



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία

***Μοντελοποίηση και σχεδιασμός στοιχείων μηχανών
και συστημάτων μετάδοσης κίνησης με χρήση
Συναπτικών Δικτύων***

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΥΡΙΚΑΣ

Επιβλέπων: Επίκουρος καθηγητής Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2015

Περιεχόμενα

1. Περιεχόμενα
2. Ευχαριστίες
3. Περίληψη
4. Abstract
5. Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή - Στόχοι
6. Κεφάλαιο 2: Θεωρία Συναπτικών Δικτύων
 - a. State-of-the-Art μεθοδολογίες σχεδιασμού
 - b. Μοντελοποίηση των Ιδεών
 - c. Γραφική απεικόνιση
 - d. Σχηματικές πράξεις μεταξύ ιδεών
 - e. OCG κατηγοριοποίηση
 - f. Τα Συναπτικά Δίκτυα ενσωματωμένα σε PLM περιβάλλοντα
7. Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές Συναπτικών Δικτύων
 - a. Φθορά κοπτικών δίσκων μετροπόντικα
 - i. Εισαγωγή
 - ii. Συναρτήσεις γήρανσης
 1. Απώλεια υλικού λόγω τριβολογικής φθοράς
 2. Ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης και ξαφνική θραύση
 - iii. Ενδογενείς συναρτήσεις του συστήματος
 1. Η γεωμετρία του κοπτικού δίσκου
 2. Κινηματική και δυναμική ανάλυση της κοπής
 - iv. Σχεδιαστικοί στόχοι
 - v. Συνολικό Συναπτικό Δίκτυο
 1. Ένωση των υπο-δικτύων
 2. Επίλυση του Συναπτικού Δικτύου
 - vi. Συμπεράσματα
 - b. Φθορά οδόντων κιβωτίου ελικοπτέρου
 - i. Εισαγωγή
 - ii. Σχεδιαστική Άλγεβρα
 1. Συναπτικά Δίκτυα
 2. Ανάλυση OCG
 - iii. Ταυτότητα του συστήματος: Μελέτη του κιβωτίου ενός ελικοπτέρου
 - iv. Ονομαστικά μοντέλα λειτουργίας και θεμελιώδη στοιχεία Συναπτικών Δικτύων
 1. Ανάλυση επαφής οδόντων (γεωμετρία και κινηματική ανάλυση)
 2. Δυναμική ανάλυση

- v. Μοντέλα γήρανσης, ζεύξη των μοντέλων γήρανσης και υλοποίηση του θεμελιώδους Συναπτικού Δικτύου
 - 1. Γήρανση λόγω αποβολής υλικού (Φθορά τύπου scoring/scuffing)
 - 2. Γήρανση λόγω ρωγμάτωσης (Κόπωση)
- vi. Το συνολικό Συναπτικό Δίκτυο
 - 1. Ένωση των υπο-δικτύων: Σύνθεση και Έλεγχος
 - 2. Ανάλυση του Συναπτικού Δικτύου: Απόσπαση του μαθηματικού μοντέλου
 - 3. Διαμόρφωση του Συναπτικού Δικτύου - Ευελιξία του μοντέλου
- vii. Συμπεράσματα
- c. Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη χρήση των ανοχών
 - i. Εισαγωγή
 - ii. Σχεδιαστικές Θεωρίες για το assembly και πρότυπα για τις ανοχές
 - iii. Σύγχρονα λογισμικά για το assembly και τις ανοχές
 - iv. Αλγόριθμος για Design-for-Part-tolerancing
 - 1. SolidWorks DimXpert και TolAnalyst
 - 2. Ερωτήματα και Πειράματα στο SolidWorks
 - 3. Τα Συναπτικά Δίκτυα στην πορεία του αλγορίθμου
 - 4. Πορεία του αλγορίθμου για την ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο εξαρτήματος
 - 5. Συναπτικά Δίκτυα στον αλγόριθμο για το part tolerancing
 - v. Αλγόριθμος για Design-for-Assembly-tolerancing
 - 1. Συναπτικά Δίκτυα στον αλγόριθμο για το part tolerancing
 - 2. Πορεία του αλγορίθμου για την ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο συναρμολογήματος (Functional Assembly)
 - 3. Μήτρα χύτευσης υπό πίεση
 - 4. Εφαρμογή του Functional Assembly στη συναρμολόγηση της μήτρας
- 8. Κεφάλαιο 4: Γενικά Συμπεράσματα
 - a. Συμπεράσματα για τα Συναπτικά Δίκτυα
 - b. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα
- 9. Βιβλιογραφία

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βασίλειο Σπιτά για την αμέριστη βοήθειά του, καθώς και τον καθηγητή κ. Χρίστο Σπιτά για τον κομβικό του ρόλο στις κατά καιρούς εξελίξεις και για την προσοδοφόρα συνεργασία μας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω και όλους αυτούς που με βοήθησαν ο καθένας με τον τρόπο του, συνεργάτες του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών, ή μη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ξεκινώντας από γενικά προβλήματα που παρουσιάζει το State-of-the-art των σχεδιαστικών μεθόδων αναλύεται και μοντελοποιείται, στην αρχή η έννοια της ιδέας στα διάφορα συστήματα σε ένα πολύ αρχικό και γενικευμένο επίπεδο. Αργότερα εισάγεται η έννοια των *Συναπτικών Δικτύων* (Synaptic Networks - SN) και ορίζεται ο τρόπος απεικόνισής τους, καθώς και διάφορες λειτουργίες που επιτρέπονται στο επίπεδο της απεικόνισης και μεταφράζουν λειτουργικές αλλαγές στο σύστημα. Αργότερα, ορίζεται η μοναδική κατηγοριοποίηση στα πλαίσια των SN (OCG κατηγοριοποίηση) κι έτσι προτείνεται η ενσωμάτωση των SN στα σύγχρονα CAD και κατ' επέκταση PLM περιβάλλοντα. Έπειτα, τα SN εφαρμόζονται σε τέσσερα σχεδιαστικά προβλήματα (case studies) οπότε και αναλύονται αυτά παρακάτω. Στο πρώτο, που αφορά στη φθορά των κοπτικών δίσκων του μετροπόντικα, γίνεται εκτενής ανάλυση των μηχανισμών της φθοράς και των συναρτήσεων γήρανσης, ενώ μέσω της κινηματικής και δυναμικής ανάλυσης, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία των κοπτικών δίσκων, παράγονται οι κύριες συναρτήσεις της κατασκευής. Τίθενται ο σχεδιαστικός στόχος, που είναι ο σχεδιασμός για ομοιόμορφη φθορά και τέλος δημιουργείται το τελικό SN, ενώ φαίνεται και η αντίστροφη διαδικασία της επίλυσης ενός SN. Η δεύτερη εφαρμογή αφορά στη γήρανση των οδόντων ενός κιβωτίου ελικοπτέρου όπου αρχικά και στο επίπεδο του συναρμολογημένου, ορίζονται οι ιδέες του SN του προβλήματος. Έπειτα, γίνεται εκτενής κινηματική και δυναμική ανάλυση, όπου ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στο υπο-SN που μοντελοποιεί την κάθε ανάλυση και στη συνέχεια δημιουργούνται τα μοντέλα της γήρανσης για scuffing, pitting και ανάπτυξη ρωγματώσεων ταυτόχρονα σε μαθηματικό επίπεδο και σε επίπεδο SN. Τέλος συντίθεται το τελικό SN και παρουσιάζονται οι δυνατότητες ευέλικτης διαμόρφωσης ενός SN. Σχετικά με την τρίτη κατά σειρά εφαρμογή των SN, η οποία αφορά στη χρήση των ανοχών σε επίπεδο ενός εξαρτήματος (part), με πρώτη μέριμνα την εκτενή μελέτη των σύγχρονων εργαλείων και των δυνατοτήτων τους. Αναφέρονται οι έλεγχοι που έγιναν στο CAD πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, για να γίνει κατανοητό τι υπάρχει ήδη και τι χρήζει βελτίωσης. Κατ' επέκταση παρουσιάζεται η ροή του αλγορίθμου και η δομή των SN που επικοινωνούν τις λειτουργίες του αλγορίθμου. Σχετικά με το τέταρτο πρόβλημα, που είναι η χρήση των SN για την ανάδειξη ενός αλγορίθμου για την ορθή χρήση των ανοχών σε επίπεδο συναρμολογημένου, αρχικά αναφέρεται η σύνδεση των SN στην ανάπτυξη του αλγορίθμου και στη συνέχεια η ροή του αλγορίθμου που υλοποιήθηκε. Τέλος, γίνεται η εφαρμογή του στο συναρμολόγημα της μήτρας χύτευσης (που είναι το case study που επιλέχθηκε) για την ανάδειξη και πιστοποίηση του αλγορίθμου. Στο τέλος της εργασίας, αναφέρονται τα συμπεράσματα από τη χρήση των SN, καθώς επίσης γίνεται αναφορά στις μελλοντικές βλέψεις και τα ερευνητικά σχέδια από αυτό το επίπεδο και πέρα.

ABSTRACT

The current state-of-the-art in design methodologies either applies to very specific kind of problems, or still requires a really big amount of computational resources due to high complexity of the models. Therefore the engineering design community undertakes the task to simplify the data and simplify the complexity of the design problems, through approaches which balance between mathematical formalisms and human intuition. In the beginning, this diploma thesis underlines the difficulties which are encountered during the design process, mostly from the view of the new and inexperienced engineer. Later, the concept of *the idea* is introduced and gradually the reader reaches the understanding of the *Synaptic Networks* (SN) concept. A whole design algebra is built around the SN concept, with the graphic representations, the operations and all the degrees-of-freedom which functionally affect the SN model. Modeling with SN, is a non-classification approach in general, but in order to retain the balance between quantitative and qualitative modeling, there is a single classification of SN ideas, which is the OCG classification. Focusing on the assessment of the necessity of the SN in the real design processes, there main part of the thesis are the four applications of the SN in machine elements, power transmission systems and the wider theory of tolerancing. In the first case, there is an SN application on the modeling of the wear phenomena on the cutting tool of a Tunnel Boring Machine (TBM). The mechanisms of wear, as well as the ageing functions are analysed, while geometry analysis together with the dynamics and kinematics of the cutting process, constitute the system functions. Ageing and system functions are presented through SN ideas and snapses and in the end, they are combined together with the design criterion for equivalent wear, in order to reach a design solution. The second case is about ageing phenomena on working teeth in a helicopter gearbox. Scuffing, pitting and crack propagation models are created both in mathematical and SN level, in order to form the final SN of the ageing phenomena in the gearbox. Apart from this modeling, in the second case, there is a thorough presentation of the flexible capabilities in modifying the SN according to other interesting senarios. Concerning the third SN application, which is about tolerancing in part level, firstly a detailed research on the current CAD tools for tolerancing is presented and later an algorithm for proper use of tolerances is suggested together with the SN model of the algorithm workflow. The fourth case study, is focusing on assembly-level tolerances and a second algorithm is proposed, in order to bridge the gaps that the current state-of-the-art is opposing. For validation and practical reasons, this algorithm is applied on the assembly of an injection moulding die, where each aspect of the tolerancing process is presented. The conclusions are the sum-up of the knowledge for SN that was risen along the way and also the future steps are listed.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή - Στόχοι

Η παρούσα διπλωματική κινείται στον ευρύτερο χώρο του μηχανολογικού σχεδιασμού (Engineering Design) με κύρια κατεύθυνση την ανάπτυξη εργαλείων για το σχεδιαστή μηχανικό για όλες τις φάσεις της σχεδιαστικής διαδικασίας. Δεν επικεντρώνεται σε κάποια συγκεκριμένη φάση του σχεδιασμού (π.χ. conceptual, embodiment, detail κλπ) αλλά περισσότερο προσεγγίζει το σχεδιασμό στη βάση του, αναγνωρίζοντας και αλληλεπιδρώντας στα δομικά μέρη του σχεδιασμού (design primitives). Ταυτόχρονα, εισάγεται, αναλύεται και χρησιμοποιείται ως πυρήνας της εργασίας, η θεωρία των Συναπτικών Δικτύων (SN) [1], [3], [4]. Είναι μια νέα μέθοδος εισηγμένη επίσημα στην κοινότητα του engineering design ήδη από το 2012 [2].

Αρχικά γίνεται συνοπτική αναφορά σε διάφορες μεθοδολογίες σχεδιασμού και εντοπίζονται τα προβλήματα που αυτές εμπεριέχουν και επιδρούν αρνητικά στο σχεδιασμό. Έτσι γνωστοποιούνται τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν και εισάγεται ο αναγνώστης στη μοντελοποίηση των ιδεών σε ένα σχεδιαστικό πρόβλημα. Κατόπιν, ορίζονται τα υπόλοιπα δομικά μέρη της θεωρίας και έτσι ολοκληρώνεται το κομμάτι του ορισμού των SN.

Η θεωρία από μόνη της δεν θα είχε κανένα ερευνητικό κέρδος στην επιστήμη του μηχανολόγου μηχανικού, αν δεν αποδείκνυε την ουσία της και τα πλεονεκτήματά της στην πράξη. Για αυτό το λόγο, ακολουθούν τέσσερις μελέτες (case studies) διαφόρων προβλημάτων, στις οποίες γίνεται εκτενής χρήση των SN με σκοπό να αναδειχτεί η ευελιξία και η χρησιμότητά τους στο μηχανολογικό σχεδιασμό.

Οι μελέτες αφορούν από γεωμετρική μοντελοποίηση και κινηματική/δυναμική ανάλυση, μέχρι σύνθετα φαινόμενα όπως αυτά της γήρανσης των κατασκευών, αλλά και στην ανάπτυξη χρήσιμων αλγορίθμων για το σχεδιαστή.

Στόχος της διπλωματικής είναι να παρουσιάσει τα πρώτα βήματα μιας μελλοντικά μεγάλης ερευνητικής δουλειάς, καθώς και να θέσει θεμέλια στην κοινότητα των σχεδιαστών μηχανικών, για τη χρήση των SN. Ξεκινώντας από το proof-of-concept που γίνεται σε αυτή την εργασία, η συνέχεια έγκειται στον εμπλουτισμό και την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων ενταγμένων στα ήδη ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα CAD. Τα εργαλεία αυτά, για να γίνουν αποδεκτά και να απορροφηθούν από τη βιομηχανία, χρειάζεται να είναι το επόμενο βήμα των ήδη υπαρχόντων και όχι κάτι εξωτικό και φαινομενικά άγνωστο. Υπό αυτό το πρίσμα, στη διπλωματική εργασία δίνεται έμφαση στην απλούστευση εννοιών και μεγεθών στο σχεδιασμό, αλλά και στην υπογράμμιση της νέας οπτικής από την οποία αντιμετωπίζονται τα προβλήματα.

Οι βλέψεις κατευθύνονται προς την αυτοματοποίηση στη σχεδιαστικής διαδικασίας, οπότε ο μηχανικός κρίνεται να συγκεντρώσει τις κρίσιμες πληροφορίες προκειμένου

να δημιουργήσει patterns και να εντοπίσει κοινά σημεία τα οποία του ήταν αφανή μέχρι πρότινος. Αυτός είναι ένας από τους πολύ βασικούς ρόλους των SN. Συνθέτοντας κανείς το SN, μεταφέρει τη λειτουργία που έχει στο μυαλό του ότι θέλει να εκτελείται και του παρουσιάζεται η ουσία του σχεδιαστικού του δημιουργήματος, οπότε βρίσκεται στην κατάσταση όπου γνωρίζει ακριβώς τι γίνεται και λαμβάνει τις αντίστοιχες αποφάσεις.

Σε μελλοντικό στάδιο, ο Η/Υ θα του προτείνει σχεδιαστικές λύσεις ή θα λαμβάνει τις αντίστοιχες αποφάσεις, σε ένα υπερσύνολο (superset) των ακριβώς απαραίτητων σχεδιαστικών παραμέτρων.

Κεφάλαιο 2: Θεωρία Συναπτικών Δικτύων

State-of-the-Art μεθοδολογίες σχεδιασμου

Παρά την μεγάλη ανάπτυξη εργαλείων και βοηθημάτων σχετικά με το μηχανολογικό και μη σχεδιασμό, αυτά φαίνεται όμως να αδυνατούν ακόμα να γίνουν άμεσα χρησιμοποιήσιμα και εύελικτα στον καθημερινό σχεδιασμό. Αυτό συμβαίνει κυρίως για τους εξής κύριους λόγους:

1. Η γενετική αναλογία (γονέα/παιδιού), παρ' όλο που ισχύει για τα περισσότερα βιολογικά συστήματα, δεν περιγράφει απόλυτα τα σχεδιαστικά συστήματα παραγωγής ιδεών. Κατά το φαινόμενο της γένεσης σχεδιαστικών ιδεών, δεν έχει αποδειχθεί ότι αυτό σχετίζεται κληρονομικά με άλλες οντότητες/δεδομένα, ή ότι εν τέλει σχετίζεται με δεδομένα απρόσιτα μέχρι τώρα στον άνθρωπο, όπως το συνειδητό και υπόσυνειδητό του. Ακόμα και αν ο σχεδιαστής μπει σε αυτή τη διαδικασία να παράγει/εξαρτά τις ιδέες του βάσει κάποιων προϋπαρχουσών ιδεών, εμποδίζει συνειδητά τη δημιουργικότητά του.
2. Πολλές φορές, οι προτεινόμενες απεικονίσεις των ιδεών, μετά από κάποιο σημείο είναι δύσκολο να προσεγγιστούν από τον ίδιο το σχεδιαστή. Ειδικά οι δενδρικές μορφές και τα νευρωνικά δίκτυα, παρ' ότι απόλυτα κατανοητά και διαχειρίσιμα από τον υπολογιστή, όταν επεκτείνονται πέραν ενός σημείου, ο άνθρωπος αδυνατεί να ακολουθήσει οπτικά, τη συνέχεια.

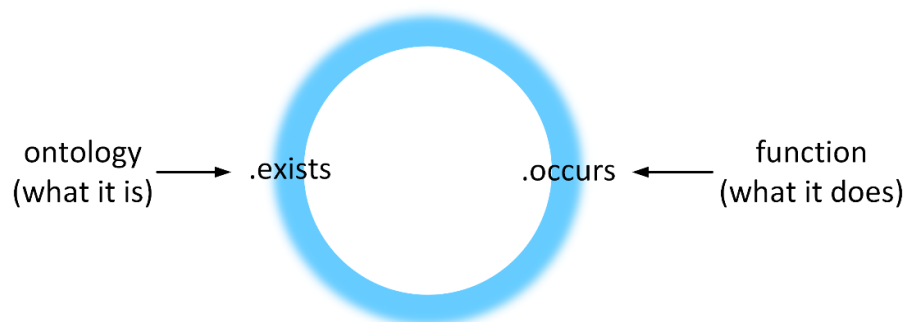
Επιπλέον, υπάρχουν και οι μέθοδοι που πλησιάζουν περισσότερο στην ανθρώπινη λογική, παρά στην υπολογιστική λογική, όπως οι μέθοδοι mind-mapping, το σκαρίφημα (sketching) και πολλές ακόμα τεχνικές καταγραφής της σχεδιαστικής διαδικασίας στο χαρτί. Τέτοιες μέθοδοι, συνήθως, δεν βοηθούν στην ανάλυση σε βάθος, ή στην ανάκτηση και τροποποίηση διαφόρων εναλλακτικών, λόγω της έλλειψης φορμαλισμού. Μετά από κάποιο σημείο, και αυτές οι ενστικτώδεις μέθοδοι, καταλήγουν να γίνονται δύσκολα προσβάσιμες λόγω του όγκου των δεδομένων.

Το κενό, λοιπόν, που χρήζει αντιμετώπισης, είναι ότι ο μηχανικός, στην προσπάθειά του να συστηματοποιήσει τη δημιουργική διαδικασία του σχεδιασμού μέσω κάποιων εργαλείων/μεθόδων, βρίσκεται αντιμέτωπος είτε με αυστηρά οριοθετημένες μεθόδους αλλά όχι ανθρωπίνως προσιτές, ή με ενστικτώδεις μεθόδους χωρίς αρκετό φορμαλισμό. Αυτό το χάσμα προσπαθούν να γεφυρώσουν, η προτεινόμενη θεωρία και οι συμπληρωματικές της έννοιες που θα αναλυθούν πιο κάτω. Γίνεται μια προσπάθεια δημιουργίας μιας αξιωματικής θεμελίωσης των βασικών εννοιών καθώς και μιας άλγεβρας της συνδυαστικής διαδικασίας του μηχανολογικού και εν γένει σχεδιασμού.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι πιο πολλές σύγχρονες μεθοδολογίες (Frames, Semantic Networks, Description Logics), ακολουθούν αυστηρά γενετικά κριτήρια για τον ορισμό/αποδοχή των ιδεών, η προτεινόμενη προσέγγιση αποκόπτεται από την άποψη ότι οι ιδέες γεννιούνται και υιοθετεί την άποψη ότι οι ιδέες απλώς *υπάρχουν* ή *εμφανίζονται* στο συνειδητό του σχεδιαστή. Σε αυτό το πλαίσιο δεν υπάρχει η αυστηρή κατηγοριοποίηση σε κλάσεις (classification) των ιδεών όπως στις άλλες μεθόδους, αλλά περισσότερο ισχύει ότι κάθε ιδέα θα μπορούσε να είναι μια κλάση από μόνη της, ή ότι μπορούν από το πουθενά να εμφανιστούν/εξαφανιστούν κλάσεις, αλλά και να μορφοποιηθούν οι υπάρχουσες.

Μοντελοποίηση των Ιδεών

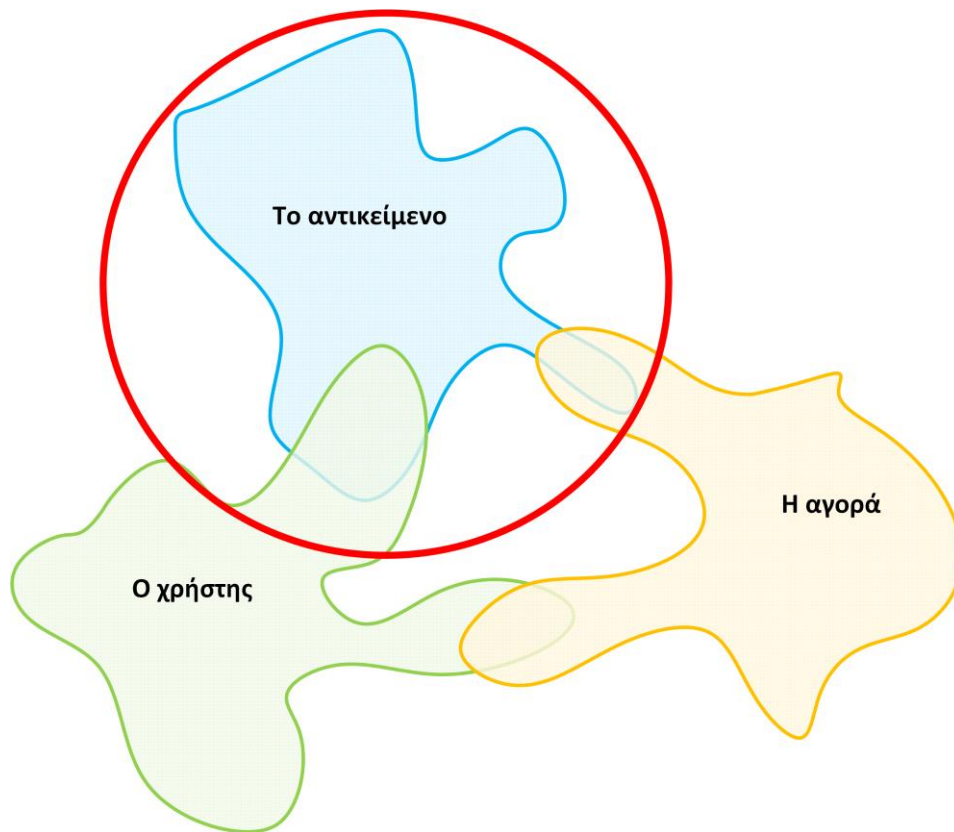
Αρχικά, θεωρείται αναγκαίο, άνθρωπος και υπολογιστής να αναφέρονται στα ίδια πράγματα με τον ίδιο τρόπο. Σε αυτή, λοιπόν, την ανθρώπινη βάση, χρησιμοποιώντας διάφορα προγραμματιστικά εργαλεία, κανείς μπορεί να υλοποιήσει ένα διαδραστικό περιβάλλον επικοινωνίας, όπου θα συνυπάρχουν η οντολογία και η λειτουργικότητα του σχεδιαζόμενου αντικειμένου.



Σχήμα 1 Περιβάλλον συνύπαρξης οντολογίας και λειτουργικότητας.

Τα κύρια αντικείμενα επικοινωνίας, αλλά και τα αντικείμενα της ίδιας της μεθοδολογίας, είναι απλούστατα *ιδέες*, δηλαδή οτιδήποτε γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο [11]. Εδώ οι αναφερόμενες ως **ιδέες**, έχουν πάρει κατά καιρούς διάφορα ονόματα σε διάφορες άλλες θεωρίες-μεθόδους, γεγονός που μόνο κατάφερε να περιορίσει το πεδίο δράσης των ιδεών (π.χ. object, module, surface pair, concept, knowledge κλπ). Ο ίδιος, δηλαδή, παρονομαστής όλων αυτών των γενικών έννοιών, στην παρούσα θεωρία παίρνει το όνομα *ιδέα*.

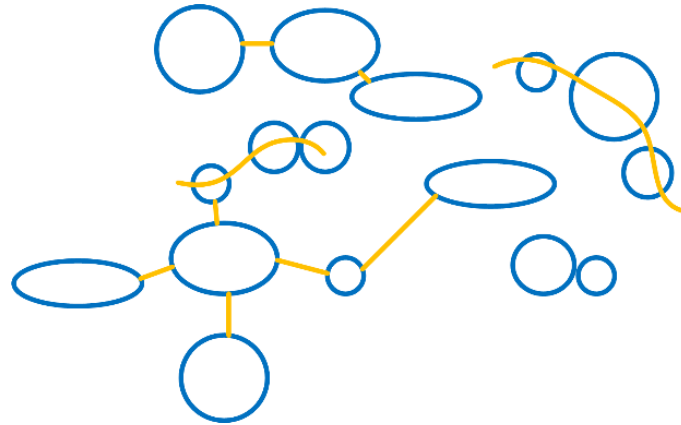
Όταν κάποιος αναφέρεται στο γενικό επίπεδο του σχεδιασμού προϊόντων, ως ιδέες δύναται να παρουσιαστούν όλα τα αντικείμενα που απαρτίζουν και περιβάλλουν το προϊόν. Τέτοια μπορεί να είναι, τα δεδομένα της αγοράς, της βιομηχανίας παραγωγής, του χρήστη του προϊόντος, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κλπ. Όλοι αυτοί οι τομείς, είναι σημασιολογικά συνδεδεμένοι όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 και έχουν κοινά σημεία-λαβές, οπότε τα χαρακτηριστικά που τους συνδέουν αποτελούν απλώς, πολλές διαφορετικές ιδέες.



Σχήμα 2 Υποσυστήματα της σχεδιαστικής διαδικασίας.

Εφόσον λοιπόν, μια ιδέα μπορεί να κυμαίνεται από γενική (π.χ. προϊόν), μέχρι πολύ συγκεκριμένη (π.χ. γεωμετρία της μικροδομής του υλικού του προϊόντος), το περιεχόμενο μιας ιδέας μπορεί να είναι κάποιες άλλες ιδέες ή και κενό (null idea), ή οτιδήποτε θεωρεί ο σχεδιαστής ότι είναι η τιμή αυτής της ιδέας. Οπότε θεωρείται δεδομένο, ότι η τιμή που επιστρέφει μια ιδέα όταν καλείται το όνομά της, είναι και αυτό μια ιδέα. Επειδή, πολλές φορές, μια ιδέα μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, σε διάφορες καταστάσεις, η τιμή της θεωρείται ότι μπορεί να είναι πιθανολογικής φύσης. Έτσι, μια πολυ-παραμετρική ιδέα, αποτελείται από τιμές-ιδέες που η καθεμία έχει τη δική της τιμή, οπότε η αρχική έχει όλες αυτές τις τιμές, με διαφορετικό για την καθεμία συντελεστή βαρύτητας.

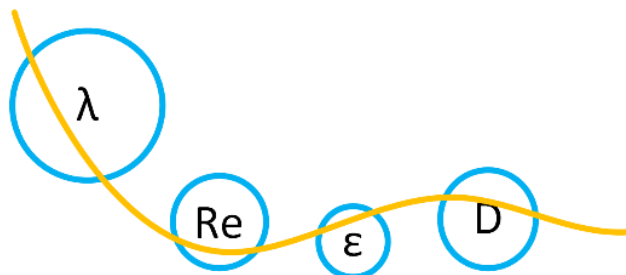
Ο τρόπος για τη σύνδεση περισσότερων ιδεών όπως προαναφέρθηκε, γίνεται με την θέσπιση *χαρακτηριστικών* σε μια ιδέα (attribution). Ως χαρακτηριστικά μιας ιδέας, ορίζονται άλλες ιδέες, περιεχόμενες στην γενικότερη. Αυτό δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως γενετική συσχέτιση των ιδεών, καθώς τα χαρακτηριστικά μια ιδέας δεν γεννιούνται από αυτή, αλλά την απαρτίζουν και δεν αποκλείεται κάποια χαρακτηριστικά να τα μοιράζονται περισσότερες από μία γενικότερες ιδέες, ή και καμία, όπως φαίνεται στο κατωτέρω Σχήμα 3. Έτσι κανείς μπορεί να καταλήξει σε αυτό που αναφέρθηκε και προηγουμένως, ότι ο ορισμός κλάσεων στη συγκεκριμένη προσέγγιση είναι περιττός, αφού οι ιδέες είναι ελεύθερες, ή αποτελούν χαρακτηριστικά άλλων και γενικά οποιαδήποτε στιγμή αυτά τα δεδομένα μπορούν να αλλάξουν αν ο σχεδιαστής το επιλέξει.



Σχήμα 3 Ιδέες σε ομάδες ή αυτόνομες.

Οι διάφοροι κανόνες-φορμαλισμοί, όπως για παράδειγμα οι λογικές και μαθηματικές πράξεις, αποτελούν επίσης ιδέες των οποίων οι τιμές-ιδέες δεν είναι σταθερές, αλλά μεταβάλλονται δυναμικά. Έτσι, με τη μορφή συνδεδεμένων ιδεών, μπορούν να αναπαρασταθούν και οι φυσικοί νόμοι, οι οποίοι είναι ισοδυναμίες διαφορετικών ιδεών-μεταβλητών, οι οποίες υπόκεινται σε πράξεις. Ένα απλό παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 4 όπου μοντελοποιείται ο επαναληπτικός τύπος των Colebrook-White (εξ. 1) για την εύρεση του συντελεστή τριβής (λ) σε σωλήνες.

$$(1) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon / D}{3.71} \right)$$

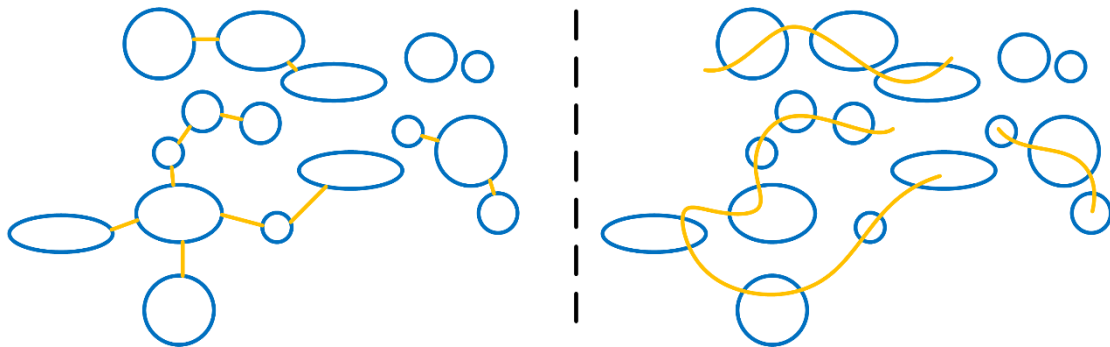


Σχήμα 4 Παράδειγμα μοντελοποίησης με SN, μιας μαθηματικής εξίσωσης.

Σε περιπτώσεις σύνθετων σχεδιαστικών προβλημάτων, όπου προστίθενται συνεχώς έννοιες από διαφορετικούς τομείς, όλες οι μεθοδολογίες οδηγούν σε δυσκίνητες συνθέσεις, δύσκολες να παρατηρηθούν και πόσο μάλλον να δεχτούν αλλαγές. Η παρούσα θεωρία δεν αποφεύγει το συγκεκριμένο κίνδυνο λόγω της φύσης που έχει αποδοθεί στις ιδέες, αλλά δίνει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να επέμβει εύκολα στη δομή της επανεκτιμώντας την συνεχώς και διατηρώντας μόνο τα χρήσιμα στοιχεία. Συνεπώς, δεν είναι καθόλου δύσκολο για το σχεδιαστή, τοποθετώντας τις κατάλληλες πληροφορίες, να δημιουργήσει μοντέλα πρόβλεψης, βελτιστοποίησης, να εξετάσει εναλλακτικά (What if) σενάρια, χωρίς να χρειαστεί να ξαναχτίσει το μοντέλο του από την αρχή.

