



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Αξιολόγηση και ποιοτικός έλεγχος γραμμής παραγωγής οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελίδων εσωτερικού φωτισμού

Διπλωματική Εργασία

Μάριος Ραλλάκης

Επιβλέπων

Γεώργιος Αραμπατζής, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Οκτώβριος 2021



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Αξιολόγηση και ποιοτικός έλεγχος γραμμής παραγωγής οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελίδων εσωτερικού φωτισμού

Διπλωματική Εργασία

Μάριος Ραλλάκης

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Αραμπατζής

Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης

Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Γεώργιος Τσιναράκης

Βαθμίδα

Πολυτεχνείο Κρήτης

Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Σπύρος Παπαευθυμίου

Βαθμίδα

Πολυτεχνείο Κρήτης

Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Χανιά, Οκτώβριος 2021

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου.

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Αραμπατζή για το ενδιαφέρον που έδειξε κατά την ανάθεση της εργασίας, όσο και κατά την ομαλή διεξαγωγή της από την αρχή μέχρι το τέλος. Επιπλέον θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις καίριες τοποθετήσεις του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον κ. Γεώργιο Τσιναράκη για το χρόνο που αφιέρωσε στο να διαβάσει και να κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις στην εργασία μου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σπύρο Παπαευθυμίου για το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της παρουσίασης.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον ξάδερφό μου Νίκο τόσο για τη στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, όσο και για τα στοιχεία που μου παρείχε.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκε σε συνεργασία με την Epishine AB, η οποία δραστηριοποιείται στον τομέα των ηλιακών κυψελίδων. Πιο συγκεκριμένα, η Epishine AB παράγει οργανικά φωτοβολταϊκά εσωτερικού χώρου μέσω της R2R διαδικασίας. Αφορμή για τη διπλωματική αυτή στάθηκε το γεγονός ότι η παραγωγικότητα της εγκατεστημένης γραμμής παραγωγής δεν είναι η επιθυμητή και η εταιρεία ενδιαφέρεται για βελτίωση της και επέκταση των παραγωγικών της δυνατοτήτων. Γι' αυτό το λόγο ο στόχος είναι να αυξηθεί το επίπεδο παραγωγής έως το 4^ο εξάμηνο του 2021.

Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, η εταιρεία σχεδιάζει να αυξήσει τον βαθμό αυτοματοποίησης της γραμμής παραγωγής και να μειώσει τα παραγωγικά στάδια τα οποία εκτελούνται χειρωνακτικά από τους εργαζομένους ώστε να μειωθεί το κόστος και ο μέσος χρόνος παραγωγής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της γραμμής παραγωγής με χρήση του λογισμικού ανάλυσης γραμμών παραγωγής Arena Rockwell. Μέσω της χρήσης του Arena, προσδιορίστηκαν κάποιες κρίσιμες παράμετροι της όλης διαδικασίας, οι οποίες περιορίζουν σημαντικά την παραγωγικότητα της γραμμής παραγωγής. Επιπλέον διεξήχθη ποιοτικός έλεγχος σε παρτίδες οργανικών φωτοβολταϊκών συσκευών, ενώ κατασκευάστηκαν κυψελίδες μικρής κλίμακας μέσω της διαδικασίας του spin coating στο εργαστήριο της εταιρείας. Στο τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για δράσεις που αν υλοποιηθούν από την εταιρεία θα αυξήσουν την αποδοτικότητα και συνεπώς την κερδοφορία της, ενώ προτείνονται και μελλοντικές επεκτάσεις.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Πίνακας Περιεχομένων.....	7
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	12
Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1. Αντικείμενο της πτυχιακής.....	13
1.2. Σκοπός της πτυχιακής.....	13
1.3. Δομή της πτυχιακής	14
Κεφάλαιο 2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	16
2.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	16
2.2. Τεχνολογίες μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό	21
2.2.1. Ανόργανες ηλιακές κυψελίδες.....	22
2.2.2. Οργανικές ηλιακές κυψελίδες.....	25
2.3. Μέθοδοι παραγωγής και χαρακτηρισμού των οργανικών φωτοβολταϊκών	32
2.4. Μοντελοποίηση συστημάτων και προσομοίωση	41
2.5. Περιγραφή λογισμικού μοντελοποίησης και ανάλυσης	43
2.6. Θεωρία στατιστικού ελέγχου ποιότητας.....	49
2.6.1. Έλεγχος ποιότητας αποδοχής και δειγματοληπτικά σχέδια	50
2.6.2. Έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας και διαγράμματα ελέγχου	53
Κεφάλαιο 3 Περιγραφή της Epishine AB	60
3.1. Παρουσίαση της εταιρείας	60
3.2. Προϊόντα.....	60
3.3. Περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας της υπό μελέτη εταιρείας.....	64
Κεφάλαιο 4 Αξιολόγηση γραμμής παραγωγής	67
4.1. Μοντελοποίηση στο λογισμικό Arena	67
4.2. Εφαρμογή και επαλήθευση του μοντέλου ανάλυσης παραγωγής	71
4.3. Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποδοτικότητας της γραμμής παραγωγής	72
4.4. Αξιολόγηση και μελέτη εναλλακτικών σεναρίων	75

4.5.	Σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων	81
4.6.	Διαδικασία ελέγχου ποιότητας.....	84
4.6.1.	Πρότυπη διαδικασία λειτουργίας	84
4.6.2.	Παραγωγή μονής κυψελίδας μικρής κλίμακας.....	85
4.6.3.	Αποτελέσματα παραγωγής μονής κυψελίδας μικρής κλίμακας.....	87
4.6.4.	Στατιστικός έλεγχος συσκευών.....	88
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα		94
5.1.	Ανακεφαλαίωση	94
5.2.	Συμπεράσματα	94
5.3.	Προτάσεις.....	95
5.4.	Επεκτάσεις διπλωματικής εργασίας	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		97

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Συμβολή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας το 2017.....	17
Εικόνα 2: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο το 2017	18
Εικόνα 3: Προβλεπόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως το 2050, ανά πηγή ενέργειας.....	18
Εικόνα 4: Η καταγραφή του μεγέθους της αγοράς των ασύρματων αισθητήρων (WS) και της αγοράς φωτοβολταϊκών εσωτερικού χώρου (IPV) σε δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2021 και η πρόβλεψη της ανάπτυξης τους μέχρι το 2023 (Oniedo, et al., 2019).....	20
Εικόνα 5: Το μέγεθος των εναλλακτικών αγορών για φωτοβολταϊκές τεχνολογίες για τα επόμενα χρόνια (Oniedo, et al., 2019)	21
Εικόνα 6: Επαφή p-n (Wikipedia, 2014)	22
Εικόνα 7: Γράφημα υψηλότερων ερευνητικών αποδοτικότητας που δημιουργήθηκε από το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (NREL) (Nrel, 2017).....	25
Εικόνα 8: Βασική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου	26
Εικόνα 9: Ενεργειακό διάγραμμα που απεικονίζει την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, το διαχωρισμό του ηλεκτρονίου και της οπής και τη συλλογή τους στα κατάλληλα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου (Patil, 2014)	27
Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου	28
Εικόνα 11: Μία σχηματική απεικόνιση της R2R διαδικασίας. (Hartikainen & Willman, 2019)	29
Εικόνα 12: Η χαρακτηριστική καμπύλη J-V που αναπαριστά τις πιο σημαντικές παραμέτρους της απόδοσης (Μπαρλαγιάννης, 2014).....	30
Εικόνα 13: Απεικόνιση των δύο μεθόδων της μεθόδου επίστρωσης με πλέγμα. Αριστερά είναι ο μηχανισμός λειτουργίας συστήματος flat bed-screen printing ενώ δεξιά ο μηχανισμός rotary screen printing (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)	33
Εικόνα 14: Μέθοδος βαθυτυπίας (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012) ...	34
Εικόνα 15: Μέθοδος φλεξογραφίας (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)	34
Εικόνα 16: Μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό (Απαζίδης, 2017).....	35
Εικόνα 17: Διαδικασία Slot Die Coating (Παπουτσής, 2014)	36
Εικόνα 18: Διαδικασία Inkjet printing. Πάνω είναι ο πιεζοηλεκτρικός τρόπος, ενώ κάτω ο συνεχής (Χαρίτος, 2018)	37
Εικόνα 19: Φωτογραφίες από τις μηχανές των 3 τεχνικών του lamination σε R2R διαδικασία. Α) Cold Lamination Β) Hot Melt lamination και Γ) UV-Lamination (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)	38
Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της Φασματοσκοπικής Ελλειψομετρίας (Τσιμικλή, 2016).....	40

Εικόνα 21: Σχηματική απεικόνιση της Μικροσκοπίας Ατομικών Δυνάμεων (Σεϊτανίδου, 2013)	41
Εικόνα 22: Μπάρα με modules της Basic Process.....	44
Εικόνα 23: Μπάρα με modules της Advanced Process	45
Εικόνα 24: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Create Module	45
Εικόνα 25: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Dispose Module.....	46
Εικόνα 26: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Decide Module.....	47
Εικόνα 27: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Process Module.....	48
Εικόνα 28: Περιγραφή λειτουργίας απλού δειγματοληπτικού σχεδίου	52
Εικόνα 29: Λειτουργία διπλού δειγματοληπτικού σχεδίου (Αντζουλάκος, 2009).....	53
Εικόνα 30: Περιγραφή Διαγράμματος Ελέγχου (Μιχαλιέρης, 2012)	55
Εικόνα 31: Καμπύλη κανονικής κατανομής (Κούτουλα, 2017).....	56
Εικόνα 32: Διάγραμμα ελέγχου μεγέθους δείγματος n (Κουϊκόγλου, 2010)	56
Εικόνα 33: Γραφεία Epishine AB (Epishine, 2021)	60
Εικόνα 34: Φωτογραφία μίας κυψελίδας φωτός (Epishine, 2021)	62
Εικόνα 35: Χρήση των κυψελίδων φωτός σε ανιχνευτή πυρκαγιάς (Epishine, 2021)	62
Εικόνα 36: Αριστερά η μπροστινή όψη της MiroCard και δεξιά η πίσω της όψη (Epishine, 2021).....	63
Εικόνα 37: Κυψελίδα φωτός εγκατεστημένη σε ηλεκτρονική κλειδαριά ασφαλείας (Epishine, 2021).....	63
Εικόνα 38: Προσαρμοσμένη κυψελίδα φωτός κατόπιν ειδικής παραγγελία (Epishine, 2021).....	64
Εικόνα 39: Επίστρωση στρωμάτων πάνω στο ρολό	65
Εικόνα 40: Ένωση των στρωμάτων κατά τη διαδικασία του lamination.....	65
Εικόνα 41: Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας.....	66
Εικόνα 42: Απεικόνιση του Create Module και του πλαισίου διαμόρφωσης.....	68
Εικόνα 43: Απεικόνιση του Process Module και του πλαισίου διαμόρφωσης	69
Εικόνα 44: Απεικόνιση του Decide Module και του πλαισίου διαμόρφωσης	69
Εικόνα 45: Έξοδος από το σύστημα.	70
Εικόνα 46: Στατιστικά στοιχεία της εταιρείας.....	71
Εικόνα 47: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση του Arena (αρχικό σενάριο)	72
Εικόνα 48: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (αρχικό σενάριο).....	74
Εικόνα 49: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (αρχικό σενάριο)	75
Εικόνα 50: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής ανά ρολό (πρώτο σενάριο)	76
Εικόνα 51: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (πρώτο σενάριο)	76
Εικόνα 52: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (πρώτο σενάριο).....	77

Εικόνα 53: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής (δεύτερο σενάριο).....	78
Εικόνα 54: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (δεύτερο σενάριο)	78
Εικόνα 55: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (δεύτερο σενάριο).....	79
Εικόνα 56: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής (τρίτο σενάριο).....	79
Εικόνα 57: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (τρίτο σενάριο).....	80
Εικόνα 58: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (τρίτο σενάριο)	80
Εικόνα 59: Συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι προστιθέμενης αξίας όλων των κατεργασιών του κάθε σεναρίου	82
Εικόνα 60: Συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι αναμονής	83
Εικόνα 61: Απεικόνιση ενός spin coater (Hartikainen & Willman, 2019)	85
Εικόνα 62: Απεικόνιση ενός hot plate (Hartikainen & Willman, 2019).....	86
Εικόνα 63: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του spin coating. Στην εικόνα φαίνονται τα 3 στάδια που εκτελέστηκαν για την παραγωγή της κυψελίδας φωτός μικρής κλίμακας (Φόρης, 2017).....	87
Εικόνα 64: Διάγραμμα απόδοσης της κυψελίδας.....	88
Εικόνα 65: Διάγραμμα ελέγχου ποσοστού ελαττωματικών.....	91
Εικόνα 66: Διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωματικών.....	92
Εικόνα 67: Διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωμάτων	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά και αποδόσεις των βασικών τεχνολογιών ανόργανων φωτοβολταϊκών κυττάρων	24
Πίνακας 2: Χρόνοι κατεργασιών και ποσοστά μη ελαττωματικών συσκευών.....	70
Πίνακας 3: Συσκευές οι οποίες εισήλθαν και εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής και συσκευές οι οποίες είναι υπό επεξεργασία ανά πάσα στιγμή.....	73
Πίνακας 4: Αριθμός εξερχομένων συσκευών ανά ρολό σε κάθε σενάριο.....	81
Πίνακας 5: Πίνακας αριθμού και ποσοστού ελαττωματικών κυψελίδων	89

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της πτυχιακής

Τα αντικείμενα με τα οποία ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δύο. Το πρώτο αφορά τη μελέτη της γραμμής παραγωγής οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελίδων εσωτερικού χώρου της σουηδικής start-up εταιρείας Erishine AB. Το δεύτερο αφορά τον έλεγχο ποιότητας ορισμένων παρτίδων οργανικών φωτοβολταϊκών συσκευών εσωτερικού χώρου καθώς και των πρώτων υλών που συνεισφέρουν στην παραγωγή αυτών.

Η μελέτη της γραμμής παραγωγής υλοποιήθηκε μέσω της χρήσης ενός προγράμματος προσομοίωσης. Το πρόγραμμα αυτό ονομάζεται Rockwell Arena. Στο περιβάλλον του Arena προσομοιώθηκε η γραμμή παραγωγής της εταιρείας, γεγονός που σημαίνει ότι μοντελοποιήθηκαν όλες οι κατεργασίες που απαιτούνται ώστε να παραχθούν τα τελικά προϊόντα. Αυτό πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τους εργαζομένους του εργαστηρίου οι οποίοι παρείχαν όλες τις αναγκαίες ποσοτικές παραμέτρους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το μοντέλο του Arena. Επίσης μελετήθηκαν εναλλακτικά σενάρια που αφορούν αλλαγές στον τεχνικό εξοπλισμό της γραμμής παραγωγής.

Όσον αναφορά τον ποιοτικό έλεγχο των πρώτων υλών, αυτός επιτεύχθηκε μέσω μίας εξειδικευμένης τεχνικής η οποία ονομάζεται spin coating. Μέσω της μεθόδου αυτής παράχθηκαν κυψελίδες μικρής κλίμακας των οποίων μετρήθηκε η απόδοση για να επιβεβαιωθεί η καλή ποιότητα των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την παραγωγική διαδικασία για την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Επιπλέον διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος σε 12 παρτίδες οργανικών συσκευών ώστε να διαπιστωθεί αν η παραγωγική διαδικασία βρίσκεται εντός στατιστικού ελέγχου.

1.2. Σκοπός της πτυχιακής

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να επισημάνει τη σημασία τόσο της χρήσης των μοντέλων προσομοίωσης όσο και του ελέγχου ποιότητας στην παραγωγική διαδικασία εταιρειών, ιδιαίτερα υψηλής τεχνολογίας. Η σωστή χρήση αυτών των δύο εργαλείων μπορεί να επιφέρει σημαντικά κέρδη και να μειώσει το κόστος παραγωγής των διάφορων εταιρειών.

Όσον αναφορά τα μοντέλα προσομοίωσης είναι απολύτως απαραίτητα να χρησιμοποιούνται από εταιρείες που διαθέτουν ή προτίθενται να κατασκευάσουν γραμμή παραγωγής. Ο λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητα τέτοιου είδους μοντέλα είναι ότι στη σύγχρονη βιομηχανική πραγματικότητα παρατηρείται μία

όξυνση του ανταγωνισμού σε διεθνές επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι διαρκώς εντείνεται η ανάγκη να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση στους χρόνους και στο κόστος παραγωγής, γεγονός το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερο κέρδος για την εκάστοτε εταιρεία. Τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, είτε στον εντοπισμό είτε και στην πρόβλεψη των σημείων συνωστισμού τα οποία επιβραδύνουν ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τρεχουσών γραμμών παραγωγής όσο και για το σχεδιασμό μελλοντικών. Για το λόγο αυτό στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το Arena, το οποίο είναι ένα εργαλείο που βοήθησε στην κατανόηση και την ανάλυση της γραμμής παραγωγής της Epishine AB.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στη σημερινή εποχή ο ανταγωνισμός όσο πάει γίνεται ολοένα και πιο οξύς. Αυτό έχει ως συνέπεια να αναδειχτεί η ποιότητα ως μία από τις βασικότερες παραμέτρους για την αγορά ενός προϊόντος από την πλευρά του καταναλωτή. Για το καταναλωτικό κοινό έχει μεγάλη σημασία τα προϊόντα που παράγονται να βρίσκονται εντός προδιαγεγραμμένων προδιαγραφών και είναι πολύ σημαντικό να μην αποκλίνουν από αυτές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ελέγχου ποιότητας. Ο έλεγχος ποιότητας είναι μία πολύ χρήσιμη μέθοδος μέσω της οποίας δίνεται η δυνατότητα να ελέγχονται οι παραγωγικές διαδικασίες. Ο σκοπός του είναι η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, γεγονός το οποίο θα προσελκύσει μεγαλύτερο καταναλωτικό κοινό συνεπώς και περισσότερα κέρδη στην εκάστοτε εταιρεία.

1.3. Δομή της πτυχιακής

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Το παρόν πρώτο αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζονται το αντικείμενο και η δομή της πτυχιακής καθώς και ο σκοπός για τον οποίο εκπονήθηκε.

Στην αρχή του δευτέρου κεφαλαίου γίνεται μία αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στη συμβολή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στο παρόν αλλά και στο μέλλον. Αμέσως μετά περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Δύο από αυτές τις τεχνολογίες είναι οι ανόργανες και οι οργανικές ηλιακές κυψελίδες. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κεφαλαίου είναι αφιερωμένο στις οργανικές κυψελίδες καθώς αυτές είναι που παράγει η γραμμή παραγωγής της Epishine AB. Παρουσιάζεται το θεωρητικό τους υπόβαθρο, η αρχιτεκτονική τους και οι μέθοδοι μέσω των οποίων κατασκευάζονται και χαρακτηρίζονται οι αποδόσεις τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η θεωρία του στατιστικού ελέγχου ποιότητας. Αρχικά γίνεται αναφορά στην ιστορική εξέλιξη του ελέγχου ποιότητας καθώς και στα οφέλη που μπορεί να αποκομίσει μία επιχείρηση μέσω της σωστής του χρήσης. Επιπλέον παρουσιάζεται η θεωρία δύο εκ των τριών βασικών υποσυνόλων του στατιστικού ελέγχου ποιότητας. Αυτοί είναι ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής και ο

έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας. Στην επόμενο παράγραφο περιγράφονται οι έννοιες της μοντελοποίησης και προσομοίωσης συστημάτων πάνω στις οποίες βασίζεται το Rockwell Arena. Στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου γίνεται η περιγραφή του προγράμματος προσομοίωσης Rockwell Arena καθώς και των εργαλείων του που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής.

Στην πρώτη παράγραφο του τρίτου κεφαλαίου λαμβάνει χώρα η παρουσίαση της Erishine AB, η οποία αφορά την εξέλιξη της και τις εγκαταστάσεις τις οποίες διαθέτει. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τελικά προϊόντα που παράγονται από αυτήν. Επιπλέον παρουσιάζονται κατηγορίες συσκευών στις οποίες υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασή τους. Στην τελευταία παράγραφο περιγράφονται οι κατεργασίες της γραμμής παραγωγής οι οποίες απαιτούνται για την παραγωγή των τελικών προϊόντων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αρχικά περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε και επαληθεύτηκε η λειτουργία της γραμμής παραγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού του Arena. Αμέσως μετά παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα του αρχικού σεναρίου που εφαρμόστηκε στο Arena. Στο αρχικό σενάριο περιλαμβάνονται οι μέσοι χρόνοι των κατεργασιών σύμφωνα με τους οποίους λειτουργεί αυτή τη στιγμή η παραγωγική διαδικασία. Ακολουθώντας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών εναλλακτικών σεναρίων. Τα τρία αυτά σενάρια σχετίζονται με πιθανές αναβαθμίσεις που θα υπάρξουν σε κάποιες μηχανές της γραμμής παραγωγής. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η συγκριτική οικονομοτεχνική αξιολόγηση των τριών σεναρίων ώστε να διαπιστωθεί ποιο από αυτά θα είναι το αποδοτικότερο και το πιο οικονομικά συμφέρον για την εταιρεία. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται η διαδικασία του στατιστικού ελέγχου ποιότητας που διενεργήθηκε καθώς και η μέθοδος μέσω της οποίας παράχθηκαν οι κυψελίδες μικρής κλίμακας.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί τη σύνοψη της συγκεκριμένης εργασίας. Αρχικά πραγματοποιείται ανακεφαλαίωση ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα τρία εναλλακτικά σενάρια που προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα του Arena. Αμέσως μετά προτείνεται προς την εταιρεία το σενάριο το οποίο μέσα από τις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το περιβάλλον του Arena αποδείχτηκε το πιο αποδοτικό. Τέλος προτείνονται πιθανές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑΣ

2.1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Μετά το τέλος της βιομηχανικής επανάστασης, υπήρξαν αρκετές αλλαγές στις κοινωνικές και οικονομικές ανάγκες, με τις χώρες να εξαρτώνται όλο και περισσότερο από τη χρήση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πιο κοινός και διαδεδομένος τρόπος παραγωγής, πριν από μερικές δεκαετίες, ήταν η καύση ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει δύο πολύ βασικά μειονεκτήματα. Αρχικά οι επιπτώσεις για το φυσικό περιβάλλον αλλά και για την ανθρώπινη ζωή είναι πολύ δυσμενείς. Επίσης τα αποθέματα ορυκτών κάποια στιγμή θα τελειώσουν. Μέσα σε όλα αυτά έχει αυξηθεί δραματικά και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με την πάροδο των ετών, ενώ έχει καταναλωθεί και το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων αποθεμάτων τα τελευταία 200 χρόνια (Αθανασίου & Μαραβέγιας, 2015). Για τον λόγο αυτό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Στην ουσία, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τρόποι παραγωγής ενέργειας από (θεωρητικά) απεριόριστους φυσικούς πόρους. Αυτοί οι πόροι είτε αναπληρώνονται πιο γρήγορα από το ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται είτε είναι διαθέσιμοι χωρίς κάποιο χρονικό όριο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφέρονται επίσης συχνά ως «πράσινη ενέργεια» ή «καθαρή ενέργεια». Ωστόσο, ακόμα και αυτές οι «καθαρές ενέργειες» δεν σημαίνει ότι δεν είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον και ότι έχουν μηδενικές επιπτώσεις (Αθανασίου & Μαραβέγιας, 2015). Παρ' όλα αυτά, έχουν χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως αιολική, ηλιακή, κύματα, βιοκαύσιμα, υδροηλεκτρική ενέργεια, γεωθερμικά και μέσω της παλίρροιας. Τον τελευταίο καιρό έχει γίνει πολύ δημοφιλής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η ηλιακή ενέργεια που είναι η πιο άφθονη από τις υπόλοιπες «πράσινες ενέργειες», παρά το μειονέκτημα ότι ο ήλιος δεν φωτίζει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Όλο αυτό όμως υπερκαλύπτεται από το γεγονός ότι σε μια ώρα, η ποσότητα ενέργειας που δέχεται η επιφάνεια της Γης από τον ήλιο είναι μεγαλύτερη από τις ενεργειακές ανάγκες όλου του πλανήτη. Για να γίνει κατανοητή η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η Γη αρκεί κάποιος να δει τα νούμερα που έχει παρουσιάσει το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ: Κάθε ώρα 430 πεντακισεκατομμύρια Joules ηλιακής ενέργειας πέφτουν στην επιφάνεια της Γης. Για να μπορέσει να γίνει αντιληπτό το πόσο μεγάλο είναι αυτό το νούμερο αρκεί να βάλει κανείς πίσω από το 430, 18 μηδενικά. Συγκριτικά, η συνολική ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιούν όλοι οι άνθρωποι σε ένα χρόνο είναι 410 πεντακισεκατομμύρια Joules (Harrington, 2015). Για το λόγο αυτό, η ηλιακή ενέργεια πρέπει να αξιοποιηθεί στο έπακρο της τα επόμενα χρόνια.

Με βάση την έκθεση REN21 του 2017, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας του ανθρώπου συνέβαλαν κατά 19,3% ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα έτη 2015 και 2016 κατά 24,5%. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας διαιρείται σε 8,9% που προέρχεται από παραδοσιακή βιομάζα, 4,2% ως θερμική ενέργεια (σύγχρονη βιομάζα, γεωθερμική και ηλιακή θερμότητα), 3,9% από υδροηλεκτρική ενέργεια και το υπόλοιπο 2,2% είναι ηλεκτρική ενέργεια από αιολική, ηλιακή, γεωθερμική και άλλες μορφές βιομάζας (Wikipedia, 2018).



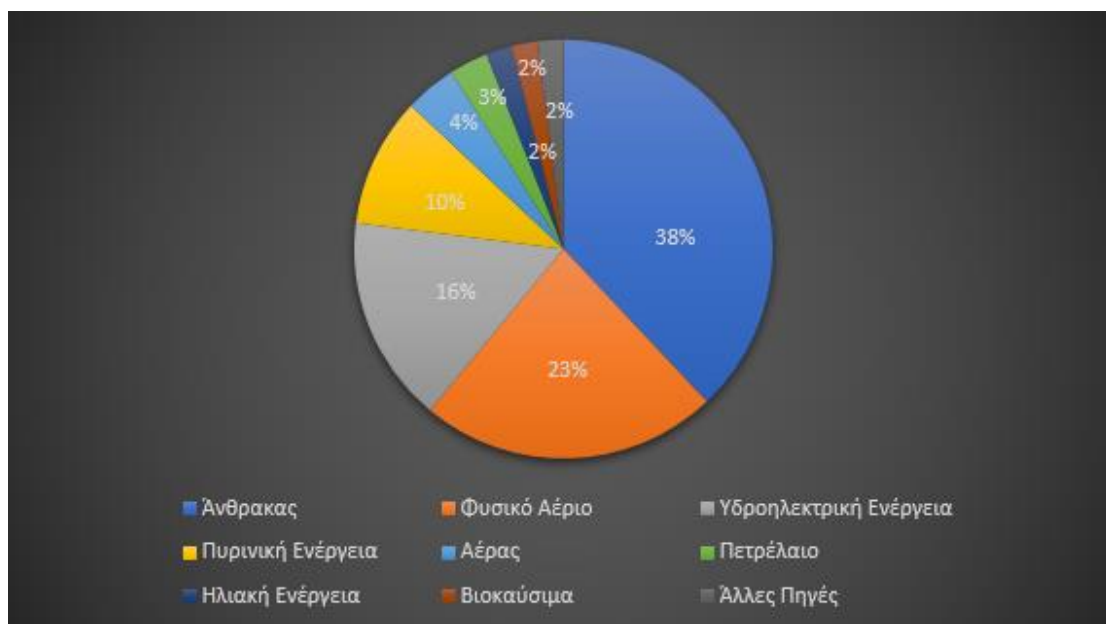
Εικόνα 1: Συμβολή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας το 2017

Αυτά τα ποσοστά είναι πολύ σημαντικό να αυξηθούν στο εγγύς μέλλον ενώ είναι μεγάλη ανάγκη να μειωθεί αρκετά η χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Για το λόγο αυτό η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει τους εξής στόχους για το 2030:

- Να μειωθούν κατά 40% τουλάχιστον οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να συνεισφέρουν στην παραγωγή ενέργειας το λιγότερο κατά 32%.
- Να υπάρξει βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 32.5% (Europa, 2020).

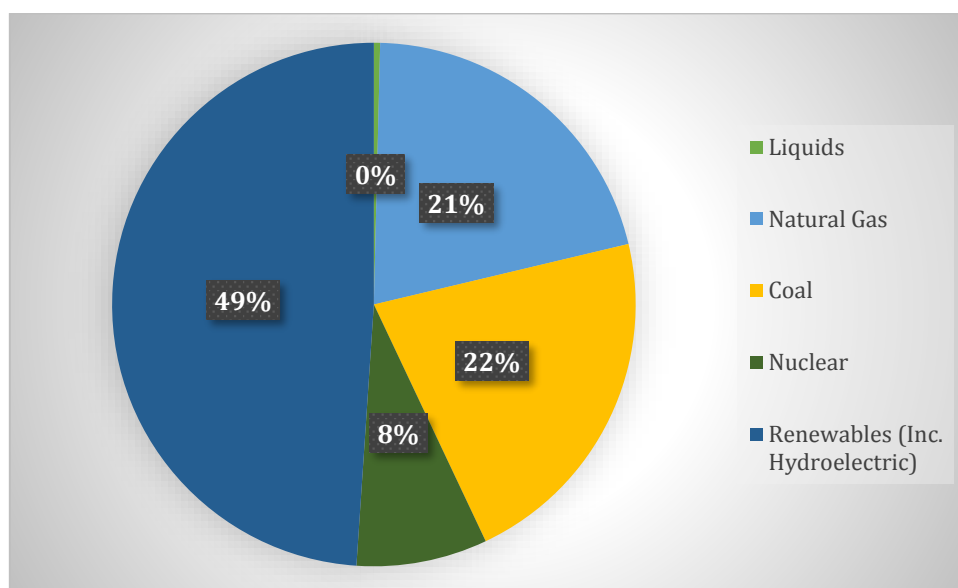
Αυτό θα βοηθήσει σημαντικά στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, που είναι η διαδικασία με την οποία η ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα ενός πλανήτη θερμαίνει την επιφάνεια του σε μια θερμοκρασία πάνω από αυτήν που θα ήταν χωρίς αυτήν την ατμόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια, ο όρος έχει συνδεθεί με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων και της κοπής δασών, έχουν

επιταχύνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη (Wikipedia, 2021).



Εικόνα 2: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο το 2017

Σύμφωνα με την εικόνα 2 το 2017 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό όμως πρόκειται να αλλάξει στο μέλλον, καθώς υπάρχει ο στόχος το 2050 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται κατά κύριο λόγο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 3.



Εικόνα 3: Προβλεπόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως το 2050, ανά πηγή ενέργειας

Παρακάτω αναγράφονται κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

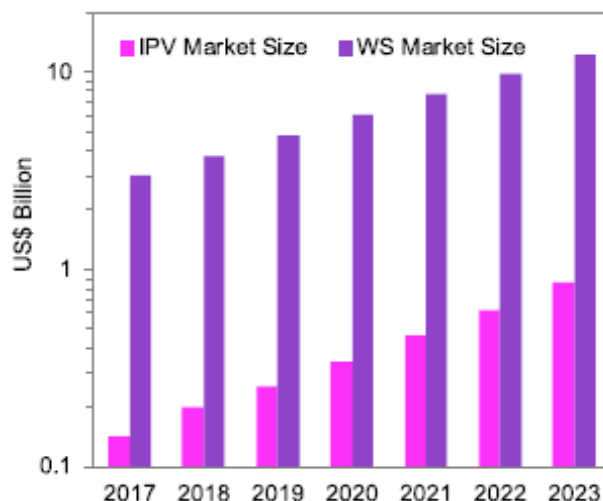
Πλεονεκτήματα:

- Φιλικές προς το περιβάλλον, με σχεδόν μηδενικά υπολείμματα και απόβλητα.
- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή.
- Έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, περίπου 20 με 30 χρόνια.

Μειονεκτήματα:

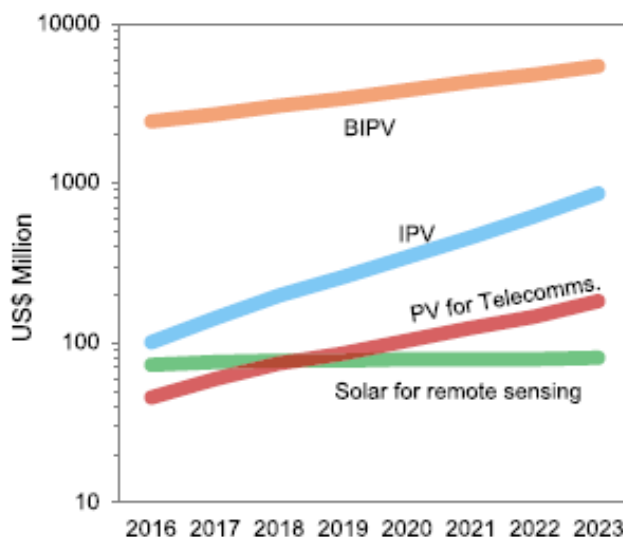
- Έχουν χαμηλό δείκτη απόδοσης σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Για τον παραπάνω λόγο δεν αρκούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων πόλεων.
- Ακριβό κόστος εγκατάστασης.
- Γεωγραφικοί και κλιματικοί περιορισμοί.
- Απαιτούν την κάλυψη μεγάλης επιφάνειας γης η οποία διαφορετικά θα μπορούσε να ήταν καλλιεργήσιμη.
- Για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται ορισμένες τοξικές χημικές ουσίες (κάδμιο και αρσενικό) και ορισμένες σπάνιες γαίες, οι οποίες στο μέλλον ενδέχεται να είναι σε έλλειψη λόγω της αλόγιστης χρήσης τους.

