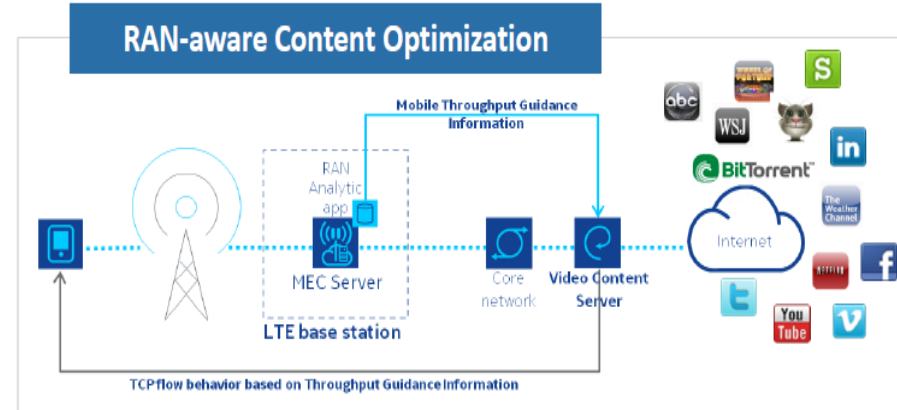


- real-time δεδομένα δέχονται MEC επεξεργασία με τη χρήση τοπικών δεδομένων (local AR/VR datasets).
- Εφαρμογή: AR/VR ξεναγήσεις σε μουσεία ή αρχαιολογικούς χώρους
- URLLC και υψηλό throughput

- vehicle-to-infrastructure (V2I) και vehicle-to-vehicle (V2V) επικοινωνίες
- Εφαρμογή: πρόβλεψη εμποδίων, εργασιών στο οδόστρωμα
 - ➔ αποστολή ειδοποίησης σε κοντινά οχήματα
 - ➔ έγκαιρη αντίδραση οδηγού

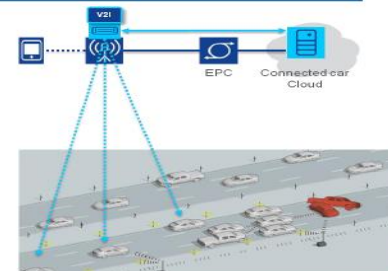
Πρόβλεψη Throughput μέσω Network Analytics

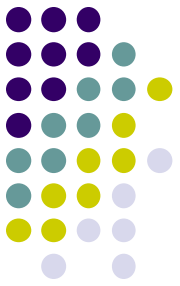
RAN-aware Content Optimization



- δεδομένα Channel State Information (CSI) στους BSs
- επικοινωνία με CN Servers ➔ έλεγχος συμφόρησης και επιλογή επιπέδων κωδικοποίησης
- βελτίωση throughput και QoS