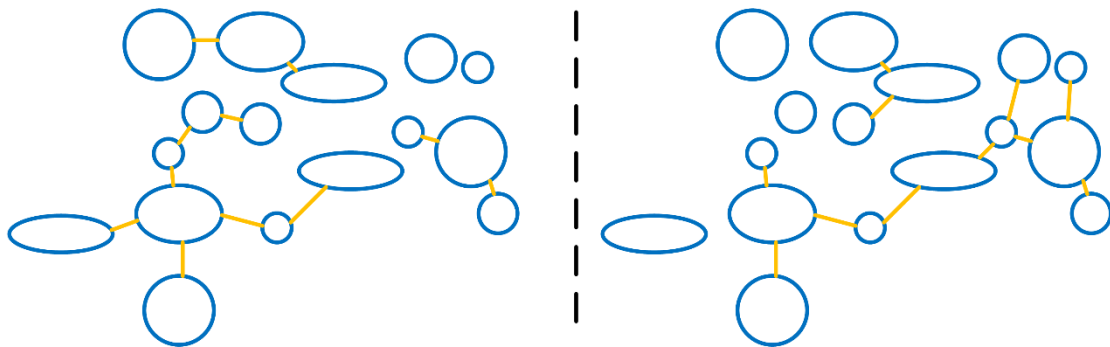
Γραφική απεικόνιση

Στη βάση της η συγκεκριμένη θεωρία, είναι αντίρροπη σε ιεραρχικές δομές (π.χ. δενδρικές), οπότε αποφασίστηκε η γραφική απεικόνιση των ιδεών και των συνδέσεών τους να γίνεται τόσο ελεύθερα όσο η φύση των ιδεών. Στο Σχήμα 5 φαίνονται δύο διαφορετικοί τρόποι απεικόνισης για τον ορισμό των ίδιων εννοιών. Στον πρώτο και πιο απλοποιημένο, οι έννοιες συνδέονται με μια συνεχόμενη γραμμή, ενώ στον δεύτερο, υπάρχει πιο λεπτομερής απεικόνιση των ιδεών και των χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 5 Ισοδύναμοι τρόποι απεικόνισης του ίδιου SN.

Αυτού του είδους η απεικόνιση περιέχει ακριβώς τις χρήσιμες πληροφορίες που ο σχεδιαστής έχει επιλέξει να βρίσκονται στο μοντέλο του, και συν τοις άλλοις, του επιτρέπουν να προβεί σε *σηματικές πράξεις* μεταξύ ιδεών ανά πάσα στιγμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Οι *σηματικές πράξεις* που μπορούν να υλοποιηθούν, αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 6 Παράδειγμα σημαντικών πράξεων που οδηγούν σε διαφορετικό SN.

Ένα εύλογο ερώτημα που τίθεται, είναι ποια είναι η φύση των συνδέσεων των ιδεών που απεικονίζονται στα σχήματα. Εδώ εισάγεται ο όρος της **σύναψης**, η οποία είναι από τη φύση της μια ιδέα όπως όλες οι άλλες, αλλά επιλέγεται να δείξει τη σημασιολογική ή άλλη (π.χ. μαθηματική), σύνδεση περισσότερων ιδεών. Η μορφή που παίρνει μια σύναψη μπορεί να αλλάξει τρόπο απεικόνισης, ή να αντικατασταθεί με άλλη/ες, όπως ακριβώς θα έκανε ο ανθρώπινος εγκέφαλος στην πορεία της σκέψης. Στα πιο πάνω σχηματικά παραδείγματα, είναι φανερό πως οι συνάψεις, οποιεσδήποτε ιδέες και αν συνδέουν, είτε δείχνουν μια φυσική σύνδεση, είτε μια μαθηματική σύνδεση είτε οποιουδήποτε είδους σύνδεση, δεν παύουν να αποτελούν αυτούσιες ιδέες, απλώς σε μορφή καμπύλης και όχι σε μορφή έλλειψης.

Λόγω του ότι οι συνάψεις μεταφράζουν τις συνδέσεις των μερών-ιδεών που απαρτίζουν κάποιες σημασιολογικά συνδεδεμένες έννοιες, τα δίκτυα που αναπτύσσονται με τις ιδέες και τις συνάψεις παίρνουν το όνομα **Συναπτικά Δίκτυα** (Synaptic Networks - SN). Σαφώς, ένα SN είναι μια ιδέα από μόνο του, οπότε σε περίπτωση που ο σχεδιαστής το επιλέξει, αυτό μπορεί να εμφανιστεί είτε στη συμπαγή του μορφή, ως μία ιδέα, είτε στην εκτεταμένη του μορφή.

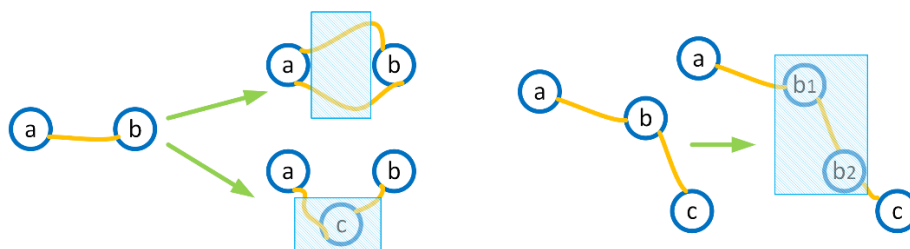
Η ανάπτυξη μιας σκέψης/σχεδιασμού, είναι ένα συνεχώς εξελισσόμενο SN, στην κατεύθυνση που ο νους/σχεδιαστής έχει επιλέξει να κινηθεί.

Σχηματικές πράξεις μεταξύ ιδεών

Ως άλγεβρα ορίζεται μία κλάση εφοδιασμένη με τελεστές για τα αντικείμενα που περιέχει. Έτσι, και η σχεδιαστική άλγεβρα που προτείνεται περιέχει συγκεκριμένους τελεστές για τις ιδέες και τις συνάψεις ενός συναπτικού δικτύου. Έτσι, με τη χρήση αυτών των τελεστών, μπορεί κανείς να επεκταθεί σε όλο το σχεδιαστικό χώρο (design space) απλώς εξελίσσοντας και τροποποιώντας συνεχώς το SN. Οι έγκυροι τελεστές που χρησιμοποιούνται στα SN, αναλύονται ξεχωριστά παρακάτω.

1. Ανάλυση (analysis-ταυτοποίηση του γνωστού)

Είναι τελεστής ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε μία σύναψη αλλά και σε περισσότερες και ο οποίος υλοποιεί ουσιαστικά την λεπτομερέστερη ανάπτυξη/επεξήγηση μιας συνδεσμολογίας μεταξύ δύο ή περισσότερων ιδεών. Σχήμα 7

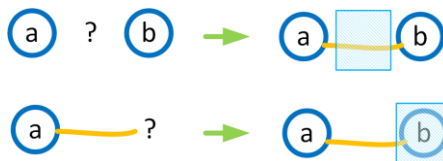


Σχήμα 7 Σχηματική απεικόνιση της πράξης της "ανάλυσης".

2. Εύρεση (heuresis-ταυτοποίηση του αγνώστου)

Είναι τελεστής ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε μία σύναψη αλλά και σε περισσότερες και ο οποίος υλοποιεί ουσιαστικά τη σύναψη-σύνδεση δύο -ή περισσότερων- ιδεών. Θέτει τη σημασιολογική βάση λόγω της οποίας οι δύο ή περισσότερες ιδέες, επιθυμεί ο σχεδιαστής να είναι ενωμένες.

Σχήμα 8

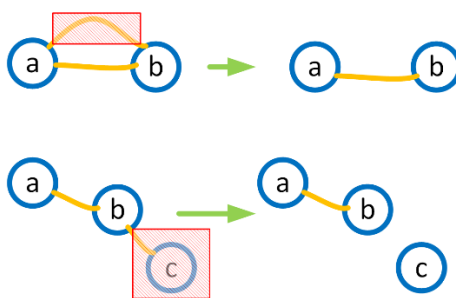


Σχήμα 8 Σχηματική απεικόνιση της πράξης της "εύρεσης".

3. Αφαίρεση (apheresis-απομάκρυνση χαρακτηριστικών)

Είναι τελεστής ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες από μία συνάψεις οι οποίες εφαρμόζονται στις ίδιες ιδέες και ο οποίος επιτυγχάνει την απομάκρυνση κάποιων συνάψεων. Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται πιο συγκεκριμένη και σαφής σύνδεση των δύο ή περισσότερων ιδεών μέσω της απλούστευσης του μοντέλου.

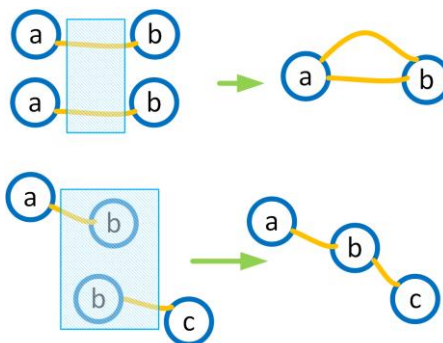
Σχήμα 9



Σχήμα 9 Σχηματική απεικόνιση της πράξης της "αφαίρεσης".

4. Σύθεση (synthesis-συνδυασμός χαρακτηριστικών)

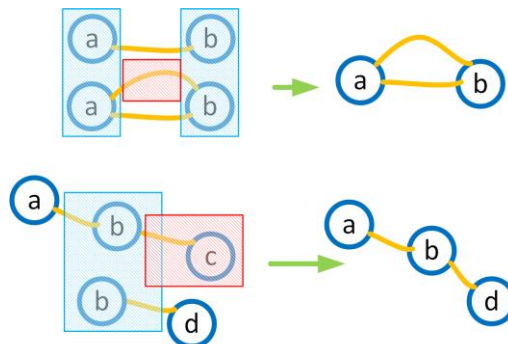
Είναι τελεστής ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες από μία συνάψεις οι οποίες συνδέουν μεν τις ίδιες ιδέες, αλλά αυτό δεν έχει γίνει οπτικά κατανοητό πριν την χρήση του τελεστή. Πρακτικά συνδυάζονται οι συνάψεις, προκειμένου να γίνει πιο ουσιαστικό και προσβάσιμο το μοντέλο. Σχήμα 10



Σχήμα 10 Σχηματική απεικόνιση της πράξης της "σύθεσης".

5. Αντικατάσταση (substitution-συνδυασμένη αφαίρεση και σύνθεση)

Είναι τελεστής ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες από δύο συνάψεις και ο οποίος δίνει την ελευθερία στο σχεδιαστή να δημιουργήσει νέες συνάψεις αφαιρώντας και συνθέτοντας ήδη υπάρχουσες. Σχήμα 11



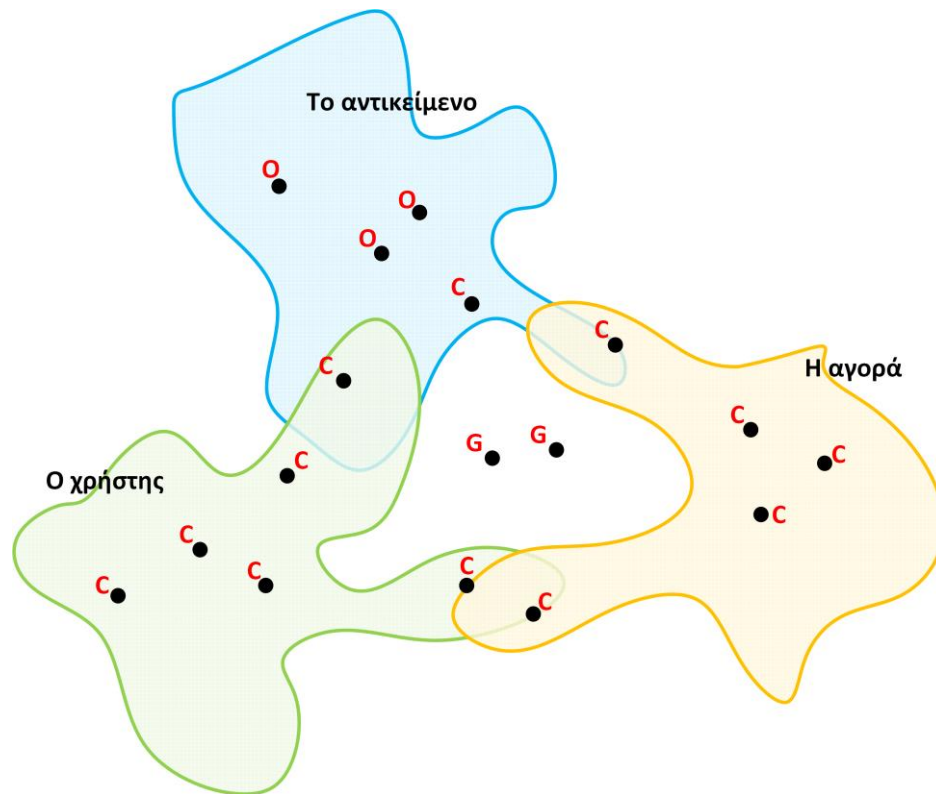
Σχήμα 11 Σχηματική απεικόνιση της πράξης της "αντικατάστασης".

OCG κατηγοριοποίηση

Στη λογική που αναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, ότι δηλαδή τα Συναπτικά Δίκτυα έχουν σκοπό να αναπαριστούν την οντολογία με τη λειτουργία του προϊόντος συνυφασμένες, ορίζεται επικουρικά, η μοναδική κατηγοριοποίηση των ιδεών σε *ιδέες-στόχους* (goal-related ideas), *ιδέες-αντικείμενα* (object-related ideas) και *ιδέες-περιβάλλον* (context-related ideas). Οι ιδέες-στόχοι, είναι οι στόχοι του σχεδιαστή. Σε αντίθεση με τους στόχους, οι ιδέες-αντικείμενα είναι οντότητες του SN, οι οποίες αποτελούν αντικείμενα των οποίων η τιμή, μπορεί να επηρεαστεί από τη σχεδιαστική διαδικασία· ενώ αντίθετα, οι ιδέες-περιβάλλον, είναι οι ιδέες που πλαισιώνουν και επηρεάζουν τα αντικείμενα διατηρώντας τις τιμές του αμετάβλητες.

Ενώ δηλαδή, η επιλογή μιας ιδέας-αντικειμένου ή περιβάλλοντος, επιβάλλει την παρουσία της άλλης, η επιλογή των ιδεών-στόχων γίνεται ανεξάρτητα των υπολοίπων. Παρ' όλ' αυτά, η σχεδιαστική άλγεβρα εφαρμόζεται σε όλες τις ιδέες με τις ίδιες αρχές.

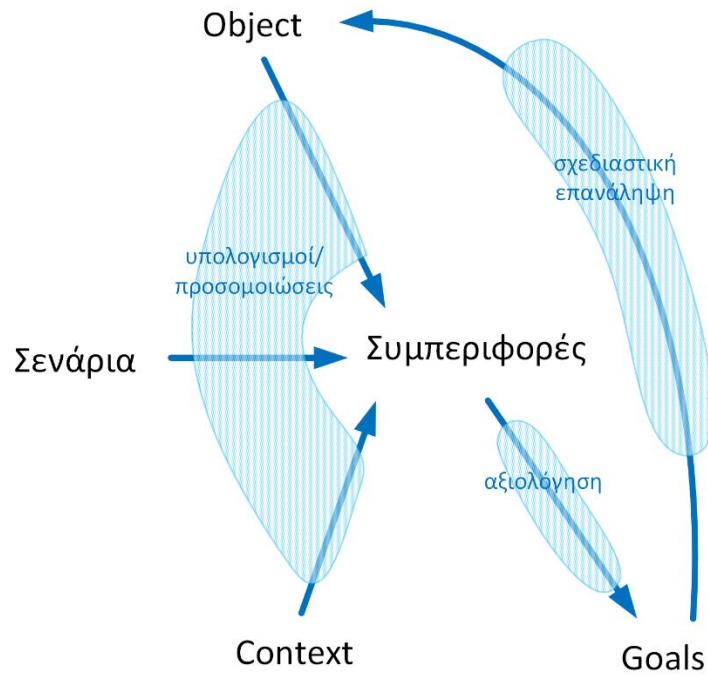
Για να γίνει αντιληπτή η προαναφερθείσα κατηγοριοποίηση, παρουσιάζεται το πιο κάτω σχηματικό παράδειγμα (Σχήμα 12), όπου φαίνεται ξεκάθαρα ο διαχωρισμός των ιδεών σε στόχους, αντικείμενα και περιβάλλον. Οτιδήποτε είναι επιθυμητό αποτέλεσμα ανήκει στην κλάση των στόχων (G), οτιδήποτε είναι δυνατόν να αλλάξει στην πορεία του σχεδιασμού, κατηγοριοποιείται ως αντικείμενο (O), οπότε όλες οι υπόλοιπες ιδέες που καθιστούν το μοντέλο σαφώς ορισμένο και αυθύπαρκτο (π.χ. φυσικοί νόμοι, χαρακτηριστικά των υλικών, νόμοι της αγοράς κλπ), αποτελούν περιβάλλον (C).



Σχήμα 12 Απεικόνιση της κατηγοριοποίησης OCG.

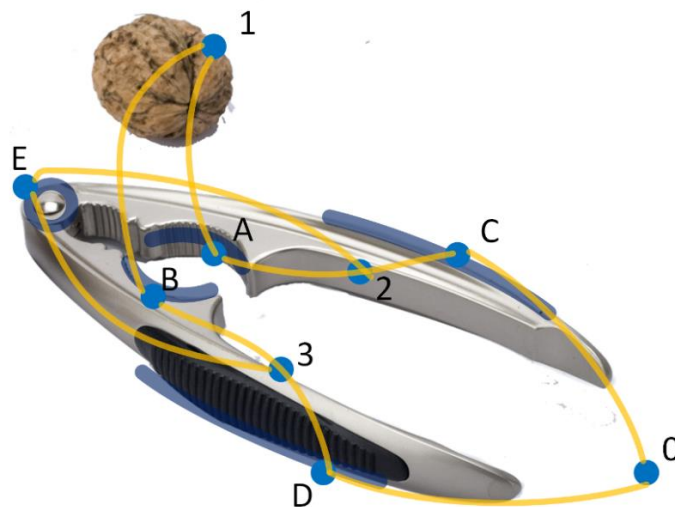
Τα Συναπτικά Δίκτυα ενσωματωμένα σε PLM περιβάλλοντα

Καθώς γίνεται προσπάθεια, η φύση πίσω από τα SN να προσεγγίζει όσο το δυνατόν συστηματικά τον τρόπο σκέψης του σχεδιαστή, θεωρητικά, η ύπαρξη των SN προϋπάρχει των CAD/CAE συστημάτων. Σε αυτή τη βάση, η λογική των SN, θα μπορούσε να ενσωματωθεί στα σύγχρονα PLM περιβάλλοντα, των οποίων το κύριο πρόβλημα στη βιομηχανία είναι η πολυπλοκότητα των εξελιγμένων συστημάτων. Μέσω των SN, η γνώση (system knowledge) που παράγεται στο χτίσιμο αλλά και στην εξέλιξη και τροποποίηση ενός SN σε πραγματικό χρόνο, διατηρείται, καθώς ουσιαστικά το SN αποτελεί την τεκμηρίωση (documentation) της ουσίας του σχεδιασμού. Στο σχήμα 13 φαίνονται σχηματικά οι διάφοροι δρόμοι στην ανάπτυξη της γνώσης, μέσω των αντικειμένων, των σχεδιαστικών στόχων, του περιβάλλοντος, των σεναρίων λειτουργίας και συμπεριφορών του συστήματος.



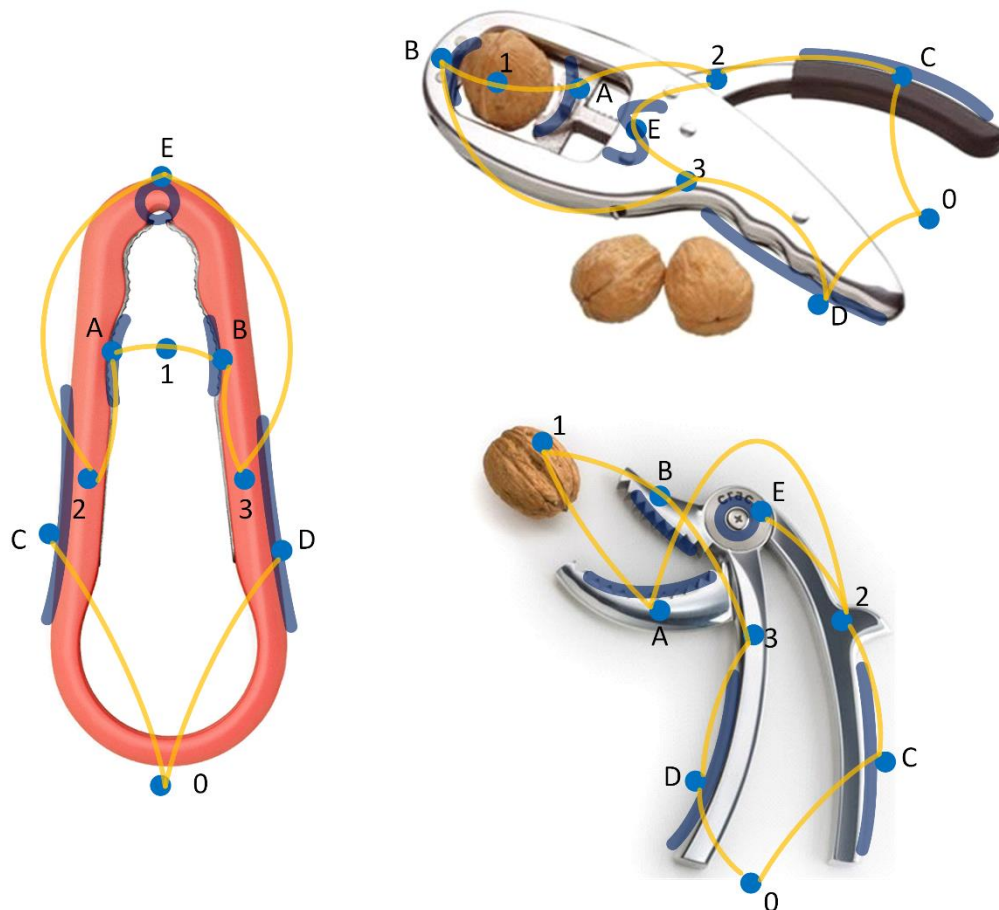
Σχήμα 13 Δρόμοι της πληροφορίας μέσα στο SN.

Σε ένα δεδομένο προϊόν, είναι εύκολο κανείς να φτιάξει το SN που το ερμηνεύει. Αυτή η διαδικασία, είναι η αντίστροφος του δημιουργικού σχεδιασμού, καθώς η σχεδιαστική λύση υπάρχει ήδη, αλλά κανείς μπορεί να επωφεληθεί μέσα από αυτή τη διαδικασία προκειμένου να καταλήξει σε σχεδιαστικές εναλλακτικές. Πιο κάτω φαίνεται το παράδειγμα της ανάλυσης ενός *καρυοθραύστη* στα στοιχεία του SN του. Στο σχήμα 14 φαίνονται όλα τα δομικά του στοιχεία: το καρύδι (ιδέα 1), το χέρι (ιδέα 0), λαβές (ιδέες 2, 3) και διεπιφάνειες (A, B, C, D, E), καθώς και οι συνάψεις που μεταφράζουν τη λειτουργία του καρυοθραύστη. Ο μαθηματικός φορμαλισμός αυτής της λειτουργίας, είναι ότι η ασκούμενη δύναμη που φτάνει στο καρύδι ($f_{1,j}$), πρέπει να ξεπερνάει την αντοχή θραύσης του κελύφους (f_{crack}).



Σχήμα 14 SN στη μοντελοποίηση της λειτουργίας του καρυοθραύστη.

Έχοντας ήδη το SN και με σκοπό να αναδειχθεί η ουσία της χρήσης των SN στην πορεία του σχεδιασμού, μπορεί κανείς (πριν αρχίσει να σχεδιάζει 3D αντικείμενα) να τοποθετήσει τις ιδέες σε διαφορετική δομή στο χώρο. Αυτή η δομή, όπως φαίνεται και στα στο σχήμα 15, οδηγεί σε εναλλακτικά 3D αντικείμενα, όπου αν ο σχεδιαστής επικεντρωθεί στο να μη χαθεί η ουσία του SN (δηλαδή η λειτουργία που επιθυμεί να εκτελέσει), και αυτά επιτελούν την ίδια λειτουργία με τον αρχικό σχεδιασμό.



Σχήμα 15 Εναλλακτικοί σχεδιασμοί με το ίδιο SN.

Αυτή η απλή αλλαγή στη χωροταξική θέση των οντοτήτων του SN, δείχνει σε ένα μικρό βαθμό την εναλλαξιμότητα που παρέχει στο σχεδιαστή η συγκεκριμένη μεθοδολογία και η *συστηματοποίηση της δημιουργικότητας*. Ακόμα περισσότερα αποτελέσματα μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, στην περίπτωση που επεκτείνει το SN στην κατεύθυνση εναλλαγής των διαφόρων σχεδιαστικών βαθμών ελευθερίας. Στα πολύπλοκα μοντέλα, τέτοιες κινήσεις οδηγούν πολλές φορές, σε άγνωστα από πριν αποτελέσματα.

Το παράδειγμα του καρυοθραύστη, έδειξε καθαρά ότι το SN, μπορεί να είναι ένα ισχυρό εργαλείο στην πορεία του σχεδιασμού, προσπερνώντας την ισχύ που έχει μία 3D υλοποίηση (embodiment). Έχοντας λοιπόν, ο σχεδιαστής δημιουργήσει εξ' αρχής το SN το οποίο ερμηνεύει τη σκέψη του για τη λειτουργία που θέλει να επιτυγχάνει μέσω του σχεδιασμού του, δεν είναι ανάγκη να βιαστεί για να υλοποιήσει το SN, καθώς ο ίδιος έχει προετοιμάσει το έδαφος για τη δημιουργικότητα. Το SN, λειτουργεί σαν εργαλείο μετα-αρχιτεκτονικής (meta-architecture), διότι ανά πάσα στιγμή, ο σχεδιαστής μπορεί να ανατρέξει σε αυτό για τροποποιήσεις και ελέγχους μελλοντικών σεναρίων.

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογές

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η θεωρία των SN σε συγκεκριμένες εφαρμογές, ώστε να γίνει εμφανής η χρησιμότητά τους και η γκάμα των εφαρμογών τους. Έτσι, τα τέσσερα case studies είναι τα εξής:

1. Μελέτη της φθοράς των κοπτικών εργαλείων μετροπόντικα (TBM) - SN on Design-for-Wear
2. Μελέτη της φθοράς τροχών κιβωτίου ελικοπτέρου - SN on Design-for-Ageing
3. Ανάπτυξη αλγορίθμου για την ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο συναρμολογήματος - SN on Design-for-Part Tolerancing
4. Ανάπτυξη αλγορίθμου για την ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο εξαρτήματος - SN on Design-for-Assembly Tolerancing

Στην 1^η, γίνεται χρήση των SN για τη μοντελοποίηση ενός αμιγώς τεχνικού προβλήματος αναλύοντας όλους τους μαθηματικούς φορμαλισμούς στο επίπεδο της γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου, με απώτερη κατάληξη τη σχεδιαστική λύση για το πρόβλημα. Στη 2^η, τα SN χρησιμοποιούνται για την ανάδειξη της πορείας μέσα στο σύστημα, του φαινομένου της φθοράς των οδόντων. Το κιβώτιο σχεδιάστηκε από το μηδέν και σκοπός της εφαρμογής είναι η μελέτη του φαινομένου της φθοράς σε μακροσκοπικό επίπεδο και όχι στις κατατομές των οδόντων, αλλά στο ευρύτερο περιβάλλον του συναρμολογήματος. Στις άλλες δύο εφαρμογές, η θεωρία των SN βοηθάει στην ανάδειξη δύο αλγορίθμων για την ορθή χρήση των ανοχών (tolerancing). Αναλύονται οι αλγόριθμοι, ενώ φαίνεται και η χρήση τους στο case study ενός καλουπιού για injection moulding.

Εφαρμογή 1: Φθορά κοπτικών δίσκων

μετροπόντικα

Εισαγωγή

Η φυσική τάση όλων των υλικών να επιστρέφουν σε θερμοδυναμική ισορροπία στο πέρασμα του χρόνου, ταυτόχρονα με τις επιπρόσθετες επιδράσεις του φυσικού και ανθρώπινου περιβάλλοντος, προκαλούν γήρανση και στις ανθρώπινες κατασκευές, με επιπτώσεις που εκτείνονται από αύξηση χρηματικού κόστους, μέχρι κόστους ανθρώπινων ζωών. Συνεπώς, οι μηχανικοί έρχονται αντιμέτωποι με το καθήκον να ερμηνεύσουν τις συμπεριφορές της φύσης σε πολύπλοκα εμπειρικά και αναλυτικά

υπολογιστικά μοντέλα, με σκοπό αυτά να χρησιμοποιηθούν για επιθεώρηση και πρόβλεψη του χρόνου ζωής και της απόδοσης των κατασκευών. Το απαιτητικό καθήκον, υπό το πρίσμα του σχεδιαστή, είναι να διαχειριστεί την πολυπλοκότητα των μοντέλων γήρανσης, με ένα πιο ευέλικτο τρόπο. Παρόλο που υπάρχουν ικανα μοντέλα για πολλές βασικές διαδικασίες γήρανσης εντούτοις αυτά είναι σχεδιασμένα να αντιμετωπίζουν συγκεκριμένα είδη εφαρμογών και άρα δεν είναι ευρείας χρήσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι σε περιπτώσεις που απαιτείται τροποποίηση του σχεδιασμού ή των συνθηκών λειτουργίας μιας κατασκευής, το σύνθετο μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του, δεν ανανεώνεται/προσαρμόζεται αυτόματα, στους νέους μηχανισμούς γήρανσης, κάνοντας τη διαδικασία του επαναλαμβανόμενου σχεδιασμού, στην καλύτερη περίπτωση, αργή.

Οι μηχανισμοί γήρανσης, από την απλή απώλεια μάζας (π.χ. λόγω τριβής, διάβρωσης, τήξης), μέχρι την αλλαγή σχήματος και ιδιοτήτων του υλικού (π.χ. αλλαγή φάσης, αλλαγή μηχανικών ιδιοτήτων, ανάπτυξη ρωγμών και παραμόρφωση), προσεγγίζονται με πολυμεταβλητές εξισώσεις, οι οποίες υπό ένα πρίσμα, είναι ήδη εξιδανικευμένες και όχι εύχρηστες για ευρεία χρήση. Αυτό το γεγονός, ωθεί το μηχανικό στη δημιουργία πολυσύνθετων υπολογιστικών μοντέλων, με αύξηση φυσικά, της ανάγκης για υπολογιστικούς πόρους. Επιπλέον, η έλλειψη ευελιξίας και προσαρμοστικότητας των ήδη διαθέσιμων τεχνικών μοντελοποίησης προβλημάτων γήρανσης, απαιτεί ακόμα περισσότερους πόρους. Το παρόν αντικείμενο μελέτης, στοχεύει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των νόμων της γήρανσης και της διαδικασίας του σχεδιασμού για γήρανση (*design for ageing*), χωρίς παράπλευρες απώλειες σε επιστημονική αξιοπιστία και εγκυρότητα των μοντέλων.

Αρχικά, προσεγγίζονται κάποιες συγκεκριμένες συναρτήσεις γήρανσης (για τριβολογική φθορά, υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων και για διάδοση ρωγμών) και το πώς αυτές μεταφράζονται σε εύχρηστα, μαθηματικά μοντέλα. Μετά από αυτή την πρώτη προσέγγιση, υλοποιούνται τα αρχικά συναπτικά δίκτυα αυτών των συναρτήσεων γήρανσης, με σκοπό να θεμελιώσουν τη βάση για την παραγωγή σχεδιαστικών ιδεών του βασικού μοντέλου της υπό μελέτη κατασκευής. Αυτή η διαδικασία υποστηρίζεται από μία OCG [5] κατηγοριοποίηση, η οποία εξυπηρετεί στο να αναδεικνύει τις σχεδιαστικές επιλογές και να διατηρεί τη διαφάνεια στη διαδικασία των σχεδιαστικών αποφάσεων. Η χρήση συναπτικών δικτύων και OCG ανάλυσης, δεν εξυπηρετεί μόνο στην βαθύτερη (οπτική) κατανόηση του προβλήματος και στην απεικόνιση της φυσικής ροής των φαινομένων μέσω των κρίσιμων παραμέτρων γήρανσης, αλλά επίσης παρέχει το πλεονέκτημα της άμεσης αλληλεπίδρασης με το πρόβλημα κάθε στιγμή με σκοπό την αντιμετώπιση διαφορετικών σχεδιαστικών στόχων, αλλά και την περαιτέρω σχεδιαστική βελτιστοποίηση.

Συναρτήσεις γήρανσης

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, η μελέτη περιορίζεται σε δύο κύριους μηχανισμούς αστοχίας:

- Τριβολογική Φθορά
- Ρωγμάτωση

Παρακάτω, επαναπροσεγγίζονται τα στοιχειώδη και θεμελιώδη μοντέλα για αυτούς τους μηχανισμούς και στη συνέχεια εκφράζονται στη λογική των συναπτικών δικτύων.