Όσον αναφορά την παγκόσμια αγορά των φωτοβολταϊκών εσωτερικού χώρου (Indoor Photovoltaic-IPV) μετά από μελέτη που διενεργήθηκε, το 2017 κυμάνθηκε στα 140 εκατομμύρια δολάρια. Το ποσό αυτό είναι ασήμαντο σε σχέση με την παγκόσμια αγορά μονάδων συλλογής ηλιακής ενέργειας η οποία ξεπέρασε τα 100 δισεκατομμύρια τον ίδιο χρόνο (Oviedo, et al., 2019). Όπως προκύπτει από την παρακάτω εικόνα λόγω της ανάπτυξης της βιομηχανίας των αισθητήρων, το ετήσιο μέγεθος της αγοράς των φωτοβολταϊκών εσωτερικού χώρου θα αυξάνεται συνεχώς.



Εικόνα 4: Η καταγραφή του μεγέθους της αγοράς των ασύρματων αισθητήρων (WS) και της αγοράς φωτοβολταϊκών εσωτερικού χώρου (IPV) σε δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2021 και η πρόβλεψη της ανάπτυξης τους μέχρι το 2023 (Oviedo, et al., 2019)

Τη δεδομένη χρονική στιγμή η Erishine αποτελεί παγκοσμίως στο χώρο των φωτοβολταϊκών εσωτερικού χώρου την πρώτη εταιρεία που ξεκίνησε να διαθέτει στην αγορά τις συσκευές της. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη αγορά βρίσκεται σε ένα πολύ πρώιμο στάδιο, αυτό όμως πρόκειται να αλλάξει καθώς και άλλες εταιρείες βρίσκονται κοντά στο να διαθέσουν στο εμπόριο τα προϊόντα τους. Πιο συγκεκριμένα το 2023 αναμένεται το μέγεθος της αγοράς να είναι στα 850 εκατομμύρια δολάρια ενώ υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να αυξηθεί σε αγορά δισεκατομμυρίων το επόμενο έτος. Επιπλέον μέχρι το 2023 θα αυξηθεί η ζήτηση των κυψελίδων εσωτερικού χώρου, η οποία αναμένεται να φτάσει σε 60 εκατομμύρια ετησίως. Αυτή αποτελεί μία αύξηση της τάξης του 70% σε σχέση με το σημερινό μέγεθος της αγοράς, καθιστώντας την ταχύτερα αναπτυσσόμενη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μη παραδοσιακές φωτοβολταϊκές αγορές (Oviedo, et al., 2019).



Εικόνα 5: Το μέγεθος των εναλλακτικών αγορών για φωτοβολταϊκές τεχνολογίες για τα επόμενα χρόνια (Oviedo, et al., 2019)

2.2. Τεχνολογίες μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων. Ένα ηλιακό στοιχείο, ή ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει την ενέργεια του φωτός απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ορίζονται ως συσκευές στις οποίες τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως ρεύμα, τάση ή αντίσταση, ποικίλλουν όταν εκτίθενται στο φως. Μεμονωμένες συσκευές φωτοβολταϊκών κυττάρων μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν μονάδες, γνωστές ως ηλιακά πάνελ.

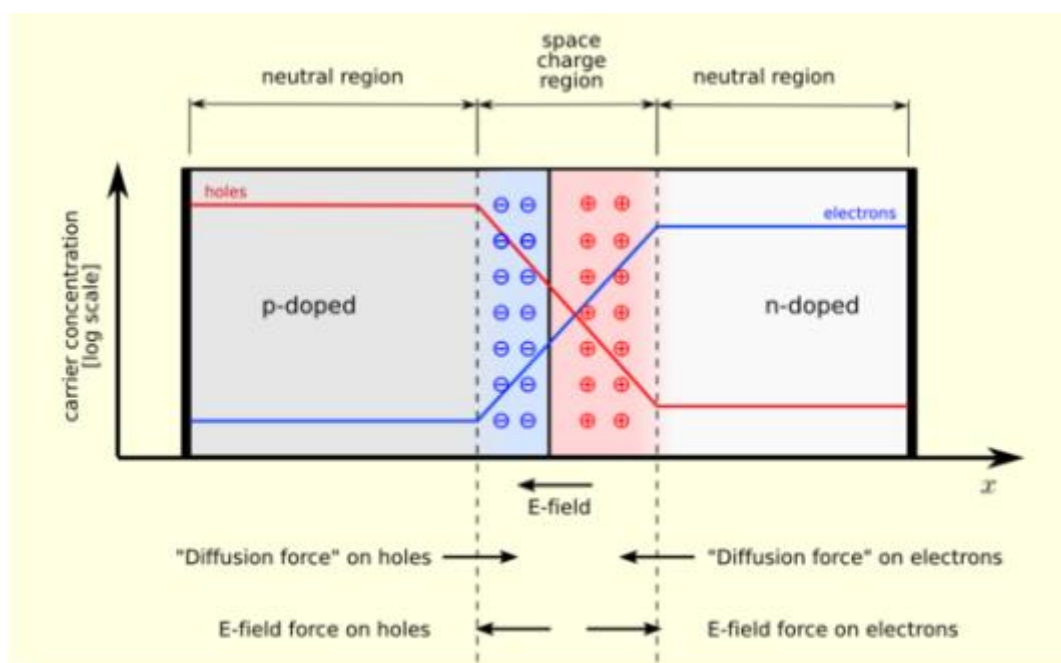
Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο βασίζεται στις ακόλουθες 3 αρχές:

- Η απορρόφηση του φωτός και η παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, το οποίο ονομάζεται εξιτόνιο.
- Ο διαχωρισμός του ηλεκτρονίου και της οπής.
- Η συλλογή των ηλεκτρονίων και των οπών μέσω των επαφών στο εξωτερικό κύκλωμα (Planete-energies, 2019).

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων: τα ανόργανα φωτοβολταϊκά κύτταρα και τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

2.2.1. Ανόργανες ηλιακές κυψελίδες

Στις μέρες μας, η πλειονότητα των εμπορικών ηλιακών κυψελών βασίζεται στην ανόργανη φωτοβολταϊκή τεχνολογία που χρησιμοποιεί μια πλάκα πυριτίου είτε σε μονοκρυσταλλική είτε σε πολυκρυσταλλική μορφή για την απορρόφηση του φωτός και μία **επαφή p-n** για τον διαχωρισμό του φορτίου, των ηλεκτρονίων και των οπών δηλαδή. Η επαφή p-n σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού **τύπου n** με ένα τεμάχιο **τύπου p**. Η διαδικασία που ακολουθείται για να δημιουργηθούν αυτοί οι δύο τύποι ονομάζεται ντόπινγκ. Ουσιαστικά κατά την κατεργασία αυτή αναμειγνύονται διάφορα χημικά στοιχεία. Έτσι για τη δημιουργία του τεμαχίου n-τύπου στο πυρίτιο προστίθενται μικρές ποσότητες αρσενικού ή φωσφόρου, ενώ στο τεμάχιο p-τύπου προστίθεται βόριο ή γάλλιο. Στην πλευρά "**p**" (**θετική**) υπάρχουν περίσσεια οπών, ενώ στην πλευρά "**n**" (**αρνητική**) υπάρχουν περίσσεια ηλεκτρονίων. Οπότε το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσω της επαφής p-n μόνο προς μία κατεύθυνση, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διόδου. Στην ουσία η διάδος είναι η ηλεκτρονική εκδοχή της βαλβίδας η οποία για παράδειγμα δεν επιτρέπει στο νερό να έχει ροή αντίθετη από την επιθυμητή. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η διάδος επιτρέπει να περάσει το ηλεκτρικό ρεύμα από τη μία κατεύθυνση αλλά μπλοκάρει την κίνηση προς την αντίθετη. Στις μέρες μας ο πιο διαδεδομένος τύπος διόδου είναι η διάδος ημιαγωγού, η οποία βασίζεται στην επαφή p-n. Σε μία p-n διάοδο το ρεύμα μπορεί να ρέει από τη μεριά τύπου p προς τη μεριά τύπου n, αλλά όχι προς την αντίθετη (Πλευριτάκης, 2019).



Εικόνα 6: Επαφή p-n (Wikipedia, 2014)

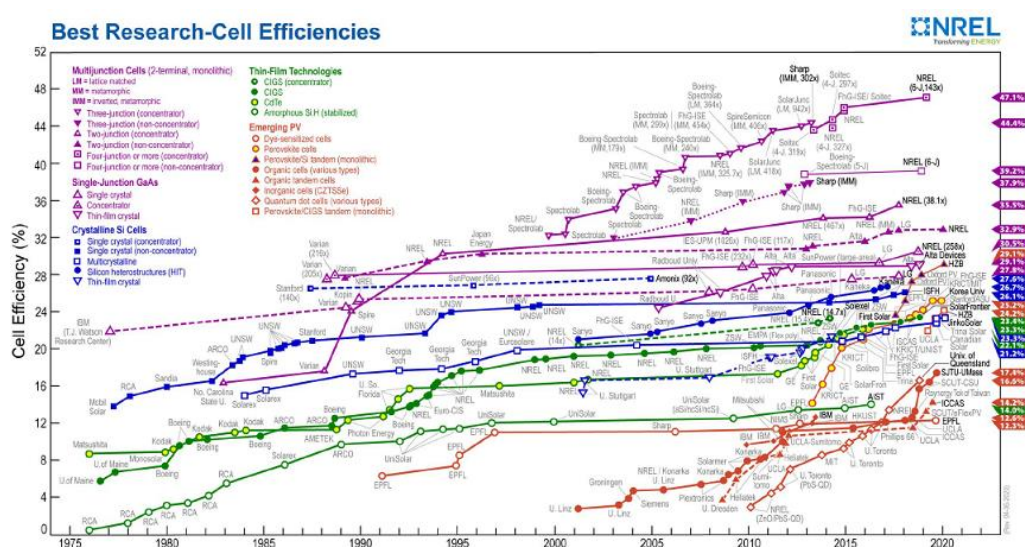
Αυτή τη στιγμή η πιο σημαντική πρόκληση για τους κατασκευαστές φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι η δημιουργία φωτοβολταϊκών κυψελίδων υψηλής απόδοσης αλλά και χαμηλού κόστους ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί διάφορες τεχνολογίες ανόργανων φωτοβολταϊκών κυψελίδων ώστε να υπάρξει βελτιστοποίηση στο λόγο κόστους ανά αποδοτικότητα. Το πιο διαδεδομένο υλικό για την παρασκευή φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο αποτελεί έναν ημιαγωγό ο οποίος παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα: αποτελεί έναν από τους πιο άφθονους πόρους στη Γη, δεν είναι τοξικό και τέλος μπορεί να αναμιχθεί με φώσφορο και βόριο για τη δημιουργία της επαφής p-n. Σήμερα για την κατασκευή των ηλιακών πάνελ που διατίθενται στην αγορά υπάρχουν 3 τύποι τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται: μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά και άμορφα λεπτά φιλμ (thin films). Οι κρυσταλλικές φωτοβολταϊκές κυψελίδες είναι οι πιο δημοφιλείς στην αγορά καθώς καταφέρνουν να παρέχουν τις υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής ενέργειας. Αυτό εξηγείται από την αφθονία του πυριτίου που υπάρχει στο φλοιό της Γης, ενώ και από τις φυσικοχημικές ιδιότητές του οι οποίες προσδίδουν καλή αποδοτικότητα. Οι κρυσταλλικές φωτοβολταϊκές κυψελίδες πυριτίου παράγονται από δύο διαφορετικά υποστρώματα πυριτίου, το πρώτο είναι το μονοκρυσταλλικό το οποίο έχει την υψηλότερη αποδοτικότητα (25%) αλλά είναι ακριβό, ενώ το δεύτερο είναι το πολυκρυσταλλικό το οποίο ναι μεν είναι πιο φθηνό αλλά έχει χαμηλότερη αποδοτικότητα (20.4%). Ωστόσο παρά το σημαντικό πλεονέκτημα της υψηλής αποδοτικότητά τους παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως το πάχος των κρυσταλλικών κυττάρων του πυριτίου το οποίο είναι κάποια εκατοντάδες μικρόμετρα και τα καθιστά εύθραυστα. Επίσης λόγω της διαδικασίας της ενθυλάκωσης αποκτούν μεγάλο βάρος, ενώ τέλος έχουν υψηλό κόστος κατασκευής. Όλα αυτά συνέβαλαν στους ερευνητές να αναπτύξουν εναλλακτικές τεχνολογίες που απαιτούν τη χρήση λίγου ή καθόλου πυριτίου (Karzazi & Arbouch, 2014). Τα πάνελ λεπτής μεμβράνης είναι μία νέα και τελείως διαφορετική τεχνολογία σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά πάνελ. Επιπλέον δεν θεωρούνται ως μία ώριμη τεχνολογία καθώς υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης μέσα στα επόμενα χρόνια. Πολύ σημαντικό είναι ότι υπάρχουν ιδιαίτερα μεγάλες επενδύσεις πάνω σε αυτή τη νέα τεχνολογία λόγω του ότι μπορεί να έχει χαμηλότερο κόστος και ευελιξία σε σχέση με τις κρυσταλλικές κυψελίδες πυριτίου, ενώ επίσης υπάρχει αισιοδοξία ότι μπορεί να φτάσουν την αποτελεσματικότητα του πυριτίου. Οι κύριες τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης που προσπαθούν να ανταγωνιστούν σε βάθος χρόνου τις κρυσταλλικές κυψελίδες πυριτίου είναι 4 και αναφέρονται παρακάτω. Αρχικά είναι τα *άμορφα κύτταρα πυριτίου*, τα οποία έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής αλλά το κακό είναι η χαμηλή απόδοση μετατροπής της ενέργειας με 13.4%. Η δεύτερη τεχνολογία είναι τα *κύτταρα τελλουρίου καδμίου* (CdTe) τα οποία έχουν επιδείξει μια καλή απόδοση με 19.6% όμως υποφέρουν από την τοξικότητα του καδμίου και τη μη διαθεσιμότητα του τελλουρίου. Στη συνέχεια είναι τα *κύτταρα χαλκού ίνδιου γαλλίου σεληνίδιο* (CIGS) επιδεικνύοντας μια πολύ καλή απόδοση στο 20.8% αλλά το αρνητικό είναι

ότι υπάρχει έλλειψη ινδίου. Τέλος είναι τα *κύτταρα αρσενιδίου του γαλλίου* (GaAs) τα οποία παρουσιάζουν τη μέγιστη απόδοση με 28.8%. (Karzazi & Arbouch, 2014). Το μεγαλύτερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν αυτές οι τεχνολογίες και δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα κρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου έχει να κάνει με το κόστος ανά απόδοση.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά και αποδόσεις των βασικών τεχνολογιών ανόργανων φωτοβολταϊκών κυττάρων

Τεχνολογίες ανόργανων φωτοβολταϊκών κυττάρων	Καλύτερες ερευνητικές αποδόσεις	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	25%	Υψηλή αποδοτικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής	Βαρύ
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	20.40%	Αποδοτικότητα και λιγότερη σπατάλη πυριτίου	Βαρύ
Άμορφο πυρίτιο	13.40%	Χαμηλό κόστος κατασκευής	Αποδοτικότητα
Αρσενίδιο του γαλλίου	28.8%	Υψηλότερη αποδοτικότητα	Πολύ ακριβό
Χαλκού ίνδιου γαλλίου Σεληνιδίου	20.80%	Αποδοτικότητα	Σπάνια στοιχεία
Τελλουριούχου του καδμίου	19.60%	Χαμηλό κόστος κατασκευής	Τοξικό και σπάνια στοιχεία

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται οι υψηλότερες ερευνητικές αποδοτικότητες που έχουν επιτευχθεί από τους διάφορους τύπους ηλιακών κυττάρων. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά, τα οποία αναλύονται λεπτομερέστερα παρακάτω, παρουσιάζονται από την πορτοκαλί γραμμή με τις κυκλικές κουκίδες. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος στο διάγραμμα τα τελευταία 20 χρόνια η αποδοτικότητα των οργανικών φωτοβολταϊκών έχει σημειώσει μια ραγδαία εξέλιξη. Αυτό σημαίνει ότι είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με λαμπρό μέλλον.



Εικόνα 7: Γράφημα υψηλότερων ερευνητικών αποδοτικότητας που δημιουργήθηκε από το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (NREL) (Nrel, 2017)

2.2.2. Οργανικές ηλιακές κυψελίδες

2.2.2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο χώρο των φωτοβολταϊκών τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αναδύονται με αρκετά γρήγορο ρυθμό νέες τεχνολογίες. Η πιο πρόσφατη και συνάμα πολλά υποσχόμενη είναι η οργανική φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Η τεχνολογία αυτή έχει να κάνει με την κατασκευή λεπτών, εύκαμπτων, διάφανων και ελαφρών ηλιακών κυψελίδων σε προσιτές τιμές. Τα τελευταία 10 χρόνια, έχει σημειωθεί μια τεράστια πρόοδος στον ερευνητικό τομέα των οργανικών φωτοβολταϊκών. Χάρη στην κατασκευή νέων αρκετά σταθερών και αποδοτικότερων οργανικών υλικών δωρητών-δεκτών (Donor-Acceptor), νέων δομών συσκευών καθώς και ρυθμιστικών στρωμάτων έχει καταστεί εφικτό να αυξηθεί η απόδοση τους (Patil, 2014). Αυτό δείχνει ότι η εμπορική χρήση τους είναι πολύ κοντά. Αυτή τη στιγμή, σε όλο τον κόσμο υπάρχουν πολλές εταιρείες οι οποίες ασχολούνται με την μεγάλη κλίμακα παραγωγής οργανικών φωτοβολταϊκών (Patil, 2014). Τα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζουν είναι αρκετά όπως χαμηλό κόστος, ελαφρότητα, ευελιξία, εύκολα στην κατασκευή, ημιδιαφανές και συμβατότητα στο ρολό στο οποίο τυπώνονται. Ωστόσο όσον αφορά την υψηλή διάρκεια ζωής, την σταθερότητα και την υψηλή αποδοτικότητα τους εξακολουθούν να αποτελούν πρόβλημα σε σχέση με τις ανόργανες. Για την κατασκευή των οργανικών διατάξεων χρησιμοποιούνται αγωγικά υλικά όπως για παράδειγμα πολυμερή, μικρά μόρια ή ολιγομερή ώστε να μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Επίσης αναφέρονται ως φωτοβολταϊκή τεχνολογία 3^{ης} γενιάς, ενώ τα κρυσταλλικά είναι 1^{ης} και τα φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης 2^{ης}.

Η βασική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου αποτελείται από το φωτοενεργό στρώμα (Photoactive layer-PAL), από ένα διαφανές ηλεκτρόδιο ανόδου και από ένα ηλεκτρόδιο καθόδου. Το φωτοενεργό στρώμα περικλείεται από τα δύο ηλεκτρόδια και είναι το μέσο στο οποίο δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Γενικά αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά ημιαγωγών τα οποία είναι ένα υλικό δότη τύπου p και ένα υλικό δέκτη τύπου n. Αυτά τα υλικά όταν συγκεντρώνονται στο φωτοενεργό στρώμα δημιουργείται η επαφή p-n. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το διαφανές ηλεκτρόδιο ανόδου είναι για την απορρόφηση της ακτινοβολίας, ενώ σε αυτό συλλέγονται οι οπές που έχουν δημιουργηθεί. Τέλος το ηλεκτρόδιο καθόδου είναι από μέταλλο και εκεί πέρα συλλέγονται τα ηλεκτρόνια.



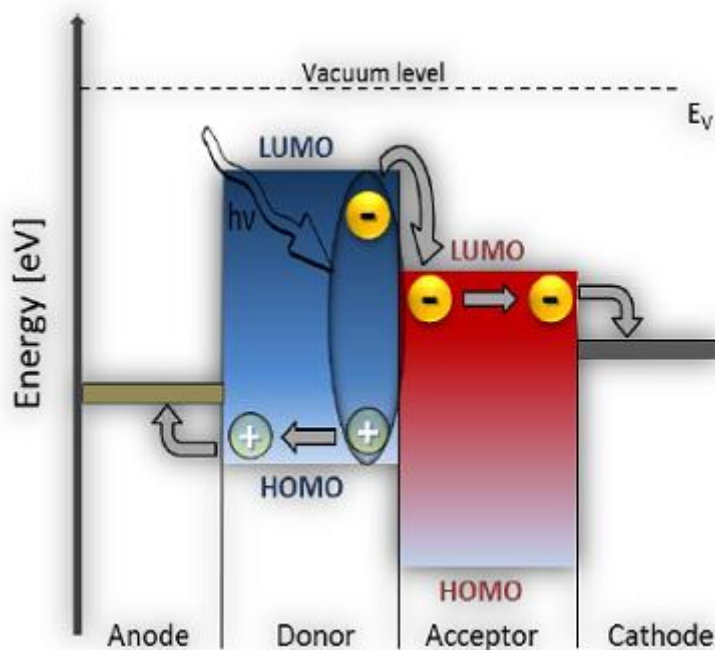
Εικόνα 8: Βασική δομή ενός οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου

Η λειτουργία ενός οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου βασίζεται στα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Απορρόφηση φωτονίων στο φωτοενεργό στρώμα.
2. Δημιουργία εξιτονίων στην επαφή δότη-δέκτη, τα οποία είναι ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στενά συνδεδεμένα.
3. Διαχωρισμός εξιτονίων σε φορείς φορτίου στην επαφή δότη-δέκτη.
4. Συλλογή των ηλεκτρονίων και των οπών στα κατάλληλα ηλεκτρόδια.
5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη δημιουργία κατάλληλου εξωτερικού κυκλώματος στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια.

Η βασική διαφορά στην αρχή λειτουργίας των οργανικών διατάξεων σε σχέση με τις ανόργανες, είναι ότι στις οργανικές η απορρόφηση του φωτός δεν δημιουργεί ελεύθερους φορείς φορτίου αλλά δεσμευμένους. Το δεσμευμένο αυτό ζευγάρι είναι το εξιτόνιο. Στη συνέχεια αναλύεται λεπτομερώς η αρχή λειτουργίας των οργανικών διατάξεων.

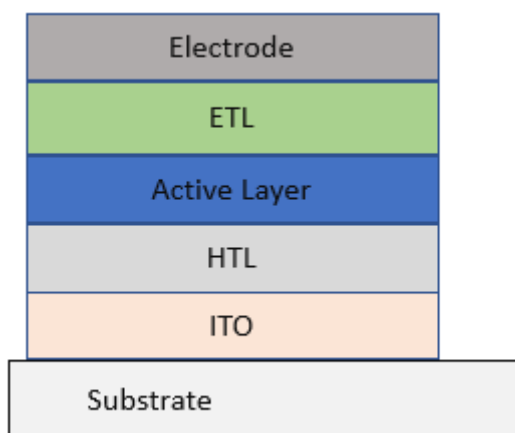
Αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι οι οργανικές διατάξεις αποτελούνται από ένα δότη και ένα δέκτη ηλεκτρονίων, οι οποίοι δεν είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό. Αυτά τα υλικά χαρακτηρίζονται από μία συγκεκριμένη ενέργεια υψηλότερου κατειλημμένου μοριακού τροχιακού (highest occupied molecular orbital–HOMO) και από μία συγκεκριμένη ενέργεια χαμηλότερου μη-κατειλημμένου μοριακού τροχιακού (lowest unoccupied molecular orbital–LUMO) (Δούδης, 2017). Οπότε μετά την πρόσπτωση της ηλιακής ενέργειας και την απορρόφηση των φωτονίων πάνω στα μόρια του δότη ή του δέκτη προκαλείται η διέγερση ενός ηλεκτρονίου που απορροφά την ενέργεια και δημιουργεί το εξιτόνιο. Στη συνέχεια το εξιτόνιο μετακινείται περαιτέρω στην διεπιφάνεια που έχει δημιουργηθεί από τη επαφή μεταξύ των υλικών του δότη και του δέκτη και μετά αποσυνδέεται σε ηλεκτρόνιο και οπή. Αφού πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός του εξιτονίου τα ηλεκτρόνια που έχουν διεγερθεί από το LUMO του δότη περνούν στο LUMO του δέκτη και στη συνέχεια καταλήγουν στο ηλεκτρόδιο καθόδου. Ενώ αντίστοιχα οι οπές περνούν από το HOMO του δότη περνούν στο HOMO του δέκτη και φτάνουν στο ηλεκτρόδιο ανόδου. Οπότε αν σε αυτά τα ηλεκτρόδια συνδεθεί με κατάλληλο εξωτερικό κύκλωμα μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια (Patil, 2014).



Εικόνα 9: Ενεργειακό διάγραμμα που απεικονίζει την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, το διαχωρισμό του ηλεκτρονίου και της οπής και τη συλλογή τους στα κατάλληλα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου (Patil, 2014)

2.2.2.2. Αρχιτεκτονική οργανικών φωτοβολταϊκών

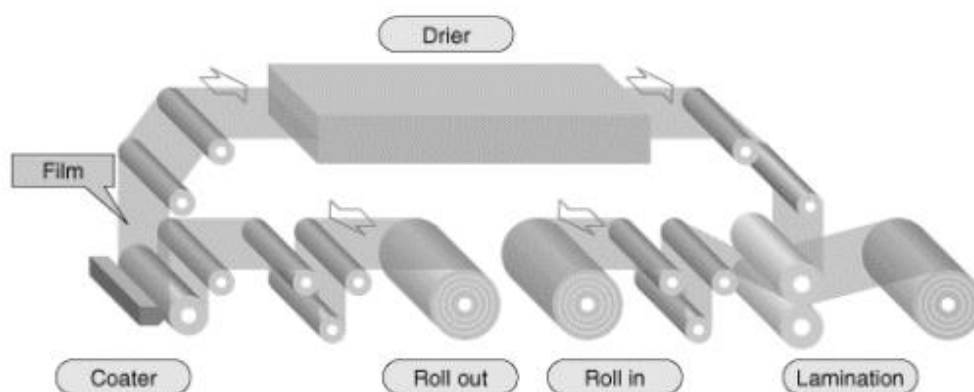
Σε αυτήν την ενότητα γίνεται μία πιο λεπτομερής ανάλυση της αρχιτεκτονικής ενός οργανικού κυττάρου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η βασική δομή μιας οργανικής διάταξης αποτελείται από τα δύο ηλεκτρόδια και το φωτοενεργό στρώμα. Αυτά έχουν την δυνατότητα να κατασκευαστούν με εκτύπωση είτε πάνω σε πολυμερές υπόστρωμα, είτε πάνω σε γυαλί το οποίο όμως χρησιμοποιείται κυρίως για εργαστηριακές δοκιμές. Πιο σύνηθες όμως είναι η χρήση του πολυμερούς καθώς σε σχέση με το γυαλί είναι αρκετά εύκαμπτο, γεγονός το οποίο κάνει πιο εύκολη την επεξεργασία του μέσω της διαδικασίας Roll-to-Roll (R2R). Το κύριο υπόστρωμα που χρησιμοποιείται γενικά είναι ο πολυτερεφθαλικός αιθυλεστέρας (Polyethylene Terephthalate εν συντομία PET). Στην ουσία είναι ένα πλαστικό φιλμ το οποίο έχει χαμηλό κόστος και καλές μηχανικές ιδιότητες. Το βασικό του ελάττωμα είναι ότι διαπερνάται εύκολα από το οξυγόνο και την υγρασία. Επίσης για να επιτευχθεί αύξηση στην απόδοση του οργανικού κυττάρου εισάγονται ένα στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων (Electron Transport Layer-HTL) και ένα στρώμα μεταφοράς οπών (Hole Transport Layer-ETL) τα οποία είναι τοποθετημένα ανάμεσα από τα δύο ηλεκτρόδια. Μέσω των στρωμάτων αυτών ενισχύεται η επιλεκτικότητα των δύο ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου, καθώς υπάρχει μικρότερο ποσοστό ώστε να συλλεχθούν ηλεκτρόνια και οπές στα μη κατάλληλα ηλεκτρόδια. Επιπλέον βοηθούν στο να μειωθεί ο ρυθμός επανασύνδεσης ηλεκτρονίων και οπών. Τέλος αποτελούν ένα είδος φράγματος στη διαπερατότητα από οξυγόνο και υγρασία (Δούδης, 2017). Όπως παρατηρείται και στην εικόνα 10 το ένα από τα δύο ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένο από οξειδίο ινδίου-κασσιτέρου (Indium Tin Oxide-ITO). Το ITO είναι ένας ημιαγωγός n-τύπου το οποίο έχει μοναδικές ιδιότητες διαφάνειας και αγωγιμότητας, ενώ χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο ανόδου λόγω της καλής απόδοσης του στην εισαγωγή οπών στα οργανικά υλικά (Δούδης, 2017).



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική οργανικού φωτοβολταϊκού κυττάρου

2.2.2.3. R2R παραγωγή οργανικών φωτοβολταϊκών

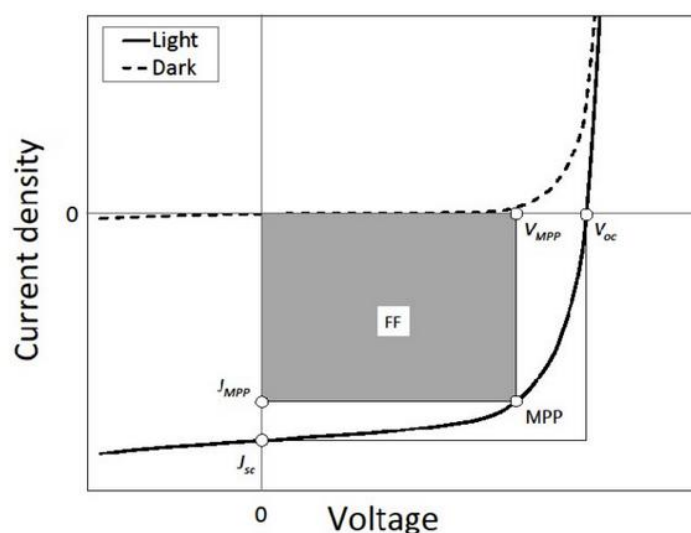
Η πιο κοινή και ευρέως διαδεδομένη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και την εκτύπωση των οργανικών φωτοβολταϊκών κυττάρων ονομάζεται Roll-to-Roll. Στις μέρες μας η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς παραγωγής όπως για παράδειγμα για την παραγωγή υφασμάτων, ινών, ιατρικών προϊόντων αλλά και σε εύκαμπτα ηλιακά πάνελ οργανικών διατάξεων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι έχει τη δυνατότητα να περιλαμβάνει πολλές τεχνολογίες. Στην περίπτωση που αυτές οι τεχνολογίες συνδυαστούν σωστά μπορούν να παράγουν ρολά τελικού υλικού με αποδοτικό και οικονομικό τρόπο με τα οφέλη των υψηλών ποσοστών παραγωγής και σε μαζικές ποσότητες. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, η διαδικασία αυτή μπορεί να επωφεληθεί από υψηλότερη απόδοση λόγω της γρήγορης ταχύτητας επεξεργασίας και της συνεχούς παραγωγής. Ο λόγος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οργανικών διατάξεων είναι η ευκαμψία που παρουσιάζει το πολυμερές υπόστρωμα πάνω στο οποίο κατασκευάζονται τα τελικά οργανικά κύτταρα. Κατά την τεχνική αυτή το υπόστρωμα είναι σε μορφή μεγάλου μήκους φύλλου το οποίο είναι τυλιγμένο σε ένα ρολό. Η γενική λογική αυτής της μεθόδου είναι ότι το πολυμερές αρχίζει να ξετυλίγεται από το ρολό, στη συνέχεια λαμβάνουν χώρα οι εκάστοτε κατεργασίες και τέλος ξανά τυλίγεται σε ρολό. Το ιδανικό αποτέλεσμα είναι το πολυμερές να εισέρχεται στη μηχανή επεξεργασίας από τη μία μεριά και στο τέλος της άλλης να παράγεται μία ολοκληρωμένη ηλιακή κυψελίδα. Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται μια διαδικασία εναπόθεσης (coating process). Κατά τη διαδικασία αυτή το πολυμερές αρχίζει να ξετυλίγεται και να περνάει αρχικά μέσα από το μηχανήμα που πραγματοποιείται η εναπόθεση του μελανιού, στη συνέχεια περνάει μέσα από μία μηχανή στεγνώματος όπου τις περισσότερες φορές αυτή είναι ένας φούρνος, ώστε να στεγνώσει το μελάνι. Τέλος το πολυμερές περνά μέσω μιας διαδικασίας ενθυλάκωσης, κατά την οποία τοποθετείται μία προστατευτική μεμβράνη για την προστασία του μελανιού από την ατμόσφαιρα (Hartikainen & Willman, 2019).



Εικόνα 11: Μία σχηματική απεικόνιση της R2R διαδικασίας. (Hartikainen & Willman, 2019)

2.2.2.4. Χαρακτηρισμός οργανικών φωτοβολταϊκών

Για να προσδιοριστούν η απόδοση και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μίας φωτοβολταϊκής συσκευής χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη J-V η οποία απεικονίζει την πυκνότητα του ρεύματος J συναρτήσει της εφαρμοσμένης τάσης V. Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται η καμπύλη J-V ενός οργανικού κελιού στο φως και στο σκοτάδι. Οι παράμετροι που απεικονίζονται είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (J_{sc}) και το V_{oc} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος. Το σημείο (MPP) είναι γνωστό ως το γόνατο της J-V καμπύλης όπου η παραγωγή ισχύος είναι στο μέγιστο, ενώ οι παράμετροι του ρεύματος και της τάσης αναπαρίστανται από τις μεταβλητές J_{MPP} και V_{MPP} (Μπαρλαγιάννης, 2014).



