

Ανάλυση Ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG)

Βιοϊατρικά Σήματα & Εφαρμογές — Εργαστήριο

MIT-BIH Database · PhysioNet · Python

Διάρκεια: 3 ώρες · 3 ομάδες · 1 notebook

Πώς θα δουλέψουμε σήμερα

Δύο οθόνες, παράλληλα:

- Αριστερά (slides): η θεωρία πίσω από κάθε βήμα
- Δεξιά (notebook): ο κώδικας που υλοποιεί τη θεωρία

Ομάδα	Record	Περιγραφή
A	100	Σχεδόν φυσιολογική καταγραφή
B	106	Πολλές εκτοπες κοιλιακές συστολές (PVC)
C	119	Ακανόνιστος ρυθμός

⚠ Κάθε ομάδα αλλάζει **μόνο** την τιμή `record_id` — όλος ο υπόλοιπος κώδικας μένει ίδιος.

Πρόγραμμα 3 ωρών

Ώρα	Περιεχόμενο
1η	Σήμα ECG · θόρυβος · ψηφιακό filtering
2η	R-peak detection · Heart Rate · HRV
3η	Αρρυθμίες · σύγκριση ομάδων · (bonus: spectral, ML)

Στόχος μάθησης:

1. Να κατανοήσετε ότι ένα βιοσήμα δεν ζει στο κενό — έχει φυσιολογική σημασία.
2. Να εφαρμόσετε τις βασικές τεχνικές DSP σε πραγματικά δεδομένα.
3. Να μάθετε να ερμηνεύετε μετρήσεις (HR, SDNN, PVC%) — όχι απλώς να τις υπολογίζετε.

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

Τι είναι το ECG;

Η καρδιά είναι ένα ηλεκτρικό όργανο

Συνήθως σκεφτόμαστε την καρδιά ως αντλία. Είναι, αλλά είναι και κάτι άλλο:

- Κάθε παλμός ξεκινά από ηλεκτρικό σήμα που γεννιέται μέσα στην καρδιά.
- Δεν χρειάζεται εντολή από τον εγκέφαλο — αν αποκόψουμε όλα τα νεύρα, η καρδιά συνεχίζει να χτυπάει. Αυτό λέγεται **automaticity** (αυτορρυθμιζόμενη λειτουργία).
- Το ECG μετράει αυτή την ηλεκτρική δραστηριότητα στην επιφάνεια του δέρματος μέσω ηλεκτροδίων (συνήθως 12 σε κλινικό περιβάλλον, 1-2 σε wearables/Holter).

Τι ακριβώς "βλέπουμε" στο ECG;

Depolarization (αποπόλωση): τα κύτταρα της καρδιάς αλλάζουν φορτίο (από αρνητικό σε θετικό εσωτερικά) → πυροδοτεί μυϊκή συστολή.

Repolarization (επαναπόλωση): τα κύτταρα επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση → χαλάρωση.

Το ECG είναι το άθροισμα όλων αυτών των ηλεκτρικών αλλαγών, όπως το βλέπει ένα ηλεκτρόδιο στο δέρμα.

Τι ΔΕΝ μετράει το ECG:

Μετράει	ΔΕΝ μετράει
Ηλεκτρική δραστηριότητα	Ροή αίματος
Χρόνους αγωγής	Αρτηριακή πίεση
Ρυθμό & κανονικότητα	Μηχανική δύναμη συστολής

Το ηλεκτρικό σύστημα αγωγής — βήμα-βήμα

Από την ηλεκτρική αγωγή στα κύματα του ECG

Φυσιολογικό βήμα	Κύμα στο ECG	Τυπική διάρκεια
1. SA node ενεργοποιείται	(αόρατο — μικρό)	—
2. Αποπόλωση κόλπων	P wave	~80 ms
3. Καθυστέρηση στον AV node	PR interval	120-200 ms
4. Αποπόλωση κοιλιών (His-Purkinje)	QRS complex	<120 ms
5. Πλατό (κοιλίες αποπολωμένες)	ST segment	~80-120 ms
6. Επαναπόλωση κοιλιών	T wave	~160 ms

Γιατί δεν βλέπουμε επαναπόλωση κόλπων;

Επικαλύπτεται χρονικά από το πολύ μεγαλύτερο QRS — το σήμα της είναι μικρό και "πνίγεται".

