



ΠΕΡΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΠΡΟΤΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ
ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

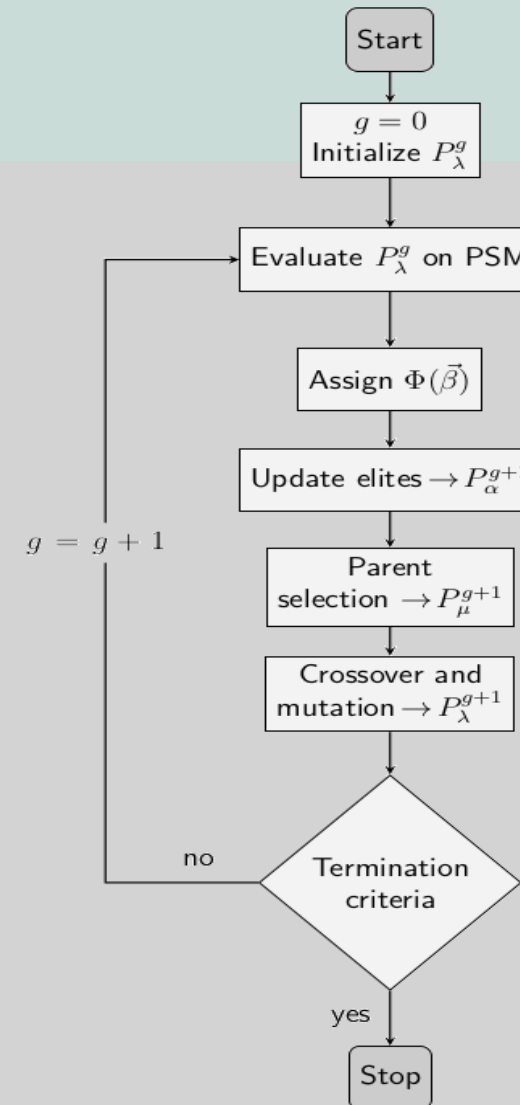
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

Εισαγωγή

- Στόχος η βέλτιστη αξιοποίηση των εξελικτικών αλγορίθμων ενισχυμένων με μεταπρότυπα → επιλογή κατάλληλου μεταπροτύπου και μεθόδου βελτιστοποίησης
 - Βελτιστοποίηση μέσω EASY
 - Ενίσχυση με εξωτερικά μεταπρότυπα του SMT (Surrogate Model Toolbox)
- Τρόποι:
 1. Σύγκριση απλών εξελικτικών και ενισχυμένων με μεταπρότυπα
 2. Σύγκριση μεταξύ εξωτερικών μεταπροτύπων του SMT
 3. Σύγκριση εσωτερικών (EASY) και εξωτερικών (SMT) μεταπροτύπων
- Εφαρμογή στη βελτιστοποίηση
 1. Απλών προβλημάτων ψευδο-μηχανικής
 2. Σχήματος αεροτομής με επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes

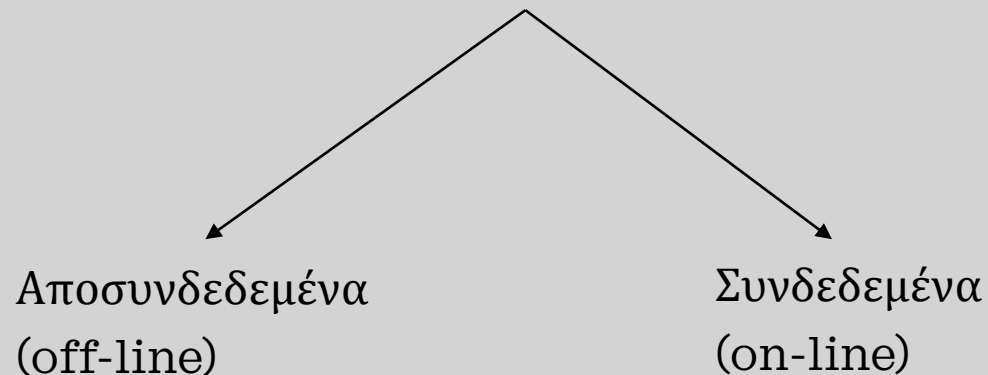
(μ, λ) Evolutionary Algorithms (EAs)

- Στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης με βάση πληθυσμούς (μ, λ)
- Σε κάθε γενιά g γίνεται επιλογή επικρατέστερων υποψήφιων λύσεων $\vec{\beta} \in P_\lambda^g$ μέσω της $\Phi(\vec{\beta})$, αφού πρώτα αξιολογηθούν στο PSM (Problem-Specific Model)
- Οι επικρατέστερες λύσεις αποθηκεύονται στο σύνολο P_e
- Ανανεώνεται στο σύνολο P_α^{g+1} μέσω τελεστών ελιτισμού
- Γίνεται η επιλογή γονέων της επόμενης γενιάς P_μ^{g+1}
- Σχηματισμός συνόλου P_λ^{g+1} μέσω ανάμιξης (crossover) και μετάλλαξης (mutation)



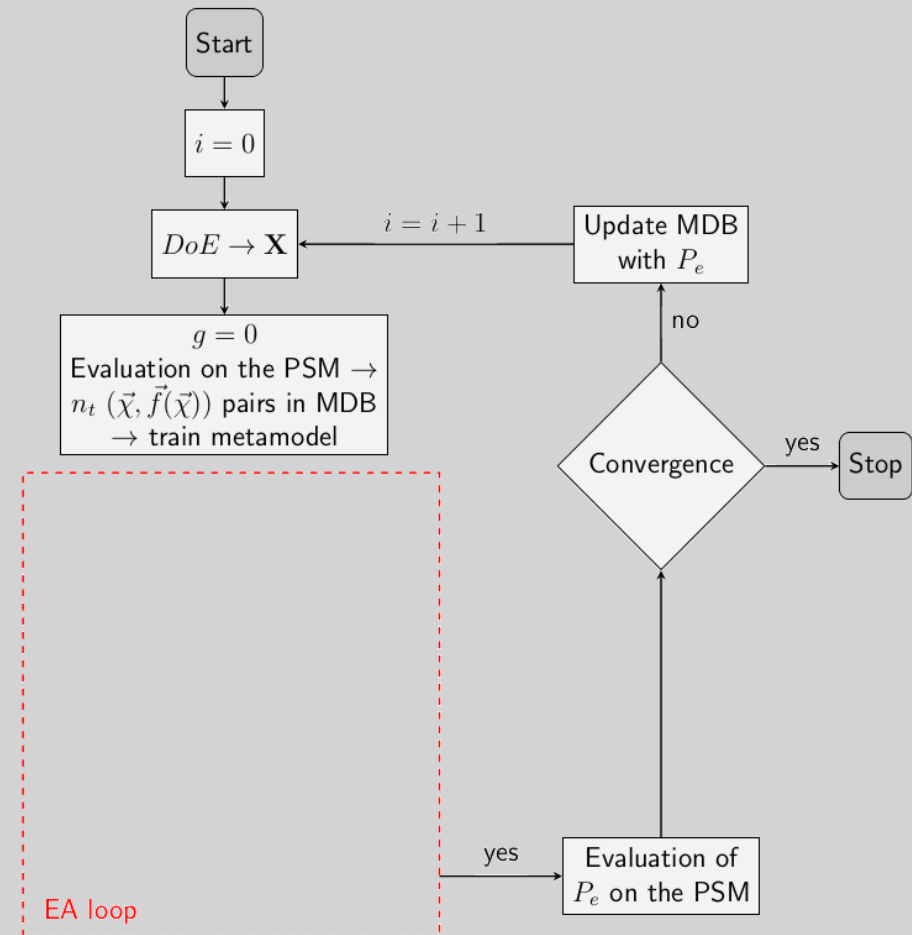
Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms (MAEAs)