Εικόνα 12: Η χαρακτηριστική καμπύλη J-V που αναπαριστά τις πιο σημαντικές παραμέτρους της απόδοσης (Μπαρλαγιάννης, 2014)

Ρεύμα βραχυκύκλωσης (J_{sc})

Όταν το κύκλωμα βραχυκυκλώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης παίρνει την μέγιστη τιμή J_{sc} ενώ η τάση ισούται με μηδέν.

$$J \text{ (at } V = 0) = J_{sc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$$

Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})

Αντίθετα όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{oc} και στην προκειμένη περίπτωση το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μηδέν.

$$V \text{ (at } I = 0) = V_{oc} \text{ (V)}$$

Μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς (P_{MPP})

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από ένα οργανικό κύτταρο μετριέται σε Watt (W). Από όλα τα δυνατά ζεύγη τιμών ρεύματος-τάσεως λειτουργίας ενός οργανικού κυττάρου υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας στο οποίο η ισχύς γίνεται μέγιστη. Το σημείο αυτό εξάγεται από τα J_{MPP} και V_{MPP} .

Συντελεστής συμπλήρωσης (Fill Factor-FF)

Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με πλευρές J_{sc} και V_{oc} περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά της οργανικής συσκευής ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το πηλίκο των εμβαδών των δύο παραλληλογράμμων με πλευρές J_{sc}, V_{oc} και J_{MPP}, V_{MPP} ονομάζεται συντελεστής συμπλήρωσης.

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} * V_{oc}} = \frac{J_{max} * V_{max}}{J_{sc} * V_{oc}} \quad (1)$$

Ο συντελεστής συμπλήρωσης σχετίζεται με την απόδοση της οργανικής συσκευής, είναι στην ουσία το μέτρο ποιότητάς της. Στην ιδανική περίπτωση ο συντελεστής αυτός ισούται με τη μονάδα. Αυτό όμως είναι πρακτικά αδύνατο να επιτευχθεί λόγω απωλειών εξιτονίων, όποτε τις περισσότερες φορές κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.8.

Συντελεστής απόδοσης η

Ο συντελεστής απόδοσης η δείχνει πόσο καλά αποδίδει συνολικά μια οργανική συσκευή. Ο τύπος που δίνει αυτόν το συντελεστή είναι το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος P_{max} προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

Από την εξίσωση (1),

$$P_{max} = J_{sc} * V_{oc} * FF$$

$$\eta = \frac{J_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}}$$

Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται από το φάσμα και την ένταση του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός αλλά και τη θερμοκρασία του οργανικού κυττάρου. Επομένως είναι πολύ σημαντικό όταν πραγματοποιείται σύγκριση και δοκιμή διαφόρων συσκευών να γίνεται υπό παρόμοιες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας.

2.3. Μέθοδοι παραγωγής και χαρακτηρισμού των οργανικών φωτοβολταϊκών

Για την κατασκευή των οργανικών διατάξεων λεπτών φιλμ χρησιμοποιείται μια ευρεία γκάμα τεχνικών. Στην αρχή θα αναλυθούν οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η εναπόθεση των διάφορων στρωμάτων και των ηλεκτροδίων πάνω στο ρολό. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής: τεχνική της εναπόθεσης ή επίστρωσης και η τεχνική της εκτύπωσης. Στην διαδικασία της επίστρωσης το μελάνι τοποθετείται πάνω στο ρολό με πολλούς τρόπους όπως είναι το βάψιμο, ο ψεκασμός ή η επικάλυψη. Στη διαδικασία της εκτύπωσης η τοποθέτηση του επιτυγχάνεται με κάποιο μέσο το οποίο έρχεται σε επαφή με το ρολό. Οι μέθοδοι εκτύπωσης είναι:

- Εκτύπωση με πλέγμα (screen printing).
- Βαθυτυπία (gravure printing).
- Ταμπονογραφία (pad printing).
- Φλεξογραφία (flexographic printing).
- Inkjet printing.
- Offset printing.

Αντίθετα οι μέθοδοι της επίστρωσης είναι:

- Περιδίνηση (spin coating).
- Επίστρωση με ράβδο (doctor blading) ή με νυστέρι (knife coating).
- Επίστρωση slot-die.
- Ψεκασμός (spraying).
- Επίστρωση κουρτίνας (curtain coating) (Χαρίτος, 2018).

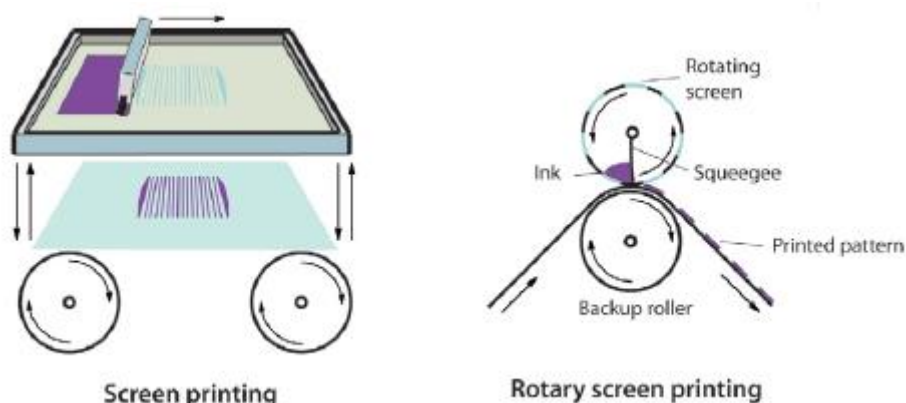
Παρακάτω θα αναλυθούν αυτές οι οποίες είναι οι πιο διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται κατά κόρον.

- **Τεχνικές εναπόθεσης και εκτύπωσης στρωμάτων**

Επίστρωση με πλέγμα (Screen printing)

Η τεχνική αυτή παλιότερα ονομαζόταν και μεταξοτυπία καθώς το πλέγμα που χρησιμοποιούταν ήταν κατασκευασμένο από μετάξι. Αποτελεί την πιο αποδοτική διεργασία όσον αναφορά το κόστος ενώ έχει και σχεδόν μηδενική απώλεια μελανιού. Κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχει ένα πλέγμα που είναι προσαρμοσμένο

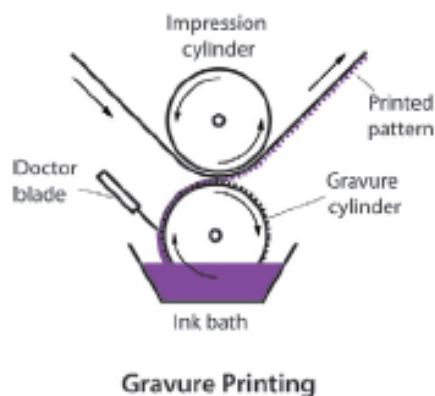
σε ένα πλαίσιο και βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το υπόστρωμα. Το μελάνι εισχωρεί ανάμεσα από τις τρύπες του πλέγματος και στη συνέχεια μία λεπίδα (squeegee), η οποία λειτουργεί σαν σπάτουλα πιέζει το πλέγμα καθώς μετακινείται πάνω του, επιστρώνει το μελάνι στο υπόστρωμα. Οι μεταξοτυπικές μηχανές χωρίζονται σε δύο τύπους α) της επίπεδης επιφάνειας (flat bed-screen printing) στις οποίες το υπόστρωμα τοποθετείται σε οριζόντιο επίπεδο και β) τις κυλινδρικές περιστροφικές (rotary screen printing) στις οποίες το υπόστρωμα τοποθετείται σε κύλινδρο, σχηματικά η τεχνική αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 13 (Χαρίτος, 2018).



Εικόνα 13: Απεικόνιση των δύο μεθόδων της μεθόδου επίστρωσης με πλέγμα. Αριστερά είναι ο μηχανισμός λειτουργίας συστήματος flat bed-screen printing ενώ δεξιά ο μηχανισμός rotary screen printing (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)

Βαθυτυπία (Gravure Printing)

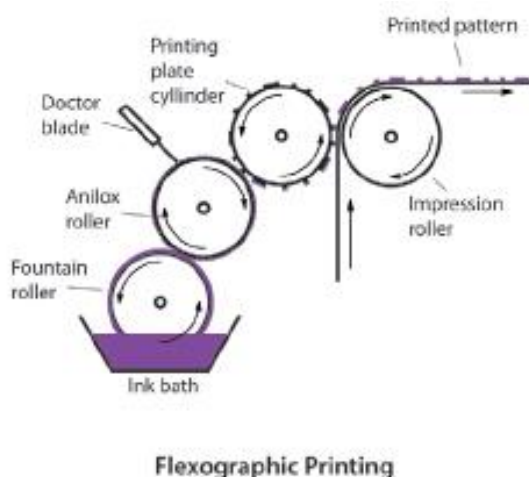
Η μέθοδος αυτή εκτός από την εκτύπωση των φωτοβολταϊκών στρωμάτων χρησιμοποιείται και για την εκτύπωση περιοδικών και καταλόγων. Όπως παρατηρείται και στην εικόνα 14 η λειτουργία της βασίζεται σε δύο κυλίνδρους, από τους οποίους ο ένας έχει πάνω του χαραγμένο το σχέδιο που θα εκτυπωθεί. Αυτός ο οποίος είναι χαραγμένος (Gravure cylinder) βυθίζεται μέσα στη «μπανιέρα» του μελανιού και μεταφέρει το σχέδιο πάνω στο υπόστρωμα το οποίο έρχεται σε επαφή με αυτόν μέσω του δεύτερου κυλίνδρου (Impression cylinder). Επιπλέον χρησιμοποιείται και μία λεπίδα (Doctor blade) της οποίας ο σκοπός είναι να απομακρύνει το παραπανίσιο μελάνι από την επιφάνεια του κυλίνδρου πριν έρθει σε επαφή ο χαραγμένος κύλινδρος με το υπόστρωμα (Χαρίτος, 2018).



Εικόνα 14: Μέθοδος βαθυτυπίας (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)

Φλεξογραφία (Flexographic printing)

Η τεχνική της φλεξογραφίας χρησιμοποιεί παρόμοιο τρόπο εκτύπωσης με την βαθυτυπία. Η διαφορά τους είναι στο ότι στην φλεξογραφία ο κύλινδρος εκτύπωσης δεν έχει πάνω του χαραγμένο το σχέδιο που θα εκτυπωθεί. Όπως και στην βαθυτυπία το μελάνι βρίσκεται σε μία «μπανιέρα» και αρχίζει να μεταφέρεται από τον πρώτο κύλινδρο (fountain roller) στον δεύτερο (anilox roller) ο οποίος έχει κάποιες μικροκοιλότητες που χρησιμεύουν για τη μεταφορά του μελανιού πάνω στο υπόστρωμα. Το μελάνι στο τέλος εναποτίθεται στο υπόστρωμα μέσω της πίεσης που ασκείται από τον κύλινδρο πίεσης (impression cylinder) (Χαρίτος, 2018).



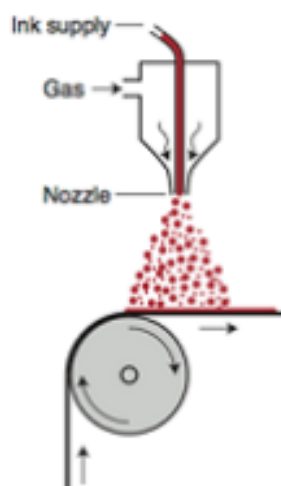
Εικόνα 15: Μέθοδος φλεξογραφίας (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)

Πριν αναλυθούν οι μέθοδοι της επίστρωσης θα αναφερθούν μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνικών της βαθυτυπίας και φλεξογραφίας. Αρχικά και οι δύο είναι ιδανικές για εκτυπώσεις υψηλής ταχύτητας αλλά και για την εκτύπωση μεγάλου αριθμού αντιτύπων. Επιπλέον κάποια ακόμη

πλεονεκτήματα της βαθυτυπίας είναι ότι κατά την προετοιμασία της εκτύπωσης η απώλεια υλικού είναι λιγότερη ενώ καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης η απόδοση του μελανιού είναι σταθερή και ικανοποιητική. Κάποια από τα μειονεκτήματά της είναι ότι για να κατασκευαστεί ο κύλινδρος εκτύπωσης απαιτείται υψηλό κόστος και αρκετός χρόνος, ενώ και για την αλλαγή του σχεδίου που είναι χαραγμένο πάνω στον εκτυπωτικό κύλινδρο απαιτείται η αλλαγή ολόκληρου του κυλίνδρου. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται το κόστος (Μπιτζένης & Απέργη, 1999). Όσον αφορά τη φλεξογραφία χαρακτηρίζεται ως μια «πράσινη» τεχνική καθώς σε σχέση με τη βαθυτυπία χρησιμοποιεί οικολογικά μελάνια και υλικά φιλικά από το περιβάλλον. Επίσης ο εξοπλισμός της δεν χρειάζεται ιδιαίτερη συντήρηση ενώ το μελάνι δεν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα τόσο όσο στη βαθυτυπία. Ένα από τα μειονεκτήματά της είναι το κόστος των εκτυπωτικών πλακών (Τζαγκαράκη, 2017).

Επίστρωση με Ψεκασμό (Spray coating)

Κατά την τεχνική αυτή το μελάνι εναποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα χωρίς να υπάρχει επαφή μεταξύ της κεφαλής επίστρωσης και του ρολού. Ο τρόπος υλοποίησης αυτής της μεθόδου όπως παρατηρείται στην εικόνα 16 είναι πολύ απλός, καθώς αποτελείται από την κεφαλή επίστρωσης η οποία έχει ένα ακροφύσιο που ψεκάζει το μελάνι. Ο ψεκασμός επιτυγχάνεται με τη βοήθεια συστήματος πεπιεσμένου αέρα μέσω του οποίου το μελάνι διασπάται σε σταγονίδια. Το πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι η υψηλή απόδοση αλλά και τα λίγα απόβλητα (Απαζίδης, 2017).

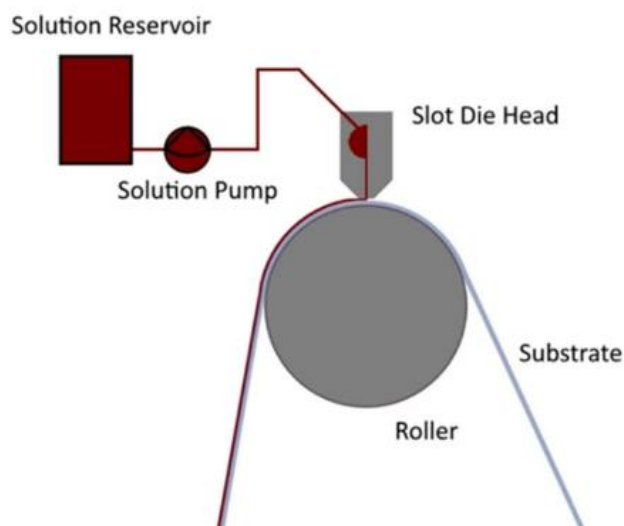


Εικόνα 16: Μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό (Απαζίδης, 2017)

Επίστρωση Slot-Die

Ακόμα μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος επίστρωσης είναι η τεχνική Slot-Die, η οποία σχηματικά παρουσιάζεται στην εικόνα 17. Στην προκειμένη περίπτωση το

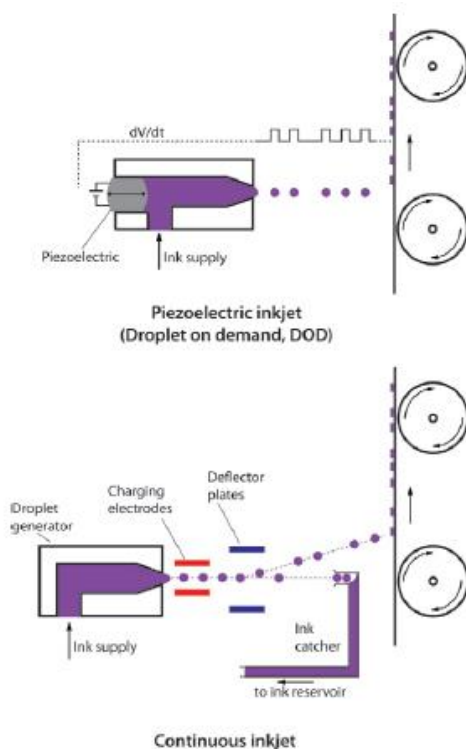
μελάνι επικαλύπτεται μέσω του εξαρτήματος της κεφαλής τύπωσης (slot die head). Η κεφαλή τύπωσης διανέμει το μελάνι ομοιόμορφα στο πλάτος του ρολού καθώς περνάει, αυτό οδηγεί σε εξαιρετική απόδοση του υλικού. Επίσης βοηθάει και στον έλεγχο του πάχους του επιχρισμένου στρώματος μεταβάλλοντας απλώς την ταχύτητα της αντλίας μελανιού (solution pump) και την ταχύτητα κίνησης του υποστρώματος. Όταν ο διαλύτης εξατμίζεται από το υπόστρωμα αφήνεται πίσω ένα καθαρό φιλμ του επιθυμητού υλικού. (Παπουτσής, 2014).



Εικόνα 17: Διαδικασία Slot Die Coating (Παπουτσής, 2014)

Inkjet Printing

Η εκτύπωση Inkjet έχει γίνει γνωστή από τους εκτυπωτές και εξαιτίας της αποδοτικότητας της τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί και στις φωτοβολταϊκές διατάξεις. Επίσης και σε αυτή τη μέθοδο το μελάνι εναποτίθεται στο υπόστρωμα χωρίς να υπάρχει επαφή με το ρολό. Η διαδικασία, όπως περιγράφεται στην εικόνα 18, αποτελείται από δύο μηχανισμούς ο πρώτος είναι ο συνεχής (continuous inkjet) και ο δεύτερος πιεζοηλεκτρικός (piezoelectric inkjet) ή σταγονιδίου κατά παραγγελία (droplet in demand). Το μελάνι εναποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα σε μορφή σταγονιδίων είτε μηχανικά μέσω ενός στομίου που του ασκεί πίεση είτε μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είτε με θέρμανση του μελανιού. Στη συνέχεια τα σταγονίδια φορτίζονται ηλεκτροστατικά μεταξύ δύο πλακών (deflector plates) και εναποτίθενται πάνω στο υπόστρωμα (Μπαρλαγιάννης, 2014).



Εικόνα 18: Διαδικασία Inkjet printing. Πάνω είναι ο πιεζοηλεκτρικός τρόπος, ενώ κάτω ο συνεχής (Χαρίτος, 2018)

- **Τεχνικές lamination**

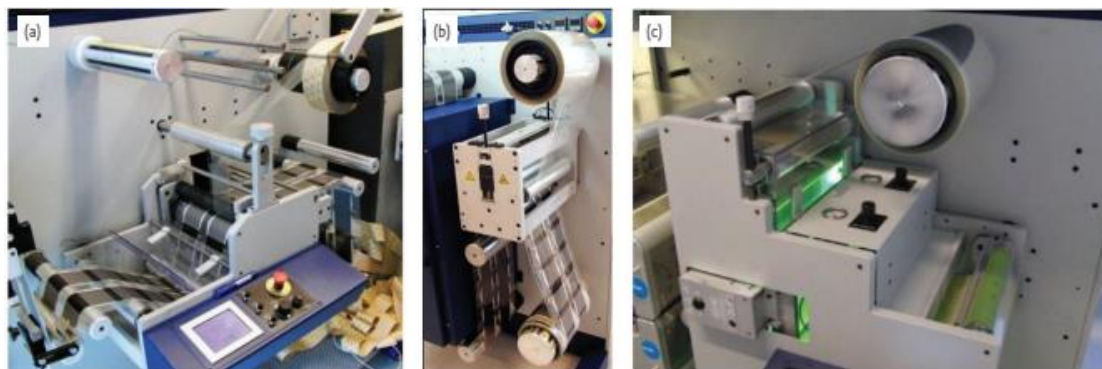
Η κατεργασία του **lamination** είναι πολύ σημαντική για την προστασία του οργανικού κυττάρου. Μέσω αυτής της μεθόδου στην οργανική διάταξη τοποθετείται μία λεπτή και εύκαμπτη πλαστική μεμβράνη η οποία εμποδίζει την διεύθυνση του οξυγόνου και της υγρασίας, καθώς αν συμβεί αυτό τα αποτελέσματα θα είναι καταστροφικά. Στην περίπτωση αυτή θα μειωθεί η λειτουργικότητα, η αποδοτικότητα και η διάρκεια ζωής της οργανικής συσκευής. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες τεχνικές: α) **Cold Lamination** β) **Hot melt Lamination** και γ) **UV Lamination**.

Η τεχνική Cold Lamination επιτυγχάνεται με την εφαρμογή adhesive πίεσης (γνωστή ως pressure sensitive adhesive). Ουσιαστικά στην ειδική μεμβράνη έχει τοποθετηθεί μία ευαίσθητη σε πίεση κόλλα η οποία μόλις δεχτεί λίγη πίεση συγκολλάται στο οργανικό κύτταρο (Τσιμικλή, 2016).

Η μέθοδος Hot Melt Lamination ακολουθεί την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη απλά στην προκειμένη περίπτωση η κόλλα ενεργοποιείται όταν θερμανθεί. Επιπλέον ο χειρισμός είναι πιο εύκολος σε σχέση με την Cold Lamination ενώ και το πάχος της κόλλας είναι λεπτότερο. Τα μειονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι οι πολύ ακριβές κεφαλές που χρησιμοποιούνται, η πολυπλοκότητα ώστε να επιτευχθεί σωστά η στρώση της κόλλας και οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που

αναπτύσσονται οι οποίες υπάρχει περίπτωση να καταστρέψουν το υλικό (Τσιμικλή, 2016).

Τέλος στην UV Lamination η κόλλα εφαρμόζεται στην πλαστική μεμβράνη μέσω εκτύπωσης ή εναπόθεσης. Μόλις έρθει σε επαφή το οργανικό κύτταρο και η μεμβράνη η κόλλα ενεργοποιείται μέσω της υπεριώδους ακτινοβολίας και στη συνέχεια σκληραίνει επιτυγχάνοντας την τελική συγκόλληση των υλικών. Τις περισσότερες φορές η εκτύπωση της UV κόλλας πραγματοποιείται μέσω της φλεξογραφικής εκτύπωσης. Οι παραπάνω 3 τεχνικές αναπαρίστανται σχηματικά στην εικόνα 19 (Απαζίδης, 2017).



Εικόνα 19: Φωτογραφίες από τις μηχανές των 3 τεχνικών του lamination σε R2R διαδικασία. Α) Cold Lamination Β) Hot Melt lamination και Γ) UV-Lamination (Søndergaard, Hösel, Angmo, & Krebs, 2012)

- **Τεχνικές τεμαχισμού**

Η παραγωγή του τελικού σχήματος και των τελικών διαστάσεων της κάθε συσκευής επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων τεχνικών τεμαχισμού. Μία από αυτές είναι η τεχνική του **Laser Cutting**, κατά την οποία η κεφαλή του laser κατευθύνεται μέσω ενός συστήματος CNC (Computerized Numerical Control) στο οποίο έχει δοθεί μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή ο κατάλληλος κώδικας ώστε να παραχθεί το ακριβές σχέδιο που επιθυμείται. Οι λόγοι που χρησιμοποιείται αυτή η τεχνολογία είναι πολλοί, οι κυριότεροι όμως είναι η υψηλή ακρίβεια και η εξαιρετική ποιότητα κοπής που παρουσιάζει. Επιπλέον η υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας καθώς σε μικρό χρονικό διάστημα μπορεί να δοθεί το τελικό σχήμα σε πολλές συσκευές ενώ έχει και τη δυνατότητα τεμαχισμού περίπλοκων γεωμετρικών σχημάτων (Wikipedia, 2015).

Μία άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η τεχνική του **Die Cutting**, κατά την οποία μέσω μίας μηχανής κοπής παράγονται οι τελικές συσκευές. Οι μηχανές κοπής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες α) τις χειρωνακτικές μηχανές και β) τις ψηφιακές μηχανές. Όπως είναι λογικό στη βιομηχανία των οργανικών φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται οι ψηφιακές μηχανές κοπής καθώς σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα επιτυγχάνεται η μαζική παραγωγή των οργανικών διατάξεων. Η

λειτουργία των μηχανών αυτών βασίζεται στην τροφοδότηση τους με ηλεκτρική ενέργεια, στο λογισμικό ενός υπολογιστή και σε μία λεπίδα. Μέσω του λογισμικού προγραμματίζονται οι εντολές που θα ακολουθήσει η λεπίδα ώστε να δημιουργήσει τα τελικά σχήματα (Scrapbook, 2020).

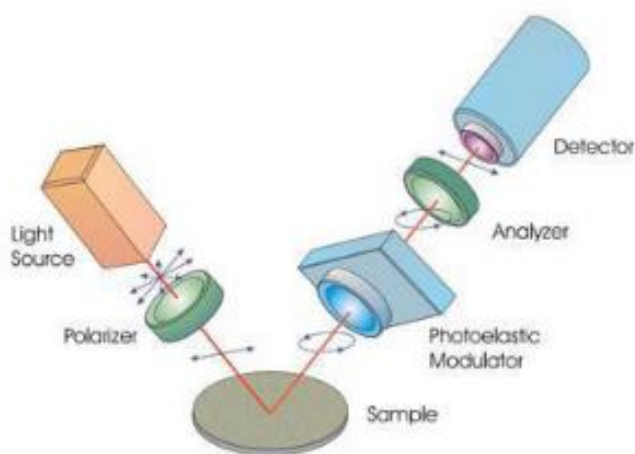
Ακόμη μία μέθοδος κοπής είναι η **CNC Knife Cutting**. Αυτή η μηχανή υψηλής ακρίβειας είναι εξοπλισμένη με μία ποικιλία από μαχαίρια και λεπίδες. Όπως και στις προηγούμενες τεχνικές το κοπτικό εργαλείο κινείται μέσω του συστήματος CNC. Οι διαφορές όμως σε αυτή τη μέθοδο σε σχέση με τις προηγούμενες είναι ότι εκτός του ότι μπορεί να κινείται μόνο η λεπίδα πάνω στο προς τεμαχισμό υλικό, υπάρχει η δυνατότητα να μετακινείται και η λεπίδα αλλά και το υλικό. Επιπλέον άλλη μία διαφορά είναι ότι σε αντίθεση με την τεχνική του laser cutting δεν μεταφέρεται θερμότητα κατά την κοπή του υλικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι λεπίδες να παραμένουν καθαρές (Omni-cnc, 2019).

Τέλος υπάρχει και η τεχνική του **Water CNC**. Η κοπή στη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μέσω νερού που πέφτει πάνω στο υλικό με πολύ μεγάλη πίεση. Αυτό σημαίνει ότι είναι μία «καθαρή» τεχνική η οποία δεν αφήνει καμένα υπολείμματα. Στη βιομηχανία των οργανικών φωτοβολταϊκών είναι η λιγότερο δημοφιλής καθώς το νερό τους δημιουργεί αρκετά προβλήματα.

- **Τεχνικές χαρακτηρισμού**

Οι τεχνικές χαρακτηρισμού αποτελούν τον ποιοτικό έλεγχο των τελικών συσκευών ώστε να μετρηθεί η απόδοση τους και να διαπιστωθεί αν υπάρχουν ελαττώματα και πως δημιουργήθηκαν αυτά. Μία από αυτές είναι ο **Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός** ο οποίος γίνεται μέσω ηλεκτρικής επαφής. Στην μέθοδο αυτή καταγράφονται οι I-V χαρακτηριστικές καμπύλες σε σκοτάδι και φως μέσω ενός προσομοιωτή ηλιακού φωτός. Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση συνδέονται τα ηλεκτρόδια της οργανικής διάταξης με τις ηλεκτρικές επαφές μίας μονάδας ηλεκτρικών μετρήσεων η οποία έχει τη δυνατότητα μέτρησης πολύ χαμηλών ρευμάτων. Μέσω αυτής της τεχνικής μπορεί να εντοπιστεί η δυσλειτουργία της συσκευής αλλά δεν μπορεί να προσδιοριστεί που ακριβώς είναι το πρόβλημα.

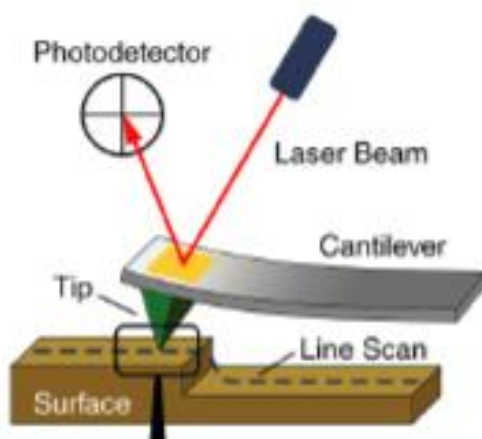
Στη συνέχεια στην εικόνα 20 παρουσιάζεται η μέθοδος της **Φασματοσκοπικής Ελλειψομετρίας** η οποία αποτελεί μία τεχνική οπτικού χαρακτηρισμού και η οποία είναι μη καταστρεπτική για τις προς εξέταση συσκευές. Το ότι δεν τις καταστρέφει είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής καθώς δίνει τη δυνατότητα να γίνεται έλεγχος των οργανικών φιλμ καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη μέτρηση της αλλαγής πόλωσης μίας δέσμης φωτός κατά την ανάκλαση της από την επιφάνεια του οργανικού φωτοβολταϊκού που μελετάται. Μέσω της μεταβολής αυτής υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα για το πάχος του αλλά και για τις οπτικές του ιδιότητες όπως είναι η μορφολογία και η καθαρότητα (Φόρης, 2017).



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της Φασματοσκοπικής Ελλειψομετρίας (Τσιμικλή, 2016)

Μία άλλη μέθοδος για τη μελέτη της συμπεριφοράς και της απόδοσης των οργανικών διατάξεων είναι η **Ηλεκτροφωτοαύγεια** (Electroluminescence). Στη συγκεκριμένη τεχνική, η οποία είναι μη καταστρεπτική όπως την Φασματοσκοπική Ελλειψομετρία, η οργανική διάταξη χρησιμοποιείται με τον ακριβώς αντίθετο τρόπο σε σχέση με τον Ηλεκτρικό Χαρακτηρισμό. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι το φωτοβολταϊκό τροφοδοτείται με ρεύμα και στη συνέχεια προσφέρει φως. Οπότε μέσω αυτού του τρόπου απεικονίζεται με λεπτομέρεια η εσωτερική κατάσταση της συσκευής και υπάρχει η δυνατότητα να εντοπιστούν τυχόν ελαττώματα, όπως είναι νεκρές περιοχές οι οποίες δεν παράγουν φως. Ο έλεγχος της ηλεκτροφωτοαύγειας γίνεται μέσω υπέρυθρων καμερών (Seners, 2018).

Ακόμη μία μέθοδος είναι η **Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων** μέσω της οποίας μπορεί να αναλυθεί η επιφάνεια της οργανικής διάταξης. Ο τρόπος λειτουργίας της βασίζεται σε μία ακίδα πολύ λίγων μικρόμετρων η οποία είναι κολλημένη σε έναν βραχίονα (cantilever). Η ακίδα τη στιγμή που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του οργανικού κυττάρου δημιουργείται μία δύναμη στο σημείο επαφής, ανάλογα με αυτή τη δύναμη ο βραχίονας υφίσταται και την ανάλογη κάμψη. Επιπλέον υπάρχει και μία δέσμη λέιζερ η οποία προσπίπτει στην οπτικά γυαλισμένη πλευρά του βραχίονα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η οποία αν ανακλάται ανάλογα με την κάμψη του βραχίονα και κάθε φορά προσπίπτει σε διαφορετική θέση του φωτοανιχνευτή. Το ρεύμα στη συνέχεια μετριέται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (Σειτανίδου, 2013).



Εικόνα 21: Σχηματική απεικόνιση της Μικροσκοπίας Ατομικών Δυνάμεων (Σεϊτανίδου, 2013)

Η επόμενη μέθοδος είναι η **Φασματοσκοπία Οπτικής Διαπερατότητας** στην οποία η συσκευή τοποθετείται σε μία διαφανή επιφάνεια. Η συσκευή ακτινοβολείται κάθετα και στη συνέχεια με τη χρήση ενός φασματόμετρου υπολογίζεται το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε από τη συσκευή (Τσιμικλή, 2016).

Επιπλέον υπάρχει και η δυνατότητα για την ανάλυση ποιότητας των οργανικών φιλμ μέσω εξωτερικού ελέγχου, ο οποίος πραγματοποιείται με τη χρήσης ειδικών καμερών. Αυτές φωτογραφίζουν τις συσκευές και μέσω ενός λογισμικού γίνεται η ανάλυση των αστοχιών που παρουσιάζονται αναφορικά με το πάχος του κάθε στρώματος της διάταξης αλλά και για την ανίχνευση οξυγόνου, υγρασίας, κενών αέρος, κακού τυπώματος και λάθος κοψίματος. Στη συνέχεια όσες είναι ελαττωματικές μαρκάρονται και γίνεται προσπάθεια για να βρεθεί η αίτια που προκάλεσε το πρόβλημα.

2.4. Μοντελοποίηση συστημάτων και προσομοίωση

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος αποτελεί μία διαδικασία μέσω της οποίας αναπαρίστανται τα πραγματικά του δεδομένα, με σκοπό την αναπαραγωγή του φυσικού συστήματος μέσω της χρήσης είτε μαθηματικών είτε προγραμμάτων προσομοίωσης (Βροντάκης, 2015). Το μοντέλο ενός συστήματος αποτελεί την απλοποιημένη μορφή του, στο οποίο περιγράφονται οι οντότητες, τα γεγονότα, οι κατεργασίες και οι καθυστερήσεις που υπάρχουν στο σύστημα. Επιπλέον το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξερεύνηση, την επαλήθευση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει το μοντέλο είναι ότι δίνεται η δυνατότητα να μελετηθεί η αποδοτικότητα και η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες, οι οποίες δεν είναι εφικτό να εφαρμοστούν στο πραγματικό σύστημα.

Αυτό συμβαίνει διότι αν εφαρμοστούν υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθούν ζημίες και μεγάλα κόστη στο σύστημα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η μοντελοποίηση είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία η οποία πρέπει να χρησιμοποιείται σε κάθε εταιρεία που έχει ως σκοπό την βελτίωση και τη σωστή εξέλιξη της.

