

Contents

1	Abstract	2
2	Εισαγωγή	3
2.1	Εισαγωγή στην πανταχού παρούσα πληροφορική	3
2.2	Εισαγωγή στα τυπωμένα ηλεκτρονικά	4
2.3	Χρήσεις των τυπωμένων ηλεκτρονικών	7
2.4	TinyML	11
2.5	Εκτυπωμένη μηχανική μάθηση	14
2.6	Στόχος διπλωματικής εργασίας	15
3	Σχετικές εργασίες στη μηχανική μάθηση για τυπωμένα κυκλώματα	16
4	Πληροφοριακό υπόβαθρο - Προαπαιτούμενα	19
4.1	Τεχνικές λεπτομέρειες για τα τυπωμένα ηλεκτρονικά	19
4.2	Μέθοδοι κατασκευής	19
4.3	Μελάνια	23
4.4	Διαδικά νευρωνικά δίκτυα	25
4.5	Σύνολα δεδομένων	26

1 Abstract

Τα τυπωμένα ηλεκτρονικά είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να καταστήσει δυνατή τη διείσδυση της πληροφορικής σε μια μεγάλη ποικιλία καταναλωτικών προϊόντων, χάρη στην υπό του cent κατασκευή τους και τους εύκαμπτους παράγοντες μορφής τους. Πολλές από τις προβλεπόμενες εφαρμογές που θα υποστηρίζουν έχουν να κάνουν με την ταξινόμηση των δεδομένων που συλλέγονται από τυπωμένους αισθητήρες για την εξαγωγή μιας χρήσιμης ιδιότητας σχετικά με το υπό μέτρηση αντικείμενο. Η εκτυπωμένη μηχανική μάθηση (ML) αναπτύσσεται προκειμένου να πραγματοποιούνται τέτοιου είδους ταξινομήσεις από δεδομένα αισθητήρων. Επειδή τα τυπωμένα ηλεκτρονικά έχουν πολύ υψηλότερες απαιτήσεις σε έκταση και κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ηλεκτρονικά, αυτά τα μοντέλα ML πρέπει να εκτελούνται σε περιβάλλον με πολύ περιορισμένους πόρους. Ευτυχώς, η ευκολία κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων με τη χρήση προσθετικών μεθόδων επιτρέπει την πλήρη προσαρμογή του υλικού στο ακριβές εκπαιδευμένο μοντέλο που ενσωματώνει. Αυτό επιτρέπει τη συρρίκνωση των απαιτήσεων σε πόρους κατά πολλούς παράγοντες. Η παρούσα εργασία αξιολογεί τη δυνατότητα ανάπτυξης αρχιτεκτονικών δυαδικών νευρωνικών δικτύων (BNN) ως τυπωμένων ταξινομητών, όπου τα BNN είναι δίκτυα με βάρη και ενεργοποιήσεις που κβαντίζονται σε ένα μόνο bit για τη μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων στο ελάχιστο, γεγονός που τα καθιστά μια καλή υποψήφια αρχιτεκτονική για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

2 Εισαγωγή

2.1 Εισαγωγή στην πανταχού παρούσα πληροφορική

Η τεχνολογία γενικά και πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός παίζει έναν ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο στη ζωή μας και δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι η τάση αυτή θα επιβραδυνθεί σύντομα. Εξακολουθεί ωστόσο να υπάρχει ακόμη ένα σχετικά άκαμπτο χάσμα μεταξύ του πραγματικού κόσμου και του υπολογιστικού τομέα, πράγμα που σημαίνει ότι οι περισσότερες από τις αλληλεπιδράσεις μας με τον κόσμο γύρω μας δεν εμπεριέχουν την πραγματοποίηση οποιουδήποτε υπολογισμού. Δεν είναι δύσκολο να φανταστούμε αμέτρητα παραδείγματα όπου υπολογιστικά στοιχεία θα προσέθεταν αξία σε καθημερινές δραστηριότητες όπως τα ψώνια από το παντοπωλείο ή θα μείωναν την απαιτούμενη εργασία σε διαδικασίες παραγωγής, όπως η μεταποίηση, εάν τα στοιχεία αυτά είχαν σχεδόν μηδενικό κόστος και μεγαλύτερη ενσωματωσιμότητα που συνδέεται με αυτά.

Αν και σχεδόν όλοι στις ανεπτυγμένες χώρες φέρουν μαζί τους και αλληλεπιδρούν με ισχυρούς υπολογιστές παντού όπου τυχαίνει να βρίσκονται, η μορφή της αλληλεπίδρασης δεν μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στο πλαίσιο όπου βρίσκονται. Δεν μπορεί κανείς απλά να ρωτήσει τις μπανάνες που πήρε αν είναι αρκετά ώριμες, να φωνάζει τα κλειδιά του για να βρει πού τα άφησε, να ελέγξει με τα παπούτσια του πόσα βήματα μπορούν να κάνουν ακόμα. Επιπλέον, είναι σαφές ότι οι μη μετρήσιμες διαδικασίες είναι τρομερά μη βελτιστοποιημένες σε σύγκριση με το τι θα μπορούσε να επιτευχθεί αν μια συνεχής ροή λεπτομερούς πληροφόρησης από κάθε ένα από τα στοιχεία που την απαρτίζουν και πρόσβαση σε έλεγχο της κάθε λεπτομέρειας αυτών των στοιχείων ήταν διαθέσιμη. Σκεφτείτε για παράδειγμα ένα αγρόκτημα όπου κάθε μεμονωμένος καρπός σε κάθε δέντρο έχει να παρακολουθείται η πρόοδος της ανάπτυξής του.

Παίρνοντας ουσιαστικά τις ιδέες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και προωθώντας στο λογικό τους όριο, η πανταχού παρούσα πληροφορική (ubiquitous computing) είναι ένα φιλόδοξο ιδανικό για ένα μέλλον όπου κάθε προϊόν είναι μια έξυπνη συσκευή, κάθε παρατηρήσιμη ιδιότητα, για την οποία οποιοσδήποτε θα μπορούσε λογικά να ενδιαφερθεί, είναι προσβάσιμη. Αυτοκίνητα θα είναι σε θέση να πλοηγούνται με ασφάλεια χωρίς πρόσβαση στην όραση ρωτώντας τις θέσεις των κοντινών συσκευών, αφού οτιδήποτε δεν είναι συσκευή άμεσα, έχει τουλάχιστον μία ή περισσότερες προσαρτημένες.

Τα τυπωμένα ηλεκτρονικά είναι σε θέση να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο τουλάχιστον στα πρώτα στάδια ενός τέτοιου μετασχηματισμού. Η εκτύπωση είναι επί του παρόντος η μόνη μέθοδος κατασκευής που μπορεί να παρέχει

υπολογιστικά στοιχεία κάτω του cent, και το κόστος είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο για το πόσο διαδεδομένα μπορούν να γίνουν. Επιπλέον, η μη τοξικότητα είναι ζωτικής σημασίας για να καταστεί δυνατή η προσθήκη τους σε ταχέως κινούμενα καταναλωτικά αγαθά που είναι αναλώσιμα σε αυτές τις κλίμακες. Η ελαστικότητα βοηθά επίσης στην ευκολότερη ενσωμάτωση. Ακόμα και οι σχετικά “μέτριες” σε σύγκριση με το πλήρες όραμα εφαρμογές που μπορούμε να περιμένουμε ότι θα έρθουν τελικά, όπως οι ετικέτες RFID που αντικαθιστούν τους barcodes και επιτρέπουν στα καταστήματα να παρακολουθούν κάθε μεμονωμένο στοιχείο του αποθέματος ή οι τυπωμένοι αισθητήρες ποιότητας τροφίμων που καθιστούν τις ημερομηνίες λήξης παρωχημένες, έχουν μεγάλες δυνατότητες να διαταράξουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών.

Η μηχανική μάθηση μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία κατά πολλές τάξεις μεγέθους σε σύγκριση με το χρόνο που θα χρειαζόνταν εξειδικευμένοι άνθρωποι σε πολλούς τομείς για να σχεδιάσουν ένα υπολογιστικό μοντέλο για να ερμηνεύσουν και να επεξεργαστούν τα δεδομένα των αισθητήρων. Σε πολλές περιπτώσεις, το αρχικό κόστος των μηχανικών θα ήταν αρκετό για να σταματήσει εντελώς η υιοθέτηση του προτύπου. Αν το μόνο που χρειάζεται είναι να συλλεχθούν και να επισημανθούν κάποια δεδομένα αισθητήρων, αυτό μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί από οποιονδήποτε υπάλληλο. Εξαρτόμαστε επίσης από το ότι το autoML είναι αρκετά καλό για τις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές δεδομένων μικρής κλίμακας, καθώς διαφορετικά θα αντιμετωπίζαμε απλώς την ίδια δυσχέρεια με το να χρειαζόμαστε έναν επιστήμονα δεδομένων για κάθε μικρόπράγμα. Μέθοδοι για την ελάφρυνση των πόρων που απαιτούνται από το εκτυπωμένο σύστημα που υλοποιεί το μοντέλο, όπως η κβάντιση και η δυαδικοποίηση, μπορούν σαφώς να επεκτείνουν το εύρος του πόσο πολύπλοκη μπορεί να είναι η υποστηριζόμενη ταξινόμηση.