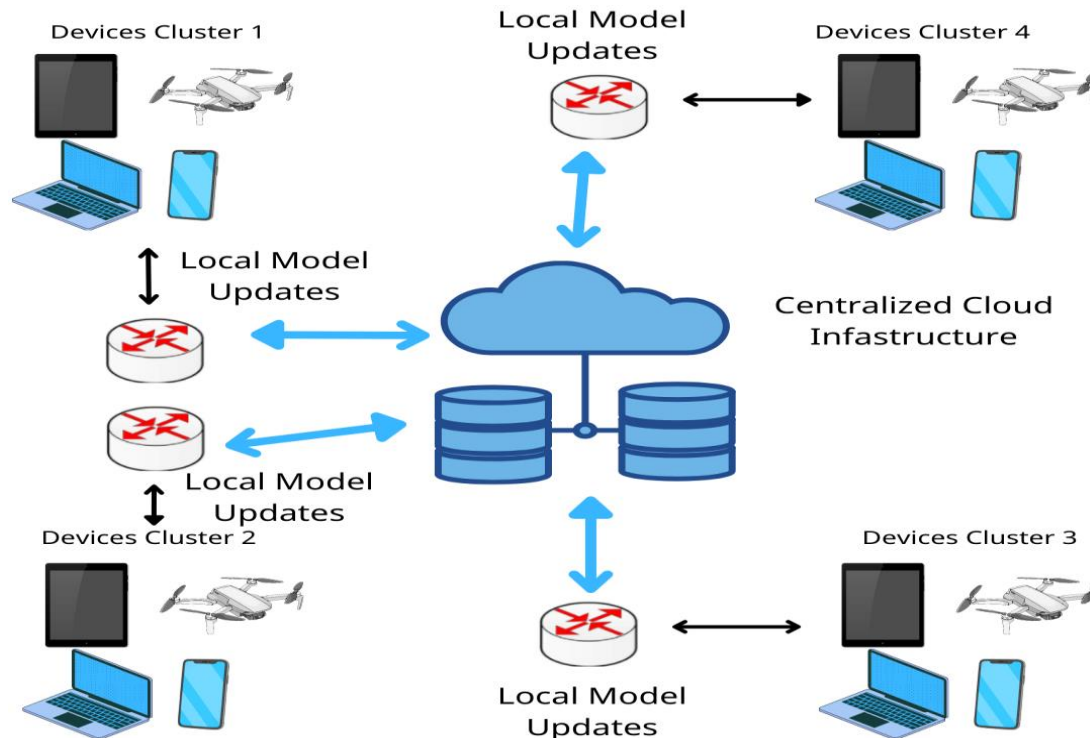
Vehicle-to-infrastructure





Παραδείγματα Χρήσης (Use cases) ΜΕC σε 5G δίκτυα [10], [11]

Συνεργατική Προσέγγιση Μάθησης - Federated Learning



Η Συνεργατική Μάθηση είναι μια ML τεχνική, η οποία εκπαιδεύει έναν αλγόριθμο σε πολλαπλές αποκεντρωμένες συσκευές (distributed edge devices), σε κάθε μία από τις οποίες διατηρούνται τοπικά δεδομένα (local datasets). Αυτή η προσέγγιση έρχεται σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ML τεχνικές, όπου όλα τα τοπικά datasets συγκεντρώνονται σε έναν διακομιστή (server) ή μια τερματική συσκευή, καθώς και με πιο κλασικές αποκεντρωμένες προσεγγίσεις, που συχνά υποθέτουν ότι τα τοπικά δείγματα δεδομένων κατανέμονται ομοιόμορφα.



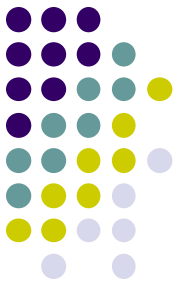
Μηχανική Μάθηση – Machine Learning (ML)

Τι είναι το ML;

- Σύμφωνα με τον T. M. Mitchell [12] *“Μια μηχανή μαθαίνει την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας T , με στόχο τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου επιπέδου απόδοσης P , με βάση κάποια πρότερη εμπειρία E , έτσι ώστε το σύστημα να βελτιώσει αξιόπιστα την απόδοσή του P κατά την εκτέλεση της εργασίας T , εκμεταλλευόμενο ξανά την πρότερη εμπειρία E ”.*
- Μηχανική Μάθηση:
 - ❖ συλλογή αλγορίθμων και μεθόδων
 - ❖ βελτίωση αποδοτικότητας μιας μηχανής (π.χ Η/Υ)
 - ❖ εκτέλεση «έξυπνων» εργασιών