Διαδικασία Μοντελοποίησης

Η διαδικασία της μοντελοποίησης αποτελείται από 5 βασικά βήματα:

- Το 1^ο βήμα είναι η αναγνώριση των συστατικών μερών από τα οποία αποτελείται το μοντέλο.
- Το 2^ο βήμα είναι η συγκέντρωση πληροφοριών για τις μεταξύ τους σχέσεις, τους τρόπους που συνδέονται και λειτουργούν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.
- Το 3^ο βήμα αποτελεί η κατασκευή του μοντέλου.
- Το 4^ο βήμα είναι η δοκιμή του μοντέλου το οποίο πρέπει να αναπαρασταθεί αν είναι δυνατόν σύμφωνα με το πραγματικό σύστημα ώστε να μπορούν τα αποτελέσματα να αξιολογηθούν κατευθείαν.
- Το 5^ο βήμα και τελευταίο βήμα είναι η τροποποίηση του μοντέλου αν αυτό θεωρείται αναγκαίο (Βροντάκης, 2015).

Τα 5 αυτά βήματα υπάρχει περίπτωση να οδηγήσουν τον αλγόριθμο σε αρκετές επαναλήψεις μέχρι το μοντέλο να αποκτήσει την τελική του μορφή. Αυτό συμβαίνει διότι συνεχώς μπορεί να προκύπτουν νέα δεδομένα τα οποία αναγκάζουν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου να μεταβάλλονται.

Η διαδικασία της μοντελοποίησης αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η κατασκευή του μοντέλου στο οποίο αναπτύσσονται η βασική δομή του και οι κανόνες που το διέπουν ώστε να αναπαραστήσουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το σύστημα στην πραγματικότητα. Αμέσως μετά το μοντέλο αναλύεται με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του, ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη τα οποία μειώνουν την αποδοτικότητα του. Το δεύτερο στάδιο αποτελεί την προσομοίωση του μοντέλου μέσω της οποίας εξετάζεται αν η συμπεριφορά του μοντέλου συμπίπτει με αυτήν του πραγματικού συστήματος. Το στάδιο αυτό ονομάζεται «επικύρωση» του μοντέλου. Τέλος κατά την προσομοίωση η βασική δομή του μοντέλου δεν μπορεί να μεταβληθεί. Αλλαγές μπορεί να προκύψουν μόνο στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται και η οποία εξελίσσεται σύμφωνα με το μηχανισμό εκτέλεσης της προσομοίωσης.

2.5. Περιγραφή λογισμικού μοντελοποίησης και ανάλυσης

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία για την προσομοίωση της γραμμής παραγωγής είναι το Rockwell Arena. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι ότι παρέχει στο χρήστη μία τεράστια γκάμα δυνατοτήτων ώστε να προσομοιώσει το σύστημα το οποίο επιθυμεί. Αρχικά το λογισμικό αυτό δημιουργήθηκε από την εταιρεία Systems Modeling Corporation. Στη συνέχεια όμως η εταιρεία αυτή εξαγοράσθηκε από την Rockwell Software με διεύθυνση στο Internet www.arenasimulation.com. Το λογισμικό αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον Microsoft Windows και χρησιμοποιείται κυρίως από σύμβουλους επιχειρήσεων, αναλυτές και μηχανικούς διαχείρισης συστημάτων. Επιπλέον αποτελεί ένα περιβάλλον προσομοίωσης συστημάτων παραγωγής τα οποία μπορεί να είναι:

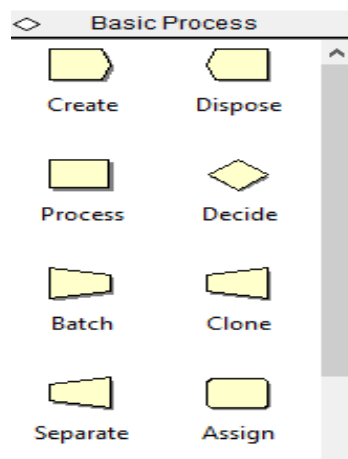
- Συστήματα παραγωγής, όπου παρατηρείται κίνηση, αποθήκευση και κατεργασία κομματιών.
- Συστήματα εξυπηρέτησης, στα οποία οι εξυπηρετούμενοι σχηματίζουν ουρές μπροστά από τα σημεία εξυπηρέτησης.
- Ή εν γένει συστήματα ροής, τα οποία διαχειρίζονται τηλεφωνικά σήματα, εντολές εκτέλεσης στον υπολογιστή, κ.λπ.

Η γλώσσα προσομοίωσης που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι η SIMAN. Το θετικό είναι ότι ο χρήστης δεν χρειάζεται να μάθει αυτή τη γλώσσα καθώς ο ίδιος δεν χρειάζεται να γράψει κώδικα προγραμματισμού. Αντίθετα για να καταφέρει να συνθέσει και να αναπαραστήσει τη γραμμή παραγωγής που θέλει να προσομοιώσει έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μέσα από μία μεγάλη γκάμα μονάδων σχεδίασης τα οποία είναι τα λεγόμενα modules, blocks και elements. Τέλος το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα πτυχιακή είναι η ακαδημαϊκή έκδοση Arena 14. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από τα πιο βασικά εργαλεία του λογισμικού ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία της μοντελοποίησης. Οι βασικές ομάδες των εργαλείων είναι 2 και είναι οι εξής: **Basic Process** και **Advanced Process**.

Η Basic Process είναι η ομάδα στην οποία περιλαμβάνονται τα βασικά modules για την προσομοίωση ενός συστήματος. Παρακάτω αναφέρονται εν συντομία κάποια από τα modules της ομάδας αυτής.

- Create Module, το οποίο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των αφίξεων των οντοτήτων (entities) που εισέρχονται στο σύστημα.
- Dispose Module, το οποίο είναι για τις αναχωρήσεις των οντοτήτων από το σύστημα.

- Process Module, το οποίο χρησιμοποιείται για την διαδικασία της εξυπηρέτησης ή της αναμονής των οντοτήτων, όταν υπάρχει άλλη οντότητα δεσμευμένη.
- Decide Module, το οποίο ελέγχει για το αν ισχύει μια συνθήκη.
- Batch Module, το οποίο είναι για την ομαδοποίηση κάποιων οντοτήτων.
- Separate Module, το οποίο μετατρέπει μια οντότητα σε πολλές.



Εικόνα 22: Μπάρα με modules της Basic Process

Η Advanced Process είναι η ομάδα η οποία περιλαμβάνει modules τα οποία απαιτούνται όταν η σχεδίαση του συστήματος είναι πιο λεπτομερής. Κάποια εξ αυτών είναι τα παρακάτω.

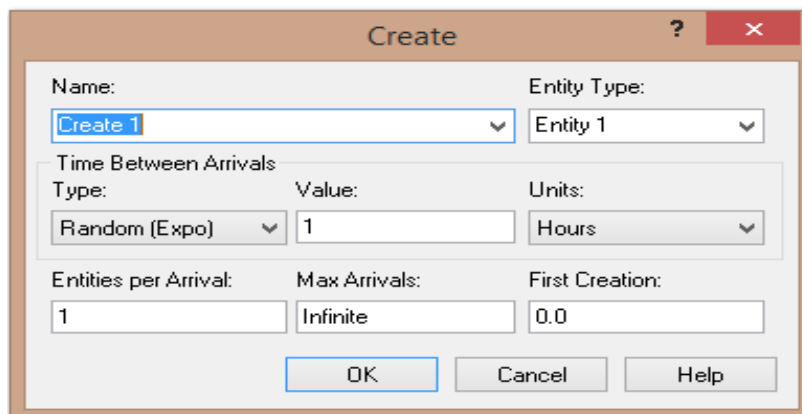
- Delay Module, το οποίο έχει σκοπό την καθυστέρηση μιας οντότητας για κάποιο χρόνο ο οποίος έχει προκαθοριστεί.
- Read Write Module, το οποίο διαβάζει δεδομένα από ένα αρχείο εισαγωγής.
- Hold Module, το οποίο δεσμεύει μια οντότητα σε μια ουρά αναμονής περιμένοντας κάποιο σήμα ή μια συνθήκη να γίνει αληθινή.
- Match Module, το οποίο συνδυάζει ένα καθορισμένο αριθμό οντοτήτων που περιμένουν σε διαφορετικές ουρές.



Εικόνα 23: Μπάρα με modules της Advanced Process

Για τη μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής στο λογισμικό Arena χρησιμοποιήθηκαν κάποια modules μόνο από την κατηγορία Basic Process, τα οποία καλύπτουν τις ανάγκες μοντελοποίησης και προσομοίωσης του συγκεκριμένου προβλήματος. Τα modules που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής Create Module, Dispose Module, Decide Module και το Process Module και τα 4 αναλύονται παρακάτω.

Create Module

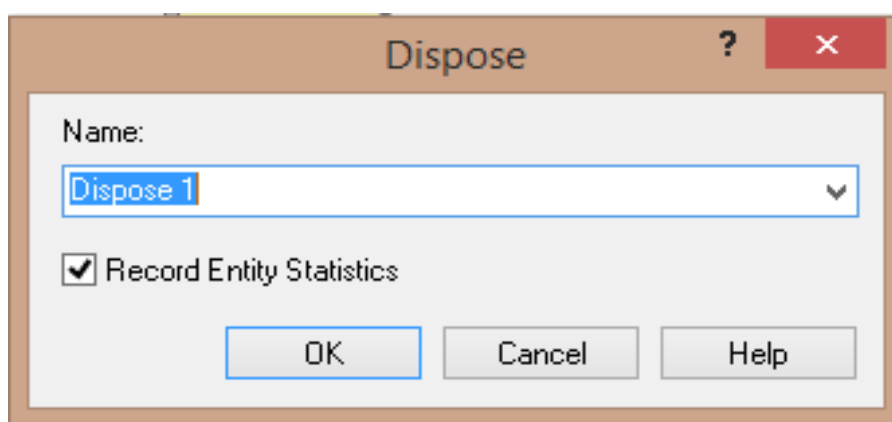


Εικόνα 24: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Create Module

Το Create Module είναι η αρχική διαδικασία για τη μοντελοποίηση κάθε συστήματος που μοντελοποιείται. Αποτελεί δηλαδή το σημείο έναρξης όλων των οντοτήτων που κυκλοφορούν μέσα στη γραμμή παραγωγής. Οι οντότητες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα ή βάσει ενός χρόνου μεταξύ των αφίξεων τους. Όπως παρατηρείται και στο πλαίσιο διαμόρφωσης του module υπάρχουν κάποιες επιλογές. Αρχικά πρέπει να οριστεί το χαρακτηριστικό όνομα

(Name) του module που δημιουργείται, το οποίο πρέπει να είναι μοναδικό, και το όνομα της οντότητας (Entity Type) που γεννιέται. Ακολούθως πρέπει να οριστεί ο ενδοαφιξιακός χρόνος (Times Between Arrivals) ο οποίος ορίζεται μέσω διάφορων κατανομών που βρίσκονται στον τύπο (Type) του ενδοαφιξιακού χρόνου. Ακριβώς δίπλα πρέπει να οριστεί η τιμή (Value) για το χρόνο μεταξύ των αφίξεων των οντοτήτων η οποία μπορεί να είναι δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες ή και μέρες. Παρακάτω ορίζεται ο αριθμός οντοτήτων που δημιουργούνται ταυτόχρονα (Entities Per Arrival), δίπλα είναι ο μέγιστος αριθμός οντοτήτων προς δημιουργία (Max Arrivals) και τέλος το ποια στιγμή θα γίνει η πρώτη δημιουργία της οντότητας.

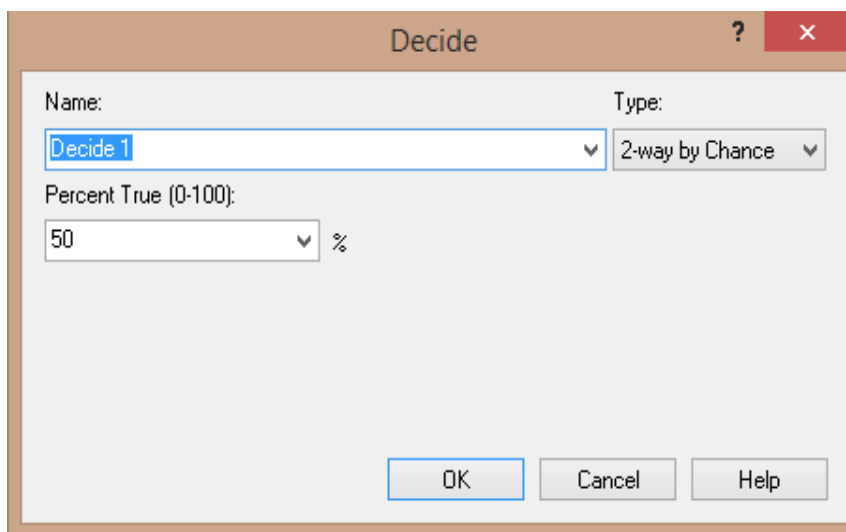
Dispose Module



Εικόνα 25: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Dispose Module

Το Dispose Module είναι το πιο απλό module όσον αναφορά τη χρήση σε σχέση με τα άλλα 3 καθώς η μόνη επιλογή που πρέπει να συμπληρωθεί είναι το όνομα που θα του δοθεί. Το συγκεκριμένο module αποτελεί το τερματικό σημείο για τις οντότητες, είναι δηλαδή το σημείο από όπου εξέρχονται από το μοντέλο προσομοίωσης.

Decide Module

The image shows a software dialog box titled "Decide". It has a standard Windows-style title bar with a question mark icon and a close button (X). The dialog contains three main input fields: "Name:" with a text box containing "Decide 1" and a dropdown arrow; "Type:" with a dropdown menu showing "2-way by Chance"; and "Percent True (0-100):" with a text box containing "50" and a percentage symbol (%). At the bottom right, there are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Εικόνα 26: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Decide Module

Το Decide Module αποτελεί τη διαδικασία λήψης αποφάσεων στο σύστημα. Στην ουσία σε αυτό το module ελέγχεται μία συνθήκη η οποία μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής. Αρχικά όπως και στα προηγούμενα module πρέπει να του δοθεί ένα όνομα που θα είναι μοναδικό. Στη συνέχεια πρέπει να επιλεγθεί ο τύπος (Type) του, οι τύποι που υπάρχουν είναι 4: 2-way by Chance, 2-way by Condition, N-way by Chance και N-way by Condition. Όταν ο τύπος είναι 2-way by Chance ή 2-way by Condition υπάρχουν δύο σημεία εξόδου από το module. Το ένα σημείο είναι για τις οντότητες που είναι 'αληθείς' και το άλλο για τις οντότητες που είναι 'ψευδείς'. Αν ο τύπος είναι N-way by Chance ή N-way by Condition υπάρχουν πολλαπλά σημεία εξόδου. Τέλος πρέπει να συμπληρωθεί το ποσοστό αλήθειας (Percent True), δηλαδή η τιμή που θα ελεγχθεί για να καθορίσει το ποσοστό των οντοτήτων που θα σταλούν στην 'αληθή' έξοδο.

Process Module

The screenshot shows a 'Process' configuration window. The 'Name' field is set to 'Process 1' and the 'Type' is 'Standard'. Under 'Logic', the 'Action' is set to 'Delay'. In the 'Delay' section, 'Delay Type' is 'Triangular', 'Units' are 'Hours', and 'Allocation' is 'Value Added'. The 'Minimum' value is .5, the 'Value:(Most Likely):' is 1, and the 'Maximum' is 1.5. The 'Report Statistics' checkbox is checked. The window has 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons at the bottom.

Εικόνα 27: Πλαίσιο διαμόρφωσης του Process Module

Το Process Module αποτελεί την κύρια μέθοδο διαδικασιών ενός μοντέλου. Είναι δηλαδή το module το οποίο αντιπροσωπεύει τις κατεργασίες μιας γραμμής παραγωγής οι οποίες μπορεί να είναι για παράδειγμα η εξυπηρέτηση πελατών σε ένα κατάστημα ή η κατεργασία ενός εξαρτήματος σε ένα εργοστάσιο. Πρώτα απ' όλα ορίζεται και εδώ το όνομα και ο τύπος του module. Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος της επεξεργασίας (Action) που θα συμβεί εντός του module. Υπάρχουν 4 είδη επεξεργασίας: Delay, Seize Delay, Seize Delay Release και Delay Release. Σε περίπτωση που επιλεγεί οποιοδήποτε είδος από τα τελευταία τρία ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τον πόρο (Resource) που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των οντοτήτων. Στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος καθυστέρησης (Delay Type) δηλαδή ο χρόνος επεξεργασίας που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η κατεργασία που εκτελείται. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν 5 διαφορετικές κατανομές οι Constant και Expression που απαιτούν μία τιμή και οι Normal, Uniform και Triangular που απαιτούν παραπάνω όπως φαίνεται και στην εικόνα 27. Στο επόμενο πεδίο συμπληρώνονται οι χρονικές μονάδες (units) οι οποίες μπορεί να είναι δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες ακόμα και μέρες. Τέλος καθορίζεται πως ο χρόνος επεξεργασίας θα κατανεμηθεί στην οντότητα και μπορεί να χαρακτηριστεί ως value added, non value added, μεταφοράς ή αναμονής. Ο χρόνος προστιθέμενης αξίας (Value Added Time) είναι ο χρόνος που αφιερώνεται ώστε στο τελικό προϊόν να προστεθεί κάποια αξία την οποία θα την χρεωθεί ο πελάτης. Ο χρόνος μη προστιθέμενης αξίας (Non Value Added Time) είναι το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή όταν αφιερώνεται χρόνος εργασίας χωρίς να υπάρχει κάποιο χρηματικό αντίκτυπο από τον πελάτη.

2.6. Θεωρία στατιστικού ελέγχου ποιότητας

Ο έλεγχος ποιότητας (ή ποιοτικός έλεγχος) ως λειτουργία έκανε την εμφάνισή του στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και πιο συγκεκριμένα το 1901, όπου στη Μεγάλη Βρετανία ιδρύθηκαν τα πρώτα εργαστήρια προτύπων. Το 1905 η έννοια του ποιοτικού ελέγχου εισάγεται στη γραμμή παραγωγής της αυτοκινητοβιομηχανίας Ford στις Η.Π.Α. (Βασιούλας, 2012). Στην συνέχεια και στις αρχές της δεκαετίας του 1920 πρωτοεμφανίστηκε ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας σε εργαστήρια όπου κατασκευάζονταν τηλέφωνα. Σε αυτά τα εργαστήρια χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά ορισμένες στατιστικές μέθοδοι πρόβλεψης και βελτίωσης (Βασιούλας, 2012). Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας αναπτύχθηκε από τον Walter Shewhart. Έπειτα, επεκτάθηκε από τον Edwards Deming ο οποίος τον εισήγαγε στη βιομηχανία της Ιαπωνίας μετά το τέλος του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου (Κούτουλα, 2017).

Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην βελτίωση της απόδοσης μίας παραγωγικής διαδικασίας, καθώς μέσω αυτού υπάρχει η δυνατότητα να εντοπίζονται διάφορα ελαττώματα στο σχεδιασμό και στην κατασκευή κατά τη διάρκεια παραγωγής του προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα εντοπίζει το πλήθος των ελαττωματικών κομματιών σε μια παρτίδα και τις αποκλίσεις από τις προδιαγραφές του παραγόμενου προϊόντος. Επιπλέον εντοπίζει και το πλήθος ελαττωμάτων ανά μονάδα προϊόντος. Αυτό σημαίνει ότι τα οφέλη που αποκτά μία επιχείρηση με τη σωστή εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι αρκετά σε επίπεδο αποτελέσματος, τόσο άμεσα όσο και μακροπρόθεσμα. Όσον αφορά το πρώτο θα εντοπίζονται λιγότερα ελαττωματικά, γεγονός που σημαίνει ότι το κόστος απώλειας και επανόρθωσης θα είναι μικρότερο. Επιπλέον θα βελτιωθεί και η ποιότητα του προϊόντος. Όσον αφορά το δεύτερο έχει να κάνει με την αγορά και τους καταναλωτές καθώς θα δημιουργηθεί μια καλή φήμη για προϊόντα υψηλής ποιότητας, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι θα υπάρξει αύξηση στις πωλήσεις και στα κέρδη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας είναι ένα σύνολο στατιστικών μεθόδων μέσω των οποίων πραγματοποιούνται αναλύσεις δεδομένων. Το σύνολο αυτό χωρίζεται στα ακόλουθα 3 υποσύνολα:

- Έλεγχος ποιότητας αποδοχής ή έλεγχος αποδοχής.
- Σχεδιασμός και ανάλυση πειραμάτων.
- Έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας ή διεργασίας (Παπαμιχαήλ, 2019).

Τα δύο υποσύνολα τα οποία αναπτύχθηκαν εξ' αρχής ήταν ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής και ο έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας. Ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής χρησιμοποιεί δειγματοληπτικά σχέδια τα οποία ελέγχουν τις παρτίδες των

προϊόντων που παράγονται. Μέσω αυτών των σχεδίων επιθεωρείται ένας τυχαίος αριθμός προϊόντων και ανάλογα με το ποσοστό των ελαττωματικών μονάδων αποφασίζεται εάν η παρτίδα θα γίνει αποδεκτή ή θα απορριφθεί (Κουϊκόγλου, 2010).

Ο έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας ασχολείται με την έννοια της πρόληψης. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιείται έλεγχος των προϊόντων που παράγονται σε κάθε φάση της παραγωγικής διαδικασίας. Αυτό θα συνεισφέρει στον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων ή χρονικών καθυστερήσεων ώστε να υπάρξει όσο το δυνατόν μικρότερη παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων και μικρότερο κόστος παραγωγής (Κουϊκόγλου, 2010). Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου πάνω στα οποία αναγράφονται οι τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών των κομματιών ή παρτίδων ενώ υπολογίζεται και η μέση τιμή τους. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών μπορεί να καταλάβει κανείς αν η διαδικασία είναι εντός των ορίων ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα θα είναι τα αναμενόμενα και οι τιμές των χαρακτηριστικών θα είναι οι επιθυμητές. Στην περίπτωση όμως που είναι εκτός ελέγχου θα πρέπει να γίνει μία έρευνα για το που υπάρχει το πρόβλημα και έχουν μεταβληθεί οι τιμές. Στη συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Το παράδειγμα αφορά έναν μαθητή του οποίου ο βαθμός στο πρώτο τρίμηνο στο μάθημα της φυσικής ήταν 15. Αν ο βαθμός του στο ίδιο μάθημα στο τέλος του επόμενου τριμήνου είναι 20 ή 10, οι γονείς του θα ήθελαν να μάθουν για ποιο λόγο υπάρχει μια τόσο μεγάλη απόκλιση. Στην μία περίπτωση θα τον ενισχύσουν να συνεχίσει τους υψηλούς βαθμούς ενώ στην άλλη θα προσπαθήσουν να καταλάβουν τι έφταιξε ώστε να το διορθώσουν. Το κοινό όμως είναι ότι και οι δύο περιπτώσεις είναι εκτός ελέγχου καθώς οι βαθμοί δεν κυμαίνονται γύρω από το 15, δηλαδή μία δύο μονάδες πάνω ή κάτω.

Τέλος ο σχεδιασμός και η ανάλυση πειραμάτων αποτελεί το πιο πρόσφατο υποσύνολο σε σχέση με τα προηγούμενα καθώς αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1980 (Κονταξάκη, 2015). Το υποσύνολο αυτό δίνει βάση στη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων κατά τη φάση του σχεδιασμού, ώστε να επιτευχθούν οι προδιαγραφές που έχουν οριστεί από την αρχή (Κονταξάκη, 2015).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα δειγματοληπτικά σχέδια και τα διαγράμματα ελέγχου.

2.6.1. Έλεγχος ποιότητας αποδοχής και δειγματοληπτικά σχέδια

Ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής διαθέτει 3 δυνατότητες:

- a) Να γίνουν αποδεκτές όλες οι παραγόμενες μονάδες, χωρίς να πραγματοποιηθεί κανένας έλεγχος.
- b) Να πραγματοποιηθεί έλεγχος σε όλες τις παραγόμενες μονάδες.

c) Να διενεργηθεί δειγματοληπτικός έλεγχος (Κονταξάκη, 2015).

Τις περισσότερες φορές προτιμάται ο δειγματοληπτικός έλεγχος σε σύγκριση με την πλήρη επιθεώρηση όλων των μονάδων. Αυτό συμβαίνει διότι ο δειγματοληπτικός έλεγχος παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μικρό κόστος.
- Απαιτείται λιγότερος χρόνος.
- Λιγότερο προσωπικό που ασχολείται με τον έλεγχο των μονάδων (Κονταξάκη, 2015).

Βέβαια η διαδικασία αυτή παρουσιάζει και ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να γίνει αποδεκτή μία παρτίδα χαμηλής ποιότητας ή να απορριφθεί μία παρτίδα υψηλής ποιότητας. Η πρώτη περίπτωση ονομάζεται σφάλμα τύπου II, ενώ η δεύτερη σφάλμα τύπου I (Παπαμιχαήλ, 2019).

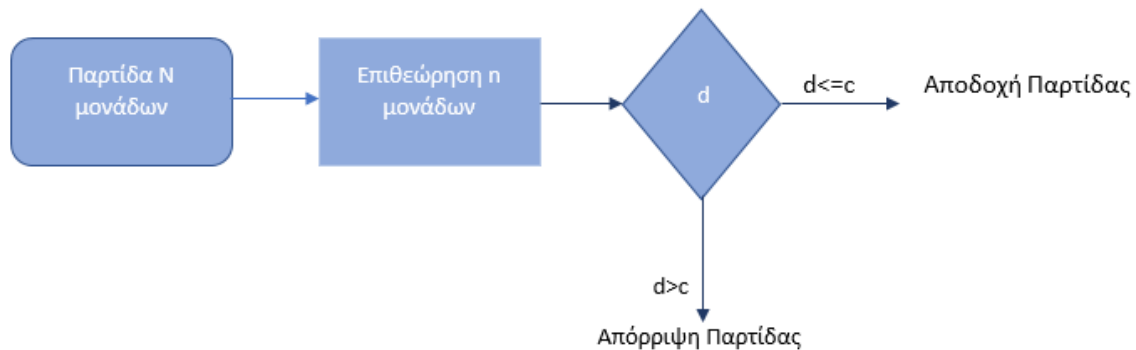
Ο κύριος σκοπός των δειγματοληπτικών σχεδίων του ελέγχου ποιότητας αποδοχής είναι να διαχωρίζουν τις παρτίδες των παραγόμενων μονάδων σε αποδεκτές και απορριπτέες σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δειγματοληψιών. Ο αριθμός των παραγόμενων μονάδων που περιλαμβάνονται σε μία παρτίδα ονομάζεται μέγεθος της παρτίδας. Ο αριθμός των παραγόμενων μονάδων που περιλαμβάνει ένα δείγμα λέγεται μέγεθος του δείγματος (Παπαμιχαήλ, 2019). Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι τα δειγματοληπτικά σχέδια αφορούν μόνο το διαχωρισμό των παρτίδων που ελέγχονται. Αυτό σημαίνει ότι δεν βοηθούν άμεσα στη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Τα δειγματοληπτικά σχέδια διακρίνονται σε 3 κατηγορίες: **απλά**, **διπλά** και **πολλαπλά**. Αρχικά στα απλά δειγματοληπτικά σχέδια η απόφαση για το αν μία παρτίδα γίνει αποδεκτή βασίζεται στις πληροφορίες που θα αντληθούν από ένα δείγμα. Όσον αφορά τα διπλά δειγματοληπτικά σχέδια υπάρχει η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένα δεύτερο δείγμα από την ίδια παρτίδα ώστε να ληφθεί η απόφαση για τον αν θα γίνει αποδεκτή ή θα απορριφθεί. Στα πολλαπλά δειγματοληπτικά σχέδια χρησιμοποιούνται περισσότερα από δύο δείγματα της ίδιας παρτίδας. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι για να είναι αποτελεσματικός ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής συνεπώς και το εκάστοτε δειγματοληπτικό σχέδιο που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει οι παρτίδες να είναι ομογενείς. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να προέρχονται από την ίδια μηχανή και τους ίδιους χειριστές έχοντας χρησιμοποιήσει τις ίδιες πρώτες ύλες. Επιπλέον οι παρτίδες να έχουν μεγάλο μέγεθος και να μεταφέρονται με ασφάλεια στο χώρο όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος ποιότητας.

Απλό δειγματοληπτικό σχέδιο

Το απλό δειγματοληπτικό σχέδιο αποτελείται από δύο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος είναι το μέγεθος των δειγμάτων n . Η δεύτερη παράμετρος είναι ο αριθμός αποδοχής c . Στην ουσία ο αριθμός αποδοχής c αποτελεί το μέγιστο αριθμό

ελαττωματικών που μπορεί να εντοπιστούν μέσα στο δείγμα n , ώστε να γίνει η παρτίδα αποδεκτή. Από την παρτίδα μεγέθους N που ελέγχεται, λαμβάνεται τυχαία δείγμα μεγέθους n . Με d συμβολίζεται ο αριθμός των ελαττωματικών μονάδων του δείγματος. Στα απλά δειγματοληπτικά σχέδια υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

- i. Αν $d \leq c$ η παρτίδα γίνεται αποδεκτή.
- ii. αν $d > c$ τότε η παρτίδα απορρίπτεται (Κονταξάκη, 2015).



Εικόνα 28: Περιγραφή λειτουργίας απλού δειγματοληπτικού σχεδίου

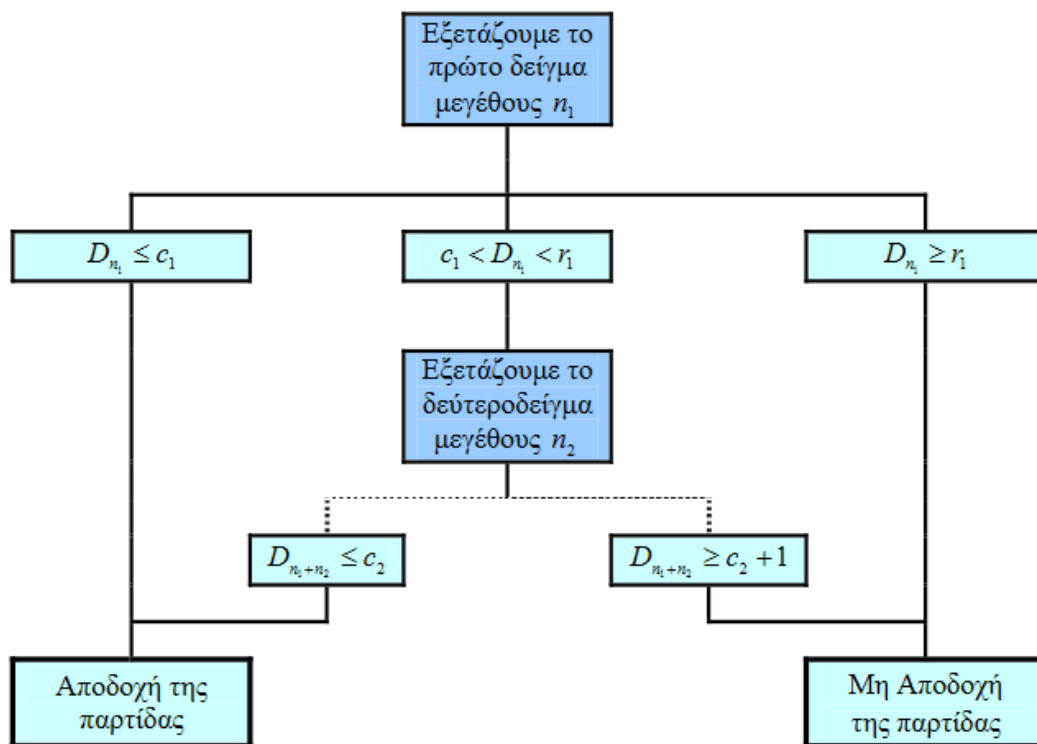
Διπλό δειγματοληπτικό σχέδιο

Το διπλό δειγματοληπτικό σχέδιο περιλαμβάνει 5 παραμέτρους. Οι δύο πρώτες παράμετροι είναι τα μεγέθη του πρώτου (n_1) και του δεύτερου (n_2) δείγματος.

Επιπλέον είναι οι δύο αριθμοί αποδοχής c_1 και c_2 του πρώτου και του δεύτερου δείγματος αντίστοιχα, με $c_1 < c_2$. Στο διπλό δειγματοληπτικό σχέδιο σε σχέση με το απλό υπάρχει μία ακόμη παράμετρος. Αυτή είναι ο αριθμός απόρριψης r_1 , με $r_1 > c_1 + 1$. Αρχικά λαμβάνεται το πρώτο δείγμα μεγέθους n_1 από την παρτίδα που ελέγχεται. Το μέγεθος της παρτίδας είναι N . Στη συνέχεια σημειώνεται ο αριθμός των ελαττωματικών μονάδων d_1 . Οι περιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν είναι οι εξής:

- i. Αν $d_1 \leq c_1$, η παρτίδα γίνεται αποδεκτή.
- ii. Αν $d_1 \geq r_1$, η παρτίδα απορρίπτεται αμέσως.
- iii. Αν $c_1 < d_1 < r_1$, η εφαρμογή του σχεδίου δεν ολοκληρώνεται καθώς πρέπει να ληφθεί ένα δεύτερο δείγμα μεγέθους n_2 . Στην προκειμένη περίπτωση η απόφαση θα ληφθεί μετά τη σύγκριση του συνολικού αριθμού ελαττωματικών $d_1 + d_2$ με τον αριθμό αποδοχής c_2 . Αν $d_1 + d_2 \leq c_2$ η παρτίδα γίνεται αποδεκτή, ειδάλλως απορρίπτεται (Κονταξάκη, 2015).

Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 29: Λειτουργία διπλού δειγματοληπτικού σχεδίου (Αντζουλάκος, 2009)

Πολλαπλά δειγματοληπτικά σχέδια

Η λειτουργία και η μεθοδολογία που ακολουθείται στα πολλαπλά δειγματοληπτικά σχέδια είναι όμοια με αυτή των διπλών. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζουν είναι ότι θα χρειαστούν περισσότερα από 2 δείγματα για να ληφθεί απόφαση.

2.6.2. Έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας και διαγράμματα ελέγχου

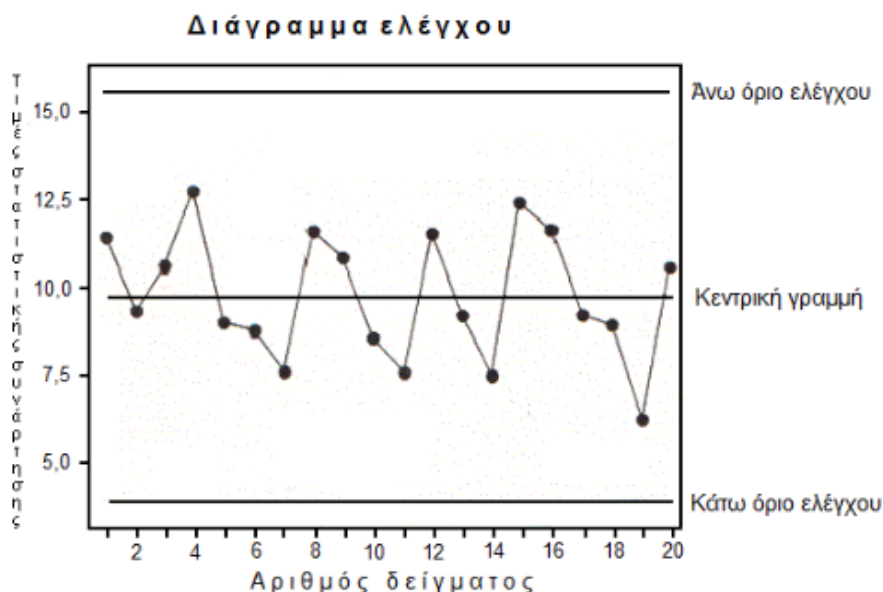
Ο έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται σταθερότητα στην ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Η επίτευξη αυτής της σταθερότητας είναι αυτό το οποίο επιθυμεί ο πελάτης, καθώς τα προϊόντα θα παράγονται μέσω μίας σταθερής και επαναλαμβανόμενης διαδικασίας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγική διαδικασία να λειτουργεί με μικρή μεταβλητότητα η οποία θα βρίσκεται εντός των ποιοτικών χαρακτηριστικών του παραγόμενου προϊόντος (Κονταξάκη, 2015). Τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιεί ο έλεγχος παραγωγικής διαδικασίας είναι τα ακόλουθα 7:

- Το Ιστόγραμμα ή Διάγραμμα Μίσχου φύλλων.
- Το Φύλλο Ελέγχου.
- Το Διάγραμμα Pareto.

- Το Διάγραμμα Αιτίου-Αποτελέσματος.
- Το Διάγραμμα Συγκέντρωσης Ελαττωμάτων.
- Το Διάγραμμα Διασποράς ή Διασκόρπισης.
- Το Διάγραμμα Ελέγχου (Παπαμιχαήλ, 2019).

Από τα παραπάνω εργαλεία τα Διαγράμματα Ελέγχου είναι αυτά τα οποία θα αναλυθούν καθώς είναι ίσως και τα πιο σημαντικά. Η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου έχει ως σκοπό να προσδιορίζονται οι αιτίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μεταβολές που μπορεί να προκύψουν σε μία παραγωγική διαδικασία. Σε κάθε παραγωγική διεργασία θα υπάρχει πάντα μία *φυσική μεταβλητότητα*, η οποία είναι το άθροισμα πολλών μικρών αιτιών. Αυτές οι αιτίες ονομάζονται *κοινές αιτίες* μεταβλητότητας (Κονταξάκη, 2015). Τέτοιες αιτίες μπορεί να είναι η ύπαρξη μικρών διαφορών στον τρόπο λειτουργίας των μηχανών, διαφορές στα προσόντα και τις υπηρεσίες που παρέχει ο κάθε εργαζόμενος ή ακόμη και στο σχεδιασμό και τις διαστάσεις του εκάστοτε προϊόντος. Στην περίπτωση της φυσικής μεταβλητότητας η παραγωγική διεργασία βρίσκεται εντός στατιστικού ελέγχου. Όμως σε μία παραγωγική διαδικασία μπορεί να υπάρξει και μία *ειδική μεταβλητότητα*. Η ειδική μεταβλητότητα είναι αποτέλεσμα ορισμένων αιτιών. Αυτές ονομάζονται *ειδικές αιτίες* μεταβλητότητας. Για παράδειγμα ως ειδικές αιτίες μπορούν να χαρακτηριστούν η διακοπή του ρεύματος, ή μία βλάβη στη γραμμή παραγωγής ή ακόμη και η αλλαγή προμηθευτή. Στην περίπτωση της ειδικής μεταβλητότητας η παραγωγική διεργασία βρίσκεται εκτός στατιστικού ελέγχου (Κονταξάκη, 2015).

Τα διαγράμματα ελέγχου απεικονίζουν τις τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος στο πέρασμα του χρόνου. Όπως παρατηρείται από την εικόνα για την κατασκευή ενός διαγράμματος ελέγχου αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν τα όρια προδιαγραφών των ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Τα όρια αυτά είναι το **Άνω Όριο Ελέγχου (ΑΟΕ)** και το **Κάτω Όριο ελέγχου (ΚΟΕ)**. Επιπλέον υπολογίζεται και η **Κεντρική Γραμμή (ΚΓ)** η οποία αποτελεί τη μέση τιμή του ποιοτικού χαρακτηριστικού. Οι κουκίδες που παρατηρούνται και ενώνονται μέσω της γραμμής αποτελούν το πλήθος των δειγμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση όπως παρατηρείται όλα τα δείγματα βρίσκονται μεταξύ του Άνω και του Κάτω ορίου ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία είναι εντός στατιστικού ελέγχου. Στην περίπτωση όμως που ένα ή περισσότερα δείγματα βρίσκονταν εκτός των ορίων αυτών, η διαδικασία θα θεωρούταν εκτός στατιστικού ελέγχου (Κονταξάκη, 2015).



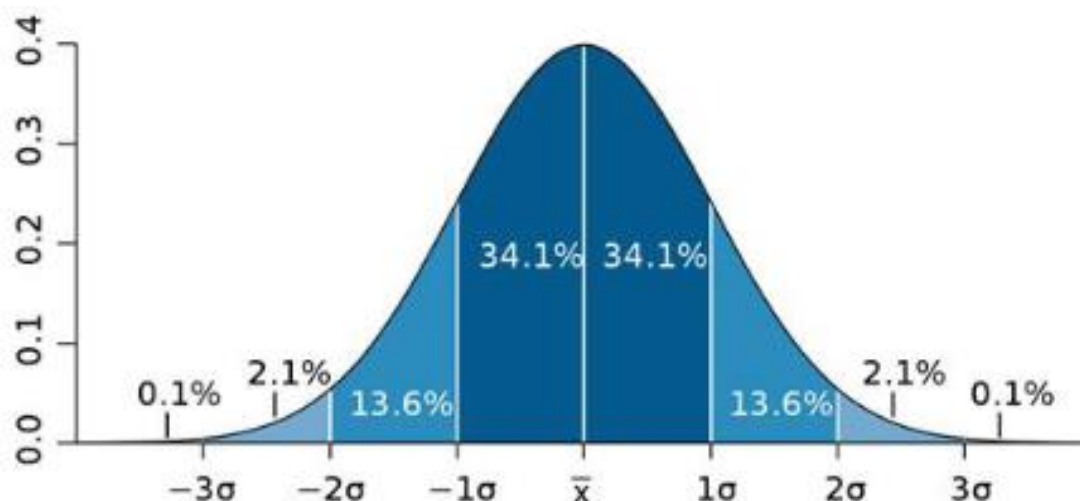
Εικόνα 30: Περιγραφή Διαγράμματος Ελέγχου (Μιχαλιέρης, 2012)

Για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής χρησιμοποιείται το μοντέλο των ορίων σίγμα. Αυτό είναι ένα γενικό μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζεται η κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Οι τύποι οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Παπαμιχαήλ, 2019):

- $AOE = \mu_w + L \cdot \sigma_w$
- $K\Gamma = \mu_w$
- $KOE = \mu_w - L \cdot \sigma_w$

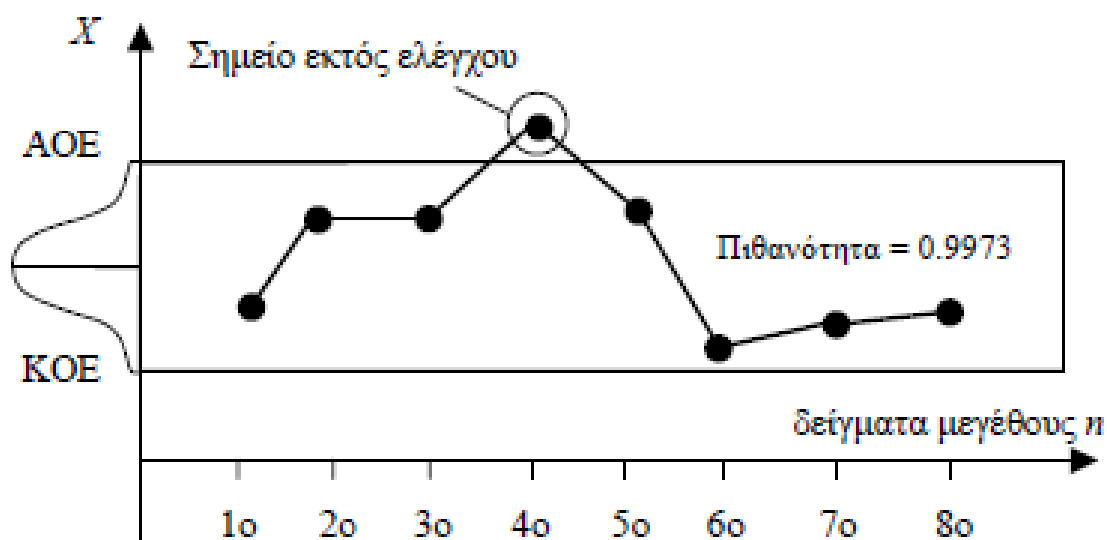
Το μ_w και στο σ_w συμβολίζουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της στατιστικής συνάρτησης w . Αυτή η συνάρτηση εκτιμά ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό ενός προϊόντος και είναι αυτή που απεικονίζεται στα διαγράμματα ελέγχου. Το L παριστάνει τον αριθμό που δηλώνει την απόσταση που θα έχουν τα όρια ελέγχου από την κεντρική γραμμή σε μονάδες τυπικής απόκλισης. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο αυξάνεται και η απόσταση των ορίων ελέγχου από την κεντρική γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι είναι μικρός ο κίνδυνος να βρεθεί ένα σημείο του διαγράμματος εκτός των ορίων ελέγχου (Παπαμιχαήλ, 2019).

Γενικά η λειτουργία των διαγραμμάτων ελέγχου βασίζεται στην κανονική κατανομή. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται ότι η κανονική κατανομή χωρίζεται σε ίσα διαστήματα 3σ , δεξιά και αριστερά της μέσης τιμής (Κούτουλα, 2017).



Εικόνα 31: Καμπύλη κανονικής κατανομής (Κούτουλα, 2017)

Σε ένα διάγραμμα ελέγχου το οποίο βρίσκεται υπό φυσική μεταβλητότητα, το 99.73% των τιμών του ποιοτικού χαρακτηριστικού του προϊόντος θα βρίσκεται εντός των ορίων (Παπαμιχαήλ, 2019). Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα να βρεθούν εκτός ορίων ελέγχου είναι μόλις 0.27%, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 32: Διάγραμμα ελέγχου μεγέθους δείγματος n (Κουϊκόγλου, 2010)

Τα διαγράμματα ελέγχου μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- α) Ανάλογα με το είδος της μεταβλητής, χωρίζονται σε διαγράμματα ελέγχου μεταβλητών και ιδιοτήτων.

- b) Σύμφωνα με τον αριθμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών της διεργασίας. Αν ο αριθμός αυτός ισούται με ένα τότε ονομάζονται μονομεταβλητά διαγράμματα ελέγχου. Αν είναι μεγαλύτερος της μονάδας πολυμεταβλητά.
- c) Σύμφωνα με την κατανομή της διεργασίας. Σε περίπτωση που οι μετρήσεις ακολουθούν γνωστή κατανομή τα διαγράμματα ελέγχου ονομάζονται παραμετρικά. Στην περίπτωση άγνωστης κατανομής μη παραμετρικά.
- d) Ανάλογα με το μέγεθος του δείγματος, αν ο αριθμός του δείγματος είναι ίσος με τη μονάδα το διάγραμμα ελέγχου ονομάζεται μεμονωμένων παρατηρήσεων. Αν είναι μεγαλύτερος της μονάδας διαγράμματα ελέγχου για ομάδες (Παπαμιχαήλ, 2019).

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα ελέγχου των ιδιοτήτων. Ως ιδιότητες χαρακτηρίζονται οι διακριτές τυχαίες μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν ποιοτικά χαρακτηριστικά. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι τα ελαττώματα που παρουσιάζει ένα προϊόν ή και ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων μίας παρτίδας. Ένα προϊόν το οποίο είναι ελαττωματικό σημαίνει ότι η τιμή τουλάχιστον ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού είναι εκτός των ορίων προδιαγραφών (Κονταξάκη, 2015).

Τα διαγράμματα αυτά χωρίζονται σε 3 βασικά είδη:

- i. Τα διαγράμματα ποσοστού ελαττωματικών προϊόντων, γνωστά ως p-chart.
- ii. Τα διαγράμματα αριθμού ελαττωματικών προϊόντων, γνωστά ως np-chart.
- iii. Τα διαγράμματα αριθμού ελαττωμάτων, γνωστά ως c-chart.

Διαγράμματα Ελέγχου Ποσοστού Ελαττωματικών Προϊόντων

Το συγκεκριμένο είδος των διαγραμμάτων ελέγχου αναπαριστά τις αυξομειώσεις του ποσοστού των ελαττωματικών μονάδων, οι οποίες εντοπίζονται μέσα από ένα δείγμα μεγέθους n . Το πηλίκο του αριθμού των ελαττωματικών μονάδων ως προς το συνολικό πλήθος των προϊόντων μίας παρτίδας, αποτελεί το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων p . Έστω ότι επιλέγονται τυχαία δείγματα μεγέθους n . Με X_{ij} συμβολίζεται η τυχαία μεταβλητή η οποία παίρνει τις τιμές 1 ή 0. Αν το προϊόν j του δείγματος i είναι ελαττωματικό τότε παίρνει την τιμή 1, αλλιώς 0. Η τυχαία μεταβλητή ακολουθεί την κατανομή Bernoulli(1,p). Με X_i συμβολίζεται η τυχαία μεταβλητή η οποία δηλώνει τον αριθμό των ελαττωματικών μονάδων. Αυτή ακολουθεί τη Διωνυμική κατανομή(n,p) με (Αντζουλάκος, 2009):

- Μέση τιμή $\mu=n*p$ και,
- Διασπορά $\sigma^2=n*p*(1-p)$

Επιπλέον ορίζεται και W_i τυχαία μεταβλητή η οποία συμβολίζεται το ποσοστό των ελαττωματικών μονάδων στο δείγμα i . Η W_i περιγράφεται από τη σχέση (Παπαμιχαήλ, 2019):

$$W_i = p_i = \frac{X_i}{n}, \text{ με αριθμό δείγματος μεγαλύτερο της μονάδας}$$

Επιπλέον για την W_i ισχύει (Αντζουλάκος, 2009):

- $\mu_{w_i} = p$
- $\sigma^2_{w_i} = \frac{p*(1-p)}{n}$

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αναπτυχθεί ένα διάγραμμα ελέγχου μέσω του οποίου θα παρακολουθείται το ποσοστό των ελαττωματικών μονάδων μίας παραγωγικής διαδικασίας, στο οποίο θα απεικονίζεται η στατιστική συνάρτηση W_i . Στη συνέχεια σε συνδυασμό με το γενικό μοντέλο σίγμα που παρουσιάστηκε παραπάνω θα προκύψουν οι τύποι για το Άνω και Κάτω όριο ελέγχου καθώς και ο τύπος της Κεντρικής Γραμμής.

Για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής για $L=3$, προκύπτουν οι παρακάτω τύποι (Παπαμιχαήλ, 2019):

- $AOE = p + 3 * \sqrt{\frac{p*(1-p)}{n}}$
- $KG = p$
- $KOE = p - 3 * \sqrt{\frac{p*(1-p)}{n}}$

Διαγράμματα Ελέγχου Αριθμού Ελαττωματικών

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου αριθμού ελαττωματικών είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Όπως και στο διάγραμμα ποσοστού ελαττωματικών η τυχαία μεταβλητή X_i παριστάνει τον αριθμό των ελαττωματικών μονάδων. Η διαφορά είναι ότι η στατιστική συνάρτηση W_i που θα απεικονίζεται στο διάγραμμα ελέγχου θα ισούται με την X_i ($W_i = X_i$). Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για $L=3$ είναι οι εξής (Παπαμιχαήλ, 2019):

- $AOE = n * p + 3 * \sqrt{n * p * (1 - p)}$
- $KG = n * p$
- $KOE = n * p - 3 * \sqrt{n * p * (1 - p)}$

Διαγράμματα Ελέγχου Αριθμού Ελαττωμάτων

Αυτό το είδος των διαγραμμάτων ελέγχου αφορά το συνολικό αριθμό ελαττωμάτων σε μία μονάδα επιθεώρησης. Ως μονάδα επιθεώρησης ορίζεται είτε ολόκληρο το προϊόν (π.χ. ένας κινητήρας), είτε ένα τμήμα από το προϊόν (π.χ. το ψυγείο του κινητήρα), είτε μία παρτίδα προϊόντων (π.χ. 10 κινητήρες). Να σημειωθεί ότι τα ελαττώματα μίας μονάδας επιθεώρησης δεν είναι ανάγκη να είναι του ίδιου τύπου (π.χ. σε έναν κινητήρα ως ελάττωμα μπορεί να θεωρηθεί η απουσία ορισμένων εξαρτημάτων, η ύπαρξη αστοχιών στις συγκολλήσεις κτλ.).

Ο αριθμός των ελαττωμάτων περιγράφεται από την τυχαία μεταβλητή X_i . Η X_i ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο c . Η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής και η διασπορά ισούνται με:

- $\mu_X = c$
- $\sigma^2_X = c$

Στο διάγραμμα ελέγχου θα απεικονίζεται η στατιστική συνάρτηση W_i η οποία ισούται με την X_i ($W_i = X_i$). Η συνάρτηση αυτή θα παριστάνει τον αριθμό των ελαττωμάτων.

Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ορίων και της κεντρικής γραμμής, με το $L=3$ είναι οι εξής (Παπαμιχαήλ, 2019):

- $AOE = c - 3 * \sqrt{c}$
- $K\Gamma = c$
- $KOE = c + 3 * \sqrt{c}$

Η βασική διαφορά αυτού του διαγράμματος σε σχέση με του ποσοστού ελαττωματικών είναι ότι σε αυτό υπολογίζεται ο αριθμός των ελαττωμάτων ανά προϊόν. Στο διάγραμμα ελέγχου ποσοστού ελαττωματικών υπολογίζεται το ποσοστό ελαττωματικών ανά δείγμα.

Κεφάλαιο 3 Περιγραφή της Epishine AB

3.1. Παρουσίαση της εταιρείας

Η Epishine AB <https://www.epishine.com/> είναι μία start-up εταιρεία η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο των οργανικών φωτοβολταϊκών απασχολώντας πάνω από 20 εργαζόμενους. Η έδρα της εταιρείας βρίσκεται στη Σουηδία και πιο συγκεκριμένα στην πόλη του Λίνσεπινγκ, όπου εκεί στεγάζονται τα γραφεία και το εργαστήριο που περιλαμβάνει τη γραμμή παραγωγής. Η ίδρυση της εταιρείας χρονολογείται μόλις το 2016 αλλά η εξέλιξη που παρουσιάζει σε αυτά τα 5 χρόνια είναι τεράστια. Όσον αφορά τις εγκαταστάσεις το 2017 ξεκίνησε να δημιουργείται ένα εργαστήριο έρευνας και ανάπτυξης. Αυτή τη στιγμή στο χώρο του εργαστηρίου υπάρχει γραμμή παραγωγής η οποία όμως δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Το τελευταίο τρίμηνο όμως του 2020 έχουν γίνει σημαντικά βήματα ώστε να αυτοματοποιηθεί. Συγκεκριμένα προστέθηκαν σε αυτήν ορισμένες εξειδικευμένες μηχανές οι οποίες βοηθούν στο να υλοποιείται η παραγωγή των συσκευών σε μικρότερο χρόνο και με το λιγότερο κόστος, καθώς πριν την άφιξη αυτών ορισμένες κατεργασίες υλοποιούνταν χειρωνακτικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται περισσότερα ελαττώματα στα τελικά προϊόντα και να επιβραδύνεται ολόκληρη η διαδικασία.



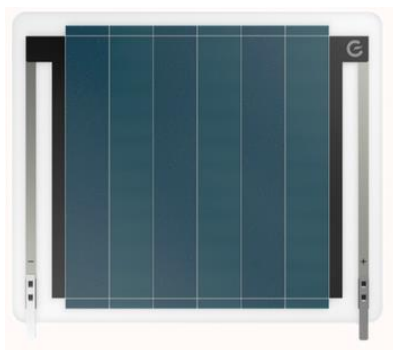
Εικόνα 33: Γραφεία Epishine AB (Epishine, 2021)

3.2. Προϊόντα

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προϊόντα που παράγονται από το εργαστήριο της Epishine βασίζονται σε περισσότερα από 30 χρόνια έρευνας πάνω στην οργανική ηλεκτρονική η οποία έχει πραγματοποιηθεί από το πανεπιστήμιο του Λίνσεπινγκ σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Chalmers (Epishine, 2021). Στην Epishine έχουν ως στόχο να προσεγγίσουν την αγορά σε 3 φάσεις βάσει των παραγωγικών δυνατοτήτων τους. Πρώτος στόχος είναι η παραγωγή ηλιακών κυψελών οι οποίες

θα είναι για χρήση σε εσωτερικούς χώρους όπου θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διάφορες μικροσυσκευές. Σε δεύτερη φάση θα προσπαθήσουν να δημιουργήσουν έξυπνες επιφάνειες για οικοδομικά υλικά, παράθυρα και σε ελαφριές κατασκευές όπου τα συμβατικά ηλιακά κύτταρα είναι δύσκολο να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν. Αυτό θα είναι αρκετά ενδιαφέρον και δύσκολο καθώς οι οργανικές διατάξεις αυτή τη στιγμή είναι πιο ακριβές σε σχέση με τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Τέλος σε τρίτη φάση στόχος είναι η δημιουργία μεγάλων οργανικών ηλιακών κυψελών οι οποίες θα χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Αυτός είναι ένας μακρυπρόθεσμος στόχος ο οποίος θα επιτευχθεί όταν θα μπορέσει να υπάρξει καλύτερη τιμή ανά κιλοβάτώρα στις οργανικές διατάξεις. Μετά από 5 χρόνια από την ίδρυση της εταιρείας στις αρχές Φλεβάρη του 2021 επιτεύχθηκε ο πρώτος στόχος με την επίσημη παρουσίαση των τελικών συσκευών οι οποίες έχουν αρχίσει να διατίθενται στην αγορά. Οι συσκευές αυτές καλούνται ως «κυψελίδες φωτός» (light cells) αντί για ηλιακές, καθώς λειτουργούν συλλέγοντας ενέργεια από φώτα εσωτερικού χώρου.

Αυτή τη στιγμή υπάρχει μία ταχέως αναπτυσσόμενη βιομηχανία αισθητήρων. Η αντικατάσταση των μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε αυτούς δημιουργεί επιπλέον εργασία για τους τεχνικούς οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την συντήρηση τους, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος εργασίας. Επιπλέον χρησιμοποιούνται πολλές μπαταρίες μίας χρήσης οι οποίες δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μέσω της δημιουργίας των κυψελίδων φωτός η Epishine έχει ως πρωταρχικό στόχο να μειωθεί το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών και όπου υπάρχει δυνατότητα να αφαιρεθούν. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κυψελίδων αυτών είναι ότι κατασκευάζονται από μη τοξικά υλικά, γεγονός το οποίο τις καθιστά φιλικές προς το περιβάλλον ενώ μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά 99%. Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 34 η κυψελίδα φωτός είναι ευέλικτη, ελαστική και αρκετά ελαφριά έχοντας πάχος μόνο 0.2 χιλιοστά. Το μέγεθος της μπορεί να κυμαίνεται από 50x50 τετραγωνικά χιλιοστά μέχρι 50x20 τετραγωνικά χιλιοστά περιλαμβάνοντας είτε 6 είτε 8 κελιά. Επιπλέον είναι κατασκευασμένη από οργανικά υλικά χαμηλού κόστους, ενώ παρουσιάζει υψηλές αποδόσεις σε χαμηλό φωτισμό, πράγμα που την καθιστά ιδανική για τροφοδοσία ασύρματων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Τέλος επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών πάνω από 10 χρόνια και μειώνει το κόστος συντήρησης τους πάνω από 80% (Epishine, 2021).



Εικόνα 34: Φωτογραφία μίας κυψελίδας φωτός (Epishine, 2021)

Εμπορικές εφαρμογές – Συνεργασίες

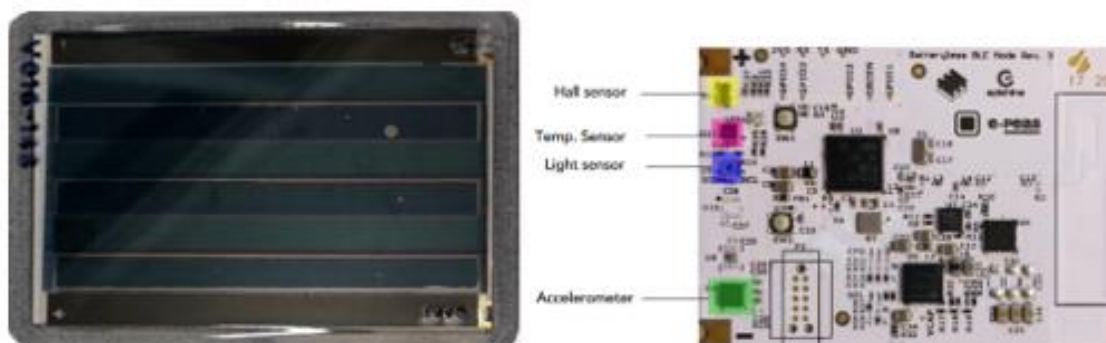
Η Microdata Due είναι μία εταιρεία η οποία ειδικεύεται στην παραγωγή ανιχνευτών πυρκαγιάς, οι οποίοι λειτουργούν με τη χρήση μπαταριών οι οποίες πρέπει να έχουν τουλάχιστον 3 χρόνια ζωής. Για εμπορικούς λόγους θέλουν να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής σε 5 χρόνια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των κυψελίδων φωτός. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 35 χρησιμοποιούνται κυψελίδες οι οποίες είναι παράλληλα συνδεδεμένες και αποτελούνται από 8 ηλιακά κελιά. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αυτονομία 8 ωρών κάτι που έχει σαν να αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας (Epishine, 2021).



Εικόνα 35: Χρήση των κυψελίδων φωτός σε ανιχνευτή πυρκαγιάς (Epishine, 2021)

Μία άλλη περίπτωση χρήσης των κυψελίδων φωτός είναι η MiroCard η οποία αποτελείται από ένα σύστημα αισθητήρων. Το μέγεθος της κάρτας είναι μικρότερο από μία πιστωτική κάρτα ενώ λειτουργεί χωρίς μπαταρίες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας κυψελίδας που βρίσκεται στην μπροστινή πλευρά. Στην πίσω πλευρά βρίσκεται το σύστημα των αισθητήρων το οποίο αποτελείται από αισθητήρες που μετρούν διάφορες παραμέτρους του περιβάλλοντος όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, το φως και η επιτάχυνση ενώ περιλαμβάνει και ασύρματο ραδιόφωνο. Επιπλέον διαθέτει bluetooth μέσω τον οποίων μπορεί να γίνεται έλεγχος ταυτότητας χρηστών και να υπολογίζεται η πληρότητα μίας αίθουσας. Τέλος ο χρόνος που απαιτείται για να ξεκινήσει η λειτουργία της από τη στιγμή που θα

βρεθεί σε φωτισμό εσωτερικού χώρου είναι μικρότερος από 5 δευτερόλεπτα (Epishine, 2021).



Εικόνα 36: Αριστερά η μπροστινή όψη της MiroCard και δεξιά η πίσω της όψη (Epishine, 2021)

Μία ακόμη περίπτωση αντικατάστασης των μπαταριών από κυψελίδες φωτός είναι οι ηλεκτρονικές κλειδαριές, όπου η εγκατάσταση τους θα είναι εύκολη λόγω του πολύ μικρού τους πάχους.



Εικόνα 37: Κυψελίδα φωτός εγκατεστημένη σε ηλεκτρονική κλειδαριά ασφαλείας (Epishine, 2021).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της Epishine είναι ότι μπορεί να προσαρμόζει τις κυψελίδες φωτός, το σχήμα τους και τον αριθμό των ηλιακών κελιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πελάτη όπως παρατηρείται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 38: Προσαρμοσμένη κυψελίδα φωτός κατόπιν ειδικής παραγγελία (Epishine, 2021)

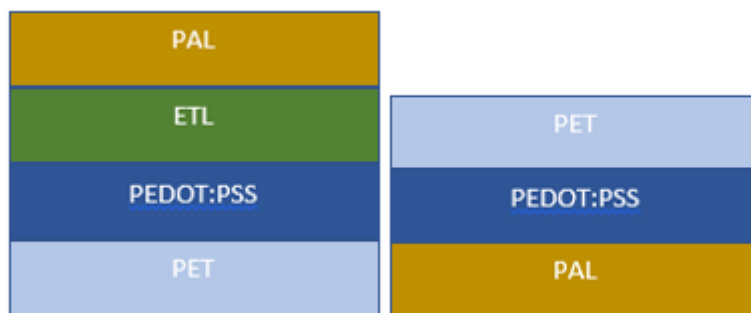
3.3. Περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας της υπό μελέτη εταιρείας

Η διαδικασία της γραμμής παραγωγής ξεκινάει όταν καταφθάνουν στο εργαστήριο τα PET ρολά πάνω στα οποία θα γίνουν οι κατεργασίες για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Το PET όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 είναι ένα πλαστικό υλικό υψηλής απόδοσης, κρυστάλλινο και θερμοπλαστικό (Greelane, 2020). Το υλικό αυτό είναι ελαφρύ και εύκολο να εκτυπωθεί, ενώ επίσης το κόστος του είναι αρκετά χαμηλό. Κάποια ακόμη πλεονεκτήματα είναι η καλή σταθερότητα διαστάσεων, η χαμηλή απορρόφηση υγρασίας και η καλή οπτική καθαρότητα (Greelane, 2020). Το μήκος του κάθε ρολού είναι 45 μέτρα από τα οποία παράγονται οι τελικές συσκευές (modules), οι οποίες είναι και το τελικό προϊόν που διατίθεται στην αγορά.

Η διαδικασία της παραγωγής των συσκευών αποτελείται από 4 φάσεις, καθώς το ρολό περνάει από αρκετές κατεργασίες κάποιες εξ' αυτών είναι αρκετά χρονοβόρες. Στις 2 πρώτες φάσεις της γραμμής παραγωγής οι κατεργασίες γίνονται ενώ το ρολό είναι ενιαίο. Από την αρχή της 3^{ης} φάσης και μετά το ρολό κόβεται σε μικρότερα κομμάτια από τα οποία προκύπτουν οι τελικές συσκευές (modules). Προτού αναλυθούν οι κατεργασίες που απαιτούνται για την κατασκευή των συσκευών πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους προστασίας των δεδομένων της εταιρείας δεν αποκαλύπτονται ούτε τα ακριβή ονόματα της κάθε κατεργασίας αλλά ούτε και πολλές λεπτομέρειες για το τι συμβαίνει σε αυτές.

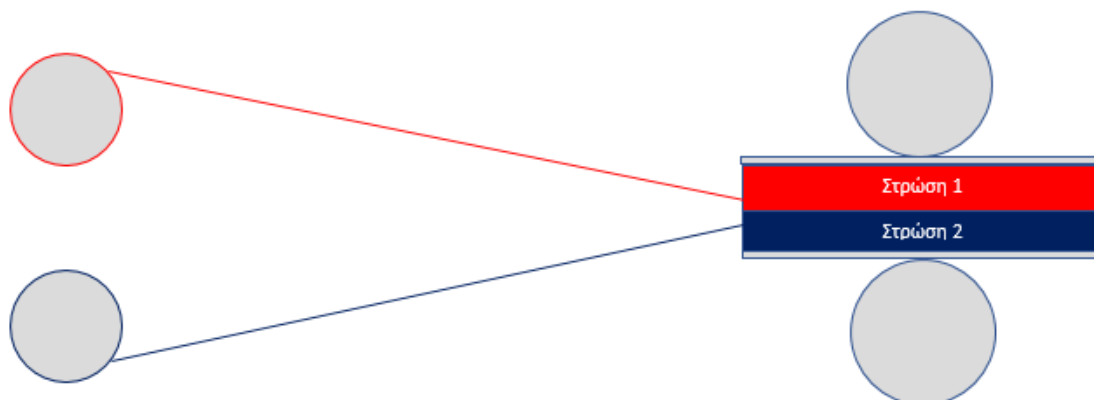
Η 1^η φάση της παραγωγικής διαδικασίας απαρτίζεται από δύο κατεργασίες. Αρχικά λαμβάνει χώρα η εκτύπωση των ηλεκτροδίων κατά μήκος του ρολού και στη συνέχεια μέσω μίας λεπίδας πραγματοποιείται η διχοτόμηση του ρολού το οποίο κόβεται κατά μήκος στα δύο.