Κάθε ορατό κύμα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο φυσιολογικό γεγονός.

Όταν λείπει ή είναι παραμορφωμένο → υποπτευόμαστε διαταραχή σε εκείνο το βήμα.

Σύντομο γλωσσάρι (πριν προχωρήσουμε)

Όρος	Τι σημαίνει
Sinus rhythm	Φυσιολογικός ρυθμός με αφετηρία τον SA node
Bradycardia	HR < 60 bpm (συχνά φυσιολογική σε αθλητές)
Tachycardia	HR > 100 bpm
Arrhythmia	Οποιαδήποτε απόκλιση από τον φυσιολογικό sinus rhythm
Ectopic beat	Παλμός που ξεκινά εκτός του SA node (κολπικός ή κοιλιακός)
Lead	Κανάλι μέτρησης — διαφορά τάσης μεταξύ 2 ηλεκτροδίων (12-lead ECG: 12 οπτικές γωνίες)
mV / ms	Πλάτος σε millivolts, χρόνος σε milliseconds — οι "μονάδες" του ECG

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

Τα κύματα του ECG αναλυτικά

Ένας παλμός — όλα τα κύματα

Τι μας λέει το κάθε κύμα — και τι σημαίνει "παθολογικό"

Κύμα	Φυσιολογικό	Παθολογία αν...
P wave	~80 ms, <0.25 mV	λείπει → κολπική μαρμαρυγή (atrial fibrillation)
PR interval	120-200 ms	>200 ms → AV block (καθυστέρηση/αποκοπή στον AV node)
QRS complex	<120 ms	πλατύ (>120 ms) → bundle branch block ή PVC
ST segment	ισιωτικό (στο μηδέν)	↑ ST → οξύ έμφραγμα (STEMI); ↓ ST → ischemia
T wave	στρογγυλό, θετικό	ανεστραμμένο → ισχαιμία ή υπερκαλιαιμία
QT interval	<440 ms (άντρες)	παρατεταμένο (long QT) → κίνδυνος Torsades de Pointes

Στο εργαστήριο εστιάζουμε στο **R peak** — το πιο αιχμηρό σημείο, αυτό που εντοπίζουμε αλγοριθμικά. Αλλά η παραπάνω γνώση είναι ο **λόγος** που το ECG έχει νόημα.

Μini-εγκυκλοπαίδεια κλινικών όρων

Atrial fibrillation (κολπική μαρμαρυγή): οι κόλποι "τρεμοπαίζουν" αντί να συσπώνονται κανονικά → εξαφανίζονται τα P waves, οι RR γίνονται τελείως ακανόνιστα. Πιο συχνή χρόνια αρρυθμία.

AV block: ο AV node καθυστερεί ή μπλοκάρει τη μετάδοση του σήματος από κόλπους σε κοιλίες. 3 βαθμοί:

- 1ος βαθμός: PR > 200 ms (όλα τα P οδηγούν σε QRS, απλά καθυστερημένα).
- 2ος βαθμός: μερικά P δεν ακολουθούνται από QRS (χάνονται παλμοί).
- 3ος βαθμός (complete): καμία σύνδεση P-QRS — χρειάζεται βηματοδότη.

STEMI (ST-Elevation Myocardial Infarction): οξύ έμφραγμα με ανύψωση ST — επείγον· δείχνει νέκρωση εξωτερικού στρώματος του μυοκαρδίου.

Ischemia (ισχαιμία): μειωμένη παροχή αίματος στο μυοκάρδιο — προειδοποιητικό σημάδι πριν το έμφραγμα.