Κατηγορίες προβλημάτων που αντιμετωπίζει το ML

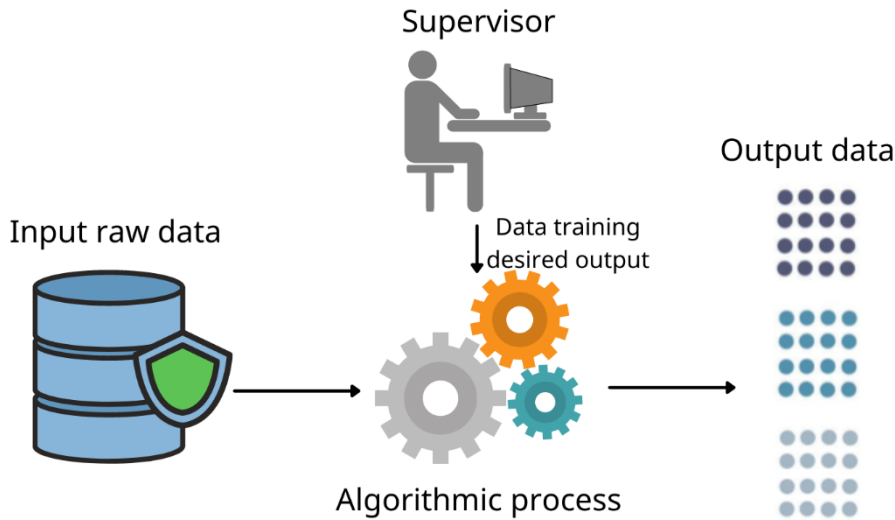
- κατηγοριοποίηση (Classification)
- πρόβλεψη (Prediction) και παλινδρόμηση (Regression)
- ομαδοποίηση (Clustering)
- εξαγωγή χαρακτηριστικών (Feature Extraction)
- αναγνώριση προτύπων (Pattern Recognition)
- ανάλυση δεδομένων σε συνιστώσες και αναπαράσταση
- γενίκευση (Generalization)



Μηχανική Μάθηση – Machine Learning (ML)

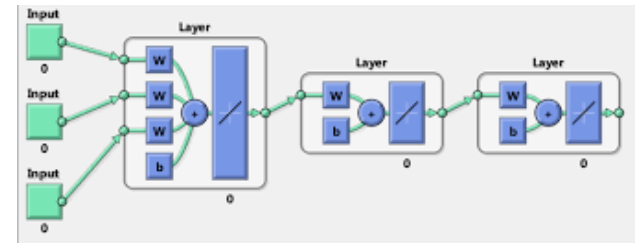
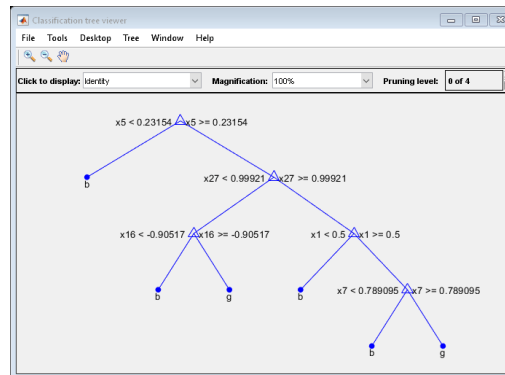
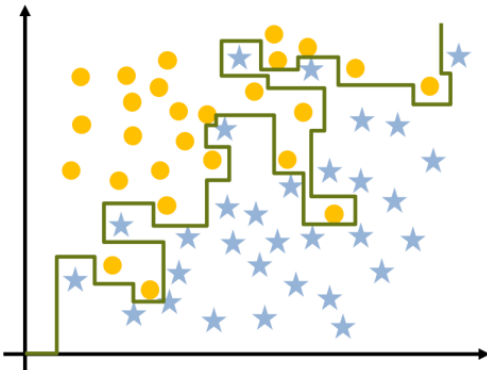
Κατηγορίες Μηχανικής Μάθησης

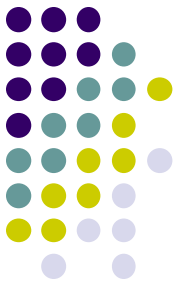
Supervised Learning



- σύνολο δεδομένων (data set) με ετικέτες (features)
- παραγωγή features είτε από ανθρώπους είτε αυτόματα με υπολογισμό
- χωρισμός dataset σε σύνολο εκπαίδευσης (training set) και σύνολο δοκιμών (test set)
- δημιουργία αντιστοίχισης μεταξύ των εισόδων και των ΕΤΙΚΕΤΩΝ.

