



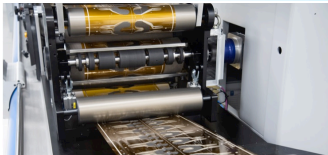
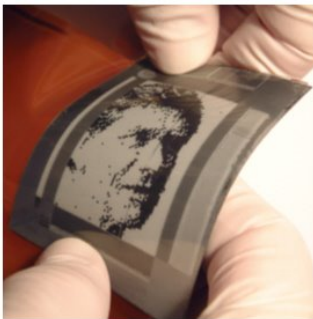
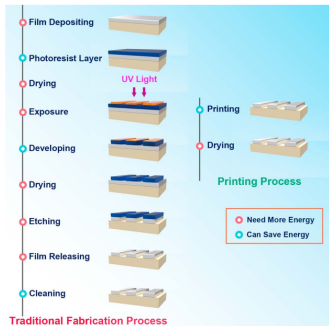
# Διαδικά νευρωνικά δίκτυα για τυπωμένα ηλεκτρονικά

Παναγιώτης Παπανικολάου

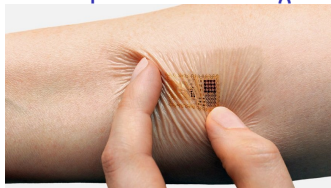
7 Ιουλίου 2023

# Τυπωμένα ηλεκτρονικά

- ▶ Κανονική εκτύπωση με ειδικά μελάνια
- ▶ Αντένες, αισθητήρες, LED, transistors, μπαταρίες...
- ▶ Πολύ φτηνά 
- ▶ Πολύ μεγάλη έκταση/κατανάλωση 





Υπολογιστικά στοιχεία **στα πάντα.**

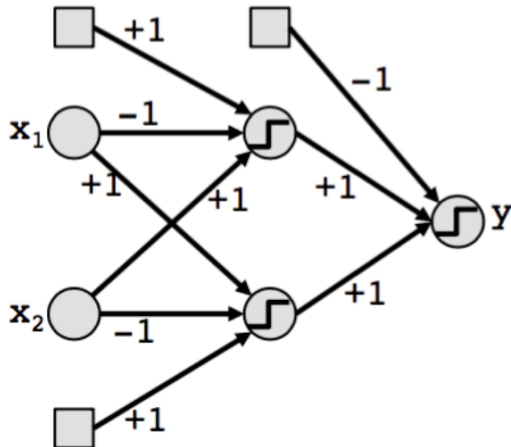


Εκτυπωμένο machine learning

- ▶ Πολλές εφαρμογές classification
- ▶ Δύσκολα υλοποιήσιμο

## Δυσادικά νευρωνικά δίκτυα(BNN)

- ▶ Weights/activations  $\in \{-1, 1\}$  (1 bit)
- ▶ Multiply-accumulate  $\rightarrow$  XNOR-popcount
- ▶ Χαμηλές απαιτήσεις 
- ▶ Λιγότερο αξιόπιστα 



- ▶ Αναλογικοί νευρώνες<sup>1</sup>
- ▶ Bespoke decision trees, SVMs<sup>2</sup>
- ▶ Bespoke approximate MLPs<sup>3</sup>
- ▶ Stochastic computing<sup>4</sup>
- ▶ Sea of gates<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup>Weller et al, Programmable neuromorphic circuit based on printed electrolyte-gated transistors, in: (Asp-Dac)

<sup>2</sup>Weller et al, Printed machine learning classifiers, in: Annu. Int. Symp. Microarchitecture (Micro)

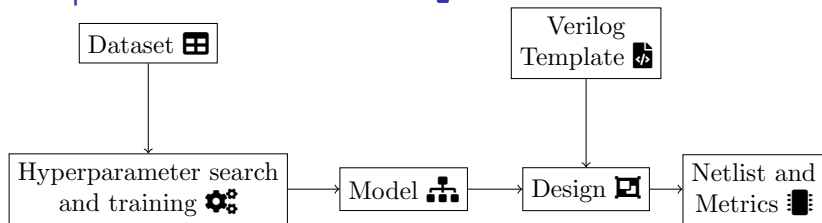
<sup>3</sup>Armeniakos et al, Cross-layer approximation for printed machine learning circuits, in: (Date)

<sup>4</sup>Weller et al, Printed stochastic computing neural networks, in: (Date)







<sup>5</sup>Iordanou et al, Tiny classifier circuits: Evolving accelerators for tabular data, (2023).