Για την επίτευξη των κατεργασιών της 2^{ης} φάσης στην Epishine έχουν αναπτύξει μία καινοτόμο μέθοδο η οποία τους προσδίδει μοναδικότητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εταιρείες. Εφόσον έχει κοπεί το ρολό στα δύο μέσω μίας τεχνικής εναπόθεσης επιστρώνονται στο ένα μέρος του ρολού το ηλεκτρόδιο PEDOT:PSS το οποίο είναι υψηλής αγωγιμότητας, το στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETL) και το φωτοενεργό στρώμα (PAL). Στο άλλο μέρος του ρολού επιστρώνονται και εκεί το ηλεκτρόδιο PEDOT:PSS και το φωτοενεργό στρώμα (PAL).



Εικόνα 39: Επίστρωση στρωμάτων πάνω στο ρολό

Αμέσως μετά ακολουθεί η κατεργασία του lamination κατά την οποία τα δύο ρολά περνούν ανάμεσα από την μηχανή του lamination και χρησιμοποιώντας πίεση και υψηλή θερμοκρασία ενώνονται.



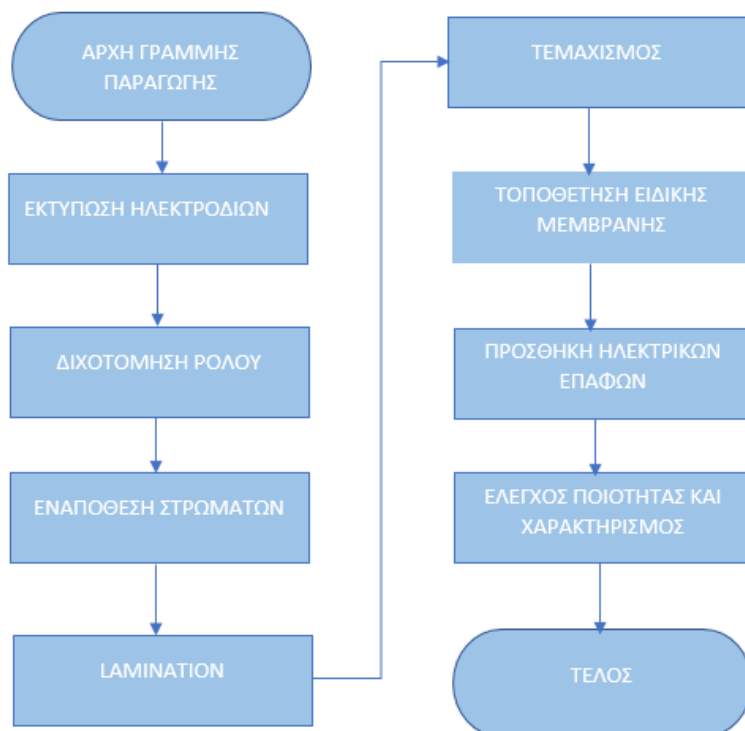
Εικόνα 40: Ένωση των στρωμάτων κατά τη διαδικασία του lamination

Μέσω αυτής της μεθόδου επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση σε πολύ χαμηλό φωτισμό ενώ μειώνονται και οι πιθανότητες να προκύψουν τυχόν ελαττώματα.

Στην 3^η φάση μέσω της κατεργασίας τους τεμαχισμού το ρολό αρχικά κόβεται σε κομμάτια από τα οποία δημιουργούνται τα σχήματα των τελικών συσκευών. Στη συνέχεια κάθε μία συσκευή περικλείεται από μία ειδική μεμβράνη η οποία εμποδίζει την εισχώρηση υγρασίας και οξυγόνου.

Τέλος κατά την 4^η φάση υλοποιείται η προσθήκη των ηλεκτρικών επαφών σε κάθε συσκευή. Οι επαφές αυτές είναι από μέταλλο και όταν συνδεθούν με κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Αμέσως μετά ακολουθεί ο ποιοτικός έλεγχος κατά τον οποίο εντοπίζονται τυχόν ελαττώματα και ο χαρακτηρισμός όπου μετριέται η απόδοση της κάθε συσκευής.

Παρακάτω στην εικόνα 41 παρουσιάζονται οι 4 φάσεις που ακολουθούνται στην γραμμή παραγωγής από την αρχή μέχρι το πέρας και την παραγωγή των τελικών προϊόντων.



Εικόνα 41: Διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας

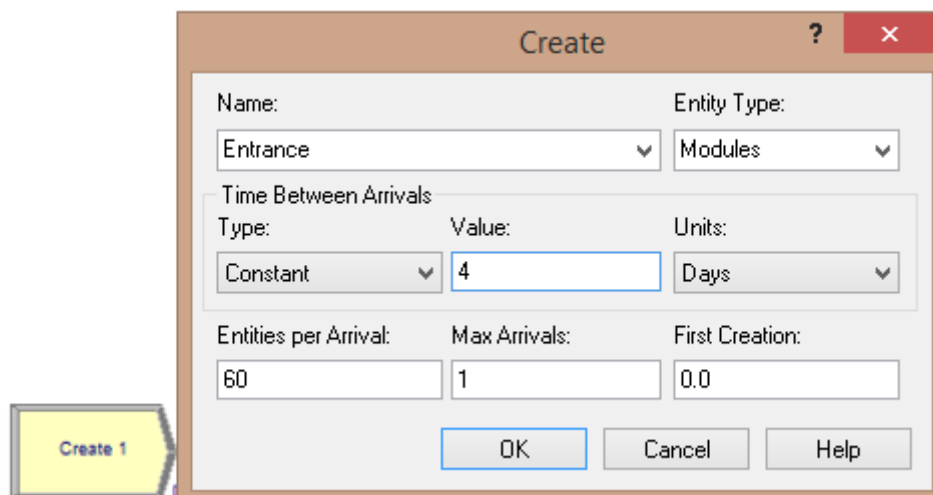
Κεφάλαιο 4 Αξιολόγηση γραμμής παραγωγής

4.1. Μοντελοποίηση στο λογισμικό Arena

Στην αρχή αυτού του κεφαλαίου θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η γραμμή παραγωγής της Erishine στο λογισμικό του Arena Rockwell. Όπως αναφέρθηκε στο τέλος του 3^{ου} κεφαλαίου η διαδικασία της γραμμής παραγωγής ξεκινάει με το ρολό να είναι ενιαίο στις αρχικές κατεργασίες και στη συνέχεια να κόβεται σε κομμάτια από τα οποία παράγονται οι τελικές συσκευές. Για λόγους συμβατότητας όμως με το λογισμικό υπήρξε μία διαφοροποίηση στη μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής στο περιβάλλον του Arena. Η διαφοροποίηση αυτή έχει να κάνει με το ότι η γραμμή παραγωγής ξεκινάει με τη δημιουργία των τελικών συσκευών. Αυτό σημαίνει ότι κάθε συσκευή λαμβάνεται υπόψη ως μία διακριτή οντότητα, γεγονός το οποίο έχει ως συνέπεια οι χρόνοι κατεργασιών να προσαρμοστούν ανά συσκευή. Ακολουθώς παρουσιάζονται τα basic modules που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής στο λογισμικό του Arena, η οποία αποτελείται από 8 κατεργασίες.

- **Είσοδος**

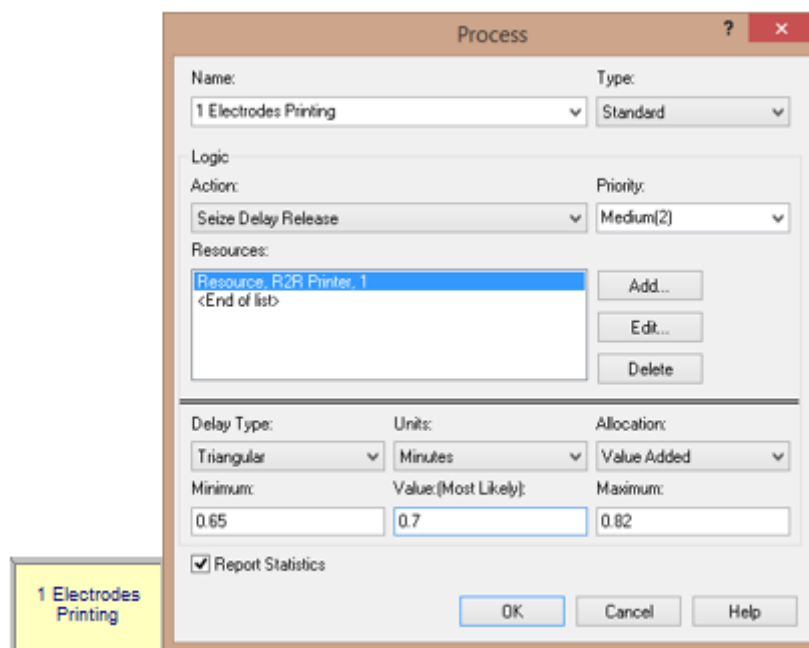
Η αρχή της γραμμής παραγωγής ξεκινάει με το Create Module στο οποίο έχει δοθεί το όνομα (Name) Entrance και Modules είναι ο τύπος της οντότητας (Entity Type) που γεννιέται. Ο ενδοαφιξιακός χρόνος (Time Between Arrivals) ακολουθεί τη συνεχή κατανομή και ορίζεται να είναι ίσος με 4 ημέρες. Στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός οντοτήτων (Entities per Arrival) που δημιουργούνται ταυτόχρονα όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσος με 60 συσκευές, ενώ δίπλα είναι το μέγιστο πλήθος οντοτήτων προς δημιουργία (Max Arrivals) το οποίο ισούται με 1. Αυτό σημαίνει ότι ανά 4 ημέρες στη γραμμή παραγωγής εισέρχεται μία παρτίδα των 60 συσκευών. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός αυτός είναι επειδή η μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής πραγματοποιήθηκε στην ακαδημαϊκή έκδοση του Arena, στην οποία υπάρχει το όριο των 150 οντοτήτων (Entities). Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που θα ξεκινήσει το πρόγραμμα να τρέχει ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα, μέσα στη μοντελοποιημένη γραμμή παραγωγής οι οντότητες δεν μπορούν να ξεπεράσουν το παραπάνω όριο. Αν συμβεί αυτό το πρόγραμμα θα σταματήσει να τρέχει και θα εμφανίσει ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα.



Εικόνα 42: Απεικόνιση του Create Module και του πλαισίου διαμόρφωσης

- **Κατεργασίες**

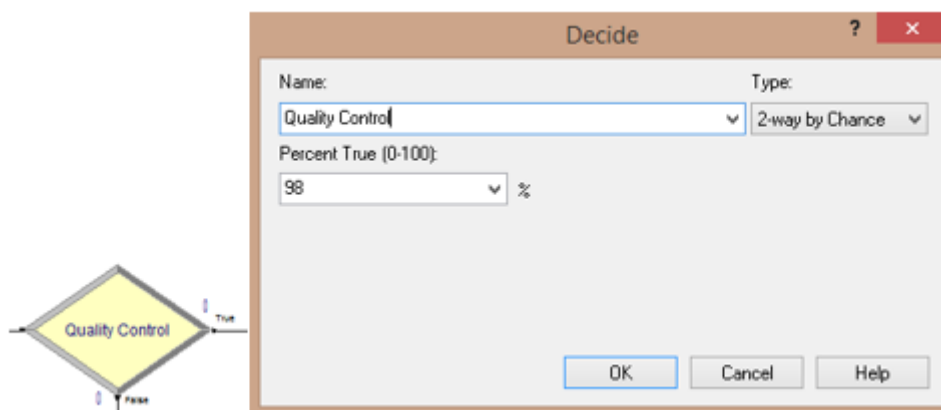
Στη συνέχεια και αφού έχουν δημιουργηθεί οι οντότητες μέσω του Create Module ακολουθούν οι κατεργασίες οι οποίες περιγράφονται από το Process Module. Εφόσον οι κατεργασίες είναι 8 τόσα θα είναι και τα Process Modules που θα χρησιμοποιηθούν. Κάθε Process Module έχει σαν όνομα την αντίστοιχη κατεργασία που προσομοιώνει. Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η κατεργασία της εκτύπωσης των ηλεκτροδίων. Το όνομα (Name) που έχει δοθεί στο module είναι το αντίστοιχο της κατεργασίας αλλά στα αγγλικά. Στη συνέχεια δεσμεύεται ο πόρος (Resource) που θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των οντοτήτων, όπου η συγκεκριμένη κατεργασία επιτελείται μέσω της μηχανής R2R Printer η οποία αποτελεί μία μηχανή εκτύπωσης για περιστροφική μεταξοτυπία. Αμέσως μετά επιλέγεται ο τύπος καθυστέρησης (Delay Type) δηλαδή η κατανομή που ακολουθείται για την ολοκλήρωση της κατεργασίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αλλά και στις υπόλοιπες κατεργασίες ακολουθείται η τριγωνική κατανομή. Ο λόγος χρησιμοποίησης της είναι επειδή η γραμμή παραγωγής δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και πολλές φορές προκύπτουν προβλήματα τα οποία μπορεί να καθυστερήσουν ολόκληρη την διαδικασία. Ακριβώς δίπλα είναι οι χρονικές μονάδες (Units) που απαιτούνται για την κατεργασία κάθε οντότητας. Η χρονική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις κατεργασίες είναι τα λεπτά. Για παράδειγμα στην κατεργασία της εκτύπωσης ηλεκτροδίων κάθε συσκευή απαιτεί κατά μέσο όρο 0.7 λεπτά για να κατεργαστεί. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ένα πίνακα όλοι οι χρόνοι κατεργασίας όλων των διαδικασιών.



Εικόνα 43: Απεικόνιση του Process Module και του πλαισίου διαμόρφωσης

- **Αποφάσεις**

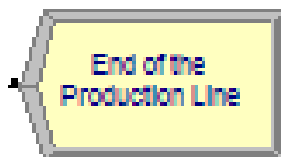
Οι εργαζόμενοι της εταιρείας μετά από κάθε κατεργασία διενεργούν ποιοτικούς ελέγχους ώστε να διαπιστώσουν με ποιο τρόπο εξελίσσεται και σε τι επίπεδο βρίσκεται η παραγωγική διαδικασία, αλλά και για την συλλογή στατιστικών στοιχείων. Οι ποιοτικοί έλεγχοι στο λογισμικό Arena απεικονίζονται μέσω των Decide Modules τα οποία έχουν σχήμα ρόμβου. Σε αυτά συμπληρώνεται το ποσοστό των οντοτήτων οι οποίες είναι «αληθείς», δηλαδή αυτές οι οποίες έχουν περάσει από τον ποιοτικό έλεγχο χωρίς να παρουσιάζουν κάποιο ελάττωμα. Όσες έχουν απορριφθεί βγαίνουν από τη γραμμή παραγωγής μέσω του Dispose Module. Τα ποσοστά που έχουν συμπληρωθεί σε κάθε Decide Module είναι σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της εταιρείας.



Εικόνα 44: Απεικόνιση του Decide Module και του πλαισίου διαμόρφωσης

- **Έξοδος**

Τέλος οι έξοδοι αναπαρίστανται από το Dispose Module και αποτελούν το σημείο από όπου οι συσκευές εξέρχονται από τη γραμμή παραγωγής είτε επειδή τελείωσε η παραγωγική διαδικασία είτε διότι απορρίφθηκαν λόγω ελαττώματος κατά τη διάρκεια του ποιοτικού ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι κάθε Decide Module ενώνεται με ένα Dispose Module.



Εικόνα 45: Έξοδος από το σύστημα.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται όλοι οι χρόνοι κατεργασίας της κάθε διαδικασίας καθώς και τα ποσοστά των μη ελαττωματικών συσκευών που γίνονται αποδεκτές μετά από κάθε ποιοτικό έλεγχο και συνεχίζουν στην παραγωγική διαδικασία. Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι για λόγους πνευματικής ιδιοκτησίας κάποια από αυτά τα νούμερα που αναφέρονται μπορεί να αποκλίνουν από την πραγματικότητα.

Πίνακας 2: Χρόνοι κατεργασιών και ποσοστά μη ελαττωματικών συσκευών

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ (%)
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	0.65	0.7	0.82	100
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	0.55	0.6	0.65	100
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	0.8	0.85	0.9	100
LAMINATION	0.3	0.35	0.42	97
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	0.55	0.6	0.65	98

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΛΕΠΤΑ)	ΠΟΣΟΣΤΑ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ (%)
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	0.4	0.45	0.5	98
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	1	1.1	1.2	96
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	0.9	1	1.1	96

4.2. Εφαρμογή και επαλήθευση του μοντέλου ανάλυσης παραγωγής

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής ακολουθεί η εντολή «Run» μέσω της οποίας ξεκινάει η προσομοίωση του προγράμματος ώστε να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα. Το αρχικό σενάριο που προσομοιώθηκε ήταν η μετατροπή ενός ρολού πρώτης ύλης σε τελικά προϊόντα ακολουθώντας τις 8 κατεργασίες που έχουν ήδη περιγραφεί. Στον παρακάτω πίνακα αναπαρίσταται ο μέσος όρος των συσκευών οι οποίες δεν είναι ελαττωματικές μετά το πέρας της κάθε κατεργασίας. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της εταιρείας γίνεται αντιληπτό ότι από την αρχή της γραμμής παραγωγής μέχρι το τέλος εντοπίστηκαν κατά μέσο όρο μόνο 8 ελαττωματικές συσκευές ανά ρολό, οι οποίες και απορρίφθηκαν.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	60
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	60
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
LAMINATION	58
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	57
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	56
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	54
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	52

Εικόνα 46: Στατιστικά στοιχεία της εταιρείας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν από το Arena. Σε αυτή την περίπτωση οι ελαττωματικές συσκευές οι οποίες και απορρίφθηκαν ήταν 8.6 κατά μέσο όρο.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	60
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	60
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
LAMINATION	58.19
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	57.01
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	55.92
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	53.75
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	51.4

Εικόνα 47: Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση του Arena (αρχικό σενάριο)

Όπως παρατηρείται τα νούμερα από το μοντέλο του Arena σε κάποιες κατεργασίες είναι ακριβώς ίδια με τα στατιστικά στοιχεία της εταιρείας, ενώ σε κάποιες άλλες κατεργασίες οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Μέσω αυτού συμπεραίνεται ότι επιτεύχθηκε σωστός προσδιορισμός των ποσοτικών στοιχείων και ότι τα αποτελέσματα που εξήχθησαν δεν ήταν τυχαία.

4.3. Αποτελέσματα και αξιολόγηση αποδοτικότητας της γραμμής παραγωγής

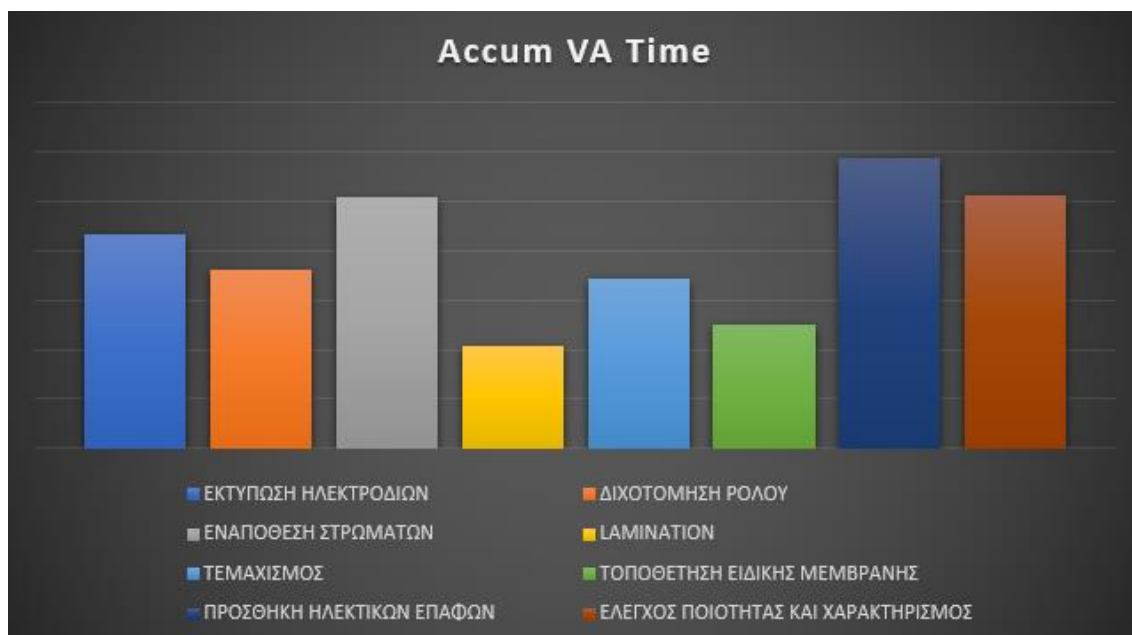
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής στο χώρο του Arena. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να γίνουν οι εξής δύο παρατηρήσεις. Η πρώτη παρατήρηση αφορά τον τρόπο λειτουργίας της γραμμής παραγωγής. Για να ξεκινήσει η εκτέλεση μίας κατεργασίας αναγκαστικά πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η αμέσως προηγούμενη. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά την απόκρυψη των χρόνων της κάθε κατεργασίας από τα τελικά αποτελέσματα ώστε να προστατευθούν τα δεδομένα της εταιρείας.

Αρχικά εμφανίζεται ο συνολικός αριθμός των συσκευών οι οποίες εισήλθαν και εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής. Επιπλέον εμφανίζεται και ο μέσος όρος των συσκευών, οι οποίες ανά πάσα στιγμή βρίσκονται μέσα στο σύστημα της γραμμής παραγωγής κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Work In Progress).

Πίνακας 3: Συσκευές οι οποίες εισήλθαν και εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής και συσκευές οι οποίες είναι υπό επεξεργασία ανά πάσα στιγμή

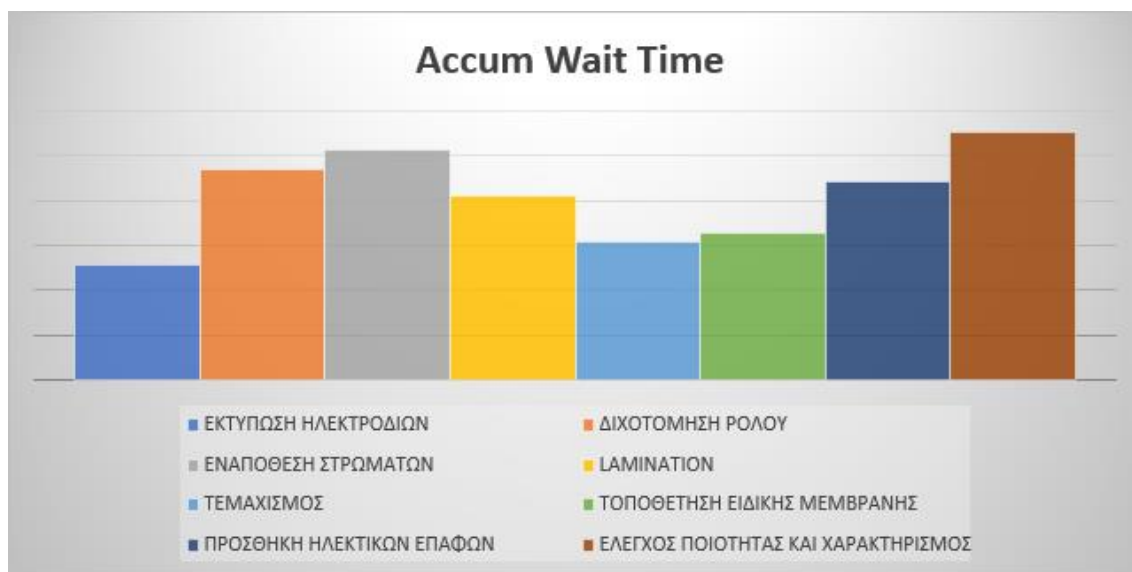
Modules	Average
Number In	60.0000
Number Out	60.000
WIP	46.4315

Έπειτα παρουσιάζεται ο συσσωρευμένος χρόνος προστιθέμενης αξίας (Accumulated Value-Added Time) της κάθε κατεργασίας. Ο χρόνος αυτός ουσιαστικά αποτελεί το συνολικό χρόνο κατεργασίας που απαιτείται για όλο το πλήθος των συσκευών. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα της εικόνας 48 υπάρχουν διαφορές μεταξύ των χρόνων κάθε κατεργασίας, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντικές καθώς υπάρχουν κατεργασίες οι οποίες απαιτούν τον διπλάσιο χρόνο για να ολοκληρωθούν. Η πιο γρήγορη κατεργασία της γραμμής παραγωγής είναι η διαδικασία του lamination. Αυτό επιτυγχάνεται διότι η μηχανή η οποία επιτελεί τη συγκεκριμένη κατεργασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι δεν παρατηρούνται καθυστερήσεις και σφάλματα κατά τη διάρκεια της χρήσης της. Από την άλλη μεριά οι πιο χρονοβόρες κατεργασίες της παραγωγικής διαδικασίας είναι η εναπόθεση των στρωμάτων, ο έλεγχος ποιότητας και χαρακτηρισμός και η προσθήκη των ηλεκτρικών επαφών. Η τελευταία αποτελεί την πιο χρονοβόρα κατεργασία του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την εκτέλεση της συγκεκριμένης κατεργασίας εμπλέκεται σε μεγάλο βαθμό ο ανθρώπινος παράγοντας, καθώς το μηχάνημα που χρησιμοποιείται δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτουν συχνά διάφορες αστοχίες κατά την τοποθέτηση των ηλεκτρικών επαφών οι οποίες μέχρι να διορθωθούν καταναλώνεται αρκετός χρόνος. Όσον αφορά τον έλεγχο ποιότητας και τον χαρακτηρισμό των συσκευών αποτελεί την τελευταία κατεργασία της παραγωγικής διαδικασίας πριν τα τελικά προϊόντα διατεθούν στην αγορά. Αυτό σημαίνει ότι κάθε συσκευή ελέγχεται εξονυχιστικά, διαδικασία που απαιτεί σημαντικό χρόνο. Τέλος η τρίτη πιο αργή κατεργασία είναι η εναπόθεση των στρωμάτων. Η κατεργασία αυτή είναι χρονοβόρα διότι τα στρώματα των διαλυμάτων πρέπει να επιστρωθούν ξεχωριστά το καθένα.



Εικόνα 48: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (αρχικό σενάριο)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συσσωρευμένου χρόνου αναμονής (Accumulated Wait Time) ο οποίος αποτελεί το συνολικό χρόνο αναμονής όλων των συσκευών στην ουρά κάθε κατεργασίας. Ο μεγαλύτερος χρόνος αναμονής εντοπίζεται στην τελευταία κατεργασία του ελέγχου ποιότητας και χαρακτηρισμού. Αυτό συμβαίνει διότι η αμέσως προηγούμενη κατεργασία της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών αποτελεί την πιο χρονοβόρα διαδικασία του συστήματος, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι δημιουργείται μία καθυστέρηση στην έναρξη της κατεργασίας του ελέγχου ποιότητας και χαρακτηρισμού οπότε ο συνολικός χρόνος αναμονής των συσκευών αυξάνεται. Επιπλέον ένας ακόμη λόγος είναι ότι σε αυτές τις δύο κατεργασίες εμπλέκεται σε σημαντικό βαθμό ο ανθρώπινος παράγοντας καθώς δεν υλοποιούνται από πλήρως αυτοματοποιημένες μηχανές. Έπειτα, ο δεύτερος μεγαλύτερος χρόνος αναμονής ανήκει στην εναπόθεση των στρωμάτων η οποία και αυτή είναι μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Ένας ακόμη λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι μέχρι αυτή την κατεργασία δεν απορρίπτεται καμία συσκευή στους ποιοτικούς ελέγχους που διενεργούνται, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα όσο περισσότερες συσκευές υπάρχουν μέσα στο σύστημα τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο χρόνος αναμονής τους. Τέλος η κατεργασία με το μικρότερο χρόνο αναμονής είναι η εκτύπωση των ηλεκτροδίων, κάτι το οποίο είναι λογικό καθώς αποτελεί την πρώτη κατεργασία της γραμμής παραγωγής οπότε δεν υπάρχει κάποια κατεργασία πριν από αυτή που να αυξάνει το χρόνο αναμονής.



Εικόνα 49: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (αρχικό σενάριο)

4.4. Αξιολόγηση και μελέτη εναλλακτικών σεναρίων

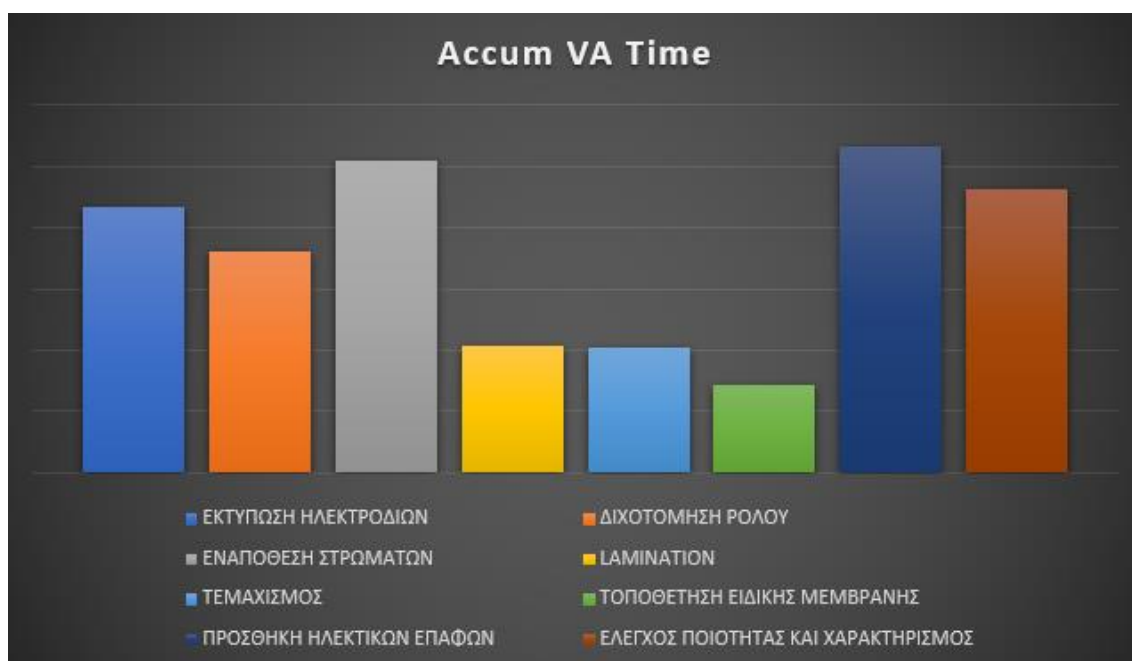
Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τρία εναλλακτικά σενάρια τα οποία μελετούνται στα πλαίσια των προσπαθειών επιτάχυνσης της γραμμής παραγωγής μέσω της αναβάθμισης συγκεκριμένων μηχανών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο χρόνος της παραγωγικής διαδικασίας συνεπώς και το κόστος παραγωγής. Συγχρόνως όμως θα μειωθούν κατά 5% τα ποσοστά των μη ελαττωματικών συσκευών μετά το πέρας της κάθε κατεργασίας που θα υποστεί αλλαγές. Αυτό θα συμβεί διότι με την αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας είναι αναμενόμενο για τα συγκεκριμένα μηχανήματα να μειωθεί η ακρίβεια. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα ένα μέρος των συσκευών να είναι εκτός των προδιαγραφών και να απορρίπτεται από την παραγωγή κατά τη διάρκεια του ποιοτικού ελέγχου.