2.2 Εισαγωγή στα τυπωμένα ηλεκτρονικά

Τα τυπωμένα ηλεκτρονικά αναφέρονται σε πολύ λεπτές ηλεκτρονικές συσκευές και κυκλώματα που παράγονται με την εφαρμογή μελανιών με τις επιθυμητές ηλεκτρικές ιδιότητες σε διάφορα υποστρώματα. Μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλο όγκο για πολύ χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλα ηλεκτρονικά με μεθόδους που είναι κοινές στην βιομηχανία εκτύπωσης. Αυτό τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές όπου τα οφέλη της ηλεκτρονικής λειτουργικότητας από μόνα τους δεν αντισταθμίζουν τα σχετικά έξοδα. Επιπλέον, μπορούν να προσφέρουν ευέλικτες μορφές και τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλης περιοχής. Ένα άλλο πλεονέκτημα που μπορεί να προκύψει από τη διάδοσή τους είναι η μείωση του αντίκτυπου των ηλεκτρονικών αποβλήτων, αφού τα τυπωμένα

ηλεκτρονικά μπορούν να είναι πολύ λιγότερο τοξικά για το περιβάλλον και πιο εύκολα ανακυκλώσιμα από τα υπόλοιπα, ή ακόμη και βιοδιασπώμενα. Δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα ηλεκτρονικά πυριτίου σε επιδόσεις λόγω της μεγάλης αντίστασης των αγώγιμων μελανιών, της έλλειψης υποστήριξης για υψηλές συχνότητες και της μεγάλης μεταβλητότητας κατά την κατασκευή. Ενώ η δυνατότητα να καλύπτουν μεγάλες περιοχές είναι μερικές φορές επιθυμητή, πολλές εφαρμογές απαιτούν σμίκρυνση που δεν μπορούν να προσφέρουν. Μια ποικιλία ενεργών και παθητικών συσκευών, όπως τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές, αισθητήρες, συλλέκτες και κεραίες μπορούν να υλοποιηθούν με αυτές. Θεωρούνται ότι αποτελούν μια αναδυόμενη αγορά με σημαντικές δυνατότητες διεύρυνσης του ρόλου των υπολογιστικών συστημάτων στην καθημερινή ζωή. Μπορούν να βοηθήσουν στη διεύρυνση του Internet-of-Things να φτάσει πολύ βαθύτερα, και έτσι συνεργίζονται καλά με άλλες εξελίξεις στον τομέα. Μια πρόσφατη έκθεση της IDTechEx[1] προβλέπει την παγκόσμια αγορά για τα τυπωμένα εύκαμπτα ηλεκτρονικά, εξαιρουμένων των OLEDs, θα φθάσει τα 12 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2033.

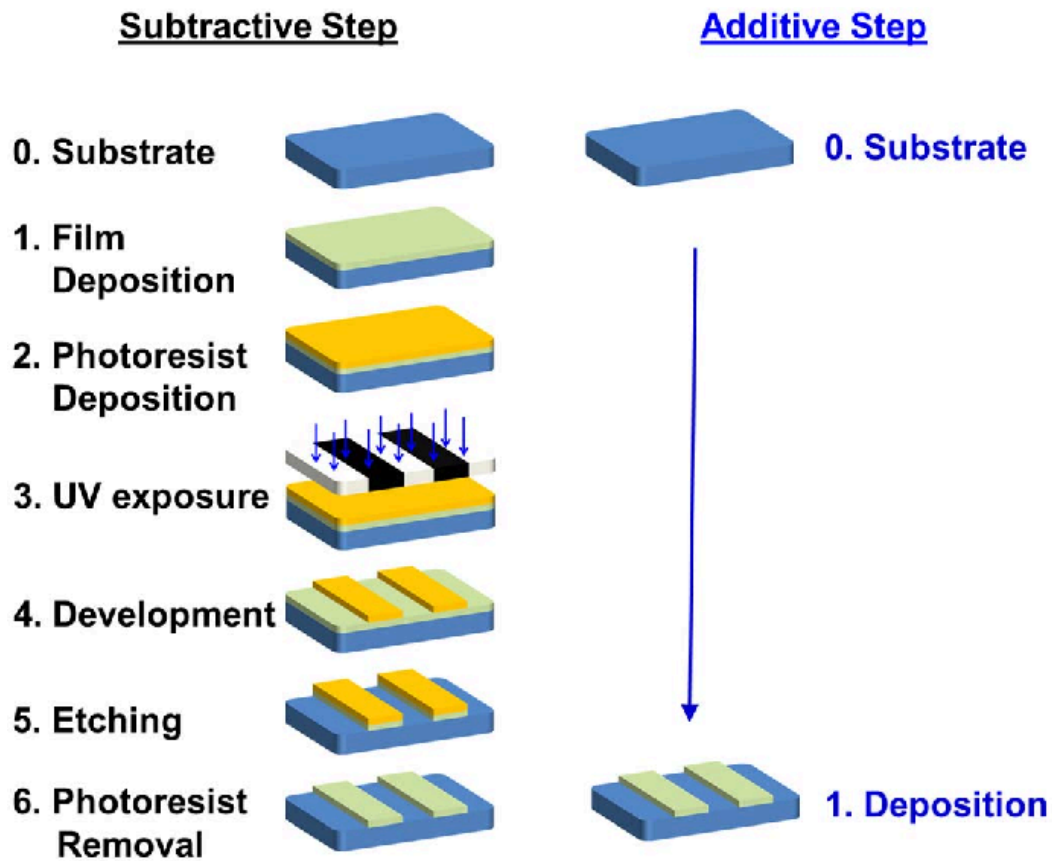


Figure 1: Comparison of subtractive electronics manufacturing to purely additive fabrication. The cost benefits of the much simpler additive procedure should be clear. Source: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050614>

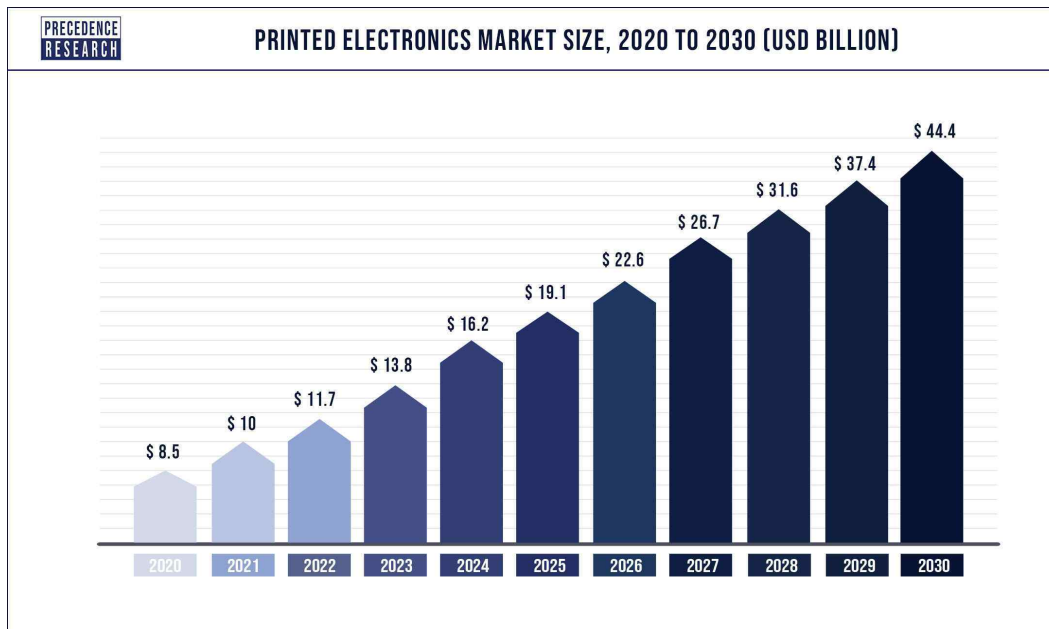


Figure 2: Projection of printed electronics market size. Source: Precedence Research

2.3 Χρήσεις των τυπωμένων ηλεκτρονικών

Η χρήση των τυπωμένων ηλεκτρονικών που οι περισσότεροι άνθρωποι μπορεί να γνωρίζουν στην καθημερινή τους ζωή είναι η μεμβράνη που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των πατημάτων των πλήκτρων στα περισσότερα μη μηχανικά πληκτρολόγια, ή ίσως οι αποπαγωγτές παρμπρίζ.

Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν:

- Αισθητήρες: τα εύκαμπτα, βιοδιασπώμενα και ελαστικά αισθητήρια στοιχεία επιτρέπουν την αποτελεσματική παρακολούθηση πολλών διεργασιών. Μια ποικιλία ιδιοτήτων του κόσμου μπορεί να μετρηθεί με τυπωμένους αισθητήρες, όπως η θερμοκρασία, η αφή, η πίεση, τα αέρια, η υγρασία, τα επίπεδα φωτός και η παρουσία ορισμένων χημικών ουσιών. Η ευελιξία και η μη τοξικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την ιατρική παρακολούθηση, γι' αυτό και οι βιοαισθητήρες έχουν λάβει μεγάλη προσοχή, ενώ ορισμένοι από αυτούς (π.χ. εκτυπωμένα επιθέματα ανίχνευσης επιληπτικών κρίσεων) είναι ήδη διαθέσιμοι στο εμπόριο.
- RFID: Το RFID (Radio Frequency Identification) είναι μια ασύρματη

τεχνολογία ανάγνωσης, η οποία επιτρέπει την απρόσκοπτη ταυτοποίηση και παρακολούθηση αντικειμένων μέσω μοναδικών κωδικών αναγνώρισης που αποθηκεύονται στις ετικέτες. Στόχος των τυπωμένων RFID είναι η αντικατάσταση των σημερινών μεθόδων αναγνώρισης αγαθών με έξυπνες ετικέτες. Οι ετικέτες RFID είναι συνήθως παθητικές και δεν απαιτούν παροχή ρεύματος. Μπορούν να κατασκευαστούν φτηνά με οποιαδήποτε κοινή μέθοδο εκτύπωσης. Έχει παρουσιαστεί ότι λειτουργούν σε συχνότητες 5G και WLAN και μπορούν να έχουν ακόμη και δυνατότητες αισθητήρων. Επί του παρόντος χρησιμοποιούνται κυρίως στα εισιτήρια και στην καταπολέμηση της κλοπής.