Bundle branch block: βλάβη σε ένα από τα δύο σκέλη του His → οι δύο κοιλίες αποπολώνονται

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

Ας δούμε πραγματικά δεδομένα

MIT-BIH Arrhythmia Database

- Δημιουργήθηκε στο MIT & Beth Israel Hospital (Boston) τις δεκαετίες '70-'80, σήμερα διαθέσιμη στο PhysioNet (open access).
- 48 records × 30 λεπτά × 2 leads, $f_s = 360$ Hz.
- Κάθε beat έχει annotation (label) από 2 ανεξάρτητους καρδιολόγους — αποτελεί το ground truth για όλη τη βιβλιογραφία ECG αλγορίθμων.

Γιατί $f_s = 360$ Hz ;

- Το QRS έχει συνιστώσες ως ~ 30 Hz → κατά Nyquist χρειαζόμαστε $f_s \geq 60$ Hz.
- Το 360 Hz επιλέχθηκε γιατί είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 60 Hz (US powerline) — διευκολύνει το notch filtering.
- Σε σύγχρονα συστήματα: 500-1000 Hz για περισσότερη χρονική ακρίβεια στο peak detection.

Πρώτη ματιά στο σήμα

▶ Τρέξτε: κελί "PRWTH MATIA — 10 kai 30 deuterolepta"

Τι παρατηρούμε στο plot:

- Επαναλαμβανόμενο μοτίβο P-QRS-T — η καρδιά "χτυπάει" κανονικά.
- Με $f_s = 360 \text{ Hz}$ και 30 min → **650.000 δείγματα** (μεγάλο σήμα!).
- Η baseline ΔEN είναι ακριβώς στο 0 — υπάρχει drift.
- Σε ορισμένα σημεία βλέπουμε μικρές διακυμάνσεις → θόρυβος.

Βασικά χαρακτηριστικά του ECG ως σήμα:

Ιδιότητα	Σημασία
Quasi-periodic	Επαναλαμβανόμενο, αλλά όχι ακριβώς ίδιο σε κάθε περίοδο (ΔEN είναι sinusoidal)
Non-stationary	Στατιστικά (μέσος, διακύμανση) αλλάζουν στον χρόνο

ΕΝΟΤΗΤΑ 4

Θόρυβος στο ECG

Γιατί κάθε ECG έχει θόρυβο;

Στο ιδανικό σενάριο, τα ηλεκτρόδια θα "άκουγαν" μόνο την καρδιά.

Στην πράξη, "ακούν" όλα τα ηλεκτρικά σήματα στο σώμα και γύρω του:

- Κίνηση του θώρακα από την αναπνοή
- Σύσπαση των σκελετικών μυών (EMG)
- Ηλεκτρομαγνητικά κύματα από καλώδια & πρίζες
- Κακή επαφή ηλεκτροδίου

Αυτά λέγονται *artefacts* ή *noise*. Πριν κάνουμε οτιδήποτε άλλο (peak detection, HRV), πρέπει να τα αφαιρέσουμε.

Οι 3 κύριοι τύποι θορύβου

Πώς ξεχωρίζουμε τους τύπους — με τη συχνότητα

Τύπος	Συχνότητα	Πηγή	Τι κάνει στο σήμα
Baseline drift	< 0.5 Hz	αναπνοή, κίνηση, ηλεκτρόδιο	"κυλάει" όλη η baseline πάνω-κάτω
Powerline	ακριβώς 50 Hz (60 Hz σε ΗΠΑ)	δίκτυο ρεύματος	προσθέτει sine wave 50 Hz σε όλο το σήμα
EMG / Muscle	> 40 Hz	μύες, τρεμούλα	πυκνά, τυχαία "δοντάκια"

Πώς ξέρουμε ότι το χρήσιμο ECG ζει στα 0.5 - 40 Hz;

Από την ανάλυση Fourier των κυμάτων:

- T wave (αργό, στρογγυλό): κυρίως 0.5 - 5 Hz
- P wave: 5 - 15 Hz
- QRS complex (αιχμηρό, μαύρο): 10 - 40 Hz