Το πρώτο από τα 3 σενάρια είναι αυτό στο οποίο σημειώνονται οι περισσότερες αλλαγές, καθώς θα μειωθούν οι χρόνοι κατεργασίας δύο διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτές είναι ο τεμαχισμός και η τοποθέτηση ειδικής μεμβράνης. Το ποσοστό κατά το οποίο θα μειωθούν οι χρόνοι κατεργασίας τους είναι 40%. Σε πρώτη φάση στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο μέσος όρος των συσκευών οι οποίες δεν είναι ελαττωματικές μετά το πέρας της κάθε κατεργασίας. Ο μέσος όρος των συσκευών που εξέρχονται από τη γραμμή παραγωγής ανά ρολό είναι 46.26, δηλαδή κατά 5.14 συσκευές λιγότερες σε σχέση με το αρχικό σενάριο.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	60
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	60
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
LAMINATION	58,16
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	57,06
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	53,22
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	48,305
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	46,265

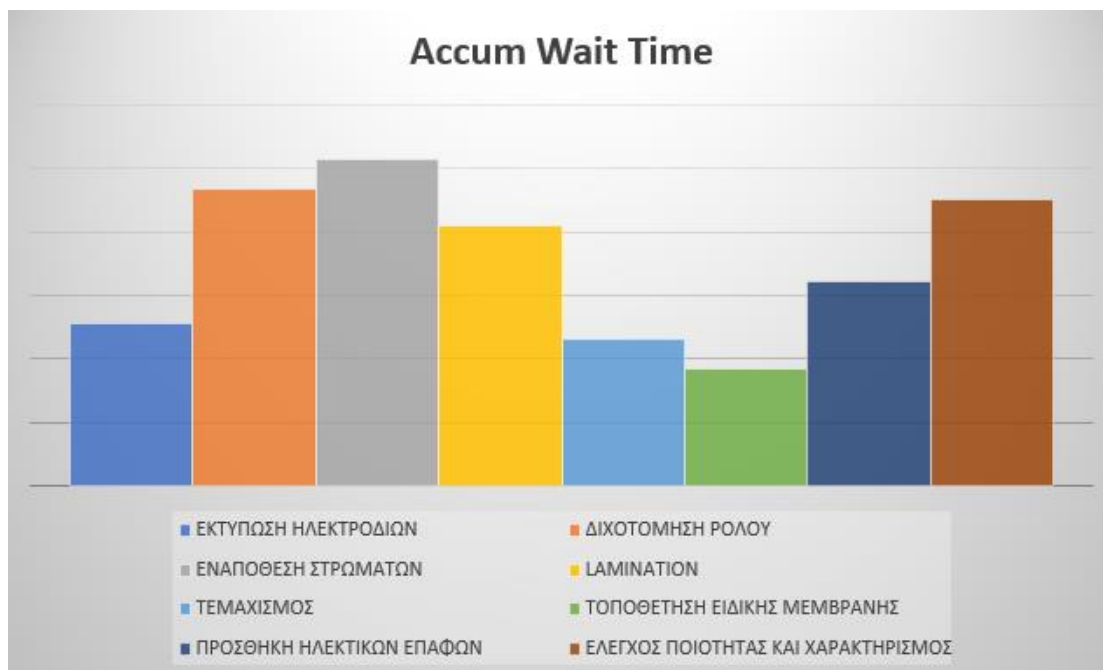
Εικόνα 50: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής ανά ρολό (πρώτο σενάριο)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο συσσωρευμένος χρόνος προστιθέμενης αξίας της κάθε κατεργασίας. Να σημειωθεί ότι οι χρόνοι κατεργασίας των 4 πρώτων διαδικασιών παρέμειναν ίδιοι με το αρχικό σενάριο καθώς δεν επηρεάστηκαν από τις αλλαγές στους χρόνους των παραπάνω δύο κατεργασιών. Το αντίθετο όμως συνέβη με τους χρόνους κατεργασίας των διαδικασιών της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών και του ελέγχου ποιότητας και χαρακτηρισμού, οι οποίοι και μειώθηκαν. Αυτό οφείλεται στο ότι οι συσκευές που έλαβαν τα συγκεκριμένα στάδια κατεργασίας ήταν λιγότερες σε σύγκριση με το αρχικό σενάριο καθώς μειώθηκε το ποσοστό αποδοχής των μη ελαττωματικών συσκευών κατά τους ελέγχους ποιότητας μετά τις διαδικασίες του τεμαχισμού και της τοποθέτησης ειδικής μεμβράνης.



Εικόνα 51: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (πρώτο σενάριο)

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται οι συσσωρευμένοι χρόνοι αναμονής. Όπως και προηγουμένως έτσι και σε αυτή την περίπτωση αλλαγές εντοπίζονται μόνο στους χρόνους αναμονής των τελευταίων κατεργασιών. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στους χρόνους αναμονής της τοποθέτησης ειδικής μεμβράνης και στην προσθήκη ηλεκτρικών επαφών.



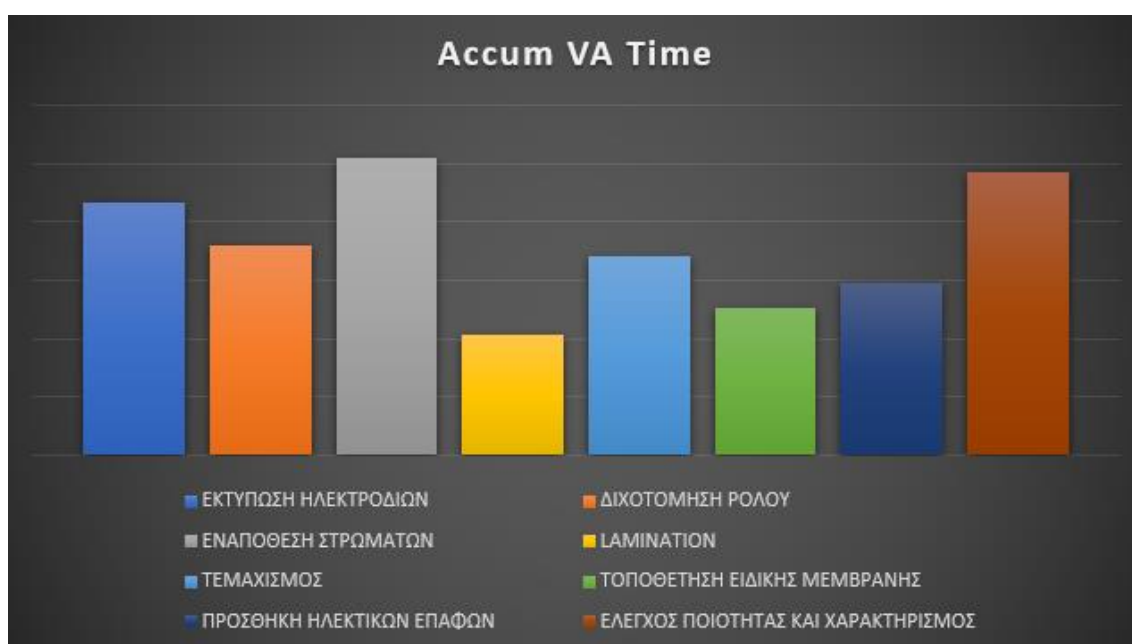
Εικόνα 52: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (πρώτο σενάριο)

Το δεύτερο σενάριο αφορά την κατεργασία της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών η οποία αυτή τη στιγμή αποτελεί και την πιο χρονοβόρα διαδικασία της γραμμής παραγωγής. Αυτό όμως θα μπορούσε να αλλάξει με την αναβάθμιση του μηχανήματος το οποίο θα μειώσει το χρόνο κατεργασίας της κατά το ήμισυ. Σε αυτή την περίπτωση ο μέσος όρος των συσκευών που εξέρχονται από τη γραμμή παραγωγής ανά ρολό είναι 48.49. Ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από το προηγούμενο σενάριο καθώς το ποσοστό των μη ελαττωματικών συσκευών μειώθηκε μόνο σε μία κατεργασία.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	60
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	60
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
LAMINATION	58,16
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	57,06
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	55,91
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	53,48
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	48,49

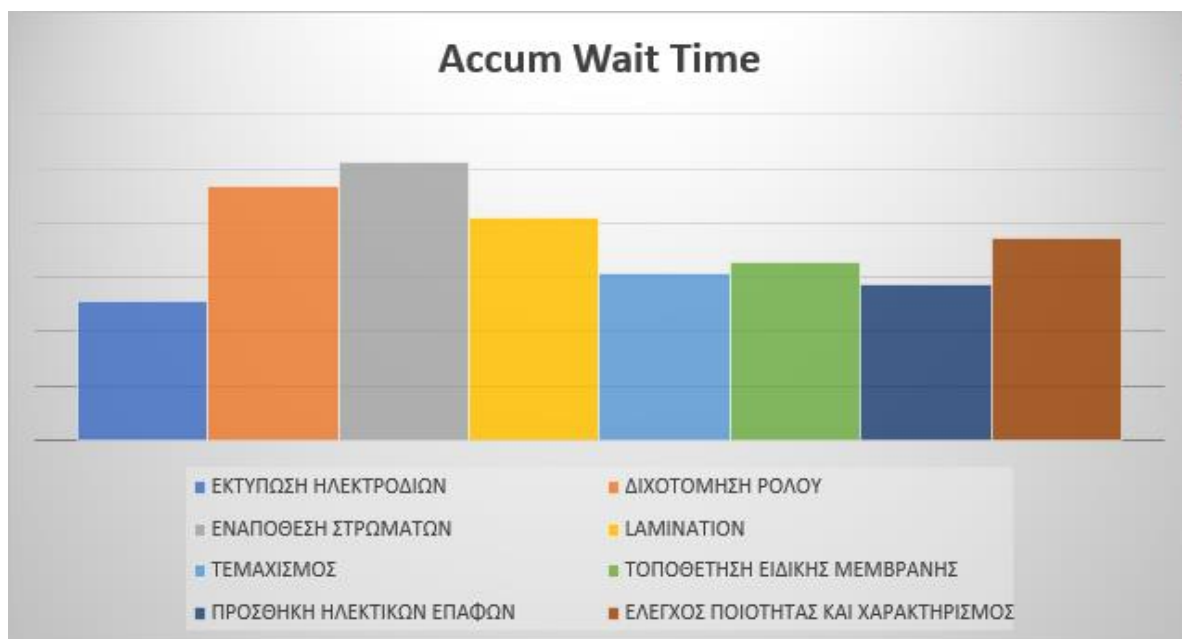
Εικόνα 53: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής (δεύτερο σενάριο).

Αμέσως μετά παρουσιάζονται οι συσσωρευμένοι χρόνοι κάθε κατεργασίας. Ο μόνος χρόνος που μειώθηκε για ελάχιστα λεπτά σε αυτό το σενάριο σε σύγκριση με το αρχικό είναι της κατεργασίας του ελέγχου ποιότητας και χαρακτηρισμού. Αν συγκριθεί ο χρόνος της ίδιας κατεργασίας με το προηγούμενο σενάριο είναι μεγαλύτερος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι συσκευές που έλαβε η συγκεκριμένη κατεργασία ήταν περισσότερες σε σχέση με το πρώτο σενάριο.



Εικόνα 54: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (δεύτερο σενάριο)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα των συσσωρευμένων χρόνων αναμονής, όπου στις 6 πρώτες κατεργασίες είναι ίδιοι με το αρχικό σενάριο. Η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στο χρόνο αναμονής της τελευταίας κατεργασίας σε σχέση με το αρχικό σενάριο.



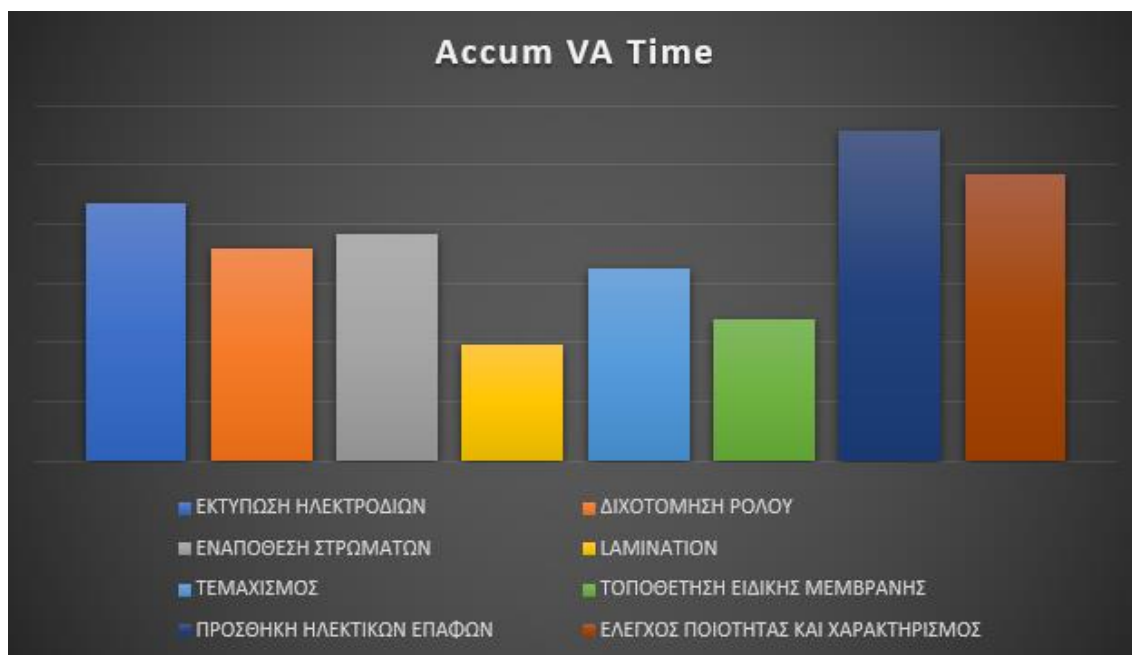
Εικόνα 55: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (δεύτερο σενάριο)

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο είναι αυτό το οποίο επιφέρει αλλαγές σε περισσότερες κατεργασίες καθώς αφορά την διαδικασία της εναπόθεσης στρωμάτων η οποία είναι η τρίτη κατεργασία της γραμμής παραγωγής. Στο σενάριο αυτό ο χρόνος κατεργασίας της συγκεκριμένης διαδικασίας μειώθηκε κατά 25%. Όπως και προηγουμένως αρχικά παρουσιάζεται ο μέσος όρος των μη ελαττωματικών συσκευών. Ο μέσος όρος ανά ρολό είναι 48.6 συσκευές ο οποίος είναι πολύ κοντά σε σχέση με το δεύτερο σενάριο.

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	60
ΔΙΧΟΤΟΜΗΣΗ ΡΟΛΟΥ	60
ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	60
LAMINATION	55,2
ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ	54,14
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	53,08
ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΑΦΩΝ	50,76
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	48,6

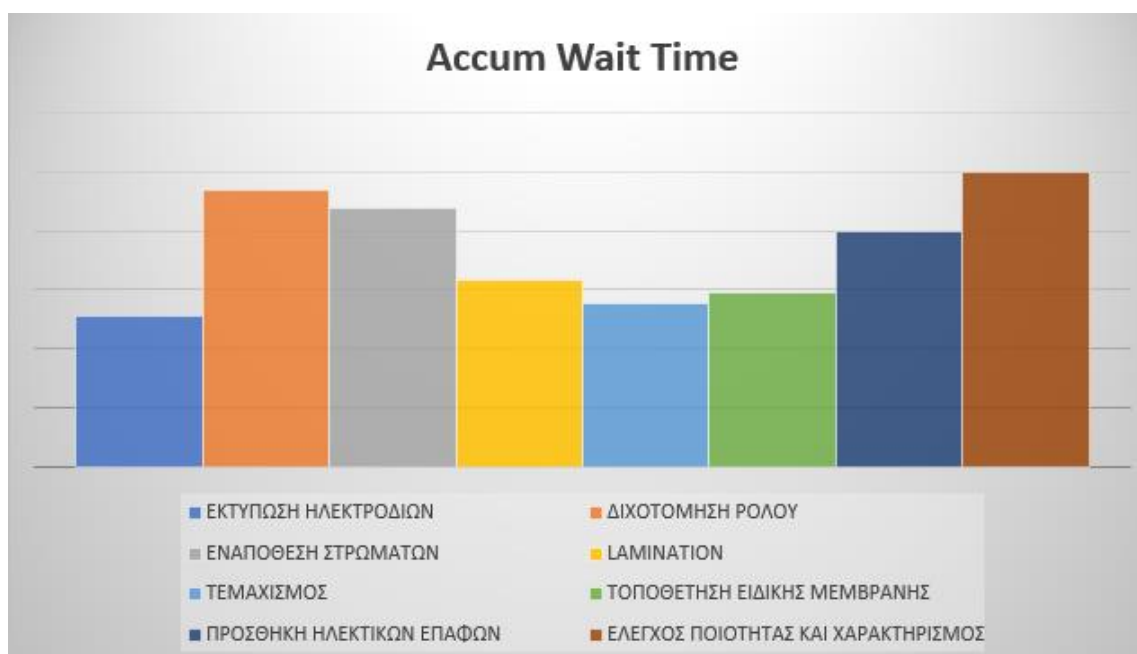
Εικόνα 56: Μέσος όρος συσκευών που εξήλθαν από τη γραμμή παραγωγής (τρίτο σενάριο)

Αμέσως μετά παρουσιάζεται ο συσσωρευμένος χρόνος προστιθέμενης αξίας κάθε κατεργασίας. Οι μόνες κατεργασίες οι οποίες δεν επηρεάστηκαν σε αυτή την περίπτωση είναι οι δύο πρώτες. Όλοι οι υπόλοιποι χρόνοι κατεργασίας των διαδικασιών έχουν μειωθεί για λίγα λεπτά σε σχέση με το αρχικό σενάριο.



Εικόνα 57: Συνολικοί χρόνοι κάθε κατεργασίας για όλο το πλήθος των συσκευών (τρίτο σενάριο)

Τέλος παρατίθεται και το διάγραμμα των συσσωρευμένων χρόνων αναμονής. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στην κατεργασία του lamination, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς η αμέσως προηγούμενη κατεργασία είναι η εναπόθεση στρωμάτων της οποίας ελαττώθηκε ο χρόνος κατεργασίας.



Εικόνα 58: Συνολικοί χρόνοι αναμονής στην ουρά κάθε κατεργασίας για όλες τις συσκευές (τρίτο σενάριο)

4.5. Σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων

Στην παράγραφο αυτή θα πραγματοποιηθεί η συγκριτική οικονομοτεχνική αξιολόγηση των 3 εναλλακτικών σεναρίων της παραγωγικής διαδικασίας τα οποία παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν προηγουμένως. Οι παράμετροι οι οποίοι θα συγκριθούν είναι οι εξής:

- Ο συνολικός συσσωρευμένος χρόνος προστιθέμενης αξίας (Accumulated Value-Added Time) που απαιτείται για την ολοκλήρωση όλων των κατεργασιών της γραμμής παραγωγής.
- Ο συνολικός συσσωρευμένος χρόνος αναμονής (Accumulated Wait Time) που παρατηρείται στις ουρές όλων των κατεργασιών.
- Ο συνολικός αριθμός των συσκευών που εξήχθησαν από το τέλος της παραγωγικής διαδικασίας.
- Τα οικονομικά δεδομένα που αφορούν τις δαπάνες που θα απαιτηθούν για την αναβάθμιση της εκάστοτε μηχανής, καθώς και την αποδοτικότητα που θα προσφέρουν στη γραμμή παραγωγής.

Ο σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι ο προσδιορισμός των θετικών και των αρνητικών παραγόντων που παρουσιάζει το κάθε σενάριο. Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει δυνατό να διαπιστωθεί ποιο από τα 3 σενάρια παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον προς υλοποίηση βάσει των οικονομικών και τεχνικών χαρακτηριστικών του για την εταιρεία της Epishine AB.

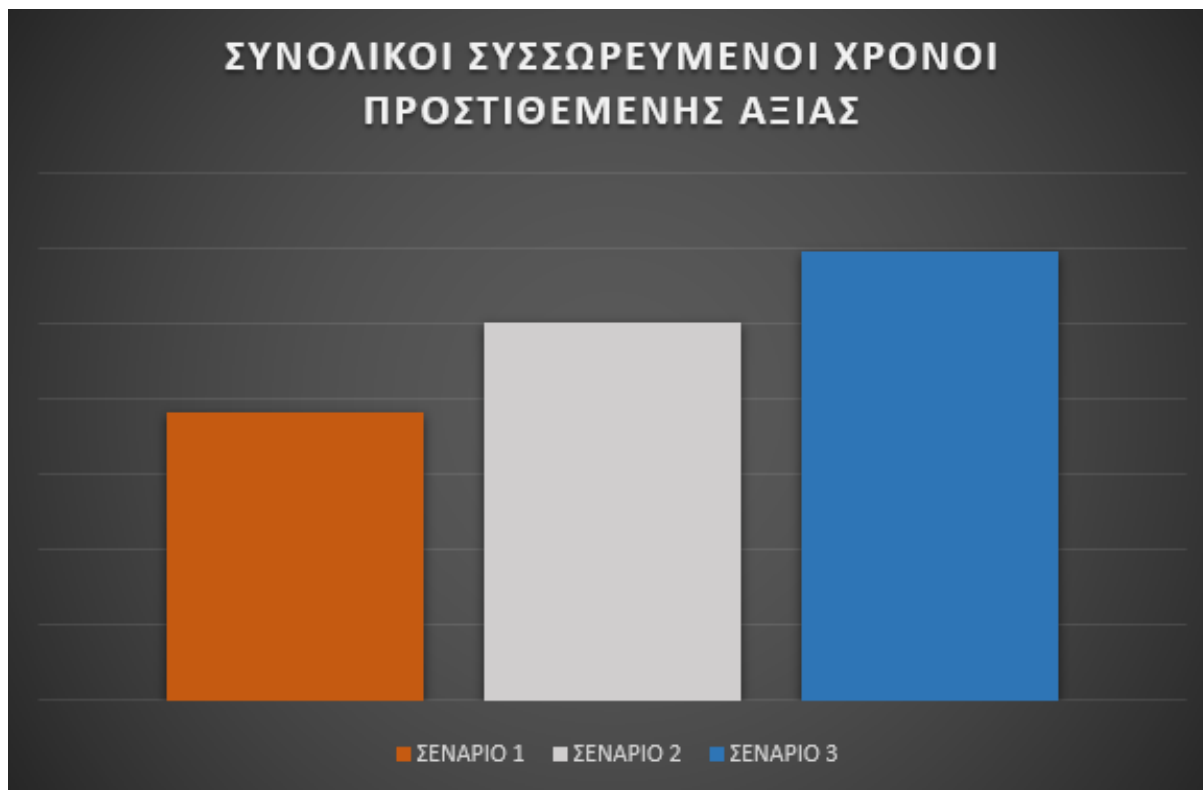
Αρχικά στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο αριθμός των συσκευών που εξήχθησαν από το τέλος της παραγωγικής διαδικασίας του κάθε σεναρίου. Όπως παρατηρείται οι διαφορές στον αριθμό των συσκευών είναι πολύ μικρές. Οι περισσότερες όμως συσκευές εξέρχονται στο τρίτο σενάριο, όπου πραγματοποιείται η αναβάθμιση της μηχανής της κατεργασίας εναπόθεσης στρωμάτων.

Πίνακας 4: Αριθμός εξερχομένων συσκευών ανά ρολό σε κάθε σενάριο

	1ο Σενάριο	2ο Σενάριο	3ο Σενάριο
Αριθμός Συσκευών	46.265	48.49	48.6

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι προστιθέμενης αξίας όλων των κατεργασιών. Το σενάριο το οποίο παρουσιάζει τον μικρότερο χρόνο είναι το πρώτο. Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς πραγματοποιούνται αναβαθμίσεις στις μηχανές δύο κατεργασιών της τοποθέτησης

ειδικής μεμβράνης και της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών. Το σενάριο στο οποίο παρατηρείται ο μεγαλύτερος χρόνος είναι το τρίτο καθώς η μείωση του χρόνου κατεργασίας που θα συμβεί από την αναβάθμιση της μηχανής στην διαδικασία της εναπόθεσης στρωμάτων είναι μόνο 25%.



Εικόνα 59: Συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι προστιθέμενης αξίας όλων των κατεργασιών του κάθε σεναρίου

Στη συνέχεια στο διάγραμμα των συνολικών συσσωρευμένων χρόνων αναμονής στις ουρές των κατεργασιών παρατηρείται ακριβώς η ίδια σειρά στους χρόνους όπως και προηγουμένως. Το πρώτο σενάριο και πάλι παρουσιάζει τον μικρότερο χρόνο.



Εικόνα 60: Συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι αναμονής

Όσον αναφορά τα οικονομικά δεδομένα των αναβαθμίσεων των μηχανών είναι εύκολο να διαπιστωθεί ποιο από τα τρία σενάρια αποτελεί το πιο δαπανηρό. Το σενάριο για το οποίο θα πρέπει να δοθούν οι περισσότεροι οικονομικοί πόροι είναι το πρώτο. Αυτό συμβαίνει διότι η υπόθεση αυτού του σεναρίου είναι να αναβαθμιστούν δύο μηχανές. Το κόστος αυτού του σεναρίου υπολογίζεται ότι θα είναι διπλάσιο συγκριτικά τόσο με το δεύτερο όσο και με το τρίτο. Οι αναβαθμίσεις των μηχανών του δεύτερου και του τρίτου σεναρίου αναμένεται να έχουν το ίδιο κόστος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που προέκυψαν από τις συγκρίσεις των τριών σεναρίων εξάγεται το εξής συμπέρασμα. Το σενάριο το οποίο θα πρέπει να επιλεγεί από την εταιρεία της Erishine είναι το δεύτερο, ακόμα και αν δεν παρουσιάζεται ως το καλύτερο σε καμία από τις παραπάνω συγκρίσεις. Τα στοιχεία τα οποία δικαιολογούν αυτή την επιλογή παρουσιάζονται στη συνέχεια. Όσον αναφορά τους συνολικούς συσσωρευμένους χρόνους προστιθέμενης αξίας και αναμονής το πρώτο σενάριο παρουσιάζεται ως το αποδοτικότερο. Συγχρόνως όμως αποτελεί και το πιο ακριβό σενάριο από τα τρία. Αυτομάτως το σενάριο αυτό απορρίπτεται καθώς το κόστος του θα είναι πολύ μεγάλο. Οπότε τα δύο σενάρια που προκρίνονται είναι το δεύτερο και το τρίτο. Αναφορικά με τον αριθμό των συσκευών που εξήχθησαν από το τέλος της γραμμής παραγωγής, στο τρίτο σενάριο εξάγονται οι περισσότερες. Σε σχέση όμως με το δεύτερο σενάριο αυτή η διαφορά θεωρείται αμελητέα. Το δεύτερο σενάριο όμως είναι πιο «γρήγορο» συγκριτικά με

το τρίτο, καθώς οι συνολικοί συσσωρευμένοι χρόνοι προστιθέμενης αξίας και αναμονής είναι μικρότεροι. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να είναι μικρότερο το κόστος παραγωγής καθώς θα απαιτούνται λιγότερες ώρες εργασίας. Επίσης αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της συνολικής παραγωγικότητας της γραμμής αφού θα μπορεί στον ίδιο χρόνο να κατεργαστεί περισσότερα ρολά και να παράγει περισσότερα τεμάχια. Αν γίνει αναγωγή και του ημερήσιου λειτουργικού κόστους ανά κομμάτι τότε αυτό κατανέμεται σε ακόμα περισσότερα προϊόντα.

Όσον αναφορά το χρονικό διάστημα που θα απαιτηθεί ώστε να αποσβεστούν οι οικονομικοί πόροι που θα δοθούν για την αναβάθμιση της μηχανής του δευτέρου σεναρίου είναι αδύνατον να υπολογιστεί. Αυτό οφείλεται στο ότι αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν σταθερά κέρδη από τις πωλήσεις. Όσες πωλήσεις έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής είναι σε πιλοτικό στάδιο.

4.6. Διαδικασία ελέγχου ποιότητας

Η παράγραφος αυτή αναφέρεται στο κομμάτι του ποιοτικού ελέγχου των πρώτων υλών, όπως είναι τα PET ρολά και τα διαλύματα, που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των τελικών προϊόντων.

- Σε πρώτη φάση περιγράφεται η μέθοδος η οποία εφαρμόστηκε στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις της εταιρείας για την παραγωγή κυψελίδων μικρής κλίμακας μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο έλεγχος ποιότητας των πρώτων υλών.
- Σε δεύτερη φάση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις μίας κυψελίδας μικρής κλίμακας μέσω του διαγράμματος της απόδοσης. Στην τελευταία φάση παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος που διενεργήθηκε σε παρτίδες παραγόμενων συσκευών.

4.6.1. Πρότυπη διαδικασία λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου 3.3 η παραγωγική διαδικασία ξεκινάει όταν καταφθάσουν στη γραμμή παραγωγής τα PET ρολά. Πριν όμως από την έναρξη της επεξεργασίας του κάθε ρολού λαμβάνει χώρα ένας ποιοτικός έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός αρχικά αφορά την ποιότητα του πολυμερούς υλικού των ρολών και κατά δεύτερον την ποιότητα των διαλυμάτων τα οποία θα επιστρωθούν σε αυτά. Ο έλεγχος ποιότητας διενεργείται μέσω της διαδικασίας του spin coating. Η τεχνική του spin coating αποτελεί εδώ και αρκετές δεκαετίες μία από τις ευρύτερα διαδεδομένες και κατάλληλες εργαστηριακές μεθόδους για την εναπόθεση οργανικών διαλυμάτων πάνω σε υποστρώματα με σκοπό το σχηματισμό λεπτών φιλμ. Όπως είναι λογικό ο έλεγχος ποιότητας δεν εφαρμόζεται σε όλο το μήκος του ρολού. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι κόβεται ένα μέρος από την αρχή του ρολού από το οποίο μέσω της τεχνικής του spin coating θα παραχθούν

κυψελίδες φωτός μικρής κλίμακας. Αμέσως μετά θα μετρηθεί η απόδοση των κυψελίδων αυτών με τη μέθοδο του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού. Μέσω του χαρακτηρισμού των κυψελίδων θα εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το αν η ποιότητα του υπόλοιπου ρολού και των διαλυμάτων είναι στο επιθυμητό επίπεδο ώστε να ξεκινήσει η παραγωγική διαδικασία.

4.6.2. Παραγωγή μονής κυψελίδας μικρής κλίμακας

Η τεχνική του spin coating αποτελείται από 3 στάδια. Το 1^ο είναι η εναπόθεση του διαλύματος πάνω στο υπόστρωμα. Το 2^ο στάδιο είναι η περιστροφή του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η εξάπλωση του διαλύματος σε όλο το υπόστρωμα. Το 3^ο και τελικό στάδιο είναι η ξήρανση του διαλύματος για την εξάλειψη περίσσειας μελανιού. Η μέθοδος του spin coating εκτελείται σε ειδικές μηχανές οι οποίες ονομάζονται spin coaters. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 61 αριστερά είναι η spin coater μηχανή με την βάση στήριξης της, η οποία περιέχει τον κινητήρα περιστροφής. Δεξιά είναι η μονάδα ελέγχου του κινητήρα περιστροφής με το πάνελ επικοινωνίας με τον εκάστοτε χρήστη.



Εικόνα 61: Απεικόνιση ενός spin coater (Hartikainen & Willman, 2019)

Τα δύο πρώτα στάδια της μεθόδου λαμβάνουν χώρα στη spin coater μηχανή, ενώ για το τρίτο χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα ξήρανσης όπου αφαιρείται ο διαλύτης τα οποία ονομάζονται hot plates.



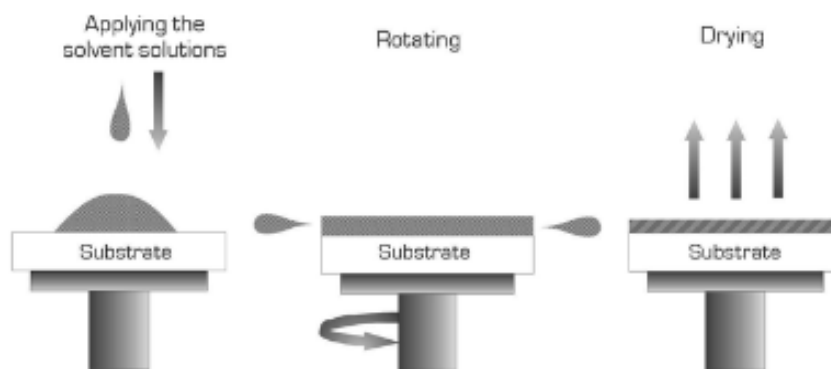
Εικόνα 62: Απεικόνιση ενός hot plate (Hartikainen & Willman, 2019)

Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που εκτελέστηκε στο εργαστήριο της Erishine για την παραγωγή των κυψελίδων μικρής κλίμακας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους προστασίας των δεδομένων της εταιρείας δεν αναφέρεται το όνομα του διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του spin coating.

Πρώτα απ' όλα πριν την έναρξη του 1^{ου} σταδίου το υπόστρωμα πρέπει να προσκολληθεί με σωστό τρόπο στο κέντρο του spin coater ώστε να όταν ξεκινήσει να περιστρέφεται να μην κουνηθεί καθόλου από τη θέση του. Η προσκόλληση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση κενού αέρος. Στη συνέχεια η εναπόθεση του διαλύματος πάνω στο υπόστρωμα επιτυγχάνεται μέσω μίας σύριγγας υπό συνεχή ροή. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι υπάρχουν δύο τρόποι ώστε να επιτευχθεί η εναπόθεση. Ο πρώτος είναι το υπόστρωμα να είναι ακίνητο. Αυτός ο τρόπος ονομάζεται στατική εναπόθεση. Ο δεύτερος τρόπος εκτελείται με το υπόστρωμα να περιστρέφεται με πολύ χαμηλή ταχύτητα, περίπου 500 rpm. Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται δυναμική εναπόθεση. Ο τρόπος που επιλέχτηκε κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης του διαλύματος είναι ο δεύτερος, καθώς μέσω της κίνησης του υποστρώματος προσφέρεται το πλεονέκτημα της καλύτερης διάδοσης του διαλύματος. Αυτό ενδεχομένως μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση διαλύματος, κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό διότι το κόστος των διαλυμάτων είναι αρκετά υψηλό.

Στο 2^ο στάδιο αρχικά προγραμματίζεται η ταχύτητα και ο χρόνος περιστροφής. Η ταχύτητα που επιλέχτηκε ήταν 3000 rpm και ο χρόνος 30 δευτερόλεπτα. Μέσω της περιστροφής το διάλυμα εξαπλώνεται σε όλο το μήκος και πλάτος του υποστρώματος. Όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα περιστροφής του υποστρώματος τόσο πιο μικρό θα είναι το πάχος του και τόσο πιο ομοιόμορφη η κατανομή του.

Τέλος στο 3^ο και τελευταίο στάδιο το υπόστρωμα τοποθετήθηκε πάνω στη επιφάνεια της μηχανής του hot plate για λίγα λεπτά ώστε να επιτευχθεί η ξήρανση (αφαίρεση του διαλύτη) του διαλύματος.