Απώλεια υλικού λόγω τριβολογικής φθοράς

Η τριβή εμφανίζεται σε οποιαδήποτε κατασκευή, όπου υπάρχει επαφή επιφανειών και σχετική κίνησή στη διεπιφάνεια δύο ή περισσότερων αντικειμένων. Η ποσοτική συνάρτηση που περιγράφει αυτού του είδους τη φθορά [6], [7] συσχετίζει τον όγκο του αποβαλλόμενου υλικού (W), με την απόσταση ολίσθησης (S), την κάθετη ασκούμενη πίεση (p_n), το συντελεστή φθοράς (k) και την επιφανειακή σκληρότητα (H) του αποβαλλόμενου υλικού, με τη μαθηματική σύνθεση που ακολουθεί:

$$(2) \quad W = kp_n S / H$$

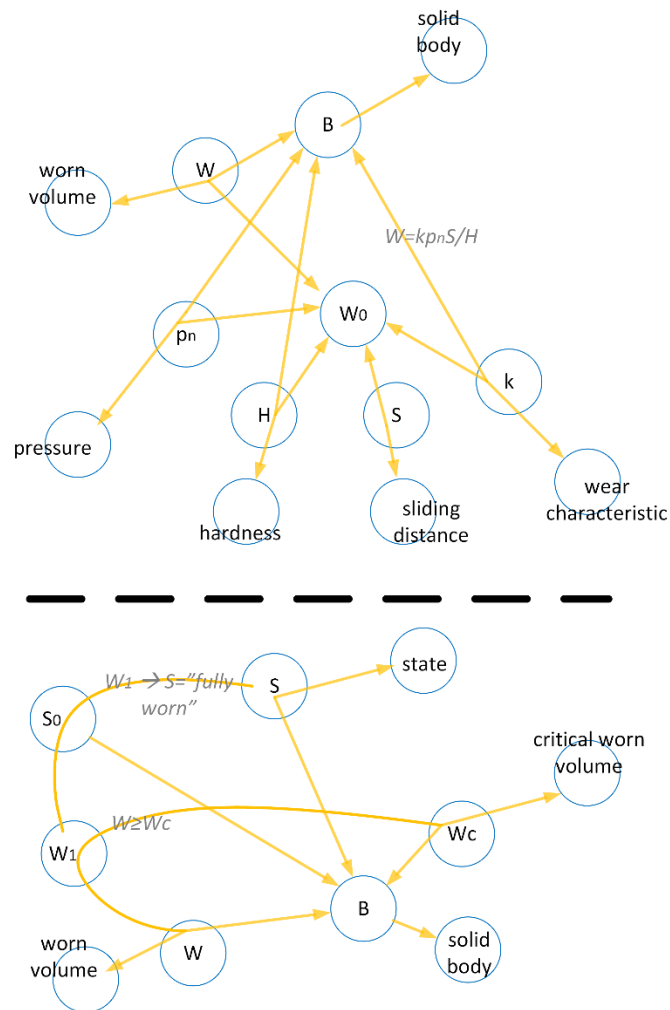
Με διαφόριση της εξ. 2 ως προς το χρόνο, προκύπτει η πιο κάτω έκφραση:

$$(3) \quad \frac{wH}{k} = p_n u$$

Όπου, u είναι η γραμμική ταχύτητα ολίσθησης και w ο ρυθμός του αποβαλλόμενου όγκου υλικού.

Καθώς όγκος υλικού φθείρεται και αποβάλεται κατά τη λειτουργία μιας κατασκευής, αλλάζουν συνεχώς η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες της διεπιφάνειας, με αποτέλεσμα την αλλαγή των σημείων άσκησης των φορτίων γεγονός που μπορεί είτε να επιταχύνει, είτε να επιβραδύνει τη φθορά. Επίσης, λόγω αυτού του φαινομένου, μπορεί να ενεργοποιηθούν και δευτερεύοντες μηχανισμοί φθοράς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μία κατασκευή θεωρείται ότι έχει αστοχήσει, όταν έχει αποβληθεί συγκεκριμένος όγκος υλικού.

Στο σχήμα 16 φαίνονται τα συναπτικά δίκτυα που μεταφράζουν το ένα τον μηχανισμό φθοράς κατά Archard [7] και το άλλο ένα γενικό κριτήριο αστοχίας λόγω τριβολογικής φθοράς. Αυτά τα δύο συναπτικά δίκτυα, θα πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους αλλά και με άλλα συμπληρωματικά, στην περίπτωση που ο μηχανικός θέλει να συνθέσει ένα πολύπλοκο μοντέλο ανάλυσης, πρόβλεψης, ή και παραγωγής σχεδιαστικών ιδεών.



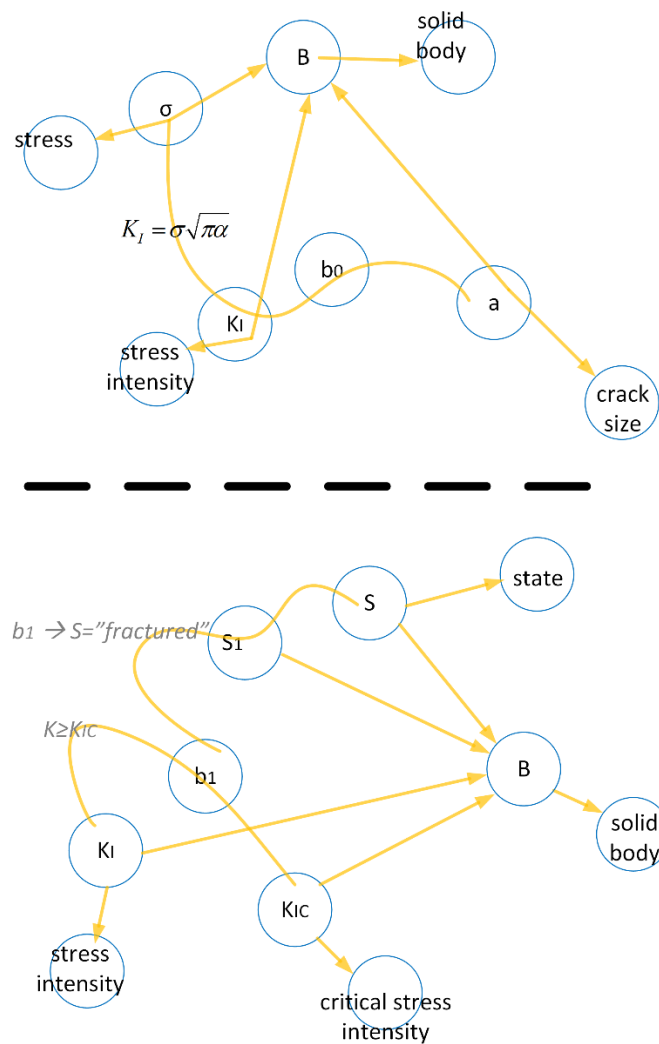
Σχήμα 16 (πάνω) Ο μηχανισμός φθοράς κατά Archard / (κάτω) Κριτήριο αστοχίας λόγω τριβολογικής φθοράς.

Ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης και ξαφνική θραύση

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, μοντελοποιούνται οι θεμελιώδεις νόμοι για τους μηχανισμούς εκκίνησης και ανάπτυξης ρωγμών, όπως αυτοί έχουν εκφραστεί από τους Griffith, Irwin και Paris. Διευρύνοντας το πρωταρχικό μοντέλο του Griffith [8], ο Irwin [9] εξέφρασε την τασική κατάσταση γύρω από μία ρωγμή, εισάγωντας τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης (K_I). Η έκφραση είναι η εξ. 4:

$$(4) \quad K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης, ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (K_{Ic}), η οποία εξαρτάται από την τοπική γεωμετρία και από το υλικό που ρωγματώνεται, τότε εμφανίζεται απότομη ανάπτυξη μακρορωγμής με μεγάλη πιθανότητα ολικής θραύσης του συγκεκριμένου υποσυστήματος. Στο σχήμα 17 φαίνονται με δομικά στοιχεία συναπτικών δικτύων, επάνω, ο στοιχειώδης νόμος ανάπτυξης ρωγμής στο άκρο μιας ρωγμής κατά Griffith/Irwin, ενώ κάτω αναπαρίσταται ένα κριτήριο ψαθυρής θραύσης λόγω ρωγμάτωσης.



Σχήμα 17 (πάνω) Ανάπτυξη ρωγμής κατά Griffith. (κάτω) Κριτήριο ψαθυρής θραύσης λόγω ρωγμάτωσης.

Το τελικό και κρίσιμο κομμάτι στη θεωρία της ανάπτυξης ρωγμών σε αστοχίες κατασκευών που υπόκεινται σε κυκλική κόπωση (ολιγοκυκλική ή πολυκυκλική), είναι η ανάλυση του Paris **[10]** σχετικά με τη συσχέτιση του μήκους της ρωγμής (a) με τον αριθμό των κύκλων κόπωσης (N), η οποία δίνεται από την εξ. 5:

$$(5) \quad d\alpha / dN = C \Delta K^m$$

Όπου C , m είναι σταθερές του υλικού, ενώ με ΔK εκφράζεται η διακύμανση του συντελεστή έντασης της τάσης (σ) συναρτήσει το χρόνου. Αυτή η εξίσωση, συνιστά τη βασική συνάρτηση ανάπτυξης ρωγμής, οπότε και αποτελεί *Context* σε όρους συναπτικών δικτύων και ανάλυσης OCG.

Ενδογενείς συναρτήσεις του συστήματος

Το πρόβλημα που επιλέχθηκε να μελετηθεί και να απεικονίσει τα πλεονεκτήματα της χρήσης συναπτικών δικτύων για την ανάλυση της γήρανσης, είναι η φθορά που παρατηρείται στους στην επιφάνεια κοπής των κοπτικών δίσκων της κεφαλής ενός μετροπόντικα (TBM).

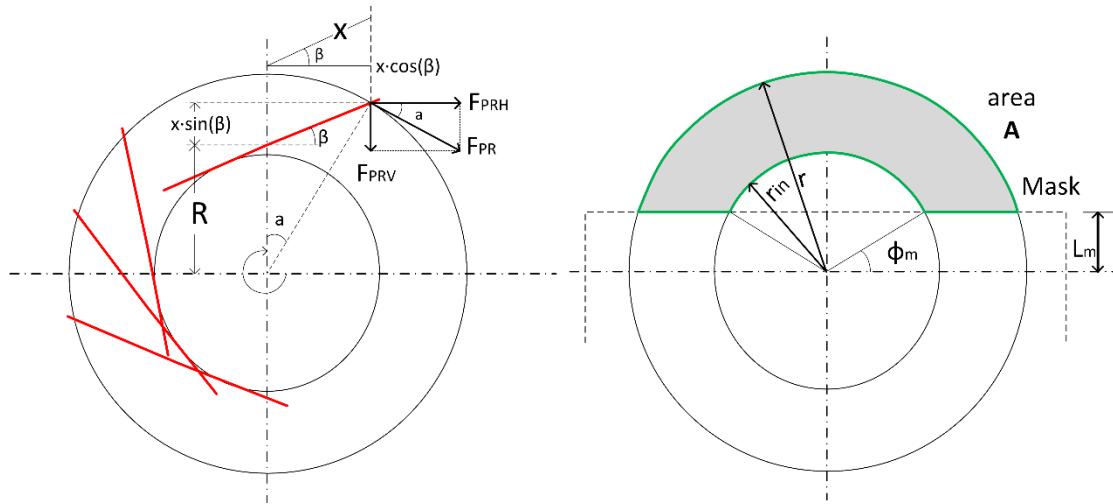
Η γεωμετρία του κοπτικού δίσκου

Τα εργαλεία που κυρίως χρησιμοποιούνται στους μετροπόντικες, είναι κοπτικοί δίσκοι (μονοί ή διπλοί) σχεδιασμένοι ώστε να επιτυγχάνουν δύο λειτουργίες, αυτή της κυκλικής κύλισης της κεφαλής του μετροπόντικα και αυτή της αποβολής του υλικού του εδάφους. Ανάλογα με το είδος του πετρώματος το οποίο πρόκειται να αποβληθεί, οι διάφορες σχεδιαστικές παράμετροι επιλέγονται αναλόγως. Κρίσιμες παράμετροι της διαδικασίας κοπής, είναι και τα στοιχεία της γεωμετρίας του κοπτικού δίσκου, τα οποία είναι:

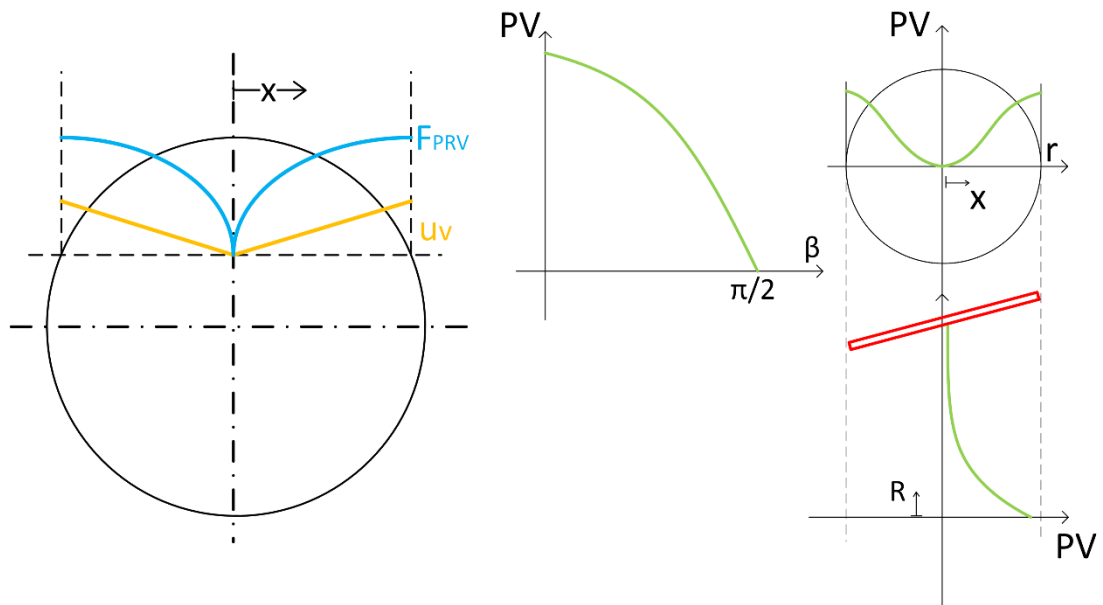
- η εξωτερική ακτίνα του δίσκου (r)
- η εσωτερική ακτίνα του (r_{in})(δηλαδή η μικρότερη ακτίνα στην οποία επιτυγχάνεται κοπή)
- η θέση του δίσκου επάνω στην κεφαλή του μετροπόντικα (R)
- η γωνία τοποθέτησης των κοπτικών δίσκων ως προς την εφαπτόμενη ευθεία στον κύκλο κύλισης (β)
- η συνάρτηση της γενέτειρας ($f(x)$), η οποία κινούμενη κυκλικά, παράγει την επιφάνεια του κοπτικού δίσκου.

Επιπρόσθετα, ο δίσκος ενδέχεται να έχει επικαλυφθεί με θυσιαζόμενη επικάλυψη (abrasive coating), όπως φαίνεται στο σχήμα 20. Αυτή η επικάλυψη δεν έχει σταθερή κατανομή πάχους, καθώς η κατανομή εξαρτάται από την ένταση του φαινομένου της κοπής σε κάθε σημείο της επιφάνειας, εφόσον το κριτήριο είναι η ομοιόμορφη φθορά του κοπτικού δίσκου. Η κατανομή του πάχους της επικάλυψης, εξαρτάται από την απόσταση του σημείου της επιφάνειας από το κέντρο περιστροφής του δίσκου (x) και από την απόσταση R από το κέντρο της κεφαλής του μετροπόντικα.

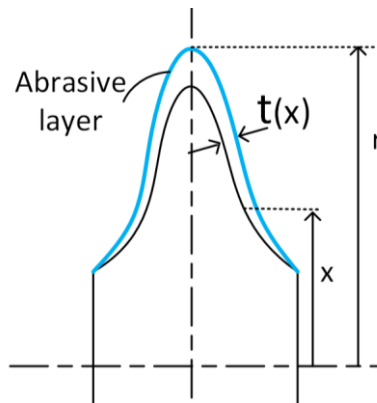
Τα στοιχεία της γεωμετρίας και η επιρροή των x , R , β στη φθορά του κοπτικού δίσκου, φαίνονται στα σχήματα 18 και 19.



Σχήμα 18 Στοιχεία της γεωμετρίας του κοπτικού TBM.



Σχήμα 19 Επιρροή των γεωμετρικών στοιχείων x , β , R στη φθορά.



Σχήμα 20 Θυσαζόμενη επικάλυψη για ομοιόμορφη φθορά στον κοπτικό δίσκο.

Κινηματική και δυναμική ανάλυση της κοπής

Η τροχιά κίνησης του κέντρου του κοπτικού εργαλείου είναι κυκλική και με την απλούστευση ότι κάθε στιγμή υπάρχει μόνο μία γραμμή σε επαφή με το πέτρωμα (κόκκινη γραμμή στην Σχήμα 18(αριστερά)), τότε η επιφάνεια σάρωσης σε έναν πλήρη κύκλο του κοπτικού, θα είναι ένας δίσκος (Σχήμα 18(δεξιά)). Η συνισταμένη δύναμη που αναπτύσσεται σε εκείνη την περιοχή, είναι η FPR, της οποίας η έκφραση δίνεται στην εξίσωση 8, ενώ οι εξισώσεις 6 και 7 είναι οι εκφράσεις των συνιστωσών της στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση.

$$(6) \quad F_{PR} = \frac{T}{i\sqrt{x^2 + R^2 + 2xR\sin(\beta)}}$$

$$(7) \quad F_{PRH} = F_{PR} \cos(a) = \frac{T/i(R + x\sin(\beta))}{x^2 + R^2 + 2xR\sin(\beta)}$$

$$(8) \quad F_{PRV} = F_{PR} \sin(a) = \frac{xT/i\cos(\beta)}{x^2 + R^2 + 2xR\sin(\beta)}$$

Όπου i είναι ο αριθμός των δίσκων που κόβουν ταυτόχρονα και T είναι η ροπή της κεφαλής του μετροπόντικα.

Αντίστοιχα με την αναπτυσσόμενη δύναμη, για τη γραμμική ταχύτητα και τις επιμέρους εκφράσεις της, ισχύουν τα εξής:

$$(9) \quad u = \omega\sqrt{x^2 + R^2 + 2xR\sin(\beta)}$$

$$(10) \quad u_H = \omega(R + x\sin(\beta))$$

$$(11) \quad u_V = \omega x \cos(\beta)$$

Οι οριζόντιες συνιστώσες τη δύναμης και της ταχύτητας (εξ. 7 και 10), προκαλούν την κίνηση της κεφαλής, ενώ οι κατακόρυφες συνιστώσες (εξ. 8 και 11), συνεισφέρουν στην ενεργό κοπή. Στο σχήμα 19(αριστερά) φαίνονται οι F_{PRV} και u_V σε ένα τυχαίο σημείο επάνω στην επιφάνεια του κοπτικού.

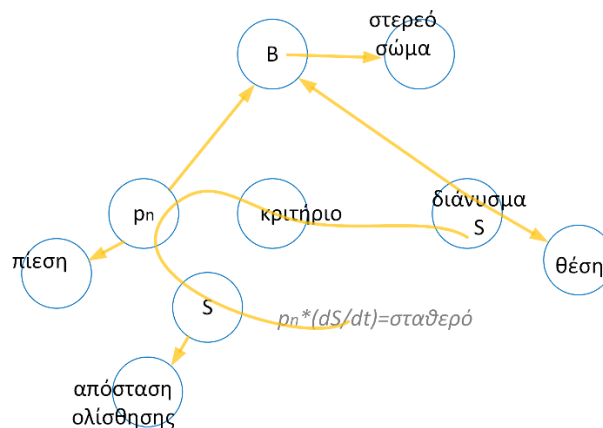
Η γήρανση των κοπτικών δίσκων του μετροπόντικα, είναι μια κλασσική περίπτωση γήρανσης λόγω τριβολογικής φθοράς της κατασκευής, οπότε η συνάρτηση γήρανσης που μεταφράζει το συγκεκριμένο φαινόμενο, είναι ο νόμος $Pu=constant$ [7].

Αυτή η συνάρτηση δείχνει ότι οι μεταβλητές κατάστασης για την τριβολογική φθορά είναι η ασκούμενη πίεση και η σχετική ταχύτητα των επαπτόμενων υλικών στην ενεργή του επιφάνεια ($A'=A\cos\beta$). Ο Pu νόμος παίρνει την μορφή της εξ. 12 στο συγκεκριμένο πρόβλημα:

$$(12) \quad P_C u_{V(x,R)} = \frac{F_{PRV}}{A\cos(\beta)} u_V = \frac{x^2 T \cos(\beta)}{Ai(x^2 + R^2 + 2xR\sin(\beta))} = const.$$

Σχεδιαστικοί στόχοι

Ένας τυπικά λειτουργικός στόχος, είναι να μην επέλθει καταστροφική αστοχία υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, ο οποίος μπορεί να υλοποιηθεί, επιβάλλοντας τις κρίσιμες τιμές των παραμέτρων, σε σχετικές ιδέες στο συναπτικό δίκτυο. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, επιλέχθηκε ως στόχος να είναι ομοιόμορφη φθορά κατά μήκος της επιφάνειας του κοπτικού δίσκου (κατά x), του οποίου η υλοποίηση σε περιβάλλον συναπτικών δικτύων φαίνεται στο σχήμα 21. Επιπρόσθετοι στόχοι -που συχνά αφορούν βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό- θα μπορούσαν να εισαχθούν στο κεντρικό συναπτικό δίκτυο, ως υπο-συστήματα.



Σχήμα 21 Ο σχεδιαστικός στόχος για ομοιόμορφη φθορά, μέσω SN.

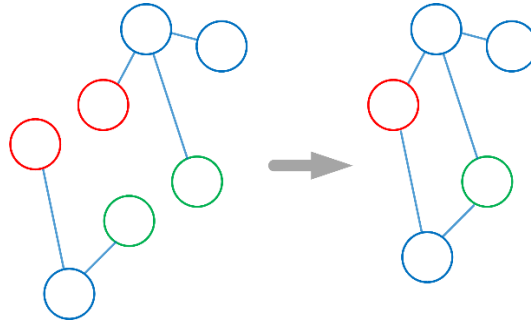
Συνολικό Συναπτικό Δίκτυο

Ένωση των υπο-δικτύων

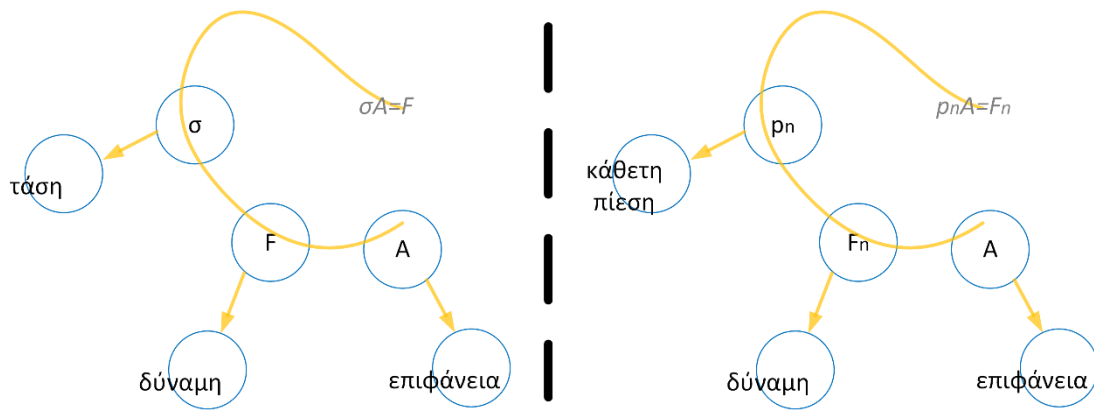
Ουσιαστικά, το συνολικό συναπτικό δίκτυο, είναι μια νοητή κατασκευή η οποία περιγράφει την κατανόηση του μηχανικού για το υπό σχεδίαση σύστημα αλλά και για τα προβλήματα που αυτό εμπεριέχει. Ως τέτοιο, είναι η σύνδεση όλων των συναφών υπο-δικτύων, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που απεικονίστηκαν πιο πάνω. Η επίτευξη της σύνδεσης δύο ή περισσότερων υπο-δικτύων, προϋποθέτει ότι κάποιες ιδέες τους θα συμπίπτουν και θα λειτουργούν σαν πιασίματα για το συγκεκριμένο υπο-δίκτυο. Αυτή η σύνδεση φαίνεται στο σχήμα 22.

Η εισαγωγή νέων ιδεών και η σύνδεση υπο-δικτύων διευρύνει το συναπτικό δίκτυο. Ενώ κάποιες ιδέες είναι νέες, με την έννοια ότι αναδύονται από πρωτότυπη ανάλυση και μοντελοποίηση, τυπικά, τα πιο πολλά δομικά στοιχεία του συναπτικού δικτύου λαμβάνονται ως προϋπάρχουσα γνώση, όπως για παράδειγμα το ότι η ασκούμενη πίεση προκύπτει από τη σύνδεση της εφαρμοζόμενης δύναμης και της ενεργής της επιφάνειας (Σχήμα 23). Χρησιμοποιώντας τα SN, κανείς μπορεί να εισάγει στη σφαίρα της εξερεύνησης, πιθανές σχεδιαστικές εναλλακτικές, τις οποίες και να

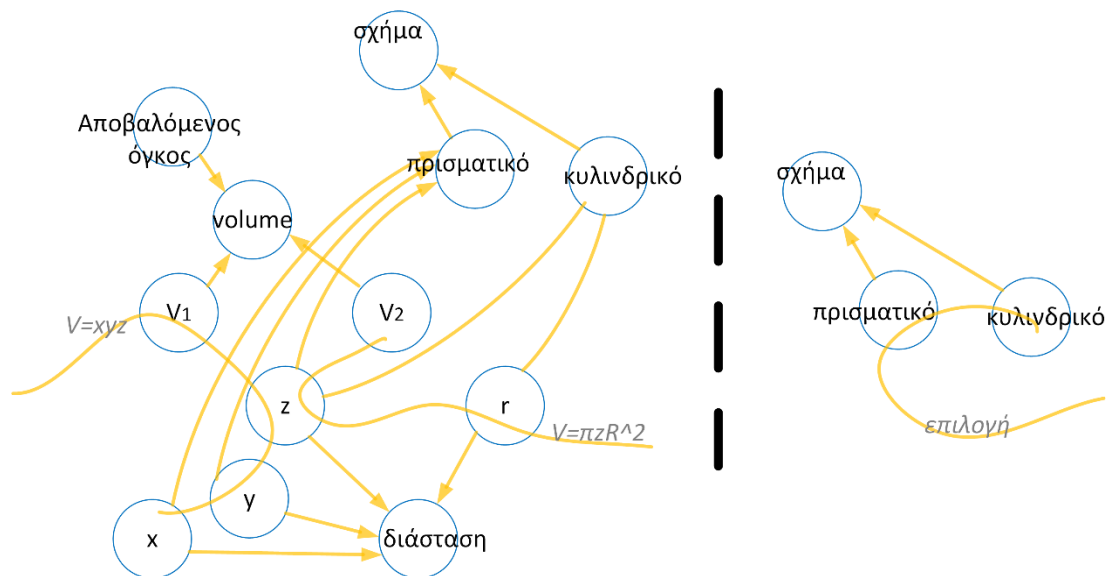
αξιολογεί ταυτόχρονα, όπως για παράδειγμα το σχήμα του κοπτικού εργαλείου το οποίο μπορεί να είναι πρισματικό ή κυλινδρικό φυσικά με τις επιπτώσεις που το καθένα έχει στον αποβαλλόμενο όγκο υλικού (Σχήμα 24). Με αυτό τον τρόπο μπορεί ο μηχανικός να έχει μια ασφαλή, σε αυτό το επίπεδο, αυτοματοποίηση.



Σχήμα 22 Σχηματική ένωση υπο-δικτύων.



Σχήμα 23 (αριστερά) Αναπτυσσόμενη τάση. / (δεξιά) Αναπτυσσόμενη πίεση.



Σχήμα 24 Σενάρια διαφορετικής γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου.

Επίλυση του Συναπτικού Δικτύου

Για λόγους ανάλυσης, οποιοδήποτε εναλλακτικό σενάριο μπορεί να ερμηνευτεί/μελετηθεί, εφαρμόζοντας τις τιμές των παραμέτρων του σε ιδέες μέσα στο SN και εξετάζοντας τις επιπτώσεις τους στους τελικούς στόχους του του σχεδιασμού (*SN goals*).

Εφόσον η θεωρία των SN χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό, ο χρήστης πρέπει να αφήσει συνειδητά κάποιες παραμέτρους με μεταβλητή τιμή, προκειμένου να τις υπολογίσει για τις οριακές καταστάσεις των κριτηρίων των στόχων του. Αυτές οι μεταβλητές αποτελούν τους *σχεδιαστικούς βαθμούς ελευθερίας* (*design DOFs*). Η οπτική αναπαράσταση του SN, μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώριση των πιο κατάλληλων για β.ε. μεταβλητών. Ιδανικά, τέτοιες μεταβλητές είναι μεν αρκετά συνδεδεμένες με τους στόχους, αλλά είναι σχετικά ανεξάρτητες μεταξύ τους προκειμένου να μην αναδύονται αντικρουόμενες καταστάσεις. Ο αριθμός των σχεδιαστικών β.ε. που δέχονται μοναδική λύση, περιορίζεται σύμφωνα με τη θεωρία, από τον αριθμό και τη μορφή των σχεδιαστικών στόχων. Είναι πιθανό να μην υπάρχει λύση για συγκεκριμένες απαιτήσεις των στόχων. Αν για μια συγκεκριμένη μορφοποίηση ενός προβλήματος, οι σχεδιαστικοί β.ε. επιδέχονται μία και μοναδική λύση, η ανάδειξη περισσότερων β.ε., σαφώς θα δώσει και απειρία λύσεων στο πρόβλημα. Πιο κάτω γίνεται επίδειξη μιας πιθανής λύσης, στο πρόβλημα της φθοράς των κοπτικών δίσκων του μετροπόντικα: Με κριτήρια στόχων τη χαμηλή και ομοιόρφη φθορά των δίσκων (στις διευθύνσεις x και R), επιλέγεται να μην γίνουν σχεδιαστικές αλλαγές στη γεωμετρία της κεφαλής του μετροπόντικα (γωνία β , θέση R , μήκος της μάσκας L_m), ούτε στη γεωμετρία του κοπτικού δίσκου (r , r_{in} , $f(x)$). Η επιρροή στην επιφανειακή σκληρότητα και στις ιδιότητες της φθοράς του εργαλείου θα προκύπτει από την εφαρμογή μιας σκληρής επικάλυψης στην επιφάνεια του δίσκου. Για ομοιόμορφη φθορά, ο στόχος βρίσκεται στα σημεία όπου οι καμπύλες του σχήματος 19(δεξιά) ακουμπούν στον οριζόντιο άξονα. Παρατηρώντας το SN στην περιοχή γύρω από το στόχο της ομοιόμορφης φθοράς, γίνεται εμφανές για το μοντέλο, ότι κάθε κοπτικός δίσκος πρέπει σίγουρα να εξοπλίζεται με επικάλυψη (t_m) πάχους μεγαλύτερου από ένα ελάχιστο, το οποίο προκύπτει από την επαλληλία των σχέσεων για το πάχος ανάλογα με την R θέση του και κατά μήκος (x) της επιφάνειάς του. Οι μαθηματικές εκφράσεις είναι οι εξ. 13-15:

$$(13) \quad t_{(x)} = \frac{k_1 x^2}{k_2 x^2 + k_3 x + k_4}$$

$$(14) \quad t_{offset(R)} = \frac{k_5}{k_6 R^2 + k_7 R + k_8}$$

$$(15) \quad t_m = t(x) + t_{offset(R)} = \frac{k_1 x^2}{k_2 x^2 + k_3 x + k_4} + \frac{k_5}{k_6 R^2 + k_7 R + k_8}$$

Αντί να επιλεγεί η επικάλυψη και ειδικά το πάχος της, ως ο κύριο σχεδιαστικός β.ε., θα μπορούσε να επιλυθεί το πρόβλημα με τους ίδιους στόχους, επιλέγοντας κάποιους άλλους σχεδιαστικούς β.ε., χωρίς να πρέπει κατ'ανάγκη να αλλάξει σημαντικά το SN. Σε τέτοιες αναλύσεις φαίνεται η δυνατότητα ευελιξίας και η εναλλαξιμότητα με τη χρήση των SN.

Μιλώντας για ευελιξία, κανείς θα μπορούσε να μελετήσει σενάρια σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (διαφορετικές στροφές, πρόωση, υλικό πετρώματος κλπ). Επίσης θα μπορούσε κανείς να επεκτείνει το SN, προς την κατεύθυνση της ψαθυρής θραύσης, με κριτήριο η περιφερειακή δύναμη να υπερβεί ένα κρίσιμο επίπεδο, οπότε και ο μηχανισμός θα άλλαζε από κυκλική φθορά, σε απότομη θραύση με την ανάπτυξη μακρορωγμής.