Πηγή εικόνων: Mathworks

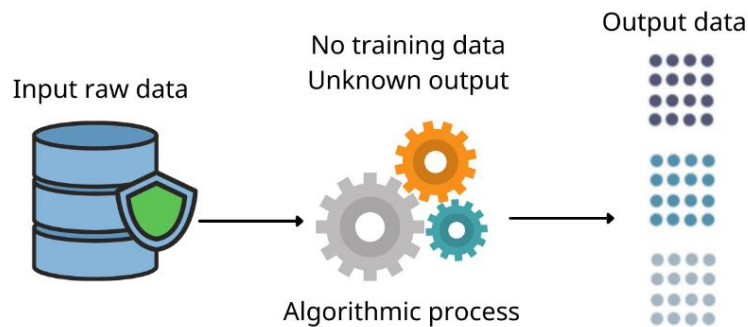




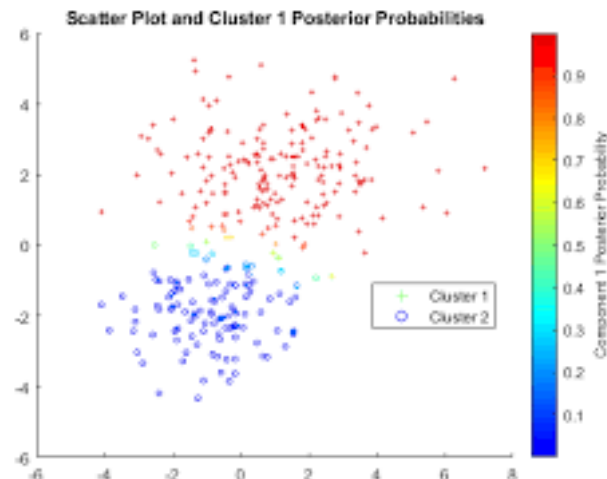
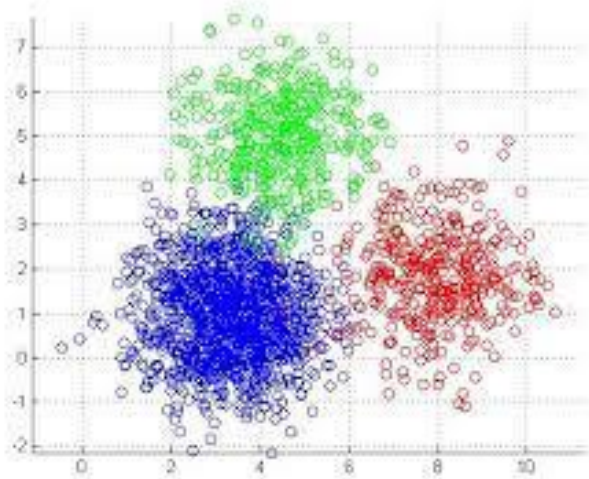
Μηχανική Μάθηση – Machine Learning (ML)

Κατηγορίες Μηχανικής Μάθησης

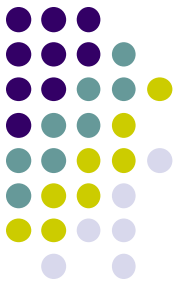
Unsupervised Learning



- προσδιορισμός κοινών χαρακτηριστικών του συνόλου των δεδομένων από το ίδιο το μοντέλο
- απουσία ετικετών από το σύνολο δεδομένων και εξαγωγή τους εσωτερικά
- υφίσταται η έννοια της εκπαίδευσης των δεδομένων:
για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα ομαδοποίησης, ως είσοδος μπορεί να δοθεί ο αριθμός των συστάδων ή των χαρακτηριστικών υπό εξόρυξη.