Άσκηση 1 — Καταστροφή & παρατήρηση

▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 1 (corrupted = ecg + drift + powerline + emg)

Συζητήστε στην ομάδα:

1. Μπορείτε ακόμα να δείτε τα R peaks; *(το μάτι σας είναι καλό φίλτρο!)*
2. Ποιος θόρυβος είναι **πιο καταστροφικός** για το peak detection;
 - Drift: μετατοπίζει τη baseline αλλά τα peaks παραμένουν τοπικά μέγιστα ✓
 - Powerline: προσθέτει "δοντάκια" — κίνδυνος ψεύτικων peaks ⚠
 - EMG: χάος στα υψηλά → πολλά false positives ✗
3. Με `x 3` πλάτος → τότε χάνεται εντελώς το σήμα;

ΕΝΟΤΗΤΑ 5

Ψηφιακό φιλτράρισμα

Τι είναι ένα ψηφιακό φίλτρο;

Ένα μαθηματικό εργαλείο που επιτρέπει ορισμένες συχνότητες να περάσουν, και μπλοκάρει άλλες.

4 βασικοί τύποι:

Τύπος	Κρατά	Κόβει	Παράδειγμα χρήσης
Low-pass	χαμηλές	υψηλές	αφαίρεση EMG
High-pass	υψηλές	χαμηλές	αφαίρεση baseline drift
Bandpass	μεσαία ζώνη	άκρα	το αγαπημένο μας για ECG
Notch	όλα ΕΚΤΟΣ από μία συχνότητα	μία συχνότητα	αφαίρεση 50 Hz powerline

Ένα bandpass 0.5-40 Hz είναι ισοδύναμο με: high-pass(0.5) + low-pass(40).

Butterworth filter & filtfilt

Δύο σημαντικές λεπτομέρειες

1. Butterworth (`signal.butter`)

- Έχει **maximally flat magnitude** στη ζώνη διέλευσης (χωρίς ripples).
- Η **τάξη** (order) ελέγχει πόσο "απότομη" είναι η αποκοπή (transition band).
 - Order 4 → καλό σημείο για ECG (ισορροπία ευκρίνειας/σταθερότητας).
 - Υψηλότερη τάξη → πιο απότομη αποκοπή αλλά **κίνδυνος αστάθειας** σε floating-point υπολογισμούς.

Εναλλακτικά: Chebyshev (απότομη αποκοπή με ripples), Elliptic (πιο απότομη ακόμα), FIR (γραμμική φάση αλλά ακριβό). **Butterworth** είναι το default για βιοσήματα γιατί δεν παραμορφώνει τη μορφολογία.

2. `filtfilt` αντί για `lfilter`

Άσκηση 2 — 3 διαφορετικά bandpass

▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 2 (filters A, B, C)

Δοκιμή	Range	Τι περιμένουμε
A	1 - 20 Hz	Κόβει κομμάτι του QRS (το QRS έχει συνιστώσες ως ~30 Hz)
B	0.5 - 40 Hz	Βέλτιστο — όλο το χρήσιμο σήμα
C	5 - 50 Hz	Κρατάει το powerline στα 50 Hz ✗

Συζήτηση:

1. Στο A, βλέπετε το QRS πιο "χαμηλό"; Γιατί;
2. Στο C, υπάρχει ακόμα 50 Hz θόρυβος — γιατί;
3. Τι θα συνέβαινε με ένα bandpass **0.05 - 150 Hz** (κλινικό πρότυπο);

ENOTHTA 6

R-peak detection

Γιατί στοχεύουμε το R peak;

Το R είναι το πιο υψηλό και πιο αιχμηρό σημείο κάθε παλμού:

- Υψηλό amplitude → εύκολο να ξεχωρίσει από τον θόρυβο.
- Στενό (αιχμηρό) → ακριβής χρονική θέση.
- Σταθερή μορφολογία → επαναλαμβανόμενο σε κάθε beat.