- Εκπαίδευση μεταπροτύπου που αντικαθιστά το ακριβό υπολογιστικά PSM
- Μείωση του υπολογιστικού κόστους της αξιολόγησης
- Πρόβλεψη μεταπροτύπου → ανάγκη επαναξιολόγησης στο PSM
- Τρόποι εκπαίδευσης μεταπροτύπων, στη βελτιστοποίηση με MAEAs



MAEAs με off-line Εκπαίδευση

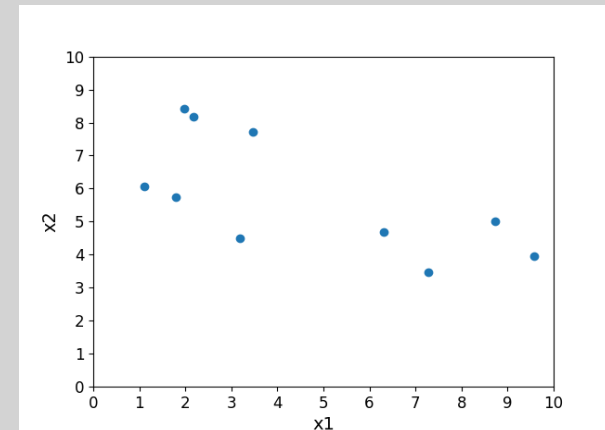
- Εκπαίδευση ενός καθολικού μεταπροτύπου με n_t επιλεγμένα δείγματα εκπαίδευσης
- Η εκπαίδευση και η επαναξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων γίνεται αποκομμένα από την εξέλιξη
- Η σύγκλιση της μεθόδου και ο αριθμός των κύκλων βελτιστοποίησης βασίζεται στην ακρίβεια του καθολικού μεταπροτύπου
- Η δειγματοληψία γίνεται με χρήση DoE (Design of Experiments) σχημάτων που διαθέτει το SMT



DoE Τεχνικές

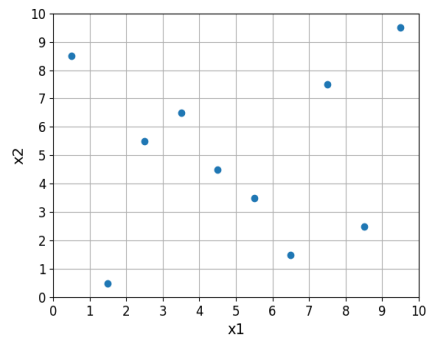
ο Οι διαθέσιμες μέθοδοι DoE με χρήση των οποίων πραγματοποιείται η δειγματοληψία είναι οι εξής:

1. Τυχαία δειγματοληψία (Random sampling)
2. LHS (Latin Hypercube Sampling)
 - Centered
 - Maximin
 - Maximin centered
 - Maxent
 - ESE
3. Παραγοντική δειγματοληψία (πλήρης ή μερική)

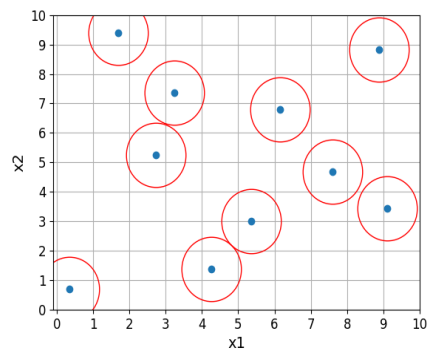


Τυχαία

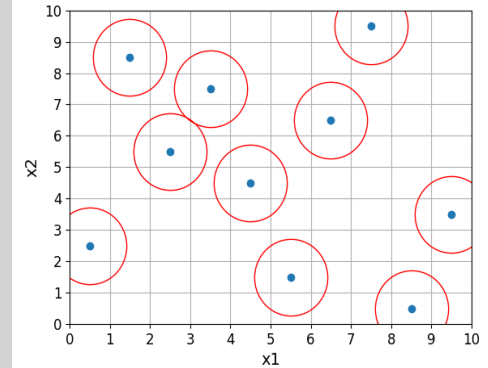
DoE Τεχνικές



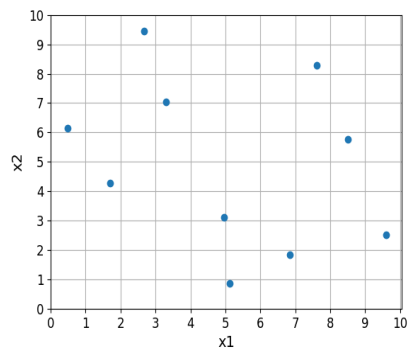
Centered



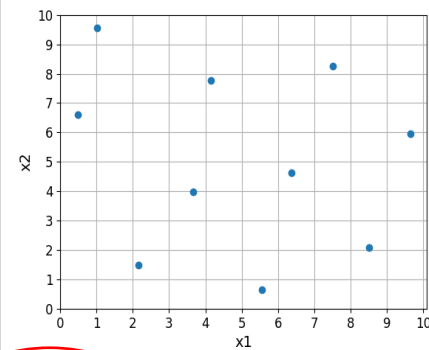
Minmax



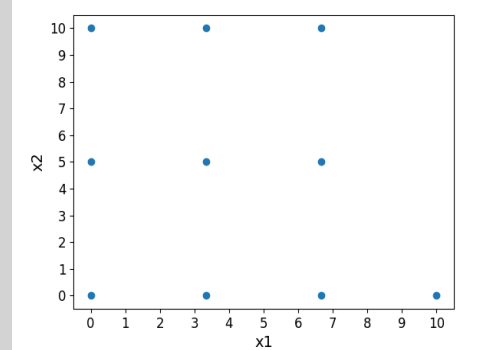
Minmax Centered



Maxent



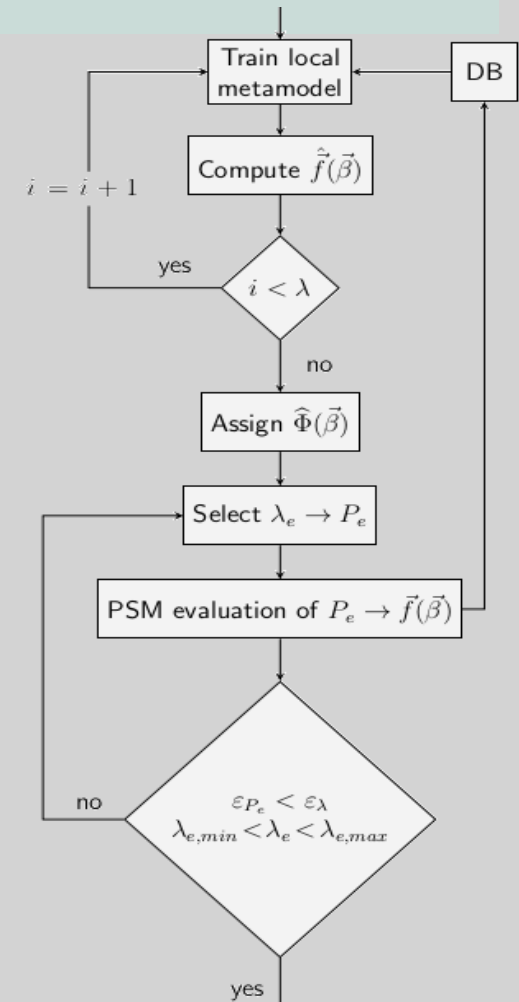
ESE



Παραγοντική (πλήρης ή μερική)