- Συγκομιδή ενέργειας: Οι τυπωμένες μπαταρίες μπορούν να παρέχουν ενέργεια στα λειτουργικά μέρη των τυπωμένων κυκλωμάτων μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα και μπορεί να καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της επιφάνειας του κυκλώματος. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μεγαλύτερη αυτονομία στα αναπτυγμένα τυπωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, η ικανότητα συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον είναι ζωτικής σημασίας. Οι τυπωμένοι συλλέκτες μπορούν να αντλήσουν ενέργεια από ραδιοσήματα, δονήσεις και συνηθέστερα από το φως. Οι τυπωμένες φωτοηλεκτρικές/ηλιακές κυψέλες έχουν επίσης προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον και εκτός του πεδίου των συγκομιστών για μικρά κυκλώματα, καθώς ενώ η απόδοσή τους δεν φτάνει τα επίπεδα των άκαμπτων ηλιακών κυψελών πυριτίου μπορούν να αναπτυχθούν σε μια ευρύτερη επιλογή χώρων, συμπεριλαμβανομένων των ενδυμάτων.
- Φωτισμός: Οι λυχνίες LED έχουν γίνει η κυρίαρχη πηγή φωτισμού, στη θέση των ενεργειακά σπάταλων λαμπτήρων πυρακτώσεως και των περιβαλλοντικών ναρκοπεδίων του φωτισμού με φθορίζοντες λαμπτήρες. Οι OLED αυξάνουν περαιτέρω την εξοικονόμηση ενέργειας και παράγουν πιο απαλό και ομοιόμορφο φωτισμό. Η εκτύπωση φαίνεται να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κατασκευή OLED χαμηλού κόστους με ανταγωνιστική φωτιστική απόδοση και να τους επιτρέπει να καλύπτουν μεγάλες επιφάνειες. Με αυτόν τον τρόπο έχουν καταδειχθεί φωτεινά πάνελ πάχους λεπτού χαρτιού.
- Οθόνες: Οι οθόνες είναι μία από τις πιο ώριμες πτυχές των τυπωμένων ηλεκτρονικών, με μεγάλες εκτυπωμένες οθόνες OLED 4K να είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Επιτρέπουν εύκαμπτες οθόνες, οι οποίες έχουν πολλές εφαρμογές στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και στα φορέσιμα και έτσι αποτελούν μια αγορά 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Ακόμη και αν η εύκαμπτη οθόνη δεν είναι πλήρως τυπωμένη, τα τυπωμένα

ηλεκτρονικά μπορούν να της προσφέρουν πρόσθετα χαρακτηριστικά. Οι οθόνες QLED μπορεί επίσης μια μέρα να εκτυπωθούν, αν η ακρίβεια εκτύπωσης συνεχίσει να αυξάνεται.

- **Wearables:** Έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές που φοριούνται είναι ήδη πολύ δημοφιλείς, όπως έξυπνα ρολόγια ή ακουστικά βαρηκοΐας ή δαχτυλίδια NFC. Τα τυπωμένα ηλεκτρονικά έχουν πολλά να προσφέρουν στον χώρο χάρη στην ευελιξία τους. Έχουν αναπτυχθεί αγωγικά υλικά που μπορούν να εκτυπωθούν σε ύφασμα και να αντέξουν στο πλύσιμο με απορρυπαντικό, επιτρέποντας την ενσωμάτωση ηλεκτρονικών σε κανονικά ρούχα. Οι εκτυπωμένοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της δραστηριότητας, ένα από τα πιο δημοφιλή χαρακτηριστικά των σημερινών έξυπνων ρολογιών, ή για την παρακολούθηση της υγείας, με εκτυπωμένα επιθέματα για την ανίχνευση επιληπτικών κρίσεων που κυκλοφορούν ήδη στην αγορά. Μπορεί επίσης να φανταστεί κανείς ότι θα ενδιέφεραν τη βιομηχανία της μόδας.

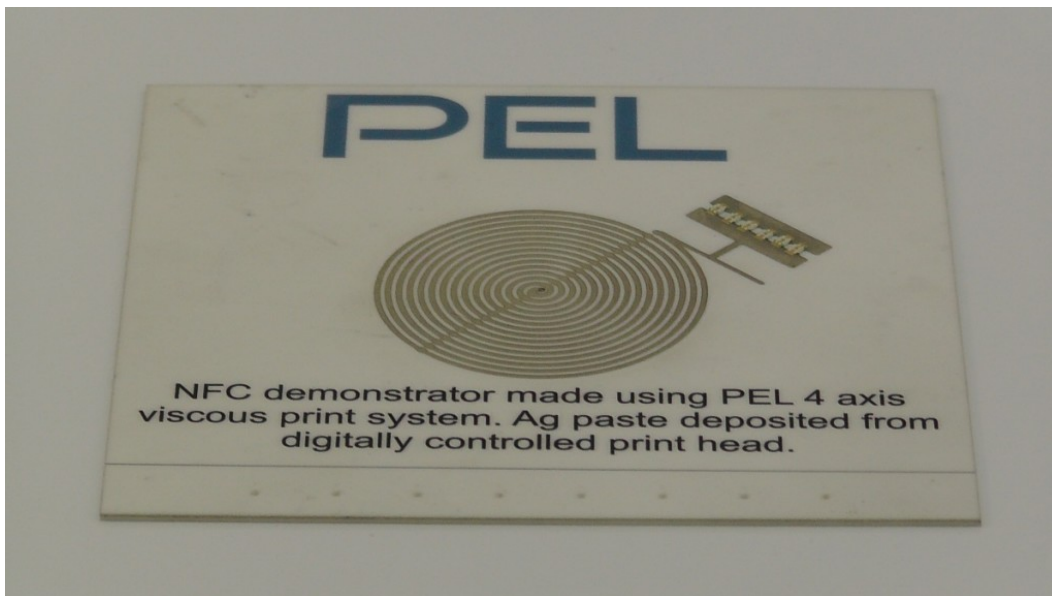


Figure 3: Printed NFC demonstration. Source: PRINTED ELECTRONICS LTD



Figure 4: Printed circuit on the membrane of a common keyboard. Source: Paulo Maluf

2.4 TinyML

Το Edge Computing επιτρέπει εφαρμογές στις οποίες η επεξεργασία δεδομένων είναι ευαίσθητη στην τοποθεσία. Παρέχει μεγαλύτερες εγγυήσεις ασφάλειας, ιδιωτικότητας και διαθεσιμότητας στους τελικούς χρήστες. Αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της αγοράς IoT, που μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τα συστήματα cloud. Το κύριο εμπόδιο στην εξάπλωση της προσθήκης είναι οι περιορισμοί πόρων που επιβάλλει.

Για να αντιμετωπιστεί η απαίτηση εκτέλεσης εφαρμογών μηχανικής μάθησης στην ακμή για έξυπνες συσκευές, οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές είναι πολύ διογκωμένες για να ανταποκριθούν. Πολλά μοντέλα απαιτούν σήμερα υπολογιστικές δυνατότητες που δεν είναι εφικτές ακόμη και για το πιο high-end καταναλωτικό υλικό, πόσο μάλλον για συσκευές χαμηλής ισχύος. Το TinyML είναι ο τομέας της βελτιστοποίησης των αρχιτεκτονικών μηχανικής μάθησης ώστε να εκτελούνται σε συστήματα με εξαιρετικά περιορισμένους πόρους, συνήθως όχι περισσότερους από μερικά χιλιοστά του βατ.

Για το εγχείρημα αυτό απαιτείται διεπιστημονική εργασία, καθώς τόσο οι αλγόριθμοι ML, όσο και το λογισμικό και το υλικό που τους υποστηρίζει πρέπει να προσαρμόζονται σε αυτούς τους περιορισμούς, χωρίς να διακυβεύεται σε σημαντικό βαθμό η ακρίβεια των μοντέλων. Περίπου οι περιορισμοί που παίζουν ρόλο είναι η ενεργειακή απόδοση, η ικανότητα επεξεργασίας, ο χώρος μνήμης και το κόστος παραγωγής και σχεδιασμού. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ανησυχία αφορά το στάδιο inference της ML, αν και η δυνατότητα υλοποίησης της φάσης εκπαίδευσης σε υλικό άκρων αποτελεί επίσης μια δική της εξειδικευμένη προσπάθεια.

Δεδομένου ότι τα προ-εκπαιδευμένα μοντέλα ML δεν μπορούν να εκτελούνται σε αυτούς τους όρους κατά κανόνα, απαιτούνται pipelines από άκρη σε άκρη, από την απόκτηση δεδομένων έως την εξαγωγή συμπερασμάτων, δημιουργώντας τον τομέα της TinyML-as-a-Service ή TinyMaaS. Πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις σε κάθε ενδιάμεσο βήμα ώστε να οδηγηθούμε σε ένα αρκετά ελαφρύ μοντέλο εκτέλεσης.

Ορισμένες προσεγγίσεις του προβλήματος περιλαμβάνουν:

- Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους στο πεδίο είναι η αναζήτηση περιορισμένης νευρωνικής αρχιτεκτονικής (constrained neural architecture search, NAS). Η αναζήτηση νευρωνικής αρχιτεκτονικής εξετάζει ένα χώρο αναζήτησης διαφορετικών αρχιτεκτονικών για διαφορετικές υπερπαραμέτρους. Ένας αλγόριθμος προσπαθεί να εντοπίσει την καλύτερη

δυνατή αρχιτεκτονική για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του μοντέλου στην επίτευγματική συνάρτηση. Ένας αξιολογητής εξετάζει τους συμβιβασμούς μεταξύ ακρίβειας και αποδοτικότητας κατά την εγκατάσταση, δεδομένων των δηλωμένων περιορισμών μνήμης, ενέργειας κ.λπ. Μπορεί να εξετάσει ένα ή πολλά μοντέλα-στόχους σε μία ή περισσότερες πλατφόρμες. Τόσο ο χώρος αναζήτησης όσο και ο αλγόριθμος αναζήτησης έχουν επίγνωση του υλικού. Πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που συνήθως υλοποιείται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών σταδίων ενός στόχου. Η εκτέλεση της αναζήτησης είναι πολύ χρονοβόρα, αλλά τα αποτελέσματα υπερτερούν των περισσότερων χειροκίνητα σχεδιασμένων δικτύων.