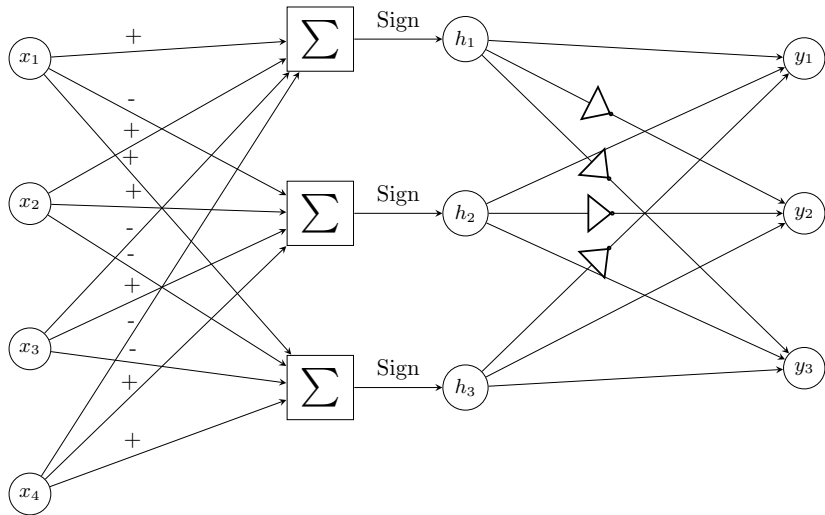
Εξέταση BNN ως προς την υποστήριξη τυπωμένου ML 

Υλοποίηση framework για αυτόματη δημιουργία  
τυπωμένου BNN από dataset 



# Model accuracy ☰

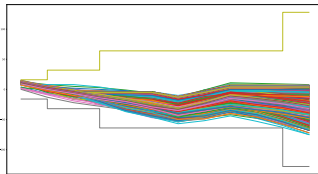
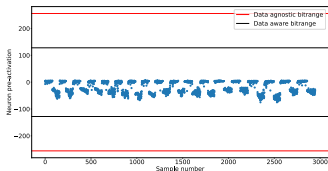
Dataset	FP32	BNN	TNN	MLPC
Cardio 	92	88	90	88
GasId 	90	81	88	–
Har 	74	51	52	–
Pendigits 	99	87	92	94
Redwine 	60	54	58	56
Whitewine 	57	51	50	54



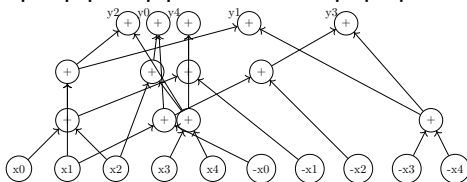


## Απόπειρες βελτιστοποίησης

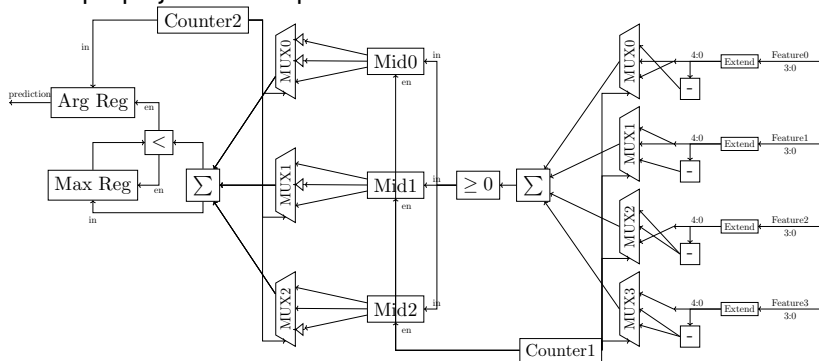
- ▶ Ελάχιστο πλάτος αθροίσματος για υποστήριξη dataset