ΜΑΕΑs με on-line Εκπαίδευση

- Εισαγωγή μιας φάσης προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης (Low-Cost Pre-Evaluation LCPE) μέσα στην εξέλιξη και ξεκινά αφού n_{user} $\vec{\beta}$ αξιολογηθούν στο PSM
- Η δειγματοληψία γίνεται στην εγγύτητα κάθε $\vec{\beta} \in P_{\lambda}^g$
- Εκπαίδευση τοπικών-προσωποποιημένων μεταπροτύπων για κάθε $\vec{\beta} \in P_{\lambda}^g$
- Η εκπαίδευση και η αξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων γίνεται μέσα στην εξέλιξη



Σύζευξη SMT με EASY σε MAEAs

- MAEAs με on-line εκπαιδευμένα εξωτερικά μεταπρότυπα → σύνταξη των εξής κωδίκων σε Python που εκτελούν τις παρακάτω ενέργειες:
 1. Αξιολόγηση των δειγμάτων στο PSM
 2. Εκπαίδευση του μεταπροτύπου
 3. Πρόβλεψη με βάση το εκπαιδευμένο μεταπρότυποΌλες οι διεργασίες της βελτιστοποίησης καλούνται μέσα από τον EASY με χρήση κατάλληλα διαμορφωμένων batch αρχείων.
- MAEAs με on-line εκπαιδευμένα εσωτερικά μεταπρότυπα → μόνο ένας κώδικας για την αξιολόγηση των δειγμάτων στο PSM
- Στους MAEAs με off-line εκπαίδευση όλες οι διεργασίες της βελτιστοποίησης (με EASY) καλούνται μέσα από ένα καθολικό κώδικα της Python → κώδικας για δειγματοληψία και επαναξιολόγηση τής 'βέλτιστης' λύσης με το PSM.

Εξωτερικά Μεταπρότυπα

- Τα διαθέσιμα μεταπρότυπα στο SMT είναι τα εξής:
 1. RBFs (Radial Basis Functions)
 2. Kriging
 3. KPLS
 4. KPLSK

Βελτιστοποίηση Συγκολλητής Δοκού ενός Στόχου

- Μείωση του κόστους κατασκευής [\$] με 4 μεταβλητές σχεδιασμού και 5 κατασκευαστικούς περιορισμούς

$$\min f(\vec{\beta}) = 1.10471h^2l + 0.04811tb(14.0 + l)$$

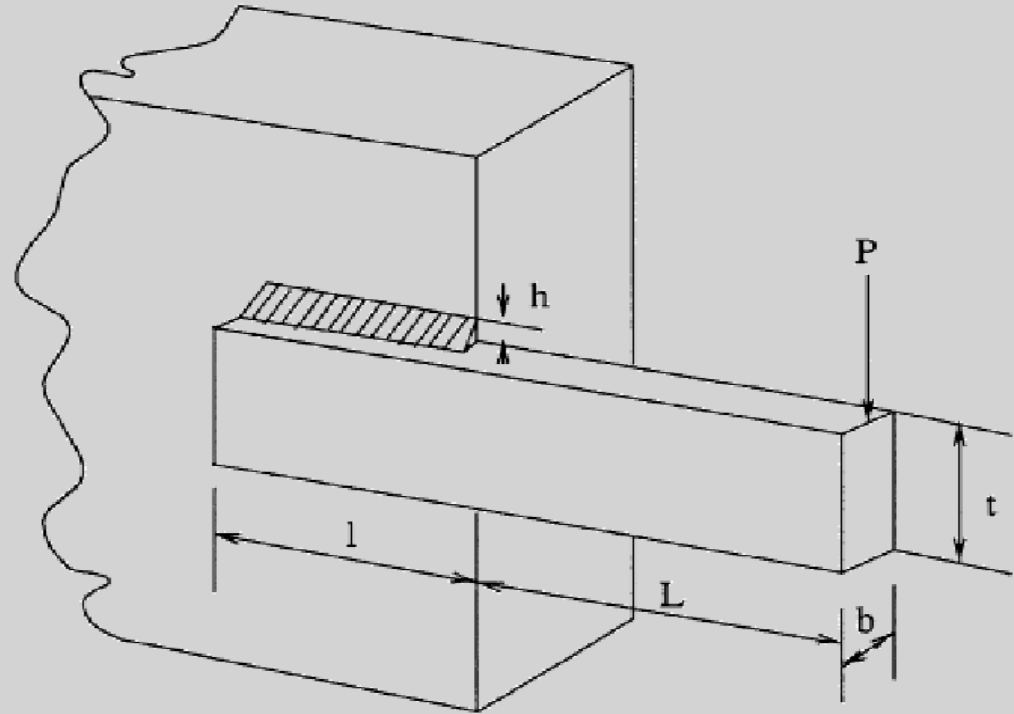
$$\text{subject to } c_1(\vec{\beta}) = \tau(\vec{\beta}) - \tau_{max} \leq 0$$

$$c_2(\vec{\beta}) = \sigma(\vec{\beta}) - \sigma_{max} \leq 0$$

$$c_3(\vec{\beta}) = h - b \leq 0$$

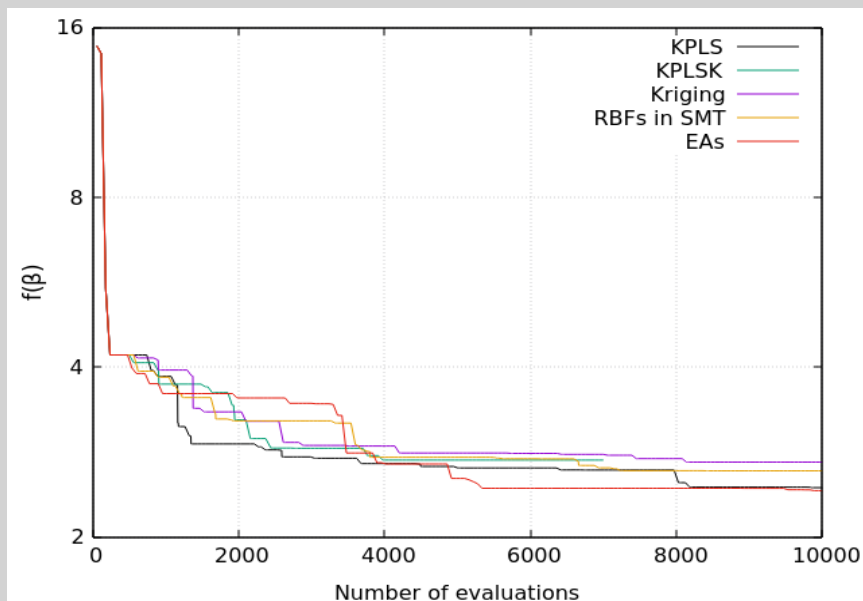
$$c_4(\vec{\beta}) = \delta(\vec{\beta}) - \delta_{max} \leq 0$$