- Μια προφανής προσέγγιση για τον χειρισμό του προβλήματος του περιορισμού μνήμης είναι η χρήση τεχνικών συμπίεσης δεδομένων στο μοντέλο ML. Μια βασική προσέγγιση που έχει επιδείξει συντελεστές συμπίεσης 15-40 φορές είναι τα προϊόντα Kronecker (KP). Ωστόσο, μπορεί να προκύψουν μεγάλες ποινές ακρίβειας και μια μέθοδος που ονομάζεται ντοπαρισμένο προϊόν Kronecker (DKP) αξιοποιεί την προσαρμογή των συν-μητρώων για να προσπαθήσει να τις διορθώσει.
- Η υπερπαραμετροποίηση είναι η ιδιότητα ενός νευρωνικού δικτύου όπου οι πλεονάζοντες νευρώνες δεν βελτιώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αυτός ο πλεονασμός μπορεί συχνά να αφαιρεθεί με μικρή ή καθόλου απώλεια ακρίβειας. Τα πλήρως συνδεδεμένα βαθιά νευρωνικά δίκτυα απαιτούν N^2 συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων. Το κλάδεμα του δικτύου αφαιρεί παραμέτρους που δεν επηρεάζουν την ακρίβεια σε μεγάλο βαθμό. Μια συνηθισμένη περίπτωση όπου αυτό μπορεί εύκολα να γίνει είναι όταν οι παράμετροι είναι είτε μηδέν είτε αρκετά κοντά σε αυτό. Ομοίως όταν οι τιμές των παραμέτρων είναι περιττά επαναλαμβανόμενες. Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κλίμακα, από μεμονωμένες συνδέσεις, νευρώνες έως ολόκληρα επίπεδα. Όταν μια διαδικασία κλαδέματος έχει ως αποτέλεσμα το νευρωνικό δίκτυο να χάσει τη συμμετρική του δομή αναφέρεται ως μη δομημένο κλάδεμα, διαφορετικά πρόκειται για δομημένο κλάδεμα. Το μη δομημένο κλάδεμα οδηγεί σε αραιούς πίνακες βαρών που οι γενικοί επεξεργαστές δεν εκτελούν αποτελεσματικά. Η επανεκπαίδευση ενός δικτύου μετά το κλάδεμα των παραμέτρων που δεν συνέβαλαν αρκετά μπορεί να του επιτρέψει να επιτύχει υψηλότερες ακρίβειες από ό,τι πριν. Ακόμα και το κλάδεμα ενός τυχαία αρχικοποιημένου δικτύου χωρίς εκπαίδευση πριν ή μετά μπορεί να οδηγήσει σε ευπρεπή ακρίβεια.
- Η απόσταξη γνώσης είναι μια διαδικασία εκπαίδευσης ενός μικρότερου,

ρηχότερου μαθητικού δικτύου για να αποδίδει κατά ένα μεγάλο μέρος τα logits εξόδου ενός μεγαλύτερου, ικανότερου δικτύου δασκάλου που έχει εκπαιδευτεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι πιο προηγμένες παραλλαγές περιλαμβάνουν σύνολα μικρών δικτύων που το καθένα προσπαθεί να ταιριάζει με τα αποτελέσματα του συγκεντρωμένου συνόλου ή την αυτοαπόσταξη κατά την οποία τα ρηχότερα στρώματα ενός βαθύ νευρωνικού δικτύου προσπαθούν να μάθουν να ταιριάζουν με τα πιο περίπλοκα χαρακτηριστικά των βαθύτερων στρωμάτων. Εάν η διαφορά μεγέθους μεταξύ των δικτύων μαθητή και δασκάλου είναι πολύ μεγάλη, ένα ενδιάμεσου μεγέθους δίκτυο βοηθού δασκάλου λαμβάνει τις απαντήσεις του δασκάλου και στη συνέχεια τις αποστάζει στο μαθητή.

- Η κβάντιση είναι η διαδικασία μείωσης της αριθμητικής ακρίβειας των τιμών στο μοντέλο. Τα δίκτυα χρησιμοποιούν συνήθως αριθμούς κινητής υποδιαστολής 32 bit κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης[2]. Οι πιο συνηθισμένοι στόχοι κβαντισμού για αυτά είναι είτε ακέραιοι αριθμοί 8-bit είτε ακέραιοι αριθμοί 4-bit. Σε πολλές περιπτώσεις το δίκτυο δεν αξιοποιεί πλήρως αυτό το επίπεδο ακρίβειας. Η μείωση της ακρίβειας σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να ανακουφίσει τον υπολογιστικό φόρτο που συνεπάγεται με αμελητέες θυσίες ακρίβειας. Η εκπαίδευση με επίγνωση της κβάντισης είναι μια διαδικασία κατά την οποία το δίκτυο πλήρους ακρίβειας εκπαιδεύεται εκ νέου στη μειωμένη μορφή. Διαδέχεται την κβάντιση του δικτύου μόνο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκπαίδευσης. Όταν η μέθοδος φτάνει στα όριά της, η ακρίβεια μειώνεται σε 1 bit. Τα δίκτυα με ακρίβεια ενός μόνο bit ονομάζονται δυαδικά νευρωνικά δίκτυα(BNNs).

2.5 Εκτυπωμένη μηχανική μάθηση

Οι πιο ξεκάθαρα επιθυμητές εφαρμογές των υπολογισμών σε τυπωμένα ηλεκτρονικά συστήματα στον τομέα της πανταχού παρούσας πληροφορικής επικεντρώνονται γύρω από κάποια μορφή ταξινόμησης. Για κάθε τυπωμένο κύκλωμα που περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους αισθητήρες απαιτείται ένα σύστημα για την ερμηνεία των εξόδων αυτού του αισθητήρα σε μια χρήσιμη μορφή, εκτός από τις τετριμμένες περιπτώσεις.

Η δημιουργία χειροποίητων υπολογιστικών μοντέλων για κάθε συνδυασμό αισθητήρων και περιπτώσεων χρήσης στις οποίες περιλαμβάνονται και η σχεδίαση αποδοτικών σχεδίων υλικού για την υποστήριξη του καθενός θα απαιτούσε ένα συντριπτικό ποσό εργατοωρών. Η μηχανική μάθηση παρέχει ένα κοινό μέσο τόσο για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης όσο και αρχιτεκτονικών για την υλοποίηση σε κυκλώματα ενός τεράστιου φάσματος αυτών των εφαρμογών. Υπάρχουν λοιπόν σαφή κίνητρα για την παροχή αυτών των μέσων.

Οι δυσκολίες σε αυτό το εγχείρημα πηγάζουν όλες από τους ακραίους περιορισμούς πόρων που δίνονται από τα μεγέθη των στοιχείων και τις ενεργειακές απαιτήσεις των τυπωμένων ηλεκτρονικών. Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, ολόκληρη η διαδικασία, από την επιλογή των κατάλληλων γενικών αρχιτεκτονικών μέχρι τη διατήρηση μόνο των απολύτως απαραίτητων στοιχείων υλικού στα κυκλώματα που προκύπτουν, πρέπει να βελτιστοποιηθεί για το σκοπό αυτό.

Πέρα από το να μειωθεί η επιφάνεια του κυκλώματος σε ένα λογικό μέγεθος, ένας σημαντικός παράγοντας που εμποδίζει τη χρηστικότητα ορισμένων υλοποιήσεων είναι ότι καμία τυπωμένη μπαταρία δεν μπορεί να υποστηρίξει την ηλεκτρική τους κατανάλωση. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να τις έχουμε σε λειτουργία στην πράξη. Η ισχύς εξόδου αυτών των μπαταριών είναι ένα σκληρό όριο που πρέπει να επιτευχθεί ή η τυπωμένη ML είναι καθαρά θεωρητική. Στην παρούσα εργασία στοχεύεται η πιο παραχωρητική μπαταρία, της Molex, η οποία μπορεί να υποστηρίξει κυκλώματα με ισχύ έως και 30mW.

2.6 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Η ιδέα αυτής της διατριβής λαμβάνει χώρα σε ένα σενάριο διάχυτου υπολογισμού. Έχω διασφαλίσει ότι η όλη διαδικασία από το σύνολο δεδομένων μέχρι τη netlist που μπορεί να περάσει στον εκτυπωτή δεν απαιτεί καμία χειροκίνητη παρέμβαση. Οποιοσδήποτε μπορεί να περάσει τα δεδομένα του αισθητήρα του στο ένα άκρο και να λάβει μετρήσεις για την ακρίβεια του μοντέλου, την επιφάνεια του κυκλώματος και τις απαιτήσεις ισχύος στο άλλο άκρο, χωρίς να απαιτούνται από αυτόν ειδικές γνώσεις σε οποιονδήποτε τομέα. Αυτό γίνεται συγκεκριμένα με τη χρήση εξειδικευμένων υλοποιήσεων δυαδικών νευρωνικών δικτύων, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους ως προς την παροχή μιας ραχοκοκαλιάς για τη διαδικασία αυτή.