- ▶ Αριθμητική βελτιστοποίηση πριν τη σύνθεση



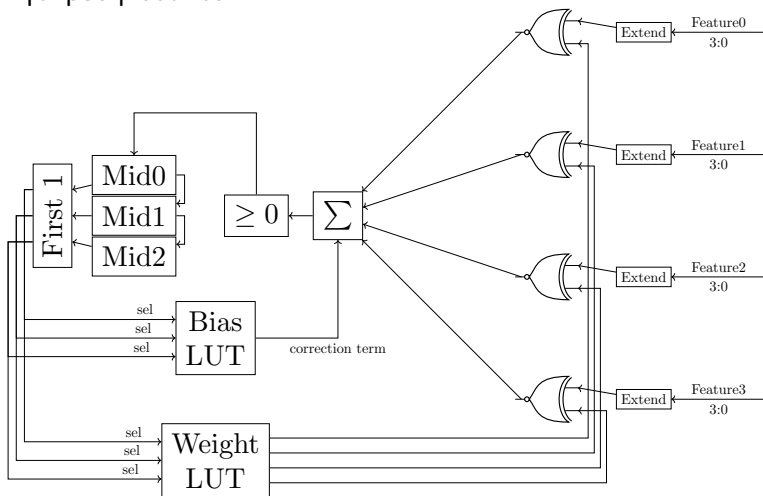
Η καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητα σημαντική  
Υπολογισμός νέου νευρώνα κάθε κύκλο



# Βελτιώσεις στην ακολουθιακή υλοποίηση ►

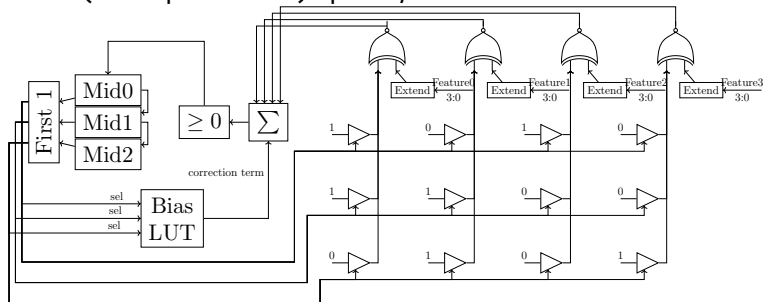
►  $-x \iff \neg x + 1$

► Αφαίρεση counter




# Tristate buffer memory

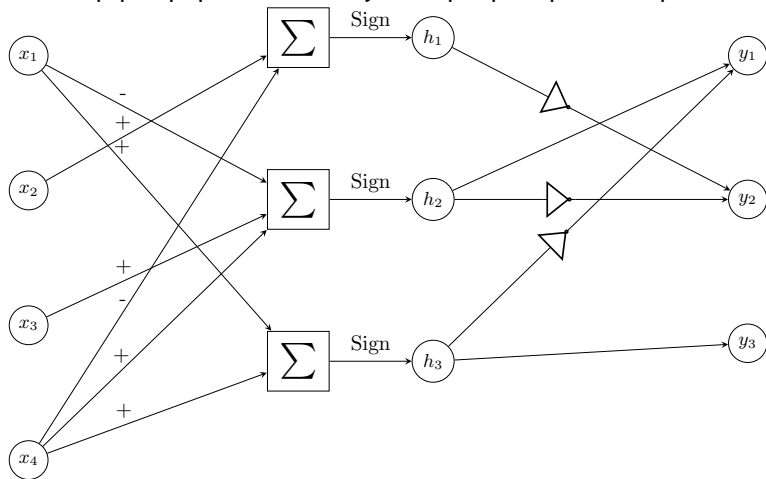
- ▶ Μείωση ισχύος από OR, μεγαλύτερο εμβαδό
- ▶ <30mW (Μπαταρία Molex) για 5/6 model



dataset	combinatorial delay(ms)	sequential delay(ms)	sequential cycles	total sequential delay(ms)
cardio	142	147	43	6321
gasId	260	181	46	8326
Har	165	135	46	6210
pendigits	309	147	50	7350
winered	160	138	46	6348
winewhite	143	129	47	6063

# Ternary weight networks

- ▶ Βάρη  $\in \{-1, 0, 1\}$  αντί  $\{-1, 1\}$
- ▶ Αφαίρεση συνδέσεων με βάρος 0 ✂
- ▶ Καλύτερη ακρίβεια και έως  $2\times$  μικρότερα κόστη 



# Συγκρίσεις