Συμπεράσματα

Τα φαινόμενα γήρανσης στις κατασκευές είναι πολύπλοκα και απαιτούν ευελιξία στη μοντελοποίηση, προκειμένου να αντιμετωπίσουν διάφορους μηχανισμούς γήρανσης. Παρουσιάστηκε η εφαρμογή των SN στη σύνθεση των υπολογιστικών μοντέλων για τις θεμελιώδεις αρχές της γήρανσης (context), επιτρέποντας την εκτίμηση της συμπεριφοράς των διάφορων σχεδιαστικών λύσεων (object), με συγκεκριμένες παραμέτρους γήρανσης (goals). Ειδικά, μέσω της μελέτης του προβλήματος της φθοράς των κοπτικών εργαλείων του μετροπόντικα, τα SN χρησιμοποιήθηκαν για να προσφέρουν:

- Γραφική και αναλυτική αναπαράσταση της μοντελοποίησης του προβλήματος, σχετικά με τις συναρτήσεις γήρανσης των συγκεκριμένων μηχανισμών.
- Ανάδειξη ενός συστηματικού μοντέλου για την ευκολότερη ταυτοποίηση των object, context, goal ιδεών, δίνοντας μια ξεκάθαρη εικόνα του τι είναι σε θέση να αλλάξει ο μηχανικός μέσω της ανάλυσης και τι είδους αποφάσεις πρέπει να λάβει.
- Δυνατότητα επέκτασης του SN, εμπλουτίζοντάς το με μοντέλα παραγωγής περισσότερων σχεδιαστικών εναλλακτικών κάθε στιγμή.
- Βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών παραμέτρων σύμφωνα με διαφορετικούς στόχους.
- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του SN, ή υπό-δικτύων αυτού, είτε αλλάζοντας κάποιες τιμές των παραμέτρων εισόδου, είτε εξελίσσοντάς το.
- Το επόμενο στάδιο μελέτης, αφορά στην υλοποίηση αυτών των εννοιών σε υπολογιστικό περιβάλλον, ώστε ο χρήστης να μπορεί να αξιοποιήσει εύκολα ακόμα και τις δυνατότητες των SN που απαιτούν υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Εφαρμογή 2: Φθορα οδοντων κιβωτίου ελικοπτερου

Εισαγωγή

Η θεωρία που παρουσιάζεται πιο κάτω αφορά τα SN, τα οποία έχουν αναλυθεί και προηγουμένως, και εκτός των άλλων στοχεύουν εν μέρει και στη γεφύρωση του χάσματος των ήδη υπάρχουσών τεχνικών αντιμετώπισης προβλημάτων γήρανσης, με την προϋπόθεση ότι τέτοια πολύπλοκα μοντέλα απαιτούν ουσιαστικούς και υπολογίσιμους πόρους και χρόνο.

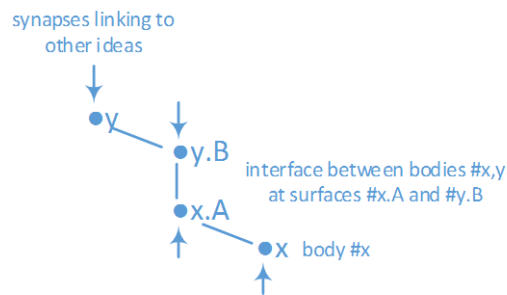
Σχεδιαστική Άλγεβρα

Στη βάση της ταυτοποίησης του προς μελέτη συστήματος, αρχικά δημιουργείται το σχετικό SN σε γραφική μορφή. Το γράφημα αργότερα, αναλύεται σε μαθηματικούς όρους υλοποιώντας τα σχετικά μαθηματικά μοντέλα των κομβικών συναρτήσεων γήρανσης. Αναλύονται διάφορες εναλλακτικές στη βάση του SN και παρουσιάζεται η ευελιξία της παρούσας μεθόδου. Η εισηγμένη σχεδιαστική άλγεβρα των SN και της OCG ανάλυσης, υπηρετεί την καλύτερη οπτικοποίηση και κατανόηση του προβλήματος, καθώς και την αλληλεπίδραση του σχεδιαστή με το πρόβλημά του ανά πάσα στιγμή. Με αυτό τον τρόπο, ο σχεδιαστής είναι ικανός να παρέμβει στο πρόβλημά του και να εξερευνήσει το σχεδιαστικό χώρο λύσεων σε κατευθύνσεις με διαφορετικούς στόχους, συνθήκες λειτουργίας και περιορισμούς.

Συναπτικά Δίκτυα

Εκφράζοντας για την κάθε προς μελέτη περίπτωση, τις συναφείς ιδέες για το SN (συντά συχνά συνεργαζόμενες **επιφάνειες** ή και **διεπιφάνειες**), καταλήγει κανείς να υλοποιεί τη σχεδιαστική άλγεβρα των ιδεών ταυτοποιώντας σημαντικούς συνδέσμους/χειρισμούς (συνάψεις) μεταξύ των ιδεών. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ένα μεγαλύτερο και γενικευμένο μοντέλο στη μορφή ενός SN, με ευπροσάρμοστο το επίπεδο πολυπλοκότητας, εξαρτώμενο πάντα από το επίπεδο λεπτομέρειας που επέλεξε ο σχεδιαστής. Δεδομένου ότι κάθε ιδέα, σύναψη ή υποσύστημα μπορεί να περιγραφεί/συσχετιστεί με ένα ή περισσότερα μαθηματικά μοντέλα, ένα γραφικά απεικονιζόμενο SN, μπορεί να αναλυθεί σε απλούστερα μοντέλα, τα οποία συνδεδεμένα δημιουργούν τη γενική εικόνα του SN.

Στο σχήμα 25 φαίνεται η στοιχειώδης σύνδεση των δύο μερών, ενός συναρμολογημένου συνόλου.



Σχήμα 25 Θεμελιώδες SN για τη μοντελοποίηση ενός multi-body συστήματος.

Ανάλυση OCG

Όπως τεκμηριώθηκε και σε προηγούμενες μελέτες, οι ιδέες ενός SN εκτός από τους στόχους (Goals), κατηγοριοποιούνται σε Objects και Context, συνδεόμενες μεταξύ τους με συνάψεις.

Στο κυνήγι των σχεδιαστικών στόχων, είναι πιθανό κανείς να επικεντρωθεί στη μελέτη συγκεκριμένων συμπεριφορών του συστήματος, δεδομένων διαφόρων σεναρίων λειτουργίας. Τα διαφορετικά σενάρια επιβάλλουν διαφορές στην Object-Context κατηγοριοποίηση, οπότε γίνεται αντιληπτό, ότι τα σενάρια αυτά για τη μελέτη της γήρανσης θα μπορούσαν, είτε να επιβάλλουν συνθήκες για τη μελέτη επιταχυνόμενης γήρανσης (παρέμβαση στο Context της γήρανσης), είτε να επιβάλλουν συνθήκες για τη μελέτη ημι-γηρασμένων συστημάτων (παρέμβαση στα Objects της γήρανσης). Υπό άλλες συνθήκες, θα ήταν αρκετά δύσκολο να μελετηθεί ένα φαινόμενο γήρανσης σε ένα νέο σύστημα.

Ταυτότητα του συστήματος: Μελέτη του κιβωτίου ενός ελικοπτέρου

Για το σκοπό αυτής της εργασίας, μελετήθηκε και παρουσιάζεται παρακάτω η περίπτωση της βλάβης στο κιβώτιο ενός ελικοπτέρου.

Η κύρια λειτουργία του κιβωτίου του κύριου άξονα ενός ελικοπτέρου είναι να διανέμει κίνηση (και ισχύ) από τις υψίστροφες οριζόντιες στροβιλομηχανές (κάποιες χιλιάδες RPM), στον χαμηλόστροφο κατακόρυφο κύριο άξονα (κάποιες εκατοντάδες RPM). Μια άλλη σημαντική λειτουργία του κιβωτίου, είναι η κατανομή της ισχύος των στροβιλομηχανών στον κύριο άξονα (ανύψωση και πρόωση του ελικοπτέρου) και στον άξονα της ουράς (σταθεροποίηση του ελικοπτέρου και ελιγμοί). Συνεπώς, οι κύριες λειτουργίες του κιβωτίου του κύριου άξονα, μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- Είσοδος κίνησης και ισχύος από δύο σχεδόν οριζόντιες στροβιλομηχανές και κατανομή τους στις δύο κύριες ανόμοιες εξόδους (κύριος άξονας και άξονας ουράς).
- Μείωση στροφών από μερικές χιλιάδες RPM σε μερικές εκατοντάδες RPM, όπου και λειτουργούν οι έλικες.
- Αύξηση της ροπής από τις κύριες μηχανές στον κατακόρυφο άξονα.

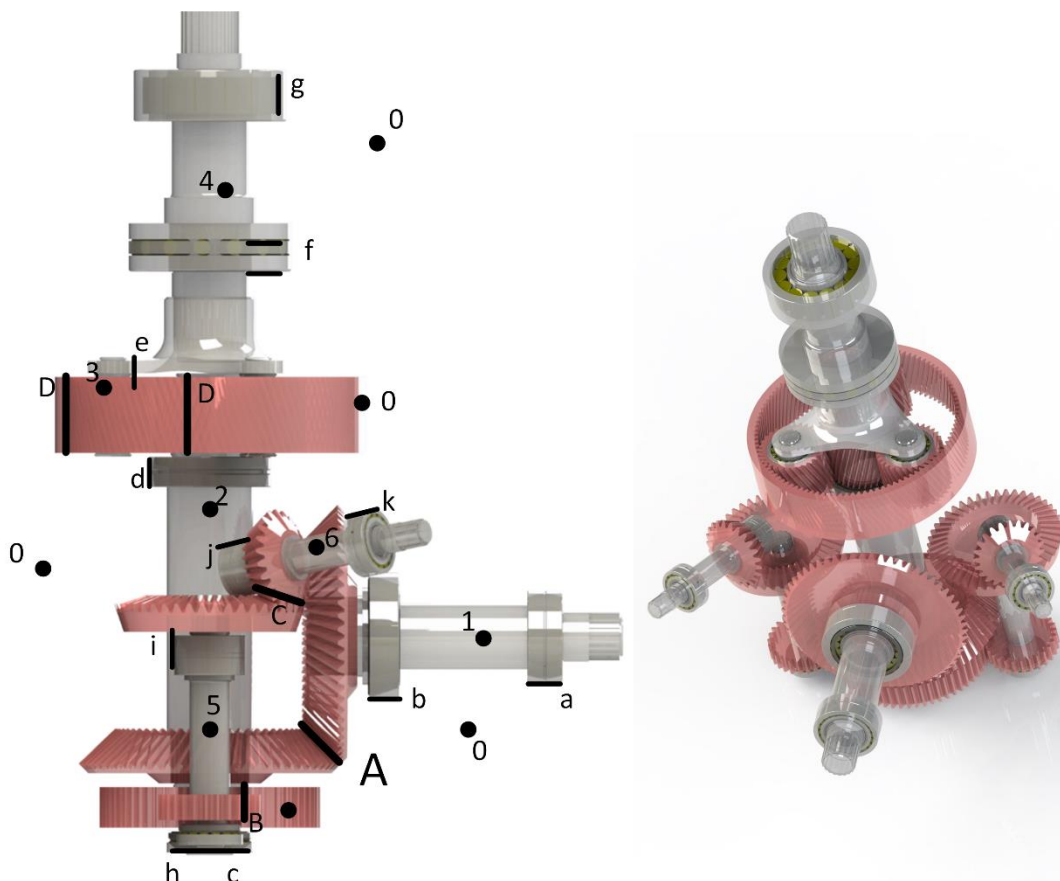
Ταυτόχρονα με τις πιο πάνω απαιτήσεις, το κιβώτιο θα πρέπει να διασφαλίζει τα εξής:

- Λειτουργία χωρίς σφάλματα (η οποία πρέπει να υποστηρίζει ταυτόχρονα, λειτουργικές απαιτήσεις όπως η απόδοση, αλλά και δομικές απαιτήσεις όπως η ακεραιότητα των στοιχείων μηχανών του).
- Διαχείριση/Ανοχή ανεπιθύμητων παράπλευρων προβλημάτων (δονήσεις, θόρυβος, αύξηση θερμοκρασίας).
- Ελεγχιμότητα σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά και σε συνθήκες αστοχίας υπο-συστημάτων του.

Τα κύρια μέρη του συστήματος, ταυτοποιούνται στον Πίνακα 1 και απεικονίζονται στο Σχήμα 26.

Πίνακας 1 Κύρια στοιχεία μετάδοσης κίνησης κιβωτίου ελικοπτέρου.

	στοιχεία	διεπιφ. ρουλεμ ών	συνεργ. οδόντω ν
assembly ατράκτου εισόδου	6.1/2	j	k C
assembly 2 ^{ης} ατράκτου	5.1/2	h	i C B
assembly κεντρικής ατράκτου	2	c	d B A D
assembly ατράκτου πλανήτη	3.1/2/3	e	e D E
assembly ατράκτου κύριου ρότορα	4	f	g E
assembly ατράκτου ουριαίου ρότορα	1	a	b A
κέλυφος κιβωτίου	0		



Σχήμα 26 Ταυτοποίηση των στοιχείων μετάδοσης κίνησης του κιβωτίου.

Πιο κάτω ακολουθεί μια γρήγορη OCG κατηγοριοποίηση των μερών του κιβωτίου λαμβάνοντας υπ'όψιν τις συνάψεις που υλοποιούνται σε φυσικό επίπεδο στο εσωτερικό του κιβωτίου.

Object (αντικείμενο σχεδιασμού/επιλογής):

- Γεωμετρία οδόντων
- Υλικά οδοντωτών τροχών
- Άτρακτος/Ρουλεμάν και επικουρικά στοιχεία μηχανών
- Μέθοδοι δεσίματος (mounting) και εσωτερικές αναδιατάξεις
- Λιπαντικά
- Πλαίσιο

Context (όχι αντικείμενο σχεδιασμού, προέρχεται από τις προδιαγραφές του συστήματος και τους φυσικούς νόμους):

- Ροπές/ταχύτητες/περιστροφές εισόδων/εξόδων.
- Κατεύθυνση ατράκτων εισόδων/εξόδων.
- Γενική συμπεριφορά του κιβωτίου (συμπεριλαμβανομένης της συμπεριφοράς στην αντίσταση κατά της φθοράς και στη γήρανση).

Καθώς, σύμφωνα με τη θεωρία των SN, τα Objects και Context ενώνονται με συνάψεις, είναι καίριας σημασίας να οριστούν οι εξισώσεις κατάστασης, ισορροπίας και συμβατότητας οι οποίες συνδέουν τις προαναφερθείσες ιδέες για τη δημιουργία συναρτήσεων γήρανσης.

Αργότερα πραγματοποιούνται μαθηματικά και γραφικά (με όρους SN), τα κινηματικά, τα δυναμικά και τα μεγέθη της γήρανσης του κιβωτίου, με σκοπό εν τέλει να συσταθεί το τελικό SN, που ερμηνεύει τις συμπεριφορές του.

Ονομαστικά μοντέλα λειτουργίας και θεμελιώδη στοιχεία Συναπτικών Δικτύων

Ανάλυση επαφής οδόντων (γεωμετρία και κινηματική ανάλυση)

Εφόσον αυτή η εργασία επικεντρώνεται στο να μοντελοποιήσει φαινόμενα γήρανσης, είναι ουσιώδες το να οριστούν τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη δυναμική (δύναμη, ροπή) και κινηματική (θέση, ταχύτητα) ανάλυση της κυλινδρικής (ευθείας/ελικοειδούς) μεταδόσης κίνησης με οδοντωτούς τροχούς. Σε πραγματικές εφαρμογές, όπως το κιβώτιο ενός ελικοπτέρου, η συνεργασία των οδόντων είναι σπανίως πραγματικά ομαλή (conjugate), οπότε απαιτείται ένα σύγχρονο και αληθοφανές μοντέλο το οποίο να συμπεριλαμβάνει τα διάφορα σφάλματα στη μετάδοση κίνησης.

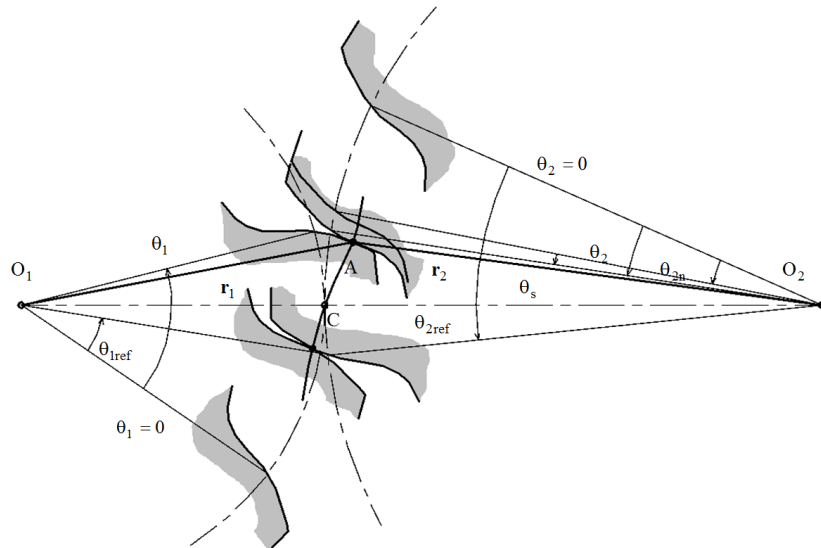
Ένα τέτοιο μοντέλο συμπεριλαμβάνεται στην εργασία [12] το οποίο περιγράφει την μη-ομαλή συνεργασία οδόντων, βασιζόμενο στις γενικευμένες εξισώσεις για τις επαπτόμενες κατατομές. Η εργασία καταλήγει σε μια ρητή βαθμωτή έκφραση. Αυτό το μοντέλο διευκολύνει τη σύγκλιση και σε γενικά υπολογιστικά προβλήματα, καταλήγει σε ίδια ή καλύτερα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα μοντέρνα μοντέλα.

Οι βασικές εξισώσεις, οι οποίες για ομαλή μετάδοση παράγουν το νόμο της οδοντώσεως είναι η βάση για τη μετάδοση ισχύος με οδόντες καθώς καθορίζουν ένα κοινό σημείο επαφής (εξίσωση 16), όπου παρατηρείται επαπτομενική επαφή των δύο κατατομών. Ακόμα και στην περίπτωση ολίσθησης των κατατομών των οδόντων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, αυτές είναι ακόμα οι πρωτεύουσες προϋποθέσεις. Η ολίσθηση των κατατομών μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη γωνία ολίσθησης (θ_s), όπως φαίνεται από την εξίσωση 18.

$$(16) \quad \vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \vec{a}_{12}$$

$$(17) \quad \left(\frac{\partial \vec{r}_1}{\partial r_1} \times \frac{\partial \vec{r}_2}{\partial r_2} \right) \cdot \vec{x}_3 = 0$$

$$(18) \quad \theta_2 - \theta_{2n} = \theta_s$$



Σχήμα 27 Γεωμετρικά μεγέθη των κατατομών για την εύρεση των εξισώσεων συνεργασίας [12]

Όταν οι διανυσματικές συναρτήσεις των δύο κατατομών, το μητρώο περιστροφής γύρω από τον κάθετο άξονα x_3 και το διάνυσμα της απόστασης των δύο κέντρων προστεθούν στις εξισώσεις 16 και 17, τότε προκύπτουν οι εκφράσεις 19 και 20, οι οποίες συνδέουν με αυτό τον τρόπο τις ανεξάρτητες θέσεις των τροχών, με το σχήμα των κατατομών τους. Η εξίσωση 21 παράγεται μετά από διανυσματική ανάλυση στον τροχό 2 του σχήματος 27 και με αυτή, ολοκληρώνεται το σύνολο των εξισώσεων για τη συνεργασία.

$$(19) \quad \vec{R}_1 \vec{f}_1 - \vec{R}_2 \vec{f}_2 = \vec{a}_{12}$$

$$(20) \quad \left(\vec{R}_1 \frac{d\vec{r}_1}{dr_1} \times \vec{R}_2 \frac{d\vec{r}_2}{dr_2} \right) \cdot \vec{x}_3 = U_3(\theta_1, r_1, r_2, \theta_2) = 0$$

$$(21) \quad \theta_2 = \left[\frac{\vec{f}_2 \times (\vec{R}_1 \vec{f}_1 - \vec{a}_{12})}{\|\vec{f}_2 \times (\vec{R}_1 \vec{f}_1 - \vec{a}_{12})\|} \right] \cdot \vec{x}_3 \cos^{-1} \left[\frac{1}{r_2^2} \vec{f}_2 \cdot (\vec{R}_1 \vec{f}_1 - \vec{a}_{12}) \right] =$$

$$= U_2(\theta_1, r_1, r_2)$$

Συνδυασμένες οι πιο πάνω εξισώσεις, δημιουργούν την τελική βαθμωτή έκφραση. Για δεδομένη τιμή της γωνίας ϑ_1 (η οποία είναι η μόνη ανεξάρτητη παράμετρος) και της γεωμετρίας των οδόντων, κανείς θα μπορούσε να υπολογίσει τα $r_1, r_2, \vartheta_2, \vartheta_3$ από το μοντέλο των εξισώσεων 22, 23 και 24.

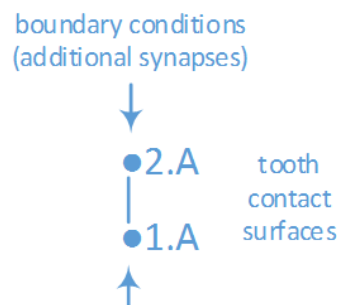
$$(22) \quad U_3(\theta_1, r_1, U_1(\theta_1, r_1), U_2(\theta_1, r_1, U_1(\theta_1, r_1))) = 0$$

$$(23) \quad r_2 = \|\vec{R}_1 \vec{f}_1 - \vec{a}_{12}\| = U_1(\theta_1, r_1)$$

$$(24) \quad \theta_2 = U_2(\theta_1, r_1, r_2)$$

Όπου, $\vartheta_{1,2}$ είναι οι γωνίες τοποθέτησης των τροχών 1 και 2, θ_3 είναι η γωνία ολίσθησης και $r_{1,2}$ είναι οι ακτίνες των σημείων επαφής από τα κέντρα των δύο τροχών O_1, O_2 αντίστοιχα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 27.

Η μετάφραση του μοντέλου της επαφής των οδόντων σε SN, είναι ξεκάθαρη, καθώς είναι απλά μια επαφή ανάμεσα σε ένα ή περισσότερα ζεύγη γεωμετρικά ορισμένων επιφανειών οδόντων. Αν οι επιφάνειες των οδόντων του τροχού #1 επισημαίνονται ως #1.A και οι αντίστοιχες του τροχού #2 ως #2.A, τότε το θεμελιώδες SN που απεικονίζει τη συνεργασία στη διεπαφή, φαίνεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28 Θεμελιώδες SN για τη μοντελοποίηση της διεπιφάνειας συνεργασίας οδόντων.

Δυναμική ανάλυση

Διατηρώντας τις πιο πάνω παραμέτρους της κινηματικής ανάλυσης και με δεδομένη την ανάγκη για μια δυναμική προσομοίωση των σφαλμάτων λειτουργίας σε οδόντες με ευθεία οδόντωση, στην εργασία [13] μοντελοποιήθηκε η επίδραση που έχουν: το φαινόμενο της ζεύξης στροφικής και πλευρικής δόνησης (Fhyst), η τριβή των οδόντων (Ffrict) και η ελαστική συμπεριφορά τους (F elast), στη μετάδοση ισχύος.

Το δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, προσαρμόστηκε σε ένα ζεύγος ευθέων οδοντωτών τροχών, σε σύμπλεξη με έναν κινητήρα και ένα στοιχείο πέδησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις προαναφερθείσες εξωτερικές δυνάμεις, για τα σφάλματα λειτουργίας. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου, βασίζεται στους τρεις βαθμούς ελευθερίας: για παράδειγμα η κίνηση του πινιόν (β.ε. 1), η κίνηση του συνεργαζόμενου (β.ε. 2) και το στοιχείο πέδης (β.ε. 3). Στην περίπτωση του

ελικοπτέρου, θα χρησιμοποιηθεί η μοντελοποίηση των δύο πρώτων β.ε.. Όπως φαίνεται στις εξισώσεις 25, 26 και 27, τα εξωτερικά φορτία συσχετίζονται με υποκοπές λειτουργίας των οδόντων (δ_k), την καμπτική δυσκαμψία ενός οδόντα (k_k), το συντελεστή απόσβεσης (c_{hyst}) και την κατατομή των οδόντων (f_k).

$$(25) \quad F_{k,elast} = -|\delta_k| k_k \vec{n}_k$$

$$(26) \quad F_{k,hyst} = C_{hyst} \frac{d|\delta_k|}{dt} \vec{n}_k$$

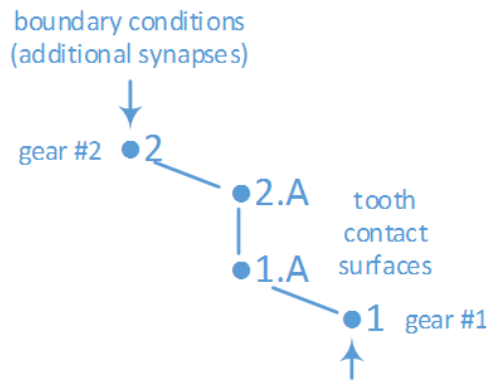
$$(27) \quad F_{k,frict} = |\delta_k| f_k k_k \vec{m}_k$$

Το τελικό σύνολο των εξισώσεων που απαρτίζει μόνο το μη-γραμμικό δυναμικό μοντέλο, είναι ένα σύστημα πέντε δευτεροβάθμιων διαφορικών εξισώσεων, το οποίο σε επαλληλία με την ανάλυση επαφής των οδόντων, παράγει τα αποτελέσματα για τη δυναμική συμπεριφορά των οδόντων. Οι εκφράσεις του μοντέλου φαίνονται στις εξισώσεις 28 και 29, από όπου και διαφαίνεται ότι οι παράμετροι που περιγράφουν την ενδογενή συμπεριφορά του τροχού (δυσκαμψία, απόσβεση, μάζα), συσχετίζονται με τη διέγερση του συστήματος (λόγω εξωτερικών φορτίων και διακυμάνσεων της γεωμετρίας). Για την περίπτωση του ελικοπτέρου, οι δύο πρώτοι βαθμοί ελευθερίας είναι αναγκαίοι.

$$(28) \quad J_j \frac{d^2 \theta_j}{dt^2} + D_j \frac{d \theta_j}{dt} - \vec{x}_3 \sum_k \left[\vec{r}_j (F_{elast} + F_{hyst} + F_{frict}) \right] - E_{shaft} \left(\frac{d \theta_{j-1}}{dt} - \frac{d \theta_j}{dt} \right) - G_{shaft} (\theta_{j-1} - \theta_j) = 0$$

$$(29) \quad M_j \frac{d^2 s_j}{dt^2} + C_j \frac{ds_j}{dt} + K_j s_j - \sum_k (F_{elast} + F_{hyst} + F_{frict}) = 0$$

Η μετάφραση του δυναμικού συστήματος του ζεύγους οδοντωτών τροχών σε SN, είναι ουσιαστικά η απεικόνιση δύο στερεών αντικειμένων σε επαφή. Αν οι επιφάνειες των οδόντων του τροχού #1 επισημαίνονται ως #1.A και οι αντίστοιχες του τροχού #2 ως #2.A, τότε το θεμελιώδες SN που απεικονίζει τη συνεργασία στη διεπαφή, φαίνεται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 29 Θεμελιώδες SN για τη μοντελοποίηση ενός ζεύγους οδόντων.

Μοντέλα γήρανσης, ζεύξη των μοντέλων γήρανσης και υλοποίηση του θεμελιώδους Συναπτικού Δικτύου

Όταν γίνεται διερεύνηση των πιο συνηθισμένων μηχανισμών αστοχίας ενός συναρμολογήματος με ακρίβεια κιβωτίου, το λιπαντικό είναι κρίσιμο στοιχείο από το οποίο εξαρτάται συνήθως η αστοχία λόγω λίπανσης. Η κύρια λειτουργικότητα του λιπαντικού στα κιβώτια, είναι η αποτροπή της φθοράς. Όταν γίνεται αναφορά στη γήρανση των οδοντωτών τροχών, δύο είναι οι πρωτεύοντες μηχανισμοί, η γήρανση λόγω αποβολής υλικού και η γήρανση λόγω ρωγμάτωσης.

Όσον αφορά στη φθορά λόγω αποβολής υλικού, δύο είναι τα κύρια φαινόμενα αστοχίας, το scoring/scuffing (adhesive φθορά) και η abrasive φθορά, φαινόμενα με εκτενή ανάλυση στη βιβλιογραφία για δεκαετίες. Αυτά τα φαινόμενα χαρακτηρίζονται και βασίζονται κατά πολύ, στον κλασσικό και προαναφερθέντα νόμο PV [7] και αφορούν όλους τους οδόντες ενός τροχού. Υψηλές διατμητικές τάσεις του λιπαντικού φιλμ στην επιφάνεια των κατατομών, προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή επαφής των οδόντων, οπότε και προκαλείται φθορά επικόλλησης (scuffing) λόγω: σύνθετου τασικού πεδίου, γωνιώδους επαφής, πλεονάζουσων δονήσεων και χαμηλής συνεκτικότητας λιπαντικού. Αυτός ο μηχανισμός δεν απαιτεί την ύπαρξη ακαθαρσιών στο λιπαντικό για να ενεργοποιηθεί, παρ' όλ' αυτά, σε ένα κιβώτιο με αρκετά μη-καθαρό λιπαντικό, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εκδηλωθεί έντονη abrasive φθορά. Εξ' αιτίας της μηδενικής ταχύτητας ολίσθησης στην περιοχή του κύκλου κύλισης και των χαμηλών Hertzian τάσεων στην κεφαλή του οδόντα (ειδικά στους ελαφρώς φορτισμένους οδόντες), στην ενδιάμεση περιοχή αυτών των δύο, εμφανίζεται κυρίως το φαινόμενο του scoring/scuffing. Στο τέλος της τροχιάς επαφών, όπου και η σχετική ταχύτητα παίρνει τις μέγιστες τιμές της, το φαινόμενο παρουσιάζει τις σοβαρότερες επιπτώσεις.

Στην περίπτωση του δεύτερου κύριου μηχανισμού γήρανσης σε οδοντωτούς τροχούς, δηλαδή τη γήρανση λόγω ρωγμάτωσης, το pitting και η θραύση του οδόντα στον πόδα, είναι τα κυριότερα φαινόμενα. Καμπτικές τάσεις προκαλούν τη θραύση οδόντα, ενώ διατμητικές προκαλούν το pitting. Το pitting είναι γενικά το πιο συχνά εμφανιζόμενο φαινόμενο φθοράς στους οδοντωτούς τροχούς, καθώς προκαλείται από συνδυασμό των τύπων αστοχίας I και II. Εστιάζοντας στο μηχανισμό του pitting, οι διατμητικές τάσεις κάτω από την επιφάνεια του οδόντα, φτάνουν στη μέγιστη τιμή τους ακριβώς κάτω από το σημείο επαφής. Έτσι, δημιουργείται μία ρωγμή λόγω mode II (διάτμηση στο επίπεδο) και αναπτύσσεται προς την επιφάνεια, κινούμενη στη μέγιστη κλίση του διανύσματος της τάσης. Στην επιφάνεια, όπου το λιπαντικό αποκτά υψηλή πίεση στο σημείο κύλισης (υψηλές Hertzian τάσεις), αυτό εισχωρεί στη μικρορωγμή και τη διευρύνει σε mode I (εφελκυσμός). Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου η ρωγμή βγει ξανά στην επιφάνεια του οδόντα σε ένα γειτονικό σημείο και έτσι αφήνει πίσω της μία κοιλότητα (pit). Σε αντίθεση με το μηχανισμό ανάπτυξης μικρορωγμής του pitting, η θραύση του οδόντα εκκινεί από μία στοχαστική απλή ρωγμή στον πόδα του οδόντα, λόγω καμπτικής καταπόνησης. Έτσι το λιπαντικό εισχωρεί στη ρωγμή βοηθώντας την εναλλασσόμενη κάμψη στην ανάπτυξη της μακρορωγμής σε τύπο I, οπότε και κάποια στιγμή επέρχεται σοβαρή υποβάθμιση της αντοχής του οδόντα και κατ'επέκταση θραύση και δημιουργία εκκοίλανσης.

Γήρανση λόγω αποβολής υλικού (Φθορά τύπου scoring/scuffing)

Ο ευρέως αποδεκτός νόμος φθορά PV, χρησιμοποιείται ως το κύριο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση προβλημάτων αποβολής υλικού. Ο Almen το 1950 [14], επέκτεινε τον κλασικό PV νόμο σε περιπτώσεις αντίστασης στο scuffing, οπότε εκτός από την κάθετη πίεση και τη σχετική ταχύτητα, εισάγεται και η απόσταση μεταξύ του κύκλου κύλισης και του σημείου άσκησης της μέγιστης πίεσης στο κατά μήκος της τροχιάς επαφών που είναι ανάλογη της αναπτυσσόμενης ταχύτητας ολίσθησης δημιουργώντας την έκφραση 30:

$$(30) \quad (PVT)_G = \frac{\pi n_p}{360} \left(1 + \frac{N_p}{N_G} \right) (\rho_G - R \sin \varphi_t)^2 P_G$$

Όπου N_p , N_G είναι οι αριθμοί των οδόντων πινιόν και συνεργαζόμενου, n_p είναι η περιστροφική ταχύτητα του πινιόν, ρ_G είναι η ακτίνα καμπυλότητας στην κεφαλή, R είναι η ακτίνα του κύκλου κύλισης, φ_t είναι η εγκάρσια γωνία οδόντωσης και P_G είναι η μέγιστη Hertzian τάση επαφής στην κεφαλή.