Φανταστείτε, αν θέλετε, το σενάριο ενός ιδιοκτήτη καφετέριας. Αποφασίζει ότι θα ήθελε τα ποτήρια στα οποία σερβίρει τον καφέ του να υποδεικνύουν την ποσότητα ζάχαρης ή άλλων γλυκαντικών που χρησιμοποιούνται στο ρόφημα. Αυτό θα προλάβαινε τους πελάτες από το να αρπάζουν τον λάθος καφέ από το τραπέζι επειδή όλα φαίνονται δυσδιάκριτα. Αφού ψάχνουν σε ένα διαδικτυακό αποθετήριο για το ποιος αισθητήρας θα ήταν χρήσιμος εδώ, παραγγέλνουν μερικά δειγματοληπτικά φύλλα αυτών των εκτυπωμένων αισθητήρων και ένα μικρό gadget που κουμπώνει στο φύλλο και καταγράφει τις μετρήσεις των αισθητήρων. Αφού τους βυθίσουν σε δώδεκα καφέδες με διαφορετικά μίγματα γλυκαντικών μέσα, συνδέουν το gadget στον υπολογιστή τους και παίρνουν ένα spreadsheet με τις τιμές των αισθητήρων για κάθε περίοδο βύθισης. Απλώς προσθέτουν την ετικέτα που αποφάσισαν ότι αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο γλυκαντικού και περνούν το φύλλο στο σύστημα. Αποφασίζουν ότι η αναφερόμενη ακρίβεια και έκταση είναι διαχειρίσιμες και παραγγέλνουν το κύκλωμα που προκύπτει να τυπωθεί σε μια παρτίδα εύκαμπτων επιθεμάτων που μπορούν να επικολληθούν στο εσωτερικό των ποτηριών.

Έχουν αξιολογηθεί διάφορες αρχιτεκτονικές για ένα τέτοιο framework. Η παρούσα εργασία προσθέτει τα Δυαδικά Νευρωνικά Δίκτυα (BNN) στον κατάλογο των προσεγγίσεων για έντυπη εκτέλεση ML. Τα BNNs είναι δίκτυα που ποσοτικοποιούνται στο απόλυτο όριο του 1 bit. Έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να ελαχιστοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερο τους υπολογιστικούς πόρους και συνεπώς αποτελούν έναν βασικό υποψήφιο για να φέρουν όλο και περισσότερους ταξινομητές κάτω από το όριο υλοποίησης των τυπωμένων ηλεκτρονικών. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της διατριβής αφιερώνεται στην εξέταση αποδοτικών υλοποιήσεων υλικού προσαρμοσμένου κατά παραγγελία (bespoke) για τα BNNs ώστε να χωρέσουν στους περιορισμούς της τεχνολογίας.

3 Σχετικές εργασίες στη μηχανική μάθηση για τυπωμένα κυκλώματα

Από τότε που η τεχνολογία των τυπωμένων υπολογιστών έφτασε στο σημείο όπου τα μοντέλα Μηχανικής Μάθησης θα μπορούσαν να υποστηριχθούν για εκτέλεση, έχουν γίνει εργασίες για την υλοποίησή τους. Οι Tahoori et al [3] επιδεικνύουν έναν αναλογικό νευρώνα δύο εισόδων και δείχνουν πώς θα μπορούσε να επεκταθεί σε πλήρως τυπωμένα αναλογικά νευρωνικά δίκτυα με λειτουργίες MAC και ενεργοποίησης. Οι Douthwaite et al [4] χρησιμοποιούν κωδικοποίηση σημάτων στο πεδίο του χρόνου, αναπαριστώντας το μέγεθος ως πλάτος παλμού και κωδικοποιώντας τα βάρη με καθρέφτες ρεύματος. Η συσσώρευση γίνεται με γραμμική φόρτιση ενός πυκνωτή με τους κατοπτρισμένους παλμούς. Οι Gkouridenis et al [5] μιμούνται βιολογικής έμπνευσης συναπτικές λειτουργίες με τρανζίστορ με ηλεκτρολυτική πύλη και δείχνουν πώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ένα perceptron ενός στρώματος. Οι Ozer et al [6] οραματίζουν πώς θα μπορούσε να μοιάζει μια αυτόματη διαδικασία για τη δημιουργία εξειδικευμένων επεξεργαστών για μια ποικιλία αρχιτεκτονικών ML σε τυπωμένα ηλεκτρονικά, αλλά δεν προχωρούν πέρα από το στάδιο του οράματος. Οι Bleier et al [7] παρουσιάζουν έναν τυπωμένο μικροεπεξεργαστή με σύνολο εντολών προσαρμοσμένο στο εκάστοτε πρόγραμμα. Οι Weller et al [8] αξιοποιούν τον στοχαστικό υπολογισμό για να μειώσουν τις απαιτήσεις των μικτών αναλογικών-ψηφιακών νευρωνικών δικτύων, αλλά με βαρύ κόστος ακρίβειας.

Οι Mubarik et al [9] αξιολογούν μικρές αρχιτεκτονικές μηχανικής μάθησης (δέντρα απόφασης, τυχαία δάση και μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης) σε ψηφιακές, βασισμένες σε πίνακες αναζήτησης και αναλογικές αρχιτεκτονικές σε ειδικά σχεδιασμένα τυπωμένα κυκλώματα. Εξετάζουν επίσης τις MLP, αλλά αποφασίζουν ότι είναι πολύ δαπανηρές για να τις αξιολογήσουν. Τα κυριότερα αποτελέσματα αφορούν τα δέντρα απόφασης (DT), όπου εξετάζουν τις απαιτήσεις των τυπωμένων υλοποιήσεων για βάθη από 1 έως 8, τόσο σε συμβατικά όσο και σε προσαρμοσμένα κυκλώματα. Δείχνουν ότι τα κατά παραγγελία (bespoke) κυκλώματα, τα οποία είναι μοναδικά κατάλληλα για τυπωμένα ηλεκτρονικά λόγω του χαμηλού μη επαναλαμβανόμενου μηχανικού (NRE) και κατασκευαστικού κόστους, μπορούν να υλοποιηθούν με περίπου δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερες απαιτήσεις από τα κυκλώματα που μπορούν να υποστηρίξουν ένα ευρύτερο φάσμα DTs και όχι μόνο ένα. Η παρούσα διατριβή είναι άμεσα εμπνευσμένη από αυτή την εργασία όσον αφορά τη χρήση σχεδιασμού κατά παραγγελία για τη μείωση των απαιτήσεων των υλοποιήσεων μοντέλων και εφαρμόζει κυρίως τις ιδέες τους στον τομέα των BNNs.

Οι Armeniakos et al [10] επεκτείνονται σε πιο απαιτητικά SVMs και Multi Layer Perceptrons. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η υλοποίησή τους, αξιοποιούν τον προσεγγιστικό υπολογισμό με δύο τρόπους. Πρώτον, παρατηρούν ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις απαιτήσεις περιοχής ενός σταθερού πολλαπλασιαστή με βάση τον συντελεστή με τον οποίο πολλαπλασιάζει. Για παράδειγμα, ο πολλαπλασιασμός με μια δύναμη του δύο δεν απαιτεί καθόλου υλικό αφού πρόκειται για μια σταθερή μετατόπιση. Προσεγγίζουν τους συντελεστές βάρους των MLP και SVM για να εκμεταλλευτούν αυτή την παρατήρηση. Δεύτερον, εφαρμόζουν κλαδέματα μετά τη σύνθεση σε επίπεδο πύλης στη λίστα δικτύου των σχεδίων. Στοχεύουν σε πύλες που έχουν σχεδόν σταθερές εξόδους και επηρεάζουν μόνο τα λιγότερο σημαντικά bits των αποτελεσμάτων και τα αντικαθιστούν με τη σταθερή τιμή που ως επί το πλείστον εξάγουν. Μαζί αυτές οι προσεγγίσεις οδηγούν σε μειώσεις έκτασης και ισχύος περίπου κατά 2 φορές στις περισσότερες περιπτώσεις. Η εργασία αυτή είναι άμεση πηγή έμπνευσης για την παρούσα διατριβή, όπου οι συντελεστές βάρους ορίζονται στη φάση της εκπαίδευσης να είναι αποκλειστικά τιμές που δεν απαιτούν την υλοποίηση πολλαπλασιαστών, όπως συμβαίνει στα BNN. Έτσι, τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται εδώ συγκρίνονται με αυτά της εργασίας αυτής ως βάση. Η σύγκριση αυτή παρέχεται στην ενότητα Αποτελέσματα.

Στο επόμενο δημοσίευμα [11] εφαρμόζουν επιπλέον τεχνικές ελαχιστοποίησης των νευρωνικών συστημάτων, όπως κβάντιση, κλάδεμα και ομαδοποίηση βαρών, και τις συνδυάζουν χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους για να μειώσουν τις απαιτήσεις έκτασης έως και 8 φορές.

Στο [12], εκτός από τους προαναφερθέντες φιλικούς προς το υλικό συντελεστές και το κλάδεμα της λίστας δικτύων, εφαρμόζεται υπερκλιμάκωση τάσης(VOS) για την περαιτέρω μείωση των απαιτήσεων ισχύος των κυκλωμάτων ταξινομητών. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση της περιοχής και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας για δεδομένο περιορισμό ισχύος. Αυτό επιτρέπει σε πολλά σχέδια να τροφοδοτούνται από τυπωμένες μπαταρίες θυσιάζοντας λιγότερο από 1% στην ακρίβεια.

Στη συνέχεια, το [13] επανεκπαιδεύει τα MLP με μια συνάρτηση βαθμολόγησης που λαμβάνει υπόψη το κόστος υλικού που σχετίζεται με τον πολλαπλασιασμό με τον συντελεστή κάθε βάρους. Οι συντελεστές ταξινομούνται σε συστάδες με βάση το κόστος υλικού τους και η επανεκπαίδευση επιτρέπει τη χρήση όλο και πιο ακριβών τιμών για τα βάρη μέχρι να επιτευχθεί το όριο ακρίβειας. Επιπλέον, τα προϊόντα αθροίζονται χρησιμοποιώντας προσεγγιστική πρόσθεση απορρίπτοντας τα λιγότερο σημαντικά bit των προϊόντων που συμβάλλουν λιγότερο στο αποτέλεσμα του MAC. Όλες αυτές οι βελτιώσεις οδηγούν σε δπλάσια

εξοικονόμηση χώρου και ισχύος για απώλεια ακρίβειας 1% και 20πλάσια για 5%. Επειδή συχνά τα δίκτυά τους χρησιμοποιούν μόνο δυνάμεις του 2 ως βάρη και συνεπώς δεν χρησιμοποιείται υλικό για την εκτέλεση του πολλαπλασιασμού, αυτό το πλεονέκτημα της χρήσης BNN δεν υπάρχει εδώ. Ωστόσο, διαφορετικοί νευρώνες χρησιμοποιούν διαφορετικά βάρη για την ίδια είσοδο, με αποτέλεσμα λιγότερα ενδιάμεσα αθροίσματα να μπορούν να μοιραστούν μεταξύ των νευρώνων. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα που μπορούν να εκμεταλλευτούν τα BNNs, αν και πληρώνουν ένα τίμημα στις δυνατότητες αναπαράστασης.