$$c_5(\vec{\beta}) = P - P_c(\vec{\beta}) \leq 0$$

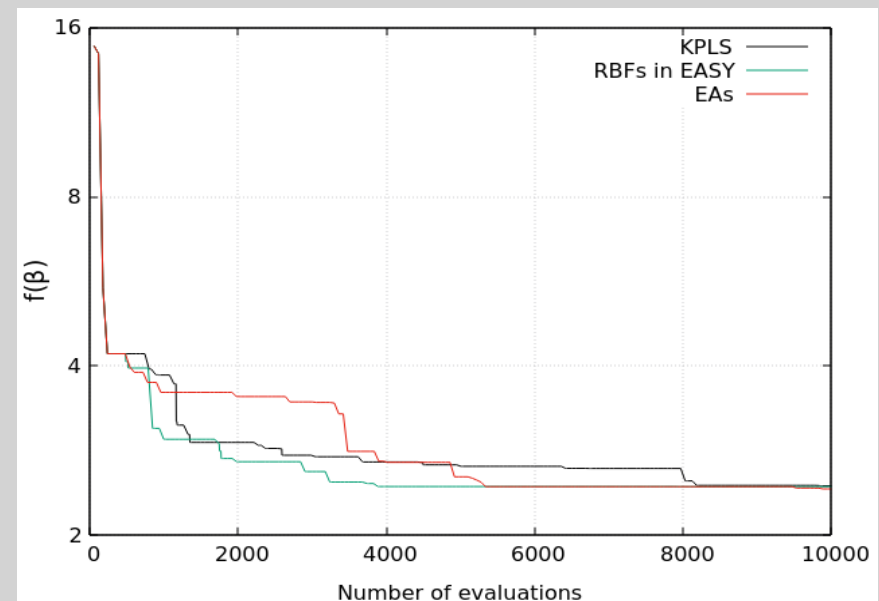


Βελτιστοποίηση Συγκολλητής Δοκού ενός Στόχου

- Αποτελέσματα βελτιστοποίησης ΜΑΕAs και ΕAs



Σύγκριση μεταπροτύπων του SMT (on-line)

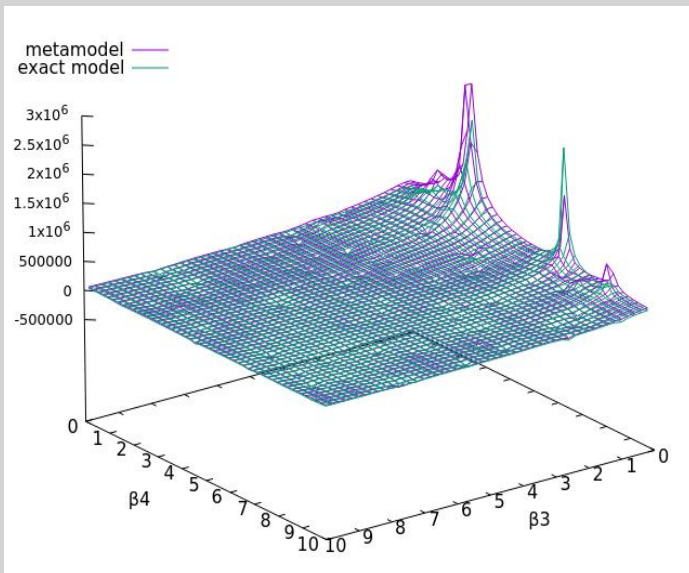


Σύγκριση KPLS και RBFs του EASY (on-line)

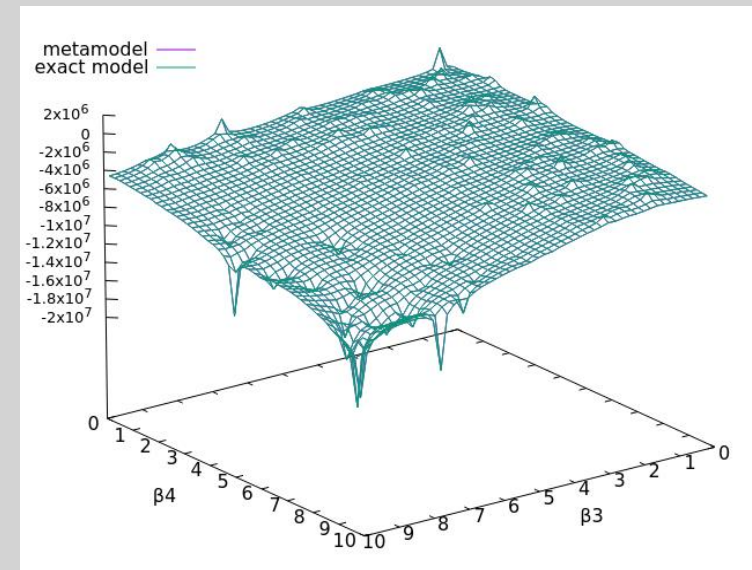
	Μέσο αποτέλεσμα	\vec{n}_{PSM}	\vec{n}_{meta}
ΜΑΕAs, on-line, SMT	2.54	10000	11579
ΜΑΕAs, on-line, EASY	2.53	10000	14422
ΜΑΕAs, off-line, SMT	3.12	388	23064
ΕAs	2.59	10000	-

Βελτιστοποίηση Συγκολλητής Δοκού ενός Στόχου

- Η κακή σύγκλιση των ΜΑΕΑs με off-line εκπαίδευση οφείλεται στην φύση των περιορισμών και την κακή εκπαίδευση των σχετικών μεταπροτύπων
- Γίνεται μετασχηματισμός των εξισώσεων των περιορισμών c_2 και c_4