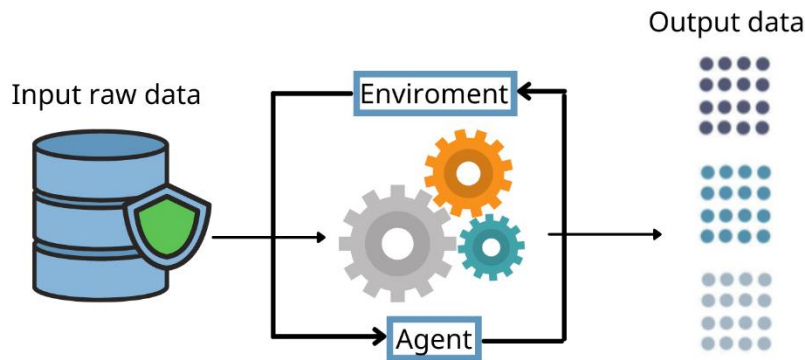
Πηγή εικόνων:
Mathworks



Μηχανική Μάθηση – Machine Learning (ML)

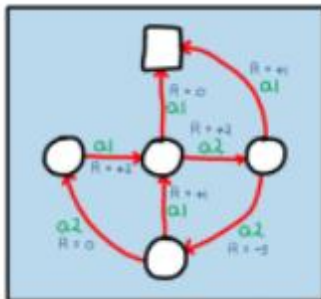
Κατηγορίες Μηχανικής Μάθησης

Reinforcement Learning

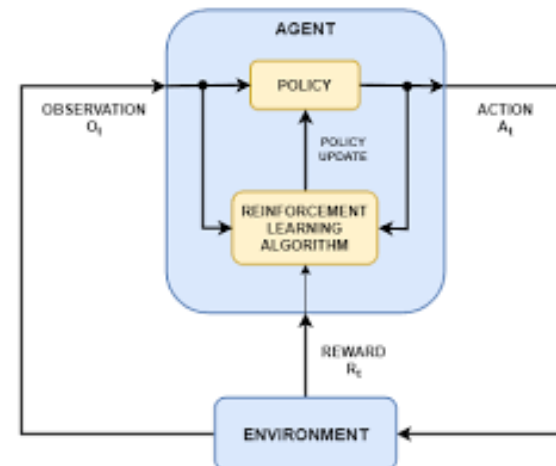


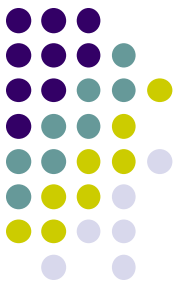
- βασισμένη στη λειτουργία των πρακτόρων
- πράκτορες → εκπρόσωποι του συστήματος σε συνεργασία με το περιβάλλον
- ανατροφοδότηση μοντέλου με reward (θετική περίπτωση) ή penalty (αρνητική περίπτωση)
- δημιουργία προγράμματος μάθησης από τον ίδιο τον πράκτορα
- σκοπός η λήψη αποφάσεων και ενεργειών

reinforcement learning



Πηγή εικόνων:
Mathworks





Federated Learning in MEC – Use Cases

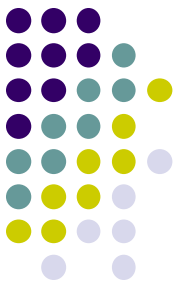
- Δίκτυα Οχημάτων και Αυτόνομη Οδήγηση: Ανάγκη για URLLC και ικανοποίηση αυστηρών QoS requirements ώστε να ανταποκρίνονται γρήγορα σε πραγματικές καταστάσεις → οι παραδοσιακές προσεγγίσεις cloud μπορεί να δημιουργήσουν κινδύνους ασφάλειας → μέσω Federated Learning προτείνονται λύσεις για τον περιορισμό του όγκου μεταφοράς δεδομένων που ως αποτέλεσμα έχουν την επιτάχυνση των ML tasks
- Υπηρεσίες Τηλεϊατρικής: Απαιτείται υψηλό QoS, χαμηλό latency και συνεργασία πολλών διασυνδεδεμένων στο δίκτυο συσκευών, όπως επίσης και απομακρυσμένη πρόσβαση. Μέσω Federated Learning είναι εφικτή η μείωση της συμφόρησης του δικτύου, αφού τα εκάστοτε ML tasks εκτελούνται τοπικά. Συνεπώς μειώνεται η πιθανότητα αποκοπής ή η υπερφόρτωση του δικτύου.
- Άλλες εφαρμογές: Critical scenarios όπως φυσικές καταστροφές, ιδιωτικά 5G δίκτυα κυρίως στην αυτοματοποίηση της αλυσίδας παραγωγής