Οι Balaskas et al στο [14] επεκτείνουν την ιδέα των φιλικών προς το υλικό συντελεστών στις τιμές κατωφλίου των συγκριτών στα δέντρα αποφάσεων. Πέρα από την τιμή κατωφλίου, η ακρίβεια της σύγκρισης μπορεί επίσης να διαμορφωθεί σε βάση ανά συγκριτή προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα. Αναπτύσσουν έναν γενετικό αλγόριθμο για να βρουν βέλτιστες διαμορφώσεις των φιλικών προς το υλικό κατωφλίων κοντά στις αρχικές τιμές και μειωμένες ακρίβειες σύγκρισης χωρίς να θυσιάζεται ακρίβεια άνω του 1%. Ως αποτέλεσμα, η έκταση και η ισχύς μειώνονται κατά 3-4 φορές. Αυτό οδηγεί μερικά από τα μικρότερα σχέδια που εξετάζουν σε επιφάνεια κάτω από cm^2 και κατανάλωση ισχύος κάτω από mW.

Οι Iordanou et al [15] έχουν μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση στην οποία χρησιμοποιούν γενετικό προγραμματισμό βασισμένο σε γράφους για να αναζητήσουν στο χώρο των λογικών εκφράσεων boolean αυτές που προβλέπουν την κλάση των δεδομένων του πίνακα με υψηλή ακρίβεια και μεταφράζοντας αυτές τις λογικές πύλες σε μια netlist. Το αποτέλεσμα είναι μια θάλασσα από λογικές πύλες, σε αντίθεση με τα δομημένα κυκλώματα άλλων προσεγγίσεων. Είναι περιττό να πούμε ότι αυτό απομακρύνεται από το πρότυπο των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών ML στις οποίες τοποθετείται αυτή η εργασία.

4 Πληροφοριακό υπόβαθρο - Προαπαιτούμενα

4.1 Τεχνικές λεπτομέρειες για τα τυπωμένα ηλεκτρονικά

4.2 Μέθοδοι κατασκευής

Τα τυπωμένα ηλεκτρονικά κατασκευάζονται με τεχνικές από τη βιομηχανία γραφικών εκτυπώσεων. Διακρίνονται σε τεχνικές εκτύπωσης με επαφή ή R2R που χρησιμοποιούν πρότυπο και σε ανέπαφες που δεν χρησιμοποιούν. Απαιτούνται πολλαπλά βήματα εκτύπωσης για τα πολλαπλά στρώματα του κυκλώματος. Οι τεχνικές εκτύπωσης επαφής περιλαμβάνουν:

- **Βαθυτυπία:** Στη βαθυτυπία, ο κύλινδρος εκτύπωσης χαράσσεται με το πρότυπο και βυθίζεται εν μέρει στο μελάνι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, με μια λεπίδα να απορρίπτει το πλεονάζον μελάνι. Αυτό αφήνει μόνο μελάνι στα τμήματα του προτύπου, το οποίο μεταφέρεται στο υπόστρωμα υπό πίεση. Η βαθυτυπία μπορεί να εκτυπώσει με υψηλή ανάλυση και ταχύτητα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, αλλά το κόστος της χάραξης του κυλίνδρου την καθιστά χρήσιμη μόνο για μεγάλες παρτίδες.
- **Offset:** Στην εκτύπωση offset το σχήμα του προτύπου εναποτίθεται σε έναν κύλινδρο με μια ουσία που δέχεται μελάνι και το αρνητικό του προτύπου καλύπτεται με ουσίες που απωθούν το μελάνι. Με αυτόν τον τρόπο μόνο το σχήμα του προτύπου απορροφά μελάνι από έναν κύλινδρο μελάνης και στη συνέχεια μεταφέρεται στο υπόστρωμα μέσω ενός ενδιάμεσου κυλίνδρου.
- **Φλεξογραφία:** Το πρότυπο ενσωματώνεται σε μια εύκαμπτη πλάκα που τυλίγεται γύρω από έναν κύλινδρο εκτύπωσης έτσι ώστε τμήματα του σχήματος να υπερυψώνονται. Το μελάνι που εφαρμόζεται σε αυτόν τον κύλινδρο μεταφέρεται σε έναν δεύτερο κύλινδρο και στη συνέχεια στο υπόστρωμα, μόνο εάν βρίσκεται στα ανυψωμένα μέρη που αντιστοιχούν στο πρότυπο. Μπορεί να υποστηρίξει τόσο μη πορώδη όσο και πορώδη υποστρώματα.
- **Μεταξοτυπία:** Το “κόσκινο” σε αυτή την περίπτωση είναι ένα στενά συνδεδεμένο ύφασμα, έτσι ώστε το μελάνι να μπορεί να περάσει μόνο με την άσκηση πίεσης. Ένα στένσιλ του προτύπου τοποθετείται πάνω στο κόσκινο και μια λεπίδα ωθεί το μελάνι μέσω των ακάλυπτων τμημάτων στο υπόστρωμα. Η μεταξοτυπία είναι η απλούστερη τεχνική από όλες και μπορεί να δημιουργήσει παχύτερα στρώματα και να εκτυπώσει σε καμπύλες επιφάνειες. Πάσχει από χαμηλότερη ανάλυση σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

- Εκτύπωση με ταμπόν: Το μελάνι μπαίνει πάνω σε μια χάραξη του προτύπου. Στη συνέχεια, ένα μαλακό ταμπόν πιέζεται πάνω του και μεταφέρει το μελάνι με το επιθυμητό σχήμα στο υπόστρωμα. Μπορεί να εκτυπώσει σε επιφάνειες τρισδιάστατων αντικειμένων.

Οι τεχνικές χωρίς επαφή περιλαμβάνουν:

- Εκτύπωση μελάνης: Το μελάνι πέφτει πάνω στο υπόστρωμα από μικροσκοπικά στόμια. Είτε υπάρχουν αρκετά στόμια για να καλύψουν το πλάτος της εκτύπωσης είτε μπορούν να μετακινηθούν για να το κάνουν. Δεν απαιτεί μεγάλο εξοπλισμό και διαφορετικά σχέδια μπορούν να εκτυπωθούν σε υψηλή ανάλυση χωρίς επιπλοκές στην αλλαγή προτύπων, γεγονός που την καθιστά ιδανική για εκτύπωση κατά παραγγελία. Το κύριο μειονέκτημά της είναι η ταχύτητα εκτύπωσης. Η εκτύπωση συνεχούς ροής μελάνης έχει μια ροή μελάνης που κατευθύνεται πάνω στο υπόστρωμα ή σε έναν κάδο απόρριψης, ανάλογα με τις πληροφορίες του σχεδίου. Μπορεί να εκτυπώσει μεγαλύτερες παρτίδες από την Drop-on-Demand inkjet, αλλά με πέντε φορές χαμηλότερη ανάλυση. Η DoD ελέγχει αν θα ρέει μελάνι χρησιμοποιώντας μια βαλβίδα, ώστε να μην σπαταλιέται μελάνι. Αναπτύσσεται σε μικρότερες κλίμακες από τη συνεχή ροή.
- Αεροζόλ: Το μελάνι κονιορτοποιείται σε λεπτή ομίχλη μέσω πεπιεσμένου αέρα ή υπερήχων, επιταχύνεται και ψεκάζεται πάνω στο υπόστρωμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καμπύλες επιφάνειες και μπορεί να παρέχει ακόμη μικρότερα μεγέθη χαρακτηριστικών από ό,τι ο inkjet, αλλά είναι απαγορευτικά αργό.

Επιπλέον, μέθοδοι όπως η εναπόθεση υπό κενό, κατά την οποία εξατμιζόμενο μελάνι καλύπτει μια επιφάνεια σε κενό αέρος, ή η νανολιθογραφία με στυλό εμβάπτισης, κατά την οποία ένα μικροσκοπικό ατομικής δύναμης εφαρμόζει το μελάνι με μεγάλη ακρίβεια στο υπόστρωμα, θεωρούνται μερικές φορές ότι περιλαμβάνονται στην ομπρέλα των τυπωμένων ηλεκτρονικών, και παρόλο που μπορούν να επιτύχουν μικρότερα μεγέθη χαρακτηριστικών απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και δεν είναι τόσο φιλικές προς το κόστος όσο οι παραδοσιακές μέθοδοι εκτύπωσης και συνεπώς λιγότερο συναφείς.