Εκπαίδευση αρχικής εξίσωσης c_2

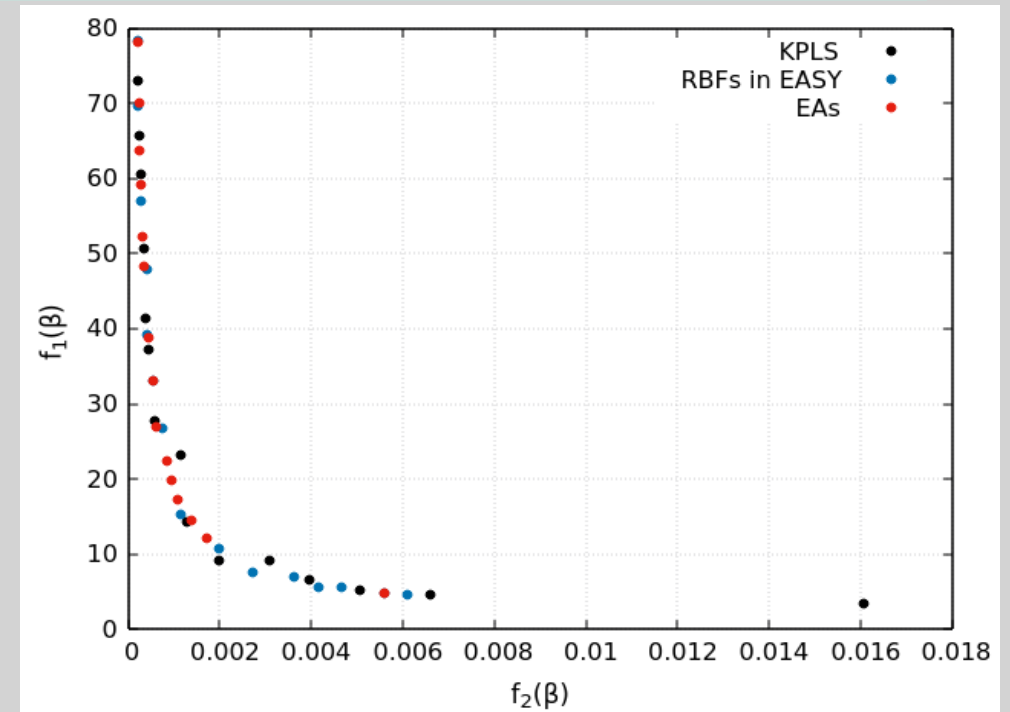


Εκπαίδευση μετασχηματισμένης εξίσωσης c_2

Βελτιστοποίηση Συγκολλητής Δοκού δύο Στόχων

- 2^{ος} στόχος η ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης δ στο άκρο της δοκού με 4 κατασκευαστικούς περιορισμούς
- Βελτιστοποίηση μέσω MAEAs με on-line εκπαίδευση
- Μέθοδος δείκτη υπερόγκου $H(F)$ με σημείο αναφοράς το (0.0181, 98.27), δίνει για τα μέτωπα:

Δείκτης υπερόγκου $H(F)$	
MAEAs, on-line, SMT	1,622
MAEAs, on-line, EASY	1.6215
EAs	1.6061



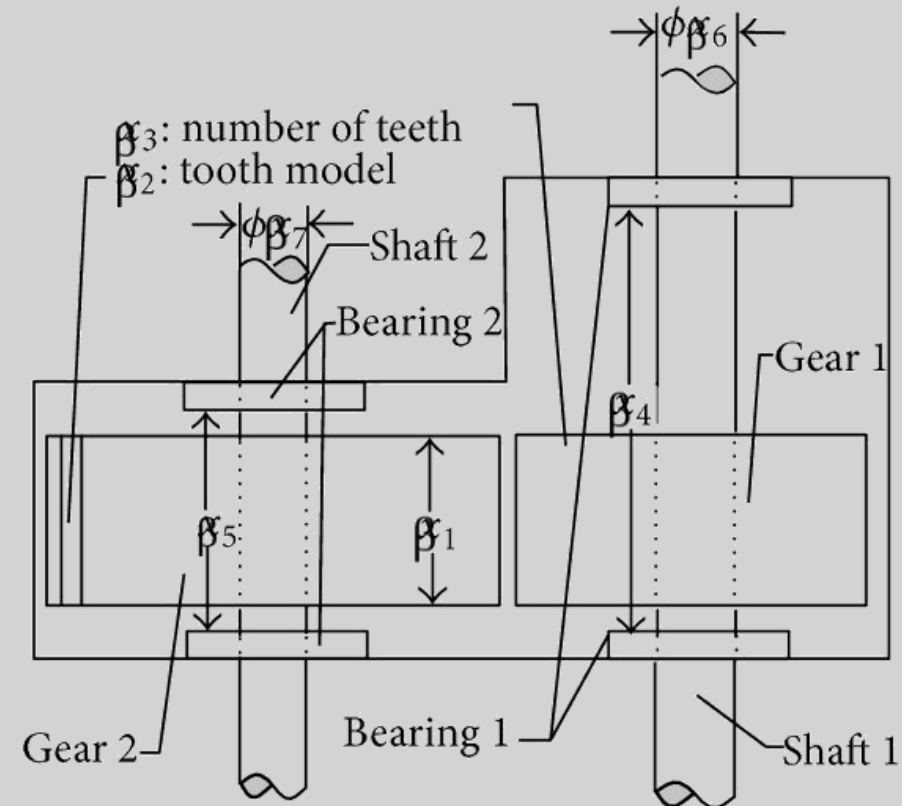
Pareto front

Βελτιστοποίηση Μειωτήρα Ταχύτητας ενός Στόχου

- Μείωση του συνολικού βάρους της κατασκευής [g] με 7 μεταβλητές σχεδιασμού και 11 κατασκευαστικούς περιορισμούς

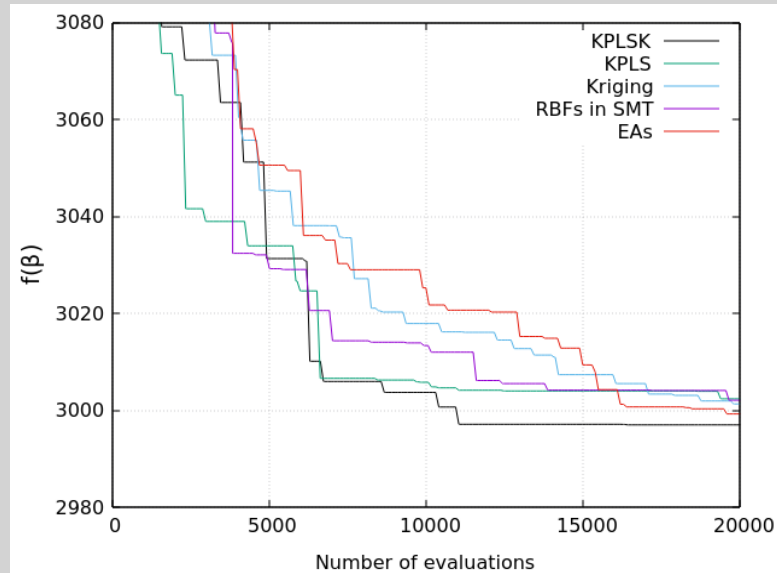
$$\min f(\vec{\beta}) = 0.7854bm^2 (3.3333N_{teeth}^2 + 14.9334N_{teeth} - 43.0934) - 1.508 (d_1^2 + d_2^2) \\ 7.4777 (d_1^3 + d_2^3) + 0.7854 (L_1d_1^2 + L_2d_2^2)$$

- Μεταβλητές σχεδιασμού:
 - Πάχος b του κινούμενου γραναζιού
 - Module m των συνεργαζόμενων γραναζιών
 - Αριθμός δοντιών N_{teeth} του pinion γραναζιού
 - Μήκη L_1, L_2
 - Διάμετροι d_1, d_2