Από R peaks → όλα τα υπόλοιπα:

- RR intervals → Heart Rate
- RR statistics → HRV (SDNN, RMSSD)
- Beat morphology → ταξινόμηση Normal/PVC

🎯 Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε `scipy.signal.find_peaks` — έναν απλό αλλά ισχυρό αλγόριθμο.

Οι 2 κρίσιμες παράμετροι

Πώς διαλέγουμε `distance` και `height`;

`distance` (ελάχιστη απόσταση μεταξύ peaks, σε samples):

- Φυσιολογικό όριο: η καρδιά δεν ξεπερνά τους ~ 200 bpm \rightarrow RR ≥ 0.3 sec.
- Συντηρητική επιλογή: `distance = fs * 0.6` (μέγιστο HR ~ 100 bpm — ασφαλές για ενήλικες σε ηρεμία).

`height` (ελάχιστο ύψος peak):

- Πολύ χαμηλό \rightarrow ο θόρυβος μετράει σαν peak (false positives).
- Πολύ υψηλό \rightarrow χάνουμε μικρά R (false negatives).
- **Adaptive κανόνας:** `height = mean(filtered) + 0.5 * std(filtered)`
 - Προσαρμόζεται αυτόματα στο πλάτος του εκάστοτε σήματος.

▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 3 (4 συνδυασμοί distance/height)

ΕΝΟΤΗΤΑ 7

Από R peaks στο Heart Rate

RR interval & Heart Rate

Φυσιολογικές τιμές & κλινική σημασία

$$\text{RR (sec)} = \frac{R_{i+1} - R_i}{f_s} \quad \text{HR (bpm)} = \frac{60}{\text{RR}}$$

Κατηγορία	HR (bpm)	Πιθανές αιτίες
Bradycardia	< 60	αθλητές (φυσιολογικό), ύπνος, AV block , υποθυρεοειδισμός, βαγοτονία
Φυσιολογικό	60 - 100	ηρεμία ενήλικα (παιδιά: υψηλότερα όρια)
Tachycardia	> 100	άσκηση, στρες, πυρετός, αφυδάτωση, υπερθυρεοειδισμός, κολπική μαρμαρυγή , κοιλιακή ταχυκαρδία

Σημαντική διάκριση:

- **Sinus tachycardia**: γρήγορος ρυθμός που ξεκινά κανονικά από SA node (συνήθως καλοήθης).

Άσκηση 5 — Tachogram & Histogram

Τι ψάχνουμε στο plot:

Παρατήρηση	Πιθανή ερμηνεία
Tachogram σταθερό	Κανονικός sinus rhythm
Tachogram με σπασίματα	PVCs ή sinus arrhythmia
Histogram στενό	Χαμηλό HRV — ηρεμία ή... παθολογία;
Histogram πλατύ	Υψηλό HRV ή αρρυθμία
Histogram με 2 κορυφές	Bimodal → δύο τύποι beats (Normal + PVC)


▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 5

🔍 Η ομάδα B (record 106) πιθανώς θα δει **bimodal histogram** — γιατί;

Διάκριση: HRV vs Arrhythmia

Συχνά συγχέονται, αλλά είναι εντελώς διαφορετικά φαινόμενα.

Χαρακτηριστικό	HRV (φυσιολογικό)	Αρρυθμία (παθολογικό)
Πηγή	SA node (sinus rhythm)	Έκτοπο σημείο ή block
Πρότυπο	Ομαλές, αργές διακυμάνσεις	Ξαφνικά spikes / drops
P wave	Παρόν, φυσιολογικό	Συχνά απουσιάζει ή παραμορφωμένο
QRS morphology	Σταθερή	Συχνά αλλοιωμένη
Κλινική σημασία	Δείκτης υγείας	Δείκτης παθολογίας

 Στην πράξη: ένα Holter monitor καταγράφει 24-48 ώρες ECG και ο γιατρός κοιτά και τα δύο — HRV trends ΚΑΙ συμβάντα αρρυθμίας.