Figure 5: Dimatix DMP-2850 Materials Printer. Source: FUJIFILM

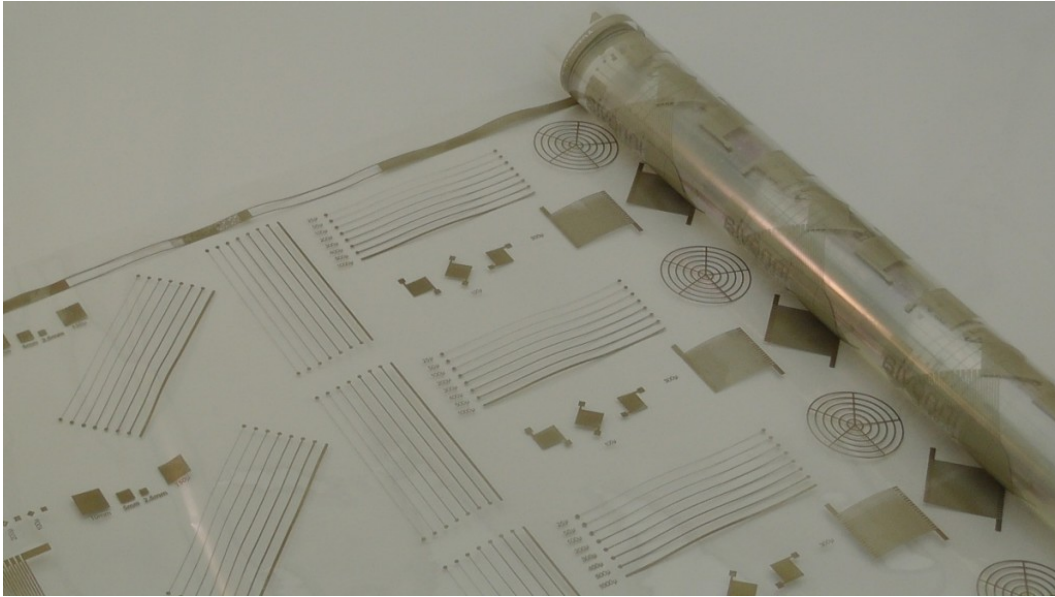


Figure 6: Long sheet of circuits printed on a Roll-to-Roll system. Source: PRINTED ELECTRONICS LTD

4.3 Μελάνια

Για την υλοποίηση λειτουργικών κυκλωμάτων απαιτούνται μελάνια με αγωγιμες, ημιαγωγιμες και διηλεκτρικές ιδιότητες. Συνήθως αποτελούνται από νανοσωματίδια υλικών με αυτές τις ιδιότητες που αναμειγνύονται με διαλύτη στο επιθυμητό ιξώδες και άλλα πρόσθετα για να καταστεί δυνατή η διαδικασία εκτύπωσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο οργανικά όσο και ανόργανα υλικά.

- **Αγωγή μελάνια:** Η πλειονότητα των υλικών για αγωγή μελάνια είναι μεταλλικά νανοσωματίδια, με πιο συνηθισμένο το ασήμι. Αν και ο άργυρος ανήκει στην κατηγορία των πολύτιμων μετάλλων, το ασημένιο μελάνι δεν είναι φοβερά ακριβό, με στυλό με αγωγή ασημένιο μελάνι να κοστίζει λιγότερο από 4 δολάρια. Άλλα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι ο χρυσός, το αλουμίνιο και ο χαλκός. Τα μελάνια χαλκού και αλουμινίου υφίστανται πολύ χειρότερη γήρανση από τα ασημένια. Τα οργανικά μελάνια βασίζονται συχνά σε νανοσωλήνες άνθρακα ή γραφένιο. Χρησιμοποιούνται επίσης φθηνότερα πολυμερή, παρά την κατώτερη αγωγιμότητά τους. Το πιο δημοφιλές είναι το PEDOT:PSS. Κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται επίσης σε αγωγή μελάνια, κυρίως οξείδιο του κασσίτερου του ινδίου (ITO), αν και πρόκειται για ακριβό υλικό.
- **Ημιαγωγή μελάνια:** Τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο και από τα οργανικά τα περισσότερα βασίζονται και πάλι σε CNT ή γραφένιο. Από αυτά μπορούν να παραχθούν τόσο υλικά τύπου p όσο και υλικά τύπου n, αν και οι τύποι p έχουν ιστορικά πολύ υψηλότερη απόδοση. (Το αντίθετο ισχύει για τα τρανζίστορ με πύλη ηλεκτρολύτη).
- **Διηλεκτρικά μελάνια:** Το διηλεκτρικό στρώμα πρέπει να είναι παχύτερο από το αγωγή και το ημιαγωγή στρώμα, ώστε να μην διαρρέει φορτίο μέσω αυτού. Ως ενεργό συστατικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά υποστρώματος, κεραμικά οξείδια και πολυμερή.

4.3.1 EGFET

Η παρούσα εργασία βασίζεται στο Process Design Kit(PDK) για τρανζίστορ επίδρασης πεδίου οξειδίου με ηλεκτρολύτη(EGFET)[16]. Το EGFET χρησιμοποιεί στερεούς πολυμερείς ηλεκτρολύτες για την πύλη των τρανζίστορ αντί για διηλεκτρικά. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται οξείδιο του ινδίου για το σκοπό αυτό. Μπορούν να λειτουργήσουν σε συχνότητα έως και 250 Hz σε τάση 1V.

Το κύριο πλεονέκτημα των EGFET σε σύγκριση με τα οργανικά τρανζίστορ είναι ότι μπορούν να οδηγηθούν σε πολύ χαμηλές τάσεις, έως και 0,6V. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την ικανοποίηση των περιορισμών που επιβάλλουν οι διαθέσιμες τυπωμένες μπαταρίες. Η περιοχή που καλύπτουν είναι ωστόσο σημαντικά μεγαλύτερη(10-100x) από εκείνη των οργανικών τρανζίστορ όπως τα CNT-TFT[17]. Για παράδειγμα, ένα απλό SR-latch που βασίζεται σε EGFET καταλαμβάνει 7mm². Μια άλλη διαφορά των τρανζίστορ με ηλεκτρολύτη με τα αντίστοιχα οργανικά είναι ότι στο EGFET είναι δυνατόν να υλοποιηθούν μόνο τρανζίστορ τύπου n, ενώ στο CNT είναι δυνατόν να υλοποιηθούν μόνο τρανζίστορ τύπου p. Κανένα από τα δύο δεν υποστηρίζει και τα δύο, οπότε οι πύλες CMOS δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τυπωμένα κυκλώματα.

4.4 Δυαδικά νευρωνικά δίκτυα

BNN είναι ο όρος για τα νευρωνικά δίκτυα που έχουν τόσο τις ενεργοποιήσεις όσο και τα βάρη με ακρίβεια 1 bit σε όλα τα κρυφά στρώματα. Τα στρώματα εισόδου οφείλουν να έχουν εισόδους υψηλότερης ακρίβειας, ώστε το δίκτυο να λαμβάνει επαρκείς πληροφορίες για να είναι δυνατή η ταξινόμηση, ενώ τα στρώματα εξόδου των ταξινομητών έχουν τις ενεργοποιήσεις τους να συγκρίνονται μεταξύ τους για να αποφασίσουν για την προβλεπόμενη κλάση, οπότε δεν μπορούν να δυαδικοποιηθούν. Ο πιο συνηθισμένος τομέας για τα BNN είναι τα Convolutional Neural Networks(CNNs). Παρουσιάστηκαν ανεξάρτητα το 2016 από τις εργασίες [18] και [19].

Πέρα από τη μείωση του μεγέθους αποθήκευσης που απαιτείται για τα βάρη $32\times$ σε σύγκριση με ένα δίκτυο πλήρους ακρίβειας 32-bit της ίδιας αρχιτεκτονικής, το υπολογιστικό κόστος μειώνεται επίσης σημαντικά, καθώς οι πράξεις πολλαπλασιασμού-συσσώρευσης(MAC) μπορούν να πραγματοποιηθούν με πράξεις XNOR και popcount. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της ταχύτητας έως και $58\times$.

Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, χρησιμοποιούνται υποκείμενα βάρη υψηλότερης ακρίβειας για να γίνει η μάθηση πιο ισχυρή. Στη φάση προς τα εμπρός διάδοσης, αυτά τα ακριβέστερα βάρη, W , και οι ενεργοποιήσεις από το προηγούμενο επίπεδο I δυαδικοποιούνται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση προσήμου:

$$sign(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } x \geq 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Οι δυαδικές πράξεις $(-1, 1, *)$ και $(0, 1, \odot)$ είναι ισόμορφες, οπότε ο πολλαπλασιασμός των βαρών με τις ενεργοποιήσεις γίνεται με τη χρήση της πράξης XNOR όταν οι δυαδικές τιμές $\{-1, 1\}$ κωδικοποιούνται στις λογικές τιμές $\{0, 1\}$ για να αποθηκευτούν σε ένα bit.

Αυτή η απεικόνιση μπορεί να αναπαρασταθεί με τον γραμμικό μετασχηματισμό $f(x) = \frac{x+1}{2}$, αφού $f(-1) = 0$ και $f(1) = 1$. Η συσσώρευση και η επακόλουθη δυαδικοποίηση των προϊόντων ενεργοποίησης-βάρους $sign(I) * sign(W)$ μπορεί να υπολογιστεί με την εκτέλεση μιας πράξης popcount, η οποία επιστρέφει τον αριθμό των bit σε μια δεδομένη συλλογή που είναι 1, και τη σύγκριση του αποτελέσματος με ένα κατώφλι για τη δυαδικοποίηση.

Κατά τη διάρκεια της προς τα πίσω διάδοσης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση της συνάρτησης ενεργοποίησης $sign$, δεδομένου ότι το $sign$ έχει

παράγωγο 0. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι γνωστή ως straight-through estimation(STE). Στην STE η συνάρτηση πρόσημου προσεγγίζεται ως εξής:

$$STEsign(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } x \geq 1 \\ x, & \text{if } 1 \geq x \geq -1 \\ -1, & \text{if } x \leq -1 \end{cases}$$

η οποία έχει παράγωγο:

$$\frac{dSTEsign}{dx} = \begin{cases} 1, & \text{if } 1 \geq x \geq -1 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

Οι ενημερώσεις γίνονται στα υποκείμενα βάρη υψηλότερης ακρίβειας και οι δυαδικοποιήσεις τους χρησιμοποιούνται για το εμπρόσθιο πέρασμα.

4.5 Σύνολα δεδομένων

Τα σύνολα δεδομένων που επιλέχθηκαν για την εκπαίδευση των μοντέλων και την υλοποίηση είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν από το [9]. Με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα για την ακρίβεια του μοντέλου και τις απαιτήσεις σε χώρο/ενέργεια μπορούν να συγκριθούν με άλλες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία. Όπως και σε αυτές τις εργασίες, τα κατηγορικά χαρακτηριστικά αφαιρέθηκαν από τα σύνολα δεδομένων, αφήνοντας μόνο τις εισόδους από αισθητήρες, αφού σε αυτές θα έχει πρόσβαση το πραγματικό εκτυπωμένο σύστημα (αυτή η υπόθεση μπορεί να παρακαμφθεί, αλλά αυτό είναι πέρα από το τρέχον αντικείμενο). Σημειώστε ότι η επιλογή των χαρακτηριστικών μπορεί να μην είναι η ίδια με τις προηγούμενες εργασίες, δεδομένου ότι τα κομμάτια δεδομένων που διατηρούσαν δεν τεκμηριώνονταν. Όλα τους ελήφθησαν από το αποθετήριο μηχανικής μάθησης του UCI[20].

Σύντομη περιγραφή των συνόλων δεδομένων:

- Arrhythmia[21]: Διάγνωση καρδιακής αρρυθμίας από 12 ηλεκτροκαρδιογραφήματα.
- Cardio[22]: Διάγνωση προβλημάτων στον καρδιακό ρυθμό αγέννητων βρεφών.
- Pendigits[23]: Ταξινόμηση γραπτού ψηφίου από μια σειρά 8 σημάτων πίεσης από αισθητήρες αφής.
- Human Activity Recognition(HAR)[24]: Ταξινόμηση του τύπου της κίνησης ενός ατόμου (ορθοστασία, ανέβασμα σκαλοπατιών κ.λπ.) με τη χρήση επιταχυνσιόμετρων από κινητά τηλέφωνα στη μέση τους.

- Gas Id[25]: Ταξινόμηση της παρουσίας αερίου με χρήση χημικών αισθητήρων.
- Wine quality(white wine)[26]: Εκτίμηση της αντιλαμβανόμενης απόλαυσης των διαφόρων λευκών κρασιών με βάση την οξύτητα και τα ίχνη ανόργανων συστατικών.
- Wine quality(red wine)[26]: Αντίστοιχο με το παραπάνω για τα κόκκινα κρασιά.

Τα σύνολα δεδομένων χρησιμοποιούν εισόδους από αισθητήρες που αντιστοιχούν τουλάχιστον κατά προσέγγιση σε αισθητήρες που έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με εκτύπωση. Το πλήρες σύστημα που περιλαμβάνει αισθητήρες, ταξινομητή και τροφοδοσία ρεύματος θα μπορούσε έτσι να υλοποιηθεί κάπως ρεαλιστικά και να μην απέχει πολύ από μια πραγματική περίπτωση χρήσης της τεχνολογίας.

Αισθητήρας	Dataset
Electrocardiography sensor on paper[27]	Arrhythmia
Electrocardiography sensor on paper[27]	Cardio
Printed movement sensor	Human activity recognition
Printed gas sensor[28]	Gas identification
Printed piezoelectric sensor[29]	Pendigits
Printed pH sensor[30], Inkjet mineral sensor[31]	Wine Quality(White)
Printed pH sensor[30], Inkjet mineral sensor[31]	Wine Quality(Red)

- [1] IDTechEx, *Flexible & printed electronics 2023-2033: Forecasts, technologies, markets*. 2023.
- [2] V. Sze, Y. Chen, T. Yang, and J. Emer, “Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 2295–2329, 2017.
- [3] D. Weller, M. Hefenbrock, M. Tahoori, J. Aghassi-Hagmann, and M. Beigl, “Programmable neuromorphic circuit based on printed electrolyte-gated transistors,” in *2020 25th asia and south pacific design automation conference (asp-dac)*, 2020, pp. 446–451.
- [4] M. Douthwaite, F. García-Redondo, P. Georgiou, and S. Das, “A time-domain current-mode mac engine for analogue neural networks in flexible electronics,” in *2019 ieee biomedical circuits and systems conference (biocas)*, IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [5] H. Ling, D. Koutsouras, S. Kazemzadeh, Y. van de Burgt, F. Yan, and P. Gkoupidenis, “Electrolyte-gated transistors for synaptic electronics, neuromorphic computing, and adaptable biointerfacing,” *Applied Physics Reviews*, vol. 7, no. 1, p. 011307, 2020.
- [6] E. Ozer *et al.*, “Bespoke machine learning processor development framework on flexible substrates,” in *2019 ieee international conference on flexible and printable sensors and systems (fleps)*, IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [7] N. Bleier, M. Mubarik, F. Rasheed, J. Aghassi-Hagmann, M. Tahoori, and R. Kumar, “Printed microprocessors,” in *2020 acm/ieee 47th annual international symposium on computer architecture (isca)*, IEEE, 2020, pp. 213–226.
- [8] D. Weller *et al.*, “Printed stochastic computing neural networks,” in *Design, automation test in europe conference exhibition (date)*, 2021, pp. 914–919.
- [9] M. Mubarik *et al.*, “Printed machine learning classifiers,” in *Annu. Int. Symp. Microarchitecture (micro)*, 2020, pp. 73–87.
- [10] G. Armeniakos, G. Zervakis, D. Soudris, M. Tahoori, and J. Henkel, “Cross-layer approximation for printed machine learning circuits,” in *Design, automation test in europe conference exhibition (date)*, 2022. Available: <https://arxiv.org/abs/2203.05915>
- [11] A. Kokkinis, G. Zervakis, K. Siozios, M. B. Tahoori, and J. Henkel, “Hardware-aware automated neural minimization for printed multilayer perceptrons,” in *2023 design, automation & test in europe conference & exhibition (date)*, IEEE, 2023, pp. 1–2.

- [12] G. Armeniakos, G. Zervakis, D. Soudris, M. B. Tahoori, and J. Henkel, "Model-to-circuit cross-approximation for printed machine learning classifiers," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2023.
- [13] G. Armeniakos, G. Zervakis, D. Soudris, M. B. Tahoori, and J. Henkel, "Co-design of approximate multilayer perceptron for ultra-resource constrained printed circuits," *IEEE Transactions on Computers*, 2023.
- [14] K. Balaskas, G. Zervakis, K. Siozios, M. B. Tahoori, and J. Henkel, "Approximate decision trees for machine learning classification on tiny printed circuits," in *2022 23rd international symposium on quality electronic design (isqed)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.
- [15] K. Iordanou *et al.*, "Tiny classifier circuits: Evolving accelerators for tabular data." 2023. Available: <http://arxiv.org/abs/2303.00031>
- [16] G. Cadilha Marques, D. Weller, A. T. Erozan, X. Feng, M. Tahoori, and J. Aghassi-Hagmann, "Progress report on 'from printed electrolyte-gated metal-oxide devices to circuits'," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 26, p. 1806483, 2019.
- [17] L. Shao, T.-C. Huang, T. Lei, Z. Bao, R. Beausoleil, and K.-T. Cheng, "Compact modeling of carbon nanotube thin film transistors for flexible circuit design," in *2018 design, automation & test in europe conference & exhibition (date)*, IEEE, 2018, pp. 491–496.
- [18] M. Courbariaux, I. Hubara, D. Soudry, R. El-Yaniv, and Y. Bengio, "Binarized neural networks: Training deep neural networks with weights and activations constrained to+ 1 or-1," *arXiv preprint arXiv:1602.02830*, 2016.
- [19] M. Kim and P. Smaragdis, "Bitwise neural networks," *arXiv preprint arXiv:1601.06071*, 2016.
- [20] D. Dua and C. Graff, "UCI machine learning repository." <http://archive.ics.uci.edu/ml>, 2017.
- [21] H. A. Guvenir, B. Acar, G. Demiroz, and A. Cekin, "A supervised machine learning algorithm for arrhythmia analysis," in *Computers in cardiology 1997*, IEEE, 1997, pp. 433–436.
- [22] D. Ayres-de Campos, J. Bernardes, A. Garrido, J. Marques-de Sa, and L. Pereira-Leite, "Sisporto 2.0: A program for automated analysis of cardiotocograms," *Journal of Maternal-Fetal Medicine*, vol. 9, no. 5, pp. 311–318, 2000.

- [23] F. Alimoglu and E. Alpaydin, “Methods of combining multiple classifiers based on different representations for pen-based handwritten digit recognition,” in *Proceedings of the fifth turkish artificial intelligence and artificial neural networks symposium (tainn 96)*, Citeseer, 1996.
- [24] D. Anguita, A. Ghio, L. Oneto, X. Parra, and J. Reyes-Ortiz, “A public domain dataset for human activity recognition using smartphones,” in *Esann*, 2013.
- [25] S. Feng *et al.*, “Review on smart gas sensing technology,” *Sensors*, vol. 19, no. 17, p. 3760, 2019.
- [26] P. Cortez, A. Cerdeira, F. Almeida, T. Matos, and J. Reis, “Modeling wine preferences by data mining from physicochemical properties,” *Decision Support Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 547–553, 2009.
- [27] E. Bihar, T. Roberts, M. Saadaoui, T. Hervé, J. B. De Graaf, and G. G. Malliaras, “Inkjet-printed pedot:PSS electrodes on paper for electrocardiography,” *Advanced Healthcare Materials*, vol. 6, no. 6, 2017.
- [28] J. Dai *et al.*, “Printed gas sensors,” *Chemical Society Reviews*, vol. 49, no. 6, pp. 1756–1789, 2020.
- [29] S. Tuukkanen and S. Rajala, “A survey of printable piezoelectric sensors,” in *2015 ieee sensors*, IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [30] M. Jose *et al.*, “Printed pH sensors for textile-based wearables: A conceptual and experimental study on materials, deposition technology, and sensing principles,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 24, no. 5, 2022.
- [31] M. Jelbuldina, H. Younes, I. Saadat, L. Tizani, S. Sofela, and A. Al Ghaferi, “Fabrication and design of cnts inkjet-printed based micro fet sensor for sodium chloride scale detection in oil field,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 263, pp. 349–356, 2017.