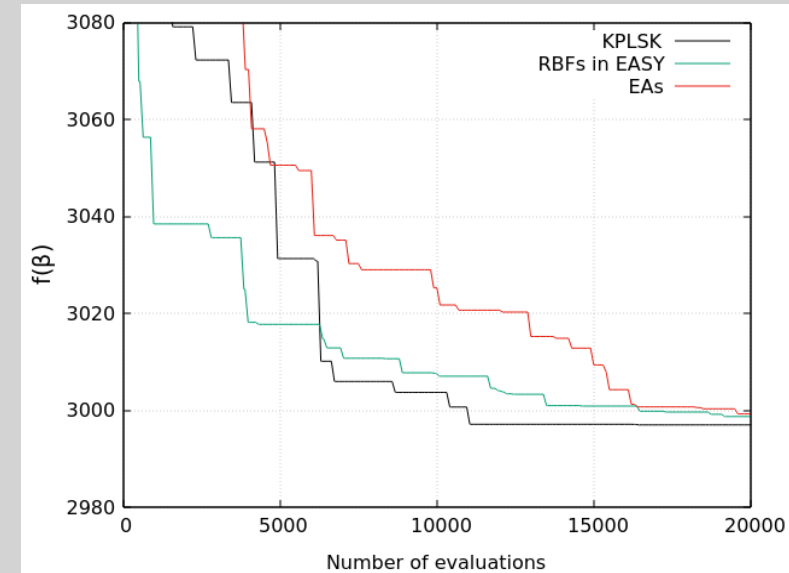


Βελτιστοποίηση Μειωτήρα Ταχύτητας ενός Στόχου

- Αποτελέσματα βελτιστοποίησης MAEAs και EAs



Σύγκριση μεταπροτύπων του SMT (on-line)

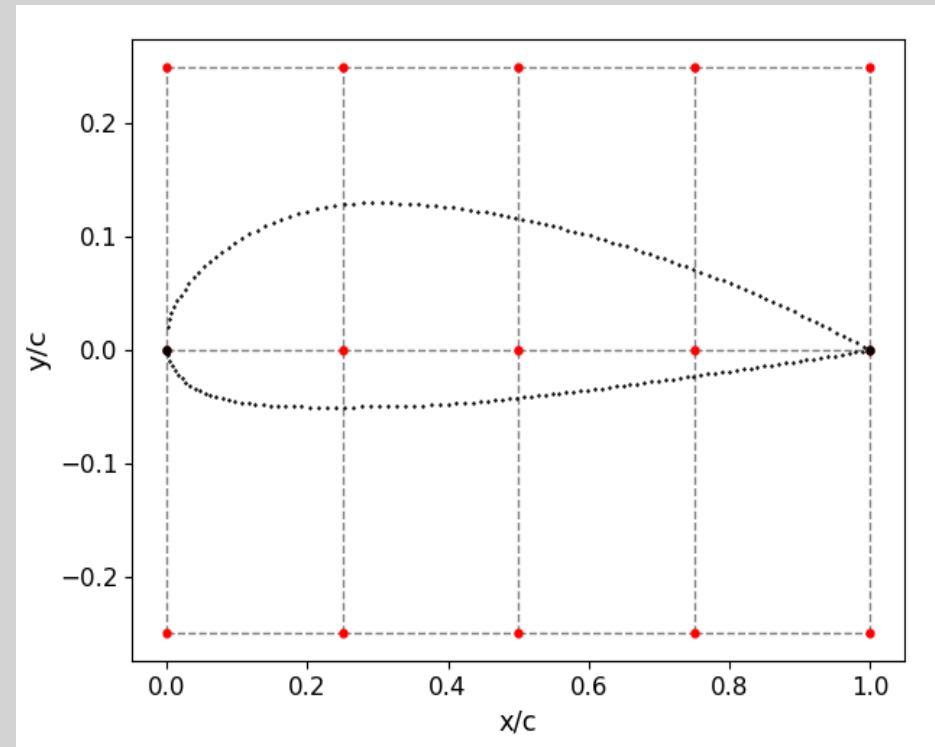


Σύγκριση KPLSK και RBFs του EASY (on-line)

	Μέσο αποτέλεσμα	\vec{n}_{PSM}	\vec{n}_{meta}
MAEAs, on-line, SMT	3002.68	20000	22792
MAEAs, on-line, EASY	3005.46	20000	24775
MAEAs, off-line, SMT	3004.34	151	18239
EAs	3006.01	20000	-

Βελτιστοποίηση NACA 4318

- Βελτιστοποίηση σχήματος αεροτομής
- Προσαρμογή πλέγματος με χρήση ογκομετρικών NURBS με 15 σημείων ελέγχου → 13 μεταβλητές σχεδιασμού οι κατά y συντεταγμένες
- Επίλυση των RANS εξισώσεων για την περίπτωση μόνιμης, συμπιεστής ροής με χρήση PUMA
- Χρήση Spalart-Allmaras μοντέλου τύρβης



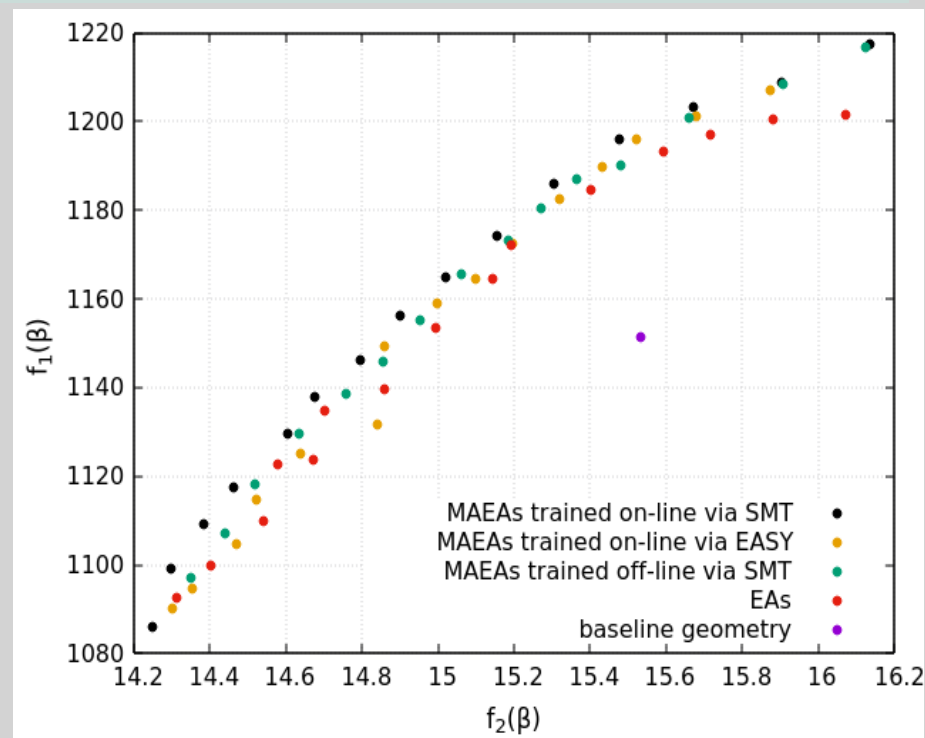
Βελτιστοποίηση Αεροτομής δύο Στόχων σε Συνθήκες Απογείωσης

- Συνθήκες πτήσης σε υψόμετρο $h = 0 \text{ m}$

	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$p \text{ [bar]}$	$T \text{ [K]}$	Mach	Re_∞	$\alpha \text{ [}^\circ\text{]}$
Αέρας	1.225	1.01325	288	0.15	$3.492 \cdot 10^6$	10

- Στόχοι: $f_1 = \max L$, $f_2 = \min D$
- Μέθοδος δείκτη υπερόγκου $H(F)$ με σημείο αναφοράς το $(\max\{x \in F\} + 0.25, \min\{y \in F\} - 20)$, δίνει για τα μέτωπα:

Μέσος Δείκτης υπερόγκου $H(F)$	
MAEAs, on-line, SMT	223.65
MAEAs, on-line, EASY	209.37
MAEAs, off-line, SMT	215.08
EAs	202.20



Pareto front

Βελτιστοποίηση Αεροτομής ενός Στόχου σε Συνθήκες Απογείωσης

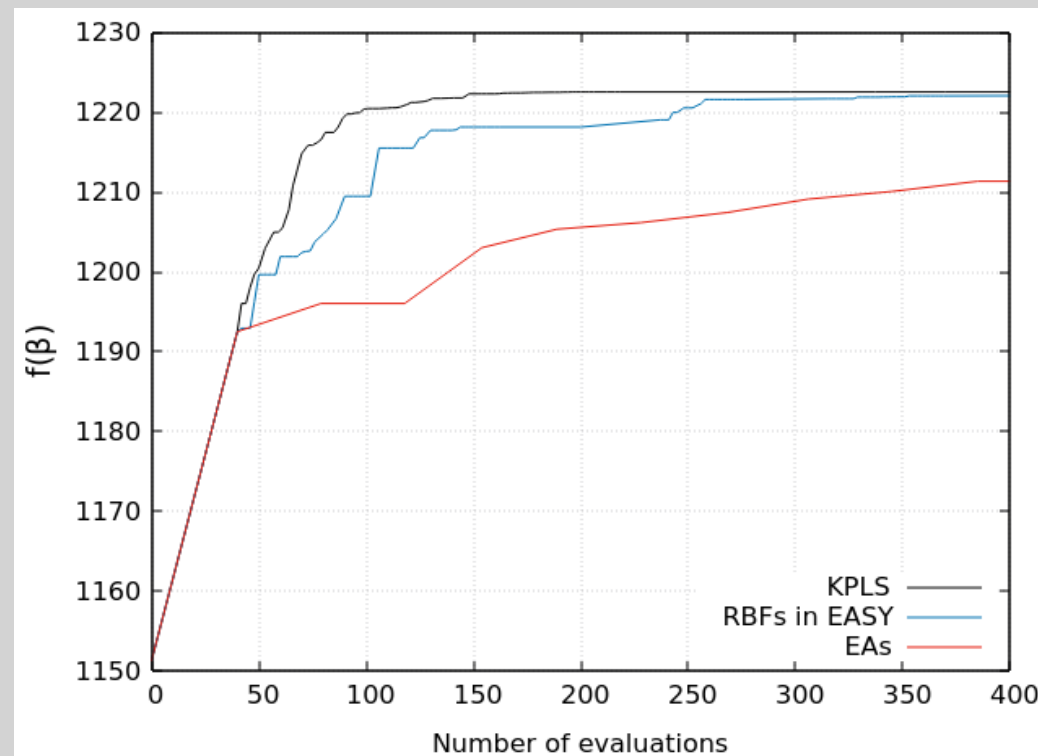
- Συνθήκες πτήσης σε υψόμετρο $h = 0 \text{ m}$

- Στόχος $\max f(\vec{\beta}) = L$

subject to $c_1(\vec{\beta}) = D - 1.08D_{bst} \leq 0$

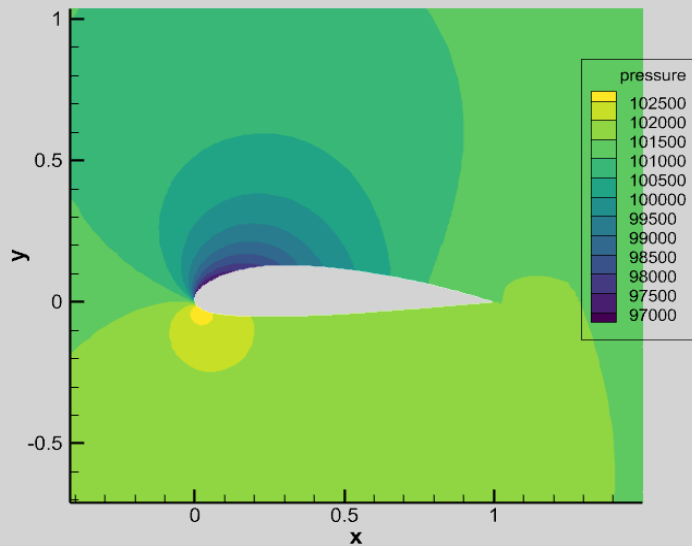
Σε συνθήκες απογείωσης $D_{bst} = 15.53 \text{ N}$

Μέσο αποτέλεσμα		\vec{n}_{PSM}	\vec{n}_{meta}
MAEAs, on-line, SMT	1222.33	400	2988
MAEAs, on-line, EASY	1221.90	400	4000
MAEAs, off-line, SMT	1221.27	81	1000
EAs	1211.54	400	-

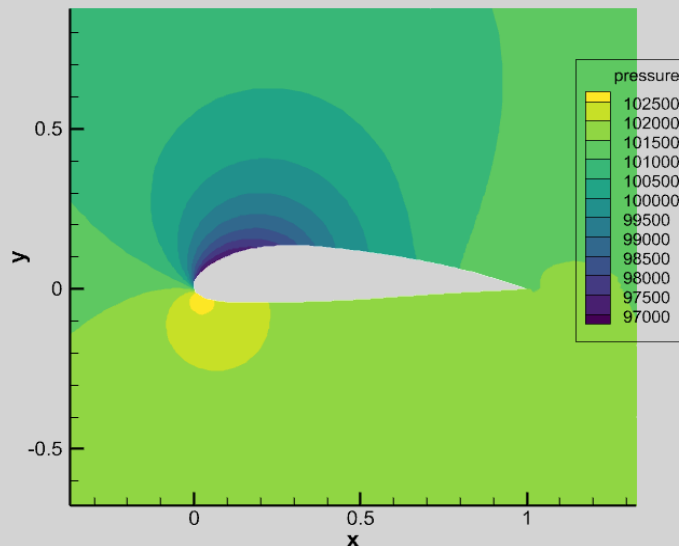


MAEAs με on-line εκπαίδευση vs EAs

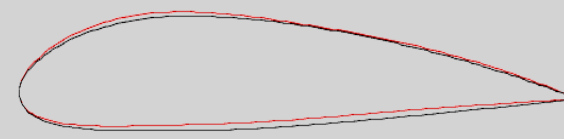
Βελτιστοποίηση Αεροτομής ενός Στόχου σε Συνθήκες Απογείωσης