ENOTHTA 8

Heart Rate Variability (HRV)

Η καρδιά ΔΕΝ είναι μετρονόμος

Μια υγιής καρδιά δεν χτυπάει με σταθερό ρυθμό. Αν δείτε σήμα όπου τα RR είναι απολύτως ίδια, υποπτευθείτε παθολογία ή τεχνικό σφάλμα.

Γιατί υπάρχει μεταβλητότητα;

1. Respiratory Sinus Arrhythmia (RSA):

- Σε εισπνοή: η καρδιά επιταχύνει (μειώνεται ο παρασυμπαθητικός τόνος).
- Σε εκπνοή: επιβραδύνει (αυξάνεται ο παρασυμπαθητικός τόνος).
- Φυσιολογικό φαινόμενο, εμφανές κυρίως σε νέους και αθλητές.

2. Baroreflex: πτώση πίεσης → άμεση αύξηση HR (μέσω vagus nerve).

3. Αργές διακυμάνσεις: θερμορύθμιση, ορμόνες, κιρκάδιοι ρυθμοί.

Αυτόνομο Νευρικό Σύστημα (ANS) — οι δύο "πετάλες":

Time-domain HRV: SDNN & RMSSD

Οι δύο βασικές μετρήσεις

SDNN — Standard Deviation of NN intervals

$$\text{SDNN} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{RR}_i - \overline{\text{RR}})^2}$$

- Συνολική μεταβλητότητα (long-term + short-term).
- 100 ms → υγιές · 50-100 ms → μέτριο · < 50 ms → μειωμένο.

RMSSD — Root Mean Square of Successive Differences

$$\text{RMSSD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\text{RR}_{i+1} - \text{RR}_i)^2}$$

- Βραχυπρόθεσμες αλλαγές μόνο.
- Αντανασκλά κυρίως παρασυμπαθητικό τόνο

⚠ Προσοχή στην ερμηνεία

"Η ομάδα Β έχει $SDNN = 180$ ms. Άρα η καρδιά της είναι πολύ υγιής!" — ΛΑΘΟΣ.

Το record 106 έχει πολλά **PVCs**. Κάθε PVC έχει ένα μικρό RR (πρώιμος παλμός) ακολουθούμενο από μεγάλο RR (αντισταθμιστική παύση).

→ Αυτό τεχνητά φουσκώνει το $SDNN$, αλλά δεν αντανακλά υγιή ANS λειτουργία.

Κανόνας: Πριν ερμηνεύσουμε το HRV, πρέπει να αφαιρέσουμε ή σημειώσουμε τους έκτοπους παλμούς.

Στην κλινική πρακτική: HRV υπολογίζεται μόνο πάνω σε **NN intervals** (Normal-to-Normal), όχι σε όλα τα RR.

ΕΝΟΤΗΤΑ 9

Τύποι παλμών & αρρυθμίες

Normal vs PVC — μορφολογία

Τι είναι μια PVC;

PVC = Premature Ventricular Contraction = Πρώιμη Κοιλιακή Συστολή

Παλμός που ξεκινά από **έκτοπο σημείο μέσα στην κοιλία** — όχι από τον SA node. Το ηλεκτρικό σήμα γεννιέται σε λάθος μέρος και διαδίδεται "στραβά" — όχι μέσω του γρήγορου His-Purkinje συστήματος, αλλά κύτταρο-σε-κύτταρο.

4 χαρακτηριστικά διάγνωσης:

1. **Πρώιμος** — εμφανίζεται νωρίτερα από τον αναμενόμενο (RR πριν: μικρό).
2. **Αντισταθμιστική παύση** — RR μετά: μεγάλο (το επόμενο SA σήμα φτάνει σε κοιλίες που ακόμα είναι σε **refractory period** → αγνοείται· περιμένουμε το μεθεπόμενο).
3. **Πλατύ QRS** (> 120 ms) — γιατί το σήμα ταξιδεύει εκτός του γρήγορου His-Purkinje συστήματος (αργή cell-to-cell αγωγή).
4. **Διαφορετική μορφολογία** — συχνά αντεστραμμένη πολικότητα (το διάγραμμα