Εκτός από αυτό το κριτήριο αστοχίας, οι ερευνητές που μελέτησαν τα φαινόμενα αποβολής υλικού, κατέληξαν σε κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας του λιπαντικού, όπως και σε κάποιους δείκτες για την αντίσταση σε scoring/scuffing. Αρχικά, ο Blok [15] πρότεινε την έκφραση (16) για την flash θερμοκρασία (T_f), που είναι η κρίσιμη θερμοκρασία διάσπασης του λιπαντικού φιλμ, θεωρώντας ως κρίσιμους παράγοντες φθοράς: τις γραμμικές ταχύτητες των οδόντων (V_1, V_2), το φορτίο (w), τη θερμική αγωγιμότητα (λ), την ειδική θερμοχωρητικότητα (c), την πυκνότητα του υλικού (ρ) και το πάχος του φιλμ του λιπαντικού (a). Η flash θερμοκρασία θέτει το θερμοκρασιακό όριο, που αν ξεπεραστεί, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστεί scuffing. Αργότερα, ο Kelley το 1952 [17] και ο Dudley το 1954 [16], βελτίωσαν την έκφραση της flash θερμοκρασίας εισάγοντας στο μοντέλο την επιφανειακή τραχύτητα και την ενεργή θέση της κατατομής του οδόντα. Η κατά AGMA έκφραση 32 για τη θερμοκρασία επαφής (TC), η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αντίστασης στο scuffing, περιέχει τον δείκτη του scoring (εξίσωση 33), ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση παίζει το ρόλο του ορίου για την πρόβλεψη για scuffing.

$$(31) \quad T_f = \frac{1.11\mu w(V_1 - V_2)}{(\sqrt{V_1} + \sqrt{V_2})\beta \cdot 2a}$$

$$(32) \quad T_c = T_i + SI \cdot Z_t \cdot \frac{50}{50 - S}$$

$$(33) \quad SI = \left(\frac{W_{te}}{F_e}\right)^{3/4} \frac{n_p^{1/2}}{P_d^{1/4}}$$

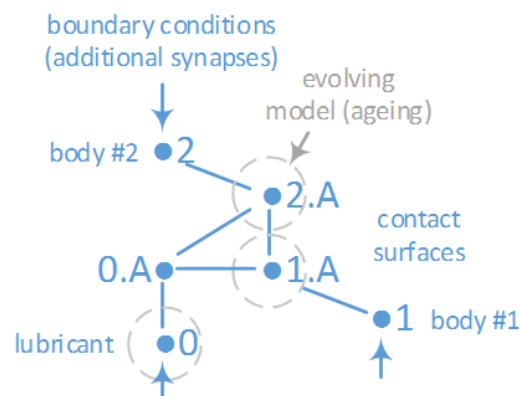
$$(34) \quad Z_t = 0.0175 \frac{\left(\sqrt{\rho_p} - \sqrt{\frac{N_p}{N_g} \rho_g}\right) P_d^{1/4}}{(\cos \varphi_t)^{3/4} \left(\frac{\rho_p \rho_g}{\rho_p + \rho_g}\right)^{1/4}}$$

Όπως προαναφέρθηκε, το scuffing εμφανίζεται έντονα στην περιοχή του τέλους της τροχιάς επαφών, καθώς σε εκείνες τις θέσεις η σχετική ταχύτητα (V) και η απόσταση ολίσθησης (T), παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους και κατ'επέκταση προκαλούν τη μέγιστη τιμή του τροποποιημένου νόμου PVT . Στο σχήμα 30 [18], φαίνονται οι ισοχρωματικοί κροσσοί που φανερώνουν το τασικό πεδίο στο τέλος της τροχιάς επαφών σε μία κατάσταση διπλού ζεύγους επαφής. Με τη χρήση υπολογιστικών (π.χ. FEA) και πειραματικών μεθόδων (π.χ. φωτοελαστικότητα, καυστικές, υπέρηχοι), προκύπτει η κατανομή των τάσεων κατά μήκος της ενεργής εξελιγμένης.



Σχήμα 30 Χρήση της μεθόδου της φωτοελαστικότητας για απεικόνιση των ισοχρωματικών μοτίβων της τάσης διπλού ζεύγους οδόντων (αριστερά) και απλού ζεύγους οδόντων (δεξιά). [18]

Η υλοποίηση σε SN, της προκαλούμενης από τριβή φθοράς ενός ζεύγους συνεργαζόμενων οδόντων, είναι ουσιαστικά δύο σώματα σε σύνδεση, συμπεριλαμβανομένου και του λιπαντικού μέσου. Αν το λιπαντικό επισημαίνεται ως σώμα #0, η επιφάνεια επαφής του σώματος #1 ως #1.A και η αντίστοιχη επιφάνεια του σώματος #2 ως #2.A, τότε το θεμελιώδες SN που περιγράφει το σύστημα, φαίνεται στο Σχήμα 31. Η βασική διαφορά μεταξύ αυτού του μοντέλου, το οποίο έχει χτιστεί με γνώμονα τη γήρανση, και ενός απλού μοντέλου λειτουργίας, έγκειται στο ότι το μοντέλο για τη γήρανση επηρεάζει ενδογενείς παραμέτρους του συστήματος και κατ'επέκταση εξελίσσεται αυτόματα με την πάροδο του χρόνου. Στην περίπτωση της μοντελοποίησης προβλημάτων φθοράς, αυτή η εξέλιξη μπορεί να είναι ευεργετική (running-in, polishing) ή επιβλαβής (αποβολή υλικού, υποβάθμιση λιπαντικού, abrasion κλπ).



Σχήμα 31 Θεμελιώδες SN για τη μοντελοποίηση της φθοράς λόγω αποβολής υλικού, σε ένα ζεύγος οδόντων.

Το μοντέλο της φθοράς δεν θα είχε αξία, εάν η αναμενόμενη φθορά δεν επηρέαζε τη λειτουργία του συστήματος, δηλαδή εάν δεν αλληλεπιδρούσαν τα μοντέλα της φθοράς με τα εσωτερικά μοντέλα, αυτά της κινηματικής και της δυναμικής.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αυτή η αλληλεπίδραση μεταφράζεται ως η συνεχής αλλαγή της επιφάνειας συνεργασίας λόγω της φθοράς, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει άμεσα τα δυναμικά και κινηματικά αναπτυσσόμενα φαινόμενα.

Γήρανση λόγω ρωγμάτωσης (Κόπωση)

Το pitting είναι η πιο επιβλαβής από όλα τα είδη φθοράς στους οδοντωτούς τροχούς, αφού όσο περισσότερες εκκοιλάνσεις (pits) δημιουργούνται στην επιφάνεια συνεργασίας, τόσο αυτή μειώνεται, με αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση των Hertzian τάσεων κατά μήκος του οδόντα. Η ταχύτερη υποβάθμιση των χαρακτηριστικών είναι αναπόφευκτη και συμβαίνει κατά κόρον στο χαμηλότερο σημείο επαφής απλού ζεύγους οδόντων (LPSTC) του πινιόν στους ευθείς οδόντες. Σε αυτό το σημείο, ο κρίσιμος παράγοντας για το φαινόμενο του pitting, είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση συνδυαζόμενη με την ελάχιστη ισοδύναμη ακτίνα καμπυλότητας.

Σε όρους λειτουργικότητας και χρόνου ζωής, η κύρια διαφορά μεταξύ pitting και θραύσης οδόντος, είναι ότι οι οδόντες που έχουν υποστεί pitting, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν κανονικά για κάποιο διάστημα μετά την εμφάνιση του φαινομένου, σε αντίθεση με την περίπτωση της θραύσης του οδόντα, όπου η μετάδοση ισχύος παύει να είναι δυνατή μετά από τέτοια φθορά. Εφόσον το ένα φαινόμενο σχετίζεται με επιφανειακές τάσεις (pitting) ενώ το άλλο με καμπτικές τάσεις (θραύση οδόντος), η AGMA προτείνει συγκεκριμένες εκφράσεις (εξισώσεις 35 και 36) για τον υπολογισμό των αντίστοιχων αναπτυσσόμενων τάσεων. Αδιαφορώντας για το μηχανισμό φθοράς, τα προαναφερθέντα μοντέλα του Griffith και του Paris (επαναλαμβάνονται στις εξισώσεις 38 και 39), είναι τα θεμελιώδη κριτήρια για τη φθορά λόγω ρωγμάτωσης.

$$(35) \quad \sigma_t = \frac{F_t}{mbJ} K_0 K_u K_s K_m K_B \leq S_{t,cr} = \frac{S_{at} K_L}{S_F K_T K_R}$$

$$(36) \quad \sigma_C = C_P \sqrt{\frac{F_t}{bd_1 J} K_0 K_u K_s K_m C_F} \leq S_{c,cr} = \frac{S_{at} Z_N C_H}{S_H K_T K_R}$$

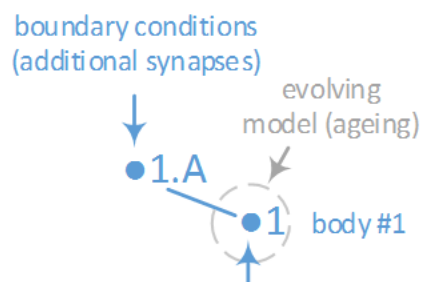
$$(37) \quad C_P = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\nu_P^2}{E_P} + \frac{1-\nu_G^2}{E_G} \right)}}$$

$$(38) \quad K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \leq K_{I,cr}$$

$$(39) \quad \frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

Η φύση της μετάδοσης κίνησης, παρέχει από μόνη της δευτερεύοντες μηχανισμούς αποτροπής της ανάπτυξης ρωγμών, που λειτουργούν ως μηχανισμοί ανακούφισης των τάσεων. Αρχικά, όλοι οι οδόντες υψηλών προδιαγραφών (συμπεριλαμβανομένων και αυτοί των κιβωτίων ελικοπτέρων), δέχονται σκλήρυνση με μικρό βάθος, αντί για ολική σκλήρυνση. Αυτό εξυπηρετεί στο ότι ο μη-σκληρυνόμενος πυρήνας του οδόντα, αντιστέκεται στη διάδοση ρωγμών που μπορεί να εκκινήσουν από την ευαίσθητη σε ρωγματώσεις, επιφάνεια. Δευτερευόντως, στην περίπτωση ανάπτυξης ρωγμής στον πόδα ενός οδόντα, αυξάνεται η ενδοτικότητα του, με αποτέλεσμα να φορτίζονται περισσότερο οι γειτονικοί οδόντες και να ανακουφίζεται αυτός.

Η υλοποίηση σε SN, του φαινομένου ενός τροχού να βρίσκεται σε καταπόνηση κόπωσης (pitting, θραύση οδόντα), είναι ένα σώμα #1 το οποίο υπόκειται σε κόπωση, στην επιφάνειά του #1.A. Το γράφημα του θεμελιώδους SN, φαίνεται στο Σχήμα 32. Και πάλι, στη μελέτη φαινομένων φθοράς, η φθορά μπορεί να έχει συνολικά είτε ευεργετικό (running-in), είτε επιβλαβές τελικό αποτέλεσμα.



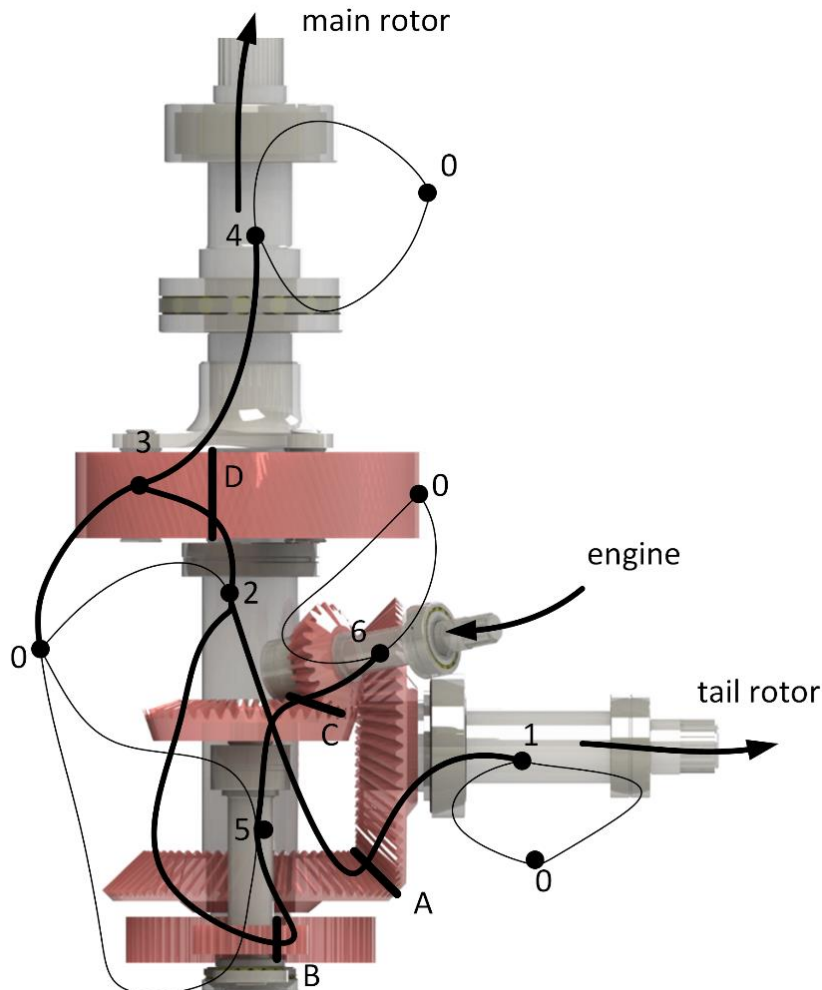
Σχήμα 32 Θεμελιώδες SN για τη μοντελοποίηση της κόπωσης.

Σε αυτή την περίπτωση, η σύνδεση των μοντέλων της γήρανσης, με τα μοντέλα λειτουργικότητας του συστήματος, σχετίζεται με τη συνεχώς μεταβαλλόμενη τιμή της δυσκαμψίας (και πιθανώς της επιφανειακής τραχύτητας) των επηρεαζόμενων στοιχείων του συστήματος, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, οπότε και επέρχεται πάλι αλλαγή των αρχικών τιμών.

Ότι αφορά στο σχεδιασμό κιβωτίων ελικοπτέρων, το συχνότερο φαινόμενο είναι το pitting ή micro-pitting (frosting) ακολουθούμενο από θραύση οδόντων. Παρ'όλο που μικρο-ρωγμές ενδέχεται να εμφανιστούν στον πόδα του οδόντα, αυτές δεν πρέπει να εκλαμβάνονται ως σημάδια φθοράς, αλλά μάλλον σαν ευκαιρία παρακολούθησης του φαινομένου. Η abrasive φθορά, περιορίζεται κυρίως με το φιλτράρισμα του λιπαντικού, ωστόσο νέες τεχνικές προτείνουν τη χρήση του υψηλής συνεκτικότητας καυσίμου των ελικοπτέρων, για λίπανση και ψύξη των στοιχείων του κιβωτίου, αφού οι μικρο-απώλειες ισχύος του κιβωτίου μπορούν να παίξουν το ρόλο της προθέρμανσης του καυσίμου και έτσι να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση.

Το συνολικό Συναπτικό Δίκτυο

Ένωση των υπο-δικτύων: Σύνθεση και Έλεγχος



Σχήμα 33. Το συνολικό SN του κιβωτίου του ελικοπτερού. Παχιές συνάψεις: κύριες λειτουργίες (μετάδοση κίνησης και ισχύος). Λεπτές συνάψεις: δευτερεύουσες λειτουργίες (φόρτιση ρουλεμάν, ευθυγράμμιση)

Ανάλυση του Συναπτικού Δικτύου: Απόσπαση του μαθηματικού μοντέλου

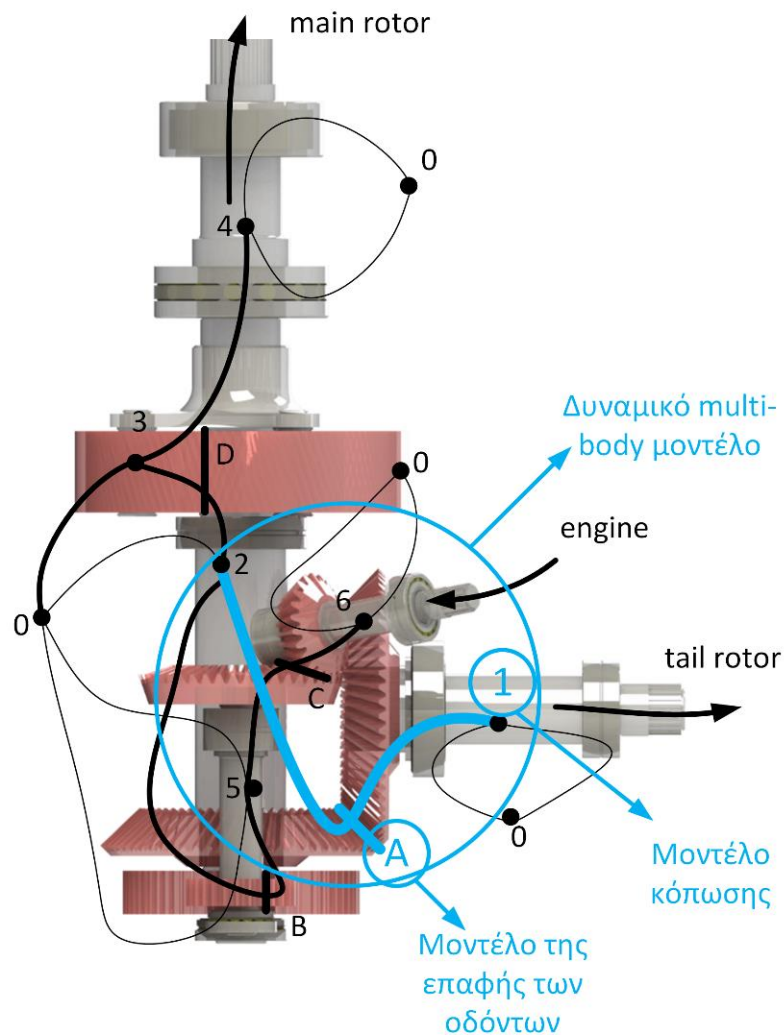
Όταν το SN είναι υλοποιημένο σε επίπεδο συστήματος, μπορεί να αναλυθεί αυτόματα για την εύρεση μοτίβων τα οποία αποτελούν δομικά μέρη του SN (όπως τα μοντέλα στα κεφάλαια 4 και 5). Για κάθε τέτοιο μοντέλο που εντοπίζεται, ανακτάται ο μαθηματικός φορμαλισμός του, ο οποίος εμπεριέχει τις τρέχουσες τιμές των παραμέτρων του. Η συνέπεια στον ορισμό των διαφόρων ιδεών του SN (ονόματα ιδεών, ονόματα συνάψεων), εξυπηρετεί στην ένωση των διαφόρων μοντέλων. Αυτή η διαδικασία φαίνεται οπτικά στο Σχήμα 34. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση

του SN, τότε ο χρήστης έχει στα χέρια του το συνολικό μαθηματικό μοντέλο του συστήματος.

Στην περίπτωση του κιβωτίου του ελικοπτέρου, το ολικό μοντέλο του συστήματος, περιλαμβάνει:

- τα κύρια σώματα του κιβωτίου 1, 2, 3.x, 4, 5.x, 6.x, 0
- τις επαφές των οδόντων, οι οποίες μοντελοποιούνται ως κοινές διεπαφές και παίρνουν τις ονομασίες A, B, C, D, E
- το μοντέλο επαφής των οδόντων (κινηματικό)
- το δυναμικό μοντέλο των κύριων σωμάτων
- τα μοντέλα φθοράς στις διεπιφάνειες
- τα μοντέλα κόπωσης στα σώματα

Σαφώς, υπάρχει δυνατότητα επέκτασης του μοντέλου στο υποσύστημα των ρουλεμάν (διεπιφάνειες a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k) και σε πολλά άλλα υποσυστήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 34.



Σχήμα 34 Απεικόνιση του διαχωρισμού των υπο-δικτύων. Δεν απεικονίζεται το υπο-δίκτυο της λίπανσης για λόγους οπτικοποίησης.

Διαμόρφωση του Συναπτικού Δικτύου - Ευελιξία του μοντέλου

Η αμεσότητα που παρέχει η γραφική απεικόνιση του SN στο χρήστη, του επιτρέπει τη γρήγορη αναγνώριση των πρωτευόντων, δευτερευόντων και λοιπών λειτουργιών σε οποιαδήποτε μορφοποίηση του συστήματος. Οι διάφορες λειτουργίες ταυτοποιούνται, ως μονοπάτια/βρόχοι συνάψεων, όπως για παράδειγμα η κύρια λειτουργία του κιβωτίου (μετάδοση κίνησης και ισχύος στον κύριο άξονα), η οποία αποδίδεται από το μονοπάτι συνάψεων 6.x-5.x-2-3.x-4, ή η δευτερεύουσα λειτουργία (μετάδοση κίνησης και ισχύος στον άξονα της ουράς), η οποία αποδίδεται από το μονοπάτι συνάψεων 6.x-5.x-2-1 και τέλος μια βοηθητική λειτουργία (μη-στρεπτική φόρτιση των ρουλεμάν και ευθυγράμμιση), η οποία αποδίδεται από το απλό μονοπάτι συνάψεων 1.b-1-1.a-0 ή και από το σύνθετο 2.c-2-2.d-0-5.x.i-5.x-5.x.h κλπ. Με αυτό τον τρόπο αναγνωρίζονται/προστίθενται στο υπάρχον σύστημα, επιπλέον υποσυστήματα.

Όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη μελέτη, μέσω των SN μπορούν να υλοποιηθούν και να εξεταστούν διάφορα “What if” σενάρια, αλλάζοντας οποιεσδήποτε παραμέτρους λειτουργίας, αλλά θέτοντας επίσης και διαφορετικούς σχεδιαστικούς βαθμούς ελευθερίας.

Συμπεράσματα

Η χρήση των SN σε αυτό το πρόβλημα, ανέδειξαν τα πλεονεκτήματά τους στο γενικό επίπεδο του συναρμολογήματος αναδεικνύοντας τα φυσικά, γεωμετρικά, κινηματικά και δυναμικά μεγέθη που επιφέρουν γήρανση στην κατασκευή.

- Γίνονται γραφικά ξεκάθαρα τα υπο-συστήματα/υπο-δίκτυα, της μελέτης και γίνεται αντιληπτή η σύνδεσή τους.
- Σε γραφική μορφή οι λειτουργίες που εκτελούνται μέσα στο κιβώτιο του ελικοπτέρου.
- Προφανής η μετάβαση από το γενικό επίπεδο του συναρμολογήματος, σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής που παρουσιάζουν λειτουργικό ενδιαφέρον, όπως οι κατατομές των οδόντων, οι διεπιφάνειες ατράκτων-ρουλεμάν και γενικά οπουδήποτε ενδιαφέρει το σχεδιαστή να επικεντρώσει το ενδιαφέρον του και να εισάγει νέα δεδομένα.
- Φυσικά, ισχύουν τα συμπεράσματα και της προηγούμενης μελέτης, του κοπτικού του TBM, καθώς οι δύο μελέτες έχουν κοινά τεχνικά στοιχεία.

Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη χρήση των ανοχών

Εισαγωγή

Η επίγνωση της ανάγκης για συστηματοποίηση μεν στις εφαρμογές του βιομηχανικού σχεδιασμού και για αυτοματοποίηση δε, επαναλαμβανόμενων διαδικασιών, επήλθε περί τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όπου ξεκίνησαν οι σημαντικές και καρποφόρες προσπάθειες για την ανάπτυξη εργαλείων επίλυσης *design-for-X* προβλημάτων, ανάδειξης δημιουργικότητας και βελτιστοποίηση σχεδιαστικών παραμέτρων. Το προϊόν που σχεδιάζεται, πάντοτε, αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο δομείται από αυτοτελή αλλά και ομαδοποιημένα μέρη, των οποίων η φυσική αλληλεπίδραση ολοκληρώνει τη λειτουργικότητα του συστήματος. Ο σκοπός του σχεδιασμού (*design intent*), ενσαρκώνεται μέσω της συναρμολόγησης του τελικού προϊόντος, δηλαδή όταν τοποθετούνται, συνδέονται και ρυθμίζονται τα μέρη του στο χώρο, ακολουθώντας συγκεκριμένους κανόνες. Είναι λοιπόν προφανές, πως η χωροταξική τοποθέτηση των διαφόρων μερών ενός συναρμολογήματος, καθορίζει κατά πολύ τη λειτουργικότητά του. Ακόμα περισσότερο, υπό το δεδομένο ότι η σχεδιαστική διαδικασία κινείται κυκλικά μεταξύ αφαιρετικών και συγκλινουσών επιλογών [19], [20] προκύπτει ακόμα πιο καίρια η διατήρηση μιας ξεκάθαρης σύνδεσης της λειτουργικότητας με την ενσάρκωση του σχεδιαστικού στόχου (*design intent*). Άρα, εμφανίζεται η ανάγκη για συστηματική προσέγγιση της διαδικασίας της συναρμολόγησης και ο τρόπος υποστήριξής της με γνώμονα τις μεθόδους σχεδιασμού.

Σχεδιαστικές θεωρίες για το assembly και πρότυπα για τις ανοχές

Σαφώς και υπάρχουν ώριμες σχεδιαστικές μεθοδολογίες και θεωρίες στον ακαδημαϊκό αλλά και στον κόσμο της βιομηχανίας, είτε γενικές είτε στοχευμένες στην επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Από αυτές τις μεθοδολογίες, οι οποίες αντιμετωπίζουν τη λειτουργικότητα των συναρμολογημένων κομματιών, καθώς και τη γεωμετρική τοποθέτησή τους στο χώρο υπό διάφορα πρίσματα, λείπει η ερμηνεία αυτών μέσω των γεωμετρικών ανοχών.

Αντίθετα, έμφαση δίνεται περισσότερο σε προβλήματα ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων [21], σε προβλήματα σχετικά με λήψη σχεδιαστικών αποφάσεων [22] ή και σε γενικευμένες μεθοδολογίες οι οποίες, παρ'ότι στιβαρές και πιθανώς εφαρμόσιμες, ακόμα διατηρούνται σε ένα γενικό επίπεδο χωρίς σημαντική ενσωμάτωση προβλημάτων λειτουργικότητας συναρμολογημένων προϊόντων [23], [24], [25]. Οι υπάρχουσες σχεδιαστικές θεωρίες, όπως αυτές έχουν αναπτυχθεί από τον Reich [25], προσπερνούν ακούσια το πρόβλημα της ουσιαστικής λειτουργικότητας του κάθε αντικειμένου στη σχεδιαστική διαδικασία. Αποτέλεσμα αυτής της δυσλειτουργίας, είναι να εκλείπει η επικοινωνία των λειτουργιών των διαφορετικών μερών με το ίδιο το συναρμολογημένο σύνολο, εφησυχάζοντας στην έκπτωση της σχετικής θέσης των μερών στο χώρο. Οι συντεταγμένες διαφορετικών μερών στο χώρο, δεν τα καθιστούν κατά ανάγκη συναρμολογημένο και λειτουργικό σύνολο. Ως τέτοια, χαρακτηρίζεται η ομαδοποίηση κάποιων, κατά τα άλλα άσχετων, αντικειμένων, όταν σε αυτά δωθούν ορισμένες προδιαγραφές. Τέτοιου είδους προδιαγραφές, είναι οι *γεωμετρικές ανοχές*, στις οποίες και επικεντρώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία.

Παρ'όλα αυτά, οι *γεωμετρικές ανοχές* σε ένα κομμάτι ή και μεταξύ κομματιών, είναι μια έννοια που υπάρχει σε κάθε συναρμολογημένο ή όχι προϊόν, ανεξάρτητα από το αν σταθμίζονται ή όχι κατά τη διαδικασία σχεδιασμού. Στη βιομηχανία, είναι απαραίτητο ο σχεδιαστής μηχανικός να απαιτήσει κάποιες τιμές σε ορισμένες γεωμετρικές ανοχές μεταξύ συνεργαζόμενων επιφανειών, αναδεικνύοντάς τες στα κατασκευαστικά σχέδια. Για το λόγο αυτό, διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές, διέπονται εκτεταμένα από διεθνή πρότυπα (ISO 2768 1/2, 5459, 1101). Οι ομαδοποιήσεις των ανοχών και οι κανόνες για την απεικόνισή τους, όπως ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα, δεν καλύπτουν το χάσμα μεταξύ τοποθέτησης ανοχών σε ένα σχέδιο και μετάφρασης της λειτουργίας ενός κομματιού/συναρμολογήματος σε γεωμετρικές ανοχές. Για την ακρίβεια, υπάρχουν άφθονες αποδείξεις στη βιομηχανική πρακτική, όπου ανοχές αντιγράφονται από σχέδια σε σχέδια, υλοποιώντας μια δίχως δικαιολόγηση, αντί για συστηματικά καθορισμένη, χωροταξική τοποθέτηση κομματιών, αδυνατώντας να οδηγήσουν σε έναν ξεχωριστό σχεδιασμό για κάθε κομμάτι. Οπότε είναι κρίσιμο το να υπάρχει ένα εργαλείο για το μηχανικό, μέσω του οποίου θα δίνονται απαντήσεις σε ερωτήματα όπως το τι υλοποιείται μέσω κάποιας συγκεκριμένης ανοχής, ή και το ποιους περιορισμούς στο τελικό συναρμολόγημα θέτει κάποια ανοχή, έτσι ώστε ο σχεδιαστής να πάρει τις ιδανικές αποφάσεις για τις γεωμετρικές ανοχές, σε συνδυασμό με τις αποφάσεις για τη χωροταξική τοποθέτηση των διάφορων μερών του συναρμολογήματος. Ένα τέτοιο εργαλείο, θα του παρέχει οδηγίες για την ορθότερη πρακτική στη διαχείριση των γεωμετρικών ανοχών, με γνώμονα την ικανοποίηση των απαιτήσεων λειτουργίας.

Σύγχρονα λογισμικά για το assembly και τις ανοχές

Όταν γίνεται αναφορά σε εργαλεία για το σχεδιαστή μηχανικό, τότε τα μοντέρνα CAD προγράμματα (SolidWorks, CATIA, Siemens, NX, PTC, Creo, Inventor, Rhino κλπ) κατέχουν περίοπτη θέση, λόγω της ευρείας χρήσης τους στη βιομηχανία και των ποικίλων λειτουργιών τους. Όσον αφορά στις ανοχές, τα προγράμματα είναι περιορισμένα στο βαθμό της απεικόνισης ανοχών στο περιβάλλον αλληλεπίδρασης τους και στο στοιχειώδη υπολογισμό κάποιων (όχι όλων) ανοχών σε επίπεδο ενός αντικειμένου. Σε καμία περίπτωση δεν υπάρχει υποστήριξη λειτουργικών γεωμετρικών ανοχών σε επίπεδο συναρμολογήματος στα υπάρχοντα CAD πακέτα, τακτική συνήθης στη βιομηχανία και ιδιαίτερα σε ειδικές κατασκευές (π.χ. CERN project “QXF Pole Inserts”).

Ο χρήση των ανοχών στα προγράμματα CAD, βρίσκεται ακόμα σε ένα μη προχωρημένο στάδιο όπου έχουν ξεπεραστεί μεν τα προβλήματα απεικόνισης των ανοχών, αλλά υπάρχει ακόμα έδαφος να καλυφθεί προκειμένου τα προγράμματα να μπορούν να δώσουν *ορθές* κατευθυντήριες γραμμές για τον ορισμό ανοχών καθώς και να συνδυάσουν τις διαστάσεις και τις ανοχές που πραγματικά επηρεάζουν τα υψηλού ενδιαφέροντος σχεδιαστικά στοιχεία του κομματιού/συναρμολογήματος, με σκοπό να αποφανθούν για τυχόν προβλήματα ή να προτείνουν συγκεκριμένες σχεδιαστικές κινήσεις.

Στη συγκεκριμένη εργασία, αφού έγινε διερεύνηση και χρήση των δυνατοτήτων του προγράμματος SolidWorks14, αργότερα έγινε εκτενής ανάλυση των δυνατοτήτων του γύρω από τα θέματα που αφορούν στις ανοχές, από τη διαδικασία του σχεδιασμού ακόμα. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, υλοποιήθηκε αρχικά ένα add-in για το SolidWorks με συγκεκριμένους ελέγχους για τον ορθότερο ορισμό διαστατικών και γεωμετρικών ανοχών σε επίπεδο ενός αντικειμένου (part), ενώ προτάθηκε και ένας ακόμα αλγόριθμος, χωρίς υλοποιημένο software, για την καλύτερη μοντελοποίηση της πραγματικής αλληλεπίδρασης των κομματιών ενός συναρμολογήματος (assembly), ενσωματώνοντας τη χωροταξική σύνδεση των κομματιών με τις κατάλληλες γεωμετρικές ανοχές σε επίπεδο συναρμολογήματος.

Εφαρμογή 3: Αλγόριθμος για Design-for-Part tolerancing

SolidWorks DimXpert και TolAnalyst

Στη φάση του σχεδιασμού αντικειμένων και συναρμολογημένων μηχανών/μηχανισμών, ο σχεδιαστής μηχανικός δεν έχει τη δυνατότητα να κάνει μετρήσεις ή παρατηρήσεις καθώς, σε αυτό το επίπεδο, τα αντικείμενα σχεδιασμού είναι θεωρητικά. Έτσι καλείται, χρησιμοποιώντας τα διάφορα διαθέσιμα εργαλεία, όχι μόνο να σχεδιάσει κάποια αντικείμενα στο χώρο, αλλά να υλοποιήσει και τις λειτουργικότητές του, που λύνουν το πρόβλημα που του έχει ανατεθεί. Η λειτουργία, λοιπόν, που επιτελούν τα μέρη που σχεδιάζει, πρέπει στο τέλος να είναι ξεκάθαρη και χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, επιτυγχάνεται μέσω της διαστασιολόγησης και των ανοχών, αρχικά σε επίπεδο αντικειμένου (part), οπότε και οι εταιρείες των διαφόρων σχεδιαστικών πακέτων έχουν αναπτύξει κατάλληλα εργαλεία που υπηρετούν αυτό το σκοπό. Στο SolidWorks, αυτά τα εργαλεία είναι το *DimXpert* και το *TolAnalyst*, δύο διαφορετικά add-ins που αφορούν στην οπτικοποίηση των ανοχών και την επαλληλία στους υπολογισμούς της ζώνης των ανοχών.