Αρχική γεωμετρία



Βελτιστοποιημένη γεωμετρία



Βελτιστοποιημένη γεωμετρία

- Αύξηση 6.1% της άνωσης
- Θετική μετατόπιση της γραμμής κύρτωσης

Βελτιστοποίηση Αεροτομής ενός Στόχου σε Συνθήκες Ευθείας Πτήσης

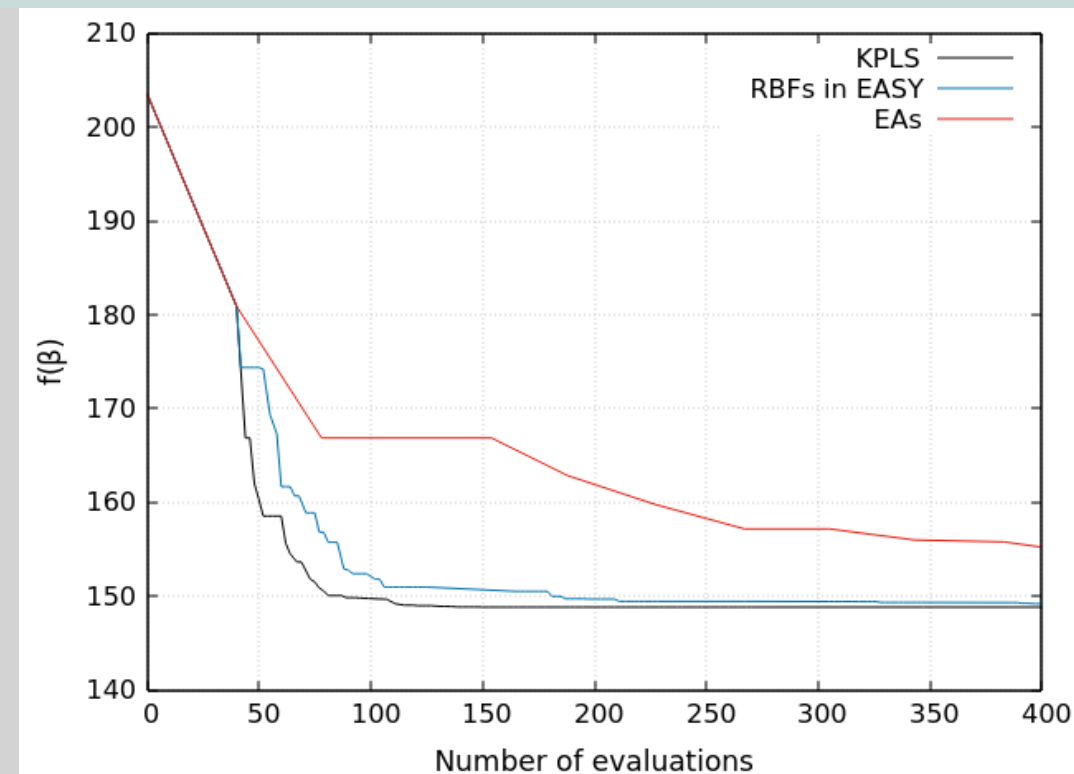
- Συνθήκες πτήσης σε υψόμετρο $h = 11000$ m

	ρ [kg/m ³]	p [bar]	T [K]	Mach	Re_∞	α [°]
Αέρας	0.364805	0.227	216.8	0.7	$4.797 \cdot 10^6$	2

- Στόχος: $\min f(\vec{\beta}) = D$
subject to $c_1(\vec{\beta}) = L - 0.92L_{bsl} \geq 0$

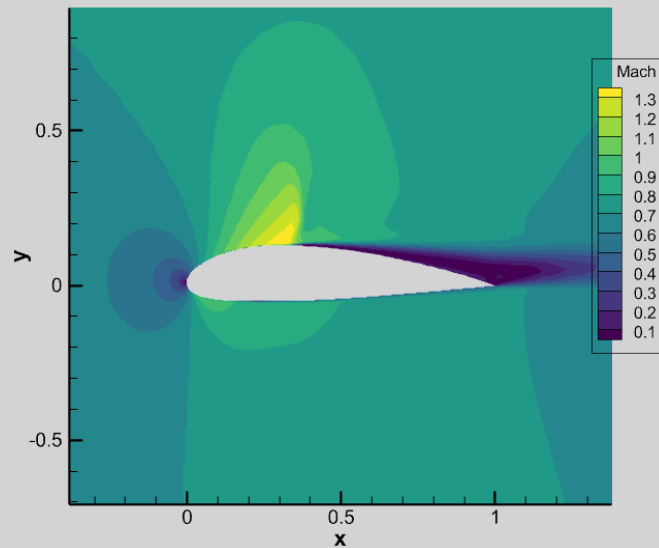
- Σε συνθήκες ευθείας πτήσης $L_{bsl} = 1123.81$ N

	Μέσο αποτέλεσμα	\vec{n}_{PSM}	\vec{n}_{meta}
MAEAs, on-line, SMT	148.86	400	2988
MAEAs, on-line, EASY	149.57	400	4000
MAEAs, off-line, SMT	149.60	87	2000
EAs	154.63	400	-

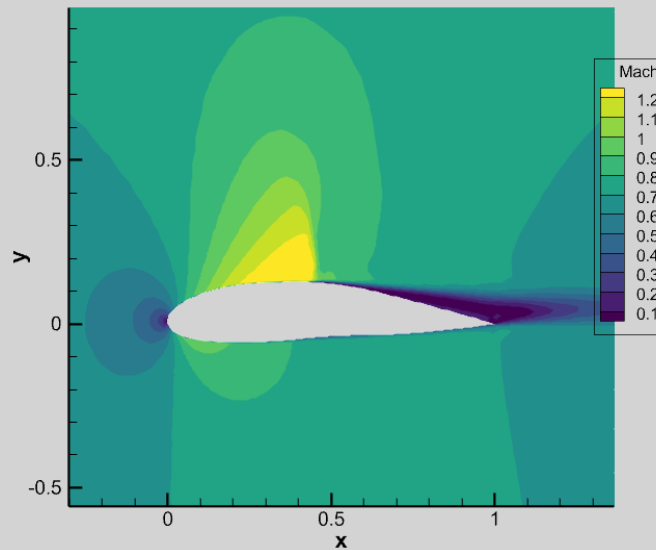


MAEAs με on-line εκπαίδευση vs EAs

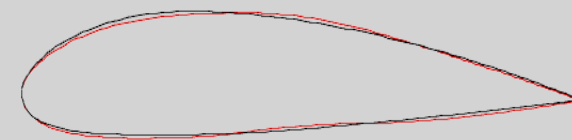
Βελτιστοποίηση Αεροτομής ενός Στόχου σε Συνθήκες Ευθείας Πτήσης



Αρχική γεωμετρία



Βελτιστοποιημένη γεωμετρία



Βελτιστοποιημένη γεωμετρία

- Μείωση 26.3% της οπισθέλκουσας
- Μετατόπιση της ζώνης αποκόλλησης της ροής από $x/c = 0.33$, $x/c = 0.43$
- Αρνητική μετατόπιση της γραμμής κύρτωσης

Συμπεράσματα

1. Σε απλά προβλήματα ψευδο-μηχανικής η εφαρμογή εξωτερικών μεταπροτύπων εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των εσωτερικών RBFs
2. Στην περίπτωση της αεροδυναμικής εφαρμογών η χρήση του KPLS με on-line είτε off-line εκπαίδευση, οδήγησε σε 60-80% μείωση του υπολογιστικού κόστους συγκριτικά με τα RBFs του EASY
3. Στις εφαρμογές που μελετήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρατηρήθηκε:
 - Διαφαινόμενη υπεροχή των KPLS, KPLSK μεταξύ των όλων των χρησιμοποιούμενων μεταπροτύπων
 - Υπεροχή των MAEAs με on-line εκπαίδευση έναντι MAEAs με off-line εκπαίδευση και απλών εξελικτικών



ΑΠΟΡΙΕΣ/ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