MEC σε 5G δίκτυα – Προκλήσεις και Μελλοντικές επεκτάσεις

- δύσκολα εφαρμόσιμη η υλοποίηση μιας καθολικής MEC αρχιτεκτονικής δικτύου
- πολύ-παραμετρικό πρόβλημα: διαχείριση των υπολογιστικών πόρων, βελτιστοποίηση του δικτύου, αποθήκευση δεδομένων, πρωτόκολλα επικοινωνίας
- απαίτηση για την βέλτιστη κατανομή των πόρων του συστήματος (RRM) ➔ λύσεις μέσω προηγμένων μεθόδων Ανάλυσης Δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης.
- ανάγκη ασφαλούς και έγκυρης επικοινωνίας ανώτερου επιπέδου ➔ network management and orchestration

- περιορισμένοι υπολογιστικοί πόροι στα UEs
- ανάθεση υπολογιστικών task σε πολλαπλούς κόμβους με διαφορετικές υπολογιστικές δυνατότητες

- αντιμετώπιση προβλημάτων Ασφάλειας και Απορρήτου (Security and Privacy)





Βιβλιογραφία

- [1] *Multi-Access Edge Computing (MEC); Phase 2: Use Cases and Requirements*, Standard ETSI GS MEC 002 V2.1.1, Oct. 2018.
- [2] Q. Pham et al., “A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116974-117017, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001277.
- [3] I. Aktaş, “Cloud and edge computing in IoT: a short history,” Bosch Connected World Blog, Feb. 07, 2019. <https://blog.bosch-si.com/bosch-iot-suite/cloud-and-edge-computing-for-iot-a-short-history/>.
- [4] Abdulhasan, M.Q., Salman, M.I., Ng, C.K. et al. An Adaptive Threshold Feedback Compression Scheme Based on Channel Quality Indicator (CQI) in Long Term Evolution (LTE) System. *Wireless Pers Commun* 82, 2323–2349 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2350-1>
- [4] “Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update 2017–2022,” Cisco, San Jose, CA, USA, White paper, February 2019.
- [5] M. Carugi, “Key features and requirements of 5G/IMT-2020 networks,” Report, 2018.
- [6] H. Lin, X. Xu, J. Zhao, and X. Wang, “Dynamic service migration in ultra-dense multi-access edge computing network for high-mobility scenarios,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2020, no. 1, Oct. 2020, doi: 10.1186/s13638-020-01805-2.
- [7] Z. Ning, X. Wang, J. J. P. C. Rodrigues and F. Xia, “Joint Computation Offloading, Power Allocation, and Channel Assignment for 5G-Enabled Traffic Management Systems,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3058-3067, May 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2892767
- [8] Y. Wu, H. Huang, C.-X.Wang, and Y. Pan, “5G-enabled internet of things,” Boca Raton, FL: Crc Press, 2019.
- [9] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, “Edge Computing: Vision and Challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [10] T. Subramanya and R. Riggio, "Centralized and Federated Learning for Predictive VNF Autoscaling in Multi-Domain 5G Networks and Beyond," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 1, pp. 63-78, March 2021, doi: 10.1109/TNSM.2021.3050955.
- [11] D. M. Manias and A. Shami, "Making a Case for Federated Learning in the Internet of Vehicles and Intelligent Transportation Systems," in *IEEE Network*, vol. 35, no. 3, pp. 88-94, May/June 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2000552.
- [12] T. M. Mitchell, *Machine Learning*, 1st ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997. [Online]. Available: <https://www.cs.ubbcluj.ro/~gabis/ml/ml-books/McGrawHill-MachineLearning-TomMitchell.pdf>