PVC — γιατί μας ενδιαφέρει κλινικά;

Συνήθως καλοήθης, αλλά:

- >10% των παλμών = PVC → πιθανό σημάδι υποκείμενης καρδιοπάθειας.
- R-on-T phenomenon: αν το PVC πέσει πάνω στο T wave του προηγούμενου παλμού (μέσα στη "vulnerable period"), μπορεί να πυροδοτήσει **κοιλιακή μαρμαρυγή (V-fib)** → ανακοπή.
- Bigeminy: εναλλαγή Normal-PVC-Normal-PVC... (κάθε 2ος παλμός είναι PVC).
- Trigeminy: κάθε 3ος παλμός είναι PVC.
- Couplet / Triplet: 2 ή 3 PVCs στη σειρά.
- VT (ventricular tachycardia): ≥ 3 διαδοχικά PVCs με HR > 100 → **επείγον**.

Άλλοι τύποι έκτοπων παλμών:

Τύπος	Προέλευση	Στο ECG
APC (atrial)	έκτοπο σημείο στους κόλπους	διαφορετικό P, κανονικό QRS

Άσκηση 7 — Καταμέτρηση beat types

▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 7

Αναμενόμενο για κάθε ομάδα (ενδεικτικά):

Record	Total	N (%)	V (%)
100	~2270	~99%	~1%
106	~2090	~75%	~25%
119	~2090	~80%	~20%


Συζήτηση:


- Γιατί το 100 έχει σχεδόν μηδενικά PVCs;
- Πώς θα διέκρινε ένας γιατρός μια "ασφαλή" από μια "επικίνδυνη" συχνότητα PVC;

Άσκηση 8 — Overlay μορφολογίας

Τεχνική overlay (epoch averaging):

- Κόβουμε ± 0.3 sec γύρω από κάθε R peak \rightarrow "παράθυρα" ίδιου μήκους.
- Τα ζωγραφίζουμε όλα μαζί στο ίδιο άξονα \rightarrow **μοτίβο** μορφολογίας.
- Ο μέσος όρος δίνει τον "τυπικό" παλμό κάθε κατηγορίας.

 Είναι η ίδια ιδέα με το **ERP** (Event-Related Potential) στο EEG — τυπική τεχνική σε όλα τα βιοσήματα.

 Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 8

Παρατηρήστε στο **average plot**:

- **Πλάτος QRS**: το PVC είναι πλατύτερο (> 120 ms);
- **Amplitude**: το PVC συχνά μεγαλύτερο (αλλά εξαρτάται από lead);

Άσκηση 9 — RR analysis ανά τύπο

Υπενθύμιση φυσιολογίας PVC:

Παλμός	RR πριν	RR μετά
Normal	normal	normal
PVC	μικρό (πρώιμος)	μεγάλο (παύση)

▶ Τρέξτε & συμπληρώστε: Άσκηση 9 — δύο histograms στο ίδιο plot.

Συζήτηση:

- Το PVC histogram είναι **μετατοπισμένο αριστερά** (μικρότερα RR);
- Υπάρχει **bimodality** στα PVC RRs (μικρό + μεγάλο μαζί); Γιατί;

Rule-based arrhythmia detection

Πώς δουλεύει & ποια τα όρια

Ο κανόνας (βασισμένος στον z-score):

$$|\text{RR}_i - \overline{\text{RR}}| > k \cdot \sigma_{\text{RR}}$$

Αν υποθέσουμε ότι τα RR ακολουθούν Gaussian κατανομή:

- $k = 1.5$ → flag για ~13% των φυσιολογικών beats (false positive heavy).
- $k = 2.0$ → flag για ~5%.
- $k = 2.5$ → flag για ~1.2%.

k	Ευαισθησία (Sensitivity)	Ειδικότητα (Specificity)
1.5	υψηλή	χαμηλή
2.0	μέτρια	μέτρια
2.5	χαμηλή	υψηλή

ΕΝΟΤΗΤΑ 10

Σύγκριση ομάδων & συζήτηση


Συμπληρώστε τον κοινό πίνακα

Μέτρηση	Ομάδα A (100)	Ομάδα B (106)	Ομάδα C (119)
HR (bpm)			
SDNN (ms)			
RMSSD (ms)			
Total beats			
PVC count			
PVC %			
Suspicious (k=2)			

▶ Τρέξτε: κελί "ΤΕΛΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ" σε κάθε ομάδα και συμπληρώστε.

Ερωτήσεις συζήτησης

1. Ποιο record είναι το πιο "υγιές"; Με ποιο κριτήριο το συμπεραίνετε; (HR; PVC%; SDNN;)
2. Ποιο έχει το υψηλότερο SDNN; Είναι υγιές ή τεχνητά υψηλό λόγω αρρυθμιών;
3. Σχέση PVC% και SDNN — υπάρχει συσχέτιση στα 3 records;
4. Ο rule-based detector πέτυχε; Αν όχι, πού απέτυχε:
 - Μέτρησε λιγότερα από τα πραγματικά PVCs (false negatives);
 - Μέτρησε περισσότερα (false positives);
5. Τι θα βελτιώνατε; Ποιο feature θα προσθέτατε; (Πλάτος QRS; Σχήμα; Δίαυλο 2;)

 Η συζήτηση αυτή είναι πιο σημαντική από τους αριθμούς. Σκεφτείτε σαν κλινικός ερευνητής, όχι σαν αλγόριθμος.

BONUS

Spectral HRV & Machine Learning

Frequency-domain HRV

Ιδέα: Εφαρμόζουμε FFT στα RR intervals (όχι στο raw ECG!) — και βλέπουμε σε ποιες συχνότητες "ζει" η μεταβλητότητα. Η σειρά των RR είναι ένα **νέο σήμα** χαμηλής συχνότητας (~1 δείγμα/sec).

Band	Range (Hz)	Περίοδος	Φυσιολογική σημασία
VLF	0.003 - 0.04	25-300 sec	Θερμορύθμιση, renin-angiotensin, ορμονικές
LF	0.04 - 0.15	7-25 sec	Baroreflex, μικτό συμπαθητικό + παρασυμπαθητικό
HF	0.15 - 0.40	2.5-7 sec	Παρασυμπαθητικό (συγχρονισμένο με αναπνοή — RSA)

LF/HF ratio: ιστορικά θεωρείται δείκτης συμπαθο/παρα-συμπαθητικής ισορροπίας.

- Υψηλό: συμπαθητική κυριαρχία (στρες).
- Χαμηλό: παρασυμπαθητική κυριαρχία (χαλάρωση).

Machine Learning — Logistic Regression

Πρόβλημα: Δεδομένων RR-based features, να ταξινομήσουμε beat ως Normal ή PVC.

Features (3):

- `RR_before` — interval πριν το beat
- `RR_current` — interval του beat
- `RR_after` — interval μετά

Γιατί δουλεύει:

- PVC → `RR_before` μικρό (πρώιμο), `RR_after` μεγάλο (παύση).
- Normal → όλα κοντά στον μέσο όρο.

5-fold cross-validation → δίκαιη εκτίμηση accuracy.

Σύνοψη

Σήμερα μάθατε να:

- ✓ Διαβάζετε ένα ECG σε φυσιολογικό επίπεδο (P, QRS, T)
- ✓ Καθαρίζετε σήμα από 3 τύπους θορύβου με bandpass filter
- ✓ Ανιχνεύετε R peaks αυτόματα — και να ρυθμίζετε τις παραμέτρους
- ✓ Υπολογίζετε HR & HRV (SDNN, RMSSD) και να ερμηνεύετε τις τιμές
- ✓ Διακρίνετε Normal από PVC με βάση RR & μορφολογία

Αυτές οι τεχνικές είναι οι ίδιες που χρησιμοποιούνται σε:
wearables (Apple Watch, Polar), Holter monitors, ICU patient monitors, ML diagnosis systems.

Επόμενο εργαστήριο: EEG ή PPG; (συζήτηση)