Σε ό,τι αφορά στο *DimXpert*, αυτό περιέχει εργαλεία ορισμού στοιχείων αναφοράς (data), διαστάσεων και ανοχών των features και γεωμετρικών ανοχών, όπως επίσης και γραφικές ενδείξεις συνέπειας στον ορισμό όλων αυτών και επιπλέον αλγόριθμο αυτόματης διαστατοποίησης (auto-dimensioning).

Σχετικά με το *TolAnalyst*, αυτό έπεται της χρήσης του *DimXpert* και ειδικεύεται στη μέτρηση δύο διαφορετικών οντοτήτων ενός συναρμολογημένου μηχανισμού, για τον υπολογισμό της μέγιστης και ελάχιστης απόστασης αυτών των δύο οντοτήτων. Λαμβάνει υπ' όψιν τη σειρά συναρμολόγησης των μερών του συναρμολογήματος και τους περιορισμούς που τίθενται σε κάθε αντικείμενο (όχι τα mates μεταξύ αντικειμένων).

Με δεδομένο ότι αυτά τα εργαλεία εμπεριέχουν ελέγχους και έχουν εισηγμένες ρουτίνες κανόνων στη διαστασιολόγηση, γίνεται αντιληπτό ότι το κοινό στο οποίο απευθύνονται αυτές οι εφαρμογές, είναι νέοι σχεδιαστές χωρίς αρκετή εμπειρία στη χρήση ανοχών και οι οποίοι προστρέχουν από την αρχή στο CAD πρόγραμμα. Εδώ λοιπόν, πρέπει να αναφερθεί πως αυτά τα εργαλεία κινούνται περισσότερο προς την κατεύθυνση επίτευξης της απεικόνισης των ανοχών, παρά προς την κατεύθυνση της ουσιώδους χρήσης των ανοχών για ερμηνεία των λειτουργιών του συναρμολογήματος.

Η ιεραρχία Master/Slave, είναι η βάση πάνω στην οποία κανείς ορίζει σταδιακά όλους τους περιορισμούς που θέτει αρχικά σε ένα μεμονωμένο εξάρτημα, αλλά και όταν αυτό αργότερα συνεργάζεται και με άλλα γειτονικά. Αυτή η ιεραρχία δεν

ακολουθείται στα μοντέρνα εργαλεία των CAD και σε συνδυασμό με την αδιαφορία, από πλευράς software, για τον ορισμό των ανοχών ξεκινώντας από τα δομικά συστατικά τους (σημεία, ευθείες, επιφάνειες) οδηγείται κανείς, στα συχνά παρατηρούμενα φαινόμενα υπερορισμού/υποορισμού αντικειμένων στο χώρο, καθώς και σε σχεδιασμούς που δεν επικοινωνούν σε έναν τρίτο, τη λειτουργία για την οποία σχεδιάστηκαν.

Συνεπώς, όταν σημασιολογικά, υπάρχουν περισσότερες από μία master επιφάνειες, ή όταν για παράδειγμα κανείς δύναται να τοποθετήσει ανοχές με τυχαίο τρόπο, γεγονότα που συμβαίνουν με τη χρήση των DimXpert και TolAnalyst, εκεί εντοπίζεται ένα χάσμα το οποίο χρήζει γεφύρωσης. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκαν αυτά τα μελανά σημεία των CAD, εντοπίστηκαν τα σημεία διαμόρφωσης και έγινε μια προσπάθεια εξάλειψής τους.

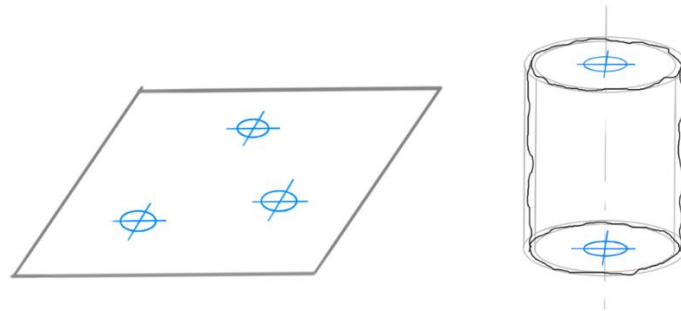
Ξεκινώντας λοιπόν, την αναγνώριση των βασικών συχνών προβλημάτων, εντοπίστηκε ότι ο υπερ-ορισμός επιφανειών στη φάση του ορισμού των επιφανειών αναφοράς, έγκειται στην αλληλοεπικάλυψη συγκεκριμένων βαθμών ελευθερίας και ότι η τυχαία τοποθέτηση ανοχών, προέρχεται από την αδυναμία του χρήστη να ερμηνεύσει ο ίδιος τη λειτουργικότητα του προϊόντος που σχεδιάζει. Έτσι, αποφασίστηκε ότι το εργαλείο που θα δημιουργηθεί, θα πρέπει να προτείνει μια πορεία η οποία αν ακολουθηθεί, θα οδηγεί σε ένα σαφώς ορισμένο εξάρτημα, με έκδηλα όλα τα λειτουργικά και τα συστημικά χαρακτηριστικά του.

Παρατηρώντας ότι το DimXpert προσπερνάει το στάδιο του ορισμού των θεμελιωδών χαρακτηριστικών (primitives), καθώς χτίζει στη μετέωρη βάση ότι, στη διαστασιολόγηση οι προσχεδιασμένες λείες επιφάνειες λαμβάνονται και πάλι ως λείες επιφάνειες αντί για μη-λείες, όπως ισχύει στην πραγματικότητα· στο βελτιωμένο εργαλείο, θα πρέπει να ξεπεράσει ο χρήστης την ευκολία του να αντιμετωπίζει τις επιφάνειες ως πλήρως λείες. Αυτή η παράλειψη στο CAD, οδηγεί σε λάθη από το ξεκίνημα της διαστασιολόγησης, οπότε για να το αποφύγει ο σχεδιαστής θα πρέπει να ξεκινάει στη βάση ότι καμία επιφάνεια δεν είναι τελείως λεία, οπότε έτσι θα προβεί φυσιολογικά στον ορισμό πιο θεμελιωδών γεωμετρικών στοιχείων όπως τα **σημεία** επάνω στις επιφάνειες.

Εφόσον, σημεία ορίζουν μια επιφάνεια και εφόσον επιφάνειες είναι τα στοιχεία αναφοράς (datum) ενός αντικειμένου, γίνεται αντιληπτό ότι ο χρήστης σε αυτό το αρχικό στάδιο πρέπει να ορίζει σημεία αναφοράς (datum targets) με συγκεκριμένες διαστάσεις και επιφάνειες εφαρμογής. Από συγκεκριμένο αριθμό σημείων αναφοράς προκύπτουν και οι επιφάνειες που εν τέλει αποτελούν τα data του εξαρτήματος. Ενώ θεωρητικά, έχοντας τη συνθήκη για το σχήμα που πρέπει να υλοποιούν κάποια σημεία, κανείς θα μπορούσε να θέσει ως επιφάνειες αναφοράς οποιαδήποτε είδη συνεχόμενων επιφανειών· στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι επιφάνειες αναφοράς είναι επίπεδες και κυλινδρικές.

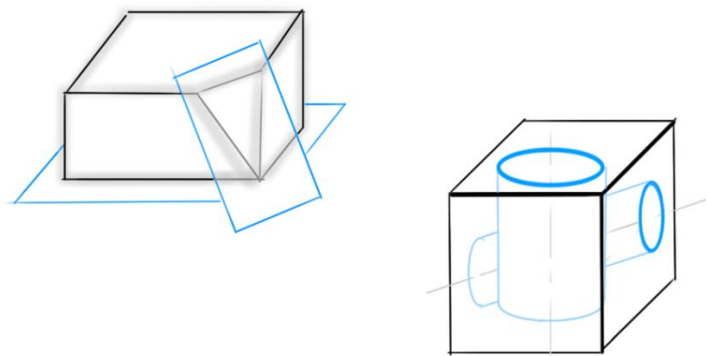
Οπότε οι δύο συνδυασμοί, διαστάσεων και σημείων αναφοράς, που ορίζουν ένα επίπεδο και έναν κύλινδρο, φαίνονται στο σχήμα 35 και είναι οι εξής:

- Επίπεδο: 3 σημεία αναφοράς
- Κύλινδρος: 2 διάμετροι με διαστατικές ανοχές + 2 σημεία αναφοράς/ 1 διάμετρος με διαστατική ανοχή + 3 σημεία αναφοράς στην εσωτερική επιφάνεια

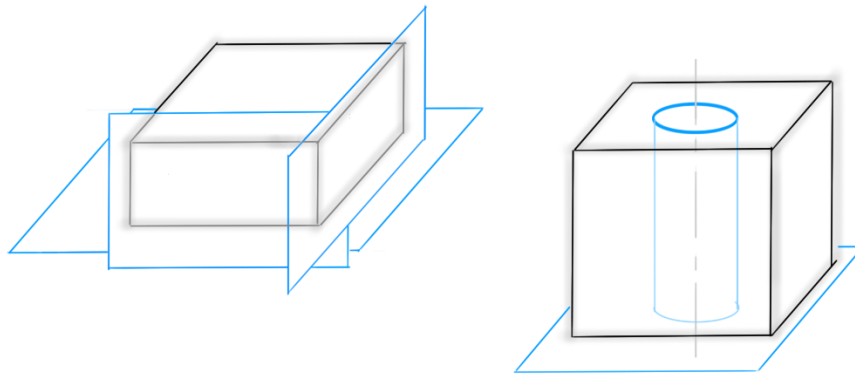


Σχήμα 35 Σαφής ορισμός επιφάνειας επιπέδου (αριστερά) και κυλινδρικής επιφάνειας (δεξιά).

Με τη λογική ότι ο νέος αλγόριθμος ξεκινάει από τον ορισμό των σημείων αναφοράς και με γνώμονα τη master/slave ιεραρχία, στο επόμενο στάδιο ο χρήστης πρέπει να δημιουργεί ένα σαφώς ορισμένο πλαίσιο στοιχείων αναφοράς (Datum Reference Frame, *DRF*), βάσει του οποίου θα οριστούν οι υπόλοιπες επιφάνειες ενδιαφέροντος. Με την έννοια *σαφώς ορισμένο*, νοείται ένα DRF το οποίο θα δεσμεύει τρεις βαθμούς ελευθερίας κίνησης του αντικειμένου, αλλά από την άλλη, δεν θα υπάρχουν data τα οποία δεν θα δεσμεύουν ανεξάρτητα, έστω και έναν βαθμό ελευθερίας. Δηλαδή, μπορεί ένα datum να δεσμεύει τον ίδιο βαθμό ελευθερίας με ένα άλλο, αλλά για να είναι datum του σαφώς ορισμένου DRF, θα πρέπει να δεσμεύει τουλάχιστον άλλον ένα β.ε. κίνησης. Τα data τα οποία δεν ανήκουν στο βασικό DRF, είναι απλώς επικουρικά των βασικών και έχουν διάσταση/ανοχή εξάρτησης από κάποιο/α από τα βασικά data. Το σχήμα 36, δείχνει ότι δεν είναι αναγκαίο κακό ο περιορισμός ενός β.ε. κίνησης από περισσότερα από ένα data και το σχήμα 37, απεικονίζει κάποιες πιο ιδανικές, αλλά αρκετά συνηθισμένες περιπτώσεις ορισμού βασικών DRFs.



Σχήμα 36 Δέσμευση κάποιων β.ε. κίνησης από περισσότερα από ένα data, αλλά και πάλι σαφώς ορισμένα DRFs.

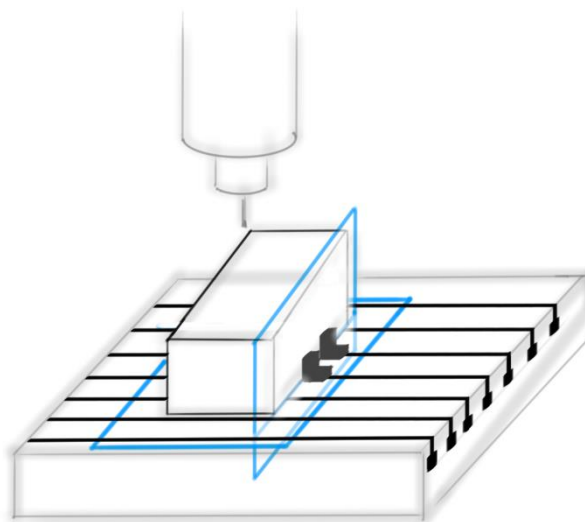


Σχήμα 37 Συνήθεις περιπτώσεις DRFs.

Επειδή ο χρήστης αντιλαμβάνεται ότι ο ορθός ορισμός του βασικού DRF είναι σχετικά πολύπλοκος και για λόγους ιεραρχίας και ξεκάθαρης πορείας στη χρήση των ανοχών, θα απαγορεύεται σε αυτόν οποιαδήποτε τοποθέτηση διαστάσεων ή ανοχών στο κομμάτι, πριν την ολοκλήρωση του βασικού DRF. Αυτό τον βοηθάει στο να ξεκαθαρίσει ο ίδιος, τις θεμελιώδεις λειτουργίες που επιθυμεί να υλοποιεί ο σχεδιασμός του και από ποιες επιφάνειες πρέπει να ξεκινήσει, αλλά και να αντιληφθεί την ορθή πορεία για την επίτευξη των στόχων του.

Στη συνέχεια, αναπτύσσονται κάποια ερωτήματα που τέθηκαν σχετικά με την ανάγκη ή όχι συγκεκριμένων δεσμεύσεων για την ορθή ιεραρχία, ενώ επίσης υπάρχουν ερωτήματα σχετικά με το αν κάποια επιθυμητά στοιχεία της ιεραρχίας, υλοποιούνται ήδη από τα DimXpert και TolAnalyst. Για τη διερεύνηση των δεύτερων, έγινε εκτενής ανάλυση σε αυτά τα εργαλεία και υλοποιήθηκαν διάφορα σενάρια τα οποία οδήγησαν στις απαντήσεις των ερωτημάτων και τα οποία αναλύονται πιο κάτω.

Αρχικά λοιπόν, υπάρχει το ερώτημα αν, στο επίπεδο του βασικού DRF, είναι αναγκαία η εξάρτηση κάποιων data από ένα και πρωταρχικό master datum και ακόμη περισσότερο, τι εξυπηρετεί το να υπάρχει εξάρτηση και τι το να μην υπάρχει. Η απάντηση προσεγγίζεται μέσω ενός απλού παραδείγματος της βιομηχανίας:



Σχήμα 38 Αντικείμενο δεμένο σε φρέζα κάθετου άξονα, με data τις δύο μπλε επιφάνειες.

Έστω ότι ένα πρισματικό κομμάτι δένεται στην τράπεζα ενός κέντρου κατεργασιών (Σχήμα 38), στηρίζοντας το κομμάτι στις επιφάνειες που ο σχεδιαστής έχει ορίσει ως επιφάνειες αναφοράς στη φάση του σχεδιασμού (έστω A η επιφάνεια που ακουμπάει στην τράπεζα και B η δεξιά επιφάνεια όπου σφίγγουν οι σφυγκτήρες). Αν η A έχει οριστεί ως master datum και η B παρ' όλο που δεσμεύει έναν διαφορετικό β.ε. κίνησης, έχει μια γεωμετρική ανοχή καθετότητας ως προς το A, τότε μέσω της τιμής της ανοχής καθετότητας, ο σχεδιαστής μπορεί να εισάγει τη χάρη του σφυγκτήρα στην επιφάνεια B. Αυτό σημαίνει, πως από τη φάση του design (και έχοντας μια σε βάθος άποψη για τις ικανότητες της συγκεκριμένης μηχανής και των εξαρτημάτων της), μπορεί να γνωρίζει τι ανοχές είναι δυνατόν να πετύχει με τη συγκεκριμένη κατεργασία και να ορίσει και τις υπόλοιπες ανοχές αντίστοιχα. Αν, από την άλλη, στη συγκεκριμένη μηχανή, χρησιμοποιούνταν σημειακά στηρίγματα, τα οποία θα μπορούσαν να ακουμπήσουν στις ευρύτερες περιοχές των datum targets των επιφανειών, τότε δεν θα ήταν ανάγκη να υπάρχει εξάρτηση του B ως προς το A. Αυτά τα γεγονότα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το αν θα υπάρχουν αναφορές ή όχι μεταξύ των data, σε επίπεδο βασικού DRF, εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο θα εκτελεστεί η λειτουργία επάνω στο συγκεκριμένο εξάρτημα και άρα *δεν υπάρχει δέσμευση εξάρτησης*.

Ερωτήματα και Πειράματα στο SolidWorks

Στη συνέχεια, εγείρονται ερωτήματα για τις δυνατότητες των DimXpert και TolAnalyst και μέσω των σεναρίων επάνω στη μήτρα για injection moulding, δίνονται οι απαντήσεις.

1. Ακολουθείται η ιεραρχία master/slave για τις επιφάνειες, κατά τον ορισμό διαστάσεων ανοχών στο DimXpert;
2. Σε επίπεδο συναρμολογήματος (assembly), όλες οι ανοχές επηρεάζουν στον τελικό υπολογισμό στην stack-up ανάλυση του TolAnalyst;
3. Στο DimXpert, ισχύει η ισοδυναμία στον ορισμό μιας επιφάνειας, α) με μία γεωμετρική ανοχή χωρίς αναφορά και μία διάσταση και β) με δύο γεωμετρικές ανοχές χωρίς αναφορά και μία γεωμετρική ανοχή με αναφορά;

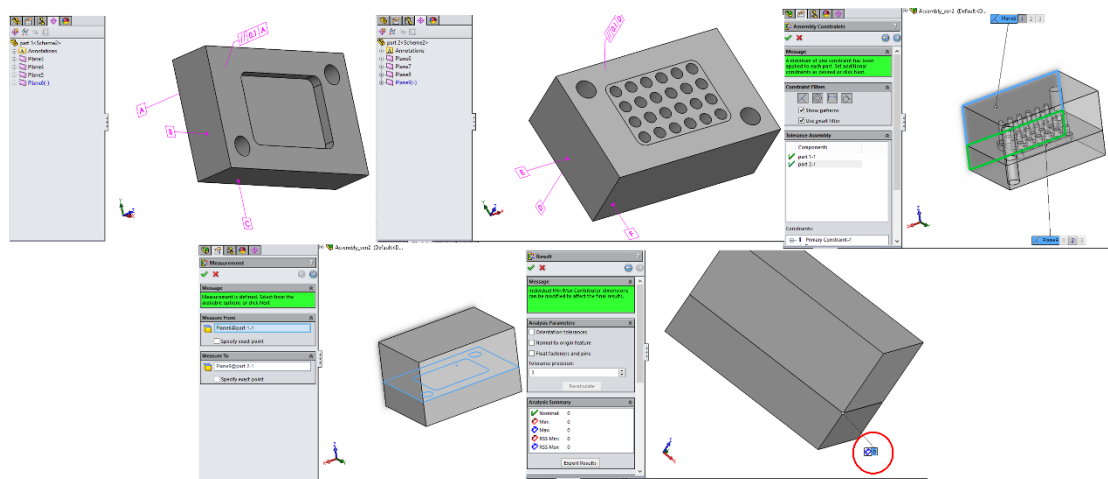
Σενάριο 1

Mates: ομόκεντροι κύλινδροι ευθυγράμμισης, σε επαφή οι πλευρές της parting line

DimXpert: DRF τριών πλευρών, παραλληλίες ως προς τα data A, D

TolAnalyst: Δυνατότητα επιλογής γεωμετριών που έχουν δεχτεί DimXpert διαστατοποίηση, μέτρηση των επιφανειών της parting line

Αποτελέσματα: Μηδενικά, υπό οποιωνδήποτε περιορισμών. Η αιτιολόγηση είναι ότι υπάρχει το mate των δύο πλευρών που έχουν επιλεγθεί να μετρηθούν. Οπότε ανεξάρτητα από τις ανοχές που έχουν οριστεί στο DimXpert, εφόσον υπάρχει, δομικά, mate σε αυτές τις επιφάνειες, δεν γίνεται να υπολογιστεί η μέγιστη/ελάχιστη απόστασή τους.



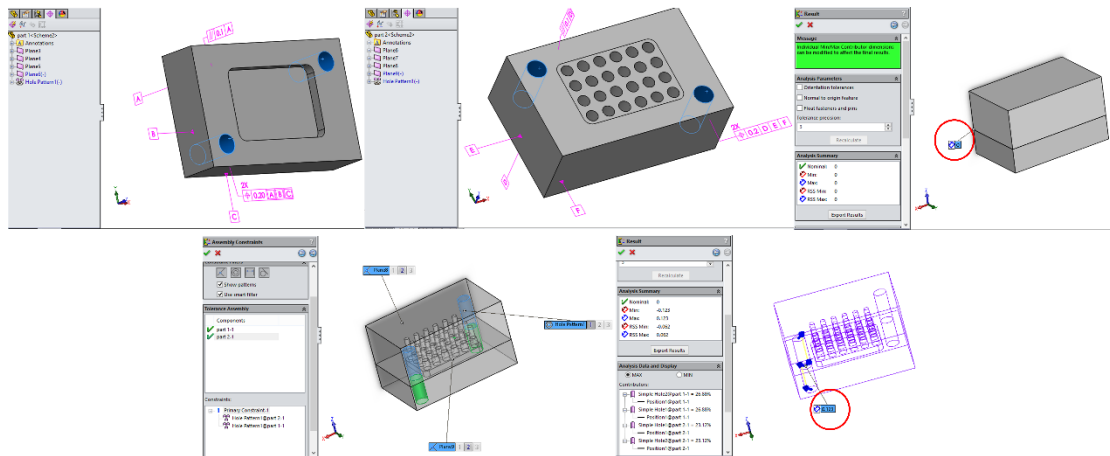
Σχήμα 39 Αλληλεπίδραση με τα περιβάλλοντα των DimXpert και TolAnalyst. (σειριακά) DimXpert ανοχές στα δύο μέρη, δέσμευση των πλάγιων επιφανειών, επιλογή των επιφανειών της parting line για υπολογισμό, μηδενικά αποτελέσματα υπολογισμού.

Σενάριο 2

Ίδιες συνθήκες με το Σενάριο 1, με μόνη προσθήκη τις ανοχές θέσης των κυλίνδρων ευθυγράμμισης ως προς A, B, C και D, E, F αντίστοιχα.

TolAnalyst: α) μέτρηση των επιφανειών της parting line, β) μέτρηση των αντικριστών αξόνων των κυλίνδρων στις διευθύνσεις x και y (στη z απαγορεύει, διότι υπάρχει το mate στην parting line).

Αποτελέσματα: α) Μηδενικά, κάτω από οποιοσδήποτε περιορισμούς. β) Μη-μηδενικά και διαφορετικά ήταν τα αποτελέσματα, όταν οι περιορισμοί ήταν ομοεπιπεδότητα στις επιφάνειες της parting line/πλάγιες επιφάνειες ή όταν οι 4 κύλινδροι ήταν αντικριστοί κατά ζεύγη. Παρ' όλο που τα αποτελέσματα ήταν μη-μηδενικά, κανένας υπολογισμός δεν λάμβανε υπ' όψιν τις ανοχές παραλληλίας καθώς αυτές βρισκόνταν σε άλλο επίπεδο από το μετρούμενο.



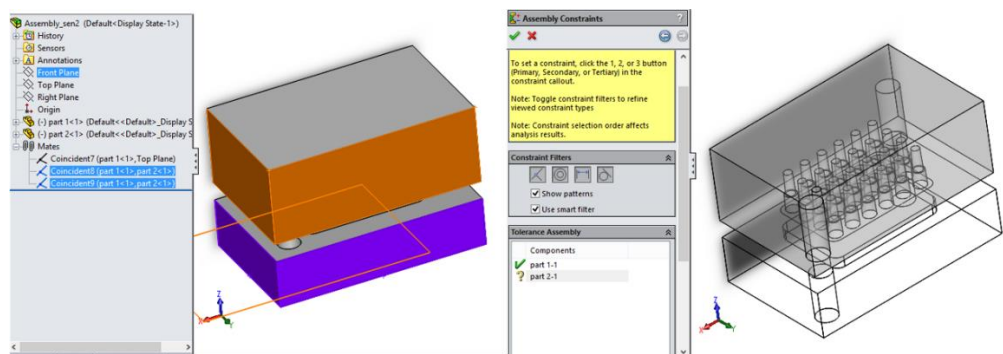
Σχήμα 40 (σειριακά) DimΧpert ανοχές στα δύο μέρη, επιλογή των αντικριστών κυλίνδρων για υπολογισμό, δέσμευση των κυλίνδρων, μη-μηδενικά αποτελέσματα υπολογισμού.

Σενάριο 3

Mates: Ομοεπίπεδες οι πλαϊνές επιφάνειες (B με E και C με F).

DimΧpert και *TolAnalyst*: Ίδιες συνθήκες με το Σενάριο 2.

Αποτελέσματα: α, β) Δεν υπάρχουν αποτελέσματα όταν, χωροταξικά, δεν βρίσκονται σε επαφή τα δύο μέρη.



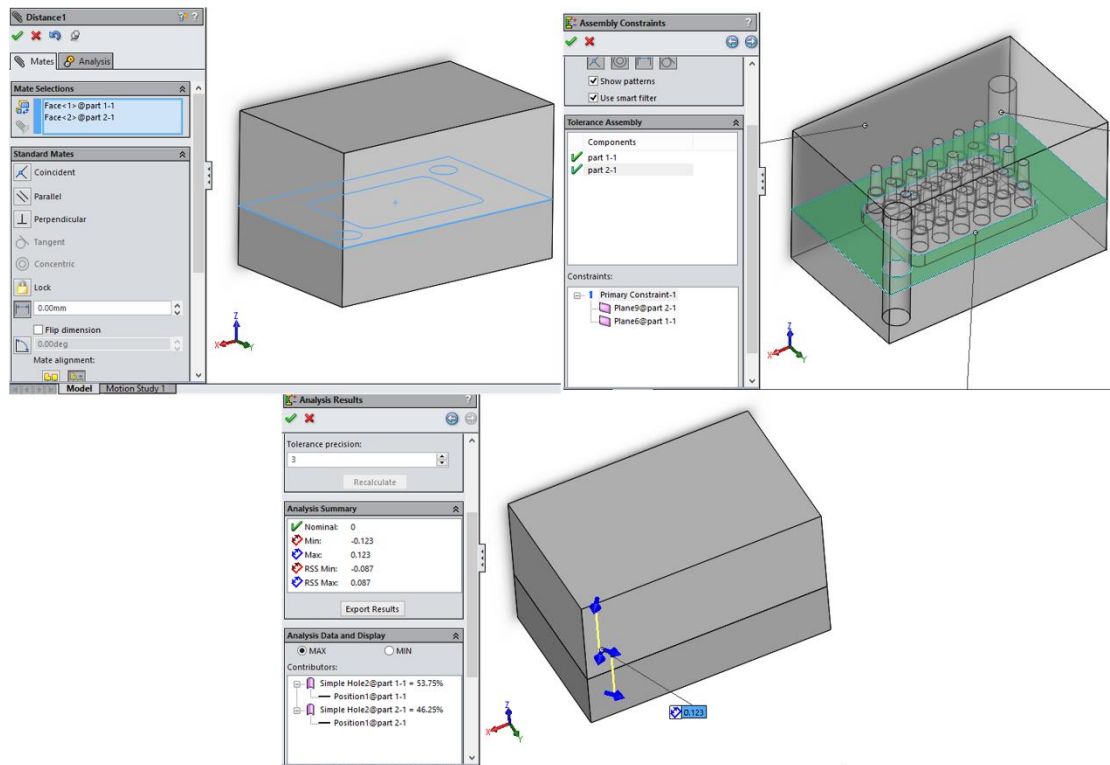
Σχήμα 41 (αριστερά) Mates μόνο στις πλάγιες επιφάνειες / (δεξιά) Αδυναμία χρήσης του TolAnalyst.

Σενάριο 4

Mates: Ίδια με το Σενάριο 3 και με προσθήκη, mate μηδενικής απόστασης των επιφανειών της parting line.

DimXpert/TolAnalyst: Ίδιες συνθήκες με τα Σενάρια 2, 3.

Αποτελέσματα: α, β) Ακριβώς τα ίδια με το Σενάριο 2. Αυτό απλώς σημαίνει, πως η ομοεπιπεδότητα και η μηδενική απόσταση είναι ισοδύναμα mates για το TolAnalyst.



Σχήμα 42 (σειριακά) Προσθήκη του mate μηδενικής απόστασης στην parting line, δέσμευση της απόστασης των επιφανειών της parting line, μη-μηδενικά αποτελέσματα.

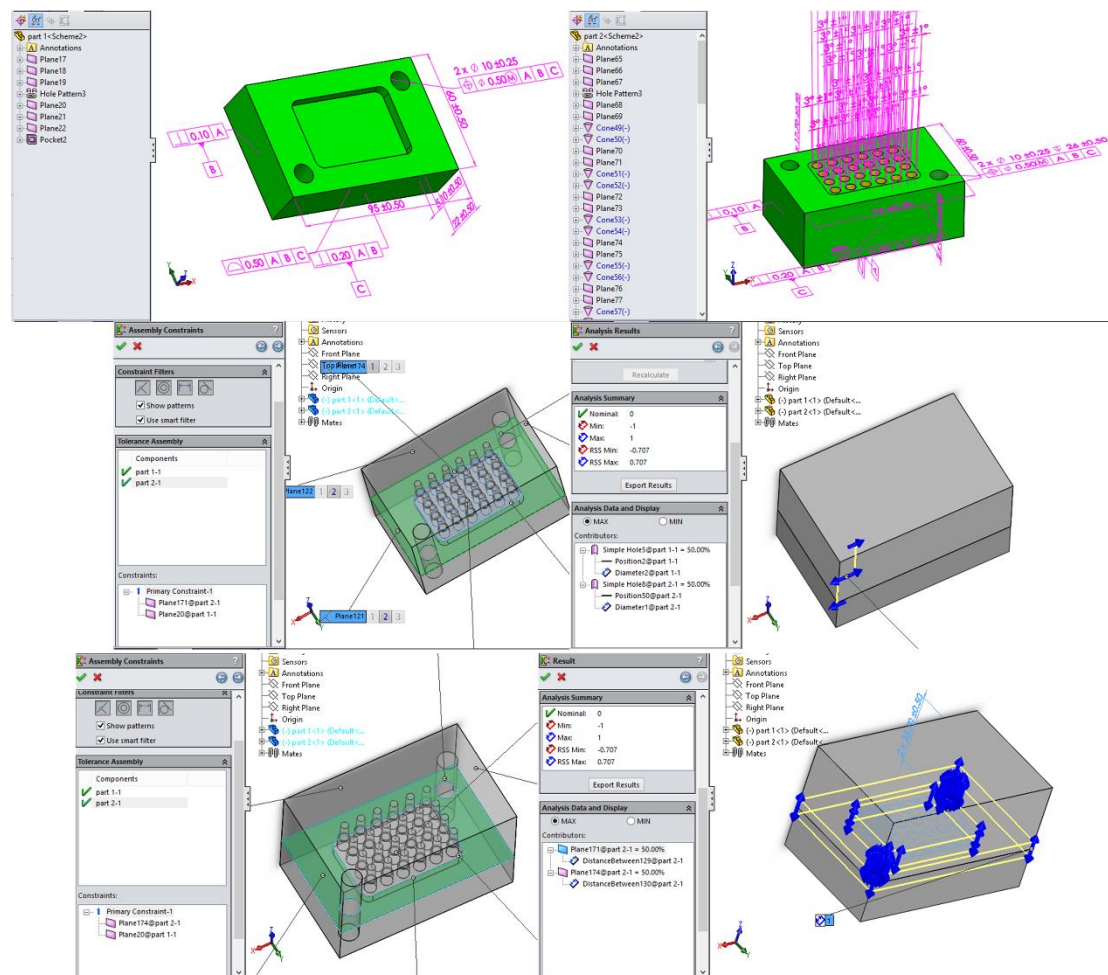
Σενάριο 5

Mates: Ίδια με τα Σενάρια 1, 2.

DimXpert: Auto-dimensioning.

TolAnalyst: Ίδια με τα Σενάρια 2, 3.

Αποτελέσματα: α) Μηδενικά αποτελέσματα με όλους τους περιορισμούς, εκτός από την περίπτωση όπου υπάρχει περιορισμός στις επιφάνειες της parting line, με επιλεγόμενη ολόκληρη την επιφάνεια στο part 2. Άρα, σε αντίθεση με τα μη-μηδενικά αποτελέσματα εδώ στο Σενάριο 5.α, όποια επιφάνεια δεν έχει ανοχές DimXpert, δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς. β) Μη-μηδενικά αποτελέσματα με τους αντίστοιχους, όπως στο 5.α. περιορισμούς, αλλά με την επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα, άλλων ανοχών εκτός αυτών του 5.α, καθώς η μέτρηση γίνεται σε άλλη διεύθυνση.



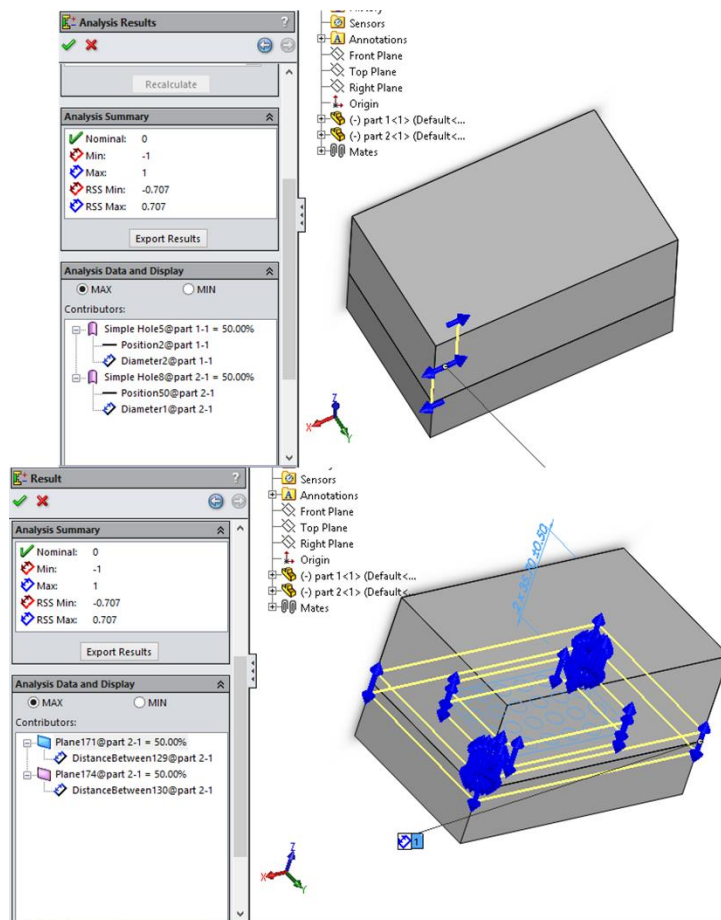
Σχήμα 43 (πάνω) Auto-dimensioning του DimXpert στα δύο μέρη. / (μέση) Υπολογισμός των αντικριστών κυλίνδρων. / (κάτω) Υπολογισμός των επιφανειών της parting line.

Σενάριο 6

Όλα ίδια με το Σενάριο 5, καθώς αυτό που επιδιώκεται να αποδειχτεί, είναι ότι αλλάζοντας κάποιες ανοχές εκτός επιπέδου μέτρησης (out-of-plane), οι οποίες στην πραγματικότητα αλλάζουν τη ζώνη ανοχών (tolerance zone), δεν υπάρχει αλλαγή στον υπολογισμό του TolAnalyst.

DimΧpert: Αλλαγές των τιμών των ανοχών σε out-of-plane ανοχές.

Αποτελέσματα: Καμία αλλαγή στα αποτελέσματα της μέτρησης του TolAnalyst. Επιβεβαίωση της αρχικής υπόθεσης.



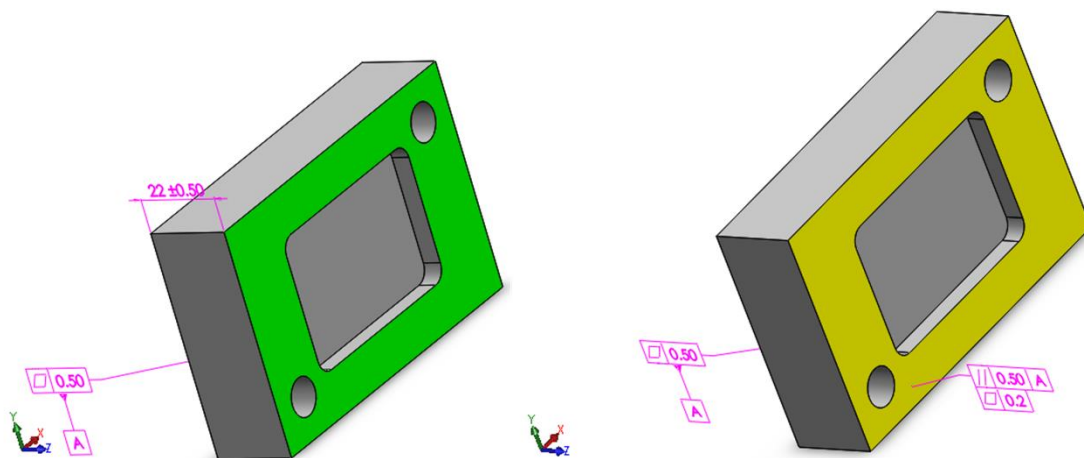
Σχήμα 44 Ίδια αποτελέσματα με το Σενάριο 5. Ελλιπής υπολογισμός του TolAnalyst για την πραγματική tolerance zone συνυπολογίζοντας τις out-of-plane ανοχές στο assembly.

Μέσα από αυτά τα έξι κλιμακωτά σενάρια, προέκυψε ότι οι απαντήσεις για τα δύο πρώτα ερωτήματα είναι σαφώς **αρνητικές**. Για το μεν 1^ο, δεν υπάρχει καμία υποχρέωση για συσχέτιση των υπόλοιπων data με ένα master datum και για το 2^ο, παρατηρείται αδιαφορία για την πραγματική ζώνη των προκυπτουσών ανοχών σε επίπεδο συναρμολογήματος (assembly tolerance zone).

Για το 3^ο ερώτημα, υλοποιήθηκε το παρακάτω παράδειγμα σύγκρισης δύο διαφορετικών σεναρίων ορισμών ανοχών, για την ίδια επιφάνεια. Βάσει της θεωρίας των ανοχών, τα δύο σενάκια πλήρους ορισμού μιας επιφάνειας η οποία δεν αποτελεί datum, είναι ισοδύναμα.

Σενάριο 1ο: Με διάσταση και διαστατική ανοχή από ένα datum σε συνδυασμό με μια γεωμετρική ανοχή χωρίς αναφορά (π.χ. επιπεδότητα) στο ίδιο datum (Σχήμα 45 (αριστερά)), είτε

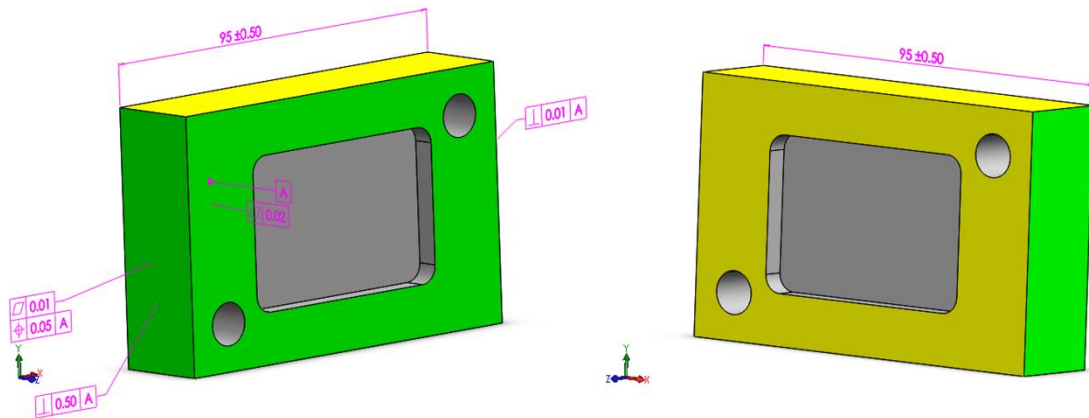
Σενάριο 2ο: Με γεωμετρική ανοχή αναφοράς σε κάποιο datum (π.χ. παραλληλία), σε συνδυασμό με γεωμετρικές ανοχές χωρίς datum (π.χ. επιπεδότητες) στις δύο αυτές επιφάνειες (Σχήμα 45(δεξιά)).



Σχήμα 45 (αριστερά) Σενάριο 1 για τον ορισμό μιας επιφάνειας. / (δεξιά) Ισοδύναμο Σενάριο 2.

Το αποτέλεσμα είναι ότι στο Tolerance Status του DimXpert, η πρώτη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως συνεπής (έγκυρα ορισμένες επιφάνειες/πράσινες), ενώ η δεύτερη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως ασυνεπής (μη-έγκυρα ορισμένες επιφάνειες/πορτοκαλί). Αυτό το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, καθώς παραπλανεί το χρήστη και τον εμποδίζει να δει την πλήρη εικόνα της διαστασιολόγησης με γεωμετρικές ανοχές.

Από αυτό το παράδειγμα, προέκυψαν και άλλες παρατηρήσεις για το τι θεωρεί συνεπές και τι όχι το DimXpert. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 46(αριστερά), έχουν τοποθετηθεί εσκεμμένα τριών ειδών περιορισμοί σε μία επιφάνεια, χωρίς το DimXpert να την σημειώνει ως υπερορισμένη (κόκκινη). Επίσης, θεωρεί πλήρως ορισμένες (πράσινες) δύο πλευρές, αν τοποθετηθεί μεταξύ τους μια διάσταση (με ή χωρίς διαστατική ανοχή), χωρίς κανέναν άλλο περιορισμό, ούτε καν datum κάπου πάνω στο part (Σχήμα 46(δεξιά)).



Σχήμα 46 Μη-αναγνώριση από μεριάς DimXpert των όχι-σαφώς ορισμένων επιφανειών.

Εν τέλει, το DimXpert θεωρεί τέλεια ορισμένες κάποιες επιφάνειες, μόνο όταν υπάρχει datum ή κάποια διάσταση σε αυτές. Επίσης, το auto-dimensioning, σαφώς και δεν αντιλαμβάνεται τη λειτουργία για την οποία είναι σχεδιασμένο ένα εξάρτημα, οπότε η τοποθέτηση διαστάσεων και ανοχών, γίνεται απλώς με γνώμονα να διαστασιολογηθούν πλήρως όλες οι επιφάνειες και να θεωρούνται τέλεια ορισμένες (πράσινες), γεγονός που δε συμβαίνει ποτέ στην πραγματικότητα αφού ανοχές τοποθετούνται στις επιφάνειες ενδιαφέροντος, ενώ για το υπόλοιπο εξάρτημα θεωρείται δεδομένη μια γενική ζώνη ανοχών.

Θέλοντας, ο αλγόριθμος ορθής διαστασιολόγησης, να ενταχθεί στη διαδικασία σχεδιασμού όπως αυτή πραγματοποιείται σήμερα από τους μηχανικούς-σχεδιαστές της βιομηχανίας, δηλαδή χωρίς να τους αναγκάζει να εκπαιδευτούν πάνω σε νέα εργαλεία και μεθοδολογίες, επιλέχθηκε η πρακτική υλοποίηση του αλγορίθμου να πάρει τη μορφή ενός Add-in σε πρόγραμμα CAD. Επιλέχθηκε το SolidWorks 14, λόγω της μελέτης των DimXpert και TolAnalyst εργαλείων, αλλά και λόγω του ότι περιέχει ενσωματωμένο API για την ανάπτυξη τέτοιων προγραμμάτων. Το SolidWorks 14 συνδέθηκε με το Visual Studio 13, προκειμένου να γραφεί ο κώδικας σε Visual Basic (VB.NET) και να είναι άμεσα εκτελέσιμος και χρησιμοποιήσιμος στο περιβάλλον του SolidWorks 14.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται εκτενώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος και η πορεία προγραμματισμού που ακολουθήθηκε.

Πορεία του αλγορίθμου για ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο εξαρτήματος

Σε αυτή την ενότητα, περιγράφεται η πορεία του προτεινόμενου αλγορίθμου για την ορθή διαστασιολόγηση και τοποθέτηση ανοχών, όπως αυτός υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Visual Basic.

Αν κανείς προσπαθούσε να χωρίσει τον αλγόριθμο σε αδρά βήματα, χωρίς αυτό να αποτελεί το βασικό οδηγό στην υλοποίηση του κώδικα, τότε αυτά είναι τα εξής:

1. Δημιουργία ενός συνεπούς πλαισίου επιφανειών αναφοράς (DRF)
2. Τοποθέτηση διαστάσεων και διαστατικών ανοχών
3. Τοποθέτηση γεωμετρικών ανοχών

Αναλυτικότερα, το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνει ο χρήστης όταν ήδη έχει καταλήξει στην επιθυμητή γεωμετρία του εξαρτήματος, είναι να ορίσει το πλαίσιο των επιφανειών αναφοράς (DRF) οι οποίες δεσμεύουν με συνέπεια το αντικείμενο στο χώρο, όπως έχει αναλυθεί και πιο πάνω. Σε αυτή τη φάση, απαγορεύεται στο χρήστη, να ορίσει οποιοσδήποτε άλλες διαστάσεις/ανοχές, πριν το DRF είναι σαφώς ορισμένο. Στον κώδικα, ελέγχεται οποιοσδήποτε συνδυασμός των επιφανειών που έχουν οριστεί ως datum και λαμβάνεται απόφαση εάν από τα ορισμένα data, προκύπτει σαφώς ορισμένο DRF. Και στην περίπτωση που ο χρήστης έχει ορίσει data τα οποία αλληλοεπικαλύπτουν κάποιο β.ε. κίνησης, προβλέπεται ειδοποίηση στο χρήστη για το ποια είναι αυτά, ώστε είτε να επιλέξει πιο να κρατήσει ή να τα κρατήσει και τα δύο, σημειώνοντας ένα από αυτά ως το datum που συμμετέχει στο σαφή ορισμό του DRF.

Εφόσον κρίνεται ότι υπάρχει ένα σαφώς ορισμένο DRF, τότε το επόμενο μήνυμα στο χρήστη, είναι να ορίσει σε κάθε επιφάνεια-datum με συνεπή (consistent) τρόπο σημεία αναφοράς (datum targets). Γίνονται έλεγχοι για τον υπερ-ορισμό ή υπο-ορισμό των επιφανειών από σημεία αναφοράς, με σκοπό ο χρήστης να καταλήξει στον ορθό ορισμό τους.

Στο μεταξύ, γίνονται ταυτόχρονοι έλεγχοι για την ανίχνευση άλλων σημειώσεων (annotations) επάνω στο αντικείμενο και υπάρχει μήνυμα ένστασης, στην περίπτωση που αυτές είναι διαστάσεις ή γεωμετρικές ανοχές που δεν επιτρέπει ο αλγόριθμος, μέχρι στιγμής, να οριστούν. Παρ' όλ' αυτά, στο χρήστη επιτρέπεται να ορίσει γεωμετρικές ανοχές οι οποίες δεν απαιτούν επιφάνειες αναφοράς (κυκλικότητα, κυλινδρικήτητα, ευθύτητα, επιπεδότητα), οποιαδήποτε στιγμή μετά τον ορισμό του DRF, καθώς αυτές, αφορούν τις επιφάνειες τις ίδιες και δεν προωθούν την πολυπλοκότητα της ζώνης ανοχών. Τέτοιου είδους γεωμετρικές ανοχές, συνηθίζεται να τοποθετούνται στα data, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αλληλοεπικαλύπτουν τη σημασία των datum targets, αφού για παράδειγμα μπορεί ένα datum να ορίζεται από τα 3 datum targets του και ταυτόχρονα να του επιτρέπεται (όχι «να έχει» αφού το

εξάρτημα βρίσκεται ακόμα σε θεωρητικό υπόβαθρο) μια συγκεκριμένη απόκλιση στην επιπεδότητά του.

Μετά από τον ορισμό των σημείων αναφοράς και καθώς όλα τα data, είναι σαφώς ορισμένα, προτείνεται στο σχεδιαστή να προχωρήσει πρώτα στον ορισμό διαστάσεων και όχι γεωμετρικών ανοχών (εκτός από την ανοχή θέσης) ακόμα. Η αλήθεια είναι πως, διάσταση με ανοχή και γεωμετρική ανοχή, δείχνουν το ίδιο ακριβώς πράγμα εννοιολογικά, απλώς οι δεύτερες είναι πολυπλοκότερες στη σύλληψη, οπότε θέλοντας το μοντέλο να γίνει όσο το δυνατόν πιο απλό, προωθούνται πρώτα οι διαστάσεις. Τοποθετώντας διαστάσεις και ανοχές ανάμεσα σε data και άλλες επιφάνειες, αυτές οι επιφάνειες ορίζονται επακριβώς. Δεν χρειάζονται κάποια άλλη γεωμετρική ανοχή αναφοράς, αλλά επικουρικά (και με σκοπό να μειωθεί η ζώνη ανοχών για την επιφάνεια) μπορούν να οριστούν σε αυτές, γεωμετρικές ανοχές χωρίς σημείο αναφοράς (datum).

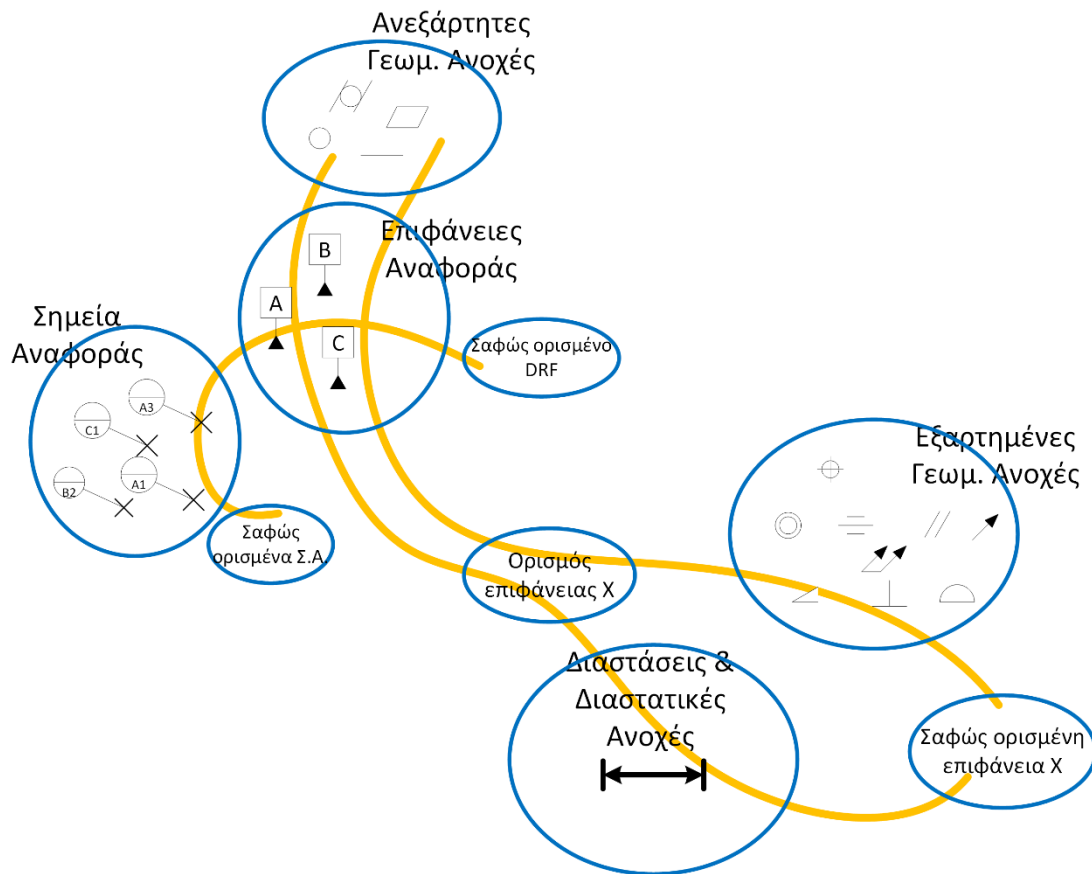
Μέχρι αυτό το σημείο, ο σχεδιαστής, θα μπορούσε να έχει τελειώσει με τη διαστατοποίηση και να έχει καταλήξει σε ένα πλήρως κατανοητό εξάρτημα. Η χρήση των υπόλοιπων γεωμετρικών ανοχών αναφοράς, γίνεται μόνο εφόσον δεν έχουν καλυφθεί ήδη όλες οι απαιτήσεις του σχεδιαστή και για αυτό το λόγο αφήνονται για το τέλος της διαδικασίας.

Ο έλεγχος που υλοποιείται συνεχώς, κατά τη διάρκεια τοποθέτησης διαστάσεων και στη συνέχεια γεωμετρικών ανοχών, είναι ο έλεγχος είτε της ταυτόχρονης ύπαρξης των δύο προαναφερθέντων σεναρίων για τον σαφή ορισμό μιας επιφάνειας, είτε του φτωχού ορισμού ενός από τα δύο. Έτσι, επισημαίνεται στο σχεδιαστή η κατάσταση της κάθε επιφάνειας που τον ενδιαφέρει να ορίσει πλήρως.

Συναπτικά Δίκτυα στον αλγόριθμο για το part tolerancing

Με δεδομένο ότι στόχος του αλγορίθμου είναι να καταλήξει ο χρήστης σε ένα λειτουργικά διαστασιοποιημένο εξάρτημα, οι κύριες ιδέες-στόχοι του SN είναι ο σαφής ορισμός του DRF και ο σαφής ορισμός επιφάνειας. Στο SN στο Σχήμα 47 φαίνεται η ροή του αλγορίθμου για το part tolerancing.

Γίνεται εμφανές, ότι οι γεωμετρικές ανοχές που δεν απαιτούν αναφορά, είναι standalone ιδέες στο SN, των οποίων όμως η τιμή συνυπολογίζεται για τον έλεγχο των εξαρτημένων επιφανειών. Επίσης, γίνονται εμφανή τα βήματα του αλγορίθμου, καθώς π.χ. ο χρήστης δεν μπορεί να τοποθετήσει γεωμετρικές ανοχές αν δεν υπάρχει ένα σαφώς ορισμένο DRF. Στο σχήμα 47 φαίνεται ότι την πληροφορία αυτού του περιορισμού την κουβαλάνε οι συνάψεις που καταλήγουν στις ιδέες *Διαστάσεις* και *Γεωμετρικές Ανοχές*, ενώ είναι εύκολο ο περιορισμός να εισηχθεί στο περιβάλλον του CAD.



Σχήμα 47 Η πορεία του αλγορίθμου απεικονιζόμενη μέσω SN. Οι τρεις συνάψεις επικοινωνούν τις συνθήκες για σαφή ορισμό DRF, datum targets και λοιπών επιφανειών.

Γενικά, στόχος είναι στα υπολογιστικά εργαλεία που χτίζονται, να είναι ενσωματωμένη η εφαρμογή των SN, ώστε κανείς να μπορεί στο μέλλον να αλληλεπιδράσει σε επίπεδο SN με τους ήδη ανεπτυγμένους κώδικες και να τους βελτιώσει/επεκτείνει.

Τέλος, ο τελευταίος έλεγχος για τον σαφή ορισμό μιας επιφάνειας, τρέχει για κάθε επιφάνεια που ενδιαφέρει να είναι ορισμένη. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα τεστ στο SolidWorks, δεν είναι δυνατόν να βασιστεί κανείς στο "Tolerance Status" του SolidWorks.

Εφαρμογή 4: Αλγόριθμος για Design-for-Assembly tolerancing

Συναπτικά Δίκτυα στον αλγόριθμο για το assembly tolerancing

Σε αυτή την εργασία, όλες οι σχέσεις που απαιτούνται να αναπτυχθούν στην περίπτωση της υλοποίησης ενός λειτουργικού συναρμολογήματος (αντικείμενα, επιφάνειες και γεωμετρίες, σχετική θέση των αντικειμένων στο χώρο, γεωμετρικές ανοχές), αναπαριστώνται στο γενικό χώρο των ιδεών και των συνάψεων, όπου κάθε σημασιολογική σύνδεση αναπαρίσταται ως σύναψη που ενώνει αντικείμενα, επιφάνειες και γεωμετρίες (ιδέες).

Πιο κάτω παρουσιάζεται το πώς ένα functional assembly ορίζεται με όρους συνάψεων και αντιπαραβάλλεται με τον ορισμό του απλού mate, που υπάρχει στα σύγχρονα CAD.

Έστω ότι PART(1) και PART(2) δύο απλά ορθογώνια παραλληλεπίπεδα αντικείμενα. Εκτός των άλλων γεωμετριών, το PART(1) έχει μια επιφάνεια SURF(1), μια αρσενική γεωμετρία (boss) SURF(2) και μια άλλη επιφάνεια SURF(3), οι οποίες είναι ανά δύο κάθετες μεταξύ τους. Αντίστοιχα, το PART(2) έχει δύο κάθετες επιφάνειες SURF(4) και SURF(5), καθώς και μία θηλυκή γεωμετρία SURF(6). Αυτές οι γεωμετρίες φαίνονται στο σχήμα 48.

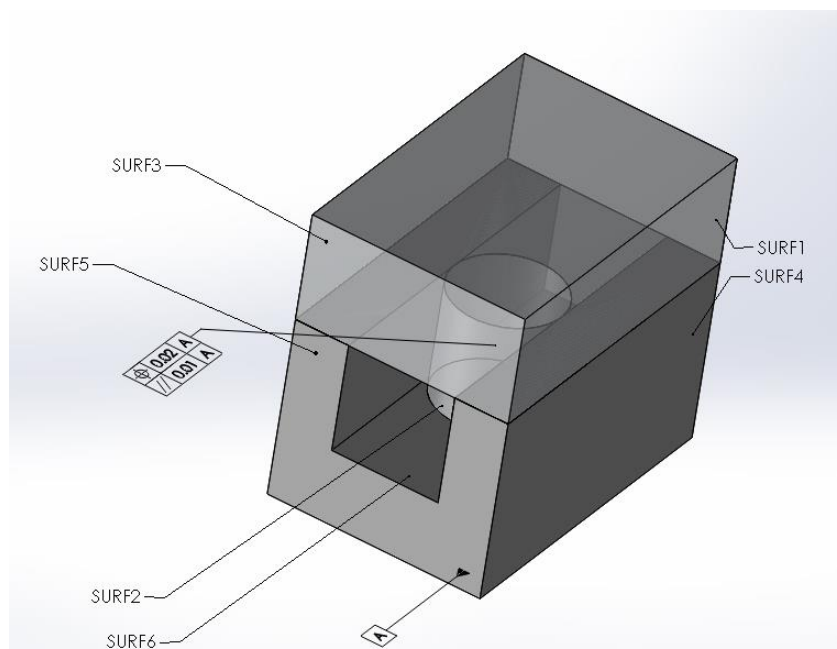
Σύμφωνα με τη θεωρία των SN, οι περιεχόμενες ιδέες και συνάψεις του συστήματος, περιέχονται πιο κάτω στους Πίνακες 2 και 3.

Πίνακας 2 Format του ορισμού των ιδεών.

name	Value
SURF (1)	(FACE (PART (1)) PLANE ...)
SURF (2)	(BOSS (PART (1)) CYLINDER ...)
SURF (3)	(FACE (PART (1)) PLANE ...)
SURF (4)	(FACE (PART (2)) PLANE ...)
SURF (5)	(FACE (PART (2)) PLANE ...)
SURF (6)	(SLOT (PART (2)) PLANE ...)

Πίνακας 3 Format του ορισμού των συνάψεων.

name	synapsis between	Value
SYN (1)	SURF (1) SURF (4)	(MATE (SURF (4) SURF (1)) () ())
SYN (2)	SURF (2) SURF (6)	(MATE (SURF (6) SURF (2)) () ())
SYN (3)	SURF (3) SURF (5)	(FLUSH (SURF (5) SURF (3)) () ((PARALLELISM 0.01) (POSITION 0.02)))



Σχήμα 48 Ορισμός των συνεργαζόμενων features και των απαραίτητων ανοχών στο assembly.

Στην περίπτωση των δύο πρώτων συνάψεων, αρκεί ο ορισμός του απλού mating των επιφανειών, καθώς δεν υπάρχει άλλη λειτουργική απαίτηση για τις συνδεόμενες επιφάνειες και άρα καμία ρητή γεωμετρική ανοχή. Στην περίπτωση της τελευταίας σύνδεσης, η φύση της λειτουργίας της είναι η έλλειψη επαφής, επομένως τονίζεται η ανάγκη ορισμού ανοχής για την παραλληλία και τη σχετική θέση των συγκεκριμένων επιφανειών. Ξεκάθαρα λοιπόν, μια «χαλαρή» τοποθέτηση (flush positioning) των δύο επιφανειών χωρίς την πληροφορία για την ανοχή, δεν θα επαρκούσε για τη σωστή επικοινωνία της ουσίας του σχεδιασμού.

Έτσι, φαίνεται ότι στη διαδικασία της συναρμολόγησης με τη χρήση SN, αναδεικνύονται οι επιθυμητές λειτουργικότητες, συνδυασμένες με τις απαιτήσεις για τη χωροταξική θέση των αντικειμένων.

Πορεία του αλγορίθμου για ορθή τοποθέτηση ανοχών σε επίπεδο συναρμολογήματος (Functional Assembly)

Τα CAD προγράμματα περιέχουν περιβάλλοντα assembly, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για το χτίσιμο του κώδικα του functional assembly αλλά και ως εργαλεία απεικόνισης των αντικειμένων. Ταυτόχρονα με το γραφικό περιβάλλον, ο προγραμματιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει έτοιμες βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων που παρέχονται από τα προγράμματα. Επιλέχθηκε το περιβάλλον assembly του SolidWorks 14, ως βάση για την προτεινόμενη προσθήκη. Τέλος, υπάρχουν εργαλεία στο ίδιο το πρόγραμμα, τα οποία εξυπηρετούν στην κατεύθυνση του ορισμού του functional assembly, οπότε θα χρησιμοποιηθούν και αυτά.

Το σχήμα 49 απεικονίζει την πορεία του αλγορίθμου για την επίτευξη ενός functional assembly. Αρχικά, ο σχεδιαστής, έχει τη δυνατότητα να επιλέξει για τη συναρμολόγηση, ανάμεσα στην προϋπάρχουσα εντολή του απλού Mate και στην νέα εντολή “Functional Assembly”. Τη στιγμή που επιλέγεται η εντολή για εκκίνηση του functional assembly, ξεκινά να τρέχει ο κώδικας παράλληλα στον στάνταρ κώδικα του SolidWorks, ενώ στο θεωρητικό επίπεδο των SN, δημιουργείται μια σύναψη η οποία αναμένει τις εισόδους-ιδέες από το χρήστη, για να τις ενώσει.

Το πρώτο μήνυμα της διαδικασίας αφορά στην επιλογή ή την εισαγωγή των ουσιαστικών αντικειμένων που επιθυμεί ο σχεδιαστής να ενώσει. Αυτό συμβαίνει, διότι απαιτούνται τουλάχιστον δύο αντικείμενα για την εκτέλεση του κώδικα του functional assembly. Ανά πάσα στιγμή, ο σχεδιαστής δύναται να εισάγει νέα αντικείμενα προς σύνδεση με τα πρώτα. Στο επίπεδο SN, αυτά τα δύο αντικείμενα που έχουν επιλεγεί, αποτελούν δύο ιδέες χωρίς να υπάρχει κάποια σύναψη ανάμεσά τους, καθώς δεν έχει αποφασιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα συνδεθούν.

Το επόμενο βήμα, είναι να οριστεί η *σχέση της θέσης* (positioning relationship) που θα έχουν τα δύο αυτά αντικείμενα (ας είναι $PREL_{(ij)}$), η οποία όμως αποτελεί την πρώτη σύναψη μεταξύ των δύο αντικειμένων-ιδεών. Η τοποθέτηση μιας $PREL_{(ij)}$, υποχρεώνει το σχεδιαστή να εισάγει άμεσα τα εξής στοιχεία:

- ένα ζεύγος επιφανειών
- τα κάθετα στις επιφάνειες διανύσματα
- μία ή περισσότερες ανοχές

Αυτή η *υποχρέωση*, αποσκοπεί στο να κάνει το σχεδιαστή να αποφασίσει/αντιληφθεί ότι το ζεύγος επιφανειών που διάλεξε είναι το αναγκαίο και ικανό ζεύγος για να υλοποιήσει τη λειτουργία που αυτός επιθυμεί. Αυτό το βήμα είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία, για το ζεύγος που ο σχεδιαστής επιλέγει να συνδέσει κάθε φορά και συγχρόνως παράγει τα data που απεικονίζονται στο σχήμα 49 ότι δημιουργούνται. Αυτά τα data είναι τα εξής:

- ένα mate
- μία ή περισσότερες γεωμετρικές ανοχές
- ένας δείκτης φυσικής συσχέτισης (physical contact relationship flag) των δύο αντικειμένων (αυτή η επισήμανση πυροδοτείται από επόμενο βήμα)

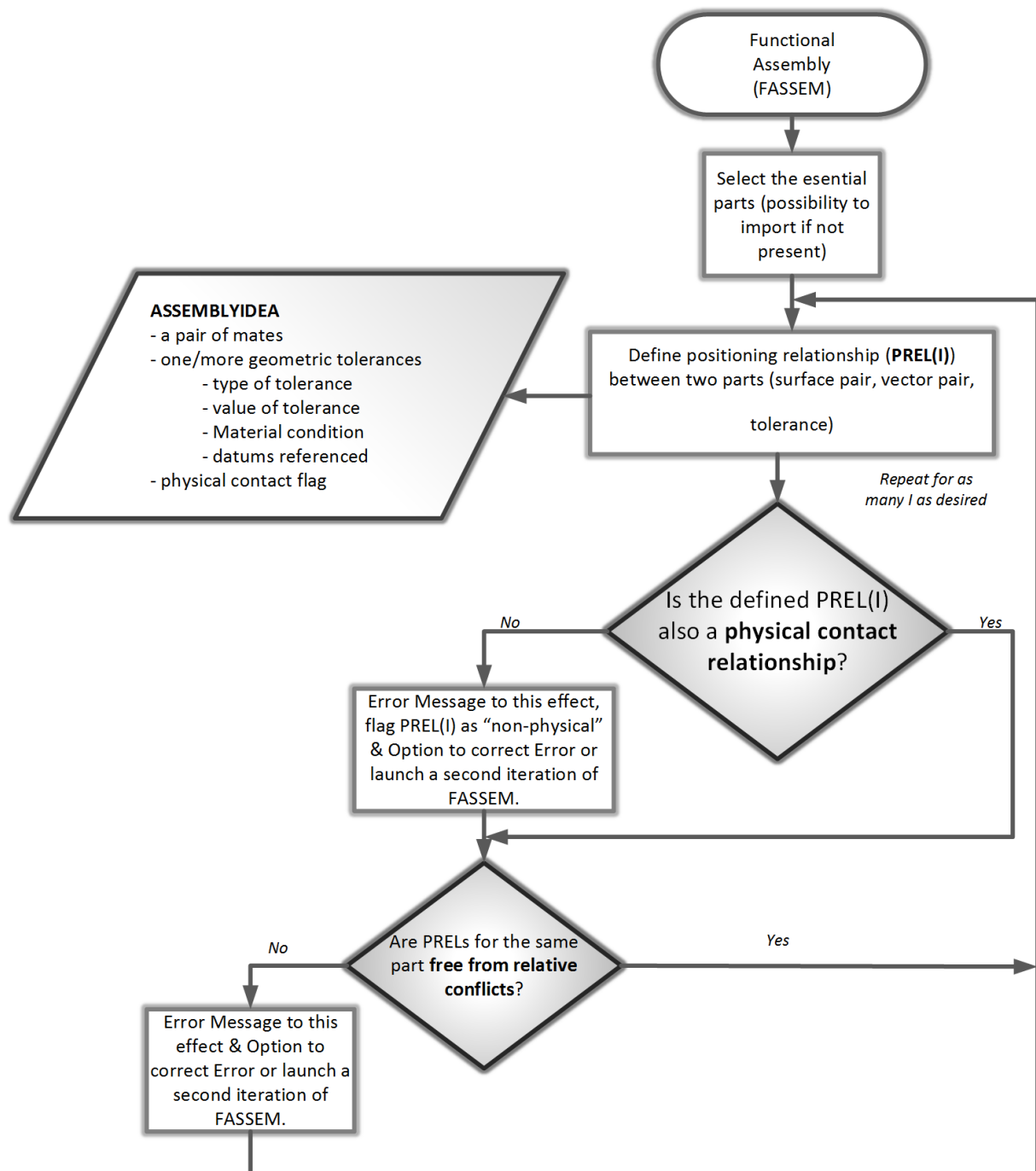
Οι γεωμετρικές ανοχές αποτελούνται από μια υπο-ομάδα δεδομένων:

- τύπος ανοχής
- αριθμητική τιμή της ανοχής
- συνθήκες υλικού (material conditions)
- αναφορές επιφανειών

Συνεπώς, μία $PREL_{(i)}$ και το παραπάνω σύνολο των δεδομένων αφορούν ένα ζευγάρι επιφανειών.

Μετάπειτα στον αλγόριθμο, έρχεται το κομβικό βήμα για την απόφαση κατά πόσο η σχέση της θέσης των δύο επιφανειών, αποτελεί και *υλική συσχέτιση* των δύο αντικειμένων (δηλαδή αν στην πράξη αυτά τα δύο αντικείμενα είναι ενωμένα). Το αποτέλεσμα αυτού του ελέγχου, καθορίζει την τιμή της επισήμανσης που προαναφέρθηκε (True/False) και σαφώς, το αν μεταφράζεται ορθά η λειτουργικότητα των δύο επιφανειών.

Ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα του προηγούμενου ελέγχου, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να ορίζει καινούργια *PRELs* με άλλα αντικείμενα και άλλες επιφάνειες, δηλαδή καινούργιες συνάψεις στο SN. Αυτό το γεγονός, θα αυξήσει την πολυπλοκότητα του συναρμολογήματος, οπότε από εδώ απορρέει η ανάγκη για έναν δεύτερο έλεγχο. Ο έλεγχος αυτός, αφορά στην έλλειψη σχετικών σφαλμάτων των ανοχών, λόγω του υπερορισμού κάποιων λειτουργιών/ανοχών/β.ε. (self-consistency).



Σχήμα 49 Πορεία του αλγορίθμου του Functional Assembly, στη γλώσσα των flowcharts.

Σε κάποια δεδομένη στιγμή σε αυτή τη διαδικασία, εφόσον όλες οι PRELs αποτελούν και υλικές συσχετίσεις των επιφανειών τους (1^{ος} έλεγχος) και την ίδια στιγμή, δεν υπάρχουν σχετικά σφάλματα στο συναρμολόγημα (2^{ος} έλεγχος), τότε ο σχεδιαστής έχει καταφέρει ένα **functional assembly**. Κάθε στιγμή, ο σχεδιαστής μπορεί να τροποποιήσει δεδομένα στην κατεύθυνση διόρθωσης των εντοπισμένων σφαλμάτων, ή στην κατεύθυνση δημιουργίας επιπλέον PRELs. Σε κάθε περίπτωση και παρά τους περιορισμούς που τίθενται, η εμπειρία και η δημιουργικότητα του σχεδιαστή στο να επιλύει τα προβλήματα, είναι εν τέλει οι παράγοντες που θα οδηγήσουν σε ένα λειτουργικά βελτιωμένο συναρμολόγημα.

Μήτρα χύτευσης υπό πίεση

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται η πρώτη εισαγωγή στο case study που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την ανάδειξη του αλγόριθμου για τις ανοχές σε επίπεδο συναρμολογήματος.

Το σχεδιαστικό θέμα που επιλέχθηκε για την επίδειξη του add-in που υλοποιήθηκε, είναι η μήτρα για χύτευση υπό πίεση (injection moulding), μιας βάσης 4x6 υποδοχέων πιπετών για χρήση από το Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Βιοιατρικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, σε συνεργασία με το οποίο έγιναν και τα πρώτα σχέδια της μήτρας, η κατασκευή της και κάποια πειράματα για τη λειτουργικότητάς της.

Πλαστικές πιπέτες, σε όρους εμβιομηχανικής, χρησιμοποιούνται προκειμένου να μεταφέρουν ένα ρευστό σε ένα βιολογικό δείγμα. Η συγκεκριμένη βάση αποτελείται από 24 σωληνωειδείς υποδοχείς με κωνική διαμόρφωση στις άκρες και επάνω της προσαρμόζονται 24 εύκαμπτες πιπέτες. Η βάση με τις πιπέτες αργότερα παίρνει θέση πάνω σε 24 δοκιμαστικούς σωλήνες με δείγματα χόνδρων γονάτου, με σκοπό να υποδεχτούν το καθένα διαφορετικά είδη πρωτεϊνών μέσω ενός ρομποτικού βραχίονα ο οποίος εγχύνει διαμέσου της βάσης και των πιπετών. Αργότερα, τα δείγματα χόνδρων, ελέγχονται για την ανάδειξη ή την υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Ως προδιαγραφές λειτουργίας της μήτρας χύτευσης, ορίστηκαν οι εξής:

- Το υλικό της χύτευσης θα είναι πολυπροπυλένιο PP4052F. Αυτό καθορίζει την επιλογή του υλικού της μήτρας, στο σχεδιασμό των κοιλοτήτων της μήτρας και των γεωμετριών για καλύτερη απόψυξη, καθώς και σε παραμέτρους για την επιτυχή διεξαγωγή του πειράματος.
- Η κατασκευασμένη μήτρα, θα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη χειροκίνητη μηχανή injection moulding που έχει το Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και Βιοιατρικής Τεχνολογίας. Αυτό καθορίζει στο μέγεθος της μήτρας, στη γεωμετρία του σχετού έγχυσης, στον όγκο του προς χύτευση υλικού, στη θερμοκρασία του πλαστικού τη στιγμή της έγχυσης, στην ταχύτητα της έγχυσης και σε όλες τις παραμέτρους του πειράματος.
- Υλοποίηση της εξωτερικής κωνικής γεωμετρίας στις άκρες των σωλήνων, καθώς και επίτευξη των ονομαστικών διαστάσεων με συγκεκριμένη ακρίβεια, προκειμένου να επιτελείται επιτυχής σύνδεση των κώνων με τις εύκαμπτες πιπέτες. Αυτό συντελεί στο λεπτομερή σχεδιασμό της γεωμετρίας της μήτρας και σαφώς στις επιλεγόμενες γεωμετρικές ανοχές.
- Η δημιουργία των αγωγών των κώνων, δεν είναι υποχρεωτικό να υλοποιηθεί κατά τη διαδικασία του injection moulding.

Οι προδιαγραφές επιρεάζουν άμεσα το σχεδιασμό όλων των εμπλεκόμενων στο συναρμολογημένο προϊόν, μερών, ενώ από τα πιο κάτω βασικά χαρακτηριστικά μιας

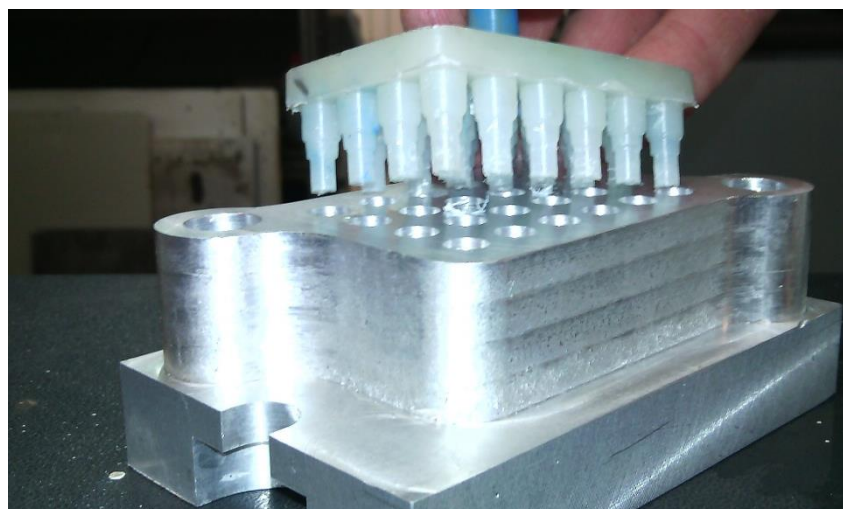
injection χύτευσης, απορρέουν κομβικές πληροφορίες για τις ανοχές που έχει κληθεί ο μηχανικός να ορίσει στα μηχανολογικά -προς κατασκευή των κομματιών- σχέδια. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Ακρίβεια ευθυγράμμισης των 2 μερών της μήτρας.
- Απαγωγή αέρα από την κοιλότητα κατά τη διάρκεια της χύτευσης.
- Απόψυξη μήτρας και προϊόντος.
- Συνυπολογισμός συστολής/διαστολής του υλικού της μήτρας.
- Υπολογισμός δύναμης σύσφιξης των μερών της μήτρας.
- Ικανότητα εξόλκευσης του προϊόντος της χύτευσης από την κοιλότητα της μήτρας.

Στα σχήματα 50 και 51 φαίνονται η βάση για τις πιπέτες όπως παράγεται από την ταχεία προτυποποίηση και το τελικό αποτέλεσμα ύστερα από την κατασκευή και πείραμα της μήτρας.



Σχήμα 50 Βάση για πιπέτες από 3D printing.

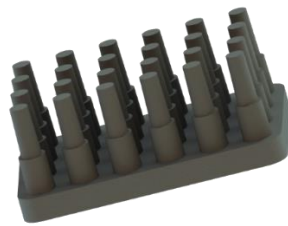


Σχήμα 51 Μέρος του καλουπιού και το τελικό προϊόν της χύτευσης.

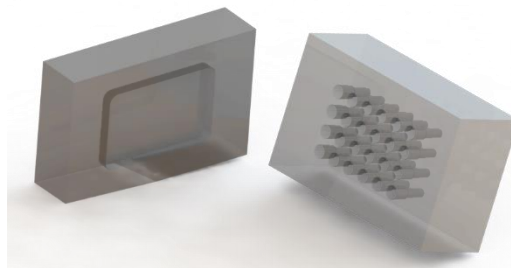
Εφαρμογή του Functional Assembly στη συναρμολόγηση της μήτρας

Πιο κάτω αναλύεται η πορεία σε βήματα, του αλγορίθμου του functional assembly. Η ιδέα είναι να εμφανιστούν οι επιπτώσεις που επιφέρει ο αλγόριθμος καθώς ενσωματώνεται στη σχεδιαστική διαδικασία.

1. Αρχικά ο σχεδιαστής σχεδιάζει το προϊόν που θέλει να προκύπτει από τη διαδικασία της χύτευσης (Σχήμα 52) και αποφασίζει τη γεωμετρία των δύο σε-επαφή επιφανειών (parting surfaces) των δύο αντικειμένων. Αργότερα, σχεδιάζει τις δύο κοιλότητες και τα αντικείμενα στα οποία αυτές ενσωματώνονται (Σχήμα 53).

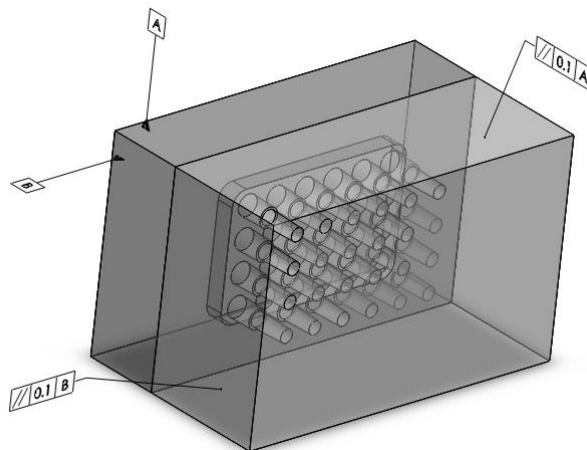


Σχήμα 52 Επιθυμητό προϊόν χύτευσης.



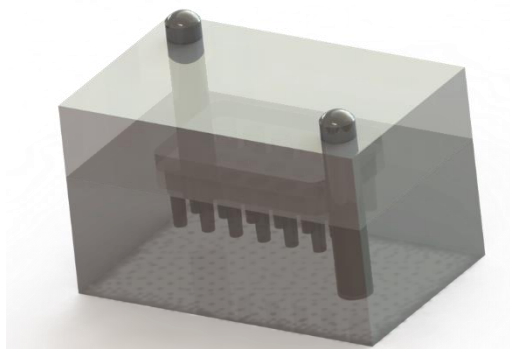
Σχήμα 53 Τα δύο μέρη του καλουπιού σε πρώιμο σχεδιαστικό στάδιο.

2. Στην περίπτωση που η πρώτη προσπάθεια του σχεδιαστή να συναρμολογήσει τα δύο αντικείμενα αποτυγχάνει στον 1^ο έλεγχο για την υλική συσχέτιση (Σχήμα 54), τότε ο σχεδιαστής έρχεται στη θέση όπου πρέπει να επιλέξει είτε να διορθώσει το σφάλμα που αναδείχτηκε με σκοπό να περάσει τον 1^ο έλεγχο, ή να προχωρήσει στον ορισμό περισσότερων σχέσεων.

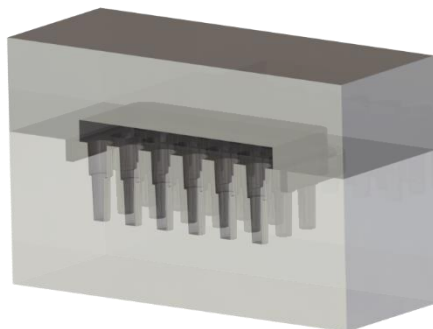


Σχήμα 54 Αποτυχία στον 1ο έλεγχο του αλγορίθμου.

3. Για τη διόρθωση του σφάλματος που αναδείχθηκε στον 1^ο έλεγχο, υπάρχουν αρκετές σχεδιαστικές εναλλακτικές, αλλά εδώ παρουσιάζονται δύο από αυτές. Η πρώτη εναλλακτική είναι να προκαλέσει τη σχέση αρσενικής-θηλυκής γεωμετρίας, όπως για παράδειγμα να δημιουργήσει οπές οι οποίες θα δεχθούν πείρους (σχήμα 55). Η δεύτερη εναλλακτική προκειμένου να προκαλέσει υλική συσχέτιση των επιφανειών, είναι η δημιουργία γεωμετριών σύνδεσης στις επιφάνειες του καλουπιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 56.

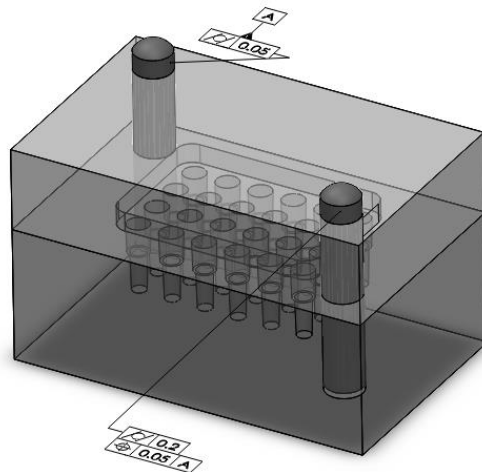


Σχήμα 55 Σχεδιαστική εναλλακτική με πείρους ευθυγράμμισης (dowel pins).



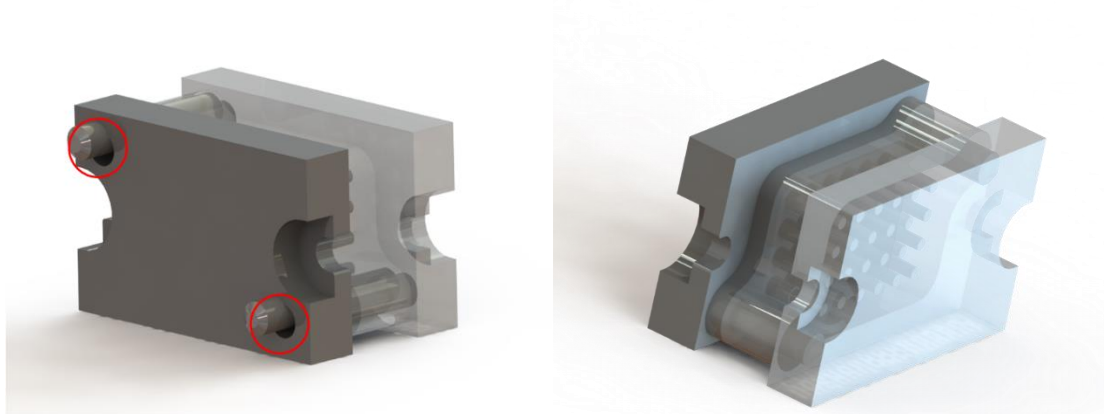
Σχήμα 56 Σχεδιαστική εναλλακτική με ροσενική και θηλυκή γεωμετρία (slot).

4. Στο δίλημμα του σχεδιαστή, ποια εναλλακτική να επιλέξει, εδώ επιλέγεται η 1^η εναλλακτική με τους πείρους καθώς η άλλη εγκυμονεί προβλήματα ευθυγράμμισης και απαγωγής του αέρα από την κοιλότητα.
5. Ο αλγόριθμος του 2^{ου} ελέγχου, τρέχει σε κάθε περίπτωση προσθήκης νέας *PREL* ή επιβολής αλλαγών σε κάποια υπάρχουσα σχέση 2 ή περισσότερων επιφανειών (π.χ. αλλαγή της τιμής μιας ανοχής, άρα και αλλαγή της ζώνης ανοχών). Το σχήμα 57 παρουσιάζει μία πιθανή περίπτωση αντικρουόμενων τιμών των ανοχών, η οποία οδηγεί σε έλλειψη λειτουργικότητας λόγω αποτυχίας στο 2^ο έλεγχο όπου έγινε ο υπολογισμός της ζώνης ανοχών.



Σχήμα 57 Αποτυχία στο 2ο έλεγχο του αλγορίθμου. Το πρόβλημα είναι στις τιμές των γεωμετρικών ανοχών.

6. Η διόρθωση του συγκεκριμένου προβλήματος γίνεται με αλλαγή των τιμών των ανοχών. Η επίδειξη του αλγορίθμου κλείνει με κάποιες αλλαγές στα μέρη του καλουπιού, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις υπόλοιπες λειτουργικότητες που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να αποφευχθούν βασικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της ίδιας της χύτευσης (σχήμα 59). Υπάρχει αφαίρεση υλικού στο προφίλ για πιο ικανοποιητική απόψυση, δύο κοιλίες-εξολκείς στο πίσω μέρος του ενός αντικείμενου και μία θύρα έγχυσης υλικού στο άλλο αντικείμενο. Τέλος, στο σχήμα 58 φαίνεται ένα σφάλμα στη χρήση του περιορισμού Mate, το οποίο διορθώνεται με επιπλέον *PREL* ανάμεσα στον πείρο και στη μήτρα.



Σχήμα 58 (αριστερά) Συναρμολόγημα με προβληματικές τις σχέσεις των κάθετων διανυσμάτων των σχετιζόμενων επιφανειών (άξονες-τρίματα).

Σχήμα 59 (δεξιά) Τελικό functional assembly της μήτρας.

Κεφάλαιο 4: Γενικά Συμπεράσματα

Οι εφαρμογές θα μπορούσαν να αφορούν διαφορετικά Design-for-X προβλήματα. Ο σκοπός του είναι να δείξουν ότι ο χρήστης μπορεί να ασχολείται, γενικά, με οτιδήποτε κινεί το ενδιαφέρον του σε ένα εξάρτημα ή σε ένα συναρμολόγημα, αλλά αν αυτό το κάνει χρησιμοποιώντας τα SN, θα καταλήξει να διατηρεί την ουσία του σχεδιασμού του, να μπορεί εύκολα να την προσπελάσει στο μέλλον, αλλά και να την επεκτείνει προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Ουσιαστικά δεν αποκτάει κάποια νέα γνώση που αγνοούσε πριν, αλλά καταφέρνει να οπτικοποιήσει το πρόβλημα και να το προσεγγίσει ως πολυσύνθετο που είναι και όχι ως πολλά διαφορετικά υπο-προβλήματα που απλώς θα δημιουργούσαν πληροφορίες, χωρίς αυτές να διαχειρίζονται σωστά.

Η προφανής σύνδεση των εξαρτημάτων ενός συναρμολογήματος (ή των γεωμετριών ενός εξαρτήματος), δηλαδή αυτό που γίνεται αντιληπτό τη στιγμή που κάποιος κοιτάει ένα εξάρτημα/συναρμολόγημα, υλοποιεί τις συνάψεις (και κατ'επέκταση το SN), πάνω στις οποίες θα δομηθεί η ουσία του σχεδιασμού/ανάλυσης κλπ. *Οι συνάψεις είναι τα μόνα σταθερά στοιχεία στη σχεδιαστική διαδικασία, απλώς για διαφορετικό πρόβλημα, μεταφέρουν διαφορετικές πληροφορίες και καταλήγουν σε διαφορετικά, αλλά σίγουρα χρήσιμα, αποτελέσματα.*

Στη συνέχεια αναφέρονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Συμπεράσματα για τα Συναπτικά Δίκτυα

1. Τα συναπτικά δίκτυα είναι μια ολοκληρωμένη άλγεβρα για το σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική συστημάτων.
2. Ο σχεδιασμός και η ανακάλυψη του σχεδιαστικού χώρου (design space exploration), γίνονται αντιληπτές ως εξέλιξη και τροποποίηση των SN του συστήματος/μοντελου.
3. Η εμπειρία και η γνώση που δημιουργείται, διατηρείται και θα είναι άμεσα μελλοντικά προσβάσιμη, χωρίς να κινδυνεύει ο εκάστοτε σχεδιασμός.
4. Η μεθοδολογία του σχεδιασμού, υλοποιείται σε σύνολα κανόνων των τελεστών των SN, οι οποίοι είναι λογικές και μαθηματικές διαδικασίες προγραμματίσιμες και ενσωματώσιμες σε CAD και PLM συστήματα.
5. Υποστήριξη και των δύο δρόμων ανάμεσα στο γενικό και το ειδικό:
6. Από το γενικό στο ειδικό: σχεδιασμός (design)
7. Από το ειδικό στο γενικό: ανάλυση, αντίστροφος σχεδιασμός (reverse engineering)

8. Ειδικότερα για το σχεδιασμό:
9. Από το περιβάλλον και τα σενάρια, στις λειτουργικότητες: Conceptual Design
10. Από το περιβάλλον και τα σενάρια, στις ενεργές διεπιφάνειες και σε υπολειτουργίες: Architecture/Configuration Design
11. Από το περιβάλλον και τα σενάρια, στους σχεδιαστικούς βαθμούς ελευθερίας: Embodiment Design
12. Από το περιβάλλον και τα σενάρια, στη 3D μορφή και σε λοιπές λειτουργικές λεπτομέρειες: Detail Design
13. Με τη χρήση των SN, επιτυγχάνεται σχετικά αυτόματη οργάνωση στη δομή του μοντέλου, καθώς υποστηρίζεται η φυσική, μη-αλγοριθμική και δημιουργική σκέψη.
14. Γρήγορη ανάλυση του SN και αναγνώριση σφαλμάτων είτε στον ορισμό ιδεών, είτε στον ορισμό συνάψεων.
15. Δυνατότητα άμεσων τροποποιήσεων.
16. Συστηματική και εστιασμένη διαχείριση της πολυπλοκότητας του συστήματος.
17. Διατήρηση των συνάψεων του SN καθώς μέσω αυτών επικοινωνείται η ουσία της μοντελοποίησης και του σχεδιασμού.
18. Εμφανής η διάκριση των λειτουργικών sub-assemblies στο τελικό SN, καθώς το κάθε sub-assembly αποτελεί ένα υπο-δίκτυο.
19. Αυτόματη παραγωγή αποτελεσμάτων, όταν ο σχεδιαστής εισάγει στις συνάψεις συγκεκριμένες ιδιότητες/περαμέτρους του συγκεκριμένου προβλήματος.
20. Η δημιουργικότητα στις σχεδιαστικές λύσεις, προσεγγίζεται συστηματικά και όχι μηχανιστικά.
21. Οι υλοποιημένες λειτουργίες, απεικονίζονται ως μονοπάτια συνάψεων και αποτελούν υπο-δίκτυα.
22. Τα SN, μοντελοποιούν multi-physical συστήματα.
23. Οι απαντήσεις σε εναλλακτικά (What if) ερωτήματα, προκύπτουν πριν τη φάση της αρχιτεκτονικής.
24. Τα απλούστερα SN, μπορούν να αποφανθούν για προβλήματα εύρεσης της αλήθειας (reality checks), ενώ τα πιο σύνθετα καταλήγουν σε αποτελέσματα εκτίμησης/πρόβλεψης καταστάσεων και λειτουργούν προσομοιωτικά για διάφορα σενάρια λειτουργίας, σε πραγματικό χρόνο.
25. Επίσης δυνατή είναι και η απεικόνιση συνθηκών αβεβαιότητας, καθώς και η πρόβλεψη της πορείας τέτοιων συστημάτων.
26. Επίσης, τα SN είναι ικανά για τη μοντελοποίηση σύνθετων/ασυνήθιστων φαινομένων, όπως για παράδειγμα φαινόμενα φθοράς/γήρανσης.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η χρήση των SN είναι αναγκαίο να συνεχιστεί και να αναδειχτεί στα σχεδιαστικά προβλήματα, προκειμένου να γίνουν αλλαγές και προσαρμογές για την επίλυση νέων προβλημάτων που θα αναδειχθούν. Έτσι, σε πρώτο στάδιο, οι ήδη ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι πρέπει να φτάσουν σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο αυτοματοποίησης στα CAD προγράμματα, αλλά επίσης, να αναπτυχθούν και να εισαχθούν νέες μεθοδολογίες βασισμένες στα SN για τη μελέτη/ανάλυση ποικίλων Design-for-X προβλημάτων. Σίγουρα, θα χρειαστεί κάποια στιγμή να δημιουργηθεί και η ζωντανή απεικόνιση του SN κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, με τις συνάψεις να έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν ιδιότητες, να υλοποιούν φυσικούς νόμους αλλά και λογικές πράξεις και έτσι να προχωρήσει η έρευνα προς το ιδεατό υπολογιστικό εργαλείο στο οποίο ο χρήστης θα υλοποιεί τις μελέτες για τα Design-for-X σενάρια, σε ένα περιβάλλον, χρησιμοποιώντας τα απολύτως απαραίτητα δεδομένα.

Ο αλγόριθμος για το parttolerancing είναι ξεκάθαρος και συνεπής (consistent) σε ό,τι αφορά στην ουσία του και στα μηνύματα που επιθυμεί να περάσει στο χρήστη. Παρ' όλ' αυτά, ο κώδικας που αναπτύχθηκε δεν εκτελεί με πλήρως αυτόματο τρόπο τους ελέγχους του αλγορίθμου και αυτό οφείλεται σε καθαρά προγραμματιστικές δυσκολίες. Οι έλεγχοι που υλοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο χρήστη σε μορφή μηνυμάτων (prompts) προκειμένου να εκτελέσει συγκεκριμένες δράσεις.

Πιθανώς, όταν είναι πια, εύκολη η μοντελοποίηση με τη χρήση SN στα σύγχρονα CAD, ο Η/Υ να μπορεί συμψηφίζοντας τα αποτελέσματα συγκεκριμένων Design-for-X προβλημάτων, να λαμβάνει σχεδιαστικές αποφάσεις και σε επόμενο επίπεδο να προτείνει σχεδιαστικές λύσεις.

Για το άμεσο μέλλον, υπάρχουν και προγραμματισμένα πειράματα σε νέους μηχανικούς, για τη χρήση των υλοποιημένων εργαλείων και το κατά πόσον επιτυγχάνεται ο στόχος τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C Spitas, "Analysis of systematic engineering design paradigms in industrial practice: Scaled experiments," *Journal of Engineering Design*, no. 22, 7, pp. 447-465, 2011.
- [2] C Spitas, "Definition of a functional class of ideas for Integrated Product Development and supporting theory," in *9th International Workshop for Integrated Product Development*, 5-7 Sept, Magdeburg, 2012.
- [3] C Spitas, V Spitas, and M Rajabalinejad, "Case Studies in Advanced Engineering Design," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Case Studies in Advanced Engineering Design*, 17-18 May, Athens, 2013.
- [4] C Spitas, "Beyond frames: A formal human-compatible representation of ideas in design using non-genetic ad-hod and volatile class memberships and corresponding architecture for idea operators," in *International Conference on Engineering Design 2013 (ICED13)*, 19-22 August, Seoul, 2013a.
- [5] C Spitas, "Object- Context- Goal Analysis," in *SIG Decision Making workshop*, Paris, 2013.
- [6] R Holm, "Electrical Contacts," *Almqvist and Wilselles*, 1946.
- [7] J F Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of Applied Physics*, no. 24, 8, pp. 981-988, 1953.
- [8] A A Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, no. A221, pp. 163-198, 1921.
- [9] G Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate," *Journal of Applied Mechanics*, no. 24, pp. 361-364, 1957.
- [10] P C Paris, M P Gomez, and W E Anderson, "A rational analytic theory of fatigue," *The Trend in Engineering*, no. 13, pp. 9-14, 1961.
- [11] Merriam, Webster, "*On-Line Dictionary & Thesaurus*.", <http://www.merriam-webster.com/>
- [12] C Spitas and V Spitas, "Direct analytical solution of a modified form of the meshing equations in two dimensions for non-conjugate gear contact," *Applied Mathematical Modelling*, no. 32, 1, pp. 2162-2171, 2007
- [13] C Spitas and V Spitas, "Calculation of overloads induced by indexing errors in spur gearboxes using multi-degree-of-freedom dynamic simulation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, no. 220, 2006
- [14] J O Almen, "Surface Deterioration of Gear Teeth," *Mechanical Wear*, pp. 229, 1950

- [15] H Blok, "Les Temperatures de Surface Dans Conditions de Graissage Sous Extreme Pression," *Proc. Second World Petr. Congress, Section IV*, vol. III, pp. 471
- [16] D W Dudley, "Practical Gear Design," McGraw-Hill, 1954
- [17] B W Kelley, "A New look at the Scoring Phenomena of Gears," *SAE Transactions*, no. 61, pp. 175, 1952
- [18] V Spitas, G A Papadopoulos, C Spitas and T Costopoulos, "Experimental Investigation of Load Sharing in Multiple Gear Tooth Contact Using the Stress-Optical Method os Caustics," *Strain*, no. 47, pp. 227-233, 2009
- [19] C Spitas, "Analysis of systematic engineering design paradigms in industrial practice: a survey," *Journal of Engineering Design*, no. 22, 7, pp. 427-445, 2010
- [20] C Spitas, "Analysis of systematic engineering design paradigms in industrial practice: scaled experiments," *Journal of Engineering Design*, no. 22, 7, pp. 447-465, 2010
- [21] J Majak, M Pohlak, R Kuttner, M Eerme and K Karjust, "Artificial neural networks and genetic algorithms in engineering design," in *EngOpt 2008*, 01-05 June, Rio de Janeiro, 2008
- [22] I Sheng, I Lim and T Kok-Soo, "Eco-Efficient Product Design Using theory of Intensive Problem Solving (TRIZ) Principles," *American Journal of Applied Sciences*, no. 7, 6, pp. 852-858, 2010
- [23] K Clement, A Jordan and S Vajna, "The Autogenetic Design Theory - an Evolutionary View of the Design Process," in *International Conference on Engineering Design 2003 (ICED '03)*, 19-21 August, Stockholm, Design Society, 2003
- [24] G Pahl, W Beitz, J Feldhusen and K H Grote, "Engineering Design: A Systematic Approach," 3rd Edition, London: Springer, 2007
- [25] Y Reich, "A critical review of General Design Theory," *Research in Engineering Design*, no. 7, 1, pp. 1-18, 1995
- [26] G Mavrikas, V Spitas and C Spitas, "Introduction of structural-specific functions for computational models based on synaptic networks," in *1st International conference on Ageing of Materials and Structures (AMS 2014)*, 26-28 May, Delft, 2014
- [27] G Mavrikas, V Spitas and C Spitas, "Functional Assembly using synaptic networks: Theory and a demonstration case study," in *International Conference on Engineering Design 2015 (ICED '15)*, 27-30 July, Milan, Design Society, 2015