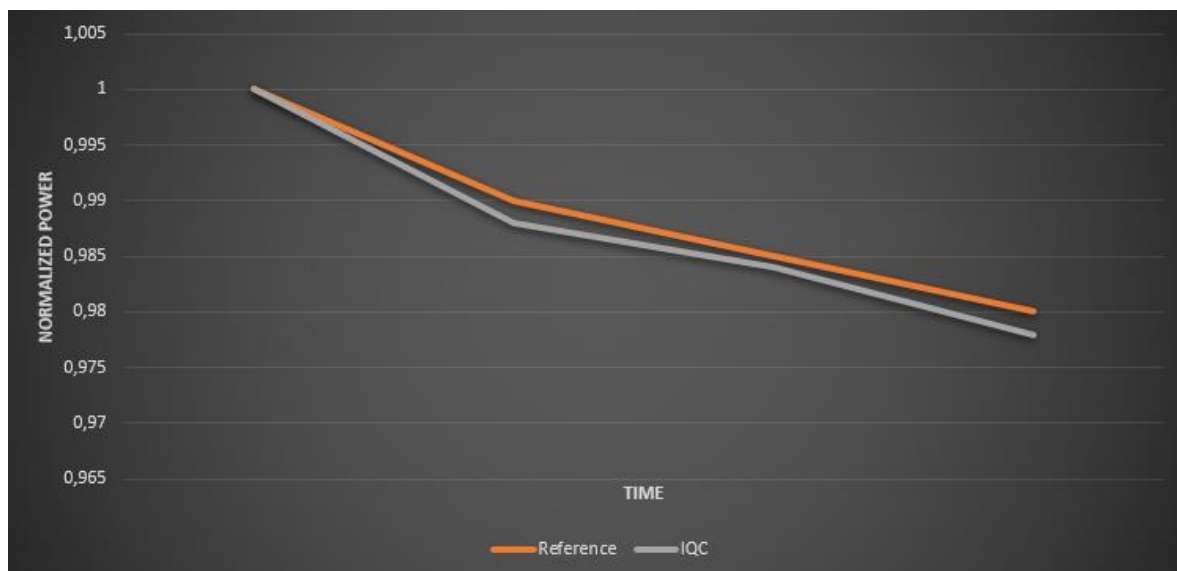
Εικόνα 63: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου του spin coating. Στην εικόνα φαίνονται τα 3 στάδια που εκτελέστηκαν για την παραγωγή της κυψελίδας φωτός μικρής κλίμακας (Φόρης, 2017)

Ένας από τους λόγους που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη τεχνική για την παραγωγή κυψελίδων μικρής κλίμακας είναι ότι αποτελεί μία εύκολη στο χειρισμό μέθοδο χωρίς την απαίτηση εγκατάστασης εξοπλισμού υψηλού κόστους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά της είναι ότι αναπαράγει τα αποτελέσματά της. Αυτό σημαίνει ότι το πάχος και η μορφολογία του διαλύματος πάνω στο υπόστρωμα θα είναι τις περισσότερες φορές ομοιόμορφα. Επιπλέον η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για τον ποιοτικό έλεγχο των πρώτων υλών, όπως είναι το ρολό του υποστρώματος και τα διαλύματα, διότι προσφέρει ταχύτατη παραγωγή πολλών δειγμάτων για ανάλυση και μελέτη σε μικρό χρονικό διάστημα. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Το μεγαλύτερο από αυτά είναι η σπατάλη μεγάλης ποσότητας πρώτης ύλης. Επίσης κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης και της περιστροφής του υποστρώματος υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθούν κάποιες ατέλειες. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να προκύψουν περιοχές με οπές ή φυσαλίδες και περιοχές οι οποίες δεν είναι καλυμμένες με το διάλυμα. Τέλος ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι συμβατή με συστήματα Roll-to-Roll, άρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βιομηχανικούς σκοπούς και παραγωγή μεγάλης κλίμακας οργανικών φωτοβολταϊκών.

4.6.3. Αποτελέσματα παραγωγής μονής κυψελίδας μικρής κλίμακας

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία η παραγωγή της κυψελίδας φωτός μέσω της κατεργασίας του spin coating αμέσως μετά ακολουθεί ο χαρακτηρισμός της. Η τεχνική που επιλέχτηκε ήταν ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός. Αρχικά η κυψελίδα συνδέθηκε μέσω των ηλεκτροδίων της με τις ηλεκτρικές επαφές μίας μονάδας ηλεκτρικών μετρήσεων, η οποία έχει τη δυνατότητα να μετράει πολύ χαμηλά ρεύματα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε έναν προσομοιωτή φωτός, όπου και καταγράφηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του ρεύματος και της τάσης (I-V) αλλά και η ισχύς της. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε ένα αδρανές περιβάλλον, ώστε οι ίδιες μετρήσεις να επαναληφθούν και τις επόμενες μέρες. Ο λόγος για τον οποίο τοποθετήθηκε η κυψελίδα στο αδρανές αυτό περιβάλλον είναι για να μην μειωθεί η απόδοση της κυψελίδας, ώστε και τις επόμενες μέρες που θα μετρηθεί ξανά να είναι

σε υψηλά επίπεδα συγκριτικά με την πρώτη μέτρηση. Επιπλέον εμποδίζει την εισχώρηση οξυγόνου και υγρασίας τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν μείωση στην απόδοσή της. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα το οποίο επιδεικνύει την ισχύ της κυψελίδα σε ένα διάστημα ημερών. Πιο συγκεκριμένα στο άξονα y παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη ισχύς ενώ στον άξονα x είναι ο χρόνος.



Εικόνα 64: Διάγραμμα απόδοσης της κυψελίδας

Αρχικά η γκρι γραμμή απεικονίζει την ισχύ της κυψελίδας η οποία παράχθηκε ως μέρος του ποιοτικού ελέγχου χρησιμοποιώντας καινούργια διαλύματα, τα οποία βρίσκονταν υπό αξιολόγηση. Η πορτοκαλί γραμμή απεικονίζει την ισχύ μίας άλλης κυψελίδας η οποία δημιουργήθηκε με τη χρήση διαλυμάτων αναφοράς. Ως διαλύματα αναφοράς ορίζονται τα διαλύματα των οποίων οι αποδόσεις και οι ιδιότητες είναι ήδη γνωστές και μετρημένες.

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα όσο περνάει ο χρόνος η ισχύς της κυψελίδας σιγά σιγά φθίνει. Είναι όμως πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι η διαφορά στην ισχύ την πρώτη μέρα σε σχέση με την τελευταία είναι πολύ μικρή, καθώς από το 1 έχει βρεθεί λίγο κάτω από το 0.98. Επιπλέον πολύ μικρή είναι και η απόκλιση από την κυψελίδα αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι τα διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι σχεδόν στο ίδιο επίπεδο με τα διαλύματα αναφοράς, συνεπώς υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν κατά την παραγωγική διαδικασία.

4.6.4. Στατιστικός έλεγχος συσκευών

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί η μελέτη που διενεργήθηκε σε παρτίδες παραγόμενων συσκευών, ώστε να διαπιστωθεί αν η παραγωγική διαδικασία αυτών βρίσκεται εντός ή εκτός στατιστικού ελέγχου. Η μελέτη αυτή

πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης των διαγραμμάτων ελέγχου που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.4. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία βασικά είδη των διαγραμμάτων ελέγχου.

Πριν πραγματοποιηθεί η παρουσίαση των 3 διαγραμμάτων ελέγχου είναι αναγκαίο να γίνει μία αναφορά στα στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής. Αρχικά η μελέτη αυτή αφορά 12 παρτίδες συσκευών. Κάθε παρτίδα αποτελείται από 60 συσκευές. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος του δείγματος n , ισούται με 60. Επιπλέον για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής είναι αναγκαίο να υπολογιστεί και το ποσοστό p των ελαττωματικών μονάδων σε κάθε παρτίδα. Μία συσκευή θεωρείται ελαττωματική όταν η ισχύς της είναι κάτω από το επιθυμητό επίπεδο, το οποίο έχει οριστεί από τους σχεδιαστές του προϊόντος. Στον παρακάτω πίνακα στην πρώτη στήλη παρουσιάζονται οι παρτίδες των συσκευών. Στη δεύτερη στήλη ο αριθμός των ελαττωματικών συσκευών ανά παρτίδα. Τέλος στην τρίτη στήλη είναι το ποσοστό των ελαττωματικών συσκευών ανά παρτίδα.

Πίνακας 5: Πίνακας αριθμού και ποσοστού ελαττωματικών κυψελίδων

Παρτίδες	Αριθμός Ελαττωματικών Κυψελίδων	Ποσοστό Ελαττωματικών Κυψελίδων
1η	12	0.2
2η	9	0.15
3η	6	0.1
4η	15	0.25
5η	6	0.1
6η	13	0.22
7η	16	0.27
8η	6	0.1
9η	12	0.2
10η	8	0.14
11η	10	0.17
12η	12	0.2

Από την τρίτη στήλη του παραπάνω πίνακα υπολογίζεται το μέσο ποσοστό των ελαττωματικών συσκευών p_o . Ο τύπος που χρησιμοποιείται για αυτόν τον υπολογισμό είναι το άθροισμα όλων των ποσοστών των ελαττωματικών μονάδων προς τον αριθμό των παρτίδων.

$$p_o = \frac{\text{Άθροισμα ποσοστών ελαττωματικών μονάδων}}{\text{Συνολικός αριθμός παρτίδων}}.$$

Άρα το μέσο ποσοστό των ελαττωματικών συσκευών ισούται με $p_o = 0.1725$. Το ποσοστό αυτό θα χρησιμοποιηθεί στα διαγράμματα ελέγχου ποσοστού και αριθμού ελαττωματικών.

Για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής του διαγράμματος ελέγχου ελαττωμάτων πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η παράμετρος c . Η παράμετρος αυτή ισούται με το πηλίκο του συνολικού αθροίσματος των ελαττωματικών μονάδων προς τον αριθμό των παρτίδων.

$$c = \frac{\text{Άθροισμα ελαττωματικών μονάδων}}{\text{Συνολικός αριθμός παρτίδων}}$$

Οπότε η παράμετρος ισούται με $c = 10.42$. Αμέσως μετά ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων ελέγχου 3 τυπικών αποκλίσεων, δηλαδή $L = 3$.

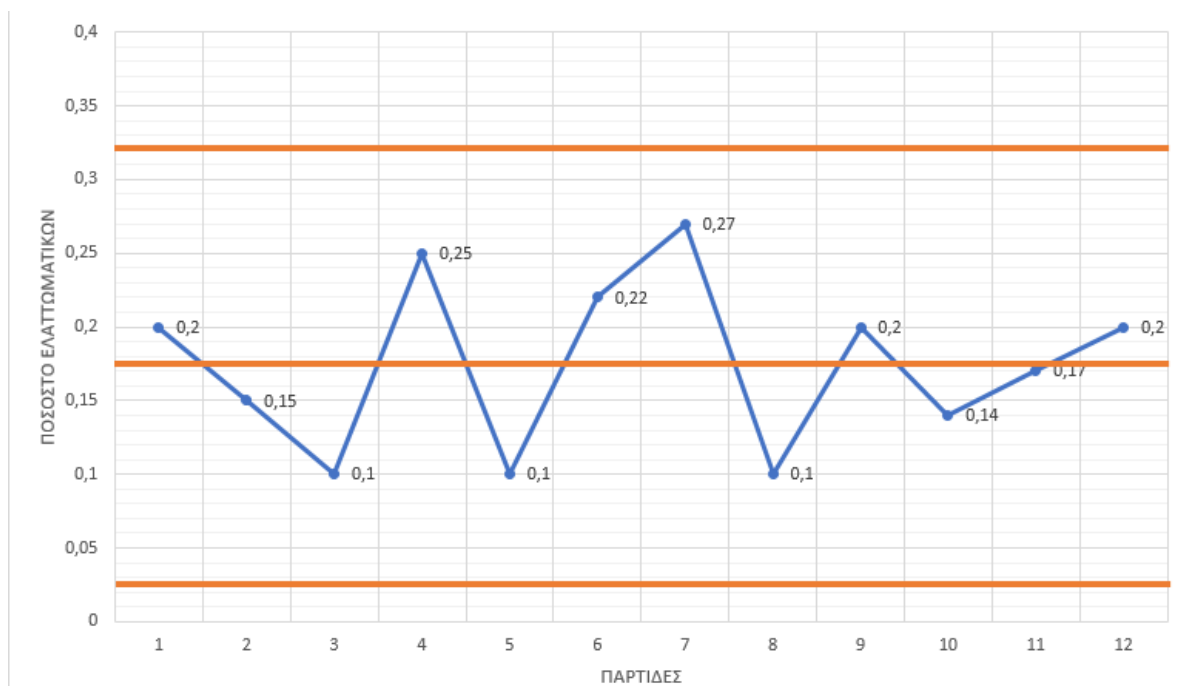
Διάγραμμα Ελέγχου Ποσοστού Ελαττωματικών

Σε αυτό το διάγραμμα η Κεντρική Γραμμή ισούται με το μέσο ποσοστό ελαττωματικών που υπολογίστηκε παραπάνω, οπότε $KΓ = p_o = 0.1725$. Το Άνω και το Κάτω όριο ελέγχου υπολογίστηκαν από τους παρακάτω τύπους:

$$AOE = 0.1725 + 3 * \sqrt{\frac{0.1725(1-0.1725)}{60}} = 0.32$$

$$KOE = 0.1725 - 3 * \sqrt{\frac{0.1725(1-0.1725)}{60}} = 0.025$$

Εφόσον υπολογίστηκαν οι παραπάνω παράμετροι στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου ποσοστού ελαττωματικών.



Εικόνα 65: Διάγραμμα ελέγχου ποσοστού ελαττωματικών

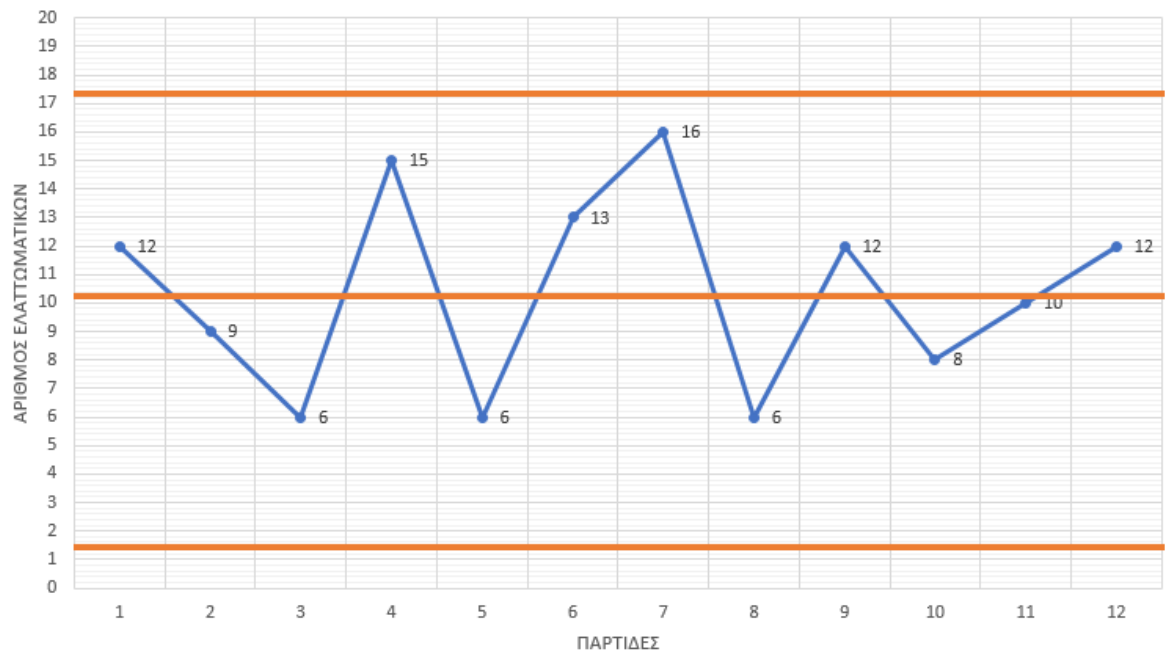
Διάγραμμα Ελέγχου Αριθμού Ελαττωματικών

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ελέγχου η Κεντρική Γραμμή ισούται με το γινόμενο του μέσου ποσοστού των ελαττωματικών μονάδων με το μέγεθος δείγματος n . Οπότε $KΓ = n * p = 60 * 0.1725 = 10.35$. Το Άνω και το Κάτω όριο ελέγχου υπολογίστηκαν από τους παρακάτω τύπους:

$$AOE = 60 * 0.1725 + 3 * \sqrt{10.35 * 60 * (1 - 0.1725)} = 19.13$$

$$KOE = 60 * 0.1725 - 3 * \sqrt{10.35 * 60 * (1 - 0.1725)} = 1.56$$

Αμέσως μετά γίνεται η παρουσίαση του διαγράμματος ελέγχου αριθμού ελαττωματικών.



Εικόνα 66: Διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωματικών

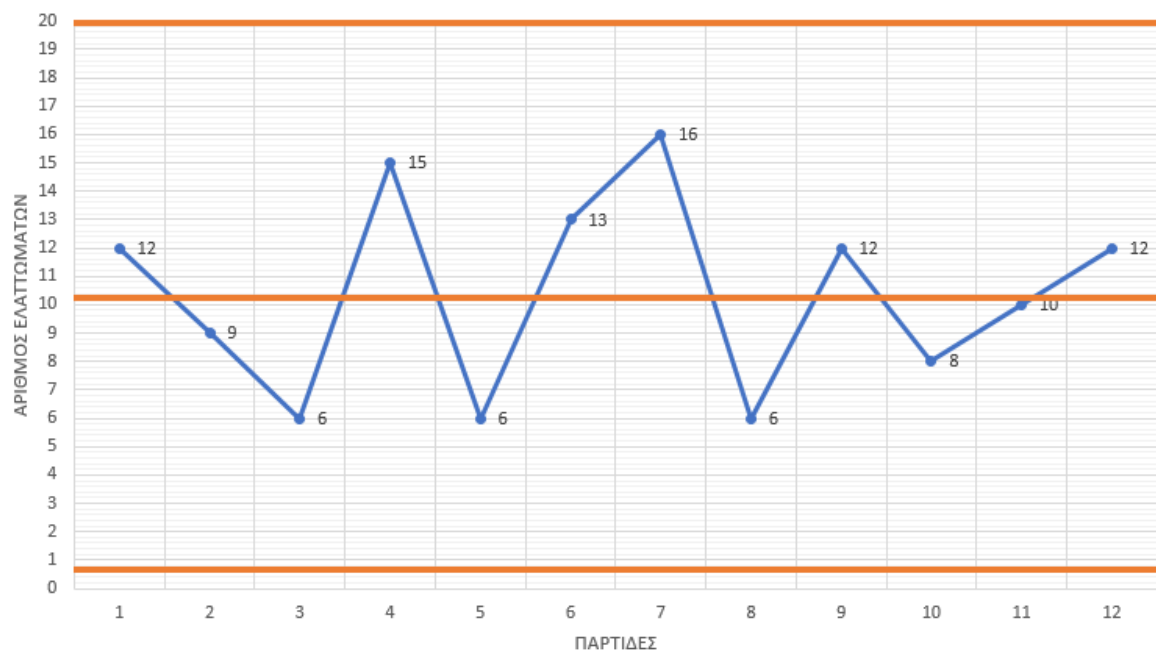
Διάγραμμα Ελέγχου Αριθμού Ελαττωμάτων

Στο διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωμάτων η Κεντρική Γραμμή ισούται με την παράμετρο c , άρα $KΓ = c = 10.42$. Για τον υπολογισμό του Άνω και του Κάτω ορίου ελέγχου οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

$$AOE = c + 3 * \sqrt{c} = 20.1$$

$$KOE = c - 3 * \sqrt{c} = 0.75$$

Το διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωμάτων παρουσιάζεται αμέσως μετά.



Εικόνα 67: Διάγραμμα ελέγχου αριθμού ελαττωμάτων

Το συμπέρασμα που εξάγεται μετά την κατασκευή και των τριών διαγραμμάτων ελέγχου είναι ότι κανένα σημείο δεν βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγική διαδικασία των συσκευών βρίσκεται εντός στατιστικού ελέγχου και στα 3 διαγράμματα. Συνεπώς η παραγωγική διαδικασία είναι αξιόπιστη και δεν απαιτούνται σημαντικές μετατροπές που να σχετίζονται με την ποιότητα της.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

5.1. Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση αποδοτικότητας και ο ποιοτικός έλεγχος της γραμμής παραγωγής οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελίδων εσωτερικού χώρου της εταιρείας Epishine AB. Αρχικά για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη, περιγράφηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Arena Rockwell και τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της γραμμής παραγωγής. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η θεωρία του στατιστικού ελέγχου ποιότητας καθώς και τα διαγράμματα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών διαπιστώθηκε ότι η παραγωγική διαδικασία των οργανικών κυψελίδων είναι εντός στατιστικού ελέγχου. Ακολούθως έγινε η παρουσίαση της εταιρείας καθώς και των προϊόντων που παράγει. Αμέσως μετά παρουσιάστηκε η γραμμή παραγωγής και οι κατεργασίες που την απαρτίζουν. Στη συνέχεια περιγράφηκε ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε η γραμμή παραγωγής στο λογισμικό Arena, ενώ καταγράφηκαν οι χρόνοι επεξεργασίας και τα ποσοστά των μη ελαττωματικών συσκευών μετά το πέρας της κάθε κατεργασίας. Είναι πολύ σημαντικό να ειπωθεί ότι, τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της γραμμής παραγωγής στο περιβάλλον του Arena είναι πολύ κοντά σε σχέση με την πραγματικότητα όπως προέκυψε από τη διαδικασία επικύρωσης του μοντέλου μέσω προσομοιώσεων. Έπειτα, έγινε η καταγραφή και η ανάλυση των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τον τρόπο που λειτουργεί αυτή τη στιγμή η παραγωγική διαδικασία του εργαστηρίου. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση και η σύγκριση τριών εναλλακτικών σεναρίων που έχουν ως σκοπό τη βελτίωση και την αύξηση της παραγωγικής δυνατότητας της γραμμής παραγωγής μέσω της αναβάθμισης συγκεκριμένων μηχανών. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η μέθοδος μέσω της οποίας παράχθηκαν κυψελίδες μικρής κλίμακας για τον ποιοτικό έλεγχο των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των τελικών συσκευών. Τέλος παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή στατιστικού ελέγχου ποιότητας σε 12 παρτίδες τελειοποιημένων συσκευών.

5.2. Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκαν τέσσερα σενάρια για τη γραμμή παραγωγής της Epishine. Το αρχικό σενάριο ουσιαστικά περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί αυτή τη στιγμή η παραγωγική διαδικασία. Τα υπόλοιπα τρία εναλλακτικά σενάρια αφορούν αλλαγές οι οποίες θα συνεισφέρουν στην αναβάθμιση της γραμμής παραγωγής. Στο πρώτο σενάριο πραγματοποιούνται αναβαθμίσεις σε δύο μηχανές στις κατεργασίες του τεμαχισμού και της τοποθέτησης ειδικής μεμβράνης. Το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει το

μικρότερο χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας, όμως είναι και το πιο ασύμφορο συγκριτικά με τα άλλα δύο καθώς το κόστος αναβάθμισης των δύο μηχανών είναι διπλάσιο. Στο δεύτερο σενάριο αναβαθμίζεται η μηχανή της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών. Στο σενάριο αυτό ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η παραγωγική διαδικασία είναι μεγαλύτερος από του πρώτου. Επιπλέον συγκριτικά με το πρώτο σενάριο το κόστος αναβάθμισης του μηχανήματος είναι το μισό. Όπως και στο δεύτερο σενάριο έτσι και στο τρίτο αναβαθμίσεις πραγματοποιούνται μόνο σε μία μηχανή. Η μηχανή αυτή είναι της κατεργασίας της εναπόθεσης στρωμάτων. Το σενάριο αυτό είναι το πιο «αργό» συγκριτικά με τα άλλα δύο, καθώς παρουσιάζει το μεγαλύτερο χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας.

5.3. Προτάσεις

Από τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των τριών εναλλακτικών σεναρίων αυτό το οποίο προτείνεται προς την εταιρεία είναι το δεύτερο. Να πραγματοποιηθεί δηλαδή αναβάθμιση στη μηχανή της κατεργασίας της προσθήκης ηλεκτρικών επαφών. Οι παράμετροι που συγκρίθηκαν ώστε να αποφασιστεί ποιο από τα τρία σενάρια θα προταθεί στην εταιρεία ήταν δύο. Η πρώτη παράμετρος αφορούσε το οικονομικό σκέλος, όπου σε αυτή την περίπτωση το δεύτερο και το τρίτο σενάριο έχουν προβάδισμα έναντι του πρώτου το οποίο θα στοιχίσει το διπλάσιο ποσό στην εταιρεία. Η δεύτερη παράμετρος αφορούσε τους συνολικούς συσσωρευμένους χρόνους προστιθέμενης αξίας, όπου σε αυτή την περίπτωση το μικρότερο χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας τον παρουσίασε το πρώτο σενάριο. Συναρτήσε όμως αυτών των δύο παραμέτρων το αποδοτικότερο σενάριο είναι το δεύτερο καθώς είναι οικονομικότερο συγκριτικά με το πρώτο, ενώ και ο συνολικός συσσωρευμένος χρόνος προστιθέμενης αξίας που παρουσίασε μέσω του Arena είναι μικρότερος συγκριτικά με το τρίτο. Γι' αυτό το λόγο το δεύτερο σενάριο αποφασίστηκε να προταθεί στην εταιρεία της Epishine.

5.4. Επεκτάσεις διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μπορεί να αποτελέσει τη βάση ώστε να επεκταθεί η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη γραμμή παραγωγής της Epishine AB. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η εταιρεία της Epishine θα βρίσκεται σε θέση να παραχωρήσει περισσότερα στοιχεία που θα αφορούν της παραγωγική διαδικασία. Ένα από αυτά τα στοιχεία θα μπορούσε να είναι το κόστος των πρώτων υλών που απαιτείται για την παραγωγή των οργανικών φωτοβολταϊκών συσκευών. Επιπλέον ένα άλλο στοιχείο θα μπορούσε να είναι το κόστος εργασίας που

απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας. Αμέσως μετά παρουσιάζονται ορισμένα επόμενα βήματα της συγκεκριμένης μελέτης:

- Μελέτη εναλλακτικών σεναρίων που αφορούν αναβαθμίσεις σε μηχανές άλλων κατεργασιών.
- Μελέτη και αξιολόγηση της γραμμής παραγωγής με την εισαγωγή μηχανών τελευταίας τεχνολογίας.
- Αξιολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας στην οποία θα περιλαμβάνονται το κόστος εργασίας καθώς και οι δαπάνες που απαιτούνται για τις πρώτες ύλες.
- Πολυκριτήρια αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων με χρήση περισσότερων παραμέτρων προς βελτιστοποίηση.
- Σενάριο που θα συνδυάζει παρεμβάσεις σε συνδυασμούς μηχανών που έχουν μελετηθεί στα πλαίσια της εργασίας.
- Αναλυτική τεχνοοικονομική μελέτη που θα αφορά τις αποσβέσεις του εξοπλισμού που ενδέχεται να αποκτηθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Epishine. (2021, February 2). *Epishine*. Ανάκτηση March 1, 2021, από Epishine Web site: <https://www.epishine.com/product-release>
- Epishine. (2021, February 2). *Epishine*. Ανάκτηση March 1, 2021, από Epishine Web Site: <https://www.epishine.com/product>
- Europa. (2020, August 12). *Europa*. Ανάκτηση February 5, 2021, από Europa Web Site: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- Harrington, R. (2015, September 29). *Business Insider*. Ανάκτηση April 27, 2020, από Business Insider web site: <https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9?r=US&IR=T>
- Hartikainen, H., & Willman, A. (2019). *Using conventional manufacturing methods for industrialising the production at a start-up company*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Karzazi, Y., & Arbouch, I. (2014). *Inorganic photovoltaic cells: Operating principles, technologies and efficiencies*. University of Mohammed Premier, National School of Engineering and Applied Sciences Faculty of Sciences, Morocco.
- Nrel. (2017, April 14). *Nrel*. Ανάκτηση May 15, 2020, από Nrel Web Site: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Omni-cnc. (2019, February 14). *Omni-cnc*. Ανάκτηση January 25, 2021, από Omni-cnc Web Site: <https://www.omni-cnc.com/knife-cutting-machines-for-different-industrial-applications/>
- Oviedo, F., Shijing, S., Layurova, M., Buscemi, A. M., Ren, Z. D., Ogunfunmi, T., . . . Peters, I. M. (2019, June 19). Accelerated Development of Perovskite-Inspired Materials via High-Throughput Synthesis and Machine-Learning Diagnosis. *Joule*, 1417-1420.
- Patil, B. R. (2014). *Upscalable ITO free organic solar cells based on non transparent and semi transparent electrodes*. Technische Universität Chemnitz, Chemnitz.
- Planete-energies. (2019, April 8). *Planete-energies*. Ανάκτηση May 10, 2020, από Planete-energies Web Site: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/how-does-photovoltaic-cell-work>
- Scrapbook. (2020, January 17). *Scrapbook*. Ανάκτηση January 31, 2021, από Scrapbook Web Site: <https://www.scrapbook.com/articles/die-cutting>
- Seners. (2018, February 17). *Seners*. Ανάκτηση January 28, 2021, από Seners Web Site: <https://www.seners.gr>
- Søndergaard, R., Hösel, M., Angmo, D., & Krebs, F. C. (2012). *Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells*. Technical University of Denmark, Department of Energy Conversion and Storage, København.
- Wikipedia. (2014, October 16). *Wikipedia*. Ανάκτηση December 5, 2020, από Wikipedia Web Site: <https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction>

- Wikipedia. (2015, August 5). *Wikipedia*. Ανάκτηση January 30, 2021, από Wikipedia Web Site: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cutting
- Wikipedia. (2018, February 7). *Wikipedia*. Ανάκτηση May 5, 2020, από Wikipedia Web Site: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy
- Wikipedia. (2021, January 7). *Wikipedia*. Ανάκτηση May 8, 2020, από Wikipedia Web Site: https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect
- Αθανασίου, Σ., & Μαραβέγιας, Σ. (2015). *Τεχνική οικονομική μελέτη εφαρμογής διάφανων φωτοβολταϊκών παραθύρων απόδοσης 5% στην εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Τεχνολογικών Εφαρμογών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε, Πάτρα.
- Αντζουλάκος, Δ. (2009). *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*. Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- Απαζίδης, Ε. (2017). *Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV): Διερεύνηση των δυνατοτήτων μαζικής παραγωγής με τεχνολογίες και μεθόδους εκτύπωσης R2R (Roll-to-roll)*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Εφαρμοσμένων Τεχνών, Αθήνα.
- Βασιούλας, Χ. (2012). *Ποιοτικός έλεγχος και συστήματα διασφάλισης ποιότητας στον πρωτογενή τομέα*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Διοίκησης και Οικονομίας Τμήμα Εμπορίας και Διαφήμισης, Ιεράπετρα.
- Βροντάκης, Κ. (2015). *Αξιολόγηση Αποδοτικότητας και Μελέτη Λειτουργίας Μονάδας Επεξεργασίας Δέρματος*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά.
- Δούδης, Ε. (2017). *Μελέτη αποδόσεων οργανικών ηλιακών κελιών εκτυπωμένων με Roll to Roll διεργασία για εφαρμογές σε Φωτοβολταϊκές διατάξεις*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη.
- Κονταξάκη, Σ. (2015). *Στατιστικός Ποιοτικός Έλεγχος Επιχειρήσεων*. Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων. Πάτρα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας.
- Κουϊκόγλου, Β. Σ. (2010). *Έλεγχος Ποιότητας*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά.
- Κούτουλα, Σ. (2017). *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας και Εφαρμογές*. Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων. Αθήνα: Α.Ε.Ι Πειραιά.
- Μιχαλιέρης, Β. (2012). *Οικονομική αξιολόγηση των Απλών Δειγματοληπτικών Σχημάτων ελέγχου αποδοχής με διαλογή που προτείνει το πρότυπο ISO 2859:2006 για τη διασφάλιση ποιότητας ειδών από προμήθειες της εταιρίας CRYSTAL A.E*. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μπαρλαγιάννης, Α. (2014). *Οργανικές Ηλιακές Κυψελίδες*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα.
- Μπιτζένης, Δ., & Απέργη, Ό. (1999). *Τεχνολογία των εκτυπώσεων*. Αθήνα: Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων «Διόφαντος». Ανάκτηση από Bizdim Web Site.

- Παπαμιχαήλ, Ε. (2019). *Το Συνθετικό Διάγραμμα Ελέγχου για την Περίπτωση της Μηδενοδοιογκωμένης Διωνυμικής Κατανομής*. Τμήμα Στατιστικής και Αναλογιστικών –Χρηματοοικονομικών Μαθηματικών. Χίος : Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Παπουτσής, Ι. (2014). *Εκτύπωση οργανικών νανοστρωμάτων σε εύκαμπτα πολυμερικά υποστρώματα για οργανικά φωτοβολταϊκά με τεχνικές printing και χαρακτηρισμός*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη. Ανάκτηση από ossila.
- Πλευριτάκης, Γ. (2019, August 10). *Learnelectronics*. Ανάκτηση June 21, 2020, από Learnelectronics Web Site: <https://learnelectronics.gr/%CE%B7-%CE%B4%CE%AF%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82/>
- Σεϊτανίδου, Μ. (2013). *Ανάπτυξη Λεπτών Υμενίων και Οργανικών Φωτοβολταϊκών Διατάξεων με υγρές τεχνικές και χαρακτηρισμός της επιφανειακής τους μορφολογίας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Νανοεπιστήμες & Νανοτεχνολογίες", Θεσσαλονίκη.
- Τζαγκαράκη, Α. Μ. (2017). *Σύγχρονες εκτυπώσεις με εκτυπωτική πλάκα: Ανάλυση και παρουσίαση*. Ανοιχτό Ελληνικό Πανεπιστήμιο, Εφαρμοσμένων Τεχνών, Ηράκλειο.
- Τσιμικλή, Σ. (2016). *Ανάπτυξη Υμενίων Υψηλού Φραγμού για Ενθυλάκωση Οργανικών Φωτοβολταϊκών Διατάξεων & Έλεγχος τους στην Απόδοση των ΟΦΒ*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Νανοεπιστήμες & Νανοτεχνολογίες", Θεσσαλονίκη.
- Φόρης, Β. (2017). *Οπτικός Χαρακτηρισμός οργανικών (OVPD) και ανόργανων (VTE) λεπτών υμενίων με Φασματοσκοπική Ελλειφομετρία*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη.
- Χαρίτος, Η. Δ. (2018). *Ανασκόπηση των Διαφανών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα.