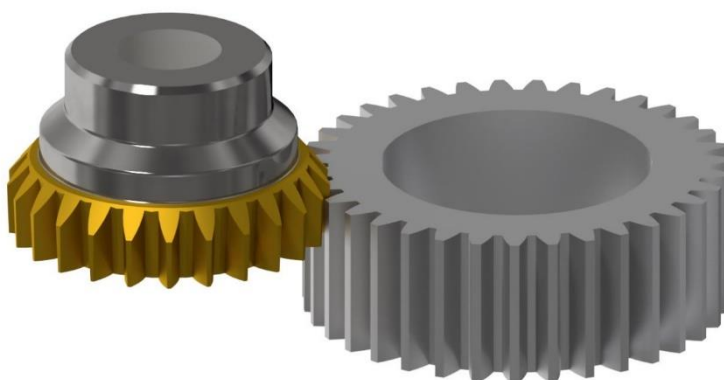




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΝΙΣΗ ΜΕ ΚΥΛΙΣΗ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΝ



ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ ΔΑΝΔΟΥΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Αριστομένη Αντωνιάδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και την άμεση καθοδήγηση του πάνω σε αυτό. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον υποψήφιο Δρ. Άγγελο Μαρινάκη για την υπομονή του και την συνεχή καθοδήγηση του από τις πρώτες έννοιες του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού μέχρι τις ατελείωτες ώρες εντοπισμού σφαλμάτων στον κώδικα. Χωρίς την βοήθεια του, η διπλωματική αυτή δε θα είχε πραγματοποιηθεί.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου που στήριξαν όλες τις επιλογές μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 3 -
ABSTRACT	- 4 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 7 -
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	- 7 -
1.2 Δομή της εργασίας.....	- 7 -
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ	- 8 -
2.1 Οδοντωτοί τροχοί	- 8 -
2.2 Γεωμετρία οδοντωτών τροχών.....	- 9 -
2.3 Κοπή οδοντώσεων	- 12 -
2.4 Πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού	- 14 -
2.5 Άλλα προσομοιωτικά μοντέλα.....	- 16 -
3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	- 30 -
3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου	- 30 -
3.2 Δομή προσομοίωσης.....	- 30 -
3.3 Κοπτικό Εργαλείο	- 32 -
3.4 Κατεργαζόμενος τροχός.....	- 36 -
3.5 Προσέγγιση κινηματικής κατεργασίας	- 37 -
3.5.1 Κατακόρυφη τροχιά δοντιού του κοπτικού τροχού	- 37 -
3.5.2 Τόξο Εργασίας δοντιού του κοπτικού τροχού.....	- 39 -
3.6 Αυλάκι οδοντωτού τροχού	- 40 -
3.7 Απόβλιπτα	- 41 -
3.8 Δυνάμεις Κοπής.....	- 42 -
3.9 Το λογισμικό του μοντέλου	- 47 -
4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	- 50 -
4.1 Παρουσίαση προσομοιώσεων	- 50 -
4.2 Επαλήθευση παραγόμενου αυλακιού	- 290 -
4.2.1 Ευθεία οδόντωση [EX – SP]	- 290 -
4.2.2 Πλάγια οδόντωση [EX – SP]	- 294 -
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 298 -
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 300 -

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες κατεργασίες οδοντώσεων, ιδιαίτερα για τροχούς εσωτερικής οδόντωσης. Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθεί ένα προσομοιωτικό μοντέλο κοπής οδοντωτών τροχών μέσω πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων (gear shaping). Η μοντελοποίηση θα πραγματοποιηθεί σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με χρήση της γλώσσας Visual Basic .NET για το λογισμικό Autodesk Inventor. Θα μελετηθεί η κοπή εσωτερικών και εξωτερικών τροχών για ευθεία και πλάγια οδόντωση.

Ο κύριος σκοπός της εργασίας είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται για διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας τροχού, εργαλείου και συνθηκών κοπής κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού. Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στο αποτέλεσμα, θα μοντελοποιηθεί η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και η κινηματική της κατεργασίας. Ο χρήστης θα εισάγει στο προσομοιωτικό μοντέλο τα δεδομένα για την επιθυμητή γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τις συνθήκες κοπής του. Έπειτα, θα μελετηθεί ο σχηματισμός ενός αυλακιού του κατεργαζόμενου τροχού με την τοποθέτηση της τροχιάς του εργαλείου σε κατάλληλες θέσεις στο χώρο, σύμφωνα με την σύνθετη κινηματική της κατεργασίας.

Τέλος, θα προσδιοριστεί η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων που προκύπτουν για τη δημιουργία ενός αυλακιού αλλά και οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία. Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια του μοντέλου, θα συγκριθούν οι παρειές των παραγόμενων αυλακιών με τις αντίστοιχες θεωρητικές και οι δυνάμεις κοπής, που θα υπολογισθούν, με αντίστοιχες της βιβλιογραφίας.

ABSTRACT

Gear Shaping is one of the most widely used gear cutting processes and is mainly applied for the creation of internal gears. A simulation model of the gear shaping process is going to be developed in the present thesis. The simulation code is going to be implemented in Visual Basic . NET based on Autodesk Inventor. Cases of helical and spur, external and internal gears are going to be studied.

The main aim of the thesis is the calculation of the cutting forces developed during the process in different cases respecting the geometry of the gear, the geometry of the cutting gear and the cutting conditions. In order to achieve high accuracy both the cutting tool and the kinematics of the process are going to be modelled. The user of the simulation model will be able to choose the data input for the desired tool and workpiece geometry as well as the cutting conditions. Afterwards, the trajectory of the cutting tooth, that participates in the creation of a gear gap will be positioned according to the complex kinematics of the process.

Finally, the dimensions of the undeformed chips are also going to be calculated, in order to estimate the components of the cutting forces. In order to verify the correctness of the model, the produced gear flanks are going to be compared to the theoretical ones, and the calculated cutting forces are going to be compared to the respective measured forces obtained from the literature.

Ονοματολογία - Nomenclature

Συμβολισμός	Ορισμός	Μονάδα Μέτρησης
GP	Θέση κύλισης (generating position)	
DS	Εμβολισμός (double stroke)	
SP	Πλάνιση με κύλιση ευθείας οδόντωσης (spur gear shaping)	
HL	Πλάνιση με κύλιση πλάγιας οδόντωσης (helical gear shaping)	
EX	Πλάνιση με κύλιση εξωτερικής οδόντωσης	
IN	Πλάνιση με κύλιση εσωτερικής οδόντωσης	
AV	Πλάγια μετατόπιση κοπτικού εργαλείου	mm
s_o/s_b	Πάχος δοντιού στην αρχική/βασική περιφέρεια	mm
h_k	Ύψος κεφαλής δοντιού	mm
h_f	Ύψος ποδιού δοντιού	mm
c	Χάρη δοντιού	mm
d_k/r_k	Διάμετρος κεφαλής/ακτίνα κεφαλής	mm
d_o/r_o	Διάμετρος αρχικής περιφέρειας /ακτίνα αρχικής περιφέρειας	mm
d_b/r_b	Διάμετρος βασικής περιφέρειας /ακτίνα βασικής περιφέρειας	mm
d_f/r_f	Διάμετρος ποδών/ακτίνα ποδών	mm
t_o	Βήμα δοντιού	mm
l_o	Διάκενο δοντιού	mm
θ	Γωνία εξελιγμένης	rad
m_n	Μέτρο οδόντωσης (normal επιπέδου)	mm
m_t	Μέτρο οδόντωσης (transverse επιπέδου)	mm
z_1	Αριθμός δοντιών κοπτικού εργαλείου	
z_2	Αριθμός δοντιών κατεργαζόμενου τεμαχίου	
z_v	Αριθμός φανταστικών δοντιών	
α_o/α_n	γωνία πίεσης (normal επιπέδου)	deg
β_1	Γωνία ελίκωσης κοπτικού εργαλείου	deg
β_2	Γωνία ελίκωσης κατεργαζόμενου τεμαχίου	deg
s	Πρόωση κύλισης	mm/DS
T	Βάθος κοπής	mm

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

v	Ταχύτητα κοπής	mm/min
γ	Γωνία αποβλίπτου	deg
r_b	Ακτίνα βασικής περιφέρειας	mm
θ	Γωνία εξελιγμένης	deg
$d\varphi_1$	Περιστροφή κοπτικού εργαλείου	deg
$d\varphi_2$	Περιστροφή κατεργαζόμενου τεμαχίου	deg
$d\theta$	Περιστροφή κοπτικής κατατομής για ελικοειδείς τροχούς	deg
b	Πάχος κατεργαζόμενου τεμαχίου	mm
b_i	πλάτος τμήματος i απαραμόρφωτου αποβλίπτου	mm
h_i	πάχος τμήματος i απαραμόρφωτου αποβλίπτου	mm
F_S	Συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην ταχύτητα κοπής	N
F_R	Συνιστώσα δύναμης κοπής παράλληλα στην πρόωση	N
F_V	Συνιστώσα δύναμης κάθετη στις F_S και F_R	N
K_S, K_R, K_V	ειδικές αντιστάσεις κοπής	N/mm ²
z, x, y	σταθερά κατεργαζόμενου υλικού	N/mm ²
ω_1	Γωνιακή ταχύτητα κοπτικού εργαλείου	RPM
ω_2	Γωνιακή ταχύτητα κατεργαζόμενου τεμαχίου	RPM
s_r	Ακτινική πρόωση	mm/DS
x_c	Μετατόπιση προφίλ	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων (gear shaping) αποτελεί μία από τις κυριότερες κατεργασίες κοπής οδοντωτών τροχών υψηλής ακρίβειας. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης κοπής οδοντωτών τροχών μέσω αυτής της κατεργασίας. Η προσομοίωση πραγματοποιείται σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με χρήση της γλώσσας Visual Basic .NET για το λογισμικό Autodesk Inventor 2021. Θα μελετηθεί η κοπή εσωτερικών και εξωτερικών τροχών για ευθεία και πλάγια οδόντωση, με κύριο σκοπό τον προσδιορισμό των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη γεωμετρία του κοπτικού τροχού, την κινηματική της κατεργασίας, καθώς και στη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων. Το μοντέλο αυτό αποτελεί μέρος λογισμικού προσομοίωσης για κατεργασίες κοπής οδοντωτών τροχών, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του αντικειμένου και της δομής της παρούσας εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 2** αποτελεί την στάθμη των γνώσεων, όπου γίνεται ανασκόπηση στους οδοντωτούς τροχούς, τη γεωμετρία τους, τις κατεργασίες μορφοποίησής τους και στην πρόσφατη βιβλιογραφία σχετικά με την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο τρόπος προσέγγισης της κατεργασίας με το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε. Αρχικά δίνεται αρκετή βαρύτητα στη γεωμετρία της κατατομής του κοπτικού εργαλείου για να υπάρξει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε επόμενο στάδιο της εργασίας. Μελετάται η κινηματική της κατεργασίας, δίνοντας έμφαση στην τροχιά που διαγράφει στον τρισδιάστατο χώρο η κατατομή ενός κοπτικού δοντιού. Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι διαστάσεις των απαραμόρφωτων αποβλίπτων που προκύπτουν κατά τη δημιουργία ενός αυλακιού. Τέλος υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά τη δημιουργία ενός αυλακιού με ή χωρίς εμπλοκή του κοπτικού εργαλείου με τον κατεργαζόμενο τροχό.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διαφορετικές περιπτώσεις, γεωμετρίας κοπτικού εργαλείου, κατεργαζόμενου τροχού και συνθηκών κοπής. Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται η γεωμετρία των αποβλίπτων για κάθε θέση κύλισης ενός αυλακιού όπως επίσης και οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ελέγχθηκαν σε σχέση με αντίστοιχα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Επιπλέον ελέγχεται η ορθότητα της παραγόμενης γεωμετρίας του τροχού, μέσω λογισμικού που αναπτύχθηκε παλαιότερα στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** και **6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η βιβλιογραφία της εργασίας, αντίστοιχα.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Οδοντωτοί τροχοί

Οι οδοντωτοί τροχοί αποτελούν ένα από τα πιο διαδεδομένα και απαραίτητα στοιχεία μηχανών, λόγω της ικανότητας τους να μεταδίδουν κίνηση και ισχύ μεταξύ περιστρεφόμενων αξόνων με ευέλικτο και αξιόπιστο τρόπο. Η μετάδοση αυτή γίνεται με εμπλοκή των δοντιών του ενός οδοντωτού τροχού, που ονομάζεται κινητήριος τροχός με έναν δεύτερο, τον συνεργαζόμενο οδοντωτό τροχό. Οι οδοντώσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα ποικίλλουν σε διαστάσεις, ξεκινώντας από πολύ μικρά γρανάζια μερικών χιλιοστών σε διάμετρο, έως τεράστια γρανάζια σε τουρμπίνες που μπορεί να φτάνουν σε διάμετρο μερικά μέτρα.



Σχήμα 2.1: Οδοντωτοί τροχοί διαφόρων μεγεθών

Προκειμένου ένας οδοντωτός τροχός να συνεργάζεται με έναν άλλο και να μην υπάρχει ασυνέχεια στη μετάδοση κίνησης, τα δόντια πρέπει να έχουν το ίδιο ύψος, το ίδιο πάχος, την ίδια απόσταση μεταξύ τους και το ίδιο σχήμα. Οι άξονες ως προς τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι παράλληλοι, τεμνόμενοι υπό γωνία ή ασύμβατοι. Η κατηγοριοποίηση των οδοντωτών τροχών ποικίλει ανάλογα το κριτήριο ταξινόμησης. Με κριτήριο το βασικό σχήμα τους, οι οδοντωτοί τροχοί διακρίνονται σε:

1. Μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς
2. Κωνικούς τροχούς
3. Ατέρμονες κοχλίες – κορώνες



προσφορά της Boston Gear

Σχήμα 2.2: Οδοντώσεις διαφόρων τύπων α) μετωπικοί β) κωνικοί και γ) ατέρμονες κοχλίες - κορώνες

Ενώ ανάλογα το είδος οδόντωσης τους διακρίνονται σε τροχούς:

1. ευθείας οδόντωσης
2. ελικοειδούς/πλάγιας οδόντωσης
3. τοξοειδούς οδόντωσης



προσφορά της Boston Gear

Σχήμα 2.3: Μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί α)ευθείας β)πλάγιας και γ)τοξοειδούς οδόντωσης

Στην παρούσα εργασία αντικείμενο μελέτης θα αποτελέσουν οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ευθείας και ελικοειδούς/πλάγιας οδόντωσης (σχήμα 2.3), ενώ επίσης θα εξεταστούν περιπτώσεις εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης και για τις δύο κατηγορίες.

2.2 Γεωμετρία οδοντωτών τροχών

Ο πιο απλός γεωμετρικά οδοντωτός τροχός είναι ο μετωπικός τροχός με ευθεία οδόντωση. Σημαντικό γεωμετρικό μέγεθος αποτελεί το μέτρο οδόντωσης (modul) m , το οποίο ορίζεται ως το πηλίκο της αρχικής διαμέτρου του οδοντωτού τροχού προς τον αριθμό των δοντιών του z . Λαμβάνει τυποποιημένες τιμές σε χιλιοστά [mm]. Δύο οδοντωτοί τροχοί προκειμένου να συνεργαστούν και να μεταδώσουν κίνηση από μία άτρακτο σε μια άλλη θα πρέπει να έχουν το ίδιο βήμα και συνεπώς και το ίδιο μέτρο οδόντωσης.

$$m = d_o / z \quad [2.1]$$

Ως βήμα δοντιού ορίζεται η απόσταση t_o ανάμεσα σε δύο αντίστοιχα σημεία δύο γειτονικών δοντιών, όταν η απόσταση αυτή μετρείται πάνω στην αρχική περιφέρεια. Αντίστοιχα το τμήμα s_o ονομάζεται πάχος του δοντιού και μετρείται και αυτό πάνω στην αρχική περιφέρεια. Η διαφορά του βήματος από το πάχος του δοντιού ορίζεται ως διάκενο l_o του δοντιού.

$$t_o = \frac{\pi d_o}{z} \quad [2.2]$$

$$s_o = \frac{t_o}{2} = \frac{m\pi}{2} \quad [2.3]$$

Η απόσταση b ονομάζεται μήκος του δοντιού.

Το τμήμα k του ύψους του δοντιού που βρίσκεται έξω από την αρχική περιφέρεια ονομάζεται κεφαλή του δοντιού. Ενώ το υπόλοιπο τμήμα f του ύψους του δοντιού, που βρίσκεται μεταξύ αρχικής περιφέρειας και περιφέρειας ποδών, ονομάζεται πόδι του δοντιού. Επομένως, τα h_k και h_f ονομάζονται ύψος κεφαλής και ύψος ποδίου αντίστοιχα.

$$h = h_k + h_f \quad [2.4]$$

$$h_k = m \quad [2.5]$$

$$h_f = m + c = 1.25m \quad [2.6]$$

$$c = 0.25m \quad [2.7]$$

Όπου c ονομάζεται χάρη και ισούται με την διαφορά της r_f από την r_b

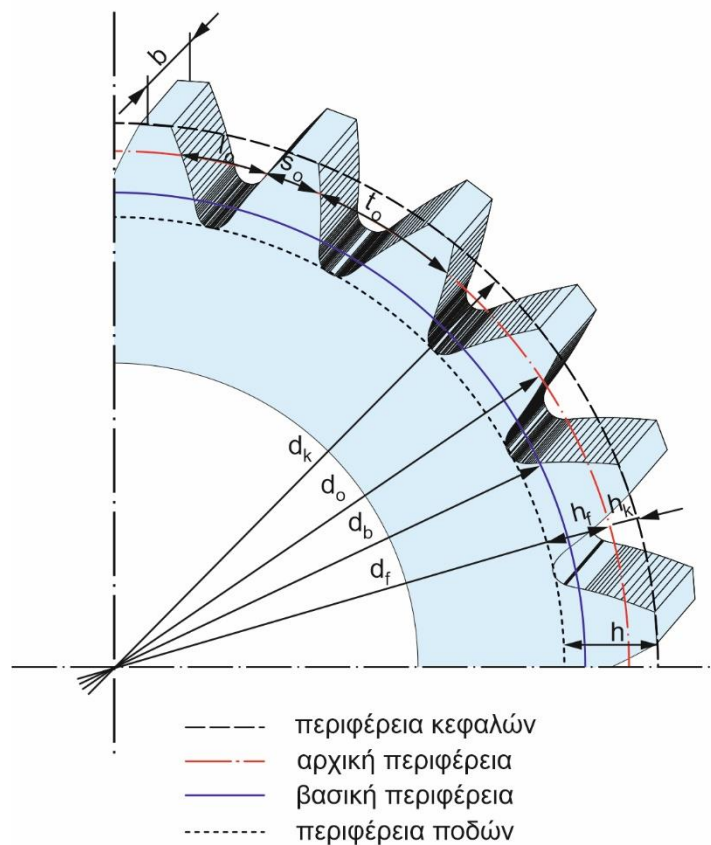
Η περιφέρεια που διέρχεται από τις κεφαλές των δοντιών λέγεται περιφέρεια κεφαλών και η διάμετρος d_k που της αντιστοιχεί ονομάζεται διάμετρος κεφαλής. Η περιφέρεια που περνά από τη μέση περίπου των δοντιών λέγεται αρχική περιφέρεια και η αντίστοιχη διάμετρος d_o λέγεται αρχική διάμετρος. Η διάμετρος d_f που αντιστοιχεί στη βάση των δοντιών ονομάζεται διάμετρος ποδιών.

$$d_o = mz \quad [2.8]$$

$$d_k = mz + 2m = m(z + 2) \quad [2.9]$$

$$d_f = mz - 2.5m = m(z - 2.5) \quad [2.10]$$

Τα παραπάνω γεωμετρικά μεγέθη αποτυπώνονται στο σχήμα 2.4.



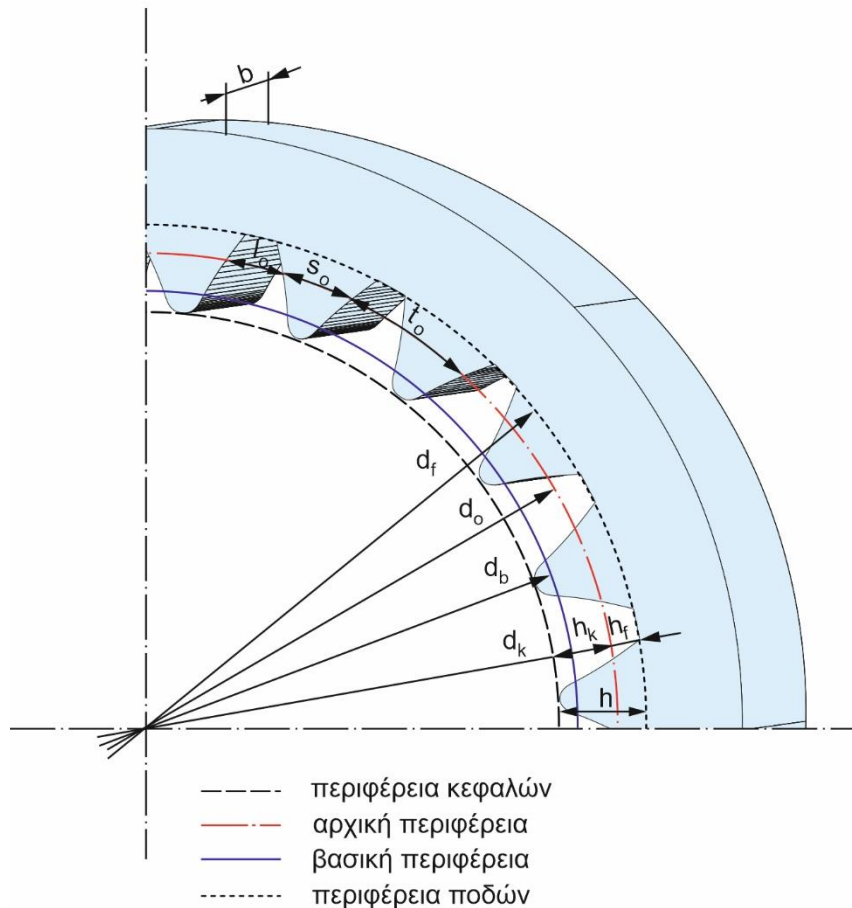
Σχήμα 2.4: Βασικά γεωμετρικά μεγέθη ενός τροχού εξωτερικής οδόντωσης

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Οι σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των γεωμετρικών μεγεθών ενός οδοντωτού τροχού ευθείας εσωτερικής οδόντωσης είναι αντίστοιχες με αυτά της εξωτερικής οδόντωσης με μια διαφοροποίηση στην περιφέρεια κεφαλών και ποδών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.

$$d_k = mz - m = m(z - 1) \quad [2.11]$$

$$d_f = mz + 2.5m = m(z + 2.5) \quad [2.12]$$



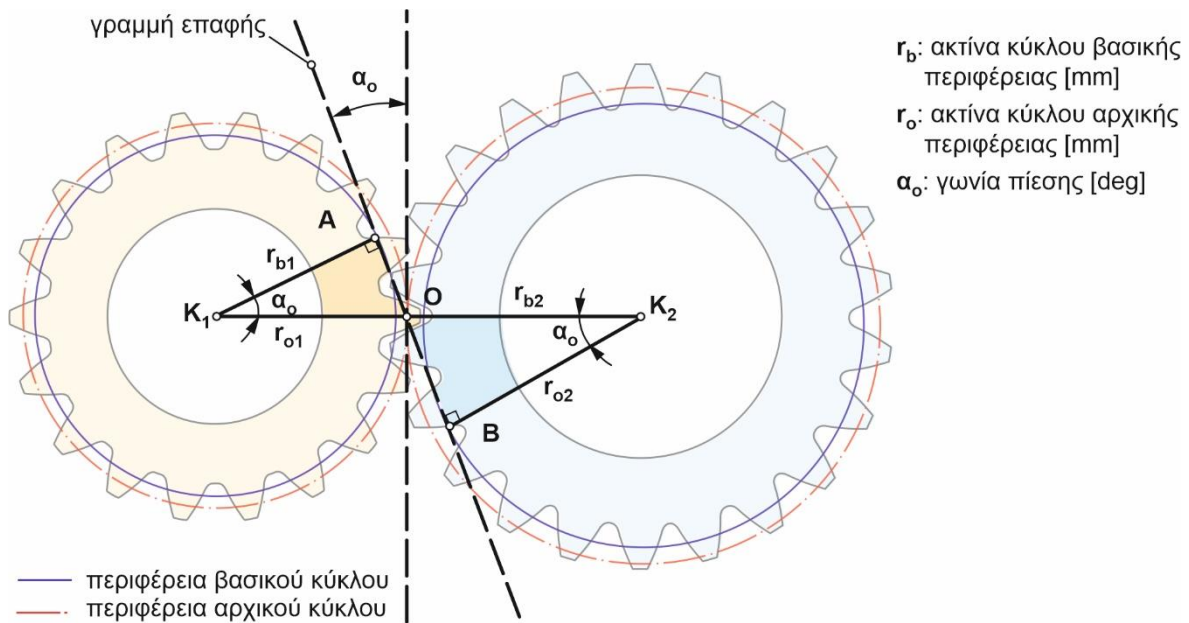
Σχήμα 2.5: Βασικά γεωμετρικά μεγέθη ενός τροχού εξωτερικής οδόντωσης

Ένα ακόμα μέγεθος που λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία είναι η γωνία πίεσης α_o όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 2.6. Παρατηρούνται δύο οδοντωτοί τροχοί σε συνεργασία, των οποίων το σημείο επαφής Ο βρίσκεται, πάντα, πάνω στους κύκλους αρχικής περιφέρειας και των δύο γραναζιών. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει επαφή των παρειών των δοντιών μεταξύ των τροχών εντός των κύκλων βασικής περιφέρειας. Η γραμμή επαφής δύο γραναζιών που βρίσκονται σε συνεργασία, αντιστοιχεί σε ευθεία που εφάπτεται των δύο κύκλων βασικής περιφέρειας. Στην προκείμενη περίπτωση η απόσταση K_1K_2 των κέντρων των γραναζιών είναι σταθερή και η γωνία πίεσης α_o σύμφωνα με τον πρώτο οδοντωτό τροχό προκύπτει από την σχέση:

$$\cos \alpha_o = \frac{r_{b1}}{r_{o1}} \quad [2.13]$$

Το σημείο επαφής Ο δεν βρίσκεται στο κέντρο της γραμμής επαφής, αλλά στο σημείο τομής της με το ευθύγραμμο τμήμα K_1K_2 .

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 2.6: Γωνία πίεσης οδοντωτών τροχών

2.3 Κοπή οδοντώσεων

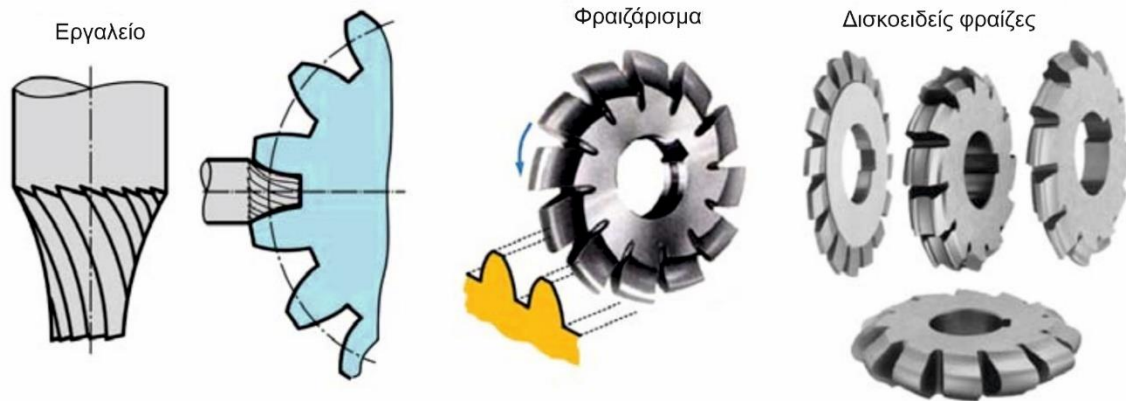
Οι οδοντωτοί τροχοί κατασκευάζονται μέσω διάφορων κατεργασιών μεταξύ των οποίων η χύτευση, η παραμόρφωση υλικού και η κονιομεταλλουργία. Παρόλα αυτά επικρατέστερος τρόπος μορφοποίησης οδοντωτών τροχών αποτελεί η αφαίρεση υλικού. Η πλειοψηφία των οδοντωτών τροχών μεταφοράς ισχύος υψηλών προδιαγραφών ποιότητας κατασκευάζονται μέσω κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Αυτές οι κατεργασίες ταξινομούνται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες:

1. Με εργαλείο μορφής, με επιμέρους μεθόδους:
 - a. Περιφερικό φραιζάρισμα με δισκοειδή φραιζα (κοπτήρας μορφής)
 - b. Μετωπικό φραιζάρισμα με κονδυλοειδή φραιζα μορφής.
2. Με γένεση, με επιμέρους μεθόδους:
 - a. Πλάνιση με κύλιση οδοντωτού κανόνα
 - b. Φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων
 - c. Πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού
 - d. Αποφλοίωση με κύλιση οδοντώσεων

Στις κατεργασίες με εργαλείο μορφής, η αφαίρεση υλικού λαμβάνει χώρα σε κάθε αυλάκι του κατεργαζόμενου τροχού ξεχωριστά όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. Κατά τη μορφοποίηση αυτή, η μορφή της κοπτικής φραιζας δίνει την κατατομή του αυλακιού που φραιζάρεται. Ο περιστρεφόμενος κοπτικός τροχός και το τεμάχιο κατεργασίας μετακινούνται το ένα μέσα στο άλλο κατά τη διεύθυνση του άξονα του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Για παράδειγμα σε μία περίπτωση ευθείας οδόντωσης που μορφοποιείται μέσω εργαλείου μορφής, το κατεργαζόμενο τεμάχιο δεν περιστρέφεται. Περιστρέφεται κατά ένα βήμα μόνο όταν ολοκληρωθεί η αφαίρεση υλικού από το ένα αυλάκι (μέθοδος χωριστού βήματος). Σε ελικοειδείς οδοντωτούς τροχούς το τεμάχιο κατεργασίας βρίσκεται σε συνεχή περιστροφή, σύμφωνα με τη γωνία ελίκωσης του. Η μέθοδος χωριστού βήματος εφαρμόζεται και σε αυτή την περίπτωση.

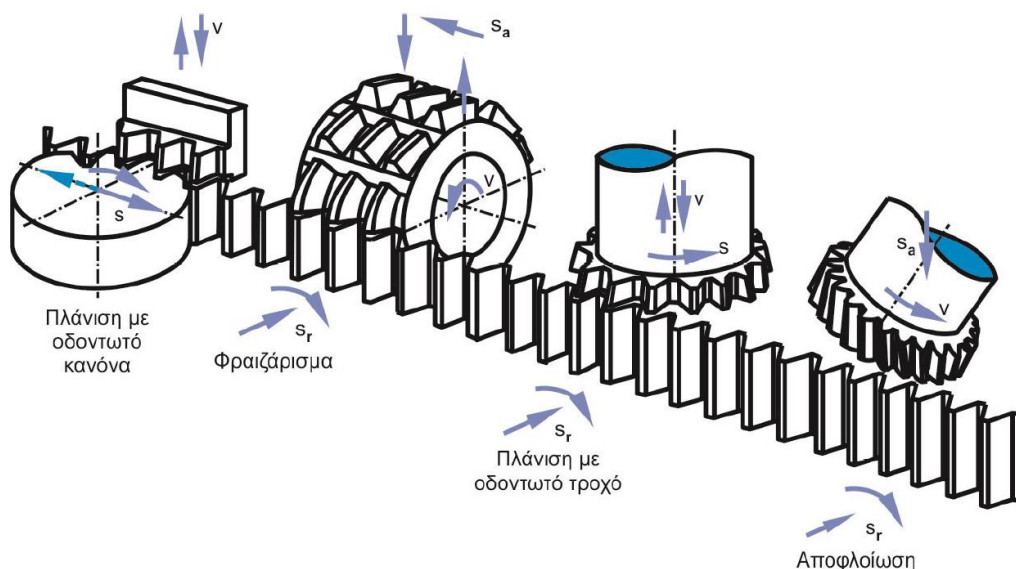
Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Οι κατεργασίες αυτού του τύπου έχουν μειονέκτημα ότι δε μπορεί ένα κοπτικό εργαλείο να χρησιμοποιηθεί για κάθε αριθμό δοντιών της ίδιας κατατομής. Για παράδειγμα σε μία περίπτωση κοπής γραναζιού με φραιζάρισμα, τα κοπτικά εργαλεία περιορίζονται σε μία περιοχή αριθμού δοντιών την οποία μπορούν να κατεργασθούν, ενώ το τελικό τεμάχιο δεν έχει καλή διαστατική ακρίβεια. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις κινήσεις διαίρεσης της εργαλειομηχανής, που εισάγουν γεωμετρικές αποκλίσεις στα κατεργαζόμενα τεμάχια, καθιστούν τις κατεργασίες με εργαλεία μορφής ανακρίβεις και αντισοικονομικές.



Σχήμα 2.7: Κοπή οδοντώσεων με φραιζάρισμα

Στις αντίστοιχες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με γένεση, τα εργαλεία κοπής είναι ίδιας κατατομής αναφοράς με αυτή του κατεργαζόμενου τροχού. Απαιτείται δηλαδή ένα μόνο εργαλείο για την μορφοποίηση οποιασδήποτε γεωμετρίας οδόντωσης του ίδιου μέτρου m . Η κοπή σε αυτές τις περιπτώσεις βασίζεται στην εμπλοκή του κοπτικού εργαλείου με την προς μορφοποίηση πλευρά της οδόντωσης του κατεργαζόμενου τροχού, έτσι ώστε οι παρειές των δοντιών να λάβουν τη μορφή της εξελεγμένης με σχετική ισοταχή κύλιση του ζεύγους κοπτήρα και οδοντοτροχού. Τα κοπτικά δόντια εισέρχονται στο αυλάκι με διαφορετικό τρόπο στις κατεργασίες με γένεση, λόγω της κύλισης εργαλείου και τροχού. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή οδοντώσεων που λειτουργούν σε υψηλό αριθμό στροφών και υψηλές ποιοτικές προδιαγραφές. Ως μειονέκτημα μπορούν να αναφερθούν τα κοπτικά εργαλεία έχουν μεγάλο κόστος και κατασκευαστικές δυσκολίες. Οι κατεργασίες αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 2.8 με τη σειρά που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.8: Κοπή οδοντώσεων με γένεση

2.4 Πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού

Η δημιουργία οδοντωτών τροχών μέσω πλάνισης με κύλιση οδοντωτού τροχού πρόκειται για μια ευρέως διαδεδομένη κατεργασία ιδιαίτερα για γρανάζια εσωτερικής οδόντωσης. Οι υπόλοιπες κατεργασίες με γένεση χρησιμοποιούνται για περιπτώσεις εξωτερικής οδόντωσης, με εξαίρεση την αποφλοίωση με κύλιση, που αποτελεί και την νεότερη κατεργασία διαμόρφωσης οδοντωτών τροχών. Επομένως η πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού (σχήμα 2.9) έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να κατεργαστεί οδοντωτούς τροχούς εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης, με μειονέκτημα της παρόλα αυτά, την ύπαρξη νεκρού χρόνου κατά την επιστροφή του εργαλείου.



Σχήμα 2.9: Πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού

Η πλάνιση οδοντώσεων με κύλιση βασίζεται στην αρχή κύλισης ανάμεσα σε δύο οδοντωτούς τροχούς που είναι σε εμπλοκή. Συγκεκριμένα, ένας οδοντωτός τροχός με συγκεκριμένη γεωμετρία, χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο, με σκοπό να κατεργαστεί ένα κυλινδρικό τεμάχιο, του οποίου τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα είναι αντίστοιχα με αυτά του κοπτικού εργαλείου.

Μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου αναπτύσσονται τεσσάρων ειδών κινήσεις κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

1. Κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση του εργαλείου, η οποία αντιστοιχεί σε έναν εμβολισμό (DS) με ταχύτητα κοπής v (m/min)
2. Παλινδρομική κίνηση εξόδου του από την εμπλοκή, ώστε να επιστρέψει στην αρχική του θέση προς τα πάνω με ασφάλεια
3. Περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου γύρω από τον άξονα του με πρόωση κύλισης s (mm/DS)
4. Περιστροφική κίνηση του κατεργαζόμενου τροχού γύρω από τον άξονα του με πρόωση κύλισης s (mm/DS)

Κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού, το εργαλείο εκτελεί κατακόρυφη κίνηση προς τα κάτω σε όλο το μήκος b του κατεργαζόμενου τροχού, με αποτέλεσμα την δημιουργία αποβλίπτου. Καθώς το εργαλείο εκτελεί κατακόρυφες παλινδρομικές κινήσεις, το ίδιο μαζί με τον κατεργαζόμενο τροχό στρέφονται συνεχώς γύρω από τον εαυτό τους σύμφωνα με τη σχέση μετάδοσης:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad [2.14]$$

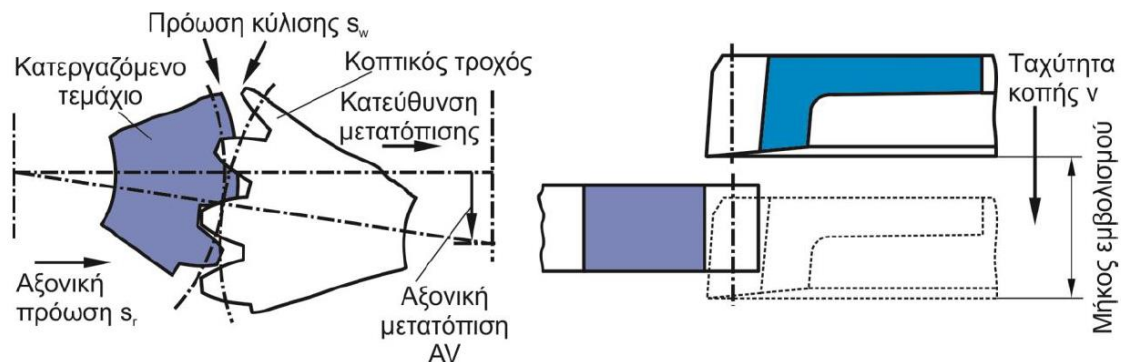
Η συχνότητα της παλινδρομικής κίνησης εξαρτάται από την πρόωση κύλισης s , η οποία προσδιορίζει και την περιστροφή του εργαλείου $d\varphi_1$ και του τεμαχίου $d\varphi_2$, μεταξύ εμβολισμών.

$$d\varphi_1 = \frac{2s}{m_n z_1} \quad [2.15]$$

$$d\varphi_2 = \frac{2s}{m_n z_2} \quad [2.16]$$

Κατά την κοπή του οδοντωτού τροχού στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων, συμμετέχουν παράλληλα περισσότερα από ένα κοπτικά δόντια, επομένως υπάρχει εμπλοκή μεταξύ κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τροχού μέχρι να ολοκληρωθεί η κατεργασία. Μέσω διαδοχικών εμβολισμών κάθε δόντι του εργαλείου αφαιρεί απόβλιττα από ένα αυλάκι του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ένα αυλάκι σχηματίζεται από ένα μόνο κοπτικό δόντι. Η κατεργασία ολοκληρώνεται για διαφορετικά διαδοχικά βάθη κοπής μέχρι να φτάσει στο προβλεπόμενο βάθος του αυλακιού.

Ακριβώς επειδή η περιστροφή εργαλείου και τροχού είναι συνεχής, απαιτείται η παλινδρομική κίνηση εξόδου κατά την κατακόρυφη άνοδο του εργαλείου στην αρχική θέση. Σε διαφορετική περίπτωση η συνεχής πρόωση θα οδηγούσε στην διείσδυση του εργαλείου στο τεμάχιο και κατά την άνοδο.



Σχήμα 2.10: Πλάγια μετατόπιση AV ατράκτου κατά την παλινδρόμηση του εργαλείου

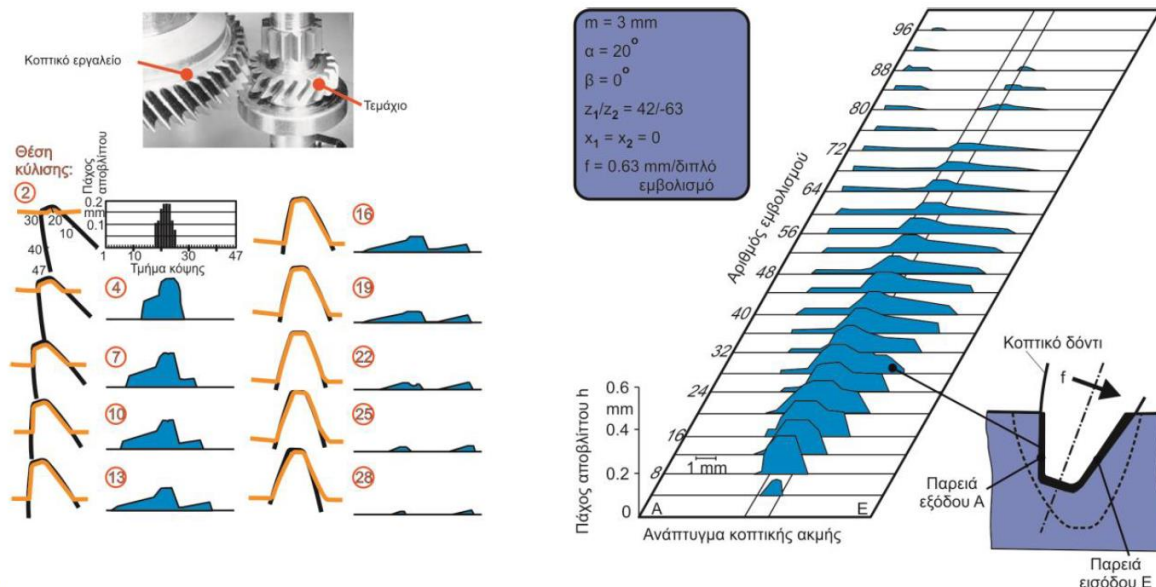
Η διαδρομή του εργαλείου οριοθετείται μεταξύ του άνω και κάτω νεκρού σημείου, όπου και λαμβάνουν χώρα οι αναστροφές στην κατεύθυνση της κίνησης του κατά τον εμβολισμό. Ο εμβολισμός του κοπτικού εργαλείου ξεκινάει από το άνω νεκρό σημείο και όταν έχει φτάσει στο κάτω νεκρό σημείο έχει σχηματιστεί ένα απόβλιττο. Σε εκείνο το σημείο πραγματοποιείται έξοδος από το τεμάχιο και αναστροφή κατεύθυνσης κίνησης του κοπτικού εργαλείου ώστε να μην υπάρξει σύγκρουση κατά τη διαδρομή του πίσω στο άνω νεκρό σημείο. Σε περίπτωση που υπήρχε σύγκρουση κατά την επιστροφή, τα κοπτικά δόντια θα διείσδυαν στο υλικό του τεμαχίου, χωρίς τη δημιουργία αποβλίττου. Αυτό συμβαίνει καθώς η επαφή του εργαλείου με τον κατεργαζόμενο τροχό θα γινόταν με τις επιφάνειες ελευθερίας του πρώτου με αποτέλεσμα την έντονη παραμόρφωση του τεμαχίου και τη γρήγορη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η κατεύθυνση αυτής της παλινδρόμησης ρυθμίζεται μέσω της πλάγιας μετατόπισης **AV** της κατακόρυφης ατράκτου της εργαλειομηχανής.

Η πλάγια μετατόπιση **AV** εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής όπως το βάθος κοπής και η ακτινική πρόωση, τη γεωμετρία του κοπτικού δοντιού, το είδος της οδόντωσης (εσωτερική, εξωτερική). Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις εσωτερικής οδόντωσης, είναι επιθυμητός ο

μεγάλος αριθμός δοντιών του κοπτικού εργαλείου καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κατεργαζόμενων τροχών ανά εργαλείο, επομένως περιορίζεται το κόστος της κατεργασίας. Στην αύξηση όμως του αριθμού των δοντιών, θέτει όριο η αποφυγή της σύγκρουσης κατά την παλινδρόμηση του εργαλείου.

2.5 Άλλα προσομοιωτικά μοντέλα

Το 1973 ο Gerd Sulzer του Πολυτεχνείου του Άαχεν, ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με προσομοιωτικά μοντέλα που αφορούν την κατεργασία της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Η έρευνα του επικεντρώθηκε αρχικά στη φθορά που προκαλείται στο κοπτικό εργαλείο καθώς και την κινηματική του και στη συνέχεια με τις διαστάσεις των αποβλίττων που προκύπτουν από την κατεργασία. Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran και αποτέλεσε βάση για τη μετέπειτα ανάπτυξη παρόμοιων εργαλείων. Για την προσομοίωση έγινε διακριτοποίηση του οδοντωτού τροχού σε ένα αριθμό επιπέδων παράλληλων προς τον άξονα του. Το αυλάκι προκύπτει από μία συλλογή πολυγωνικών γραμμών, τα απόβλιττα. Αυτά δημιουργούνται από την προβολή της τροχιάς της κοπτικής ακμής σε κάθε ένα από τα επίπεδα του τρέχοντος οδοντωτού τροχού για κάθε θέση κύλισης. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζονται τα απόβλιττα διαφόρων θέσεων κύλισης, τα πάχη τους και το ανάπτυγμα τους για δεδομένη περίπτωση προσομοίωσης.



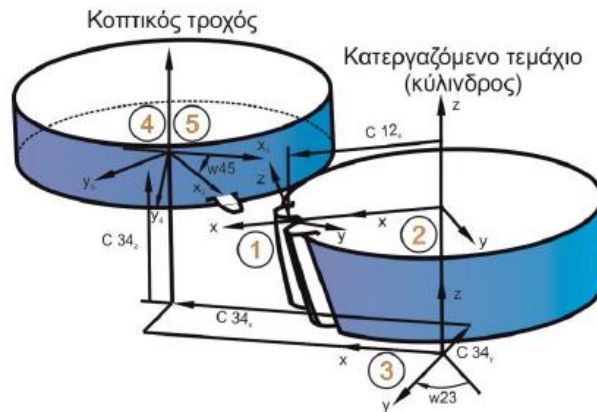
Σχήμα 2.11: Αποτελέσματα αποβλίττων σύμφωνα με το μοντέλο του Sulzer

Τρία χρόνια αργότερα στο ίδιο Πανεπιστημιακό Ίδρυμα, ο Κωνσταντίνος Μπουζάκης ήταν ο επόμενος που μελέτησε την κοπή οδοντωτών τροχών μέσω προσομοιωτικού μοντέλου. Βασιζόμενος στην μοντέλο του Sulzer επεκτάθηκε και εμβάθυνε περισσότερο στην ανάπτυξη δυνάμεων κατά την κοπή. Μελέτησε τις δυνάμεις σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων, με σημείο αναφοράς το κοπτικό εργαλείο και τον κατεργαζόμενο τροχό, όπως επίσης και σε ένα ενιαίο σύστημα όπου εξήγαγε τη συνισταμένη δύναμη της κατεργασίας. Τα συστήματα αυτά αποτυπώνονται στο σχήμα 2.12 τα οποία περιγράφουν:

- Σύστημα 1: Το περίγραμμα του αυλακιού που κατασκευάζεται σε ένα ή περισσότερα επίπεδα κοπής
- Σύστημα 2: Τη θέση του αυλακιού ως προς τον κατεργαζόμενο τροχό
- Σύστημα 3: Την περιστροφή του κατεργαζόμενου τροχού

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

- Σύστημα 4: Την αξονική απόσταση του κοπτικού τροχού με τον κατεργαζόμενο τροχό σε σχέση με το Σύστημα 4
- Σύστημα 5: την περιστροφή ενός δοντιού του εργαλείου σε σχέση με το Σύστημα 4

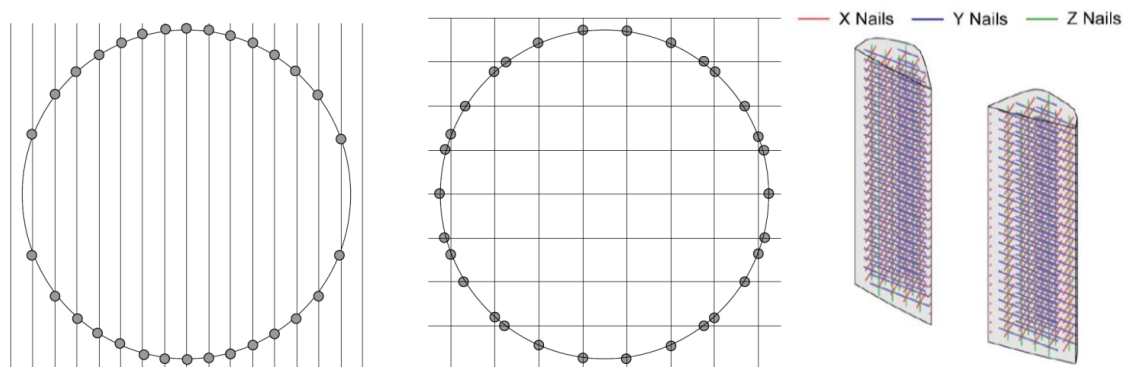


Σχήμα 2.12: Συστήματα συντεταγμένων κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων σύμφωνα με το μοντέλο του Μπουζάκη

Αν και η πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων αποτελεί την επικρατέστερη κατεργασία τα τελευταία χρόνια, για τη δημιουργία τροχών εσωτερικής οδόντωσης, υπάρχουν ελάχιστα προσομοιωτικά μοντέλα υπολογισμού δυνάμεων, πάνω σε αυτή, που να συμπεριλαμβάνουν περιπτώσεις ευθείας και πλάγιας, εσωτερικής και εξωτερικής οδόντωσης. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε μοντέλα προσομοίωσης πάνω στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων που έχουν γίνει την τελευταία δεκαετία. Ο σκοπός είναι αφενός να επαληθευτούν τα αποτελέσματα της υπάρχουσας εργασίας και αφετέρου να αναδειχθούν οι δυνατότητες της κατεργασίας.

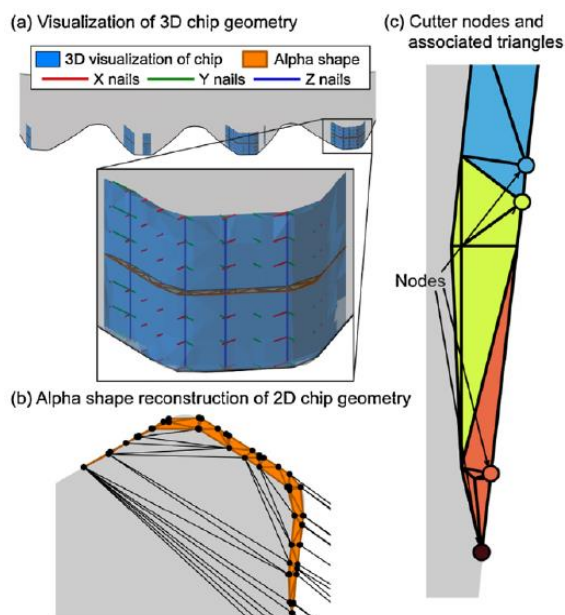
Το πιο πρόσφατο μοντέλο προσομοίωσης πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων δημοσιεύθηκε το 2016 από τους Kaan Erkorkmaz, Andrew Katz, Yasin Hosseinkhani, Fathy Ismail του Πανεπιστημίου του Waterloo και τους Denys Plakhotnik, Marc Stautner από την ModuleWorks στο Aachen, στο οποίο μελετάται η κινηματική της κατεργασίας και τις δυνάμεις που προκύπτουν από αυτή, για τροχούς ευθείας οδόντωσης. Η προσομοίωση πραγματοποιείται μέσω λογισμικού της ModuleWorks χρησιμοποιώντας το μοντέλο τριπλής κατεύθυνσης Dixel για την αναπαράσταση του εργαλείου και του τεμαχίου.

Η αναπαράσταση Dixel χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της επιφάνειας αντικειμένων, χρησιμοποιώντας παράλληλα τμήματα (ή ακτίνες) σε διακριτά διαστήματα για τον ορισμό της. Η αρχή και το τέλος κάθε ακτίνας, δείχνει τις εξωτερικές επιφάνειες του αντικειμένου που μελετάται και στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιούνται x , y , z ακτίνες αντίστοιχες για κάθε άξονα του τρισδιάστατου χώρου, με σκοπό την γεωμετρική ακρίβεια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13. Η κοπτική ακμή του εργαλείου διακριτοποιείται σε επιμέρους σημεία, ή κόμβους. Για κάθε θέση κύλισης αντιστοιχεί μία διαφορετική αναπαράσταση εργαλείου και τεμαχίου από την οποία προκύπτει και ένα απαράμορφωτο απόβλιπτο.



Σχήμα 2.13: Αναπαράσταση Dixel, μίας κατεύθυνσης, δύο κατευθύνσεων και τριών κατευθύνσεων από αριστερά προς δεξιά

Η δισδιάστατη γεωμετρία του κάθε αποβλίπτου προκύπτει, στο μισό του πάχους του κατεργαζόμενου τεμαχίου για το XY επίπεδο, από την εφαρμογή της τριγωνοποίησης Delaunay. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για το σύνολο των σημείων που προκύπτουν από τις ακτίνες κατεύθυνσης x, y που τέμνονται με εκείνες κατεύθυνσης z και τους κόμβους της κοπτικής ακμής, οι οποίοι συμμετέχουν στο σχηματισμό του εκάστοτε αποβλίπτου. Στη

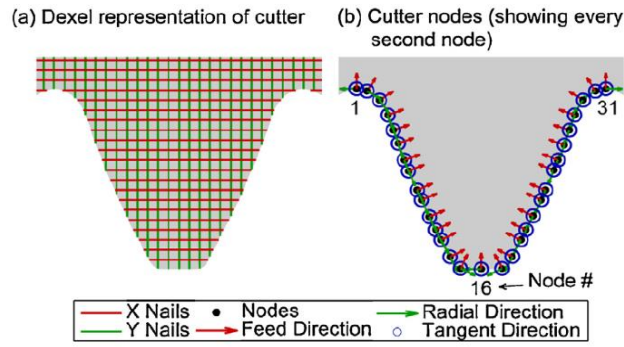


Σχήμα 2.14: Διακριτοποίηση μέσω της μεθόδου Alpha-Shape

συνέχεια εφαρμόζεται διακριτοποίηση μέσω της μεθόδου Alpha-Shape (σχήμα 2.14) με σκοπό την απαλοιφή των περιττών τριγώνων του προηγούμενου βήματος. Τέλος, για κάθε απόβλιπτο, κάθε τρίγωνο που μένει σχετίζεται με κάποιον από τους κόμβους που το αφορούν. Αυτή η διαδικασία γίνεται για να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται αρχικά κατά το σχηματισμό ενός αποβλίπτου και τελικά κατά την κοπή ολόκληρου του τεμαχίου, για όλα τα αυλάκια.

Ο υπολογισμός των δυνάμεων για κάθε απόβλιπτο προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους διανυσμάτων δύναμης κάθε κόμβου της κοπτικής ακμής. Για κάθε κόμβο υπολογίζουμε το τρισδιάστατο διάνυσμα της δύναμης λαμβάνοντας υπόψη το μήκος και το πάχος του αποβλίπτου.

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



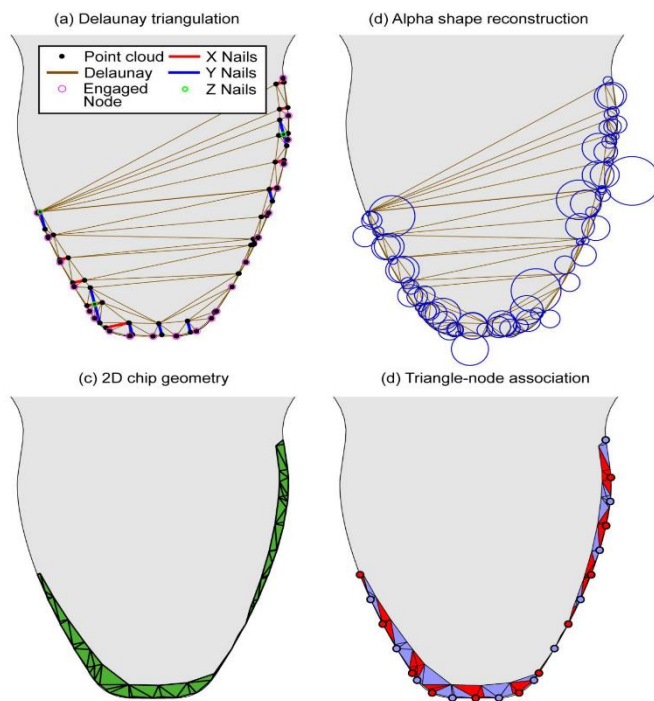
Σχήμα 2.15: Διακριτοποίηση κοπτικής ακμής

Ο υπολογισμός δυνάμεων γίνεται σύμφωνα με το γενικό μοντέλο λοξής κοπής, για κάθε συνιστώσα δύναμης σύμφωνα με τις σχέσεις Kienzle-Victor που εξηγούνται σε επόμενο κεφάλαιο:

$$F_t = K_{tc}a + K_{te}b \quad [2.17]$$

$$F_f = K_{fc}a + K_{fe}b \quad [2.18]$$

$$F_r = K_{rc}a + K_{re}b \quad [2.19]$$



Σχήμα 2.16: Διακριτοποίηση επιφάνειας αποβλήτου

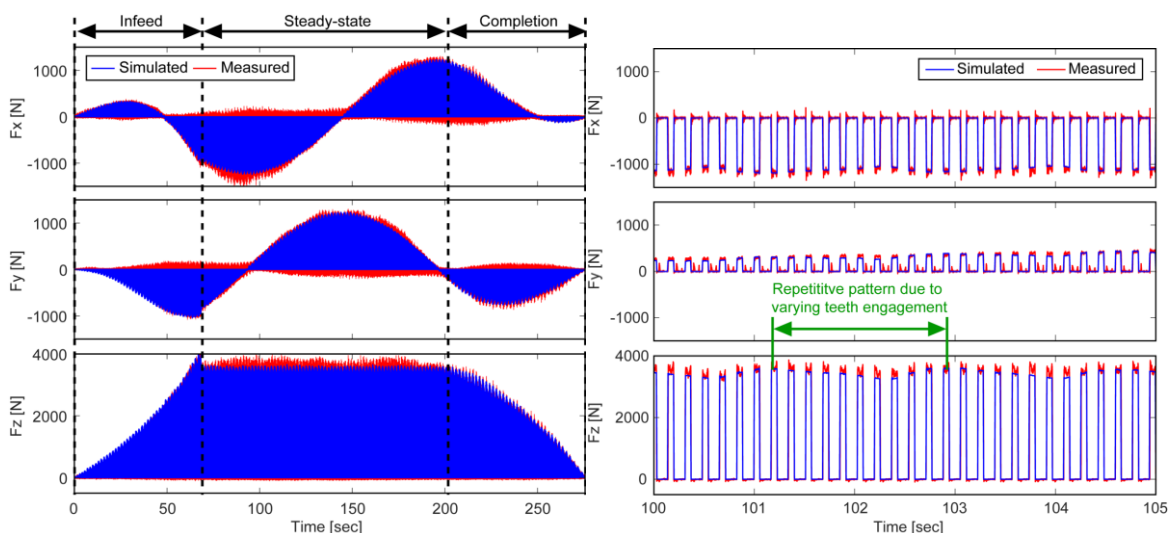
όπου b το πλάτος αποβλήτου, K είναι οι συντελεστές κοπής και a η επιφάνεια αποβλήτου. Αυτή εκφράζει το συνολικό εμβαδόν ενός αποβλήτου το οποίο προκύπτει από το άθροισμα των εμβαδών των επιμέρους τριγώνων που δημιουργήθηκαν κατά την διακριτοποίηση του αποβλήτου, όπως φαίνεται και πιο αναλυτικά στο σχήμα 2.16.

Οι Andrew Katz, Kaan Erkorkmaz και Fathy Ismail του ίδιου Πανεπιστημίου επέκτειναν το ίδιο προσομοιωτικό μοντέλο το 2018 και για ελικοειδείς τροχούς εξωτερικής οδόντωσης.

	1 ^η Περίπτωση	2 ^η Περίπτωση	3 ^η Περίπτωση
οδόντωση	εσωτερική	εξωτερική	εξωτερική
περάσματα	1	2	2
m_n [mm]	1.5875	5.08	2.1167
α_n [deg]	25	22.5	20
β_2 [deg]	0	0	-20
b [mm]	34.85	25.4	50
z_1	50	28	36
z_2	121	22	52
x_c	0	0.17	-0.06
s [mm/DS]	0.5	0.5	1
		0.5	0.5

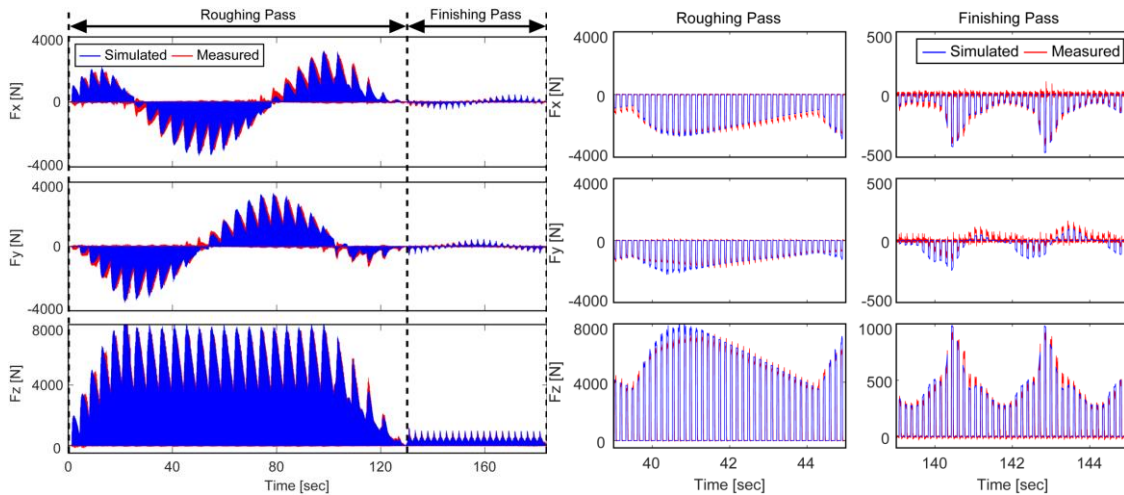
Πίνακας 2.1: Δεδομένα προσομοίωσης και πειράματος

Στο σχήμα 2.17 δίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των δυνάμεων για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε προσομοίωση και πειραματικά, των οποίων τα δεδομένα δίνονται στον πίνακα 2.1. Στα δεξιά διαγράμματα φαίνονται οι συνολικές δυνάμεις και στα αριστερά αποτυπώνονται οι δυνάμεις για ένα πολύ μικρότερο εύρος τιμών σε μεγέθυνση, όπου παρατηρούνται συνεχείς διακυμάνσεις. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποτυπώνονται με μπλε χρώμα ενώ αυτά του πειράματος με κόκκινο. Οι δυνάμεις είναι υπολογισμένες για την κοπή όλων των δοντιών του τεμαχίου, συναρτήσει του χρόνου, ο οποίος είναι διακριτός και κάθε δευτερόλεπτο αντιστοιχεί σε μια τρισδιάστατη απεικόνιση του εργαλείου-τεμαχίου σε εμπλοκή.

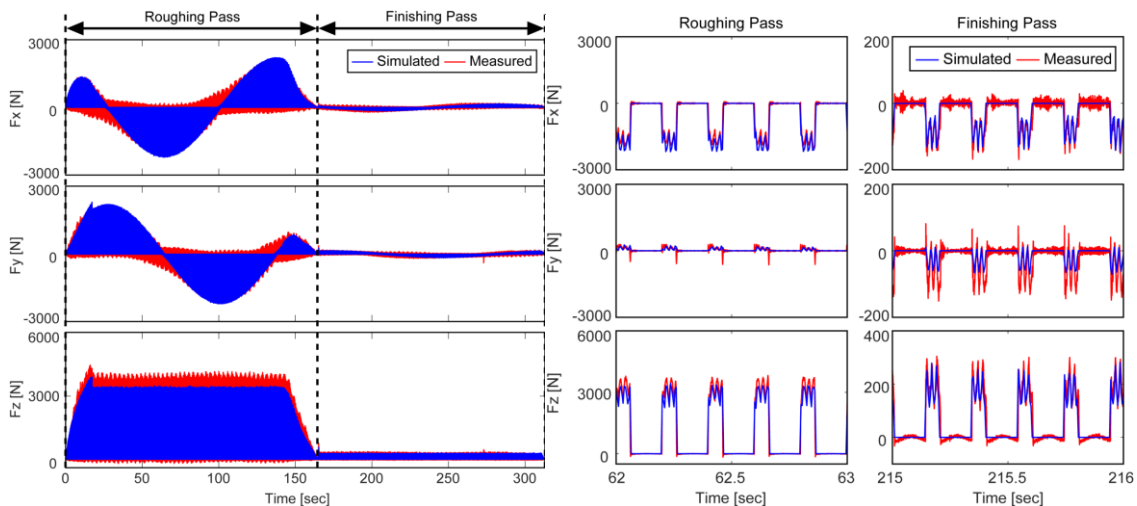


Σχήμα 2.17: (α) Case 1: Αποτελέσματα δυνάμεων για εσωτερική ευθεία οδόντωση με ένα πέρασμα AISI 1141 Steel

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



(β) Case 2: Αποτελέσματα δυνάμεων για εξωτερική ευθεία οδόντωση με δύο περάσματα AISI 8620 Steel



(γ) Case 3: Αποτελέσματα δυνάμεων για εξωτερική πλάγια οδόντωση με δύο περάσματα AISI 8620 Steel

Οι Linqing Li, Lianhong Zhang, Bing Yu, Kaifeng Wang and Fucong Liu του Πανεπιστημίου του Tianjin το 2015 μέσα από προσομοίωση της κατεργασίας στο λογισμικό VERICUT, υλοποίησαν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης της ταχύτητας περιστροφής κατά την κοπή ενός γραναζιού, με σκοπό την μείωση των θέσεων κύλισης που παίρνει κάθε δόντι του εργαλείου για τη δημιουργία ενός αυλακιού. Έχει διαπιστωθεί ότι περίπου το $\frac{1}{3}$ των εμβολισμών φτάνουν κοντά στη μέγιστη ποσότητα υλικού που μπορεί να αφαιρεθεί σε ένα πέρασμα, δηλαδή μία πλήρη περιστροφή που ολοκληρώνει είτε το τεμάχιο είτε το εργαλείο γύρω από τον εαυτό του. Μελετάται επομένως, η αύξηση της αποδοτικότητας της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων για περιπτώσεις όπου η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας κοπής για να επιτευχθεί αυτή δεν είναι εφικτή, όπως σε περιπτώσεις κατεργασίας μεγάλων γραναζιών, όπου το εργαλείο και το τεμάχιο έχουν μεγάλο μέτρο αδράνειας.

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται χωρίζεται σε δύο ευρύτερα στάδια. Στο πρώτο γίνεται ανάλυση της περιοχής κοπής κατά την πλάνιση με τον συμβατικό τρόπο σύμφωνα με την κινηματική της κατεργασίας, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη και την πρόωση κύλισης εργαλείου και τεμαχίου αλλά και την ακτινική πρόωση. Έπειτα δημιουργείται ένα πολυώνυμο, το οποίο εκφράζει το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας που έχει

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

απομακρυνθεί για ένα αυλάκι μέχρι εκείνη τη στιγμή για την εκάστοτε θέση κύλισης. Η συνάρτηση του πολυωνύμου έχει ως εξής, όπου P ο δείκτης για κάθε θέση κύλισης

$$A(P) = a_1 P^N + a_2 P^{N-1} + \dots + a_N P + a_{N+1}, (P = 1, 2, \dots, M) \quad [2.20]$$

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ομογενοποίηση της περιοχής κοπής, με τον υπολογισμό του εμβαδού του αποβλήτου για κάθε θέση κύλισης, σύμφωνα με την πολυωνυμική συνάρτηση που αναφέρθηκε παραπάνω. Δηλαδή για 40 θέσεις κύλισης, προκύπτουν 40 διαφορετικές συναρτήσεις. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η ομογενοποίηση της επιφάνειας κοπής για κάθε θέση κύλισης φτάσει την επιθυμητή ακρίβεια σύμφωνα με την εξής σχέση,

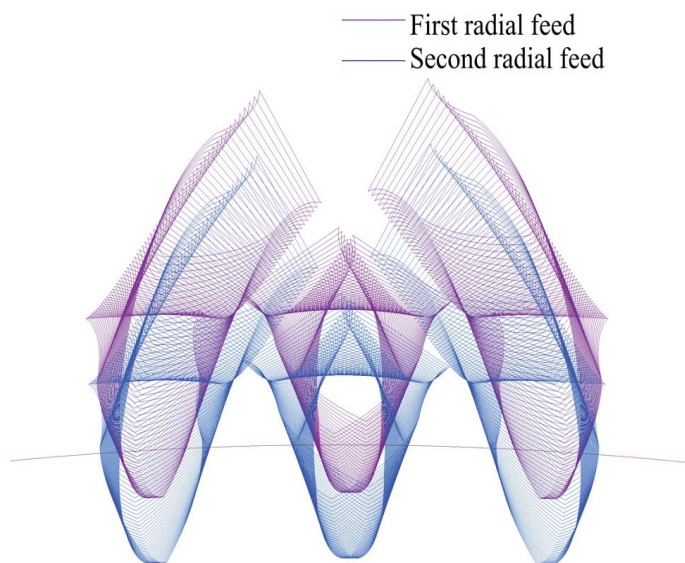
$$\frac{|A_h - A_T|}{A_T} < \varepsilon, \quad (h = 1, 2, \dots, H) \quad [2.21]$$

όπου h ο συνολικός αριθμός παλινδρομικών κινήσεων που απαιτούνται για να επιτευχθεί η κοπή μιας επιφάνειας συγκεκριμένου εμβαδού A_T και ε η επιθυμητή ακρίβεια ή ανοχή σφάλματος. Σε αυτή την φάση, υπολογίζονται οι βέλτιστες ταχύτητες περιστροφής εργαλείου και τεμαχίου σύμφωνα με τη σχέση μετάδοσης [2.14].

$$\omega'_1 = (P'_h - P'_{h-1})\omega_1 \quad [2.22]$$

$$\omega'_2 = \frac{\omega'_1}{i} \quad [2.23]$$

Η διαδικασία πραγματοποιείται αντίστοιχα για κάθε κύκλο κοπής της κατεργασίας μέχρι το τελικό τεμάχιο.

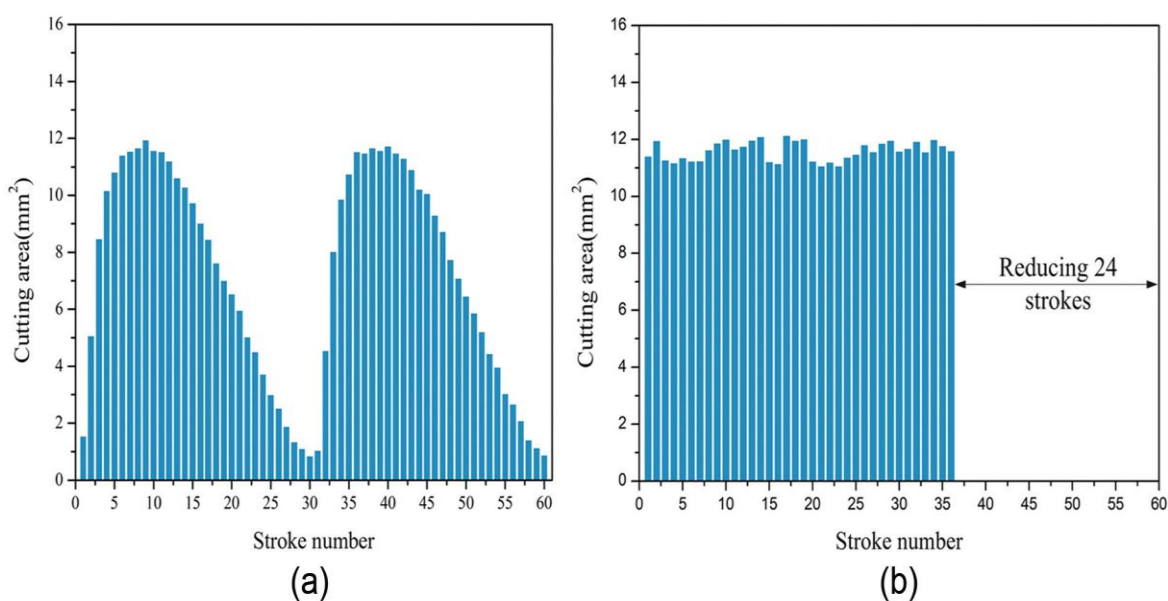


Σχήμα 2.18: Η τροχιά της κατατομής τριών δοντιών του εργαλείου για δύο διαδοχικά βάθη κοπής κατά την συμβατική πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

	Κοπτικό εργαλείο	Κατεργαζόμενο τεμάχιο
m_n [mm]	20	20
α_n [deg]	20	20
β [deg]	0	0
b [mm]	50	500
z	13	125
Συμβατική ω [rad/s]	$1.75 \cdot 10^{-3}$	$1.82 \cdot 10^{-4}$
x_c	0	0

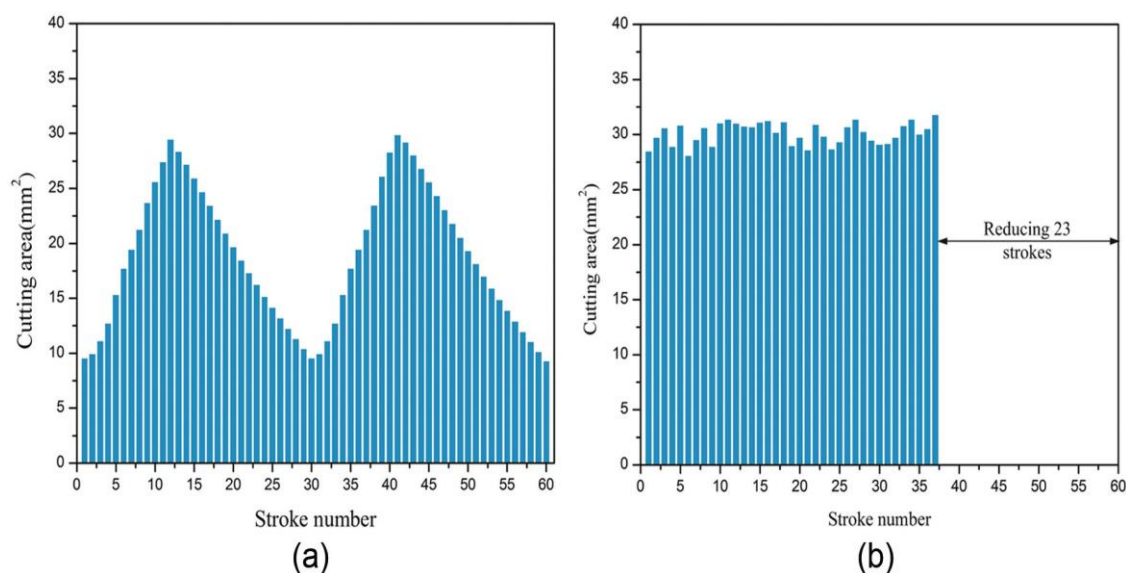
Πίνακας 2.2: Δεδομένα προσομοίωσης

Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση της μοντελοποίησης, μέσω του λογισμικού VERICUT, του συμβατικού καθώς και του προτεινόμενου τρόπου πλάνισης με κύλιση για τρία ίσα διαδοχικά βάθη κοπής. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα 2.2. Στο σχήμα 2.19 (a) και το σχήμα 2.20 (a) παρατηρείται ότι η περίπτωση συμβατικής πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων αποτελείται από 60 θέσεις κύλισης ενώ στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου στο σχήμα 2.19 (b) και το σχήμα 2.20 (b) οι θέσεις μειώνονται κατά 24 και 23 θέσεις στο πρώτο και το δεύτερο πέρασμα αντίστοιχα. Επίσης κάθε μία από τις θέσεις κύλισης στην δεύτερη περίπτωση, έχει εμβαδόν επιφάνειας κοπής σχεδόν αντίστοιχο με τις θέσεις κύλισης της συμβατικής περίπτωσης, όπου εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές εμβαδού.



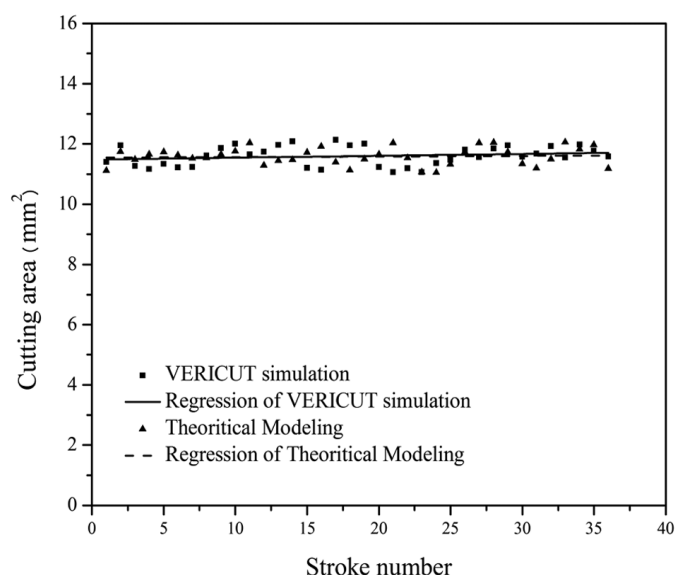
Σχήμα 2.19: Εμβαδόν επιφάνειας κοπής ανά θέση κύλισης κατά την (a) συμβατική και την (b) προτεινόμενη εκδοχή για τον πρώτο κύκλο κοπής

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 2.20: Εμβαδόν επιφάνειας κοπής ανά θέση κύλισης κατά την (a) συμβατική και την (b) προτεινόμενη εκδοχή για τον δεύτερο κύκλο κοπής

Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται και στο σχήμα 2.21 ότι το θεωρητικό μοντέλο δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο VERICUT. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, η αποδοτικότητα της κατεργασίας αυξάνεται κατά 38-40%. Παρόλα αυτά υπάρχουν ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη προτού μπορέσει να εφαρμοστεί αυτό στην πραγματικότητα, όπως η διατήρηση σταθερής επιφάνειας κοπής για κάθε βάθος κοπής και η έντονη εναλλαγή επιτάχυνσης και επιβράδυνσης κατά την πρόωση κύλισης, δημιουργώντας δονήσεις, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά στην εργαλειομηχανή.



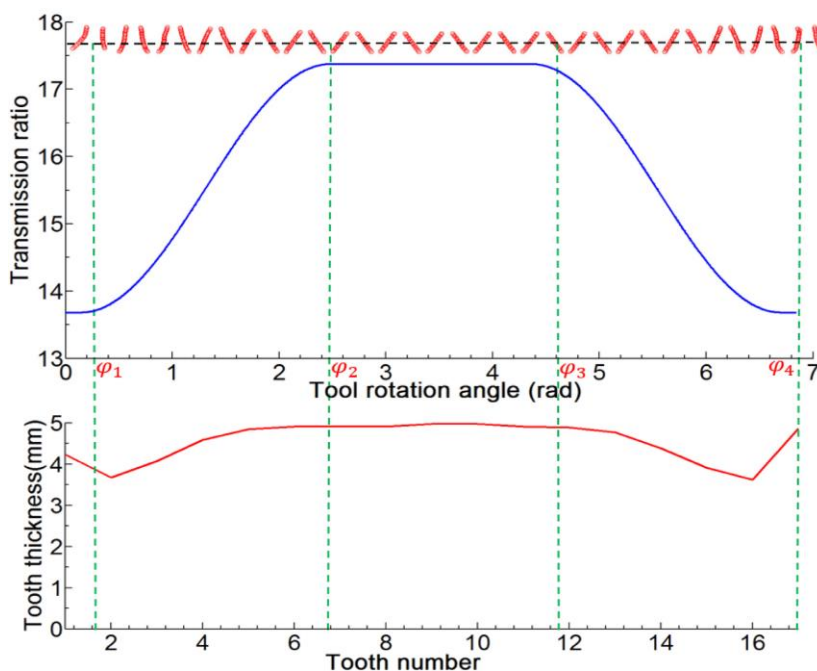
Σχήμα 2.21: Αποτελέσματα πρώτου κύκλου κοπής της προτεινόμενης εκδοχής

Το 2019 δημοσιεύθηκε από τους Man Xu, Xinghui Han, Lin Hua, Fangyan Zheng του Πανεπιστημίου της Wuhan ένα προσομοιωτικό μοντέλο που αφορά τον υπολογισμό δυνάμεων οδοντωτού κανόνα μεταβλητής σχέσης μετάδοσης τροχού. Αν και συνηθίζεται να κατασκευάζεται μέσω σφυρηλάτησης, αυτό ενδείκνυται κατά βάση για μικρά μεγέθη τεμαχίων. Επομένως αυτή η δημοσίευση προτείνει ένα κατασκευαστικό μοντέλο μέσω πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων, με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερη ποιοτική ακρίβεια και

παράλληλα να ξεπεραστεί ο περιορισμός του μεγέθους. Η μεταβλητή σχέση μετάδοσης τροχού χρησιμοποιείται αρκετά στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς διατηρεί ισορροπία και σταθερότητα κατά την οδήγηση για διαφορετικές καταστάσεις ταχύτητας. Για παράδειγμα, η σχέση μετάδοσης τροχού σε υψηλές ταχύτητες πρέπει να είναι αντίστοιχα χαμηλή, ενώ σε χαμηλές το ανάποδο. Η μετάβαση από την μία κατάσταση στην άλλη πρέπει να γίνεται ομαλά και γι' αυτόν το λόγο η συνεχής σχέση μετάδοσης κρίνεται ακατάλληλη για αυτές τις περιπτώσεις.

Επομένως η σχέση μετάδοσης [2.14] για την συγκεκριμένη περίπτωση δεν υφίσταται και ως εκ τούτου η έρευνα επικεντρώθηκε σε πρώτο στάδιο στο να μοντελοποιηθεί μία νέα μεταβλητή σχέση μετάδοσης τροχών. Η σχέση εξαρτάται από τις διαφορετικές γωνίες περιστροφής του εργαλείου ανάλογα με το είδος της σχέσης μετάδοσης που θέλουμε να πετύχουμε σε κάθε τμήμα του κανόνα, καθώς και το βάθος κοπής, σε περίπτωση διαδοχικών περασμάτων.

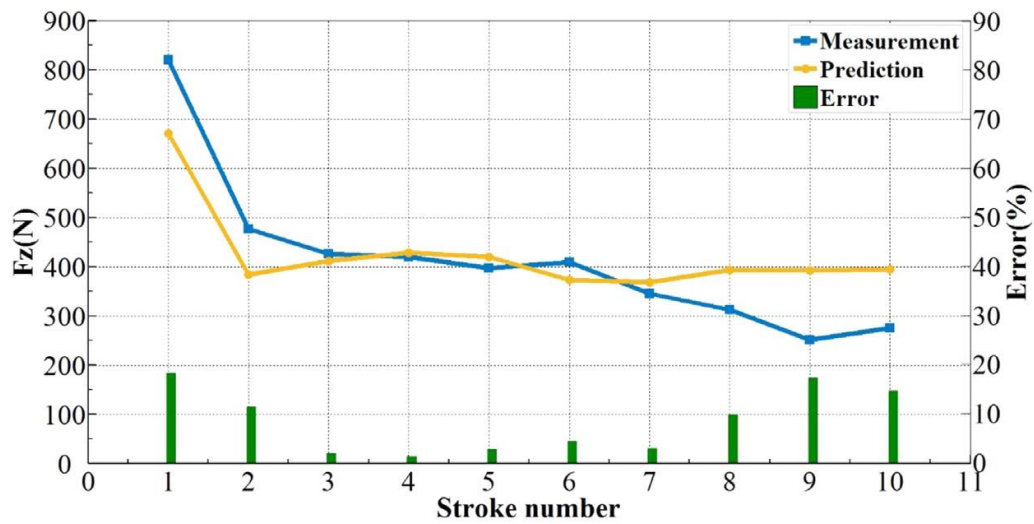
Στο σχήμα 2.22 παρατηρείται η μεταβολή στη σχέση μετάδοσης του κανόνα ανάλογα με την μεταβολή της γωνίας περιστροφής του εργαλείου, όπως επίσης και πώς η δεύτερη επηρεάζει και το πάχος των δοντιών του κανόνα.



Σχήμα 2.22: Σχέση της γωνίας περιστροφής του εργαλείου με το πάχος του δοντιού του κανόνα και την σχέση μετάδοσης τροχού

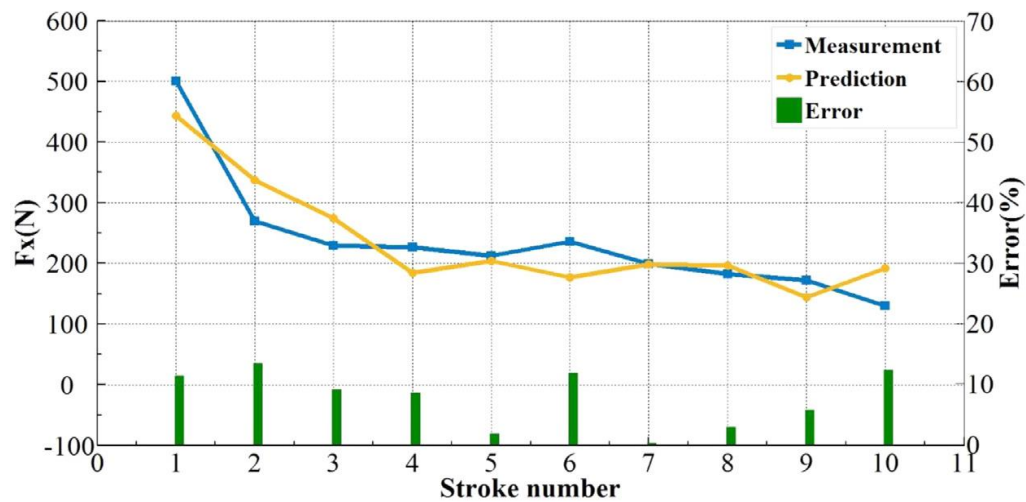
Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός δυνάμεων σύμφωνα με τις σχέσεις [2.17], [2.18], [2.19], τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.23 για την συντεταγμένη F_z , στο σχήμα 2.24 για την συντεταγμένη F_x και το σχήμα 2.25 για την συντεταγμένη F_y .

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



(a) Cutting force F_z

Σχήμα 2.23: Αποτελέσματα δυνάμεων συντεταγμένης F_z



(b) Cutting force F_x

Σχήμα 2.24: Αποτελέσματα δυνάμεων συντεταγμένης F_x

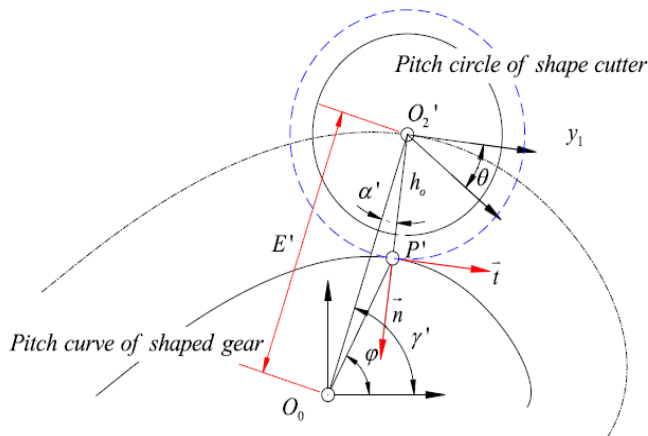


(c) Cutting force F_y

Σχήμα 2.25: Αποτελέσματα δυνάμεων συντεταγμένης F_y

Το ίδιο Πανεπιστήμιο λίγο νωρίτερα, το 2015, οι Fangyan Zheng, Lin Hua, Xinghui Han, Bo Li, Dingfang Che επεκτάθηκαν στην πλάνιση μέσω κύλισης οδοντώσεων για την κοπή μη κυκλικών οδοντωτών τροχών, όπου μέχρι τότε η κυριότερη κατεργασία κατασκευής τους ήταν το φραιζάρισμα με κύλιση. Ο λόγος που επέλεξαν αυτή την κατεργασία, ήταν για να αποφευχθούν περιορισμοί σχετικά με τον αριθμό των δοντιών και διαφορές καμπυλότητας και κυριότερα για να συμπεριληφθεί και η εσωτερική οδόντωση, γεγονός αδύνατο μέσω φραιζαρίσματος με κύλιση. Επομένως μελέτησαν τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και την κινηματική της κατεργασίας προσεγγίζοντας την πρόωσης κύλισης με δύο διαφορετικούς τρόπους και έπειτα δοκίμασαν την αποτελεσματικότητά τους στην πράξη.

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, διατηρείται σταθερή η γωνία περιστροφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου, όμως το μήκος τόξου στην αρχική περιφέρεια της καμπύλης του μεταβάλλεται σε κάθε βήμα της κατεργασίας, με αποτέλεσμα η περιοχή κοπής να μεταβάλλεται αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορετικοί βαθμοί σκληρότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου καθώς επίσης και να γίνεται εντονότερη η φθορά του εργαλείου και της ατράκτου.



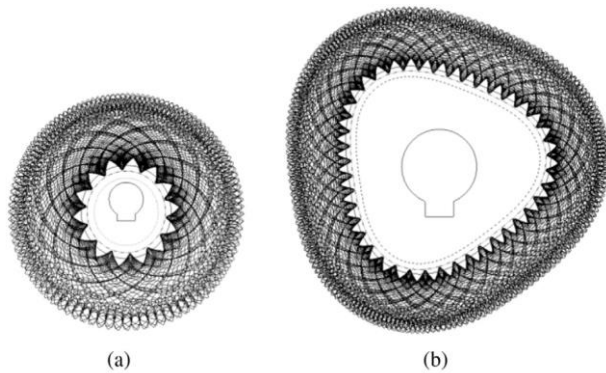
Σχήμα 2.26: Σχέσεις γεωμετρίας στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων για μη κυκλικούς τροχούς

Για την επίλυση των παραπάνω διερευνήθηκε και με έναν δεύτερο τρόπο η κύλιση πρόωσης, κατά την οποία το μήκος τόξου στην αρχική περιφέρεια της καμπύλης παραμένει σταθερό, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται σε κάθε βήμα η γωνία περιστροφής του κοπτικού αυτή τη φορά. Η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού απεικονίζεται στο σχήμα 2.26.

προκύπτει από την τροχιά που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο για την κοπή ολόκληρου του τεμαχίου. Έχοντας ως σημείο αναφοράς την θέση της ατράκτου για το κάθε τεμάχιο, παρατηρούμε ότι στα σημεία έντονης καμπυλότητας της περιμέτρου, το γράφημα είναι πιο πυκνό, δηλαδή οι θέσεις κύλισης βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους.

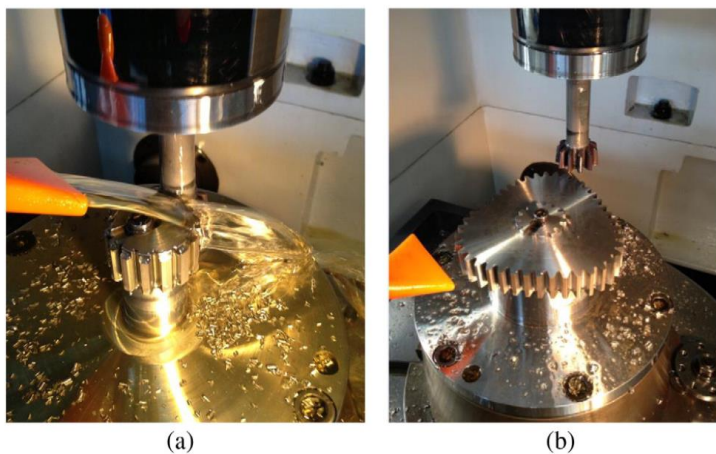
Στο σχήμα 2.27 παρουσιάζεται η τοποθέτηση των θέσεων κύλισης στο αρχικό βάθος κοπής, η οποία

Άλλοι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη για την προσομοίωση της κινηματικής της κατεργασίας για αυτό το είδος τροχών είναι η κίνηση εξόδου από την εμπλοκή εργαλείου - τεμαχίου που πραγματοποιείται σε κάθε παλινδρομική κίνηση του εργαλείου, όπως επίσης και η αρχική θέση του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο. Για παράδειγμα, στην πρώτη περίπτωση στο σχήμα 2.27, παρατηρείται ότι ενώ έχουμε ένα κυκλικό τεμάχιο, η άτρακτος του δεν βρίσκεται στο κέντρο του, αλλά είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω. Επομένως στην αρχική τοποθέτηση του εργαλείου για αυτή την περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη η θέση της ατράκτου και όχι το κέντρο του τεμαχίου, γι' αυτό και θεωρείται εφαρμογή της πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων για μη κυκλικό τροχό.



Σχήμα 2.27: Γράφημα προσομοίωσης κάθε τεμαχίου για ένα πέρασμα

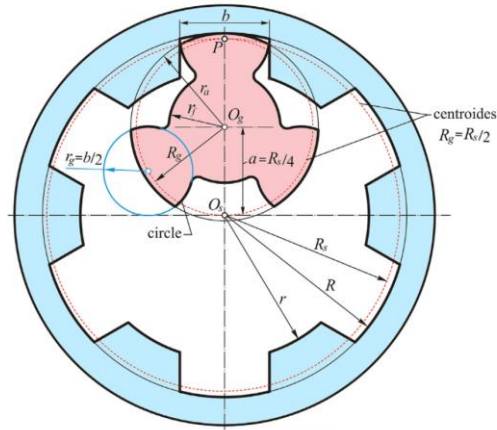
Τέλος, ακολουθώντας την δεύτερη στρατηγική πρόωσης κύλισης, κατασκευάστηκε ένα ζευγάρι τροχών μέσω ενός κέντρου κατεργασίας τριών αξόνων, σύμφωνα με το [σχήμα 2.28](#).



Σχήμα 2.28: Κοπή των οδοντωτών τροχών

Το 2018 οι Ognyan Alipiev, Svetlin Marinov, Toni Uzun του Πανεπιστημίου του Ruse πρότειναν μία νέα μέθοδο υπολογισμού της γεωμετρίας ενός κοπτικού τροχού εσωτερικής οδόντωσης με ευθύγραμμα splines. Η δημοσίευσή τους εστιάζεται κυρίως στην γεωμετρική μοντελοποίηση της κατατομής των δοντιών του εργαλείου, δίνοντας βαρύτητα στο πώς επηρεάζεται από τον αριθμό δοντιών του εργαλείου.

Αποδεικνύεται, για τροχούς τέτοιας γεωμετρίας, ότι αν ο αριθμός δοντιών του κοπτικού εργαλείου είναι ο μισός σε σχέση με αυτόν του κατεργαζόμενου τεμαχίου, απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό η κατατομή του δοντιού του εργαλείου. Σε αυτή την περίπτωση η κατατομή μετατρέπεται σε τμήμα ενός κύκλου, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.29](#). Τέλος, προτείνονται σε τέσσερις σημαντικές παραμέτρους που απαιτούνται για τον ορισμό του ελάχιστου αριθμού δοντιών: ο αριθμός δοντιών τεμαχίου, το πλάτος δοντιού, η ακτίνα από το κέντρο του γραναζιού στην αρχική περιφέρεια (R_s) και η ακτίνα από το κέντρο του γραναζιού στην περιφέρεια ποδών (r).



Σχήμα 2.29: Κατατομή εργαλείου - τροχού για $z_\varepsilon = z_\tau/2$

Το 2017 οι R.M. Khusainov, R.R. Khazie από το Πανεπιστήμιο του Kazan μελέτησαν την επίδραση των σφαλμάτων που αφορούν την κινηματική και τη γεωμετρία των κατεργαζόμενων τεμαχίων και εργαλείων, της πλάνισης με κύλιση, στο τελικό προϊόν. Επομένως προσπάθησαν να ορίσουν τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν κατασκευαστικά τον κατεργαζόμενο τροχό στην τελική μορφή του. Έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στο γεγονός ότι παρά την ακρίβεια που μπορεί να υπάρχει στην κινηματική ανάλυση της κατεργασίας, η γεωμετρία τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου παίζει αντίστοιχα πολύ σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα.

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης του μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένα γενικής χρήσης πρόγραμμα CAD/CAM, το Autodesk Inventor 2019, το οποίο διαθέτει περιβάλλον API (Application Programming Interface). Ο όρος API χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργικότητα που υποστηρίζεται από μία εφαρμογή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω ενός προγραμματιστικού περιβάλλοντος. Με χρήση του API δίνεται η δυνατότητα, μέσω κώδικα, να αυτοματοποιηθούν λειτουργίες του Inventor, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μέσα από την ίδια την εφαρμογή. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και άλλες διαδικασίες οι οποίες δεν είναι εύκολο να εκτελεστούν απευθείας από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής.

Το περιβάλλον API μπορεί να αξιοποιηθεί είτε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic for Applications (VBA), μέσω περιβάλλοντος που διαθέτει η ίδια η εφαρμογή, είτε με τον προγραμματισμό σε εξωτερικό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών και τη δημιουργία Add-In και αυτόνομων εκτελέσιμων εφαρμογών.

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον της Visual Studio 2017 μέσω Add-In με dll (dynamic link library), χρησιμοποιώντας την αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic .NET. Στην παρούσα εργασία, προτιμήθηκε η ανάπτυξη λογισμικού στον πυρήνα του Inventor, καθώς ο υπολογιστικός χρόνος της προσομοίωσης είναι αρκετά απαιτητικός. Επιπλέον, με την επιλογή ενός Add-In (dll) δεν απαιτείται γνώση του περιβάλλοντος VBA που διαθέτει το Inventor .



Σχήμα 3.1: Λογισμικό προσομοιωτικού μοντέλου

3.2 Δομή προσομοίωσης

Το λογισμικό της προσομοίωσης που αναπτύχθηκε μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Visual Studio, κάνει χρήση των βιβλιοθηκών του Autodesk Inventor, οι οποίες εμπεριέχουν τις λειτουργίες που μπορεί να βρει ο χρήστης μέσα στην ίδια την εφαρμογή.

Μέσω του περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη, ζητούνται αρχικά τα απαραίτητα δεδομένα για την περίπτωση που μελετάται, ώστε να ξεκινήσει η προσομοίωση. Τα δεδομένα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: τα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία του επιθυμητού τελικού τροχού και τα δεδομένα που αφορούν τις συνθήκες κατεργασίας.

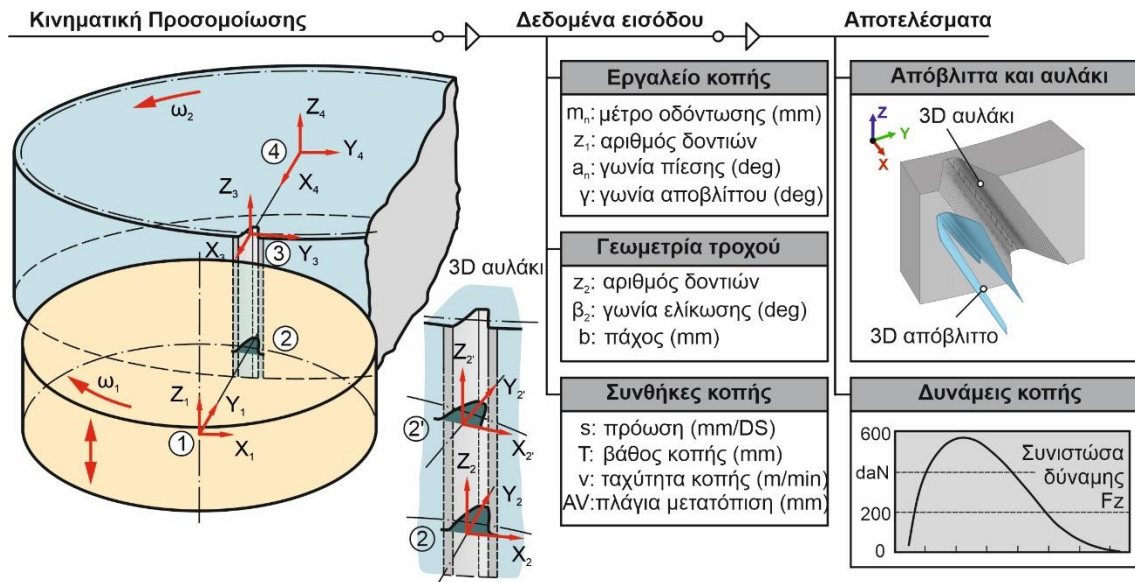
Η δομή που ακολουθείται στο προσομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε θα αναλυθεί στις επόμενες υποενότητες κατά βήμα και είναι η εξής:

1. Δημιουργία κατατομής κοπτικού δοντιού

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

2. Δημιουργία τεμαχίου προς κατεργασία
3. Δημιουργία τροχιάς κοπτικής κατατομής
4. Δημιουργία αυλακιού
5. Υπολογισμός γεωμετρίας αποβλίπτων και δυνάμεων κοπής

Το προσομοιωτικό μοντέλο εξάγει πληροφορίες σχετικά με το τρισδιάστατο αυλάκι, τη γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων του, τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη δημιουργία του, καθώς και εκείνες που αναπτύσσονται όταν τα δόντια του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού βρίσκονται σε εμπλοκή μεταξύ τους.

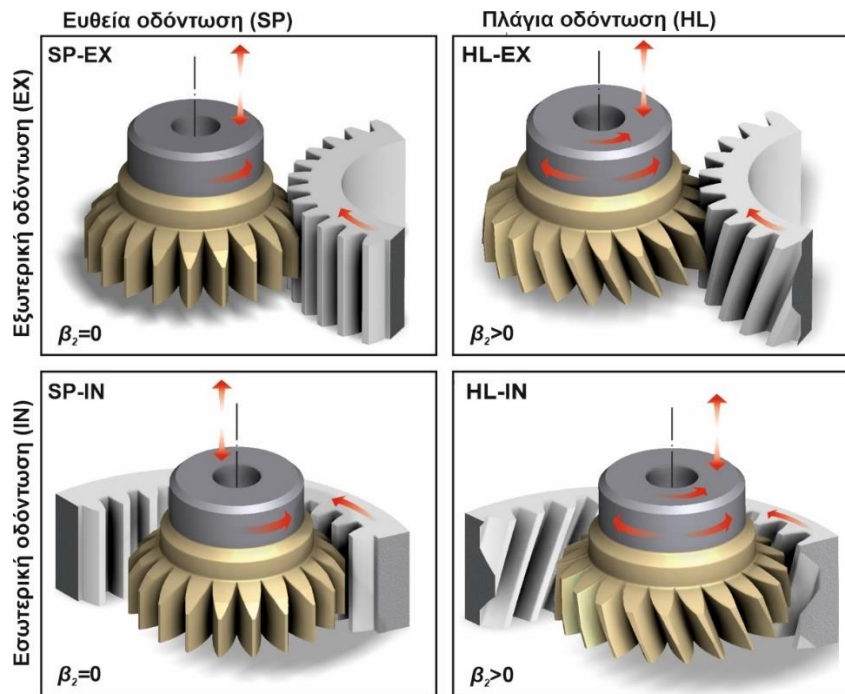


Σχήμα 3.2: Συστήματα αναφοράς και διάγραμμα ροής της προσομοίωσης

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης, για τέσσερα διαφορετικά συστήματα αναφοράς, όπου χαρακτηρίζουν:

1. Σύστημα στο κέντρο του κοπτικού εργαλείου το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του εργαλείου
2. Σύστημα στην κατατομή του εργαλείου στην εκάστοτε θέση κύλισης που βρίσκεται η κατατομή
3. Σταθερό σύστημα στο αυλάκι
4. Σταθερό σύστημα στο κέντρο του κατεργαζόμενου τροχού

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι η δημιουργία εξωτερικών και εσωτερικών τροχών, ευθείας και πλάγιας οδόντωσης, μέσω πλάνισης με κύλιση οδοντώσεων. Στο σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι περιπτώσεις που θα μελετηθούν, κατά την εμπλοκή κοπτικού εργαλείου και κατεργαζόμενου τροχού.



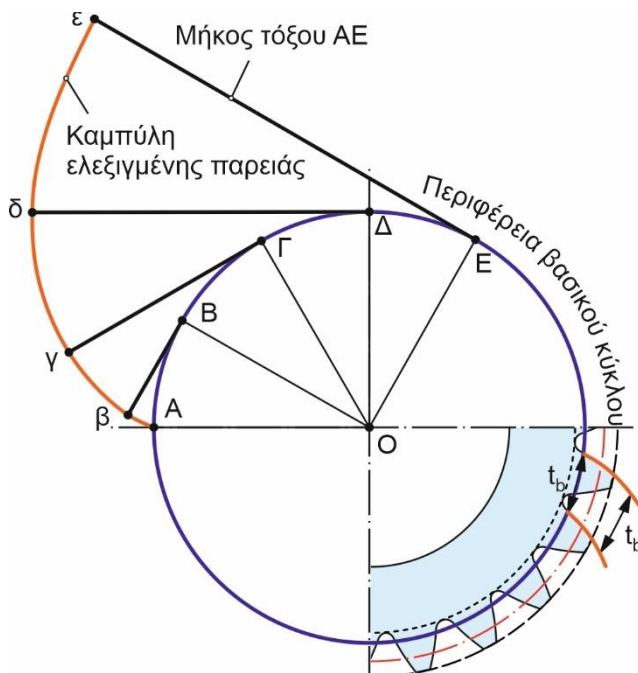
Σχήμα 3.3: Εξεταζόμενες περιπτώσεις προσομοιωτικού μοντέλου

3.3 Κοπτικό Εργαλείο

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ακρίβεια στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στη γεωμετρία του κατεργαζόμενου τροχού. Η γεωμετρία του κοπτικού δοντιού καθορίζεται από:

1. Το μέτρο οδόντωσης m_1
2. Τον αριθμό δοντιών z_1
3. Την γωνία πίεσης α_o

Η κατατομή του κοπτικού δοντιού είναι το πρώτο βήμα που απαιτείται για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης και γίνεται μέσω της εξελεγμένης του κύκλου. Η δημιουργία μιας καμπύλης με γεωμετρία εξελεγμένης, επεξηγείται με τη βοήθεια ενός τεταμένου νήματος, το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα βασικό κύκλο. Ο κύκλος αντιστοιχεί στην βασική περιφέρεια του οδοντωτού τροχού. Η πορεία που ακολουθεί η άκρη του νήματος ενώ ξετυλίγεται από τον κύκλο περιγράφει μια καμπύλη, την εξελεγμένη.



Σχήμα 3.4: Δημιουργία εξελεγμένης κύκλου

Το σχήμα 3.4 δείχνει μια καμπύλη εξελιγμένης παρειάς και την γεωμετρική της κατασκευή. Όσες περισσότερες ακτίνες τύπου ΟΑ, ΟΒ, ΟΓ κτλ. σχεδιάζονται, τόσα περισσότερα ευθύγραμμα τμήματα τύπου Ββ, Γγ, Δδ

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

δημιουργούνται με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ακρίβεια στο σχεδιασμό της εξελεγμένης. Τα ευθύγραμμα τμήματα Ββ, Γγ, Δδ είναι πάντα εφαπτόμενα στον κύκλο, άρα και οι γωνίες $\widehat{O\epsilon\epsilon}$, $\widehat{O\Delta\delta}$, $\widehat{O\Gamma\gamma}$, είναι πάντα ορθές. Επιπλέον το μήκος των ευθειών Ββ, Γγ, κτλ. Αντιστοιχεί στο μήκος της περιφέρειας ανάμεσα στο εφαπτόμενο σημείο και το σημείο έναρξης Α.

Μέσω της μελέτης της εξελεγμένης του κύκλου δημιουργούνται οι εκατέρωθεν παρειές του κοπτικού δοντιού. Κάθε παρειά της κατατομής του δοντιού ξεκινάει από την βασική περιφέρεια και καταλήγει στην περιφέρεια κεφαλών. Αντίστοιχα στο σχήμα 3.5, το ευθύγραμμο τμήμα ΟΑ είναι πάντα κάθετο με το Αα και ως εκ τούτου η γωνία $\widehat{O\alpha\alpha}$ είναι πάντα ορθή. Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΑΛ προκύπτει:

$$(OL) = r_b \cos \theta \quad [3.1]$$

$$(AL) = r_b \sin \theta \quad [3.2]$$

Οι συντεταγμένες των i σημείων που ανήκουν σε μία παρειά υπολογίζονται ως εξής:

$$x = (OL) + (Aa) \sin \theta \quad [3.3]$$

$$y = (AL) - (Aa) \cos \theta \quad [3.4]$$

Το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος (Αα) ισούται με το μήκος τόξου ΑΜ, επομένως:

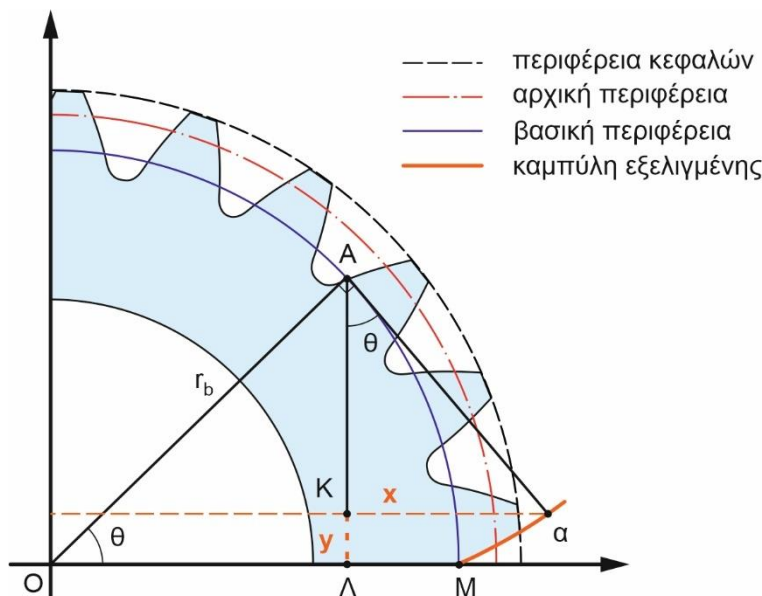
$$(Aa) = r_b \theta \quad [3.5]$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις [3.1], [3.2] και [3.5] στις [3.3] και [3.4] προκύπτουν οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζουμε τις συντεταγμένες των σημείων i που ανήκουν στην μία παρειά ενός δοντιού

$$x(i) = r_b (\sin(\theta) - \hat{\theta} \cos(\theta)) \quad [3.6]$$

$$y(i) = r_b (\cos(\theta) + \hat{\theta} \sin(\theta)) \quad [3.7]$$

Όπου r_b : ακτίνα περιφέρειας τροχών κοπτικού εργαλείου
 θ : γωνία εξελεγμένης



Σχήμα 3.5: Συντεταγμένες καμπύλης εξελεγμένης

Η γωνία θ ξεκινάει από τις 0° πάνω στην βασική περιφέρεια και καταλήγει στην θ_{\max} πάνω στην περιφέρεια κεφαλών. Για κάθε σημείο i της παρειάς αντιστοιχεί μία διαφορετική γωνία εξελιγμένης θ όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.6. Αντικαθιστώντας στις σχέσεις [3.6] και [3.7] τις πολικές συντεταγμένες ενός σημείου (r, φ) , καταλήγουμε στη σχέση υπολογισμού της γωνίας εξελιγμένης θ :

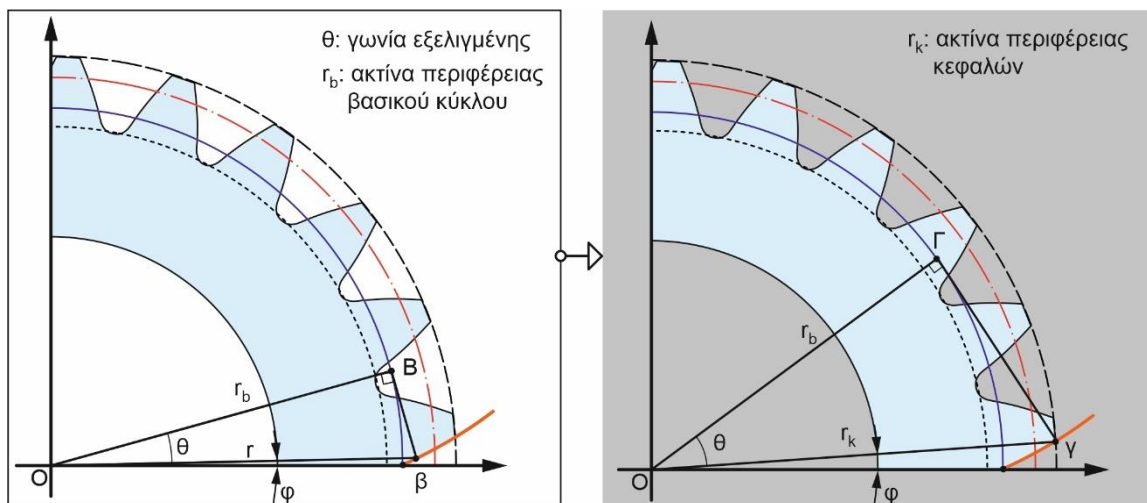
$$\begin{aligned} r \cos(\varphi) &= r_b (\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)) \\ r \sin(\varphi) &= r_b (\cos(\theta) + \theta \sin(\theta)) \end{aligned}$$

$$r^2 = r_b^2 [1 + \hat{\theta}(\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta))] \Leftrightarrow r^2 = r_b^2 (1 + \hat{\theta}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \theta = \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} \quad [3.8]$$

Άρα για ακτίνα περιφέρειας κεφαλών κοπτικού εργαλείου r_k και σύμφωνα με την σχέση [3.8]:

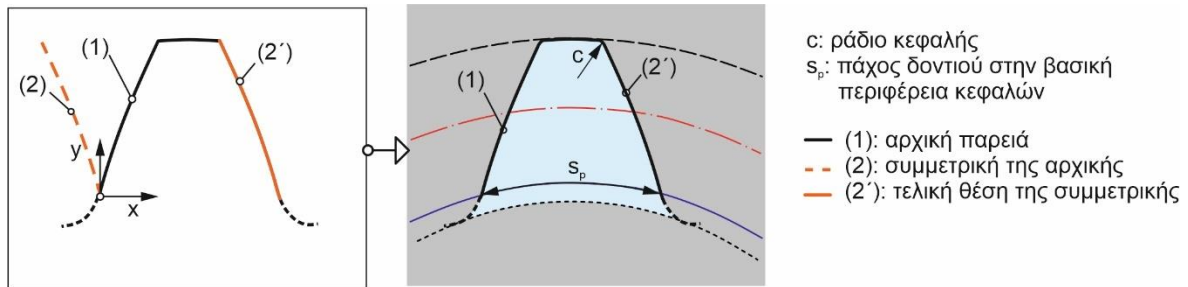
$$\theta_{\max} = \frac{\sqrt{r_k^2 - r_b^2}}{r_b} \quad [3.9]$$



Σχήμα 3.6: Διαδικασία υπολογισμού εξελιγμένης κύκλου

Οι δύο παρειές είναι συμμετρικές μεταξύ τους, ως προς τον άξονα y , για το Σύστημα 2 (σχήμα 3.2), επομένως αφού δημιουργηθούν και οι δύο για τις ίδιες τιμές y και αντίθετες τιμές x , περιστρέφονται σύμφωνα με την γωνία που αντιστοιχεί σε τόξο ίσο με το πάχος δοντιού στην περιφέρεια βασικού κύκλου. Ενώνονται στην περιφέρεια κεφαλών τους με μία καμπύλη και τέλος, προστίθεται το ράδιο κεφαλής c στα σημεία που ενώνονται οι κορυφές των παρειών με την καμπύλη του προηγούμενου βήματος, όπου $c = 0, 2m_n$, σύμφωνα με το σχήμα 3.7.

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 3.7: Κατατομή δοντιού κοπτικού εργαλείου

Στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης, υπάρχουν δύο είδη κατατομών δοντιού, τα οποία βασίζονται σε δύο διαφορετικά συστήματα επιπέδων, το normal και το transverse. Η κατατομή του δοντιού που βρίσκεται στο normal επίπεδο είναι περιστραμμένη κατά τη γωνία ελίκωσης του τεμαχίου. Η γεωμετρία της κατατομής είναι αντίστοιχη με εκείνη ενός δοντιού ευθείας οδόντωσης ίδιας γεωμετρίας. Η μόνη διαφορά, για να προσδιοριστεί σωστά η κατατομή στο normal επίπεδο, βρίσκεται στον αριθμό δοντιών του εργαλείου. Συγκεκριμένα, απαιτείται ο αριθμός φανταστικών δοντιών z_v , όπου αντιστοιχεί στον αριθμό δοντιών ενός οδοντωτού τροχού ευθείας οδόντωσης, αντίστοιχης γεωμετρίας.

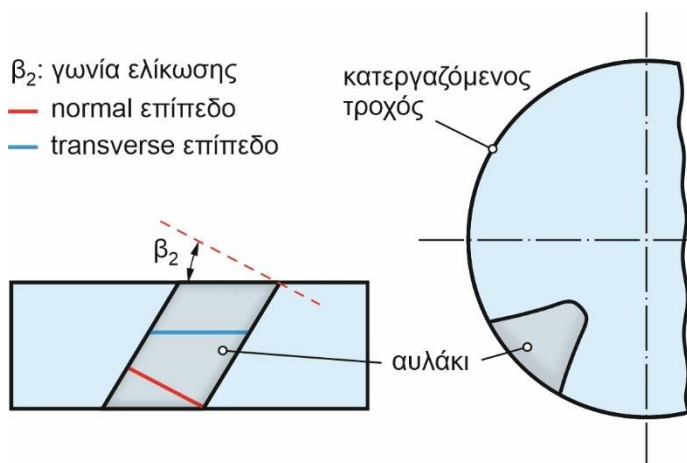
$$z_v = \frac{z_1}{\cos^3 \beta_1} \quad [3.10]$$

Για τον μετασχηματισμό της κατατομής από το normal στο transverse επίπεδο απαιτούνται οι εξής σχέσεις:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta_1} \quad [3.11]$$

$$\alpha_t = \tan^{-1} \frac{\tan \alpha}{\cos \beta_1} \quad [3.12]$$

$$d_o = z m_t \quad [3.13]$$

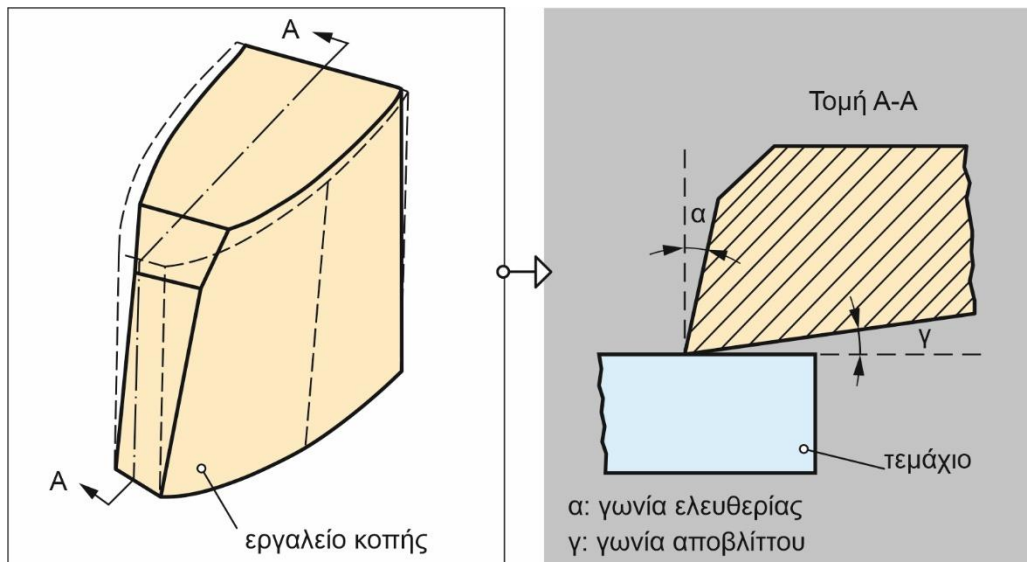


Σχήμα 3.8: Συστήματα επιπέδων στην πλάγια οδόντωση

Όσον αφορά την εμπλοκή κοπτικού τροχού και τεμαχίου, στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης, είναι απαραίτητο και οι δύο τροχοί να έχουν ίδια γωνία ελίκωσης, αντίθετης όμως φοράς.

Για τη δημιουργία της τελικής κατατομής του δοντιού, λαμβάνεται υπόψη και η γωνία αποβλήτου του εργαλείου κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Επομένως η κατατομή που δημιουργήθηκε στα προηγούμενα βήματα περιστρέφεται κατά γ μοίρες ως

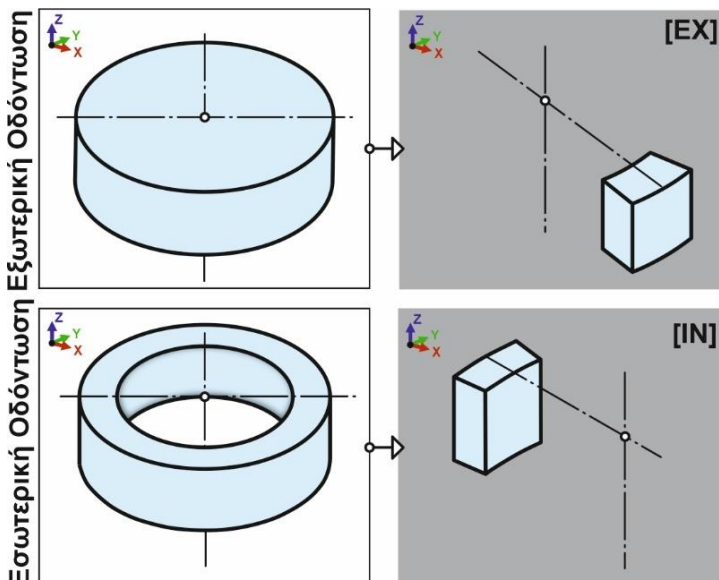
προς το κέντρο της κοπτικής ακμής στην περιφέρεια των κεφαλών.



Σχήμα 3.9: Γωνία αποβλήτου του εργαλείου κοπής

3.4 Κατεργαζόμενος τροχός

Το τεμάχιο που θα υποστεί κατεργασία, δημιουργείται με τις αρχικές του διαστάσεις σε τρισδιάστατη μορφή. Σε περίπτωση εξωτερικής οδόντωσης, πρόκειται για αντικείμενο κυλινδρικής διατομής μήκους b και διαμέτρου d_k , σύμφωνα με τη σχέση [2.9], που αντιστοιχεί στην περιφέρεια κεφαλών του οδοντωτού τροχού, που θα κατασκευαστεί. Για περιπτώσεις εσωτερικής οδόντωσης όμως, δημιουργείται τεμάχιο σε μορφή δακτυλίου, με εξωτερική διάμετρο d_f και εσωτερική διάμετρο d_k σύμφωνα με τις σχέσεις [2.11] και [2.12].



Σχήμα 3.10: Δημιουργία τεμαχίου για την προσομοίωση της κατεργασίας

Όσον αφορά την μοντελοποίηση κατεργασιών οδοντώσεων και λόγω της συμμετρίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, κάθε αυλάκι έχει ίδια γεωμετρία. Επομένως για την μοντελοποίηση μελετήθηκε ένα μόνο αυλάκι, το οποίο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προκύπτει από ένα κοπτικό δόντι. Έτσι, υπολογίζεται η γωνία που αντιστοιχεί στο πάχος του δοντιού στην περιφέρεια κεφαλών και στην περιφέρεια ποδών, με σκοπό να αφαιρεθεί η επιφάνεια του τεμαχίου, που δεν εμπλέκεται στην κοπή ενός αυλακιού για το παρόν

προσομοιωτικό μοντέλο σύμφωνα με το σχήμα 3.10.

3.5 Προσέγγιση κινηματικής κατεργασίας

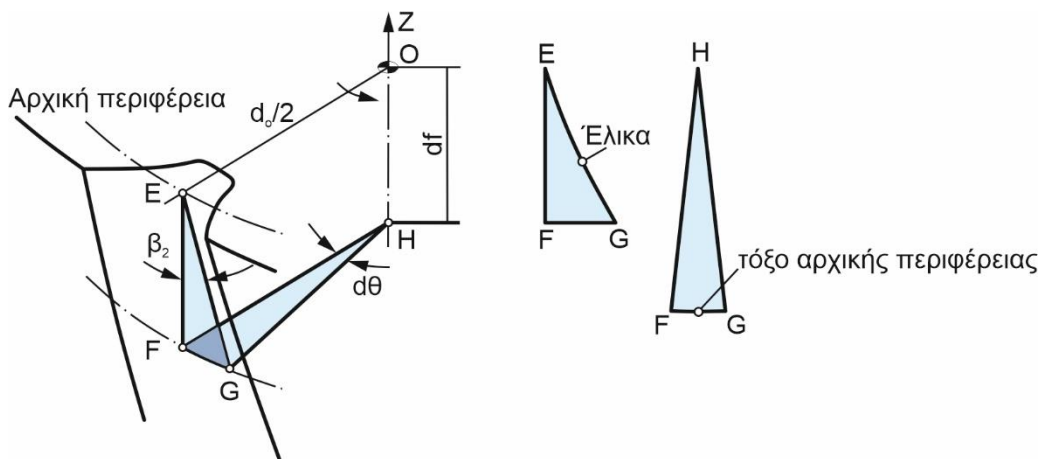
Όπως αναφέρθηκε, στην μοντελοποίηση κατεργασιών οδοντώσεων και λόγω της συμμετρίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, κάθε αυλάκι έχει ίδια γεωμετρία. Γι' αυτό στην παρούσα εργασία, θεωρείται εργαλείο με ένα κοπτικό δόντι το οποίο οδηγεί στην δημιουργία ενός τεμαχίου με ένα αυλάκι.

Για κάθε εμβολισμό το εργαλείο και το τεμάχιο θεωρούνται ακίνητα ως προς την περιστροφική κίνηση που εκτελεί το καθένα γύρω από τον εαυτό του. Για απλοποίηση της προσομοίωσης της κινηματικής της κατεργασίας στο μοντέλο, ανάγονται και οι δύο περιστροφικές κινήσεις στο εργαλείο και ως εκ τούτου ο κατεργαζόμενος τροχός θεωρείται ακίνητος. Δηλαδή για κάθε εμβολισμό το κοπτικό δόντι στρέφεται κατά $d\varphi_1$ ως προς το κέντρο του και κατά $d\varphi_2$ ως προς το κέντρο του τεμαχίου.

3.5.1 Κατακόρυφη τροχιά δοντιού του κοπτικού τροχού

Σε πρώτο στάδιο δημιουργείται η τροχιά, που διαγράφει ένα δόντι του εργαλείου κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού, σε τρισδιάστατη μορφή, με τη βοήθεια της κατατομής του εργαλείου που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο βήμα. Τοποθετώντας αντίγραφα της κατατομής του δοντιού σε παράλληλα επίπεδα καθ' όλο το μήκος b του κατεργαζόμενου τροχού με καθοδική πορεία και ενώνοντας τα σε ένα στερεό, αποτυπώνεται η τρισδιάστατη τροχιά που ακολουθεί το δόντι κατά τη διάρκεια της καθόδου του, ώστε να αφαιρεθεί ένα απόβλιπτο.

Σε αντίθεση με την ευθεία οδόντωση, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο, η τροχιά στην πλάγια οδόντωση έχει διαφορετική πορεία. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια ενός εμβολισμού το κοπτικό δόντι διαγράφει μια περιστροφή $d\theta$ ως προς το κέντρο του τεμαχίου, σύμφωνα με το σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Υπολογισμός κλίσης τροχιάς για πλάγια οδόντωση

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το σχήμα οι βάσεις των τριγώνων (HFG) και (EFG) ταυτίζονται. Οι σχέσεις που προκύπτουν από αυτά είναι οι [3.14] και [3.15].

$$(FG) = \frac{s_o}{2} \quad [3.14]$$

$$\tan \beta_2 = \frac{(FG)}{b} \quad [3.15]$$

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Η βάση τους (FG) δεν αποτελεί ευθύγραμμο τμήμα, αλλά τόξο, του οποίου το μήκος προκύπτει από την σχέση [3.16].

$$(FG) = (d\theta)r_o \Leftrightarrow \quad [3.16]$$

$$\Leftrightarrow \frac{s_o}{2} = d\theta r_o \Leftrightarrow$$

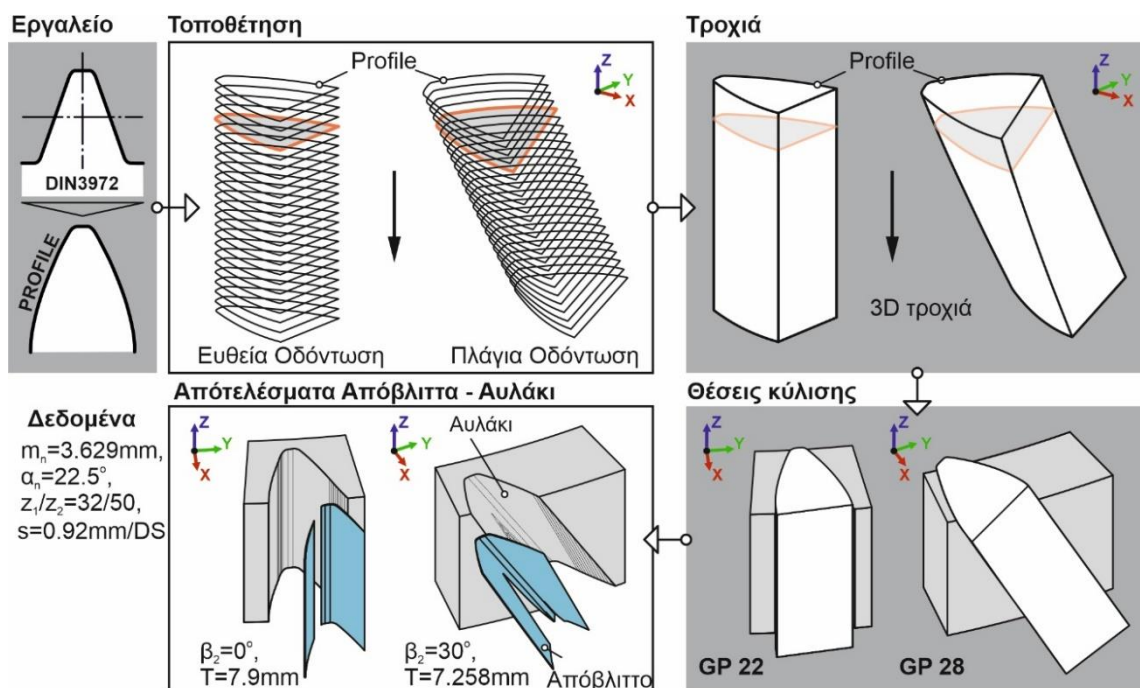
$$\Leftrightarrow d\theta = \frac{s_o}{2r_o} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow d\theta = \frac{b \tan \beta_2}{r_o} \quad [3.17]$$

Όπου $r_o = \frac{d_o}{2}$ και εφόσον μελετάμε τη γωνία περιστροφής $d\theta$ στο transverse επίπεδο, σύμφωνα με την [3.13] η [3.17] έχει ως εξής:

$$d\theta = \frac{2b \sin \beta_2}{m_1 z_1} \quad [3.18]$$

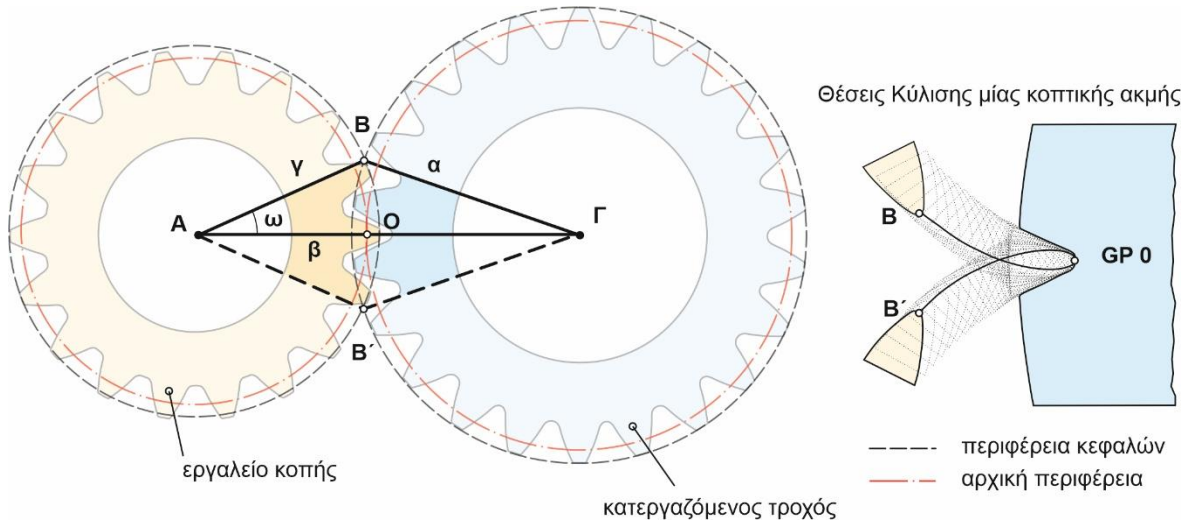
Επομένως για η αριθμό επιπέδων, που επιλέγει ο χρήστης στο λογισμικό, τοποθετούνται αντίγραφα της κατατομής του κοπτικού σε διαδοχικά επίπεδα με καθοδική πορεία. Το καθένα από αυτά τοποθετείται κάτω από το προηγούμενο περιστραμμένο κατά $d\theta/n$ καθ' όλο το μήκος b του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Με αυτόν τον τρόπο απεικονίζεται η τρισδιάστατη τροχιά ενός κοπτικού δοντιού στην κοπή για πλάγια οδόντωση. Όσα περισσότερα τα n επίπεδα που επιλέγει ο χρήστης, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται κατά τη δημιουργία της τροχιάς σε μορφή στερεού αντικειμένου. Τονίζεται ωστόσο, ότι στην ευθεία οδόντωση δεν τίθεται ζήτημα μεγαλύτερης ακρίβειας για περισσότερα επίπεδα, καθώς η κατατομή του κοπτικού δοντιού ακολουθεί κατακόρυφη καθοδική πορεία χωρίς καμία περιστροφή μεταξύ επιπέδων. Στο σχήμα 3.12 αποτυπώνεται σχηματικά για ίδια δεδομένα σε ευθεία και πλάγια οδόντωση με γωνία ελίκωσης $\beta_2=30^\circ$ η διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω για την δημιουργία της τροχιάς της κατατομής ενός κοπτικού δοντιού.



Σχήμα 3.12: Διαδικασία δημιουργίας τροχιάς και σχηματισμού αποβλίττου σε ευθεία και ελικοειδή οδόντωση

3.5.2 Τόξο Εργασίας δοντιού του κοπτικού τροχού

Πέρα από την παλινδρομική κίνηση που εκτελεί το εργαλείο, κινείται και περιστροφικά γύρω από τον εαυτό του. Αντίστοιχα κινείται περιστροφικά γύρω από τον εαυτό του και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επομένως, για την προσομοίωση της κίνησης του δοντιού του εργαλείου κατά την δημιουργία ενός αυλακιού, απαιτείται να προσδιοριστεί και το εύρος της περιστροφικής κίνησης του σχετικά με τον εαυτό του και το κατεργαζόμενο τεμάχιο.



Σχήμα 3.13: Τόξο εργασίας ενός δοντιού του κοπτικού εργαλείου για ευθεία εξωτερική οδόντωση

Όταν δύο περιστρεφόμενοι τροχοί βρίσκονται σε εμπλοκή μεταξύ τους οι κύκλοι των αρχικών περιφερειών τους εφάπτονται πάντα. Στο προσομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, εύρος του κοπτικού δοντιού αποτελεί η γωνία $\widehat{BAB'}$ στο σχήμα 3.13 η οποία προσδιορίζεται από τα σημεία τομής B και B' των κύκλων της περιφέρειας κεφαλών και των δύο τροχών. Εφαρμόζουμε το νόμο των συνημίτονων στο τρίγωνο ABΓ για τη γωνία $\hat{\omega}$:

$$\cos \omega = \frac{\beta^2 + \gamma^2 - \alpha^2}{2\beta\gamma} \quad [3.19]$$

$$\widehat{BAB'} = 2\hat{\omega} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \widehat{BAB'} = 2\cos^{-1} \frac{\beta^2 + \gamma^2 - \alpha^2}{2\beta\gamma} \quad [3.20]$$

Όπου: $\alpha = r_{k2}$

$$\beta = r_{k1} + r_{k2} - T$$

$$\gamma = r_{k1}$$

Το δόντι του κοπτικού εργαλείου που βρίσκεται στο σημείο O αντιστοιχεί στη θέση κύλισης 0 (**GP 0**) στα δεξιά του ίδιου σχήματος. Η **GP 0** είναι αυτή κατά την οποία το κοπτικό δόντι βρίσκεται στο μέγιστο βάθος του αυλακιού και βάση αυτής προσδιορίζονται και οι υπόλοιπες. Όλες οι θέσεις κύλισης πριν από αυτή έχουν αρνητική αρίθμηση, με την αμέσως προηγούμενη να ορίζεται ως **GP -1**, την προηγούμενη αυτής ως **GP -2** και όλες οι επόμενες έχουν θετική αρίθμηση. Οι θέσεις κύλισης πριν και μετά την **GP 0** δεν είναι απαραίτητα ίσες. Μάλιστα συνήθως οι πρώτες είναι περισσότερες καθώς τότε γίνεται η περισσότερη αφαίρεση υλικού. Επομένως το εύρος κύλισης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο δόντι

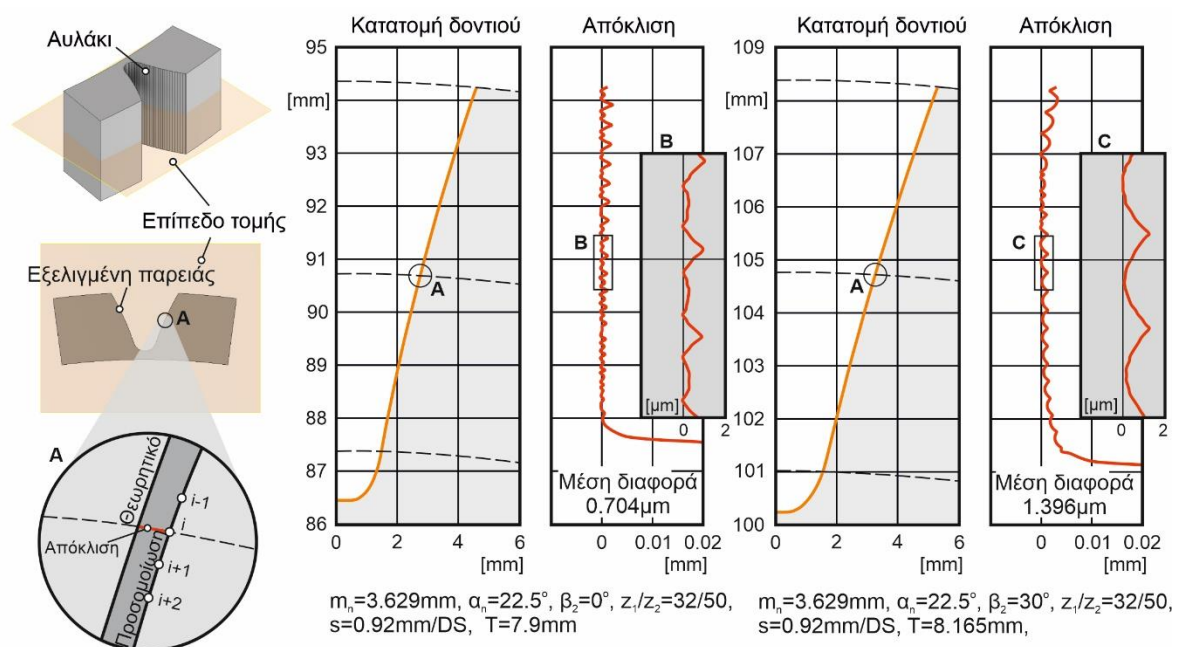
βρίσκεται εντός των ορίων της γωνίας $\widehat{BAB'}$. Στον κώδικα του λογισμικού σαν θέσεις κύλισης ορίζονται όλες εκείνες οι θέσεις που παίρνει ένα δόντι σύμφωνα με την περιστροφή του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τροχού, από τις οποίες προκύπτει απόβλιπτο.

3.6 Αυλάκι οδοντωτού τροχού

Για να ξεκινήσει η διαδικασία αφαίρεσης υλικού στην προσομοίωση, η τρισδιάστατη τροχιά του εργαλείου είναι τοποθετημένη στην θέση κύλισης 0 (**GP 0**) του αυλακιού. Στη συνέχεια, η τρισδιάστατη τροχιά που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο βήμα, περιστρέφεται κατά $\frac{\widehat{BAB'}}{2}$ για να πάρει την αρχική θέση κύλισης. Κάθε φορά που η τρισδιάστατη τροχιά περιστρέφεται κατά $d\varphi_1$ και $d\varphi_2$ (σχέσεις [2.15], [2.16]), το λογισμικό αποθηκεύει την γεωμετρία της τομής της με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτή η τομή αντιστοιχεί και σε ένα απόβλιπτο που προκύπτει από έναν εμβολισμό.

Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του προσομοιωτικού μοντέλου, είναι απαραίτητος ο έλεγχος των παραγόμενων παρειών εξελιγμένης που σχηματίζονται στο παραγόμενο αυλάκι της οδόντωσης. Για το σκοπό αυτό και με τη χρήση λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ της εξελιγμένης παρειάς που παράγεται από το μοντέλο με την αντίστοιχη θεωρητική παρειά. Η θεωρητική παρειά προκύπτει από τις εξισώσεις της εξελιγμένης καμπύλης και στη συνέχεια την περιστροφή των σημείων της σύμφωνα με το πάχος δοντιού στην βασική περιφέρεια του τροχού (σχήμα 3.7) για να μπορεί να γίνει η σύγκριση.

Εφόσον το παραγόμενο αυλάκι σχηματίζεται από την κοπή των διαδοχικών θέσεων κύλισης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των θέσεων κύλισης που χρειάζονται για τον σχηματισμό ενός αυλακιού, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακρίβεια της γεωμετρίας των παραγόμενων παρειών σε αυτό. Δηλαδή, όσο πιο μικρό το βήμα μεταξύ διαδοχικών θέσεων κύλισης, και επομένως όσο πιο μικρή η πρόωση κύλισης, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχει το τελικό αποτέλεσμα.

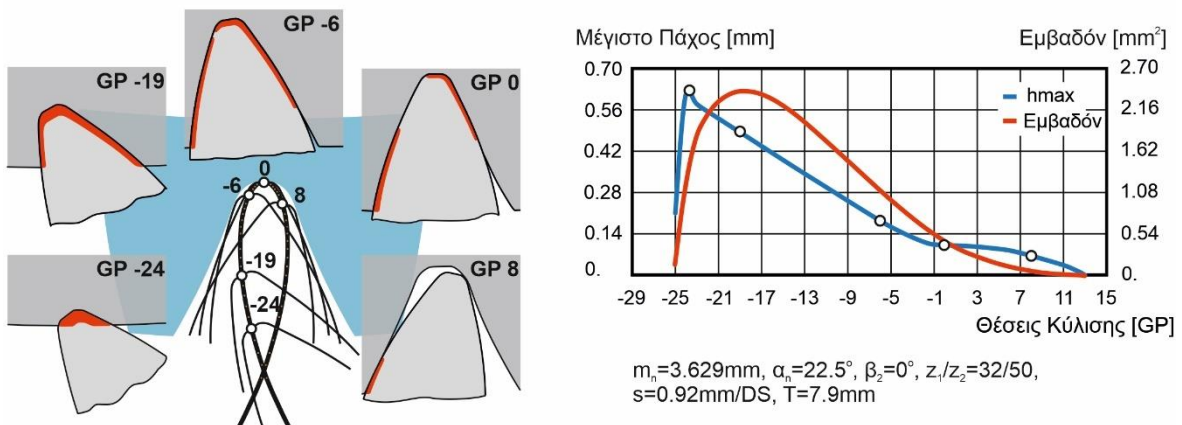


Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις, μία για ευθεία και μία για πλάγια οδόντωση, όπου φαίνεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της θεωρητικής και της παραγόμενης καμπύλης. Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια A, η σύγκριση γίνεται με τη μέθοδο τυχαίων κύκλων σταδιακά αυξανόμενης διαμέτρου, των οποίων το κέντρο βρίσκεται στο κέντρο του οδοντωτού τροχού. Το τμήμα του κύκλου μεταξύ της θεωρητικής και της παραγόμενης καμπύλης αποτελεί την διαφορά μεταξύ τους.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, τα αποτελέσματα της σύγκρισης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, με την παραγόμενη καμπύλη να ταυτίζεται σχεδόν με την αντίστοιχη θεωρητική με μέσο όρο διαφοράς **0.704μm** για την ευθεία και **1.396μm** για την πλάγια οδόντωση. Οι ελάχιστες αποκλίσεις που προκύπτουν οφείλονται στην ακρίβεια που μπορεί να προσφέρει το λογισμικό προσομοίωσης και είναι πολύ μικρές ώστε να προκαλέσουν σφάλματα στη γεωμετρία των παραγόμενων αποβλίπων και ως αποτέλεσμα των παραγόμενων δυνάμεων κοπής.

3.7 Απόβλιττα

Από την στιγμή που ξεκινάει η διαδικασία αφαίρεσης υλικού ενός κοπτικού δοντιού για τη δημιουργία ενός αυλακιού, για κάθε θέση κύλισης του κατεργαζόμενου τροχού, προκύπτει ένα νέο απόβλιττο. Υπενθυμίζεται ότι κάθε θέση κύλισης αντιστοιχεί σε έναν εμβολισμό. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τα απόβλιττα που προκύπτουν με πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς τροχούς, ευθείας και πλάγιας οδόντωσης, σε απαραμόρφωτη μορφή. Ο βασικός σκοπός για τον οποίο θα μελετηθούν αυτά, είναι η μετέπειτα μελέτη των δυνάμεων, για διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας εργαλείου, κατεργαζόμενου τροχού και συνθήκες κοπής.

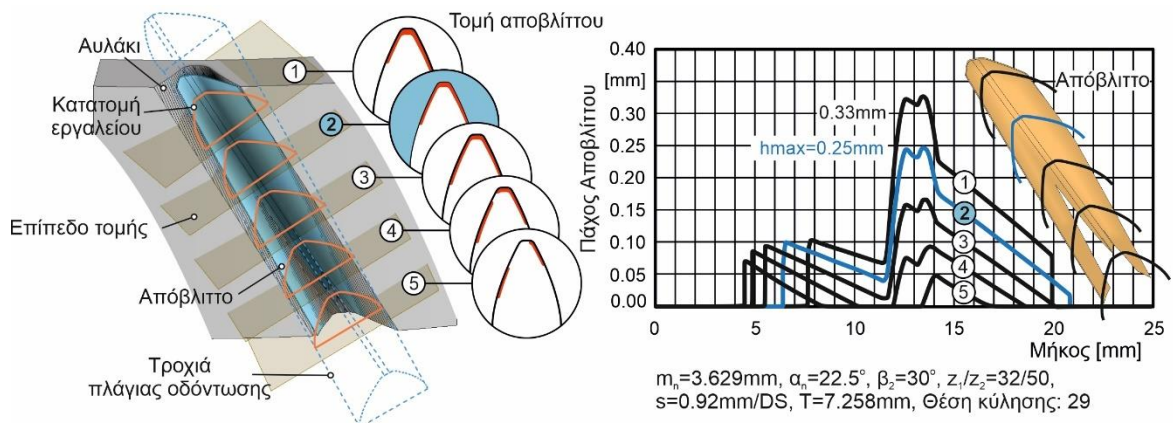


Σχήμα 3.15: Θέσεις κύλισης, εμβαδόν επιφάνειας και μέγιστο πάχος αποβλίπτου για περίπτωση ευθείας οδόντωσης

Στο σχήμα 3.15 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του προσομοιωτικού μοντέλου για μία κατεργασία ευθείας οδόντωσης. Ενδεικτικά βλέπουμε τα αποτελέσματα της τομής αποβλίπτου για κάποιες βασικές θέσεις κύλισης από τις συνολικά 39 οι οποίες σχηματίζουν το αυλάκι. Πιο συγκεκριμένα, η κόκκινη περιοχή αποτελεί την τομή μεταξύ της κοπτικής ακμής του δοντιού και της επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου που αφαιρείται κατά τον εμβολισμό που αντιστοιχεί στην εκάστοτε θέση κύλισης. Αποτυπώνεται η πορεία που ακολουθεί η κορυφή της κατατομής του κοπτικού δοντιού από την πρώτη θέσης κύλισης

μέχρι την τελευταία, για την δημιουργία ενός αυλακιού με την έντονη μαύρη καμπύλη στο κέντρο του σχήματος στα αριστερά. Από το διάγραμμα του σχήματος δίνονται πληροφορίες για το εμβαδόν του υλικού, που αφαιρείται από ένα αυλάκι κατά την κατεργασία, σε καμπύλη ανά θέση κύλισης, καθώς επίσης και το μέγιστο πάχος που έχει το κάθε απόβλιπτο ανά θέση κύλισης. Το εμβαδόν και το μέγιστο πάχος αποβλίπτου αποτελούν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δυνάμεων στο επόμενο στάδιο. Η θέση κύλισης 0 (**GP 0**) αντιστοιχεί στην θέση όπου ο άξονας Y_2 της κατατομής του κοπτικού δοντιού βρίσκεται παράλληλος με τον άξονα X_3 του συστήματος αναφοράς του αυλακιού. Παρατηρείται ότι στις αρχικές θέσεις κύλισης αφαιρείται περισσότερο υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, επομένως οι τομές των αποβλίστων έχουν μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια αλλά και μέγιστο πάχος.

Στην ευθεία οδόντωση η γεωμετρία του απαραμόρφωτου αποβλίστου είναι ομοιόμορφη σε όλο το ύψος του. Για το λόγο αυτό μελετάται η κατατομή του στο μέσο του ύψους του. Στις περιπτώσεις πλάγιας οδόντωσης όμως η γεωμετρία μεταβάλλεται. Επομένως μελετώνται πολλές διαφορετικές κατατομές ενός αποβλίστου, σε διαφορετικά επίπεδα στις διαδοχικές θέσεις που τοποθετείται η κατατομή του κοπτικού δοντιού, καθ' όλο το μήκος που διαγράφει η τροχιά ενός εμβολισμού. Ο αριθμός αυτών των επιπέδων, εισάγεται από τον χρήστη. Στο σχήμα 3.16 απεικονίζεται ο τρόπος που μελετώνται οι κατατομές καθ' όλο το ύψος του ενός αποβλίστου για πέντε διαφορετικά επίπεδα. Για κάθε ένα από τα πέντε διαφορετικά επίπεδα αντιστοιχεί μια διαφορετική κατατομή. Δεξιά απεικονίζονται οι καμπύλες πάχους αποβλίστου για κάθε επίπεδο.



Σχήμα 3.16: Πάχος αποβλίστου σε πέντε επίπεδα για την θέση κύλισης 29 για περίπτωση πλάγιας οδόντωσης

3.8 Δυνάμεις Κοπής

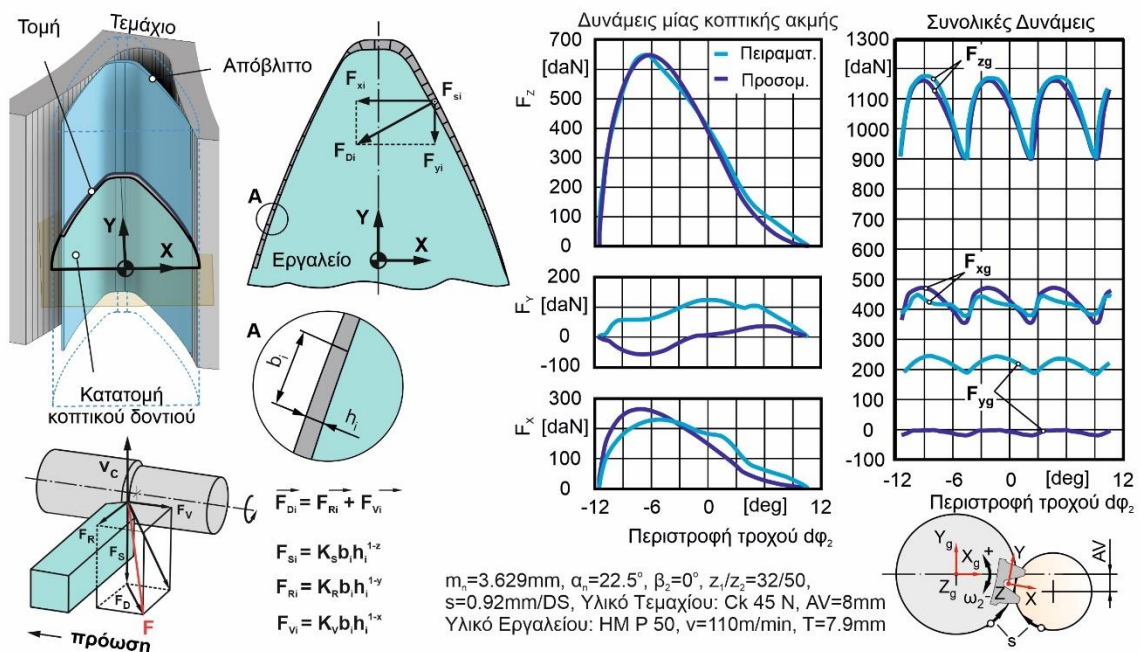
Η γνώση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο για τις κατασκευάστριες εταιρείες των εργαλειομηχανών, όσο και για τους τελικούς χρήστες αυτών. Βοηθά στη σωστή σχεδιομελέτη της εργαλειομηχανής και των εξαρτημάτων της αλλά και τον καθορισμό της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας της. Αποτελούν επίσης σημαντικό μέγεθος αξιολόγησης της κατεργαστικότητάς τους, καθώς οι δυνάμεις που ασκούνε θα πρέπει να είναι ικανές να υπερνικήσουν την αντίσταση του κατεργαζόμενου υλικού σε πλαστική παραμόρφωση. Επομένως η ισχύς της εργαλειομηχανής που πρόκειται να υλοποιήσει μια κατεργασία, εξαρτάται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια αυτής. Επιπλέον, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία, δημιουργούν φθορά στα εξαρτήματα της εργαλειομηχανής, επηρεάζοντας την τελική ακρίβεια των κατεργαζόμενων τεμαχίων.

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν καθοριστικά τις συνιστώσες των δυνάμεων κοπής είναι οι εξής:

- Η κατεργασία κοπής ως προς την κινηματική της και το είδος του αποβλίπτου (σταθερό ή μεταβαλλόμενο πάχος)
- Οι συνθήκες κοπής: ταχύτητα κοπής, πρόωση, γεωμετρία κοπτικού, βάθος κοπής, παρουσία λίπανσης και ψύξης
- Το κατεργαζόμενο υλικό
- Το κοπτικό εργαλείο ως προς τη γεωμετρία του, τη φθορά του και τυχόν επικάλυψη

Η ύπαρξη όλων αυτών των παραγόντων καθιστά την διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων ιδιαίτερα δύσκολη, στην προσπάθεια να ενταχθούν σε ένα κοινό νόμο προσδιορισμού τους.



Σχήμα 3.17: Δυνάμεις κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων. Υπολογισμός δυνάμεων για περίπτωση ευθείας οδόντωσης.

Η διαδικασία υπολογισμού δυνάμεων κοπής, μπορεί να εφαρμοστεί σύμφωνα με την περίπτωση της λοξής κοπής για κάθε μηχανουργική κατεργασία με κοπή, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε κατεργασίας. Για παράδειγμα κατά το φραιζάρισμα το απόβλιπτο δεν έχει σταθερό πάχος, σε αντίθεση με την τόννευση. Στο σχήμα 3.17 κάτω αριστερά παρουσιάζεται το σύστημα των δυνάμεων κατά τη γενική περίπτωση της λοξής κοπής. Οι δυνάμεις κοπής αναλύονται σε τρεις συνιστώσες κατά μήκος τριών αξόνων κάθετων μεταξύ τους. Αυτές είναι η κύρια δύναμη κοπής F_S , η δύναμη στην κατεύθυνση της πρόωσης F_V , και η δύναμη απώθησης F_R . Οι συνιστώσες των δυνάμεων υπολογίζονται μέσω μιας εκθετικής σχέσης που ανέπτυξαν οι Kienzle και Victor σε κατεργασία με τόρνο. Σύμφωνα με αυτή, οι δυνάμεις κοπής του συστήματος εξαρτώνται εκθετικά από το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και γραμμικά από το πλάτος του. Αυτές δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_S = b K_S h^{1-z} \quad [3.21]$$

$$F_R = b K_R h^{1-y} \quad [3.22]$$

$$F_V = bK_V h^{1-x} \quad [3.23]$$

Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής ορίζονται ως η δύναμη, η οποία απαιτείται για την κοπή απαραμόρφωτου αποβλήτου με πάχος και πλάτος ίσο με 1mm. Προσδιορίζονται πειραματικά και εξαρτώνται από το υλικό, τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου και την ταχύτητα κοπής.

Στην περίπτωση της τórνευσης, ο υπολογισμός δυνάμεων είναι σχετικά εύκολος καθώς υπάρχει μία κοπτική ακμή που κατεργάζεται τη διατομή ενός αποβλήτου, η οποία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας και περιγράφεται από ένα παραλληλόγραμμο πλάτους **b** και πάχους **h**.

Όμως, κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων, για τον σχηματισμό ενός αυλακιού όπου συμμετέχει μια κοπτική ακμή, προκύπτουν πολλά απόβλιττα διαφορετικής γεωμετρίας μεταξύ τους. Επομένως η δυσκολία υπολογισμού των δυνάμεων αυξάνεται αρκετά σε αυτή την περίπτωση και για να αντιμετωπιστεί, το απόβλιττο χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές *i* πλάτους **b_i** και πάχους **h_i** όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.17. Οι δυνάμεις κοπής **F_S**, **F_V**, **F_R** αφού υπολογιστούν, αναλύονται σε τρεις συνιστώσες για τους άξονες x, y, z στο κέντρο κάθε επιμέρους τμήματος ενός αποβλήτου, σύμφωνα με το Σύστημα 1 στο σχήμα 3.2. Η **F_z** ταυτίζεται με την κύρια δύναμη κοπής **F_S**. Εισάγεται νέα συνιστώσα **F_{Di}**, όπου προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των **F_{Ri}** και **F_{Vi}** και αναλύεται σε δύο συνιστώσες των **F_{xi}**, **F_{yi}** ώστε αυτές μετά να προστεθούν στο κέντρο της κοπτικής κατατομής. Οι σχέσεις αναλύονται ως εξής:

$$\vec{F}_{Di} = \vec{F}_{Ri} + \vec{F}_{Vi} \quad [3.24]$$

$$F_{Si} = b_i K_S h_i^{1-z} \quad [3.25]$$

$$F_{Ri} = b_i K_R h_i^{1-y} \quad [3.26]$$

$$F_{Vi} = b_i K_V h_i^{1-x} \quad [3.27]$$

όπου *i*=1,2,...,n τμήματα ενός αποβλήτου

Όταν υπολογιστούν οι **F_{xi}**, **F_{yi}**, **F_{zi}** για κάθε *i* τμήμα του αποβλήτου, τότε αυτές αθροίζονται διανυσματικά σύμφωνα με τις ίδιες σχέσεις στο σταθερό σύστημα στο κέντρο της κοπτικής κατατομής (σχήμα 3.2 - Σύστημα 2), ώστε να υπολογιστούν οι συνιστώσες των δυνάμεων κοπής για κάθε απόβλιττο *j*, που συμμετέχει στον σχηματισμό ενός αυλακιού:

$$\vec{F}_{xj} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{xi} \quad [3.28]$$

$$\vec{F}_{yj} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{yi} \quad [3.29]$$

$$\vec{F}_{zj} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{zi} \quad [3.30]$$

όπου *j*=1,2,...,m το απόβλιττο που αντιστοιχεί στη θέση κύλισης *j*.

Στη συνέχεια οι δυνάμεις F_{xj} , F_{yj} , F_{zj} μετασχηματίζονται στο σταθερό Σύστημα 3 στο αυλάκι, σύμφωνα με το σχήμα 3.2 και έπειτα αθροίζονται διανυσματικά, ώστε να βρεθούν οι συνολικές συνιστώσες των δυνάμεων κοπής F_x , F_y , F_z που απαιτούνται για την δημιουργία ενός αποβλήτου με τη συμμετοχή μίας κοπτικής ακμής, κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων.

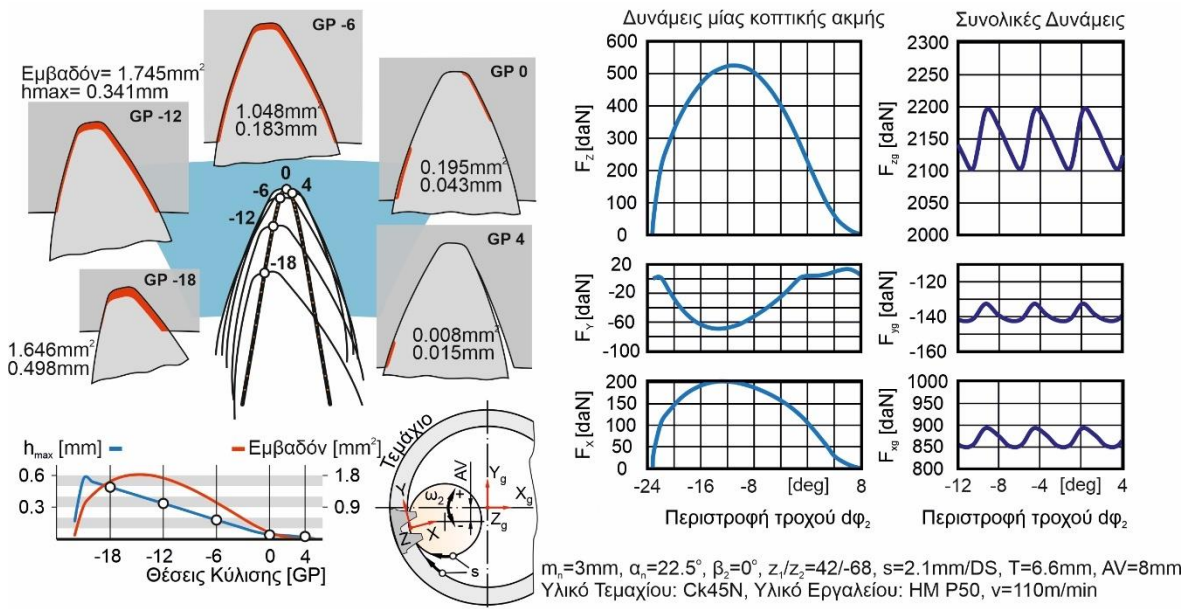
Στην πραγματική κατεργασία, κατά το σχηματισμό ενός αυλακιού, συμμετέχουν παράλληλα και άλλες κοπτικές ακμές για τον σχηματισμό άλλων αυλακιών αντίστοιχα. Με τη βοήθεια της περιστροφής που έχει το κοπτικό δόντι, ως προς το κέντρο του σε κάθε θέση κύλισης για την κοπή ενός αυλακιού, υπολογίζονται οι δυνάμεις κατά την εμπλοκή εργαλείου και κατεργαζόμενου τροχού. Συγκεκριμένα για κάθε θέση κύλισης του αυλακιού που μελετάται, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αντίστοιχες θέσεις κύλισης των γειτονικών κοπτικών ακμών που βρίσκονται σε εμπλοκή ταυτόχρονα σε διαφορετικά αυλάκια. Υπολογίζονται επομένως οι δυνάμεις από αυτές τις θέσεις κύλισης και έπειτα αθροίζονται διανυσματικά. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν και οι συνιστώσες F_{xg} , F_{yg} , F_{zg} των συνολικών δυνάμεων κοπής κατά την εμπλοκή για ένα συνδυασμό θέσεων κύλισης, με σημείο αναφοράς τη δημιουργία ενός αυλακιού, σύμφωνα με το Σύστημα αναφοράς 4 στο σχήμα 3.2. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν υπολογισθούν όλοι οι συνδυασμοί θέσεων κύλισης που προκύπτουν κατά τη δημιουργία ενός αυλακιού, όταν το κοπτικό εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο βρίσκονται σε εμπλοκή.

Για την κοπή πλάγιας οδόντωσης ο υπολογισμός δυνάμεων σε κάθε απόβλιττο γίνεται και παρουσιάζεται ανά επίπεδο.

Η ακρίβεια των δυνάμεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διακριτοποίηση της κοπτικής ακμής και τις διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων κάθε αποβλήτου. Όσο πιο αραιή είναι η διακριτοποίηση τόσο πιο γρήγορη η εκτέλεση του κώδικα, ενώ τα αποτελέσματα που παράγονται έχουν μειωμένη ακρίβεια. Αντίθετα, όσο πιο πυκνή η διακριτοποίηση, τόσο πιο αργή η εκτέλεση του κώδικα, ενώ η ακρίβεια στον υπολογισμό δυνάμεων είναι μεγαλύτερη. Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό δυνάμεων σε κάθε τμήμα ενός αποβλήτου, εξαρτώνται πέρα από το υλικό κοπής που χρησιμοποιείται και από το πάχος h_i του. Συγκεκριμένα η τιμή της αντίστασης κοπής K_S , διαφοροποιείται ανάλογα το εύρος τιμής του πάχους h_i του τμήματος που εξετάζεται κάθε φορά. Οι K_V , K_R αντίθετα έχουν σταθερή τιμή που ορίζεται μόνο από το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατεργασία. Οι τιμές των αντιστάσεων κοπής για όλες τις περιπτώσεις που εκτελέστηκαν λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [10].

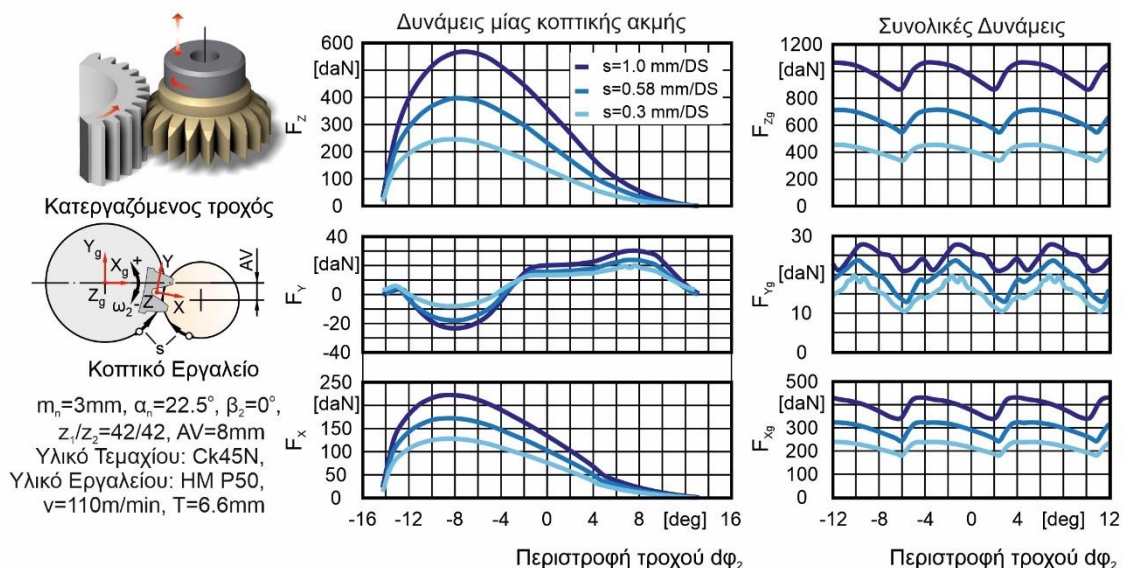
Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσομοιωτικού μοντέλου για μία περίπτωση ευθείας εσωτερικής οδόντωσης. Απεικονίζοντας οι διαστάσεις αποβλήτων για πέντε ενδεικτικές θέσεις κύλισης, καθώς και οι δυνάμεις που προκύπτουν κατά τη δημιουργία ενός αυλακιού με εμπλοκή και χωρίς.

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



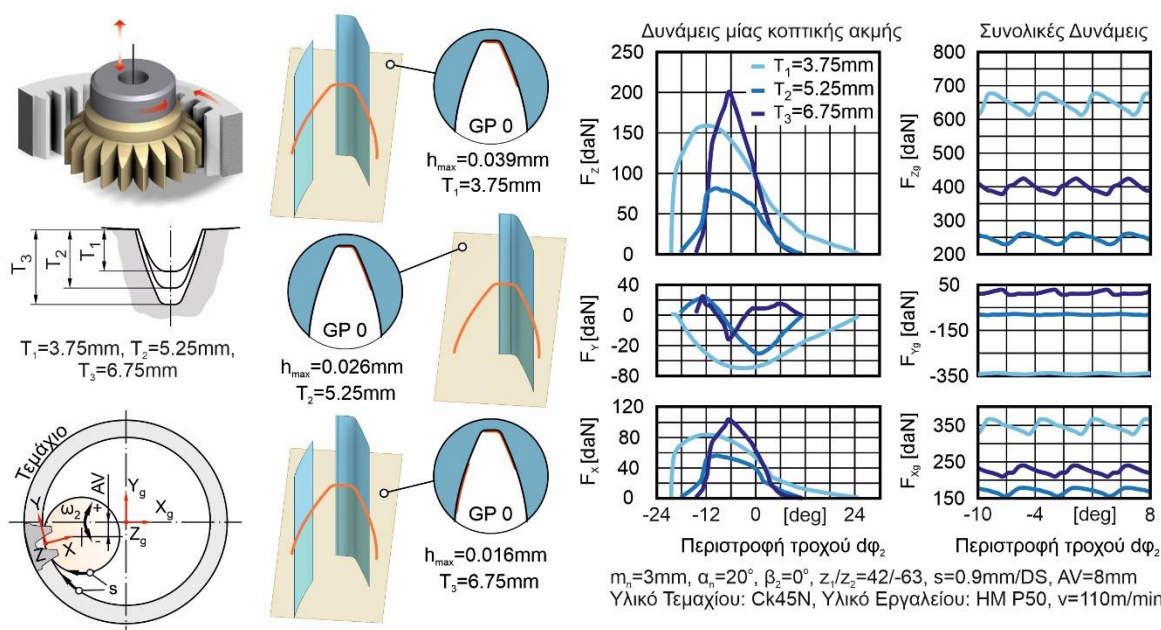
Σχήμα 3.18: Αποτελέσματα περίπτωσης εσωτερικής ευθείας οδόντωσης

Παρατηρείται από το σχήμα 3.19 ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πρόωση κύλισης τόσο μεγαλύτερες είναι και οι αλγεβρικές τιμές των δυνάμεων κοπήs κατά απόλυτη τιμή, είτε το εργαλείο βρίσκεται σε εμπλοκή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο είτε όχι. Αυτό συμβαίνει καθώς η πρόωση κύλισης επηρεάζει την σχέση μετάδοσης κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου [2.14]. Όσο μεγαλύτερη η πρόωση κύλισης s , τόσο μεγαλύτερες και οι γωνιακές ταχύτητες ω_1 , ω_2 άρα μεταξύ εμβολισμών η περιστροφή του κοπτικού εργαλείου $d\phi_1$ και του κατεργαζόμενου τροχού $d\phi_2$ είναι μεγαλύτερες και κατά επέκταση μεγαλύτερη είναι και η περιοχή υλικού που αφαιρείται από το τεμάχιο. Αυτό συνεπάγεται και λιγότερες θέσεις κύλισης για να δημιουργηθεί ένα αυλάκι. Εφόσον λοιπόν, η περιοχή του υλικού που αφαιρείται ανά θέση κύλισης είναι μεγαλύτερη, έχουμε μεγαλύτερες διαστάσεις αποβλίπτου. Υπενθυμίζεται ότι οι δυνάμεις κοπήs του συστήματος εξαρτώνται εκθετικά από το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και γραμμικά από το πλάτος του.



Σχήμα 3.19: Υπολογισμός δυνάμεων ενός αυλακιού με εμπλοκή και χωρίς για περίπτωση ευθείας οδόντωσης για διαφορετικές περιπτώσεις πρόωσης κύλισης

Στο σχήμα 3.20 απεικονίζονται οι δυνάμεις κοπής για μια περίπτωση εσωτερικής οδόντωσης, με διαδοχικά βάθη κοπής. Συγκεκριμένα, οι δυνάμεις υπολογίστηκαν διαδοχικά για $T_1=3.75\text{mm}$, $T_2=5.25\text{mm}$ και $T_3=6.25\text{mm}$. Όπως παρατηρείται, μεγαλύτερη τιμή στο βάθος κοπής δεν σημαίνει απαραίτητα μεγαλύτερη αλγεβρική τιμή των δυνάμεων. Υπάρχει διακύμανση στις διαστάσεις των αποβλήτων από βάθος σε βάθος.



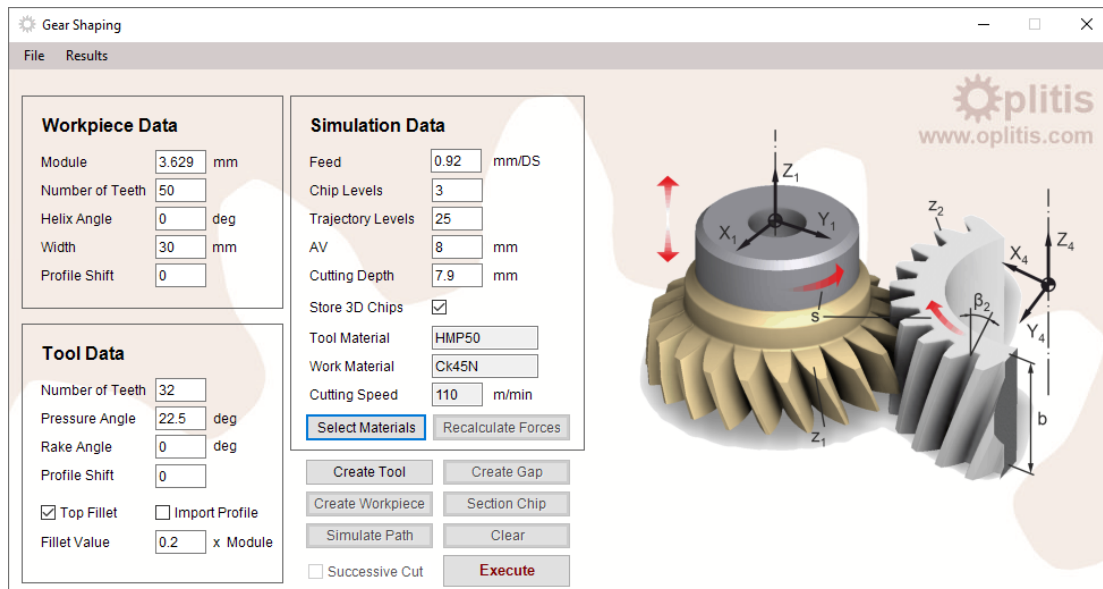
Σχήμα 3.20: Υπολογισμός δυνάμεων κοπής για διαφορετικά βάθη κοπής για περίπτωση ευθείας εσωτερικής οδόντωσης

3.9 Το λογισμικό του μοντέλου

Το προσομοιωτικό μοντέλο της πλάνισης με κύλιση οδοντωτού τροχού, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελεί τμήμα λογισμικού προσομοίωσης κατεργασιών κοπής οδοντωτών τροχών που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο βασικός σκοπός του λογισμικού είναι ο υπολογισμός της γεωμετρίας των αποβλήτων αλλά και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης οδοντωτών τροχών.

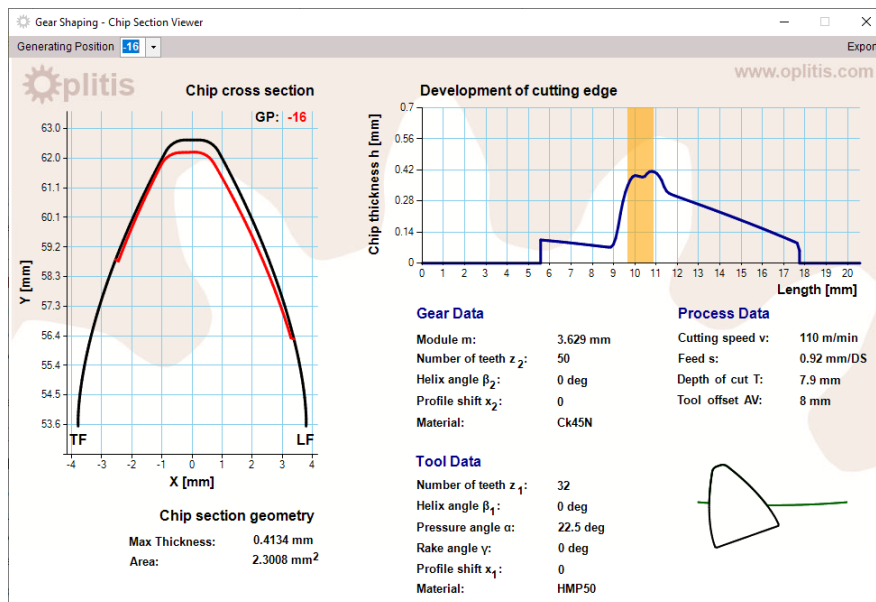
Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζεται το περιβάλλον διεπαφής χρήστη του λογισμικού για την πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού, όπου εισάγονται από τον χρήστη τα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, του κατεργαζόμενου τροχού και τις συνθήκες κοπής της κατεργασίας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών υλικών για το εργαλείο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι ειδικές αντιστάσεις κοπής αλλάζουν ανάλογα το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση της ελικοειδούς οδόντωσης, απαιτείται να δοθεί και ο αριθμός των επιθυμητών επιπέδων αποβλήτου από τον χρήστη. Επιλέγοντας τη λειτουργία “Successive Cut”, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.21, ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει μία προσομοίωση για διαδοχικά βάθη κοπής.

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 3.21: Περιβάλλον διεπαφής χρήστη του προσομοιωτικού μοντέλου

Αφού πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, στο παράθυρο “Chip Section Viewer” υπάρχουν πληροφορίες για την γεωμετρία κάθε απαραμόρφωτου αποβλήττου σε κάθε θέση κύλισης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.22](#). Αριστερά απεικονίζεται η τομή της κοπτικής ακμής με τον κατεργαζόμενο τροχό, δηλαδή το απόβλιττο, για τη θέση κύλισης -16, ενώ στο διάγραμμα δεξιά το πάχος του απαραμόρφωτου αποβλήττου σε όλο το μήκος του.

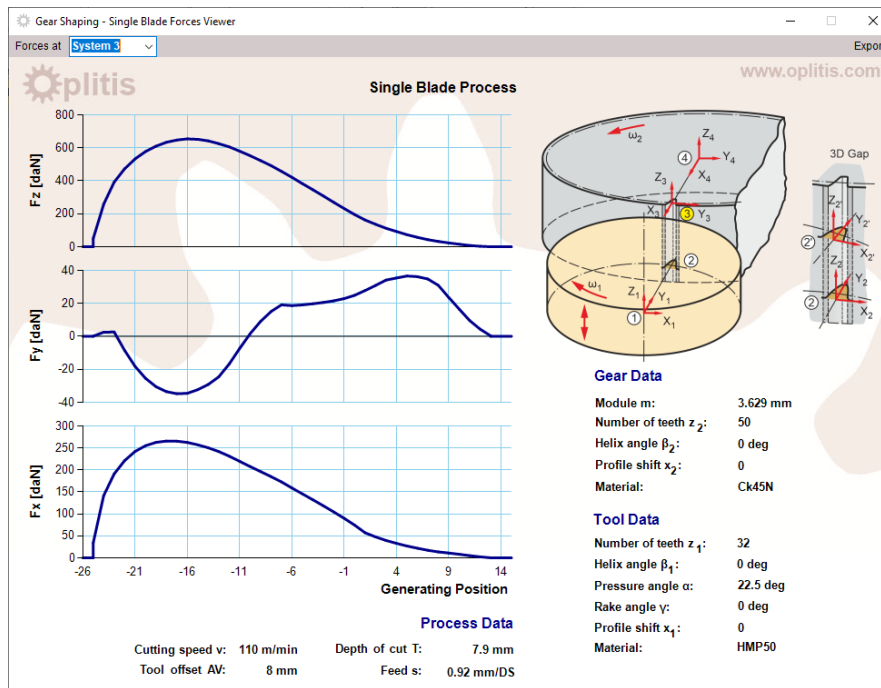


Σχήμα 3.22: Παράθυρο “Chip Section Viewer” του λογισμικού

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει σε τρία διαφορετικά παράθυρα, τα αποτελέσματα των δυνάμεων:

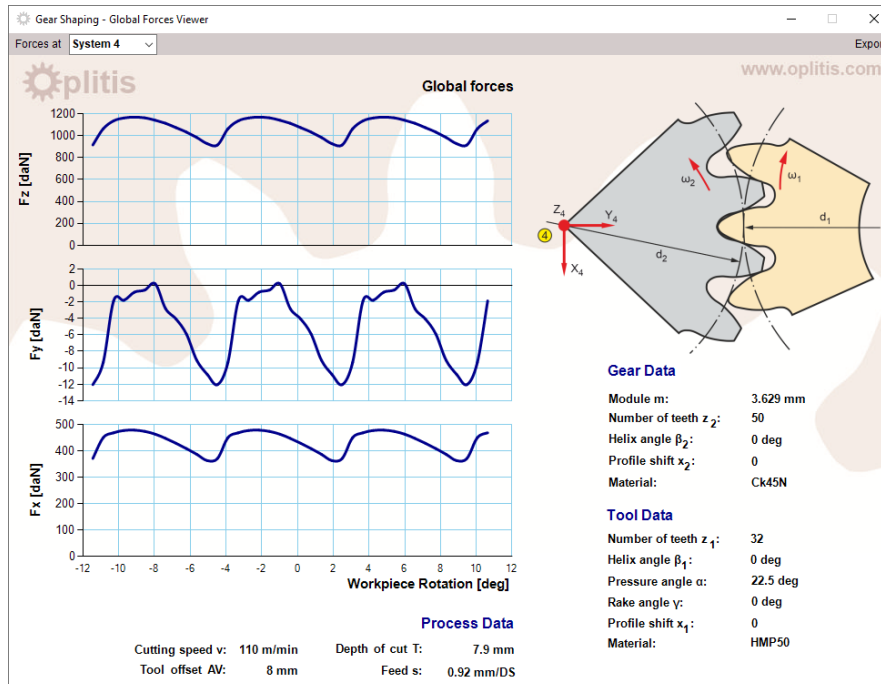
1. Για κάθε θέση κύλισης, δηλαδή για κάθε απόβλιττο, στο Σύστημα 2
2. Για την δημιουργία ενός αυλακιού μέσω μίας κοπτικής ακμής και στα τέσσερα συστήματα αναφοράς ([σχήμα 3.23](#)).
3. Για την δημιουργία ενός αυλακιού όταν το κοπτικό εργαλείο βρίσκεται σε εμπλοκή με τον κατεργαζόμενο τροχό, στο Σύστημα 4 ([σχήμα 3.24](#))

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 3.23: Παράθυρο “Single Blade Forces Viewer” του λογισμικού

Επιπλέον, ο χρήστης, έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει διαφορετικές περιπτώσεις προσομοίωσης, ώστε να μπορεί να δει τα αποτελέσματα τους χωρίς να χρειαστεί να τις εκτελέσει ξανά. Δίνεται, τέλος, η δυνατότητα να γίνει εξαγωγή όλων των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης σε έγγραφο τύπου pdf, όπως παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 4**.



Σχήμα 3.24: Παράθυρο “Global Forces Viewer” του λογισμικού

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Παρουσίαση προσομοιώσεων

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις περιπτώσεις του Πίνακα 4.1, ώστε να αναδειχθεί η λειτουργικότητα του μοντέλου για διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας οδοντωτών τροχών και συνθηκών κοπής.

	Cases	m [mm]	α_n [deg]	z_1/z_2	β_2 [deg]	b [deg]	s [mm/D S]	T [mm]	γ [deg]
SP - EX	Case 1	3.629	22.5	32/50	0	30	0.92	7.9	0
	Case 2	3.629	22.5	32/50	0	30	0.58	7.9	0
	Case 3	3.629	22.5	32/50	0	30	0.3	7.9	0
	Case 4	3	20	42/63	0	30	0.92	3.75	0
	Case 5	3	20	42/63	0	30	0.92	5.25	0
	Case 6	3	20	42/63	0	30	0.92	6.75	0
	Case 7	3.629	22.5	32/50	0	30	0.92	7.9	4
	Case 8	3.629	22.5	32/50	0	30	0.92	7.9	8
	Case 9	3.629	22.5	32/50	0	30	0.92	7.9	12
SP - IN	Case 1	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.92	7.9	0
	Case 2	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.58	7.9	0
	Case 3	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.3	7.9	0
	Case 4	3	20	42/-63	0	30	0.92	3.75	0
	Case 5	3	20	42/-63	0	30	0.92	5.25	0
	Case 6	3	20	42/-63	0	30	0.92	6.75	0
	Case 7	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.92	7.9	4
	Case 8	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.92	7.9	8
	Case 9	3.629	22.5	32/-50	0	30	0.92	7.9	12
HL - EX	Case 1	3.629	22.5	32/50	30	30	0.92	7.9	0
	Case 2	3.629	22.5	32/50	30	30	0.58	7.9	0
	Case 3	3.629	22.5	32/50	30	30	0.3	7.9	0
	Case 4	3	20	42/63	30	30	0.92	3.75	0
	Case 5	3	20	42/63	30	30	0.92	5.25	0
	Case 6	3	20	42/63	30	30	0.92	6.75	0
	Case 7	3.629	22.5	32/50	15	30	0.92	7.9	0
	Case 8	3.629	22.5	32/50	20	30	0.92	7.9	0
	Case 9	3.629	22.5	32/50	40	30	0.92	7.9	0
HL - IN	Case 1	3.629	22.5	32/-50	30	30	0.92	7.9	0
	Case 2	3.629	22.5	32/-50	30	30	0.58	7.9	0
	Case 3	3.629	22.5	32/-50	30	30	0.3	7.9	0
	Case 4	3	20	42/-63	30	30	0.92	3.75	0
	Case 5	3	20	42/-63	30	30	0.92	5	0
	Case 6	3	20	42/-63	30	30	0.92	6.75	0
	Case 7	3.629	22.5	32/-50	15	30	0.92	7.9	0
	Case 8	3.629	22.5	32/-50	20	30	0.92	7.9	0
	Case 9	3.629	22.5	32/-50	40	30	0.92	7.9	0

Πίνακας 4.1: Εξεταζόμενες περιπτώσεις

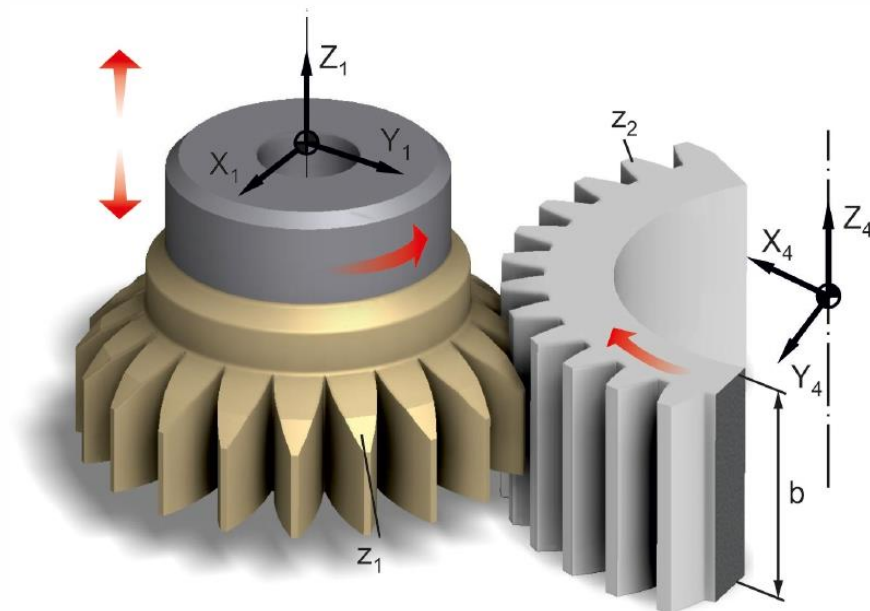
Για την πρώτη περίπτωση ευθείας εξωτερικής οδόντωσης δίνεται ολόκληρη η αναφορά (report) που μπορεί να εξάγει ο χρήστης από το λογισμικό. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις δίνονται μόνο οι τομές των αποβλίπτων για 20 θέσεις κύλισης, τα αντίστοιχα διαγράμματα

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

πάχους τους και οι δυνάμεις κοπής για μία κοπτική ακμή και όταν το εργαλείο βρίσκεται σε εμπλοκή. Στην πλάγια οδόντωση τα απόβλιττα μελετώνται σε τρία επίπεδα, με το μεσαίο να βρίσκεται στη μέση του μήκους του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μεσαίου επιπέδου μόνο, με εξαίρεση την πρώτη, όπου παρουσιάζονται και για τα τρία.

Σημειώνεται ότι τα Cases 4, 5, 6, για κάθε τύπο οδοντωτού τροχού (HL-EX, HL-IN κτλ.), αποτελούν μία περίπτωση κατεργασίας οδοντωτού τροχού, που εκτελείται σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής. Εξετάζεται επομένως και στα τρία αυτά στάδια. Τέλος για την EX-SP Case 1 έχουμε **AV=8mm** ενώ για τις υπόλοιπες **AV=0mm**.

Gear Shaping Simulation



CASE DATA

Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

EX – SP Case 1

TOOL PROFILE POINTS

#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]
1	-3.784	53.51	35	-3.084	57.298	69	-1.607	60.867	103	1.022	61.972
2	-3.787	53.624	36	-3.049	57.406	70	-1.556	60.968	104	1.077	61.873
3	-3.786	53.738	37	-3.014	57.514	71	-1.504	61.07	105	1.132	61.773
4	-3.783	53.852	38	-2.978	57.622	72	-1.452	61.171	106	1.187	61.673
5	-3.777	53.965	39	-2.941	57.729	73	-1.4	61.272	107	1.241	61.573
6	-3.769	54.079	40	-2.904	57.837	74	-1.347	61.372	108	1.295	61.473
7	-3.76	54.192	41	-2.866	57.944	75	-1.294	61.473	109	1.348	61.373
8	-3.749	54.305	42	-2.827	58.051	76	-1.24	61.573	110	1.401	61.272
9	-3.737	54.418	43	-2.788	58.158	77	-1.186	61.673	111	1.453	61.171
10	-3.723	54.531	44	-2.749	58.264	78	-1.132	61.773	112	1.505	61.07
11	-3.708	54.644	45	-2.709	58.371	79	-1.077	61.873	113	1.557	60.969
12	-3.693	54.757	46	-2.668	58.477	80	-1.022	61.972	114	1.609	60.867
13	-3.676	54.869	47	-2.627	58.583	81	-0.966	62.072	115	1.659	60.766
14	-3.658	54.981	48	-2.585	58.689	82	-0.91	62.171	116	1.71	60.664
15	-3.638	55.093	49	-2.543	58.795	83	-0.853	62.269	117	1.76	60.562
16	-3.618	55.205	50	-2.501	58.9	84	-0.784	62.359	118	1.81	60.459
17	-3.597	55.317	51	-2.458	59.005	85	-0.702	62.437	119	1.859	60.357
18	-3.575	55.429	52	-2.414	59.11	86	-0.608	62.502	120	1.908	60.254
19	-3.553	55.54	53	-2.37	59.215	87	-0.506	62.551	121	1.956	60.151
20	-3.529	55.651	54	-2.326	59.32	88	-0.397	62.584	122	2.004	60.048
21	-3.505	55.762	55	-2.281	59.425	89	-0.284	62.599	123	2.052	59.945
22	-3.479	55.873	56	-2.235	59.529	90	-0.17	62.6	124	2.099	59.841
23	-3.453	55.984	57	-2.19	59.633	91	-0.057	62.6	125	2.146	59.738
24	-3.426	56.095	58	-2.143	59.737	92	0.057	62.6	126	2.192	59.634
25	-3.399	56.205	59	-2.097	59.84	93	0.171	62.6	127	2.238	59.53
26	-3.37	56.315	60	-2.05	59.944	94	0.284	62.599	128	2.283	59.425
27	-3.341	56.425	61	-2.002	60.047	95	0.397	62.583	129	2.328	59.321
28	-3.312	56.535	62	-1.954	60.15	96	0.506	62.551	130	2.373	59.216
29	-3.281	56.644	63	-1.906	60.253	97	0.608	62.502	131	2.416	59.111
30	-3.25	56.754	64	-1.857	60.356	98	0.702	62.437	132	2.46	59.006
31	-3.218	56.863	65	-1.808	60.459	99	0.784	62.359	133	2.503	58.901
32	-3.186	56.972	66	-1.758	60.561	100	0.853	62.269	134	2.545	58.795
33	-3.153	57.081	67	-1.708	60.663	101	0.91	62.17	135	2.587	58.69
34	-3.119	57.189	68	-1.658	60.765	102	0.966	62.071	136	2.629	58.584

EX – SP Case 1

137	2.67	58.478	149	3.119	57.189	161	3.479	55.873	172	3.709	54.644
138	2.71	58.371	150	3.153	57.081	162	3.505	55.762	173	3.723	54.531
139	2.75	58.265	151	3.186	56.972	163	3.529	55.651	174	3.737	54.418
140	2.79	58.158	152	3.218	56.863	164	3.553	55.54	175	3.749	54.305
141	2.829	58.051	153	3.25	56.754	165	3.576	55.429	176	3.76	54.192
142	2.867	57.944	154	3.281	56.644	166	3.597	55.317	177	3.769	54.079
143	2.905	57.837	155	3.312	56.535	167	3.618	55.205	178	3.777	53.965
144	2.942	57.73	156	3.341	56.425	168	3.639	55.093	179	3.783	53.852
145	2.979	57.622	157	3.37	56.315	169	3.658	54.981	180	3.786	53.738
146	3.015	57.514	158	3.399	56.205	170	3.676	54.869	181	3.787	53.624
147	3.05	57.406	159	3.426	56.094	171	3.693	54.757	182	3.784	53.51
148	3.085	57.298	160	3.453	55.984						

EX – SP Case 1

GAP PROFILE POINTS

#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]	#	X [mm]	Y [mm]
1	-4.933	86.315	35	-4.335	86.349	69	-4.104	86.408	103	-3.893	86.514
2	-4.923	86.315	36	-5.197	86.349	70	-5.369	86.412	104	-5.566	86.519
3	-4.942	86.315	37	-4.325	86.351	71	-4.091	86.413	105	-3.882	86.521
4	-4.914	86.315	38	-4.316	86.352	72	-5.381	86.417	106	-5.576	86.527
5	-4.952	86.315	39	-5.211	86.353	73	-4.078	86.418	107	-3.871	86.527
6	-4.904	86.315	40	-4.306	86.354	74	-5.393	86.421	108	-3.860	86.535
7	-4.962	86.315	41	-4.297	86.356	75	-4.065	86.424	109	-5.586	86.536
8	-4.894	86.316	42	-5.224	86.356	76	-5.406	86.426	110	-5.597	86.542
9	-4.971	86.316	43	-4.287	86.358	77	-4.052	86.429	111	-3.849	86.542
10	-4.981	86.316	44	-4.278	86.360	78	-5.418	86.432	112	-5.608	86.548
11	-4.990	86.317	45	-5.238	86.360	79	-4.039	86.435	113	-3.838	86.549
12	-5.000	86.318	46	-4.269	86.362	80	-5.430	86.437	114	-5.618	86.555
13	-5.009	86.319	47	-5.252	86.365	81	-4.026	86.441	115	-3.827	86.557
14	-5.019	86.320	48	-4.259	86.365	82	-5.442	86.443	116	-5.629	86.562
15	-5.028	86.321	49	-4.250	86.367	83	-4.013	86.448	117	-3.816	86.565
16	-5.038	86.323	50	-5.265	86.369	84	-5.454	86.449	118	-5.639	86.569
17	-5.047	86.324	51	-4.241	86.370	85	-4.001	86.454	119	-3.806	86.573
18	-5.057	86.326	52	-4.232	86.373	86	-5.465	86.455	120	-5.649	86.576
19	-5.066	86.328	53	-5.278	86.374	87	-5.477	86.461	121	-3.796	86.581
20	-5.076	86.329	54	-4.223	86.375	88	-3.988	86.461	122	-5.659	86.584
21	-5.085	86.331	55	-4.213	86.378	89	-5.489	86.468	123	-3.785	86.590
22	-5.099	86.333	56	-5.292	86.379	90	-3.976	86.468	124	-5.669	86.591
23	-5.113	86.334	57	-4.200	86.381	91	-5.500	86.474	125	-3.776	86.599
24	-5.127	86.336	58	-5.305	86.384	92	-3.964	86.476	126	-5.679	86.599
25	-5.141	86.338	59	-4.186	86.384	93	-5.511	86.481	127	-5.688	86.607
26	-5.155	86.340	60	-4.172	86.387	94	-3.952	86.483	128	-3.766	86.607
27	-4.392	86.343	61	-5.318	86.390	95	-5.522	86.489	129	-5.698	86.615
28	-5.169	86.343	62	-4.158	86.391	96	-3.940	86.489	130	-3.756	86.617
29	-4.382	86.344	63	-4.145	86.395	97	-3.928	86.495	131	-5.707	86.623
30	-4.373	86.344	64	-5.331	86.395	98	-5.533	86.496	132	-3.746	86.626
31	-4.363	86.345	65	-4.131	86.399	99	-3.917	86.501	133	-5.716	86.632
32	-5.183	86.346	66	-5.344	86.402	100	-5.544	86.503	134	-3.737	86.635
33	-4.354	86.347	67	-4.118	86.403	101	-3.905	86.507	135	-5.725	86.640
34	-4.344	86.348	68	-5.356	86.408	102	-5.555	86.511	136	-3.727	86.643

EX – SP Case 1

137	-5.734	86.649	173	-5.886	86.807	209	-3.438	86.989	245	-3.338	87.162
138	-3.717	86.650	174	-3.565	86.814	210	-6.028	86.996	246	-6.131	87.167
139	-5.743	86.658	175	-5.893	86.816	211	-3.433	87.000	247	-3.334	87.172
140	-3.708	86.658	176	-3.557	86.823	212	-6.034	87.007	248	-6.136	87.175
141	-3.698	86.666	177	-5.901	86.826	213	-3.428	87.011	249	-3.330	87.181
142	-5.751	86.667	178	-3.549	86.831	214	-6.039	87.016	250	-6.140	87.183
143	-3.689	86.674	179	-5.908	86.835	215	-3.419	87.022	251	-3.327	87.190
144	-5.760	86.676	180	-3.541	86.840	216	-6.045	87.026	252	-6.144	87.191
145	-3.679	86.682	181	-5.915	86.845	217	-3.411	87.033	253	-3.323	87.199
146	-5.768	86.685	182	-3.533	86.849	218	-6.050	87.035	254	-6.149	87.200
147	-3.670	86.691	183	-5.921	86.855	219	-6.054	87.043	255	-3.320	87.207
148	-5.776	86.695	184	-3.525	86.859	220	-3.403	87.045	256	-6.154	87.211
149	-3.661	86.699	185	-5.928	86.865	221	-6.058	87.051	257	-3.317	87.215
150	-5.786	86.703	186	-3.517	86.868	222	-3.395	87.056	258	-3.315	87.223
151	-3.652	86.708	187	-5.934	86.876	223	-6.062	87.059	259	-6.163	87.230
152	-5.795	86.710	188	-3.510	86.877	224	-6.066	87.067	260	-3.310	87.231
153	-3.644	86.717	189	-5.944	86.886	225	-3.388	87.068	261	-3.305	87.239
154	-5.804	86.719	190	-3.502	86.887	226	-6.070	87.075	262	-3.300	87.247
155	-3.635	86.726	191	-5.953	86.896	227	-3.380	87.080	263	-3.296	87.255
156	-5.813	86.727	192	-3.495	86.897	228	-6.075	87.082	264	-6.176	87.261
157	-5.821	86.735	193	-3.488	86.907	229	-6.081	87.090	265	-3.291	87.263
158	-3.627	86.735	194	-5.963	86.907	230	-3.373	87.092	266	-3.287	87.272
159	-5.830	86.743	195	-3.481	86.917	231	-6.086	87.097	267	-3.283	87.280
160	-3.618	86.745	196	-5.972	86.918	232	-6.092	87.105	268	-3.279	87.288
161	-5.838	86.752	197	-3.475	86.927	233	-3.366	87.105	269	-3.275	87.297
162	-3.610	86.754	198	-5.980	86.929	234	-6.097	87.112	270	-3.271	87.305
163	-5.847	86.761	199	-3.468	86.937	235	-3.360	87.117	271	-6.197	87.307
164	-3.602	86.764	200	-5.989	86.940	236	-6.102	87.120	272	-3.267	87.313
165	-5.855	86.770	201	-3.462	86.947	237	-6.107	87.127	273	-6.204	87.319
166	-3.595	86.774	202	-5.997	86.951	238	-3.354	87.129	274	-3.263	87.322
167	-5.863	86.779	203	-3.456	86.957	239	-6.112	87.135	275	-3.259	87.331
168	-3.587	86.784	204	-6.005	86.963	240	-3.348	87.141	276	-6.211	87.331
169	-5.871	86.788	205	-3.450	86.968	241	-6.117	87.143	277	-3.256	87.339
170	-3.580	86.794	206	-6.013	86.974	242	-6.122	87.151	278	-6.218	87.343
171	-5.878	86.797	207	-3.444	86.978	243	-3.343	87.152	279	-3.253	87.348
172	-3.573	86.804	208	-6.021	86.986	244	-6.127	87.159	280	-6.225	87.357

EX – SP Case 1

281	-3.249	87.357	317	-6.429	87.851	353	-6.548	88.140	389	-6.648	88.378
282	-3.245	87.369	318	-3.088	87.864	354	-3.008	88.143	390	-2.935	88.390
283	-6.233	87.371	319	-6.434	87.864	355	-6.553	88.153	391	-6.654	88.391
284	-6.241	87.387	320	-6.440	87.878	356	-3.004	88.157	392	-2.931	88.404
285	-3.238	87.389	321	-6.445	87.891	357	-6.559	88.166	393	-6.660	88.404
286	-6.249	87.405	322	-3.078	87.900	358	-3.000	88.170	394	-6.665	88.418
287	-3.228	87.420	323	-6.451	87.904	359	-6.565	88.180	395	-2.927	88.418
288	-6.257	87.426	324	-6.456	87.917	360	-2.996	88.184	396	-6.671	88.431
289	-6.267	87.449	325	-6.462	87.930	361	-6.570	88.193	397	-2.922	88.432
290	-3.213	87.468	326	-3.068	87.936	362	-2.992	88.197	398	-6.677	88.445
291	-6.278	87.475	327	-6.467	87.943	363	-6.576	88.206	399	-2.918	88.445
292	-3.206	87.482	328	-6.472	87.956	364	-2.988	88.211	400	-6.683	88.458
293	-3.200	87.496	329	-6.478	87.969	365	-6.581	88.219	401	-2.914	88.459
294	-6.290	87.504	330	-3.058	87.971	366	-2.984	88.225	402	-6.689	88.471
295	-3.194	87.510	331	-6.483	87.982	367	-6.587	88.232	403	-2.910	88.473
296	-3.188	87.526	332	-6.488	87.996	368	-2.980	88.238	404	-6.695	88.485
297	-6.303	87.537	333	-3.048	88.007	369	-6.592	88.245	405	-2.906	88.487
298	-3.182	87.542	334	-6.494	88.009	370	-2.977	88.252	406	-6.700	88.498
299	-3.175	87.560	335	-3.044	88.020	371	-6.598	88.259	407	-2.902	88.501
300	-6.318	87.574	336	-6.499	88.022	372	-2.973	88.266	408	-6.706	88.512
301	-3.169	87.580	337	-3.040	88.034	373	-6.603	88.272	409	-2.898	88.515
302	-3.163	87.602	338	-6.504	88.035	374	-2.969	88.279	410	-6.712	88.525
303	-6.333	87.612	339	-3.036	88.048	375	-6.609	88.285	411	-2.893	88.529
304	-3.155	87.627	340	-6.510	88.048	376	-2.965	88.293	412	-6.718	88.538
305	-6.349	87.650	341	-6.515	88.061	377	-6.614	88.298	413	-2.889	88.543
306	-3.147	87.655	342	-3.032	88.061	378	-2.960	88.307	414	-6.724	88.552
307	-3.138	87.687	343	-6.520	88.074	379	-6.620	88.311	415	-2.885	88.556
308	-6.364	87.687	344	-3.028	88.075	380	-2.956	88.321	416	-6.729	88.565
309	-3.128	87.722	345	-6.526	88.087	381	-6.626	88.325	417	-2.881	88.571
310	-6.379	87.725	346	-3.024	88.088	382	-2.952	88.335	418	-6.735	88.579
311	-3.118	87.758	347	-6.531	88.101	383	-6.631	88.338	419	-2.876	88.585
312	-6.394	87.763	348	-3.020	88.102	384	-2.948	88.348	420	-6.741	88.592
313	-3.108	87.793	349	-6.537	88.114	385	-6.637	88.351	421	-2.872	88.599
314	-6.409	87.800	350	-3.016	88.116	386	-2.943	88.362	422	-6.747	88.606
315	-3.098	87.829	351	-6.542	88.127	387	-6.642	88.364	423	-2.867	88.613
316	-6.424	87.838	352	-3.012	88.129	388	-2.939	88.376	424	-6.753	88.619

EX – SP Case 1

425	-2.863	88.627	461	-6.869	88.880	497	-6.985	89.133	533	-2.614	89.396
426	-6.758	88.633	462	-2.783	88.883	498	-2.698	89.144	534	-7.113	89.406
427	-2.858	88.641	463	-6.875	88.894	499	-6.991	89.147	535	-2.609	89.411
428	-6.764	88.646	464	-2.778	88.897	500	-2.693	89.158	536	-7.120	89.421
429	-2.854	88.655	465	-6.881	88.907	501	-6.997	89.161	537	-2.604	89.425
430	-6.771	88.660	466	-2.773	88.912	502	-2.688	89.173	538	-7.126	89.435
431	-2.850	88.669	467	-6.887	88.921	503	-7.004	89.175	539	-2.599	89.441
432	-6.777	88.674	468	-2.769	88.926	504	-2.683	89.188	540	-7.133	89.450
433	-2.845	88.684	469	-6.894	88.936	505	-7.010	89.190	541	-2.594	89.456
434	-6.783	88.687	470	-2.764	88.941	506	-2.678	89.203	542	-7.140	89.464
435	-2.841	88.698	471	-6.900	88.950	507	-7.017	89.204	543	-2.588	89.471
436	-6.789	88.701	472	-2.759	88.955	508	-2.673	89.218	544	-7.147	89.479
437	-2.836	88.712	473	-6.907	88.964	509	-7.024	89.218	545	-2.583	89.486
438	-6.795	88.715	474	-2.754	88.969	510	-2.668	89.233	546	-7.154	89.494
439	-2.832	88.726	475	-6.913	88.978	511	-7.031	89.233	547	-2.578	89.501
440	-6.801	88.729	476	-2.750	88.984	512	-7.038	89.247	548	-7.161	89.509
441	-2.828	88.740	477	-6.920	88.992	513	-2.663	89.247	549	-2.572	89.516
442	-6.808	88.742	478	-2.745	88.998	514	-7.045	89.262	550	-7.168	89.523
443	-2.823	88.754	479	-6.926	89.006	515	-2.658	89.262	551	-2.567	89.532
444	-6.814	88.756	480	-2.740	89.013	516	-7.051	89.276	552	-7.176	89.538
445	-2.819	88.769	481	-6.933	89.020	517	-2.653	89.277	553	-2.562	89.547
446	-6.820	88.770	482	-2.736	89.027	518	-7.058	89.291	554	-7.183	89.553
447	-2.814	88.783	483	-6.939	89.034	519	-2.648	89.292	555	-2.556	89.562
448	-6.826	88.784	484	-2.731	89.042	520	-7.065	89.305	556	-7.190	89.568
449	-2.810	88.797	485	-6.946	89.048	521	-2.643	89.307	557	-2.551	89.577
450	-6.832	88.797	486	-2.726	89.056	522	-7.072	89.320	558	-7.197	89.583
451	-2.806	88.811	487	-6.952	89.062	523	-2.639	89.321	559	-2.546	89.592
452	-6.838	88.811	488	-2.722	89.071	524	-7.079	89.334	560	-7.205	89.597
453	-6.844	88.825	489	-6.959	89.077	525	-2.634	89.336	561	-2.541	89.607
454	-2.801	88.825	490	-2.717	89.085	526	-7.086	89.348	562	-7.212	89.612
455	-6.850	88.839	491	-6.965	89.091	527	-2.629	89.351	563	-2.536	89.623
456	-2.797	88.839	492	-2.713	89.100	528	-7.092	89.363	564	-7.219	89.627
457	-6.857	88.852	493	-6.972	89.105	529	-2.624	89.366	565	-2.530	89.638
458	-2.792	88.854	494	-2.708	89.114	530	-7.099	89.377	566	-7.226	89.642
459	-6.863	88.866	495	-6.978	89.119	531	-2.619	89.381	567	-2.525	89.653
460	-2.787	88.868	496	-2.703	89.129	532	-7.106	89.392	568	-7.233	89.657

EX – SP Case 1

569	-2.520	89.668	605	-7.374	89.942	641	-7.513	90.218	677	-2.215	90.504
570	-7.241	89.672	606	-2.421	89.947	642	-2.317	90.230	678	-7.666	90.515
571	-2.515	89.683	607	-7.381	89.957	643	-7.521	90.234	679	-2.209	90.520
572	-7.248	89.686	608	-2.416	89.962	644	-2.311	90.246	680	-7.675	90.531
573	-2.510	89.699	609	-7.389	89.973	645	-7.529	90.249	681	-2.202	90.536
574	-7.255	89.701	610	-2.410	89.978	646	-2.306	90.262	682	-7.683	90.547
575	-2.504	89.714	611	-7.397	89.988	647	-7.537	90.265	683	-2.196	90.552
576	-7.262	89.716	612	-2.405	89.993	648	-2.300	90.278	684	-7.691	90.563
577	-2.499	89.729	613	-7.404	90.003	649	-7.545	90.280	685	-2.190	90.569
578	-7.269	89.731	614	-2.399	90.009	650	-2.294	90.294	686	-7.699	90.579
579	-2.494	89.745	615	-7.411	90.018	651	-7.553	90.296	687	-2.184	90.585
580	-7.276	89.746	616	-2.394	90.024	652	-2.288	90.310	688	-7.708	90.594
581	-2.488	89.760	617	-7.419	90.033	653	-7.560	90.311	689	-2.178	90.601
582	-7.283	89.761	618	-2.388	90.040	654	-2.282	90.326	690	-7.716	90.610
583	-7.290	89.776	619	-7.426	90.049	655	-7.568	90.327	691	-2.172	90.617
584	-2.482	89.776	620	-2.382	90.056	656	-2.277	90.342	692	-7.724	90.626
585	-7.298	89.791	621	-7.434	90.064	657	-7.576	90.342	693	-2.166	90.634
586	-2.477	89.791	622	-2.376	90.072	658	-2.271	90.358	694	-7.732	90.642
587	-7.306	89.806	623	-7.441	90.079	659	-7.584	90.358	695	-2.160	90.650
588	-2.471	89.807	624	-2.370	90.087	660	-7.592	90.374	696	-7.741	90.658
589	-7.313	89.821	625	-7.449	90.095	661	-2.265	90.374	697	-2.154	90.666
590	-2.465	89.822	626	-2.364	90.103	662	-7.600	90.389	698	-7.749	90.674
591	-7.321	89.836	627	-7.457	90.110	663	-2.258	90.390	699	-2.148	90.682
592	-2.460	89.838	628	-2.358	90.119	664	-7.608	90.405	700	-7.757	90.689
593	-7.329	89.851	629	-7.465	90.125	665	-2.252	90.406	701	-2.141	90.699
594	-2.454	89.853	630	-2.353	90.135	666	-7.616	90.421	702	-7.765	90.705
595	-7.336	89.866	631	-7.473	90.141	667	-2.246	90.423	703	-2.134	90.715
596	-2.449	89.869	632	-2.347	90.151	668	-7.625	90.436	704	-7.774	90.721
597	-7.344	89.882	633	-7.481	90.156	669	-2.240	90.439	705	-2.128	90.732
598	-2.443	89.884	634	-2.341	90.167	670	-7.633	90.452	706	-7.783	90.737
599	-7.351	89.897	635	-7.489	90.172	671	-2.233	90.455	707	-2.121	90.749
600	-2.438	89.900	636	-2.335	90.183	672	-7.641	90.468	708	-7.791	90.753
601	-7.359	89.912	637	-7.497	90.187	673	-2.227	90.471	709	-2.115	90.765
602	-2.432	89.915	638	-2.329	90.199	674	-7.650	90.484	710	-7.800	90.769
603	-7.366	89.927	639	-7.505	90.203	675	-2.221	90.487	711	-2.108	90.782
604	-2.427	89.931	640	-2.323	90.215	676	-7.658	90.499	712	-7.809	90.786

EX – SP Case 1

713	-2.101	90.798	749	-7.974	91.093	785	-8.137	91.388	821	-1.738	91.696
714	-7.817	90.802	750	-1.983	91.098	786	-1.859	91.403	822	-8.315	91.705
715	-2.095	90.815	751	-7.983	91.109	787	-8.146	91.405	823	-1.731	91.714
716	-7.826	90.818	752	-1.976	91.115	788	-1.852	91.421	824	-8.325	91.721
717	-2.088	90.831	753	-7.992	91.125	789	-8.156	91.421	825	-1.723	91.731
718	-7.835	90.834	754	-1.969	91.132	790	-1.845	91.438	826	-8.334	91.738
719	-2.082	90.848	755	-8.001	91.142	791	-8.165	91.438	827	-1.715	91.749
720	-7.843	90.850	756	-1.962	91.149	792	-8.174	91.454	828	-8.344	91.755
721	-2.075	90.864	757	-8.010	91.158	793	-1.838	91.455	829	-1.708	91.766
722	-7.852	90.866	758	-1.956	91.166	794	-8.184	91.471	830	-8.354	91.772
723	-2.069	90.881	759	-8.019	91.174	795	-1.831	91.472	831	-1.700	91.784
724	-7.861	90.882	760	-1.949	91.183	796	-8.193	91.488	832	-8.364	91.789
725	-2.063	90.898	761	-8.028	91.191	797	-1.823	91.489	833	-1.692	91.801
726	-7.869	90.898	762	-1.942	91.199	798	-8.203	91.504	834	-8.374	91.806
727	-2.056	90.914	763	-8.037	91.207	799	-1.816	91.507	835	-1.685	91.819
728	-7.878	90.914	764	-1.935	91.216	800	-8.212	91.521	836	-8.383	91.823
729	-7.887	90.930	765	-8.046	91.223	801	-1.809	91.524	837	-1.677	91.836
730	-2.050	90.931	766	-1.928	91.233	802	-8.221	91.537	838	-8.393	91.839
731	-7.895	90.947	767	-8.055	91.240	803	-1.802	91.541	839	-1.670	91.854
732	-2.043	90.947	768	-1.922	91.250	804	-8.231	91.554	840	-8.403	91.856
733	-7.904	90.963	769	-8.064	91.256	805	-1.795	91.558	841	-1.662	91.872
734	-2.037	90.964	770	-1.915	91.267	806	-8.240	91.571	842	-8.413	91.873
735	-7.912	90.979	771	-8.073	91.273	807	-1.788	91.575	843	-1.655	91.889
736	-2.030	90.981	772	-1.908	91.284	808	-8.249	91.587	844	-8.422	91.890
737	-7.921	90.995	773	-8.082	91.289	809	-1.780	91.593	845	-1.647	91.907
738	-2.024	90.997	774	-1.901	91.301	810	-8.259	91.604	846	-8.432	91.907
739	-7.929	91.011	775	-8.091	91.306	811	-1.773	91.610	847	-8.442	91.924
740	-2.018	91.014	776	-1.895	91.318	812	-8.268	91.621	848	-1.640	91.924
741	-7.938	91.027	777	-8.100	91.322	813	-1.766	91.627	849	-8.451	91.941
742	-2.011	91.031	778	-1.888	91.335	814	-8.277	91.638	850	-1.632	91.942
743	-7.947	91.044	779	-8.109	91.338	815	-1.759	91.645	851	-8.461	91.958
744	-2.004	91.048	780	-1.881	91.352	816	-8.286	91.654	852	-1.625	91.959
745	-7.956	91.060	781	-8.118	91.355	817	-1.752	91.662	853	-8.471	91.975
746	-1.997	91.064	782	-1.874	91.369	818	-8.296	91.671	854	-1.618	91.977
747	-7.965	91.076	783	-8.127	91.371	819	-1.745	91.679	855	-8.480	91.992
748	-1.990	91.081	784	-1.867	91.386	820	-8.305	91.688	856	-1.610	91.995

EX – SP Case 1

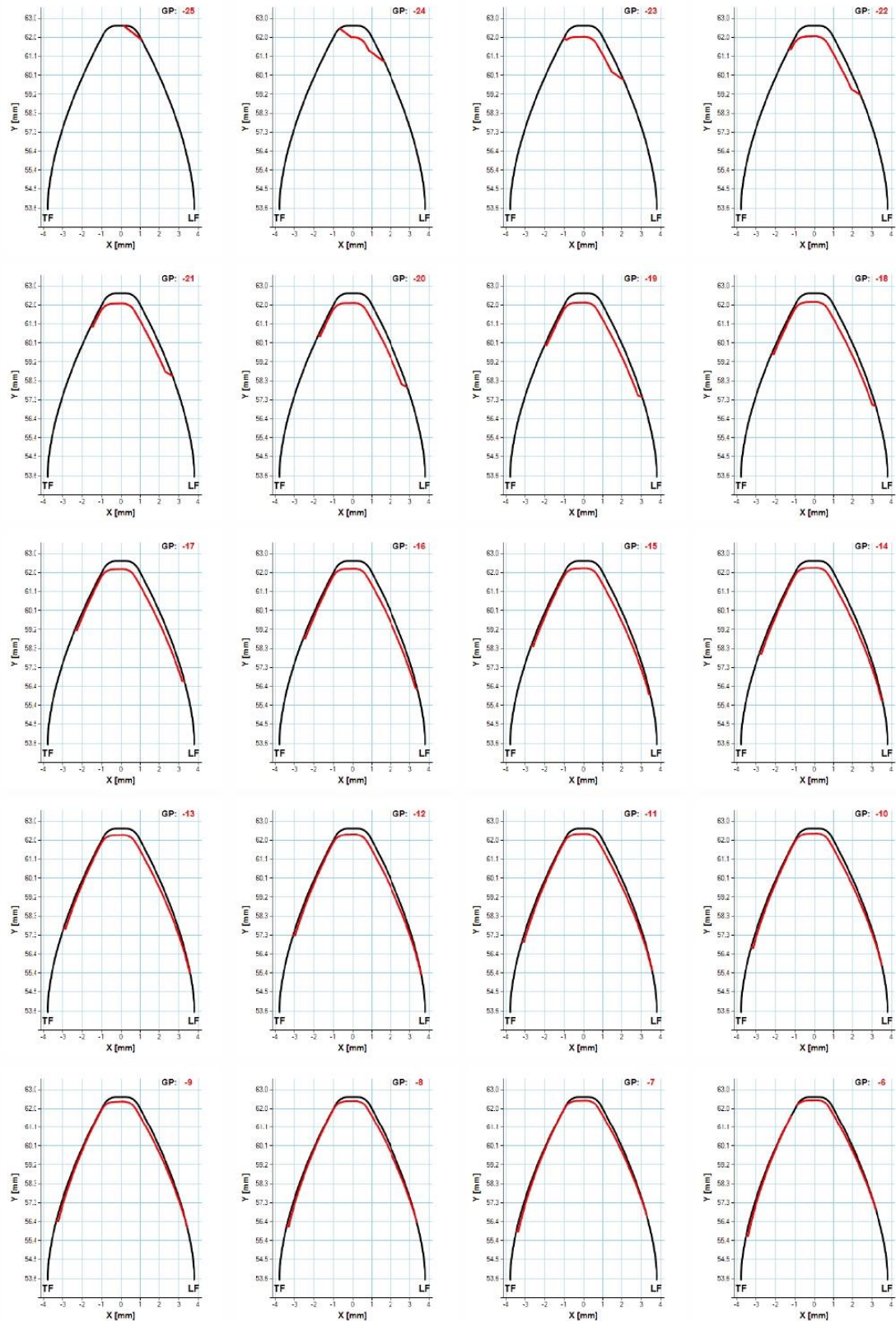
857	-8.490	92.009	893	-8.672	92.317	929	-1.323	92.641	965	-9.065	92.965
858	-1.603	92.012	894	-1.462	92.333	930	-8.870	92.648	966	-1.171	92.972
859	-8.499	92.026	895	-8.682	92.335	931	-1.315	92.659	967	-9.076	92.983
860	-1.596	92.030	896	-1.454	92.351	932	-8.880	92.665	968	-1.163	92.991
861	-8.510	92.043	897	-8.691	92.352	933	-1.307	92.678	969	-9.086	93.001
862	-1.588	92.048	898	-1.446	92.369	934	-8.891	92.683	970	-1.154	93.009
863	-8.520	92.060	899	-8.701	92.369	935	-1.299	92.696	971	-9.097	93.019
864	-1.580	92.065	900	-8.712	92.387	936	-8.901	92.700	972	-1.146	93.028
865	-8.530	92.077	901	-1.439	92.387	937	-1.291	92.714	973	-9.108	93.036
866	-1.572	92.083	902	-8.723	92.404	938	-8.911	92.718	974	-1.137	93.046
867	-8.540	92.094	903	-1.431	92.405	939	-1.283	92.732	975	-9.119	93.054
868	-1.564	92.101	904	-8.733	92.421	940	-8.922	92.736	976	-1.129	93.065
869	-8.551	92.111	905	-1.423	92.423	941	-1.275	92.751	977	-9.129	93.072
870	-1.556	92.119	906	-8.744	92.439	942	-8.934	92.753	978	-1.120	93.083
871	-8.561	92.128	907	-1.414	92.441	943	-1.267	92.769	979	-9.141	93.090
872	-1.548	92.137	908	-8.755	92.456	944	-8.945	92.771	980	-1.112	93.102
873	-8.571	92.146	909	-1.406	92.459	945	-1.258	92.787	981	-9.152	93.108
874	-1.540	92.155	910	-8.765	92.473	946	-8.956	92.788	982	-1.104	93.120
875	-8.581	92.163	911	-1.398	92.478	947	-1.249	92.806	983	-9.164	93.126
876	-1.532	92.172	912	-8.776	92.491	948	-8.967	92.806	984	-1.095	93.139
877	-8.591	92.180	913	-1.389	92.496	949	-8.978	92.824	985	-9.175	93.144
878	-1.524	92.190	914	-8.786	92.508	950	-1.240	92.824	986	-1.086	93.158
879	-8.601	92.197	915	-1.381	92.514	951	-8.989	92.841	987	-9.187	93.161
880	-1.517	92.208	916	-8.797	92.526	952	-1.232	92.843	988	-1.077	93.176
881	-8.611	92.214	917	-1.373	92.532	953	-9.000	92.859	989	-9.198	93.179
882	-1.509	92.226	918	-8.807	92.543	954	-1.223	92.861	990	-1.068	93.195
883	-8.621	92.231	919	-1.364	92.550	955	-9.011	92.877	991	-9.210	93.197
884	-1.501	92.244	920	-8.818	92.560	956	-1.214	92.880	992	-1.059	93.214
885	-8.632	92.249	921	-1.356	92.568	957	-9.021	92.894	993	-9.221	93.215
886	-1.493	92.262	922	-8.828	92.578	958	-1.206	92.898	994	-1.050	93.233
887	-8.642	92.266	923	-1.348	92.587	959	-9.032	92.912	995	-9.232	93.233
888	-1.485	92.280	924	-8.839	92.595	960	-1.197	92.917	996	-9.244	93.251
889	-8.652	92.283	925	-1.340	92.605	961	-9.043	92.930	997	-1.040	93.251
890	-1.477	92.298	926	-8.849	92.613	962	-1.188	92.935	998	-9.255	93.269
891	-8.662	92.300	927	-1.332	92.623	963	-9.054	92.948	999	-1.031	93.270
892	-1.470	92.316	928	-8.860	92.630	964	-1.180	92.953	1000	-9.266	93.287

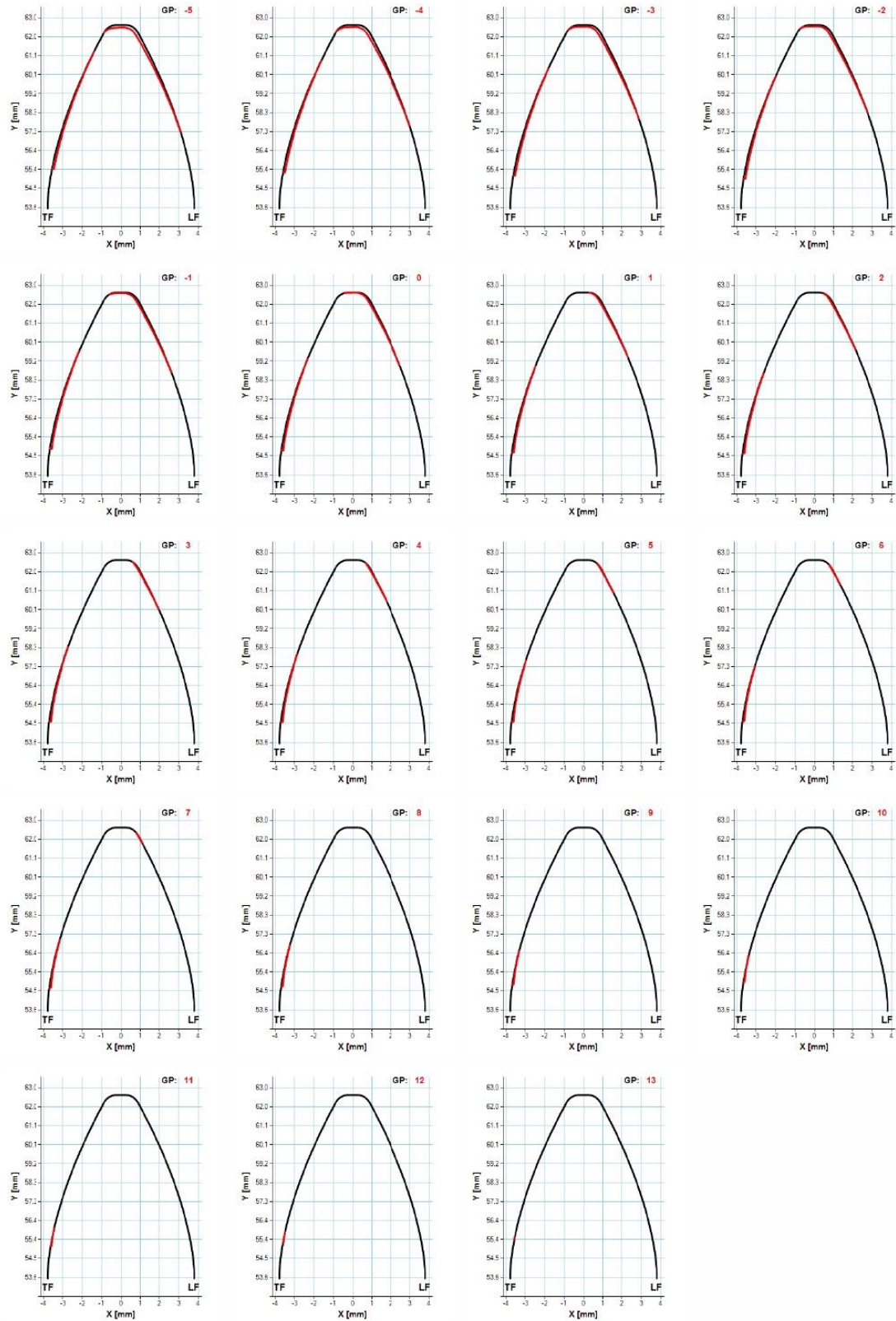
EX – SP Case 1

1001	-1.022	93.289	1031	-0.888	93.572	1061	-9.601	93.812	1091	-0.622	94.109
1002	-9.278	93.305	1032	-9.451	93.577	1062	-9.604	93.815	1092	-0.612	94.128
1003	-1.013	93.308	1033	-0.878	93.591	1063	-9.606	93.819	1093	-0.602	94.148
1004	-9.289	93.323	1034	-9.463	93.595	1064	-0.766	93.820	1094	-0.593	94.167
1005	-1.004	93.326	1035	-0.869	93.610	1065	-9.608	93.822	1095	-0.583	94.186
1006	-9.300	93.341	1036	-9.474	93.613	1066	-9.610	93.825	1096	-0.574	94.206
1007	-0.996	93.345	1037	-0.859	93.629	1067	-9.612	93.828	1097	-0.564	94.225
1008	-9.311	93.359	1038	-9.486	93.631	1068	-9.614	93.831	1098	-0.555	94.245
1009	-0.987	93.364	1039	-0.850	93.648	1069	-9.617	93.835	1099	-0.545	94.264
1010	-9.322	93.377	1040	-9.498	93.650	1070	-9.619	93.838	1100	-0.536	94.284
1011	-0.978	93.383	1041	-0.840	93.667	1071	-0.757	93.839	1101	-0.534	94.287
1012	-9.334	93.395	1042	-9.510	93.668	1072	-9.621	93.841	1102	-0.532	94.291
1013	-0.969	93.402	1043	-0.831	93.686	1073	-9.623	93.844	1103	-0.530	94.294
1014	-9.345	93.414	1044	-9.521	93.686	1074	-9.625	93.847	1104	-0.528	94.297
1015	-0.960	93.421	1045	-9.533	93.704	1075	-9.627	93.851	1105	-0.527	94.301
1016	-9.356	93.432	1046	-0.822	93.705	1076	-9.630	93.854	1106	-0.525	94.304
1017	-0.951	93.439	1047	-9.544	93.723	1077	-9.632	93.857	1107	-0.523	94.308
1018	-9.368	93.450	1048	-0.812	93.724	1078	-0.748	93.858	1108	-0.521	94.311
1019	-0.942	93.458	1049	-9.556	93.741	1079	-0.739	93.877	1109	-0.519	94.314
1020	-9.380	93.468	1050	-0.803	93.743	1080	-0.730	93.897	1110	-0.517	94.318
1021	-0.934	93.477	1051	-9.568	93.759	1081	-0.720	93.916	1111	-0.516	94.321
1022	-9.392	93.486	1052	-0.794	93.762	1082	-0.710	93.935	1112	-0.514	94.325
1023	-0.925	93.496	1053	-9.579	93.778	1083	-0.700	93.954	1113	-0.512	94.328
1024	-9.404	93.504	1054	-0.785	93.782	1084	-0.690	93.974	1114	-0.510	94.332
1025	-0.916	93.515	1055	-9.590	93.796	1085	-0.680	93.993	1115	-0.508	94.335
1026	-9.415	93.522	1056	-9.593	93.799	1086	-0.670	94.012	1116	-0.507	94.338
1027	-0.907	93.534	1057	-0.775	93.801	1087	-0.661	94.031	1117	-0.505	94.342
1028	-9.427	93.540	1058	-9.595	93.803	1088	-0.651	94.051	1118	-0.503	94.345
1029	-0.897	93.553	1059	-9.597	93.806	1089	-0.641	94.070	1119	-0.501	94.349
1030	-9.439	93.558	1060	-9.599	93.809	1090	-0.631	94.089	1120	-0.499	94.352

EX – SP Case 1

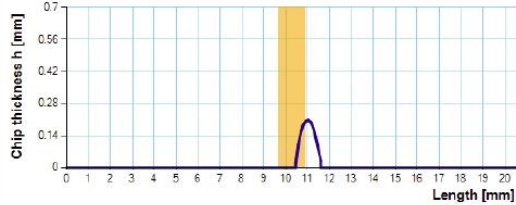
CHIP CROSS SECTIONS



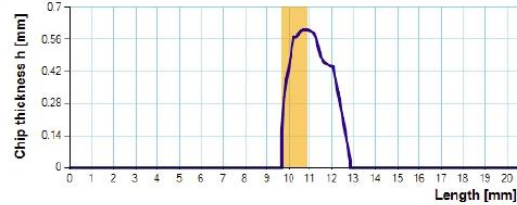


CHIP THICKNESS CHARTS

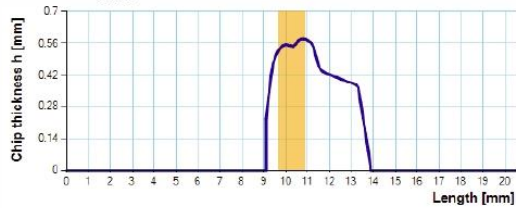
GP -25, h_{\max} : 0.2077 mm, Section area: 0.151 mm²



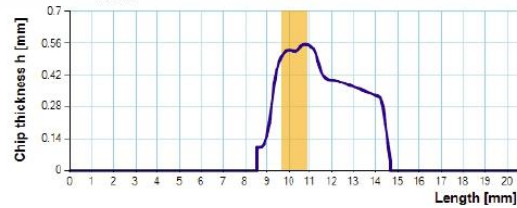
GP -24, h_{\max} : 0.6031 mm, Section area: 1.1862 mm²



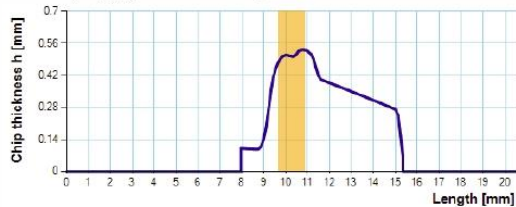
GP -23, h_{\max} : 0.5792 mm, Section area: 1.8035 mm²



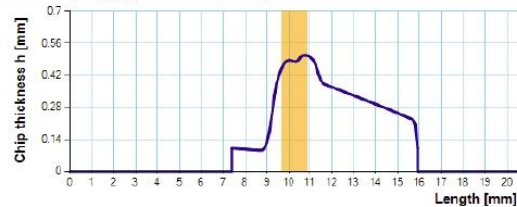
GP -22, h_{\max} : 0.5556 mm, Section area: 2.0827 mm²



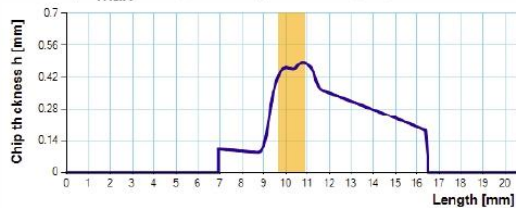
GP -21, h_{\max} : 0.5318 mm, Section area: 2.2591 mm²



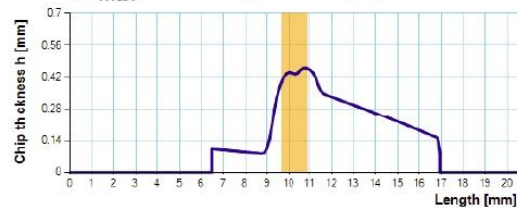
GP -20, h_{\max} : 0.5075 mm, Section area: 2.3569 mm²



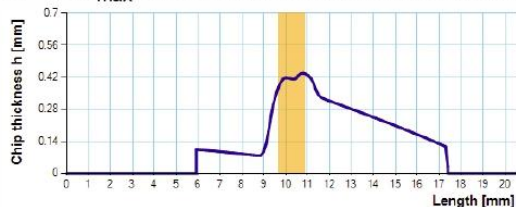
GP -19, h_{\max} : 0.4846 mm, Section area: 2.3994 mm²



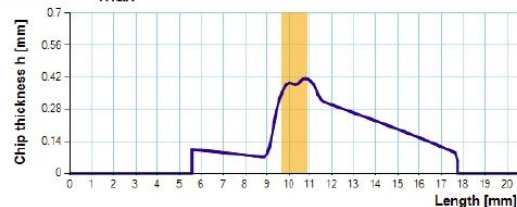
GP -18, h_{\max} : 0.461 mm, Section area: 2.3964 mm²



GP -17, h_{\max} : 0.4371 mm, Section area: 2.3618 mm²



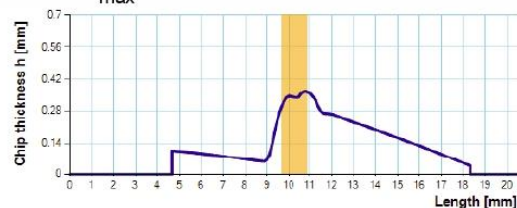
GP -16, h_{\max} : 0.4134 mm, Section area: 2.3008 mm²



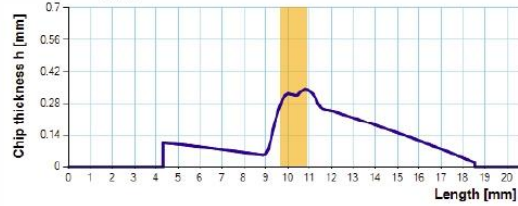
GP -15, h_{\max} : 0.3902 mm, Section area: 2.2155 mm²



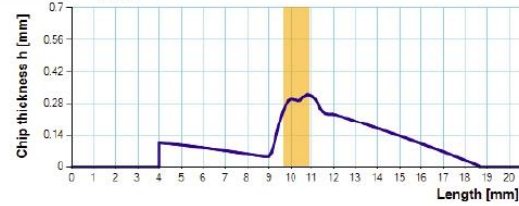
GP -14, h_{\max} : 0.3671 mm, Section area: 2.1184 mm²



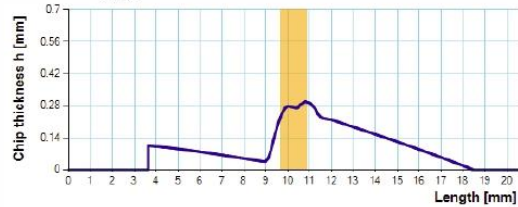
GP -13, h_{max} : 0.3438 mm, Section area: 2.0052 mm²



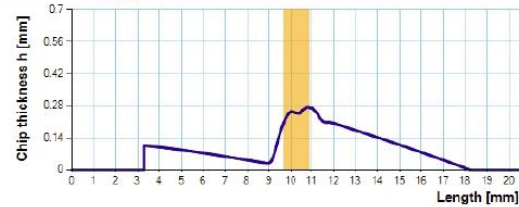
GP -12, h_{max} : 0.3205 mm, Section area: 1.882 mm²



GP -11, h_{max} : 0.2972 mm, Section area: 1.7575 mm²



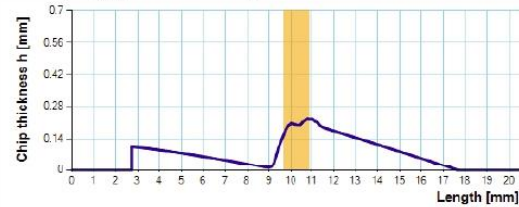
GP -10, h_{max} : 0.2739 mm, Section area: 1.6279 mm²



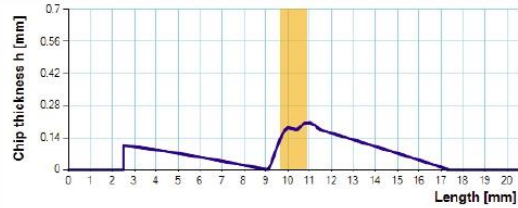
GP -9, h_{max} : 0.2508 mm, Section area: 1.5005 mm²



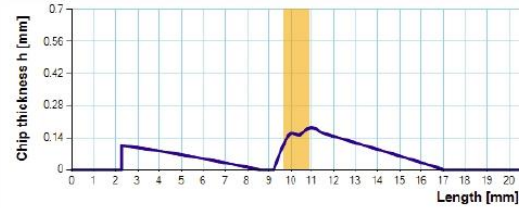
GP -8, h_{max} : 0.2276 mm, Section area: 1.3747 mm²



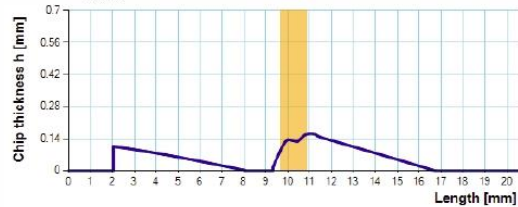
GP -7, h_{max} : 0.2056 mm, Section area: 1.2448 mm²



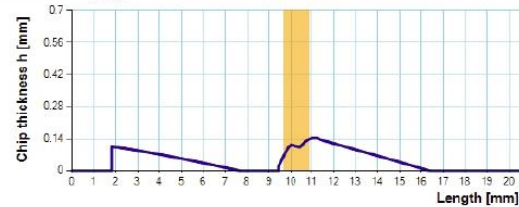
GP -6, h_{max} : 0.1825 mm, Section area: 1.1133 mm²



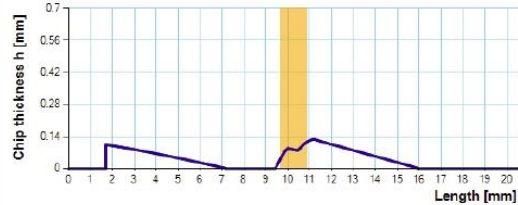
GP -5, h_{max} : 0.1616 mm, Section area: 0.9895 mm²



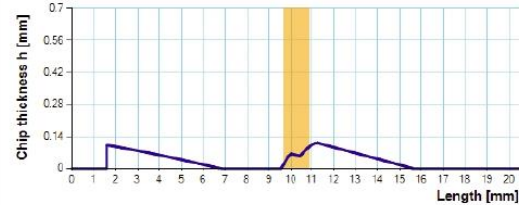
GP -4, h_{max} : 0.1433 mm, Section area: 0.8705 mm²



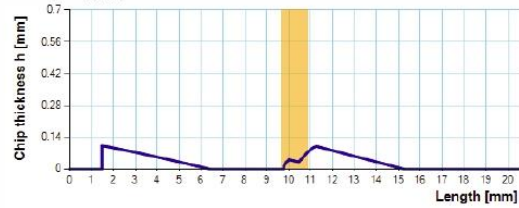
GP -3, h_{max} : 0.1272 mm, Section area: 0.7566 mm²



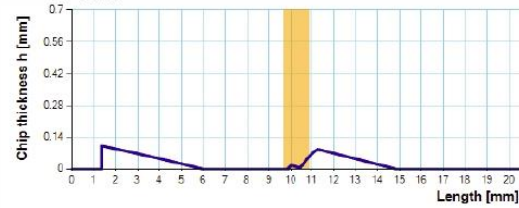
GP -2, h_{max} : 0.1128 mm, Section area: 0.6481 mm²



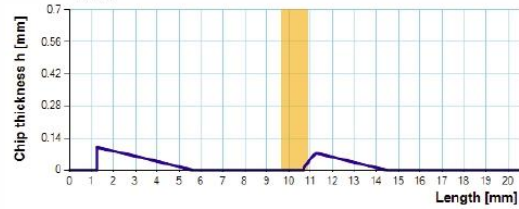
GP -1, h_{\max} : 0.1017 mm, Section area: 0.5463 mm²



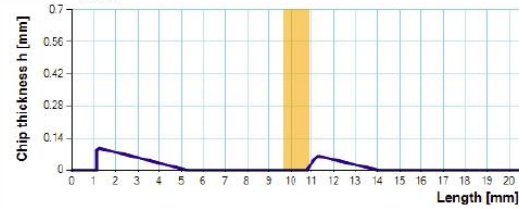
GP 0, h_{\max} : 0.1004 mm, Section area: 0.4518 mm²



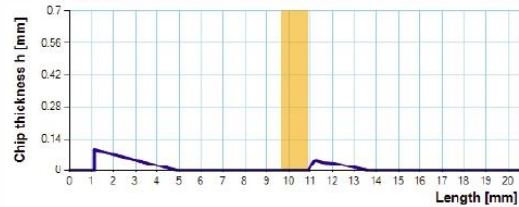
GP 1, h_{\max} : 0.0992 mm, Section area: 0.3729 mm²



GP 2, h_{\max} : 0.0955 mm, Section area: 0.3082 mm²



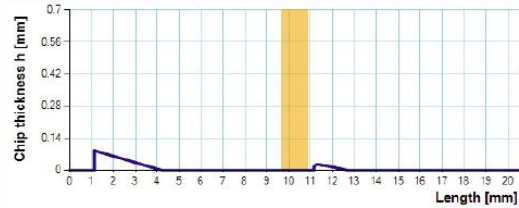
GP 3, h_{\max} : 0.0943 mm, Section area: 0.2501 mm²



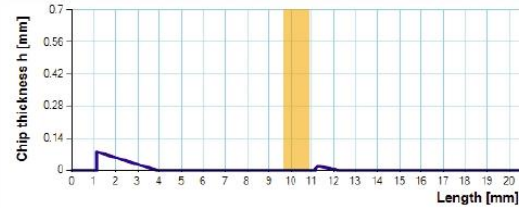
GP 4, h_{\max} : 0.0902 mm, Section area: 0.2042 mm²



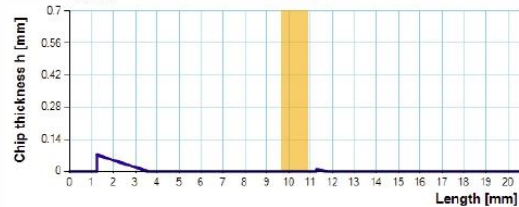
GP 5, h_{\max} : 0.0858 mm, Section area: 0.1601 mm²



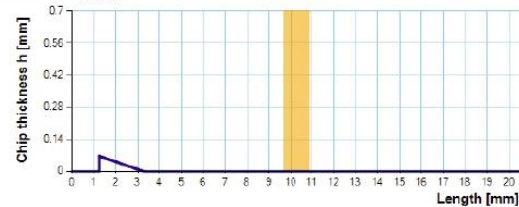
GP 6, h_{\max} : 0.0811 mm, Section area: 0.1241 mm²



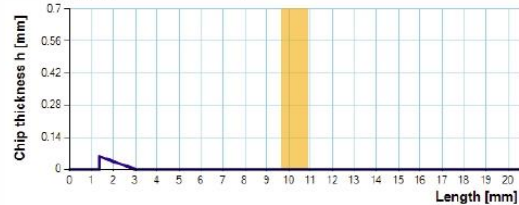
GP 7, h_{\max} : 0.0724 mm, Section area: 0.0932 mm²



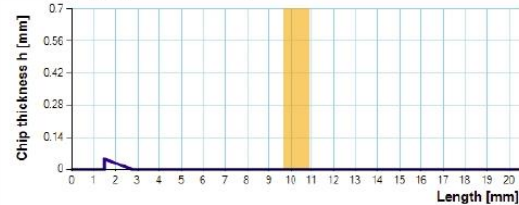
GP 8, h_{\max} : 0.0668 mm, Section area: 0.0689 mm²



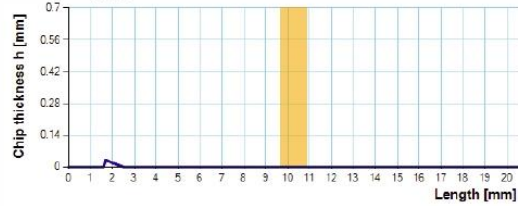
GP 9, h_{\max} : 0.0567 mm, Section area: 0.0486 mm²



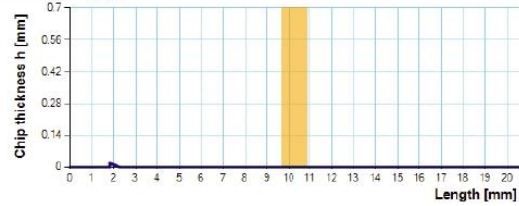
GP 10, h_{\max} : 0.046 mm, Section area: 0.0305 mm²



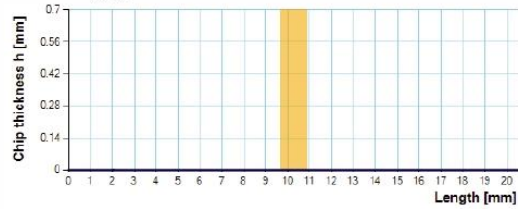
GP 11, h_{\max} : 0.0301 mm, Section area: 0.0139 mm²



GP 12, h_{\max} : 0.0179 mm, Section area: 0.0049 mm²

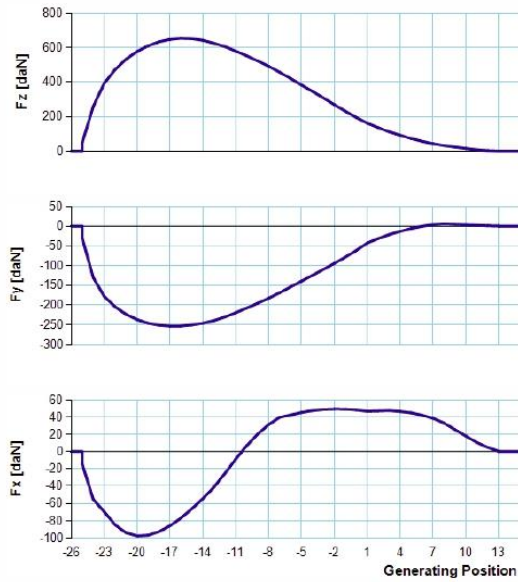


GP 13, h_{\max} : 0.0003 mm, Section area: 0.0001 mm²

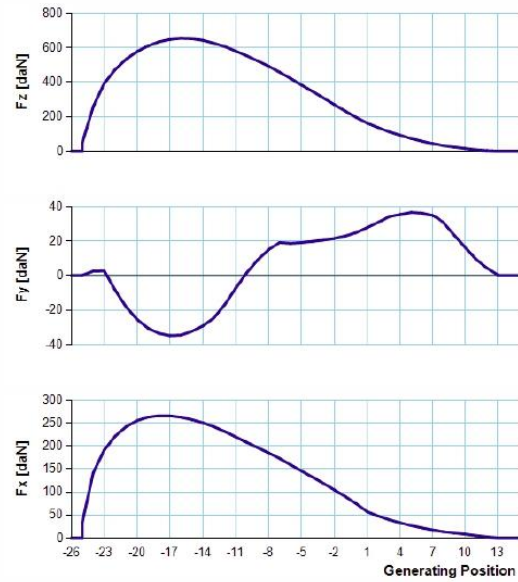


SINGLE GAP FORCES

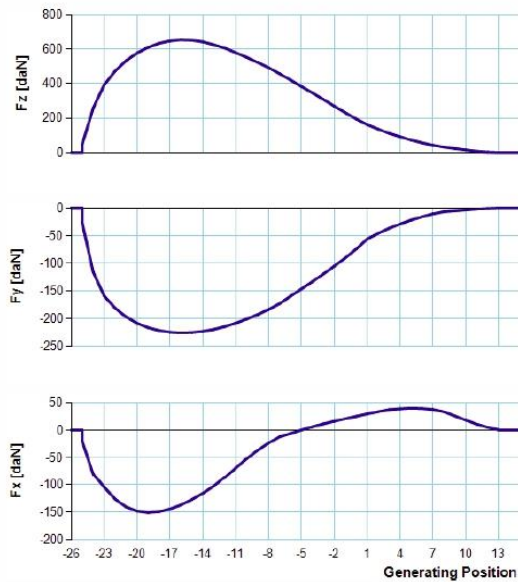
System 1



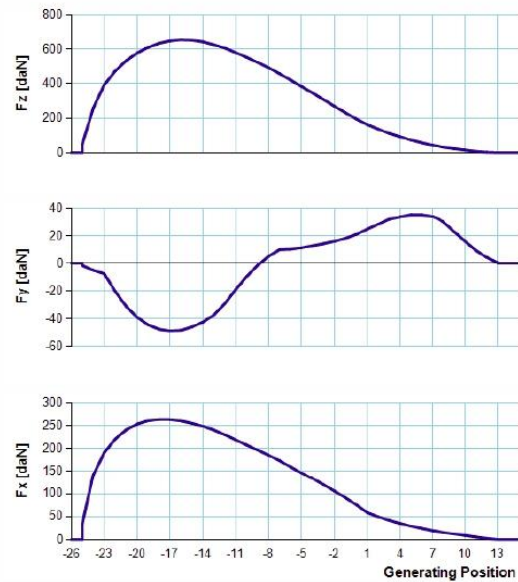
System 3



System 2

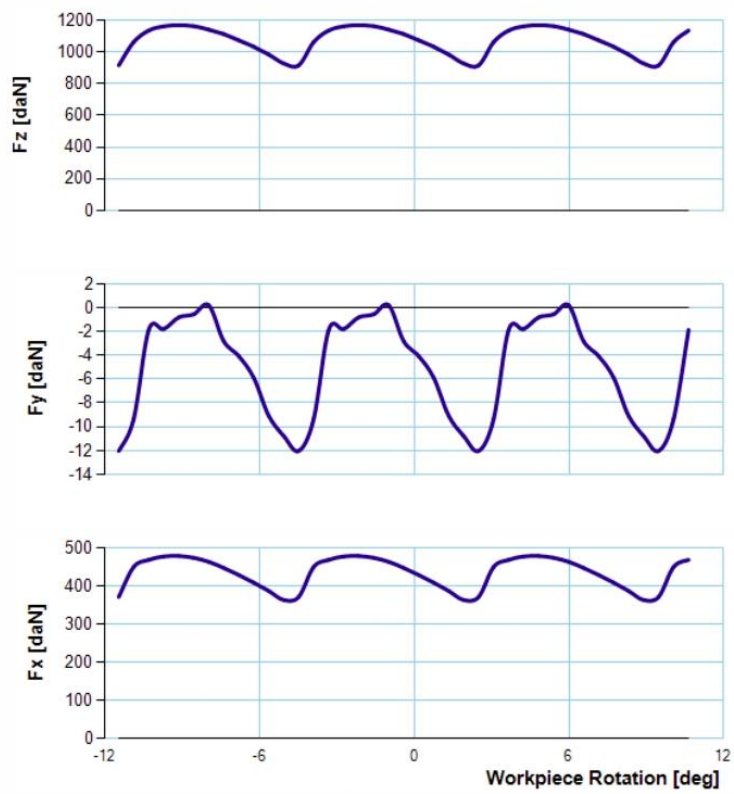


System 4

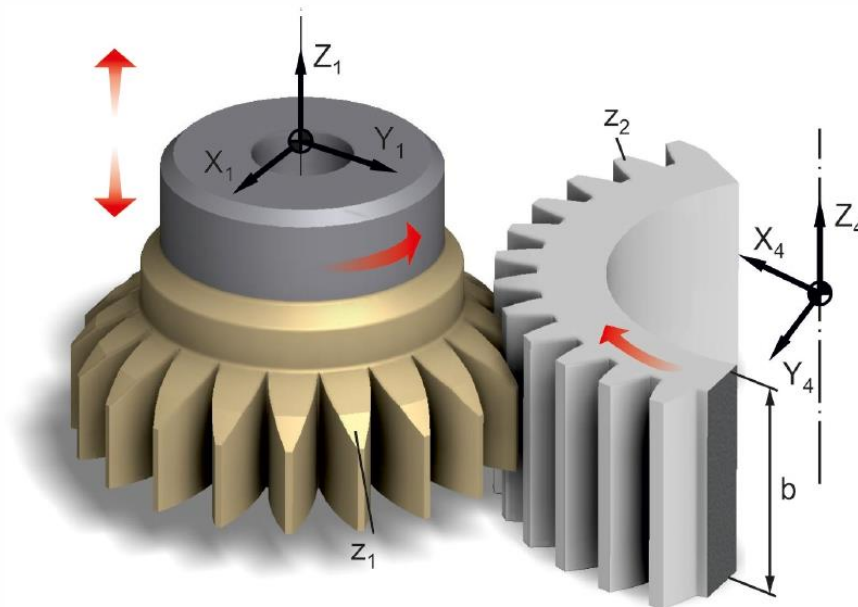


EX – SP Case 1

GLOBAL FORCES



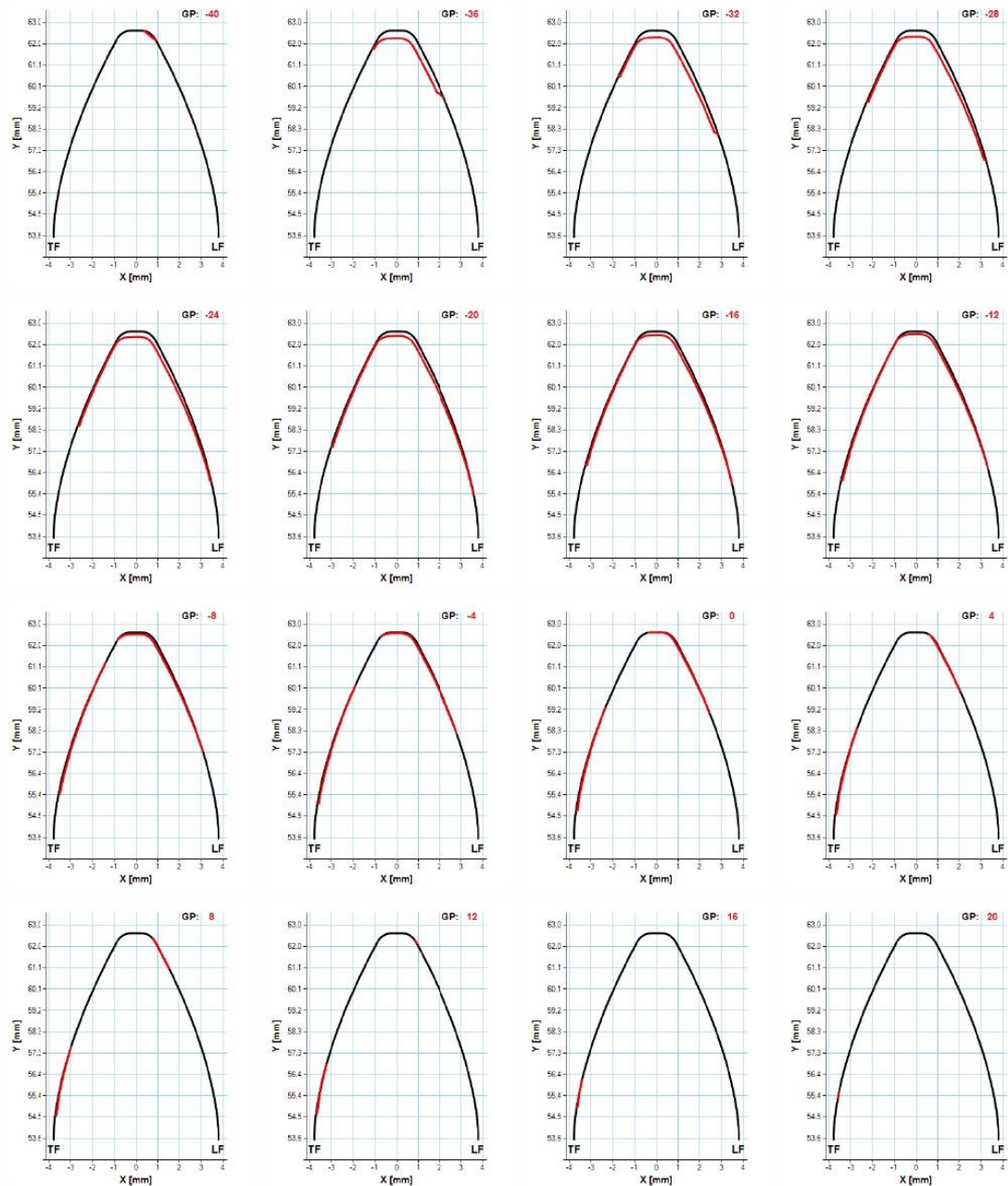
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

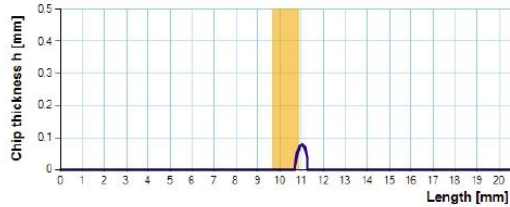
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.58 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS



CHIP THICKNESS CHARTS

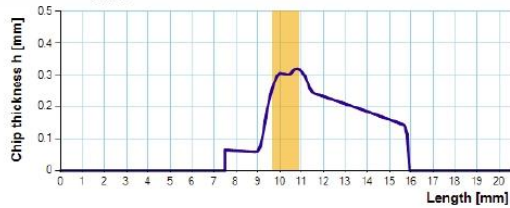
GP -40, h_{\max} : 0.0793 mm, Section area: 0.0345 mm²



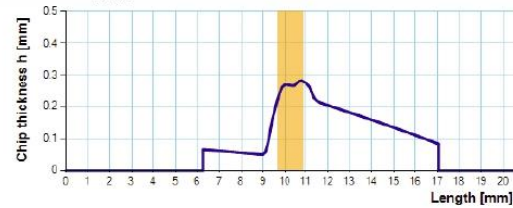
GP -36, h_{\max} : 0.3581 mm, Section area: 1.2341 mm²



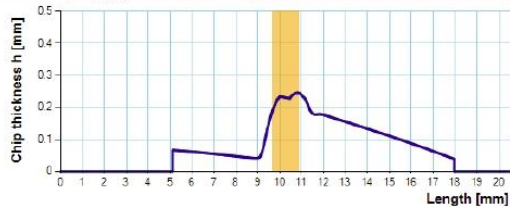
GP -32, h_{\max} : 0.3207 mm, Section area: 1.4869 mm²



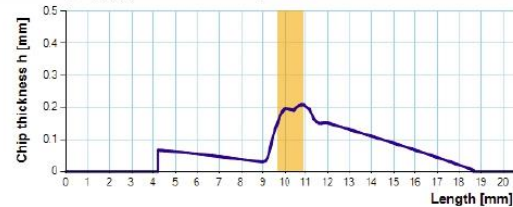
GP -28, h_{\max} : 0.2834 mm, Section area: 1.5035 mm²



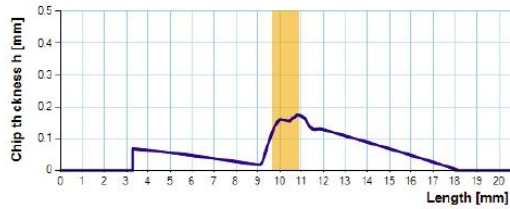
GP -24, h_{\max} : 0.2457 mm, Section area: 1.3947 mm²



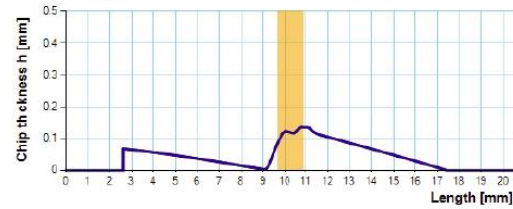
GP -20, h_{\max} : 0.2085 mm, Section area: 1.22 mm²



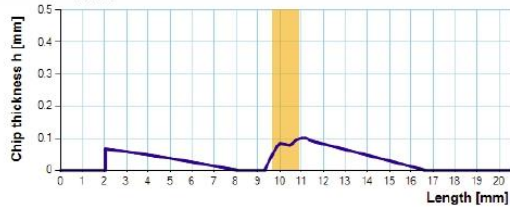
GP -16, h_{\max} : 0.1725 mm, Section area: 1.0186 mm²



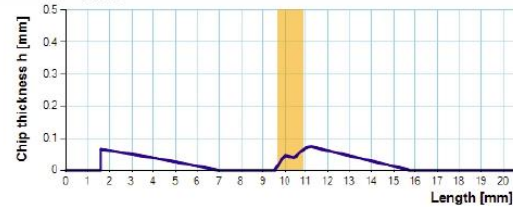
GP -12, h_{\max} : 0.1357 mm, Section area: 0.8179 mm²



GP -8, h_{\max} : 0.1012 mm, Section area: 0.6139 mm²



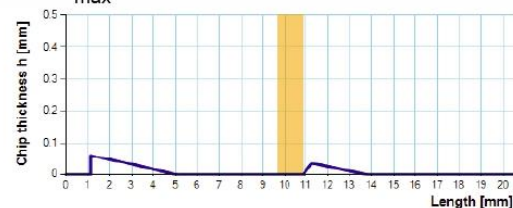
GP -4, h_{\max} : 0.0751 mm, Section area: 0.4311 mm²



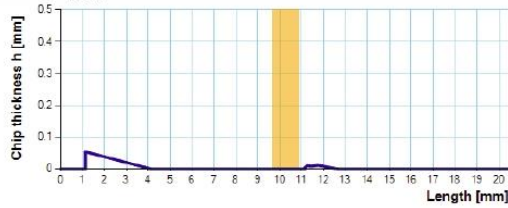
GP 0, h_{\max} : 0.0631 mm, Section area: 0.2744 mm²



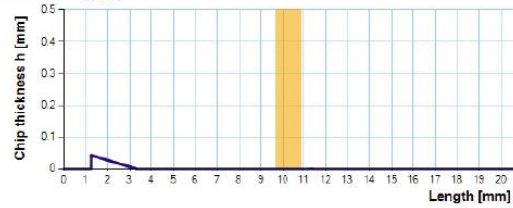
GP 4, h_{\max} : 0.0602 mm, Section area: 0.1696 mm²



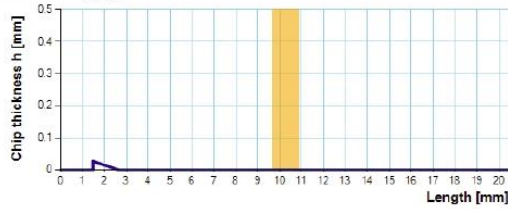
GP 8, h_{\max} : 0.0533 mm, Section area: 0.0933 mm²



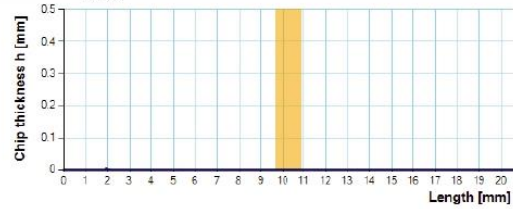
GP 12, h_{\max} : 0.0426 mm, Section area: 0.0469 mm²



GP 16, h_{\max} : 0.0271 mm, Section area: 0.0164 mm²

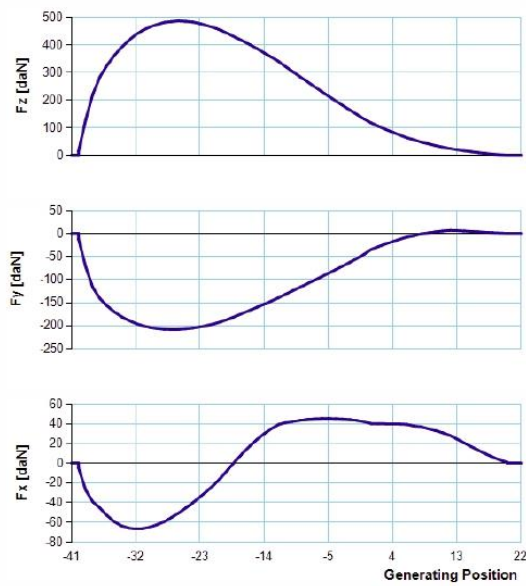


GP 20, h_{\max} : 0.0032 mm, Section area: 0.0004 mm²

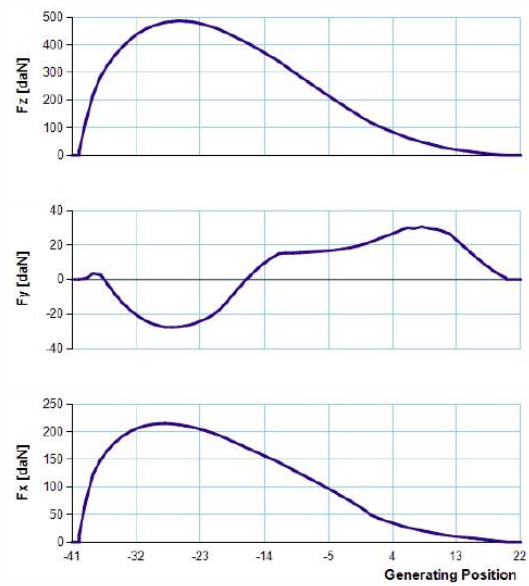


SINGLE GAP FORCES

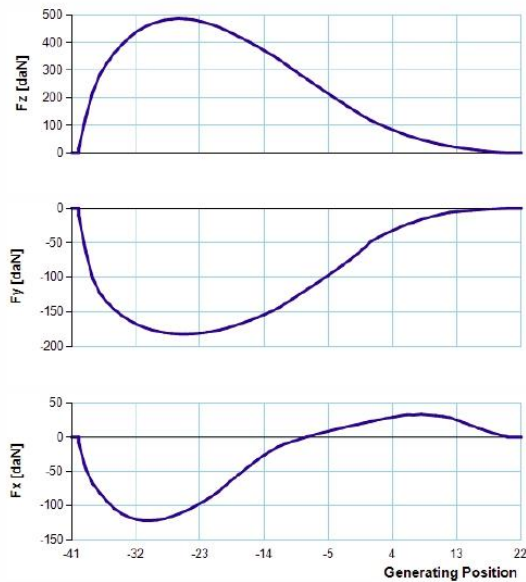
System 1



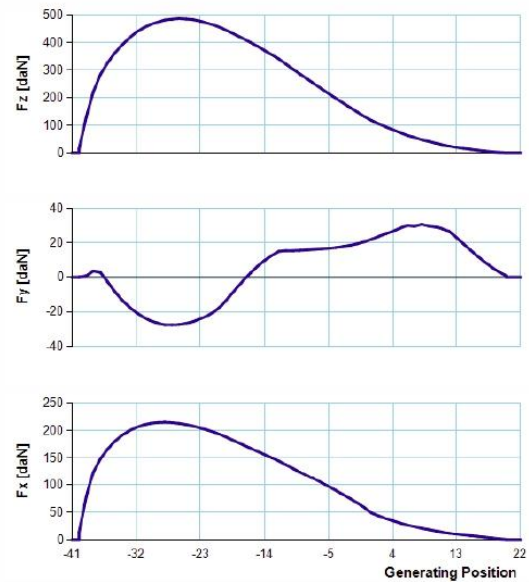
System 3



System 2

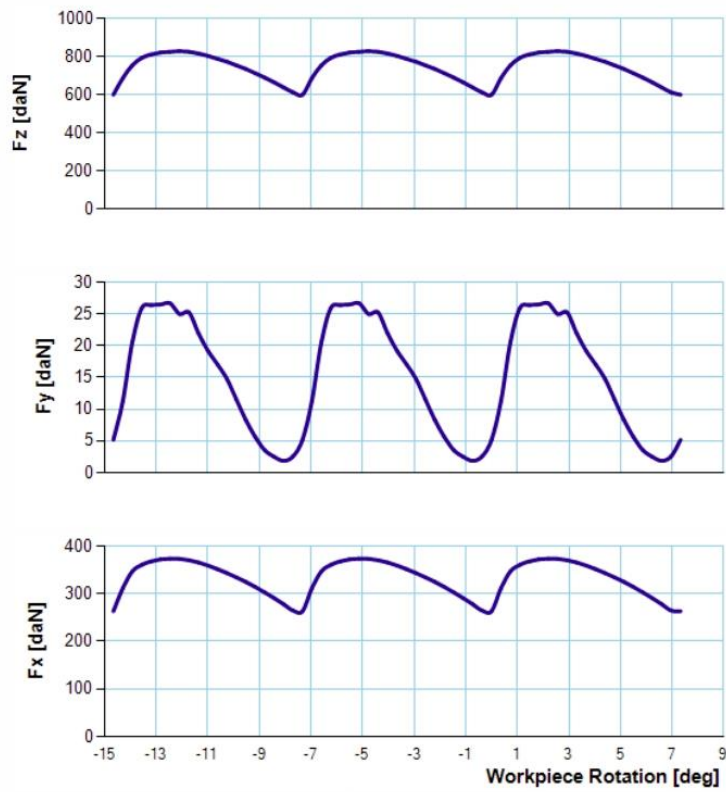


System 4

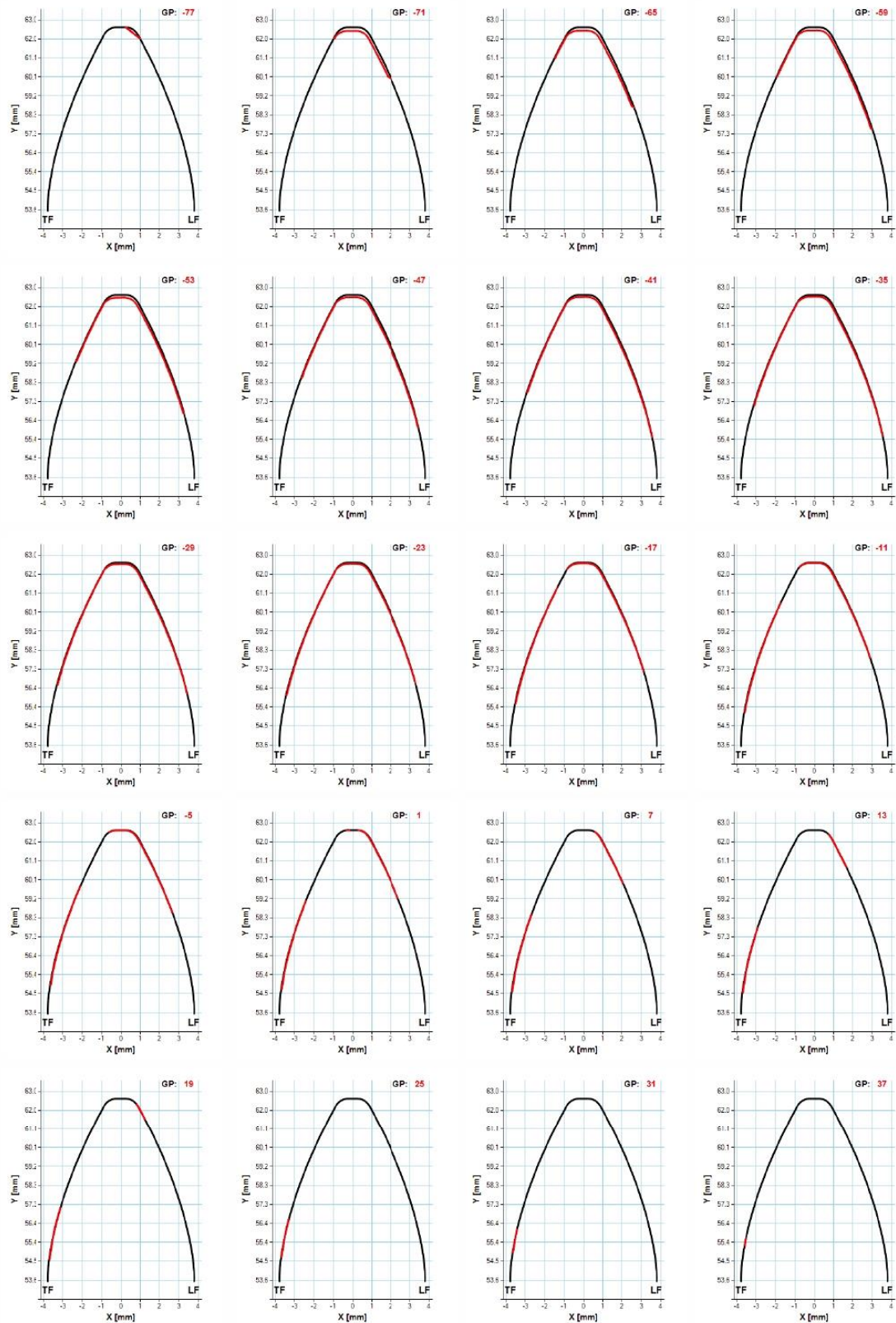


EX - SP Case 2

GLOBAL FORCES

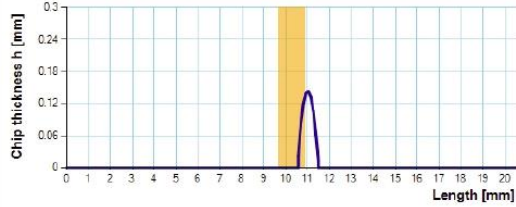


CHIP CROSS SECTIONS

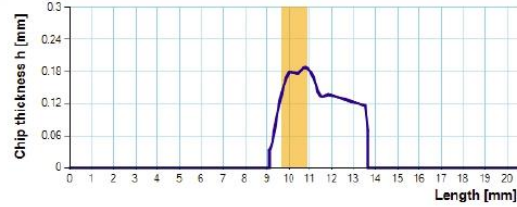


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -77, h_{\max} : 0.1436 mm, Section area: 0.0852 mm²



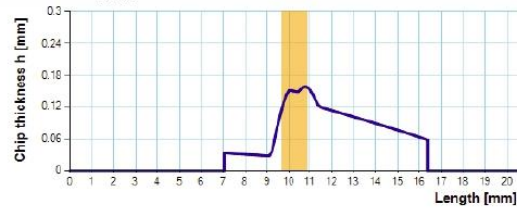
GP -71, h_{\max} : 0.1876 mm, Section area: 0.6079 mm²



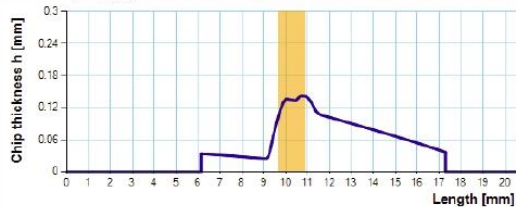
GP -65, h_{\max} : 0.1727 mm, Section area: 0.7428 mm²



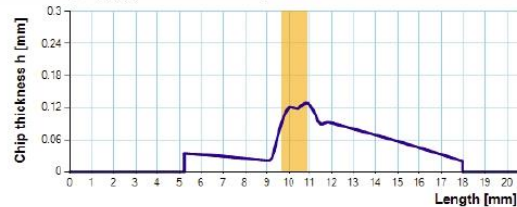
GP -59, h_{\max} : 0.1571 mm, Section area: 0.7839 mm²



GP -53, h_{\max} : 0.1419 mm, Section area: 0.7721 mm²



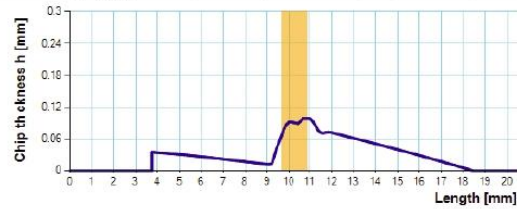
GP -47, h_{\max} : 0.1285 mm, Section area: 0.7231 mm²



GP -41, h_{\max} : 0.114 mm, Section area: 0.6538 mm²



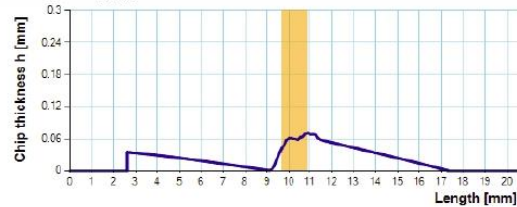
GP -35, h_{\max} : 0.0982 mm, Section area: 0.5778 mm²



GP -29, h_{\max} : 0.0849 mm, Section area: 0.4954 mm²



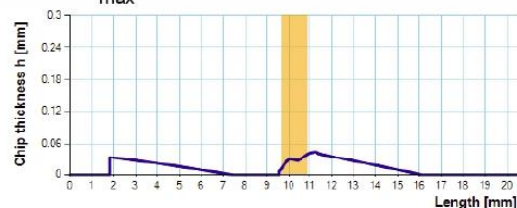
GP -23, h_{\max} : 0.071 mm, Section area: 0.4162 mm²



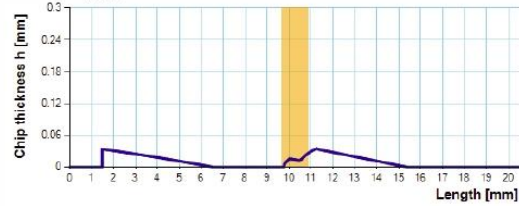
GP -17, h_{\max} : 0.0555 mm, Section area: 0.3322 mm²



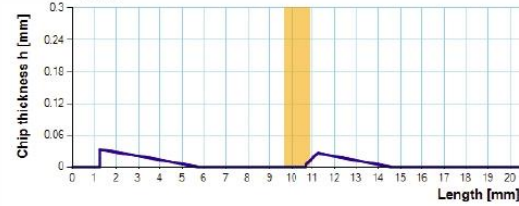
GP -11, h_{\max} : 0.0447 mm, Section area: 0.2565 mm²



GP -5, h_{\max} : 0.0346 mm, Section area: 0.1881 mm²



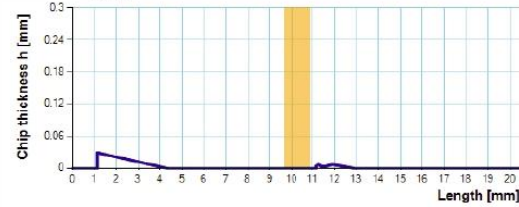
GP 1, h_{\max} : 0.0328 mm, Section area: 0.1295 mm²



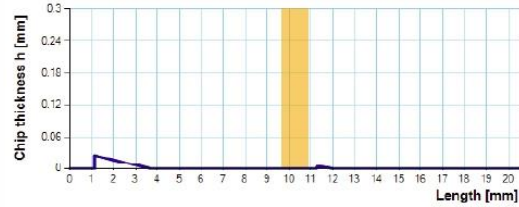
GP 7, h_{\max} : 0.0313 mm, Section area: 0.0892 mm²



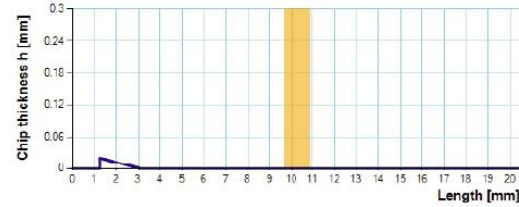
GP 13, h_{\max} : 0.0285 mm, Section area: 0.0555 mm²



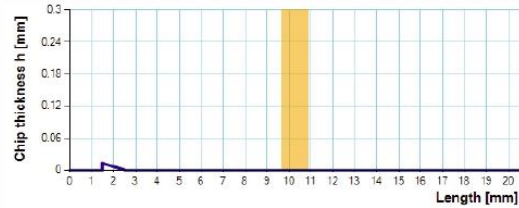
GP 19, h_{\max} : 0.0253 mm, Section area: 0.0349 mm²



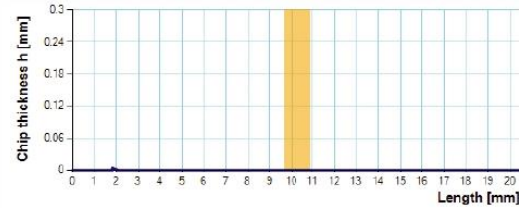
GP 25, h_{\max} : 0.0204 mm, Section area: 0.0191 mm²



GP 31, h_{\max} : 0.0133 mm, Section area: 0.0076 mm²

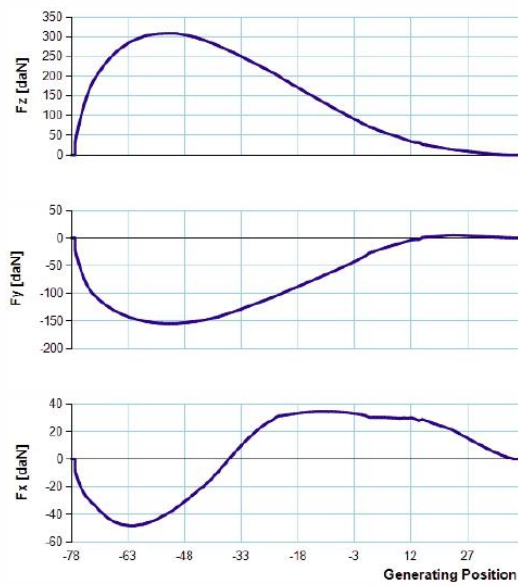


GP 37, h_{\max} : 0.0038 mm, Section area: 0.0007 mm²

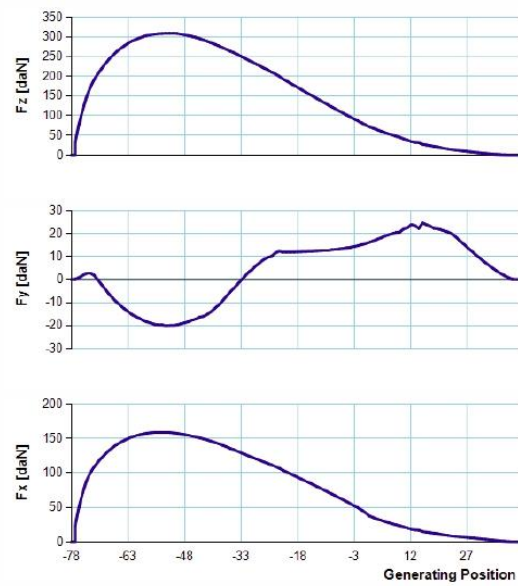


SINGLE GAP FORCES

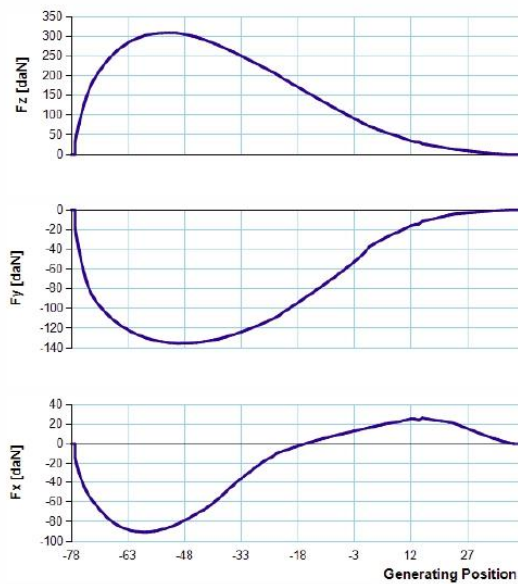
System 1



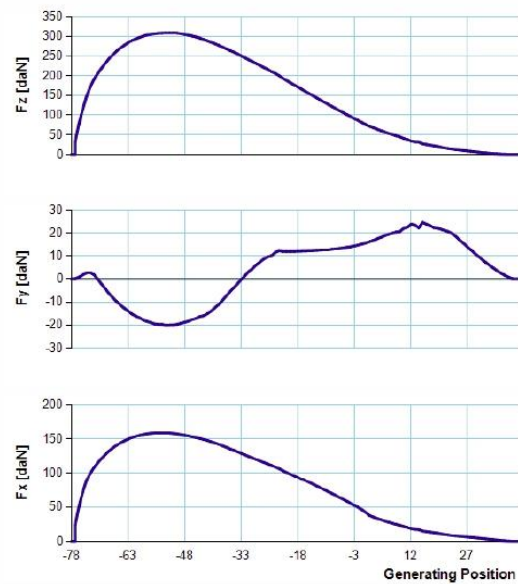
System 3



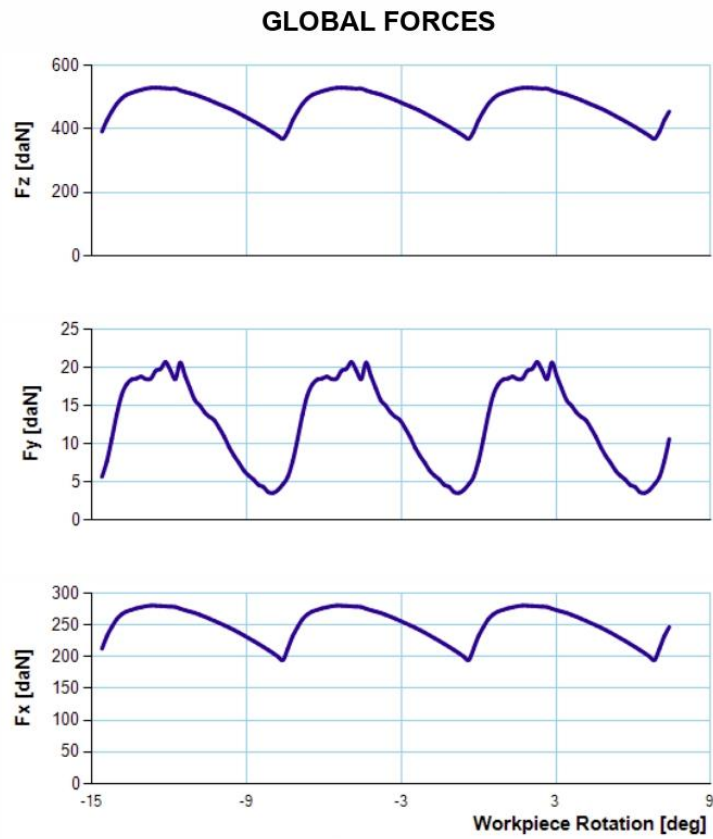
System 2



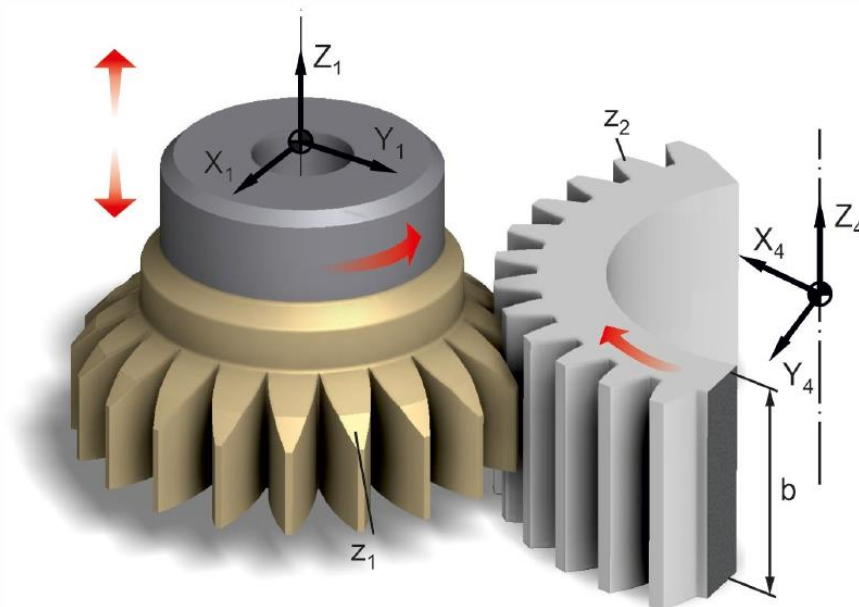
System 4



EX - SP Case 3



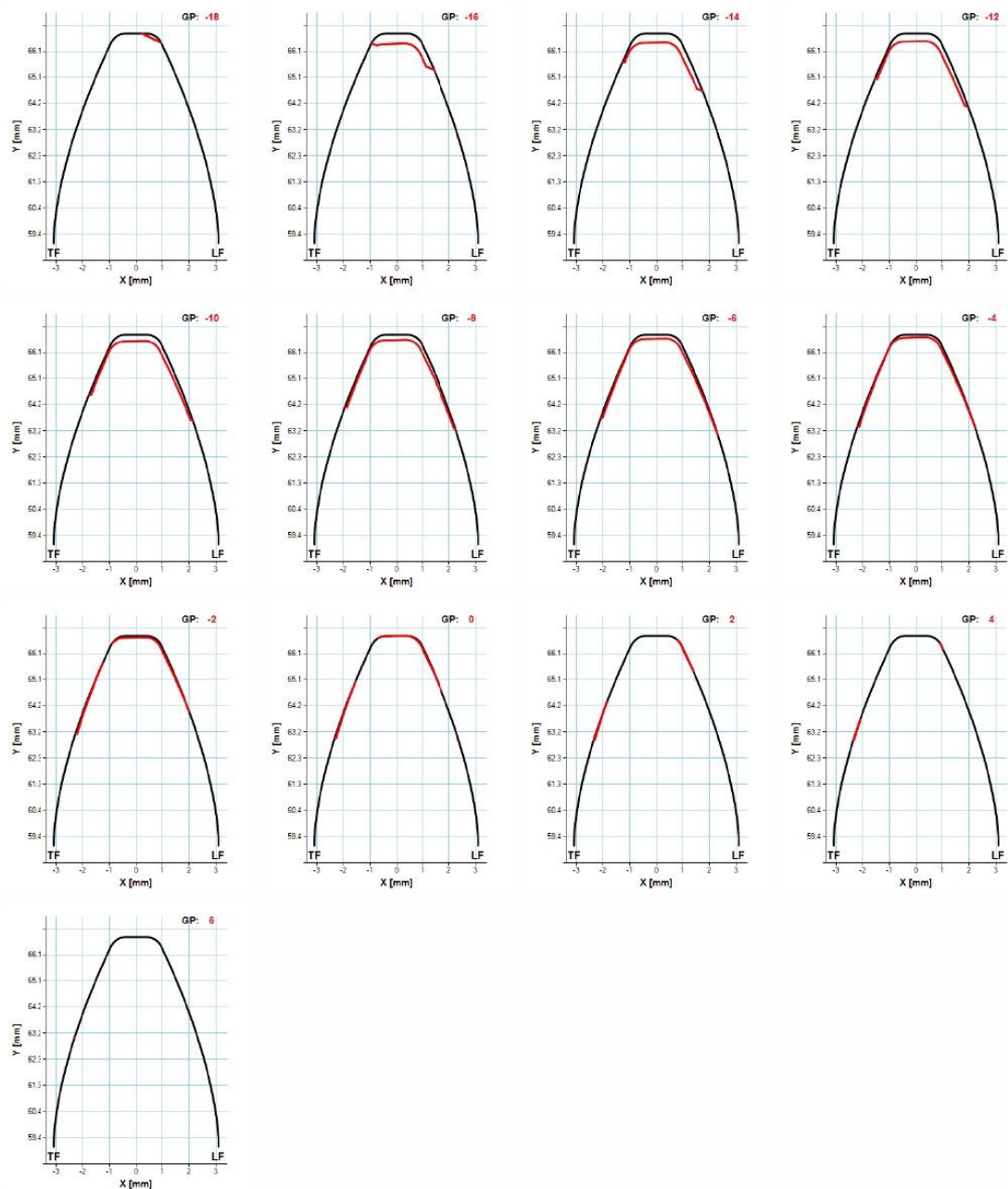
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

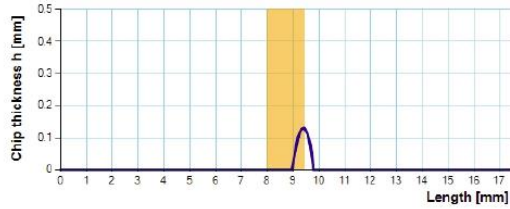
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	3.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

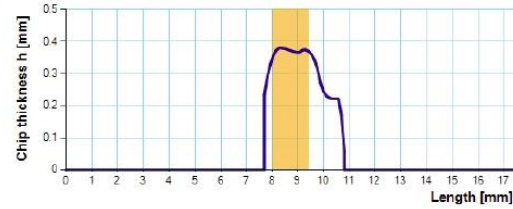


CHIP THICKNESS CHARTS

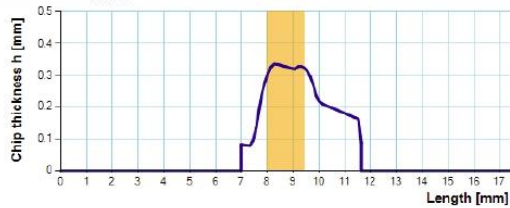
GP -18, h_{max} : 0.1297 mm, Section area: 0.0663 mm²



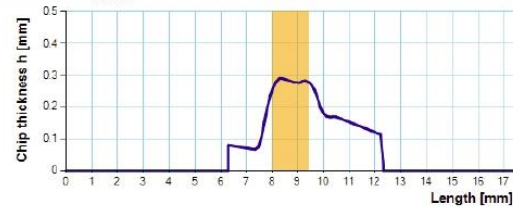
GP -16, h_{max} : 0.3807 mm, Section area: 0.8546 mm²



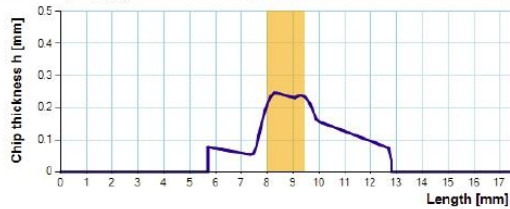
GP -14, h_{max} : 0.3363 mm, Section area: 0.9836 mm²



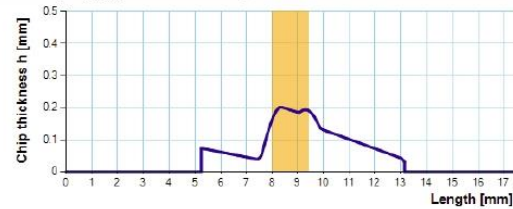
GP -12, h_{max} : 0.2915 mm, Section area: 0.9776 mm²



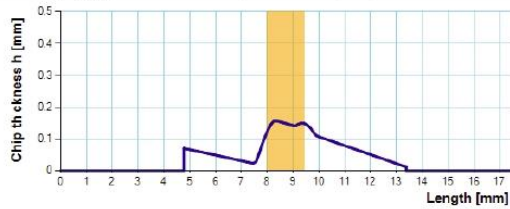
GP -10, h_{max} : 0.2465 mm, Section area: 0.9062 mm²



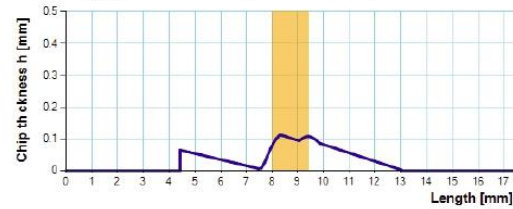
GP -8, h_{max} : 0.2013 mm, Section area: 0.7829 mm²



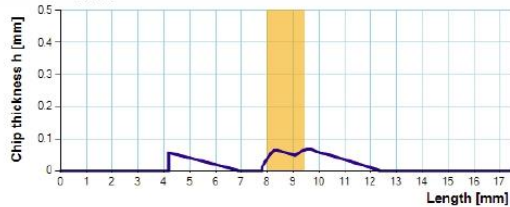
GP -6, h_{max} : 0.1559 mm, Section area: 0.6253 mm²



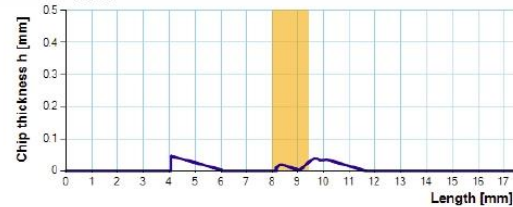
GP -4, h_{max} : 0.1103 mm, Section area: 0.4479 mm²



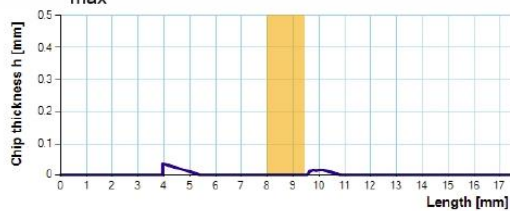
GP -2, h_{max} : 0.0678 mm, Section area: 0.2712 mm²



GP 0, h_{max} : 0.0459 mm, Section area: 0.1181 mm²



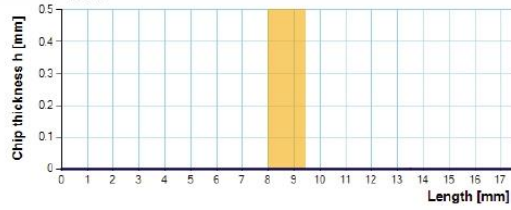
GP 2, h_{max} : 0.0346 mm, Section area: 0.0388 mm²



GP 4, h_{max} : 0.0195 mm, Section area: 0.008 mm²

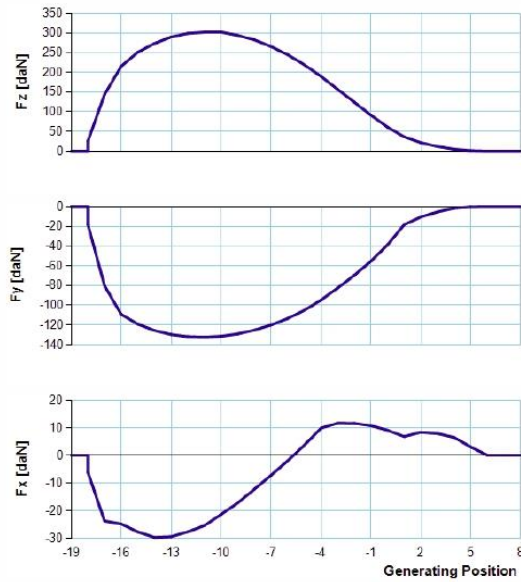


GP 6, h_{\max} : 0.0001 mm, Section area: 0 mm²

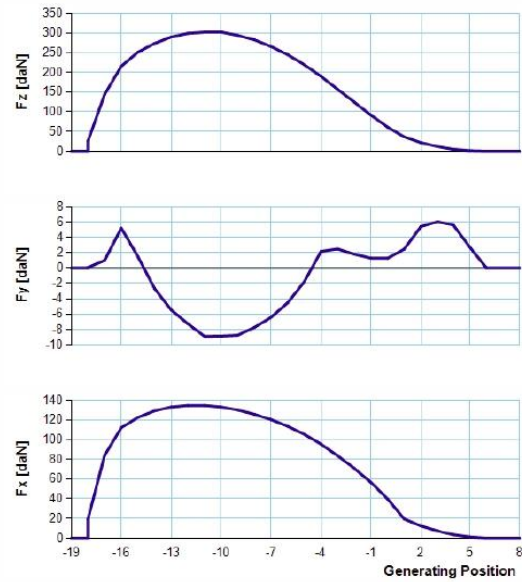


SINGLE GAP FORCES

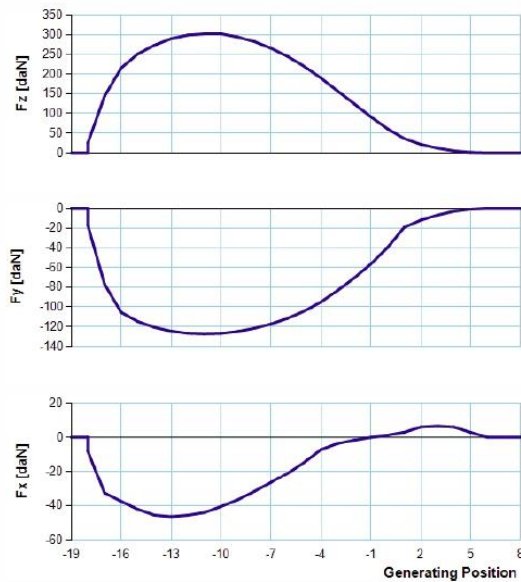
System 1



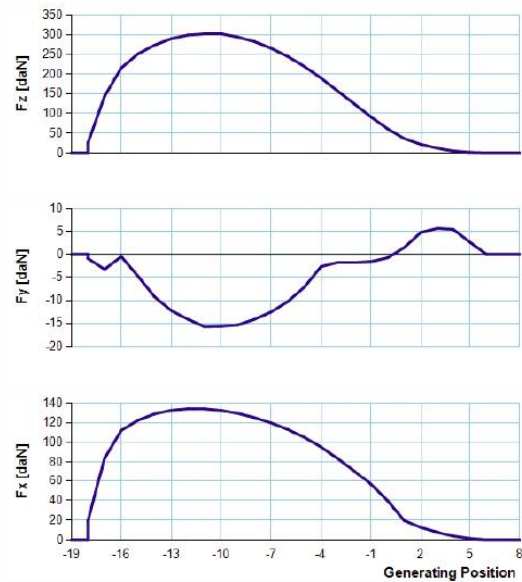
System 3



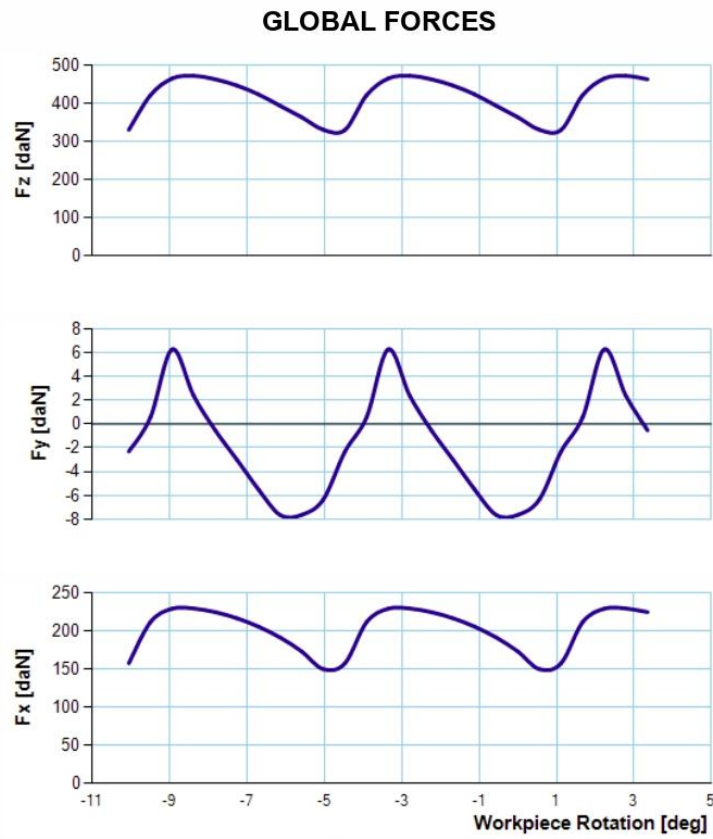
System 2



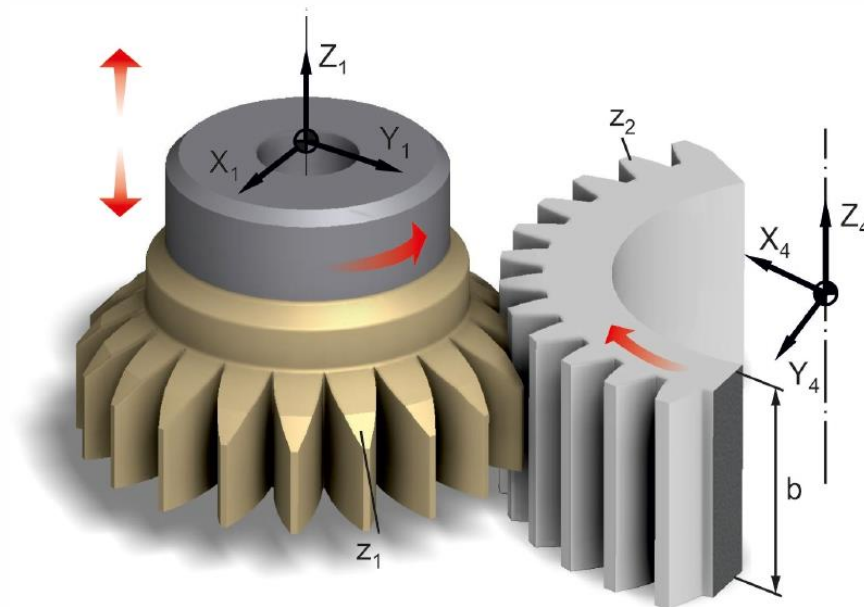
System 4



EX - SP Case 4



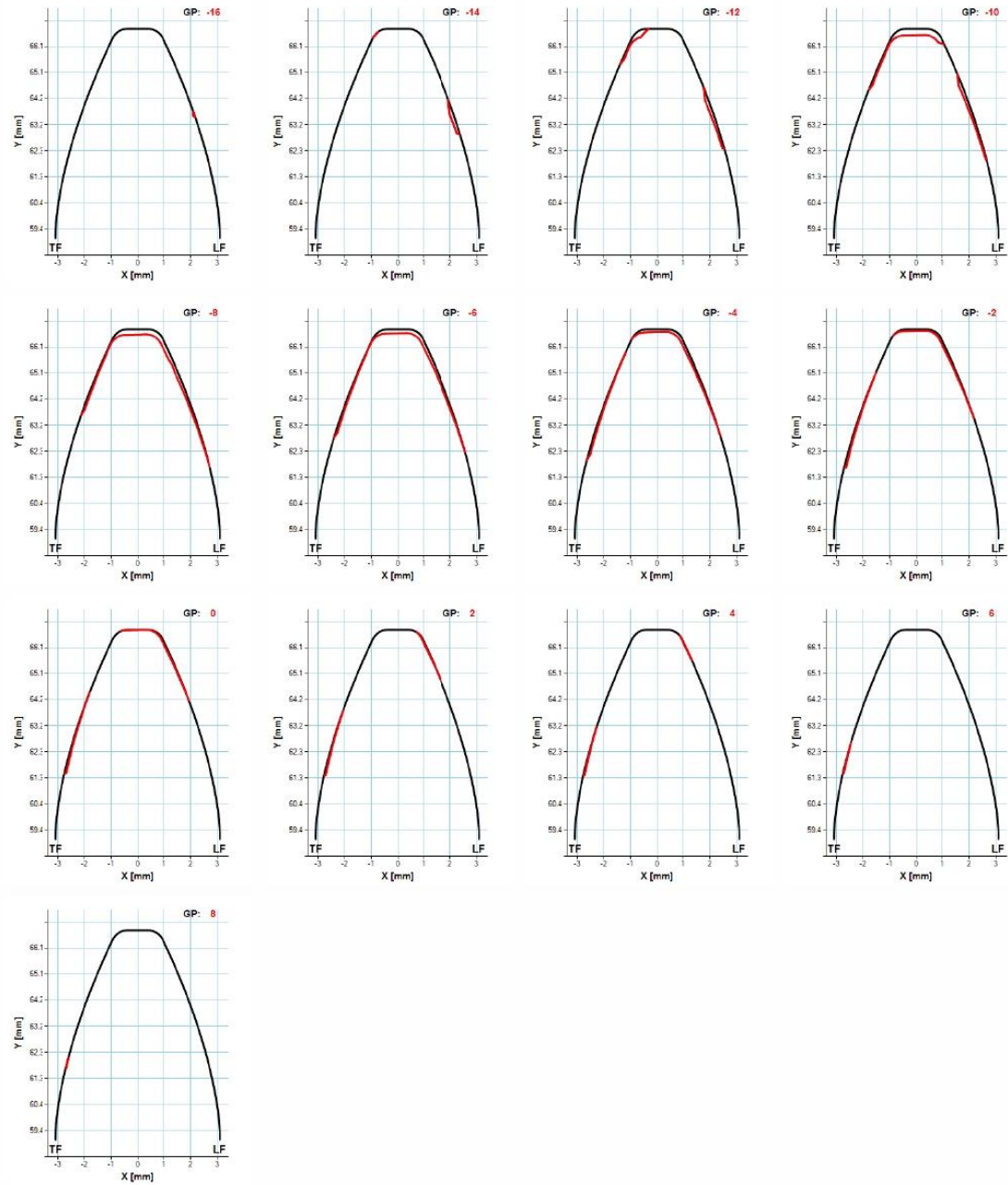
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

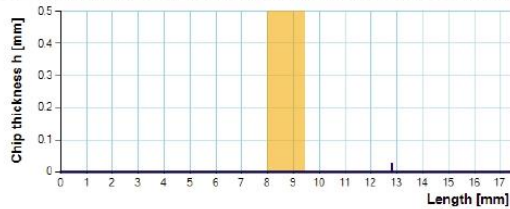
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	5.25 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

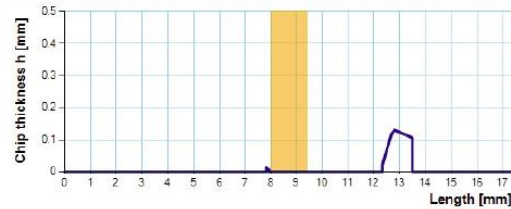


CHIP THICKNESS CHARTS

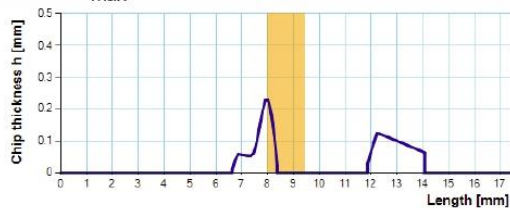
GP -16, h_{max} : 0.0243 mm, Section area: 0.0044 mm²



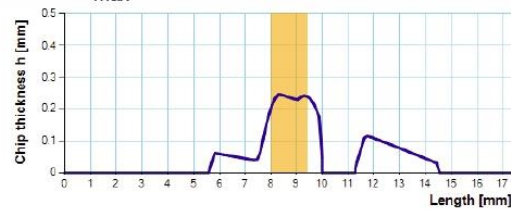
GP -14, h_{max} : 0.1304 mm, Section area: 0.1315 mm²



GP -12, h_{max} : 0.2271 mm, Section area: 0.3706 mm²



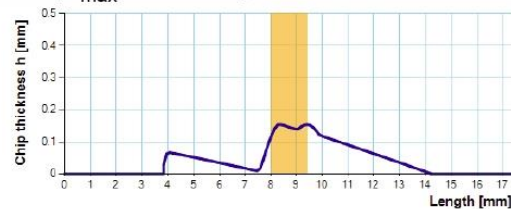
GP -10, h_{max} : 0.244 mm, Section area: 0.7875 mm²



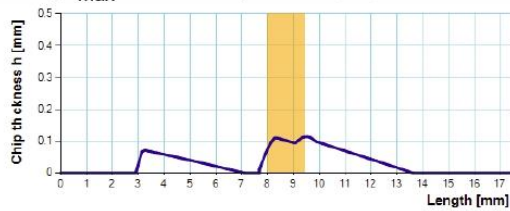
GP -8, h_{max} : 0.1992 mm, Section area: 0.8507 mm²



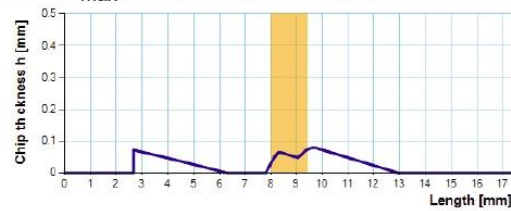
GP -6, h_{max} : 0.1542 mm, Section area: 0.6971 mm²



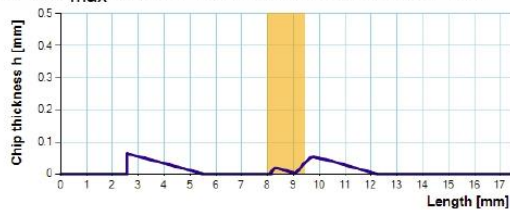
GP -4, h_{max} : 0.1131 mm, Section area: 0.5355 mm²



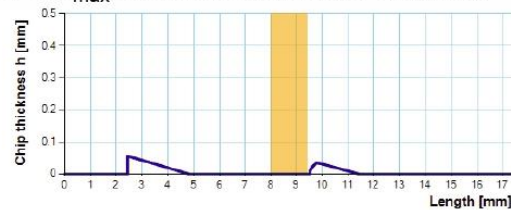
GP -2, h_{max} : 0.0787 mm, Section area: 0.3656 mm²



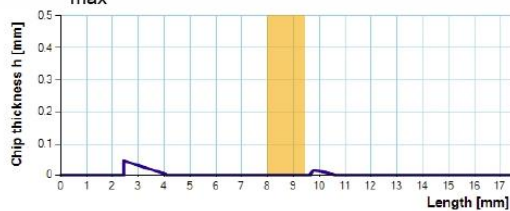
GP 0, h_{max} : 0.0641 mm, Section area: 0.204 mm²



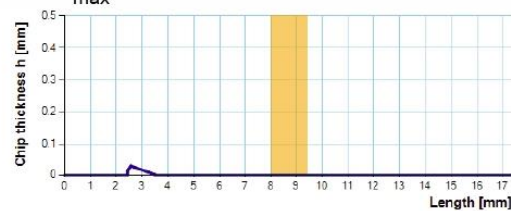
GP 2, h_{max} : 0.056 mm, Section area: 0.1083 mm²

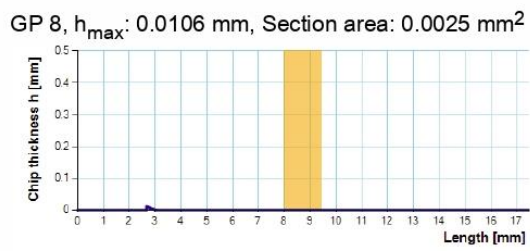


GP 4, h_{max} : 0.0444 mm, Section area: 0.0509 mm²



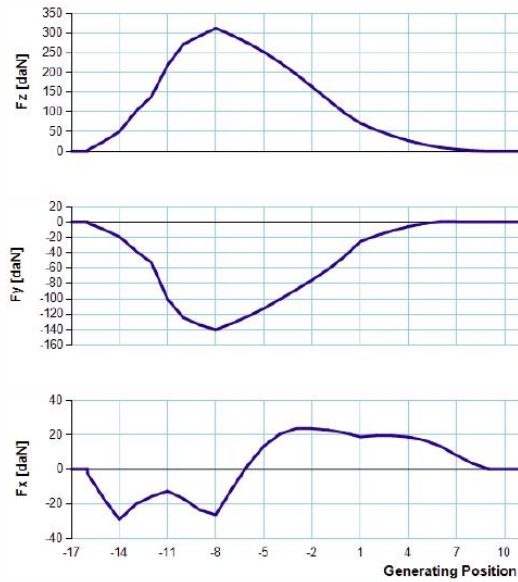
GP 6, h_{max} : 0.0284 mm, Section area: 0.0169 mm²



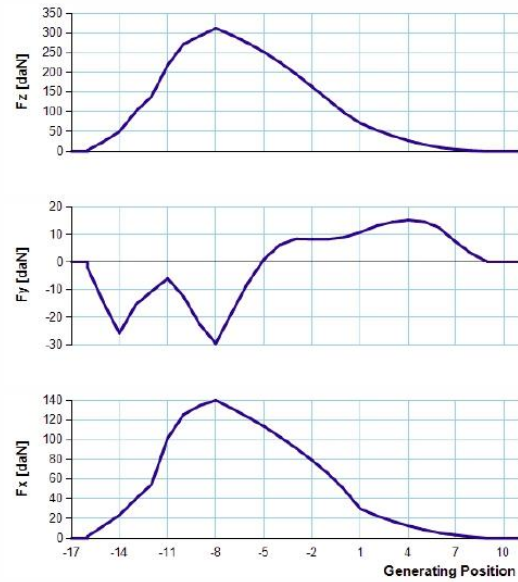


SINGLE GAP FORCES

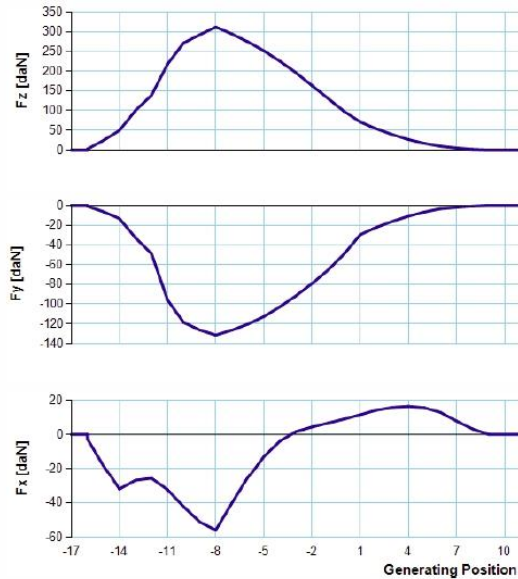
System 1



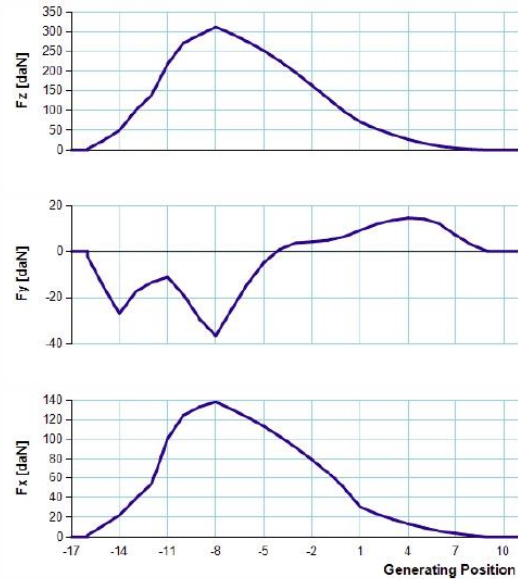
System 3



System 2



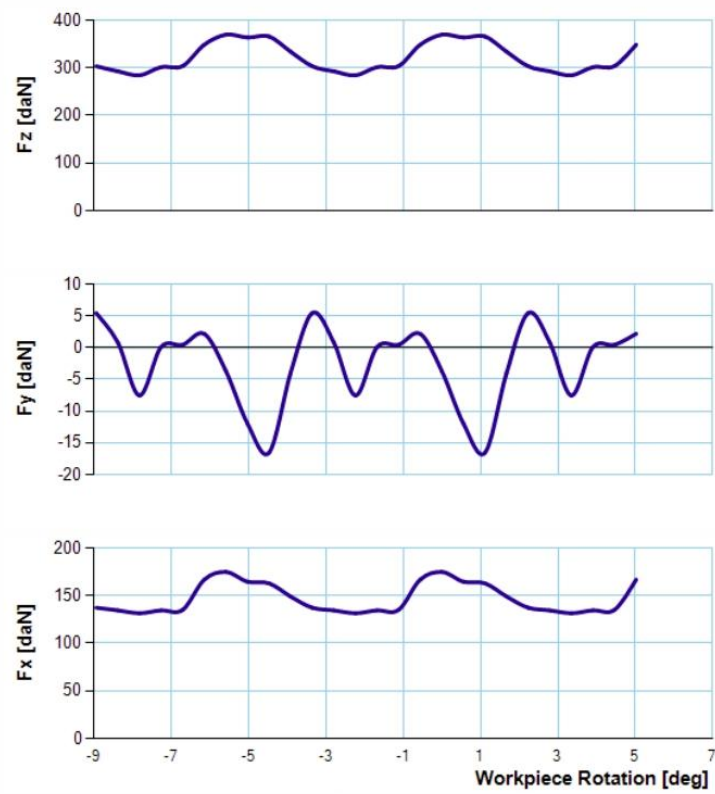
System 4



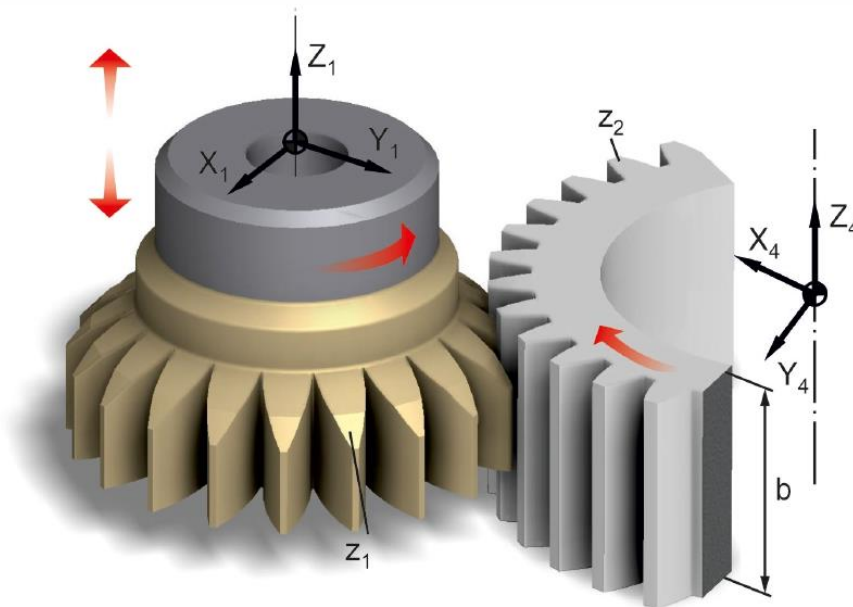
EX - SP Case 5



GLOBAL FORCES



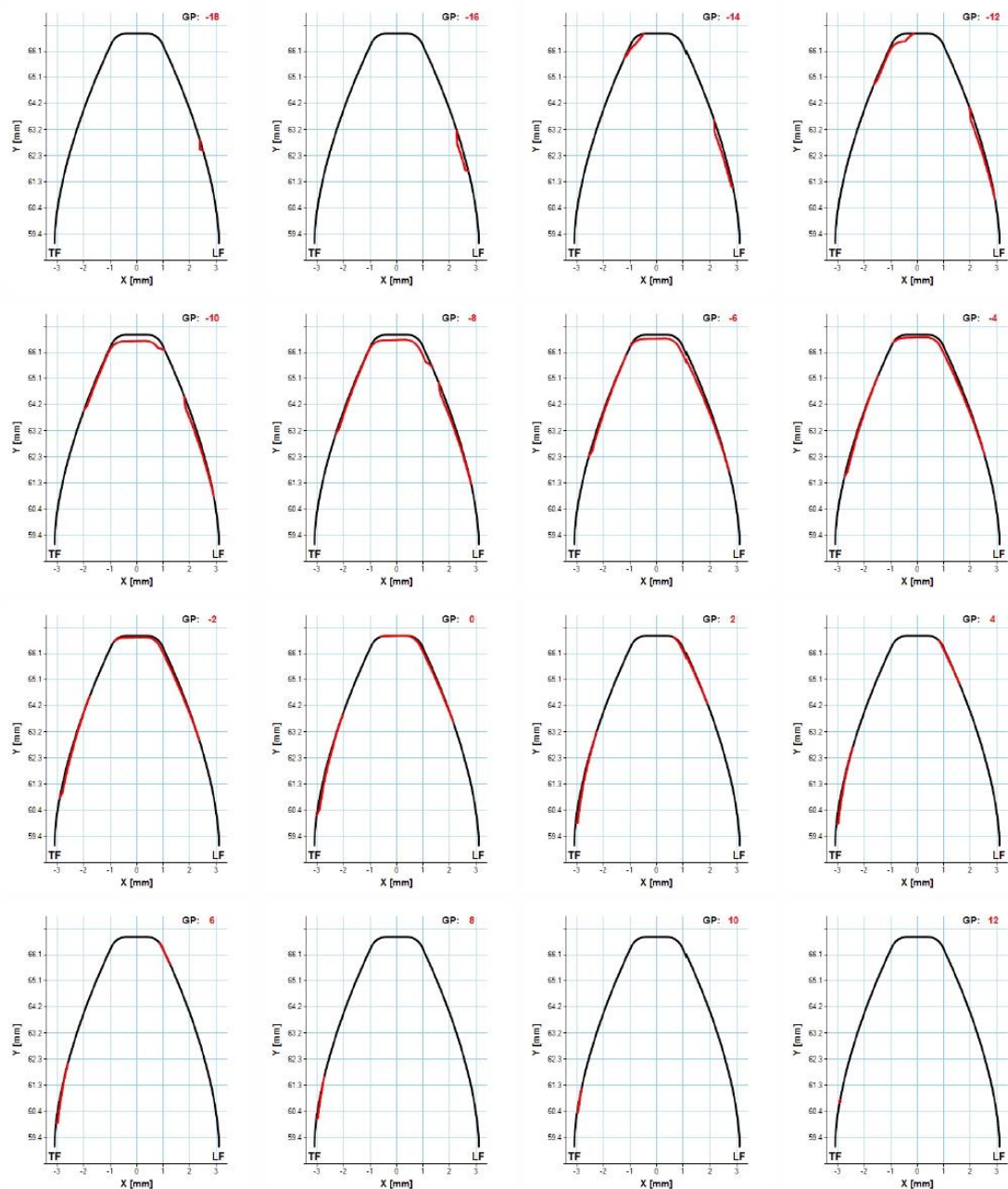
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

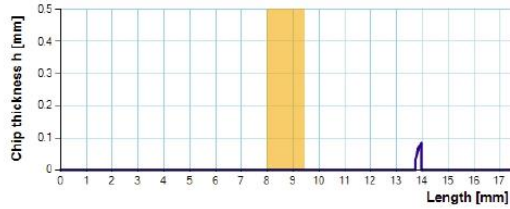
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	6.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

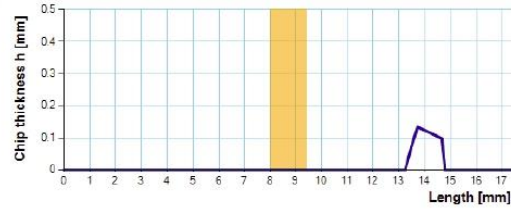


CHIP THICKNESS CHARTS

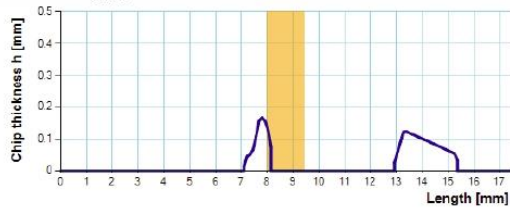
GP -18, h_{\max} : 0.0834 mm, Section area: 0.0189 mm²



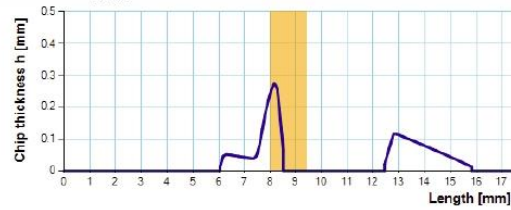
GP -16, h_{\max} : 0.1337 mm, Section area: 0.1478 mm²



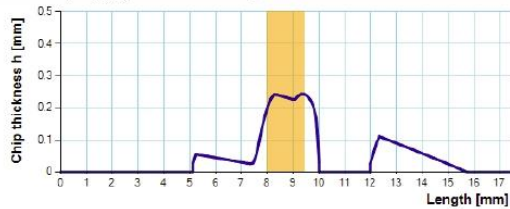
GP -14, h_{\max} : 0.166 mm, Section area: 0.3147 mm²



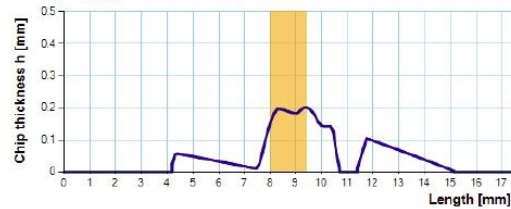
GP -12, h_{\max} : 0.2747 mm, Section area: 0.4518 mm²



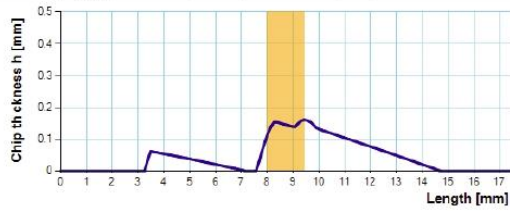
GP -10, h_{\max} : 0.2434 mm, Section area: 0.7689 mm²



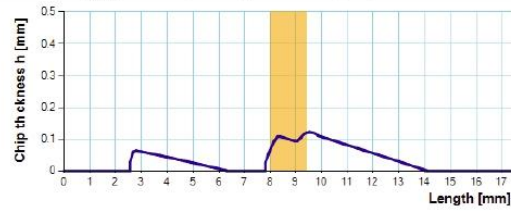
GP -8, h_{\max} : 0.2012 mm, Section area: 0.7847 mm²



GP -6, h_{\max} : 0.1598 mm, Section area: 0.7323 mm²



GP -4, h_{\max} : 0.1218 mm, Section area: 0.5652 mm²



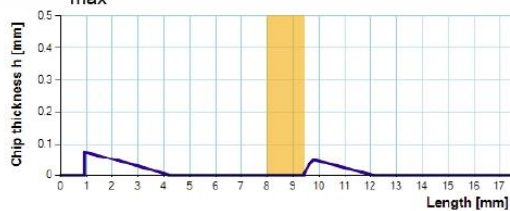
GP -2, h_{\max} : 0.0916 mm, Section area: 0.4154 mm²



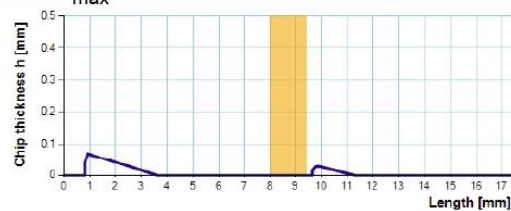
GP 0, h_{\max} : 0.0728 mm, Section area: 0.2855 mm²



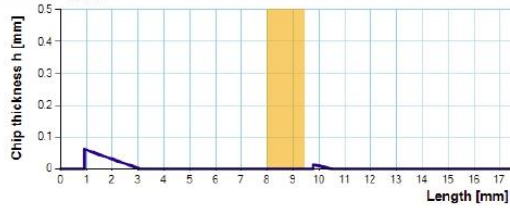
GP 2, h_{\max} : 0.0756 mm, Section area: 0.202 mm²



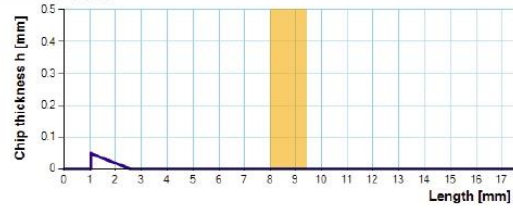
GP 4, h_{\max} : 0.069 mm, Section area: 0.1264 mm²



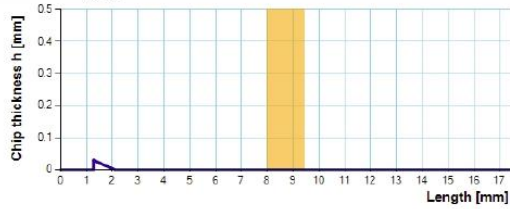
GP 6, h_{\max} : 0.0612 mm, Section area: 0.0736 mm²



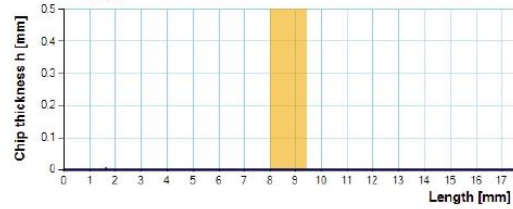
GP 8, h_{\max} : 0.0483 mm, Section area: 0.037 mm²



GP 10, h_{\max} : 0.0292 mm, Section area: 0.0122 mm²

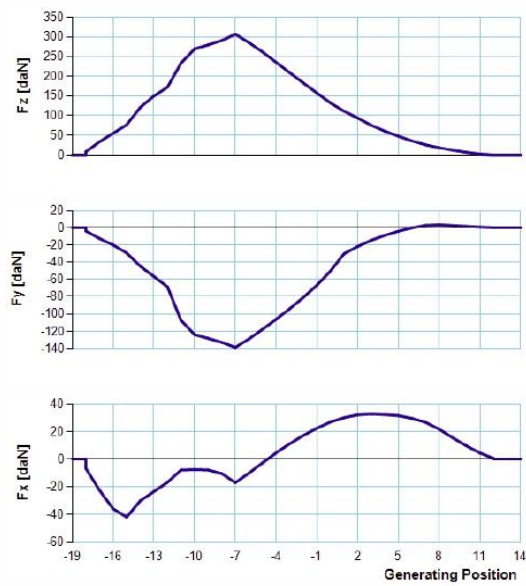


GP 12, h_{\max} : 0.003 mm, Section area: 0.0002 mm²

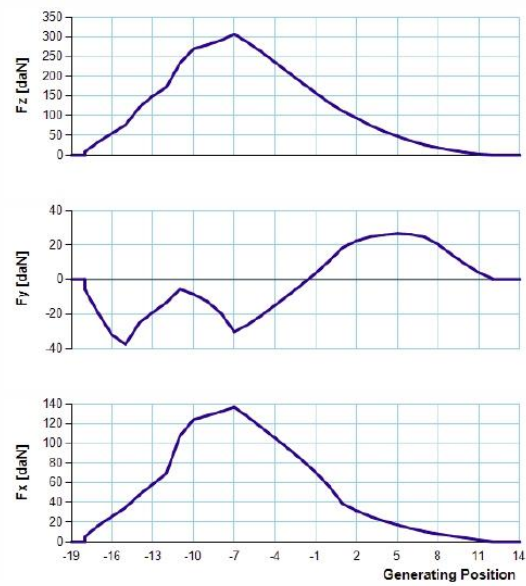


SINGLE GAP FORCES

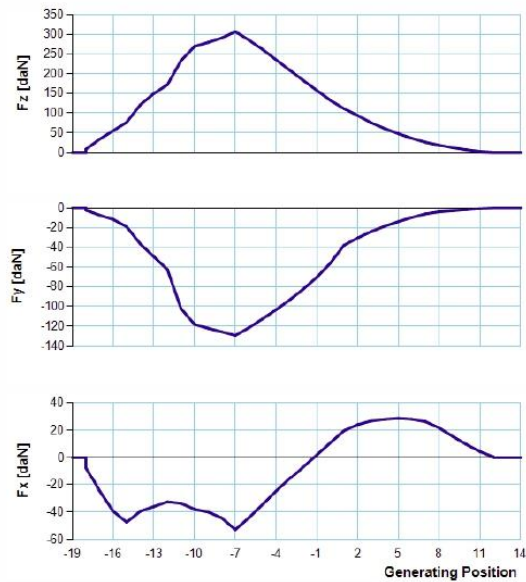
System 1



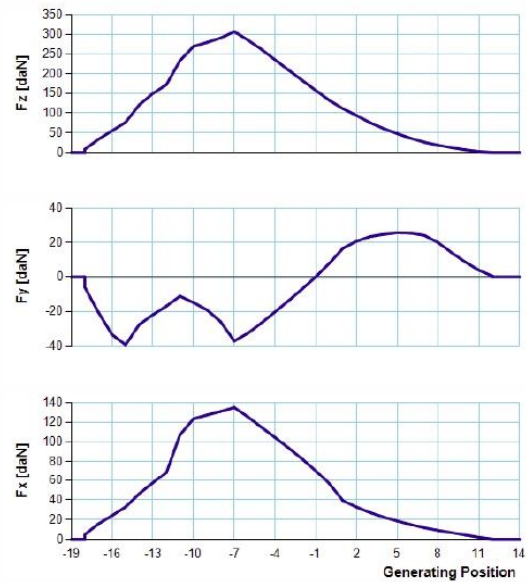
System 3



System 2

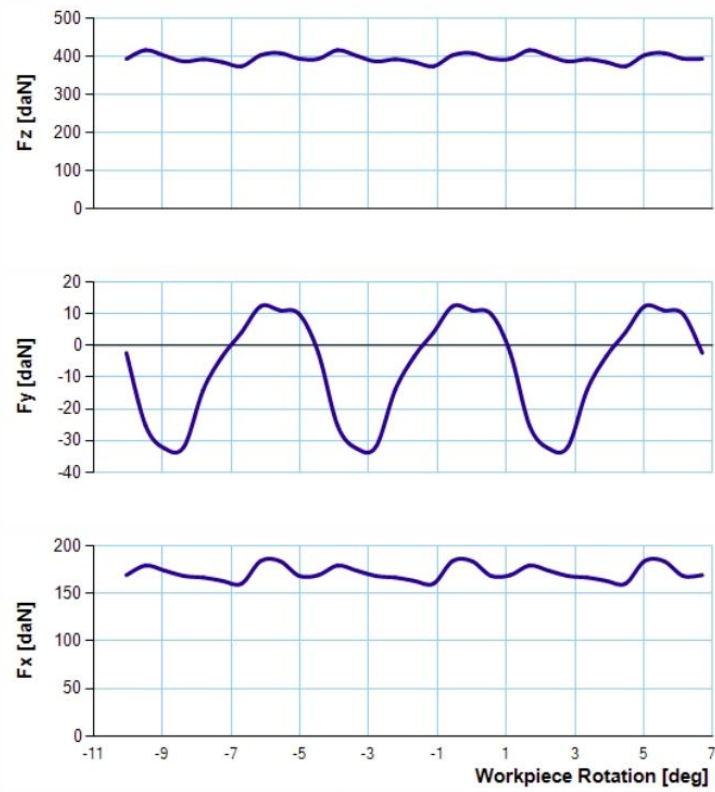


System 4

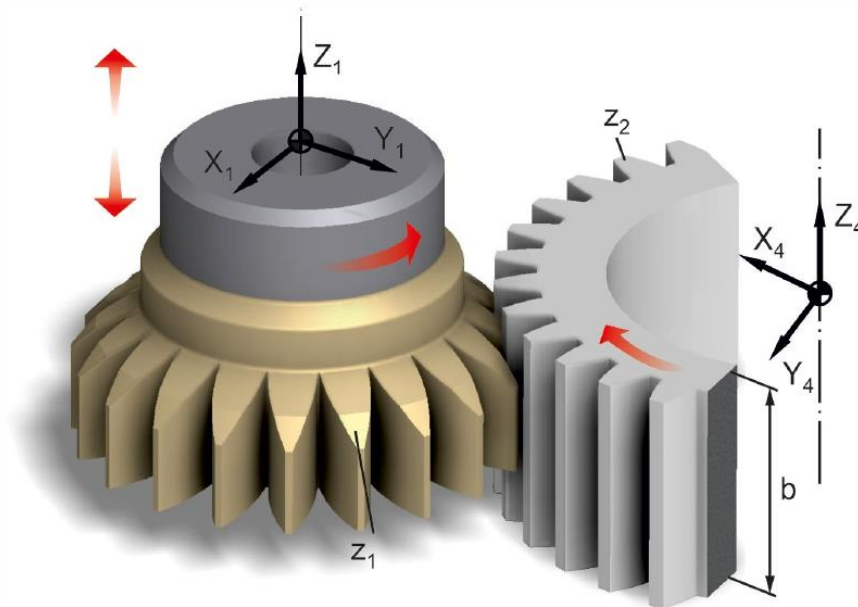


EX - SP Case 6

GLOBAL FORCES



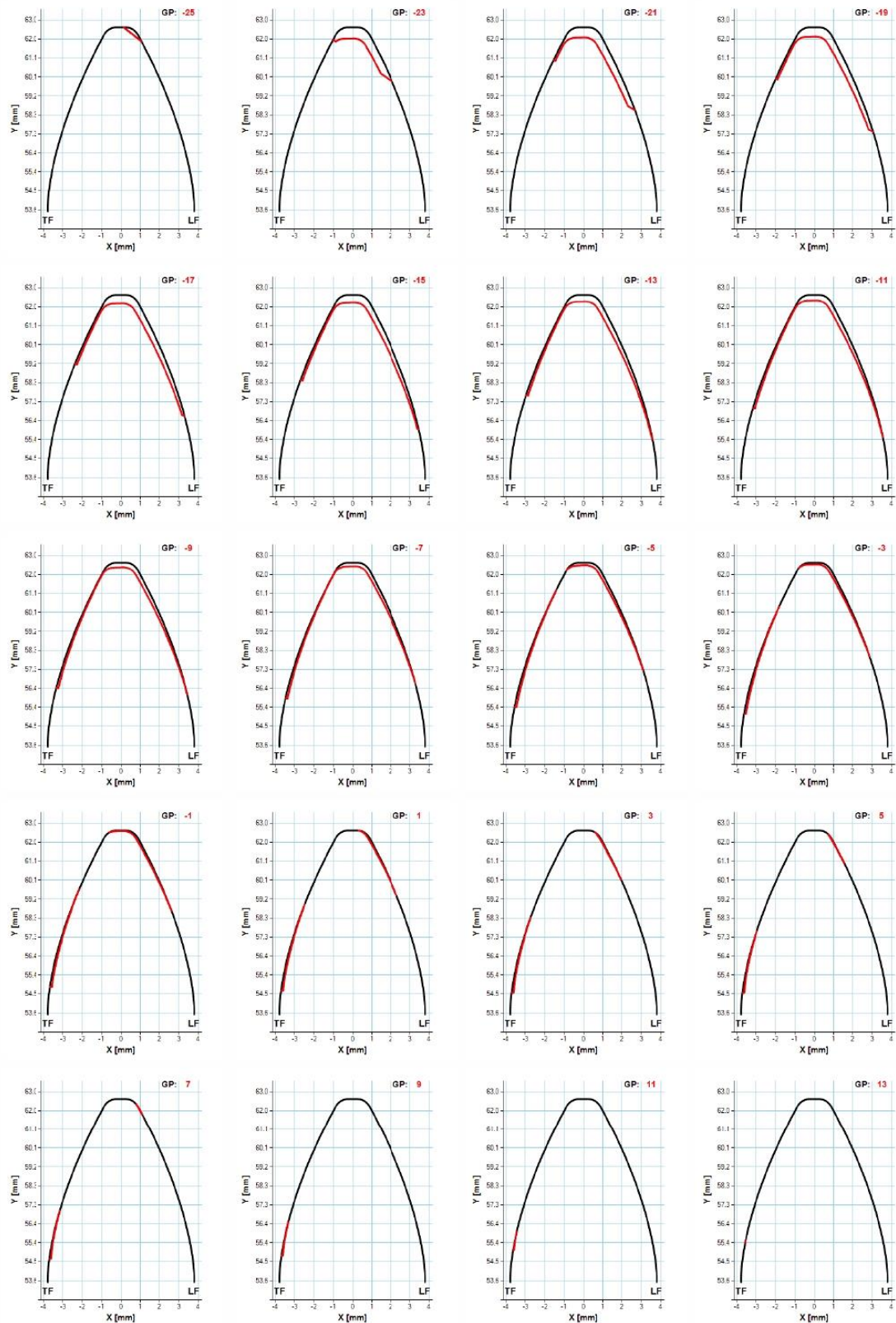
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

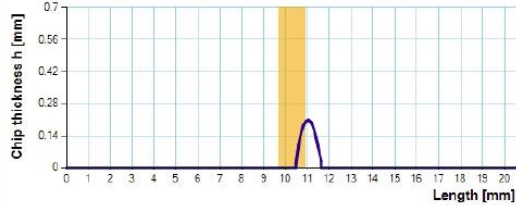
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	4 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

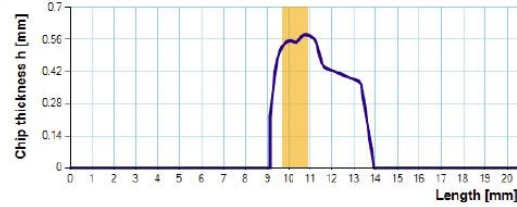


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -25, h_{\max} : 0.2079 mm, Section area: 0.1514 mm²



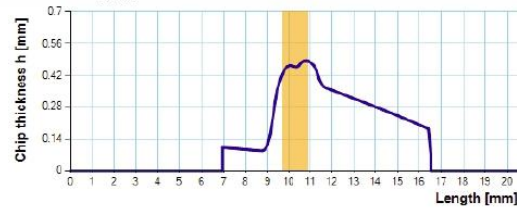
GP -23, h_{\max} : 0.5805 mm, Section area: 1.8072 mm²



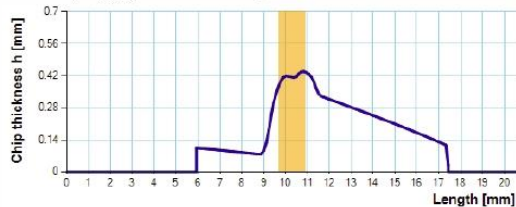
GP -21, h_{\max} : 0.533 mm, Section area: 2.2646 mm²



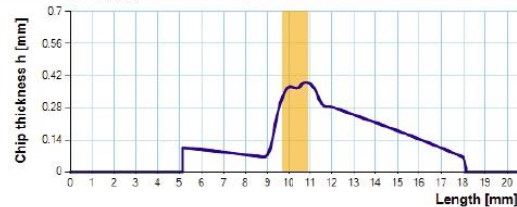
GP -19, h_{\max} : 0.4856 mm, Section area: 2.4053 mm²



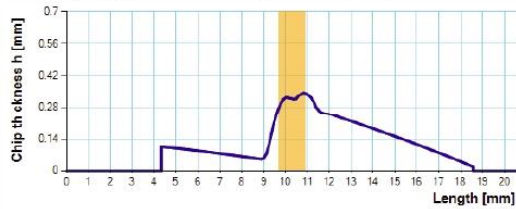
GP -17, h_{\max} : 0.4381 mm, Section area: 2.3667 mm²



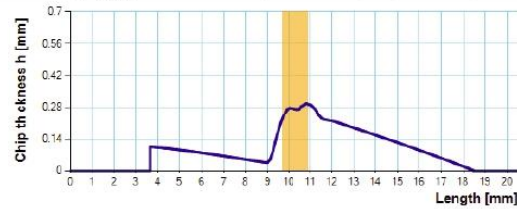
GP -15, h_{\max} : 0.391 mm, Section area: 2.2207 mm²



GP -13, h_{\max} : 0.3445 mm, Section area: 2.0101 mm²



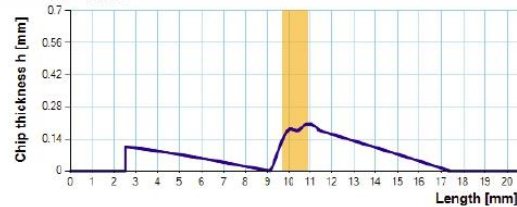
GP -11, h_{\max} : 0.2979 mm, Section area: 1.7618 mm²



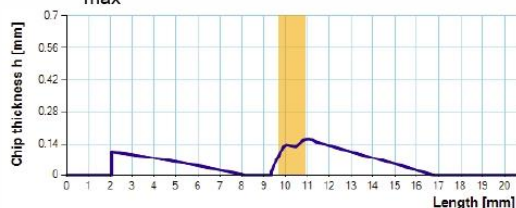
GP -9, h_{\max} : 0.2513 mm, Section area: 1.5041 mm²



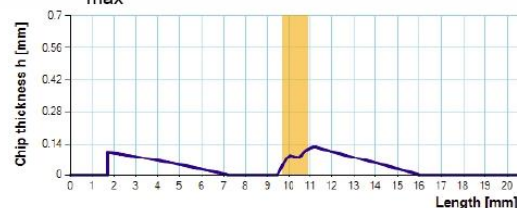
GP -7, h_{\max} : 0.2058 mm, Section area: 1.2471 mm²



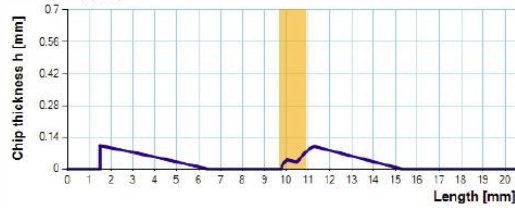
GP -5, h_{\max} : 0.1619 mm, Section area: 0.9912 mm²



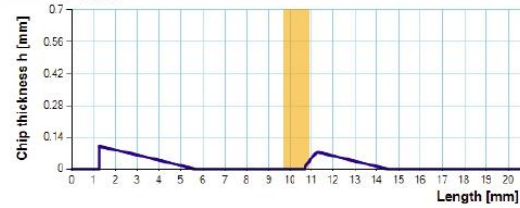
GP -3, h_{\max} : 0.1272 mm, Section area: 0.7585 mm²



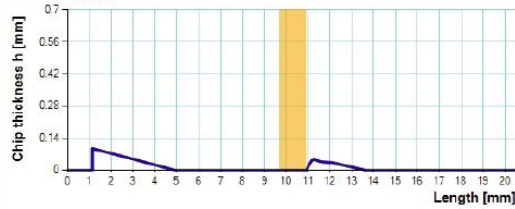
GP -1, h_{max} : 0.1017 mm, Section area: 0.5476 mm²



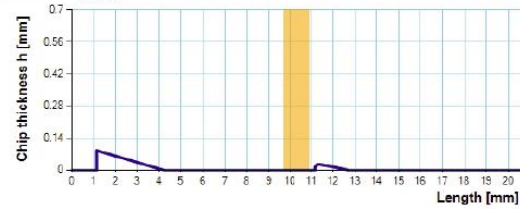
GP 1, h_{max} : 0.0992 mm, Section area: 0.3738 mm²



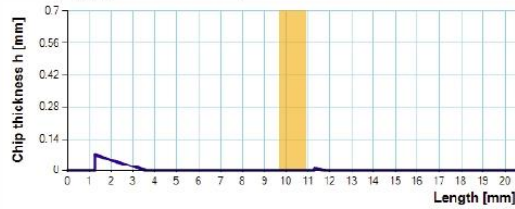
GP 3, h_{max} : 0.0943 mm, Section area: 0.2507 mm²



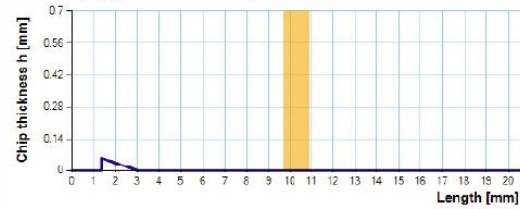
GP 5, h_{max} : 0.0858 mm, Section area: 0.1604 mm²



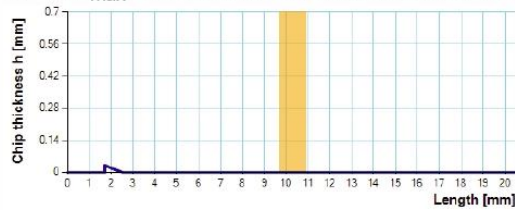
GP 7, h_{max} : 0.0724 mm, Section area: 0.0934 mm²



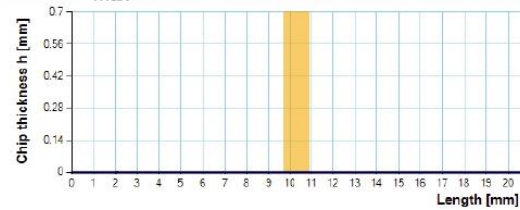
GP 9, h_{max} : 0.0568 mm, Section area: 0.0487 mm²



GP 11, h_{max} : 0.0302 mm, Section area: 0.0156 mm²

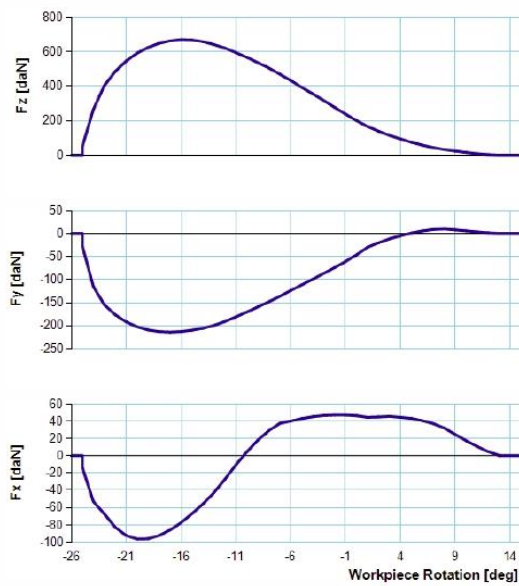


GP 13, h_{max} : 0.0003 mm, Section area: 0.0001 mm²

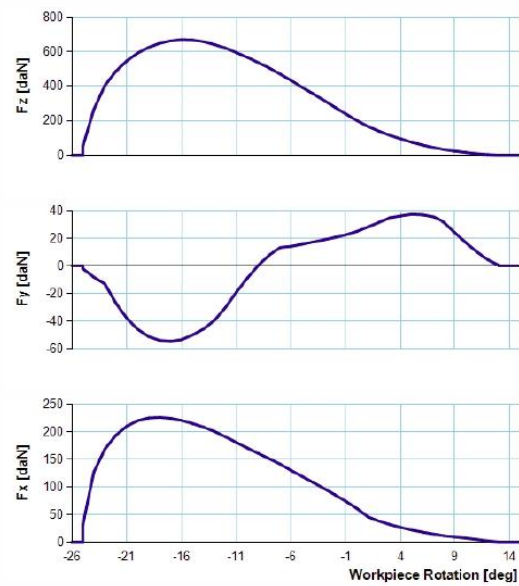


SINGLE GAP FORCES

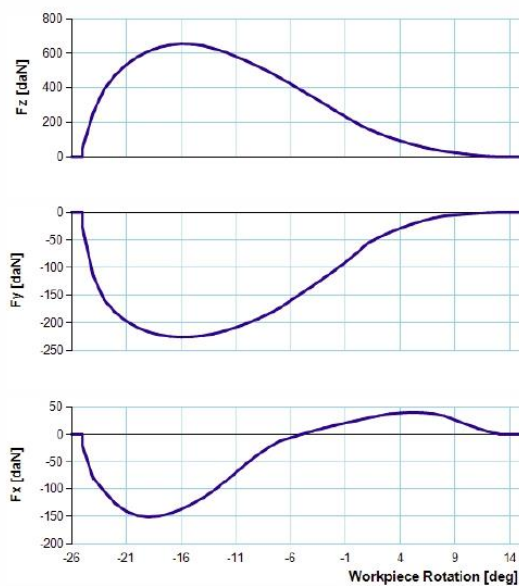
System 1



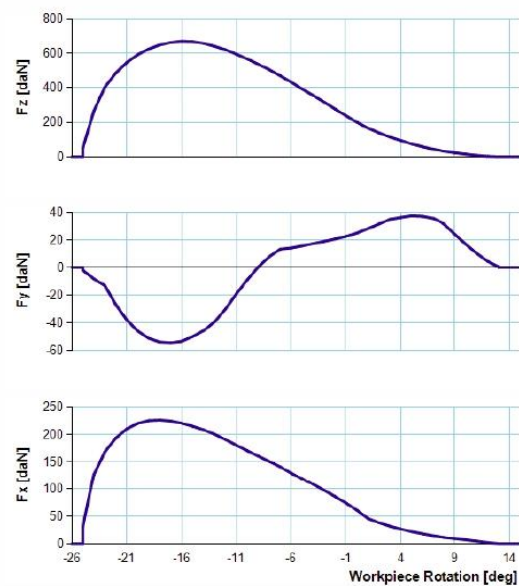
System 3



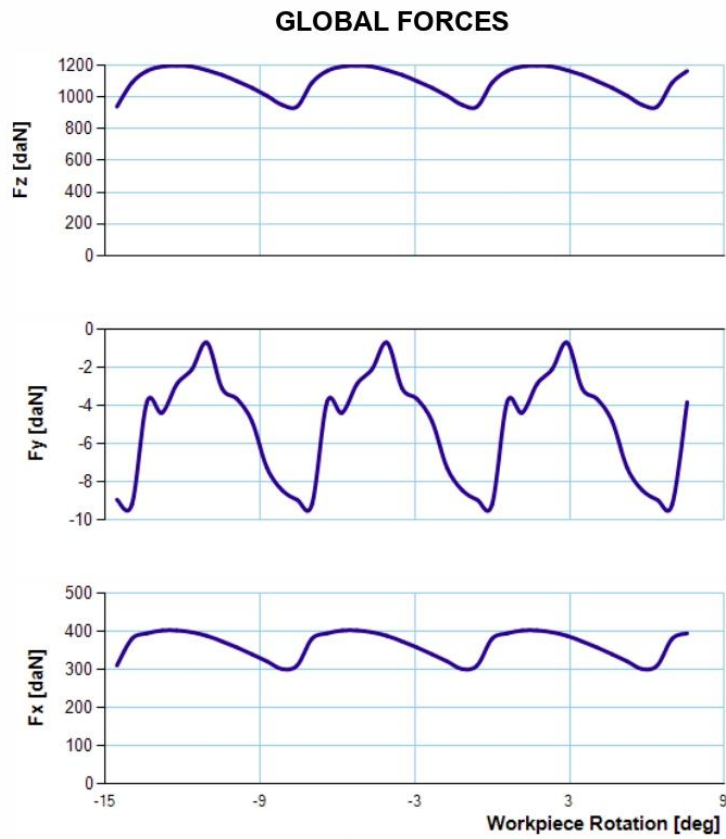
System 2



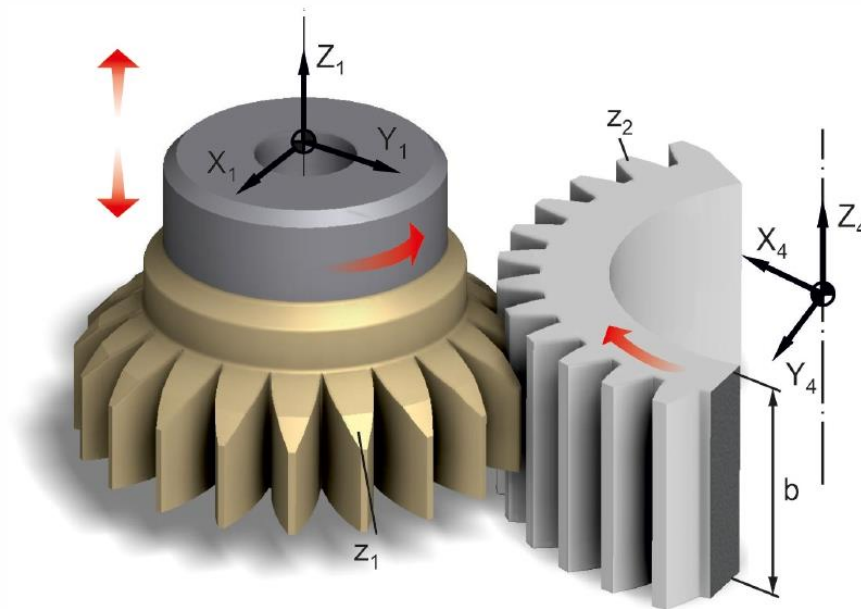
System 4



EX - SP Case 7



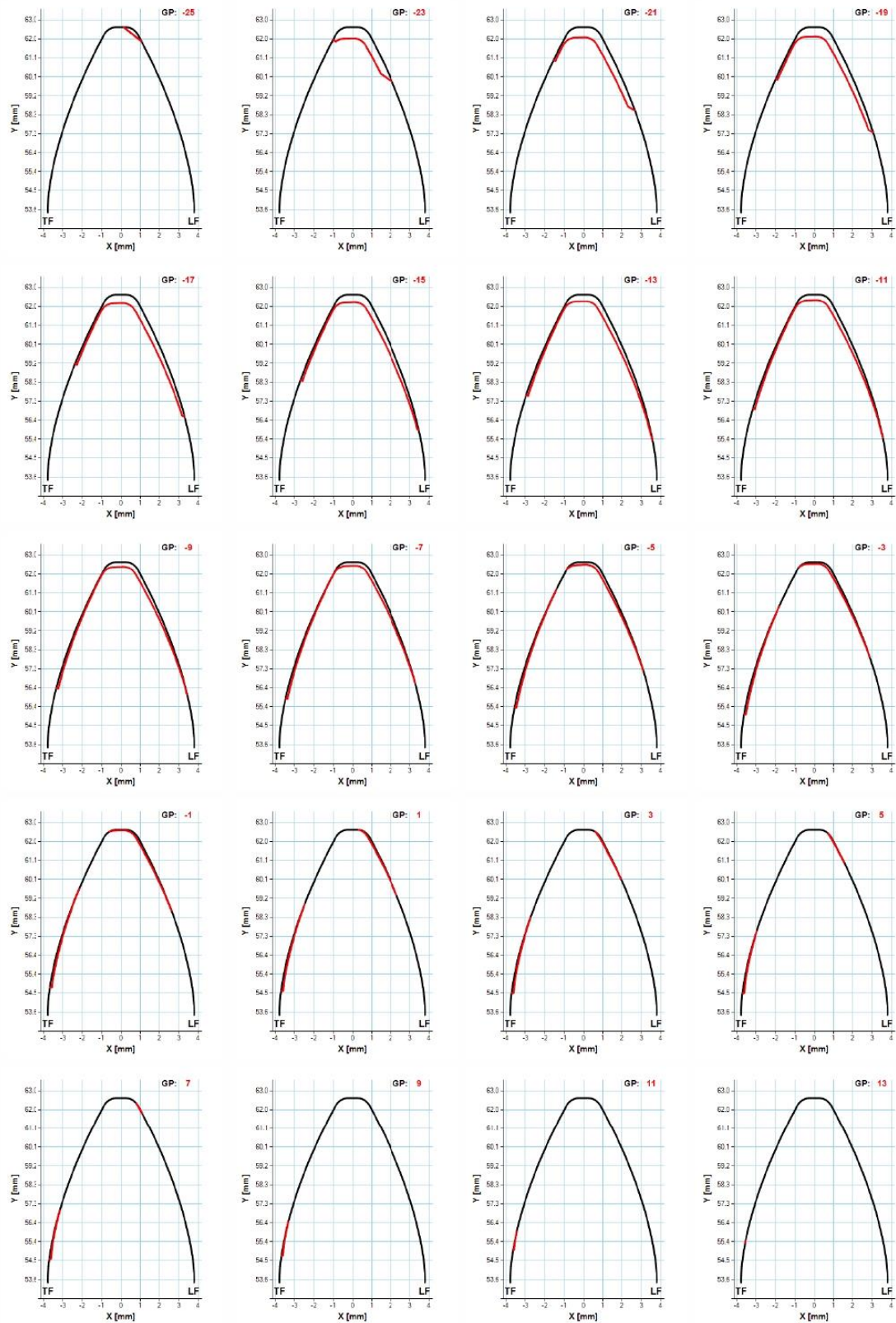
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

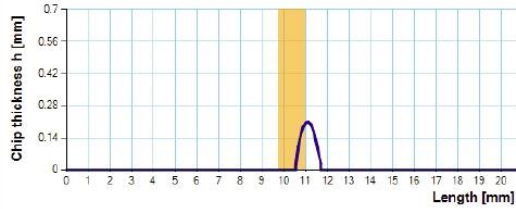
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	8 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS



CHIP THICKNESS CHARTS

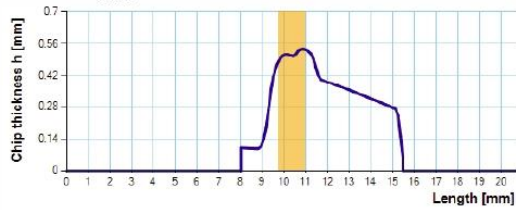
GP -25, h_{\max} : 0.2088 mm, Section area: 0.1525 mm²



GP -23, h_{\max} : 0.5843 mm, Section area: 1.8208 mm²



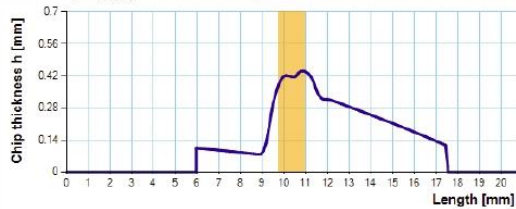
GP -21, h_{\max} : 0.5363 mm, Section area: 2.2812 mm²



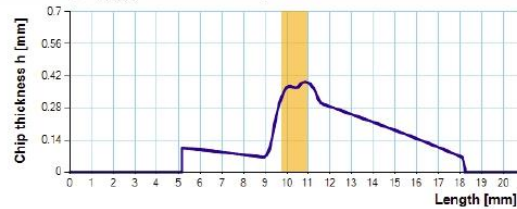
GP -19, h_{\max} : 0.4886 mm, Section area: 2.4223 mm²



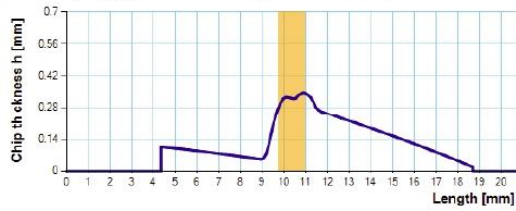
GP -17, h_{\max} : 0.4411 mm, Section area: 2.3812 mm²



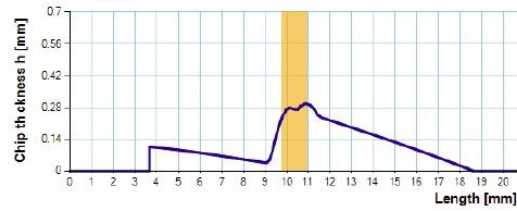
GP -15, h_{\max} : 0.3937 mm, Section area: 2.2396 mm²



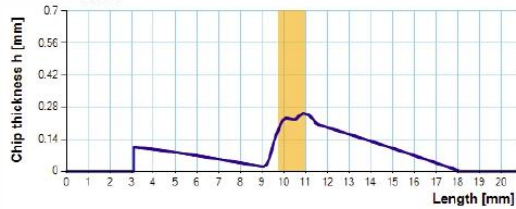
GP -13, h_{\max} : 0.3467 mm, Section area: 2.0271 mm²



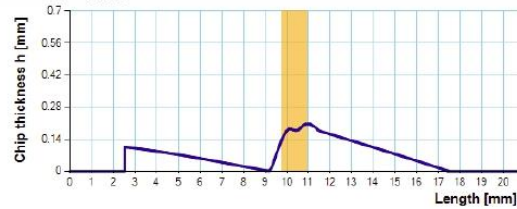
GP -11, h_{\max} : 0.2998 mm, Section area: 1.7765 mm²



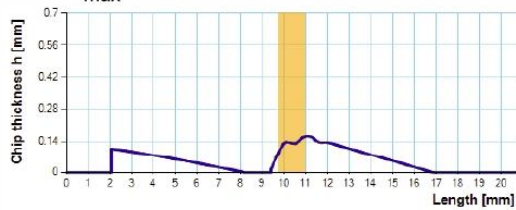
GP -9, h_{\max} : 0.253 mm, Section area: 1.5179 mm²



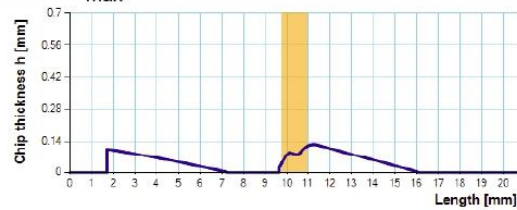
GP -7, h_{\max} : 0.2066 mm, Section area: 1.2564 mm²



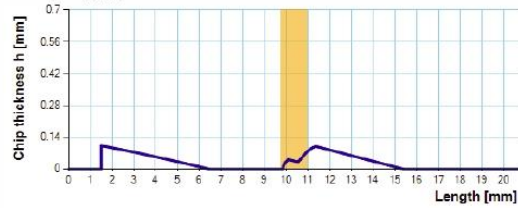
GP -5, h_{\max} : 0.1628 mm, Section area: 0.9948 mm²



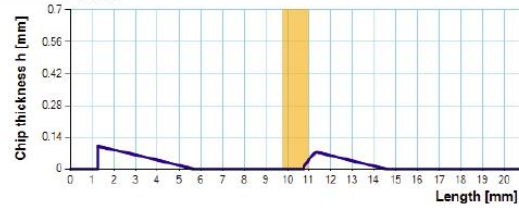
GP -3, h_{\max} : 0.1249 mm, Section area: 0.7633 mm²



GP -1, h_{\max} : 0.1018 mm, Section area: 0.5515 mm²



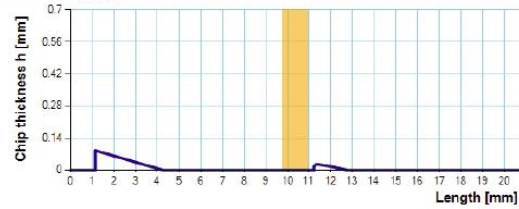
GP 1, h_{\max} : 0.0992 mm, Section area: 0.3765 mm²



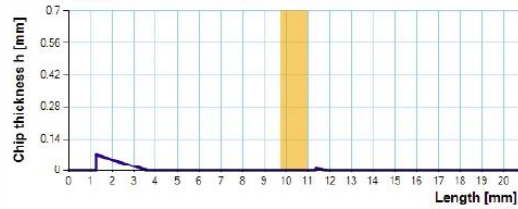
GP 3, h_{\max} : 0.0943 mm, Section area: 0.2521 mm²



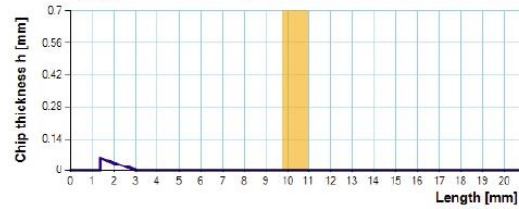
GP 5, h_{\max} : 0.0858 mm, Section area: 0.1616 mm²



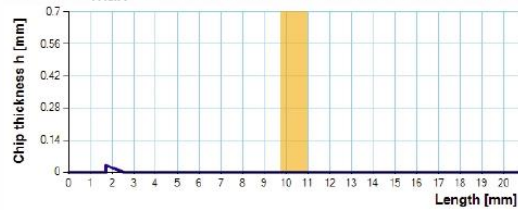
GP 7, h_{\max} : 0.0724 mm, Section area: 0.0941 mm²



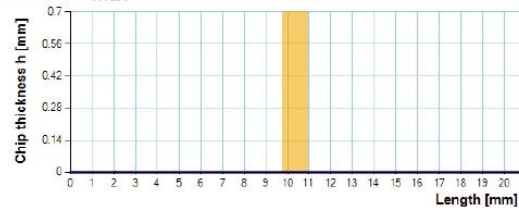
GP 9, h_{\max} : 0.0568 mm, Section area: 0.0491 mm²



GP 11, h_{\max} : 0.0303 mm, Section area: 0.0157 mm²

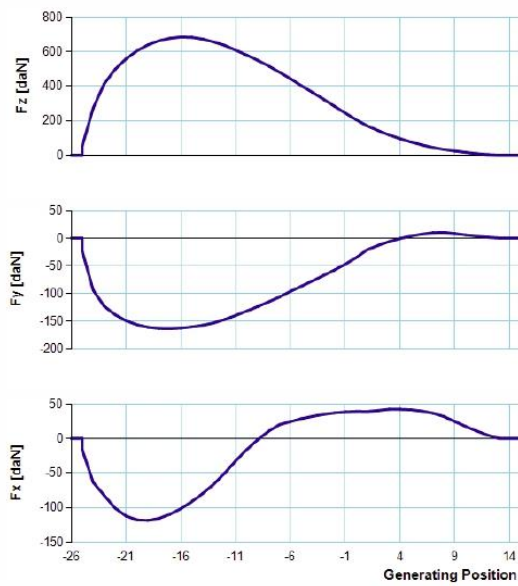


GP 13, h_{\max} : 0.0004 mm, Section area: 0.0001 mm²

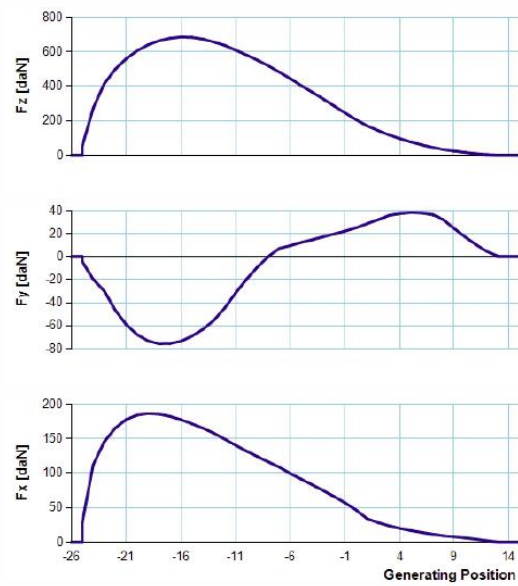


SINGLE GAP FORCES

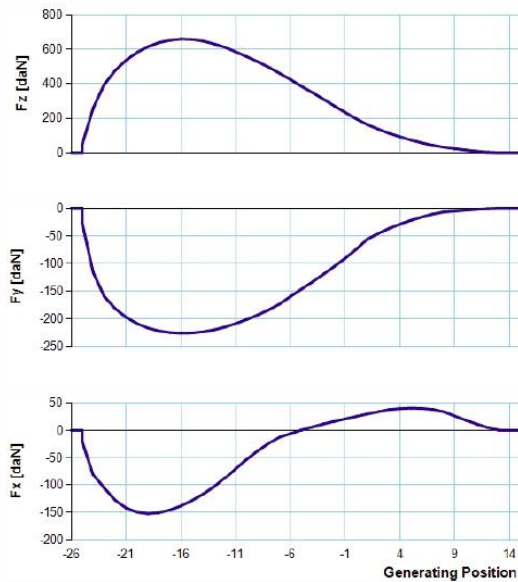
System 1



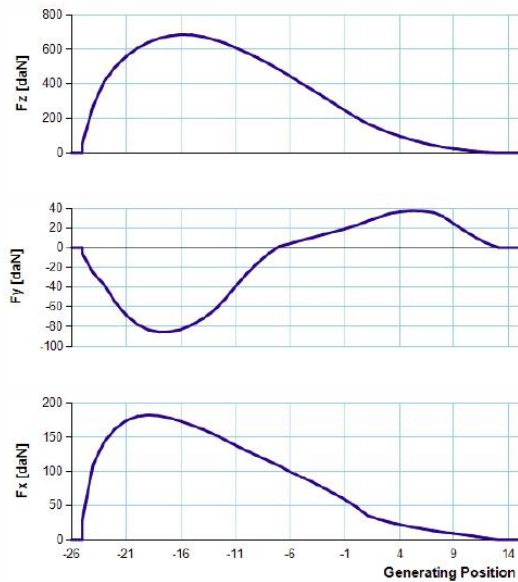
System 3



System 2

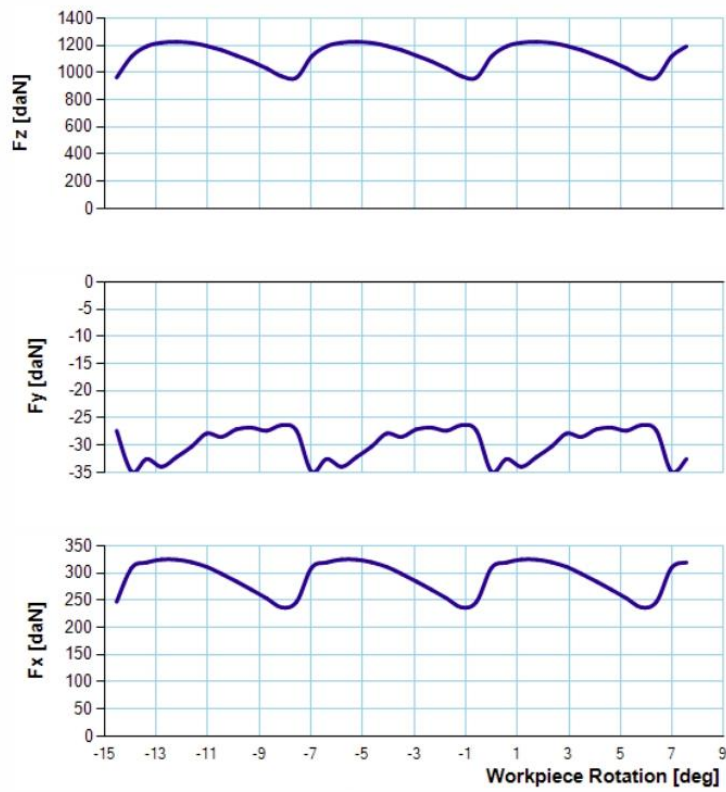


System 4

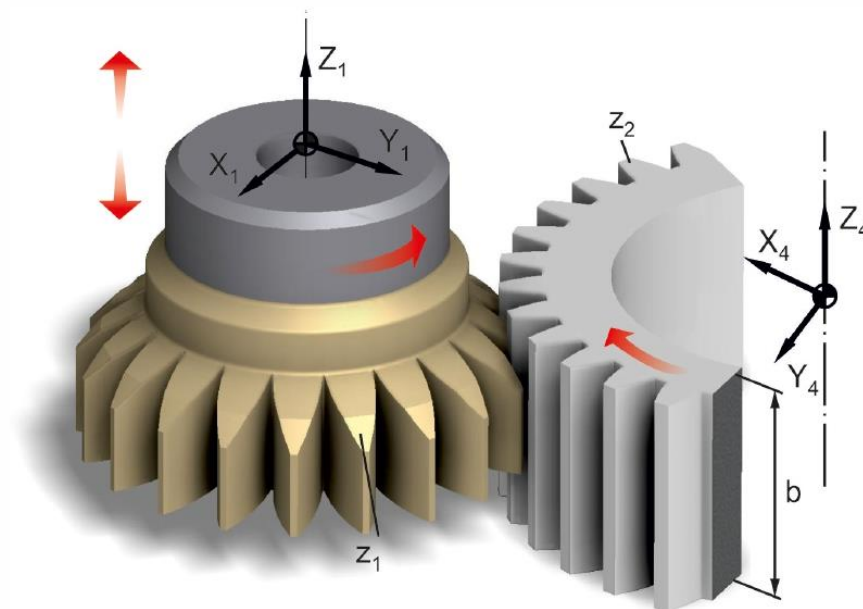


EX - SP Case 8

GLOBAL FORCES



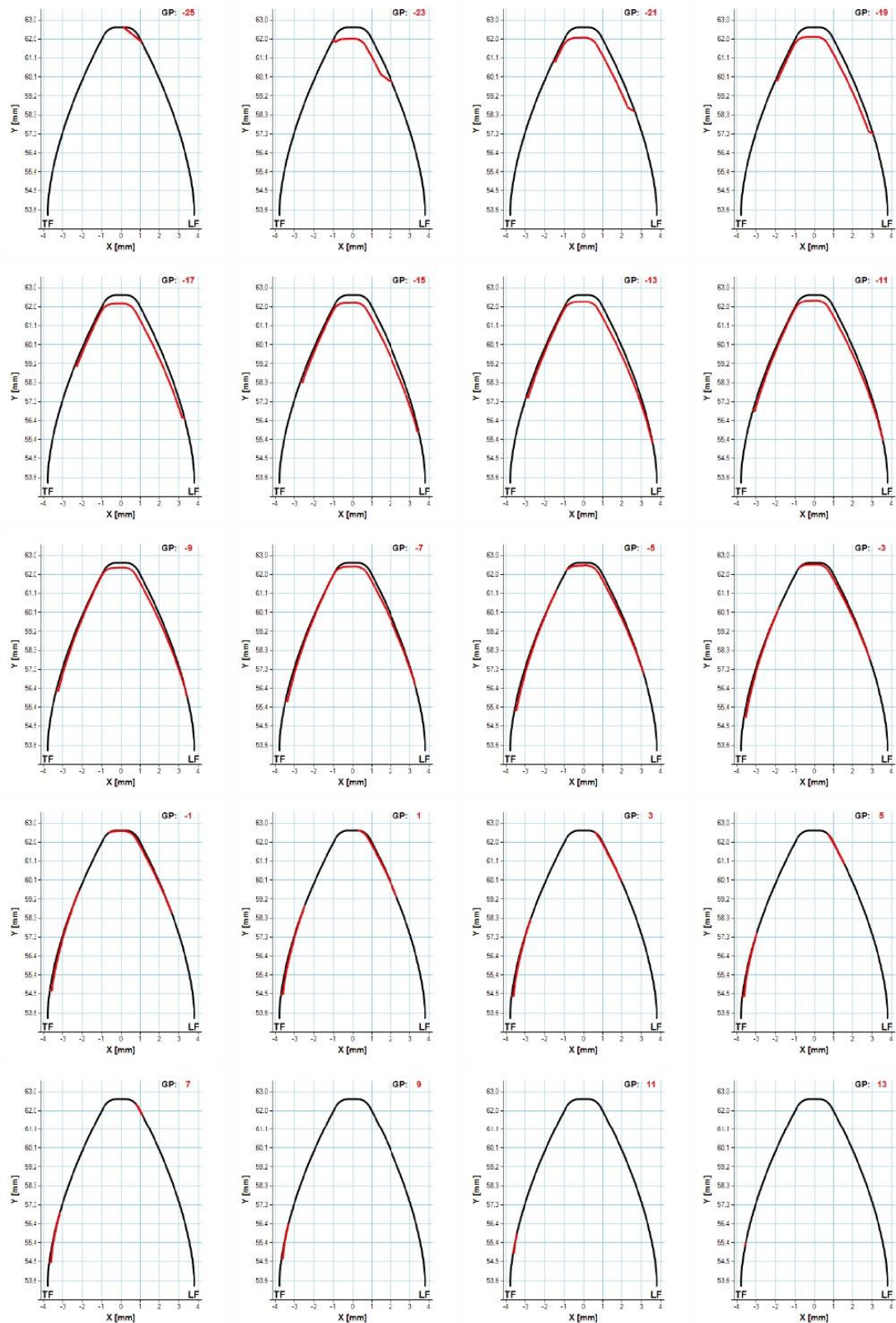
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

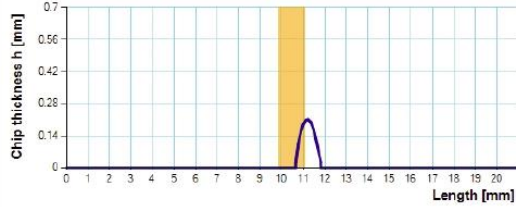
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	12 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

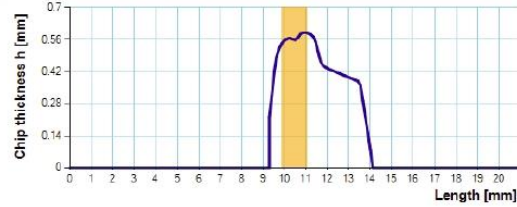


CHIP THICKNESS CHARTS

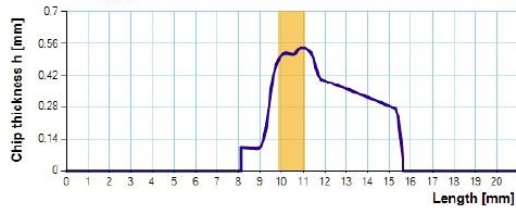
GP -25, h_{max} : 0.2102 mm, Section area: 0.1544 mm²



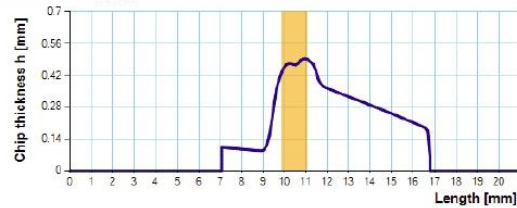
GP -23, h_{max} : 0.5908 mm, Section area: 1.8433 mm²



GP -21, h_{max} : 0.5418 mm, Section area: 2.3087 mm²



GP -19, h_{max} : 0.4936 mm, Section area: 2.4528 mm²



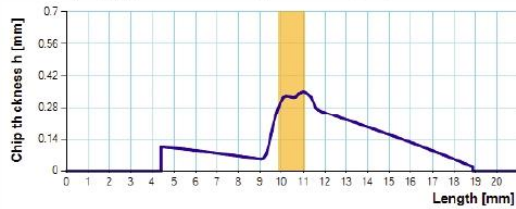
GP -17, h_{max} : 0.446 mm, Section area: 2.4107 mm²



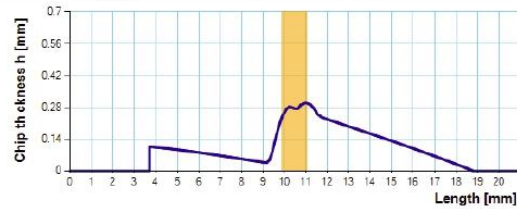
GP -15, h_{max} : 0.3981 mm, Section area: 2.2663 mm²



GP -13, h_{max} : 0.3502 mm, Section area: 2.0519 mm²



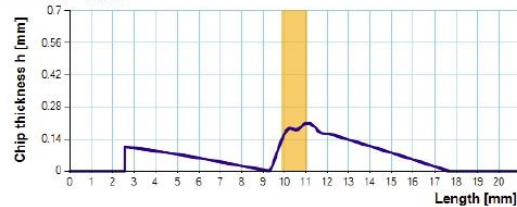
GP -11, h_{max} : 0.303 mm, Section area: 1.7992 mm²



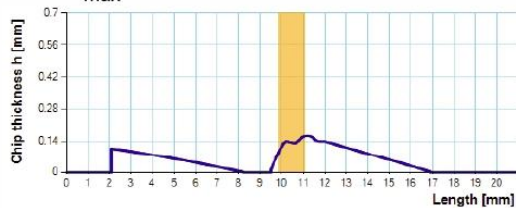
GP -9, h_{max} : 0.2557 mm, Section area: 1.5362 mm²



GP -7, h_{max} : 0.2085 mm, Section area: 1.2689 mm²



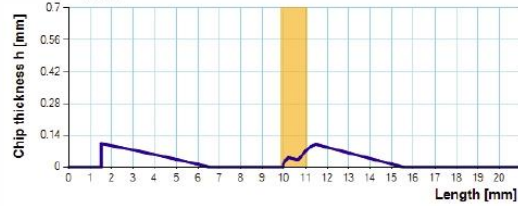
GP -5, h_{max} : 0.1642 mm, Section area: 1.0082 mm²



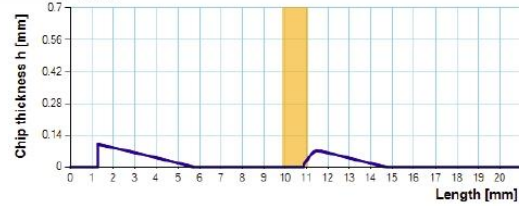
GP -3, h_{max} : 0.1293 mm, Section area: 0.7738 mm²



GP -1, h_{\max} : 0.1019 mm, Section area: 0.5583 mm²



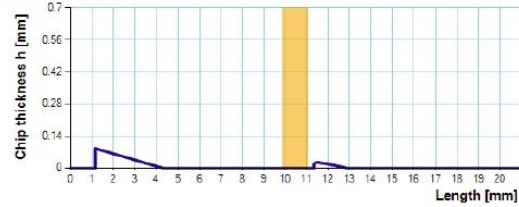
GP 1, h_{\max} : 0.0993 mm, Section area: 0.3802 mm²



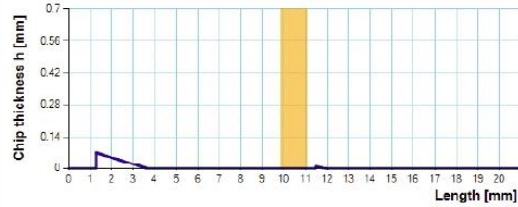
GP 3, h_{\max} : 0.0944 mm, Section area: 0.2552 mm²



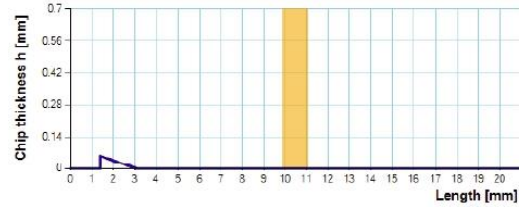
GP 5, h_{\max} : 0.0859 mm, Section area: 0.1635 mm²



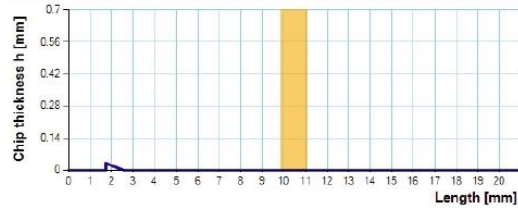
GP 7, h_{\max} : 0.0725 mm, Section area: 0.0952 mm²



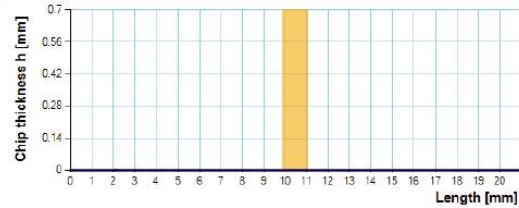
GP 9, h_{\max} : 0.0569 mm, Section area: 0.0497 mm²



GP 11, h_{\max} : 0.0304 mm, Section area: 0.0159 mm²

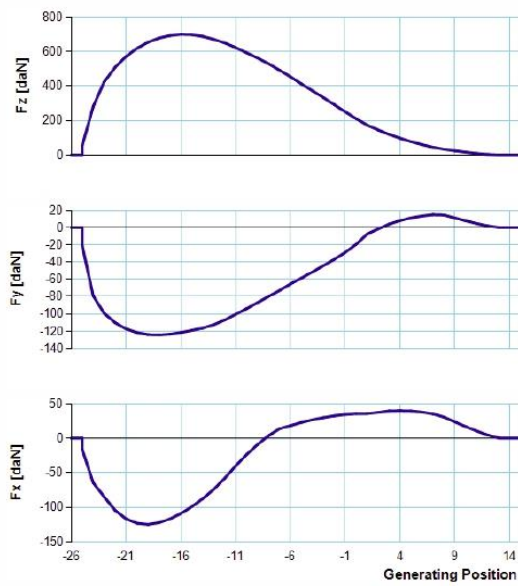


GP 13, h_{\max} : 0.0006 mm, Section area: 0.0001 mm²

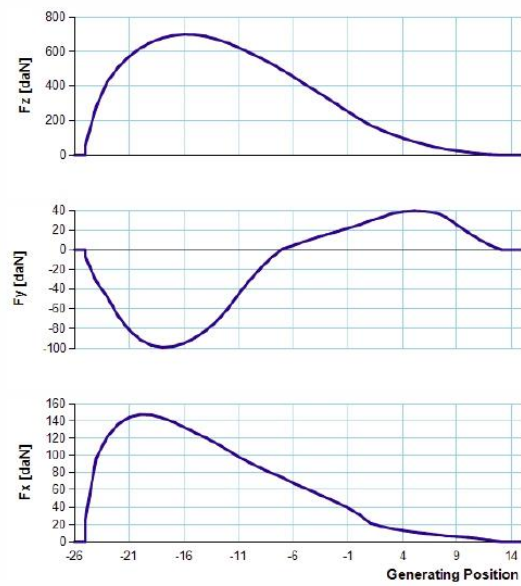


SINGLE GAP FORCES

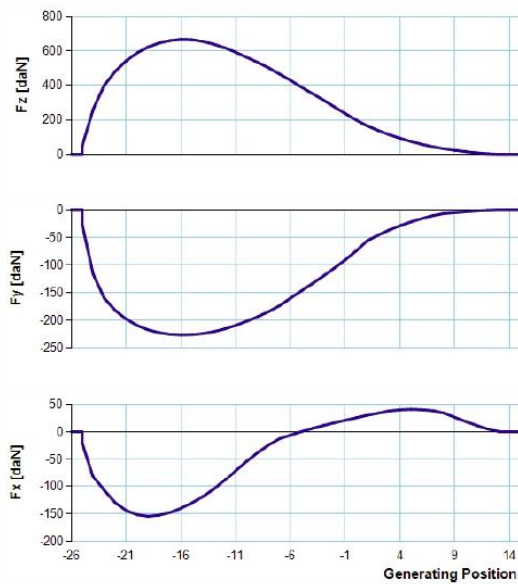
System 1



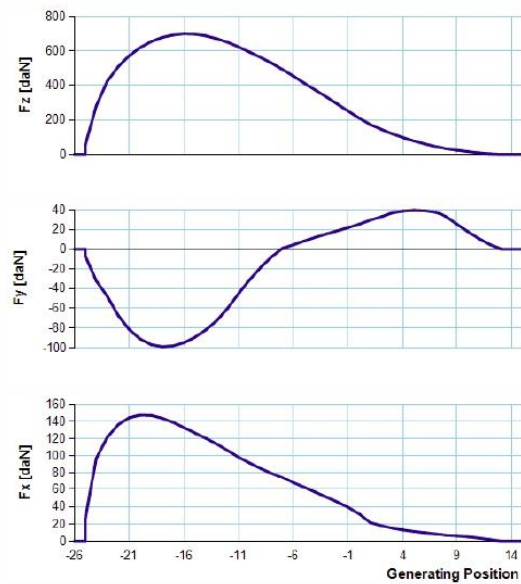
System 3



System 2

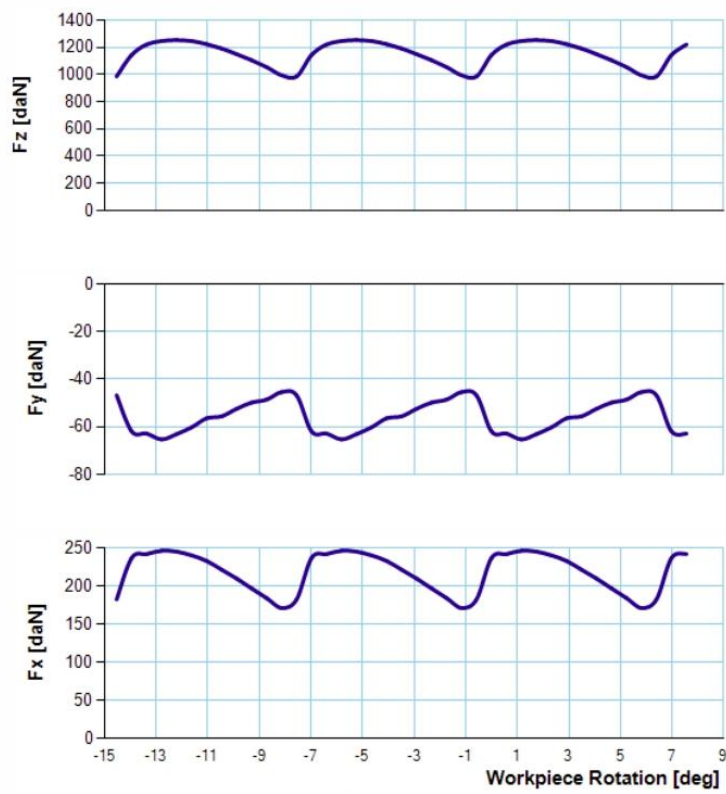


System 4

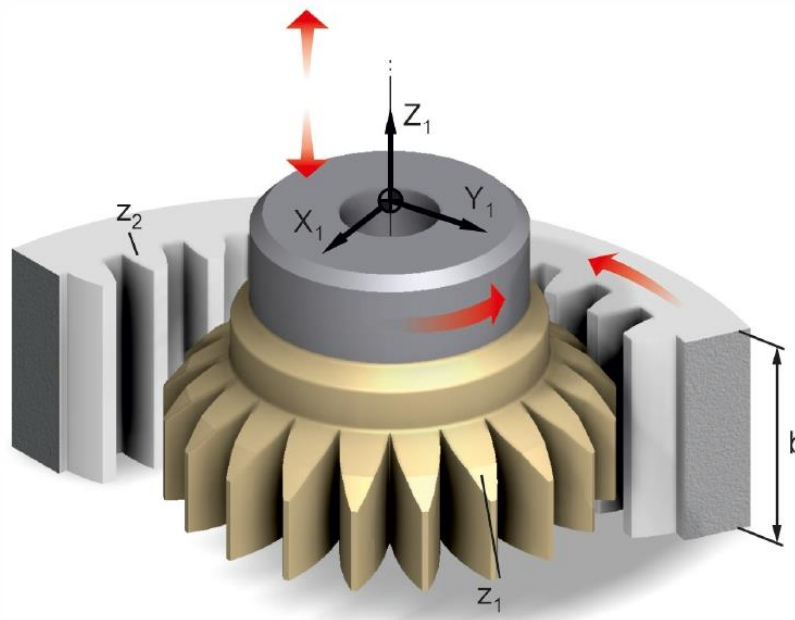


EX - SP Case 9

GLOBAL FORCES



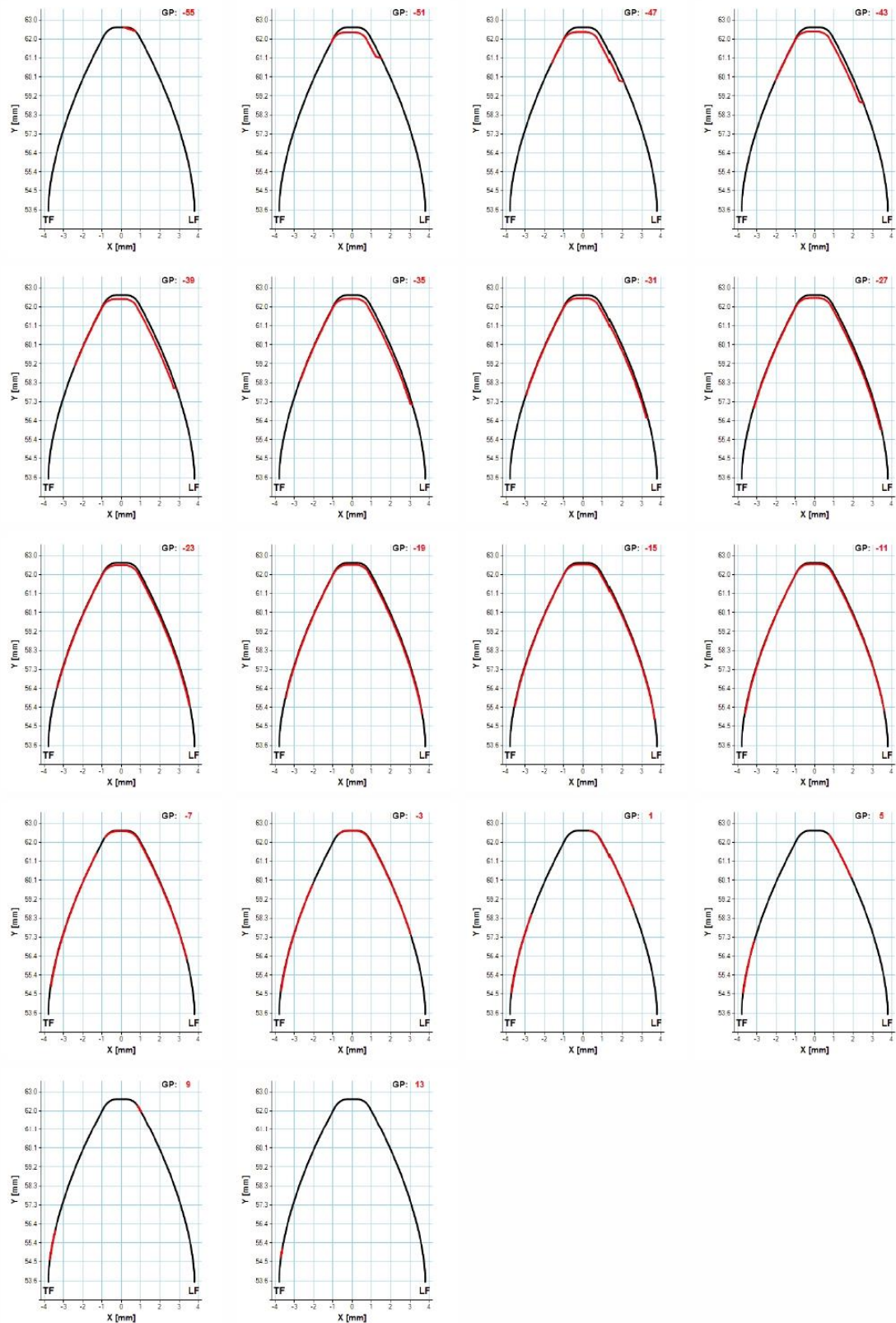
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

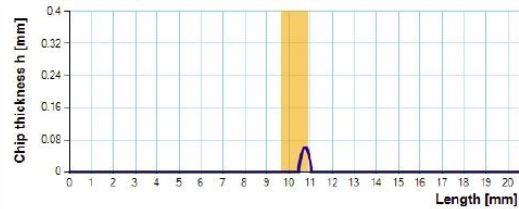
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

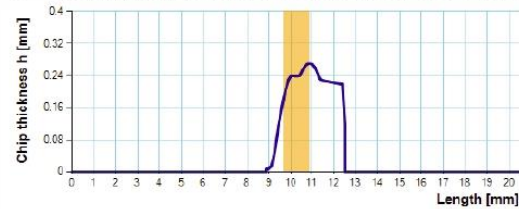


CHIP THICKNESS CHARTS

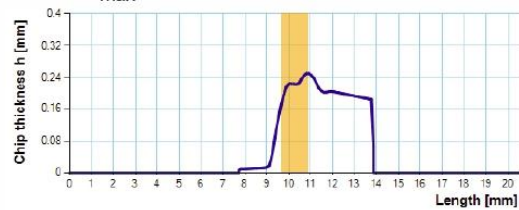
GP -55, h_{max} : 0.0607 mm, Section area: 0.0245 mm²



GP -51, h_{max} : 0.2701 mm, Section area: 0.675 mm²



GP -47, h_{max} : 0.2504 mm, Section area: 0.8919 mm²



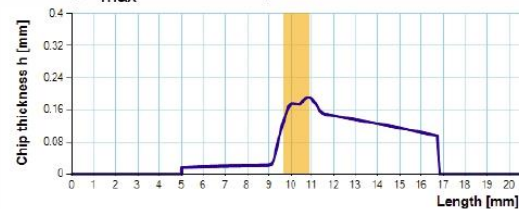
GP -43, h_{max} : 0.2302 mm, Section area: 1.0173 mm²



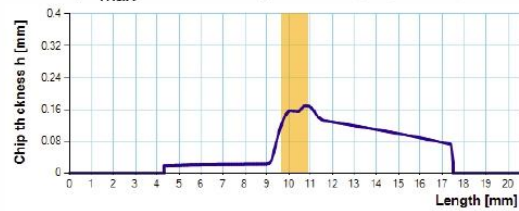
GP -39, h_{max} : 0.211 mm, Section area: 1.0725 mm²



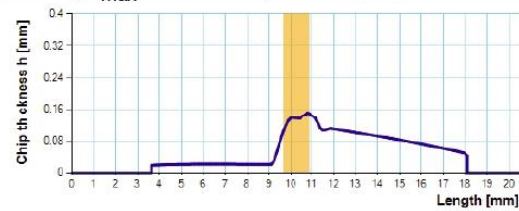
GP -35, h_{max} : 0.1912 mm, Section area: 1.0661 mm²



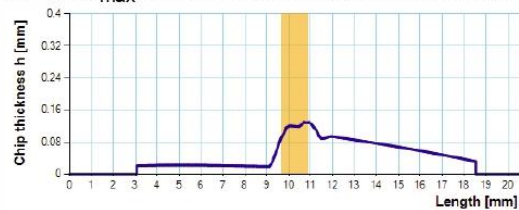
GP -31, h_{max} : 0.1699 mm, Section area: 1.0181 mm²



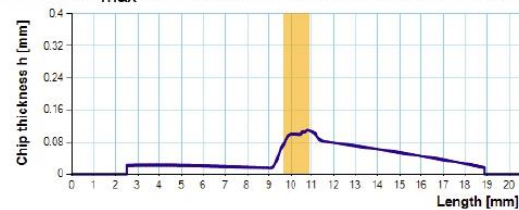
GP -27, h_{max} : 0.1513 mm, Section area: 0.9347 mm²



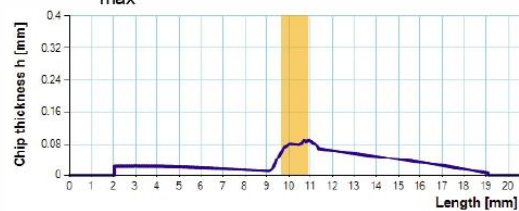
GP -23, h_{max} : 0.1298 mm, Section area: 0.8296 mm²



GP -19, h_{max} : 0.1108 mm, Section area: 0.7118 mm²



GP -15, h_{max} : 0.0896 mm, Section area: 0.5805 mm²



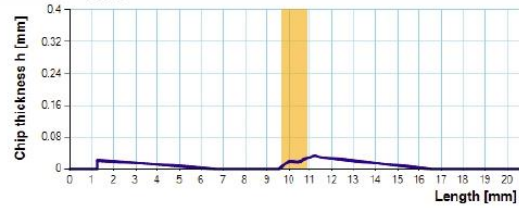
GP -11, h_{max} : 0.0699 mm, Section area: 0.4404 mm²



GP -7, h_{\max} : 0.047 mm, Section area: 0.2908 mm²



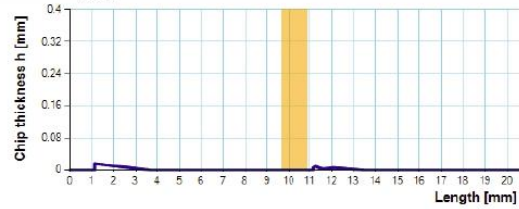
GP -3, h_{\max} : 0.0335 mm, Section area: 0.1754 mm²



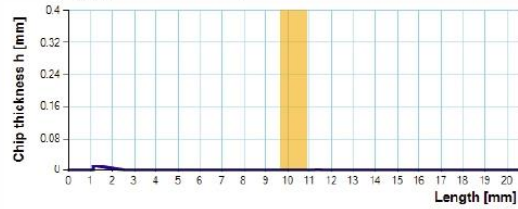
GP 1, h_{\max} : 0.0207 mm, Section area: 0.0831 mm²



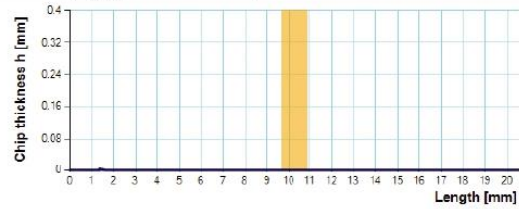
GP 5, h_{\max} : 0.0155 mm, Section area: 0.0304 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.0107 mm, Section area: 0.0078 mm²

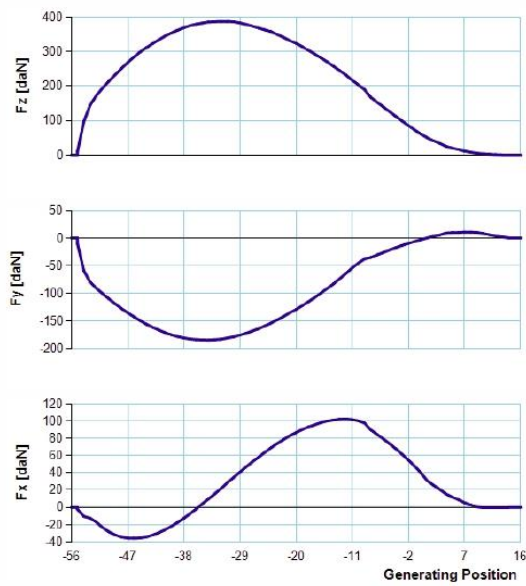


GP 13, h_{\max} : 0.0025 mm, Section area: 0.0006 mm²

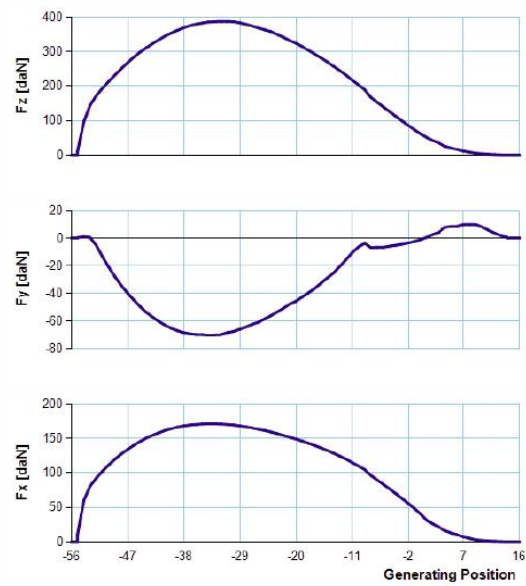


SINGLE GAP FORCES

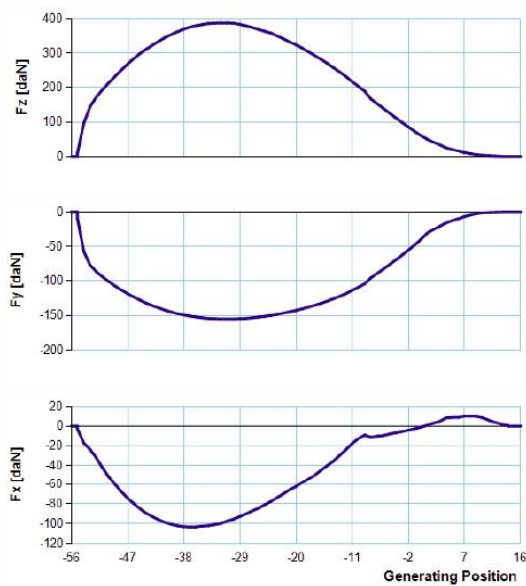
System 1



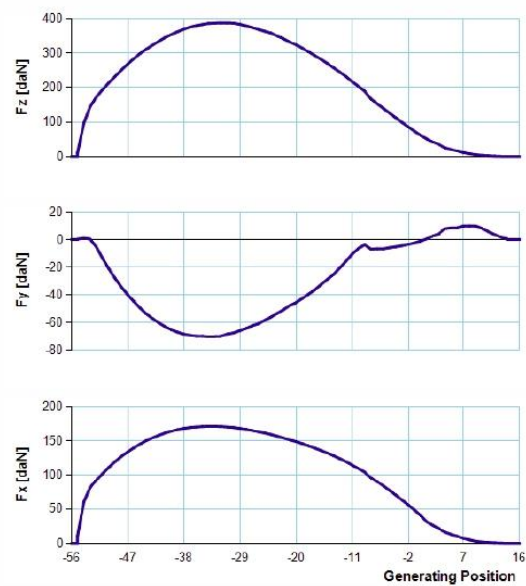
System 3



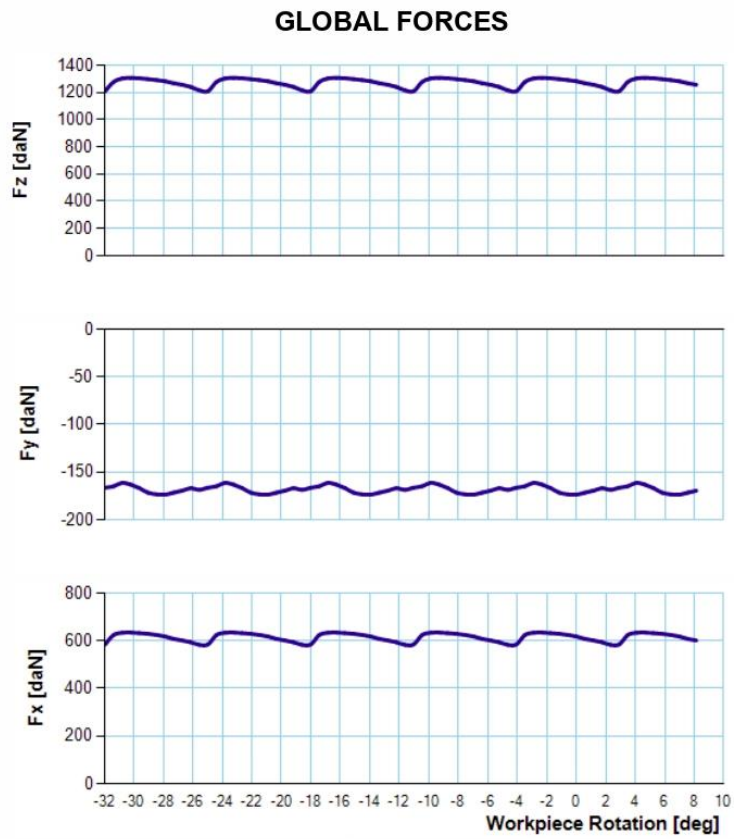
System 2



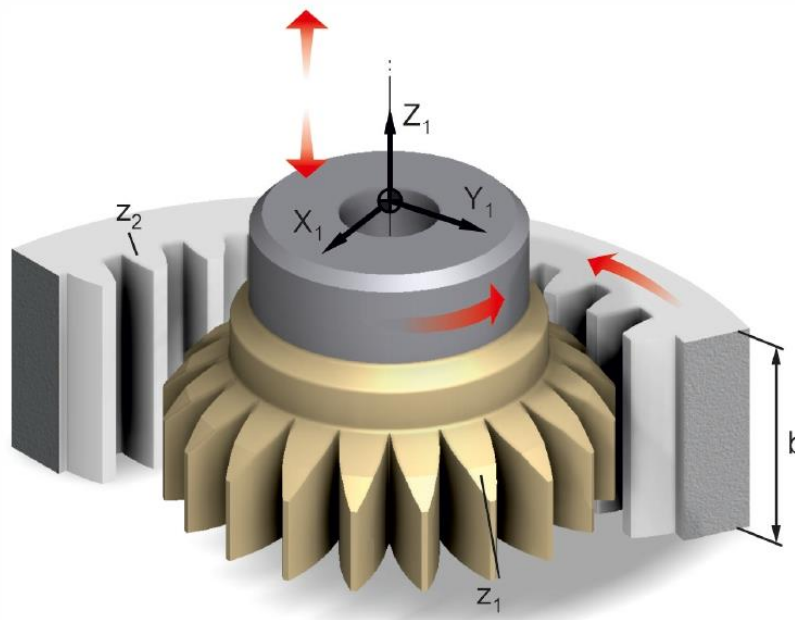
System 4



IN – SP Case 1



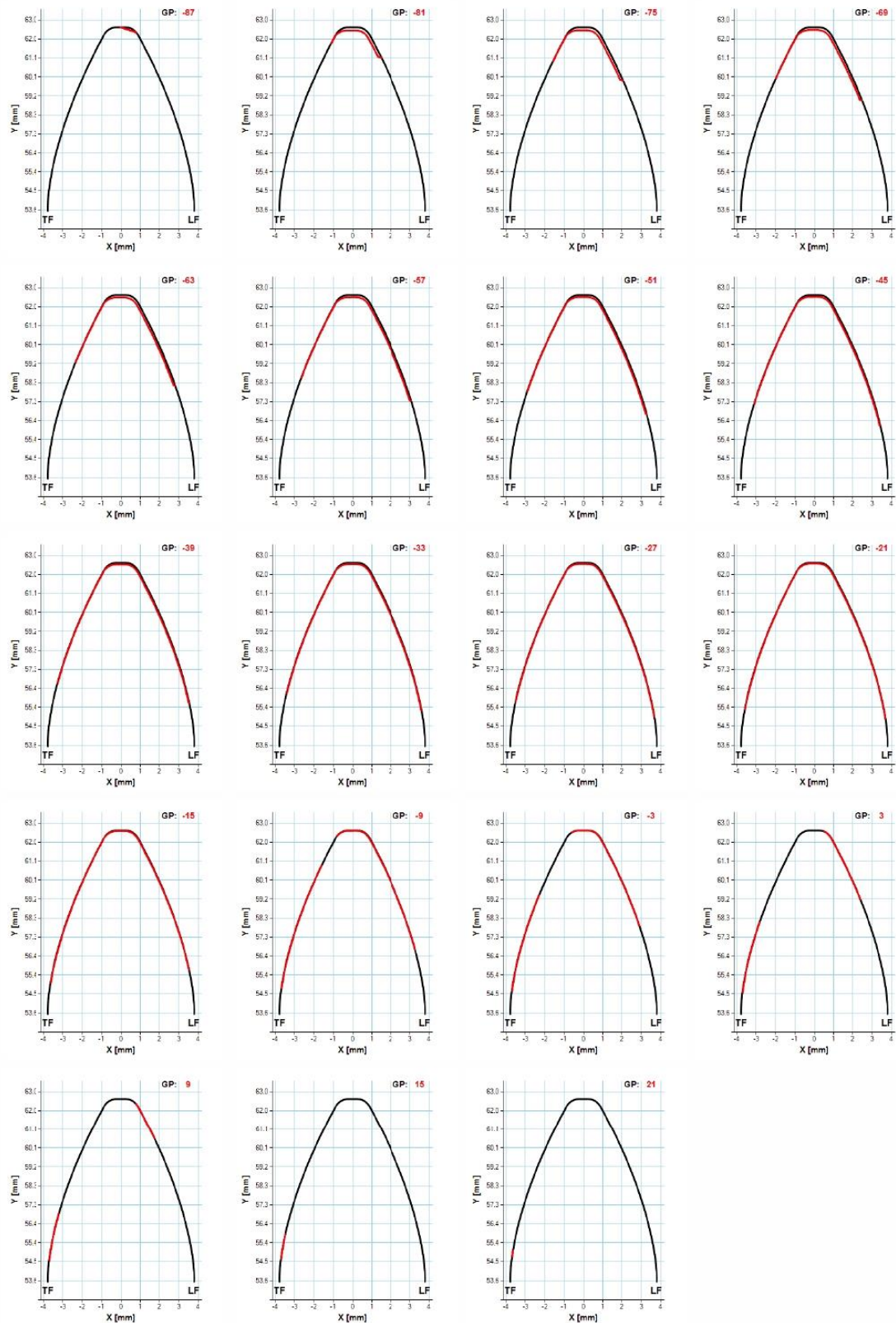
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

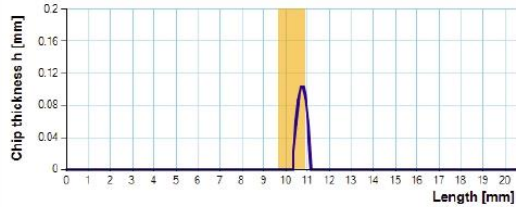
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.58 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

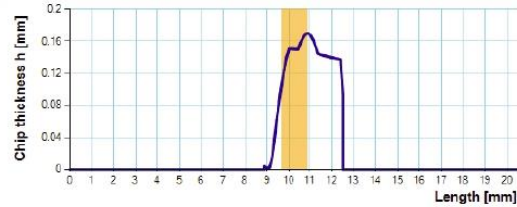


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -87, h_{\max} : 0.1034 mm, Section area: 0.0553 mm²



GP -81, h_{\max} : 0.1699 mm, Section area: 0.4292 mm²



GP -75, h_{\max} : 0.1584 mm, Section area: 0.5586 mm²



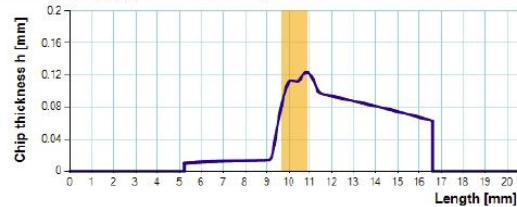
GP -69, h_{\max} : 0.1468 mm, Section area: 0.6366 mm²



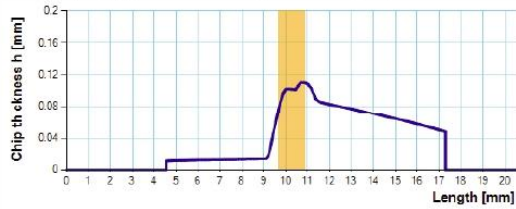
GP -63, h_{\max} : 0.1354 mm, Section area: 0.6746 mm²



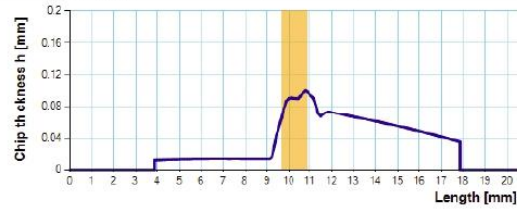
GP -57, h_{\max} : 0.1234 mm, Section area: 0.6781 mm²



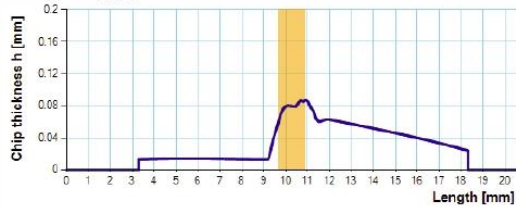
GP -51, h_{\max} : 0.1105 mm, Section area: 0.6531 mm²



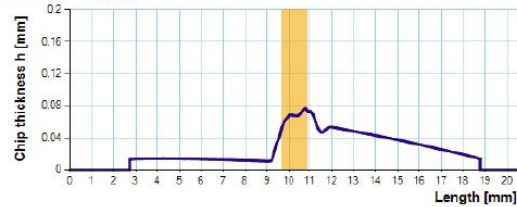
GP -45, h_{\max} : 0.1005 mm, Section area: 0.6075 mm²



GP -39, h_{\max} : 0.0876 mm, Section area: 0.5503 mm²



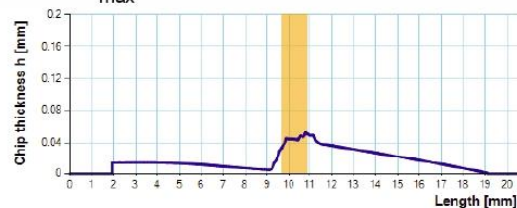
GP -33, h_{\max} : 0.0765 mm, Section area: 0.4783 mm²



GP -27, h_{\max} : 0.0643 mm, Section area: 0.4058 mm²



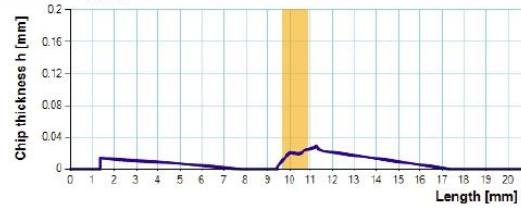
GP -21, h_{\max} : 0.0526 mm, Section area: 0.3288 mm²



GP -15, h_{max} : 0.04 mm, Section area: 0.247 mm²



GP -9, h_{max} : 0.0287 mm, Section area: 0.1557 mm²



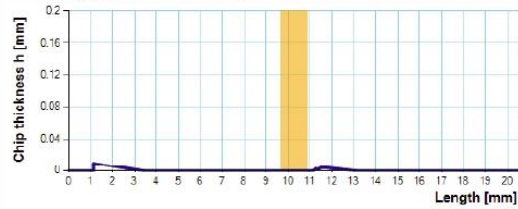
GP -3, h_{max} : 0.0193 mm, Section area: 0.0895 mm²



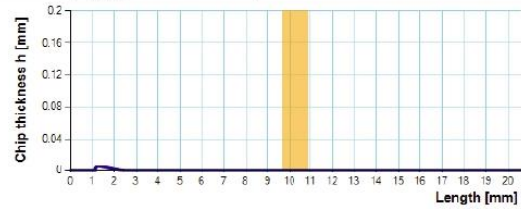
GP 3, h_{max} : 0.0115 mm, Section area: 0.0413 mm²



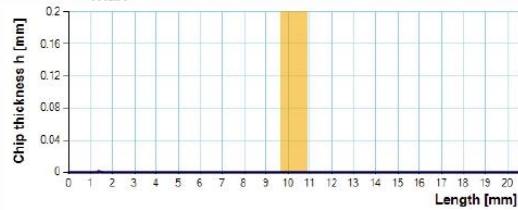
GP 9, h_{max} : 0.0091 mm, Section area: 0.0152 mm²



GP 15, h_{max} : 0.0055 mm, Section area: 0.0035 mm²

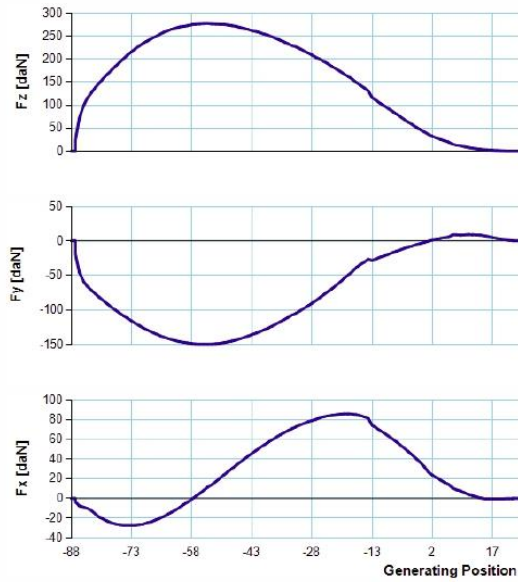


GP 21, h_{max} : 0.0009 mm, Section area: 0.0002 mm²

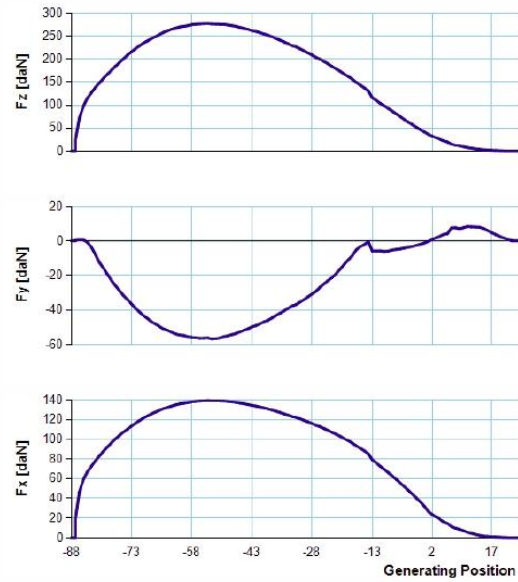


SINGLE GAP FORCES

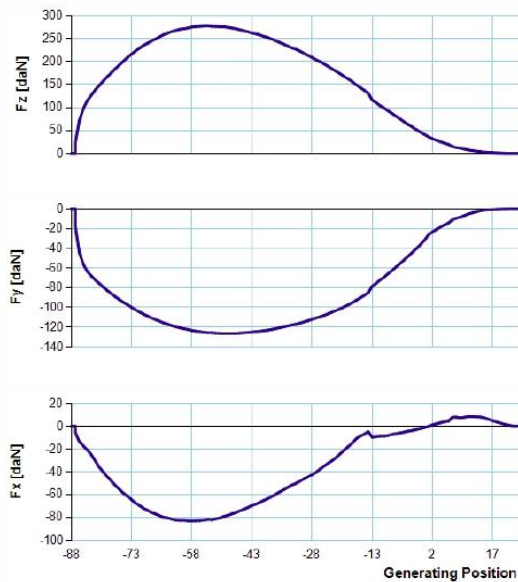
System 1



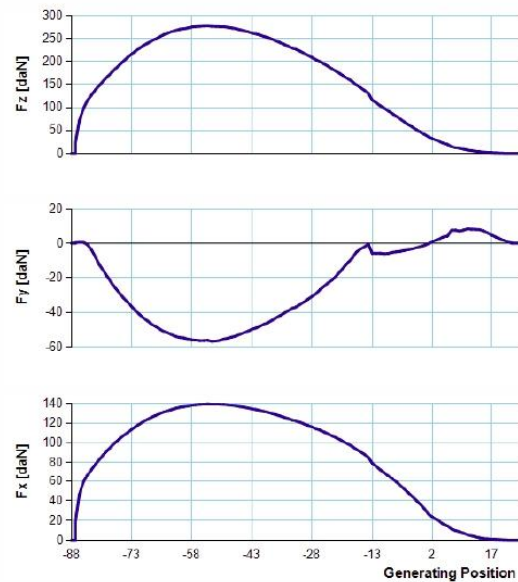
System 3

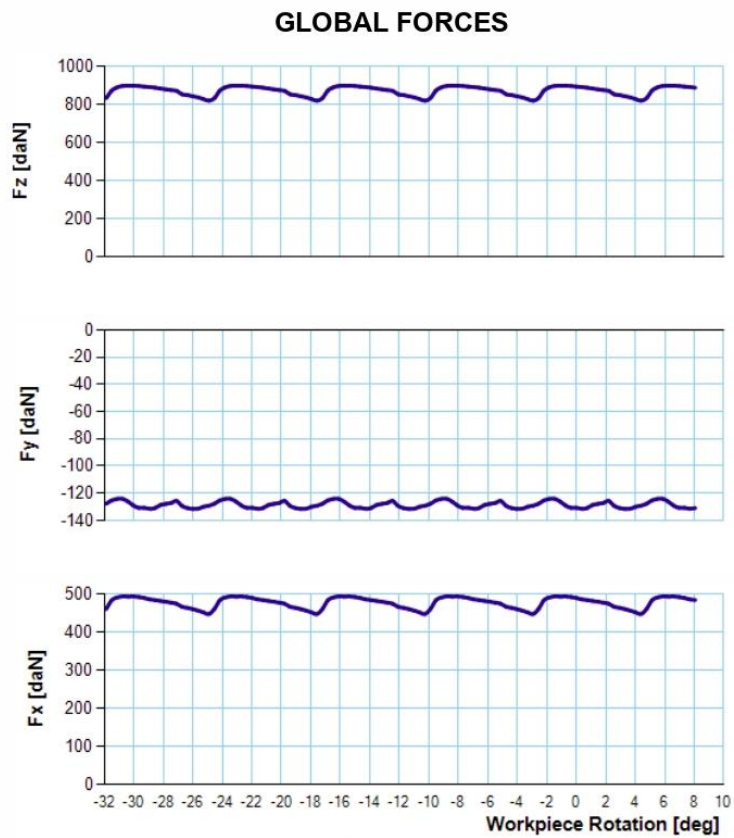


System 2

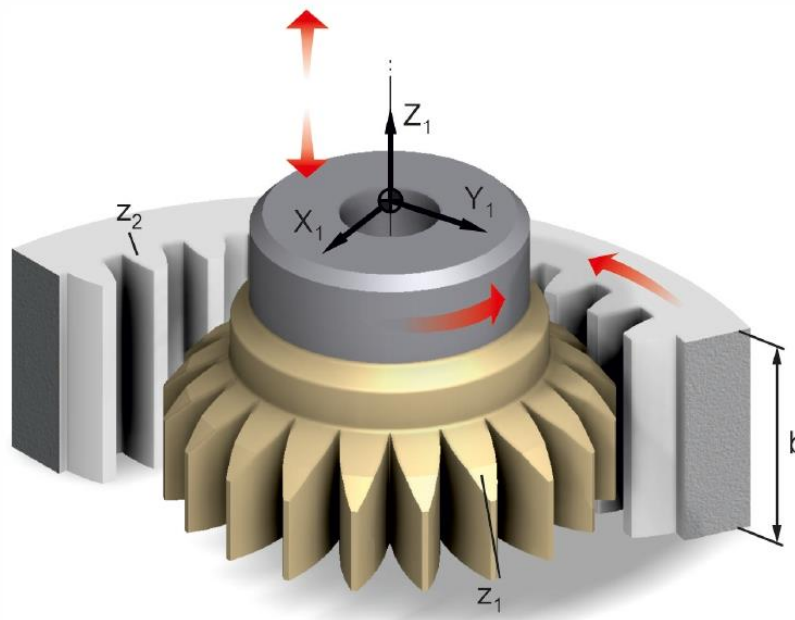


System 4





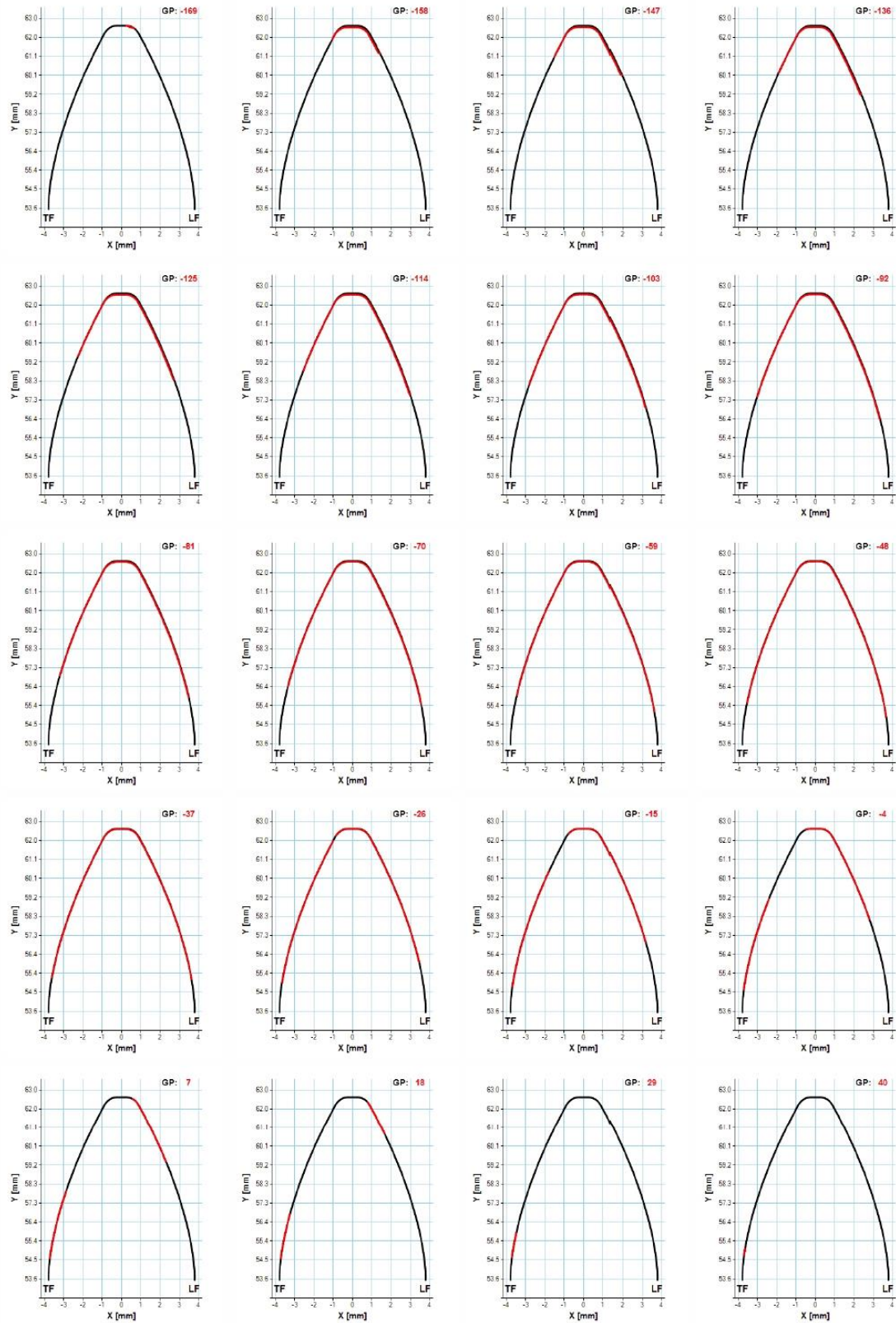
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

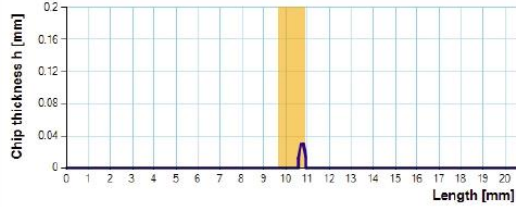
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.3 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

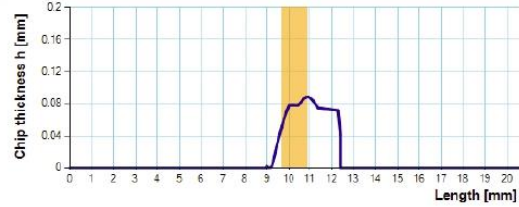


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -169, h_{\max} : 0.0302 mm, Section area: 0.0087 mm²



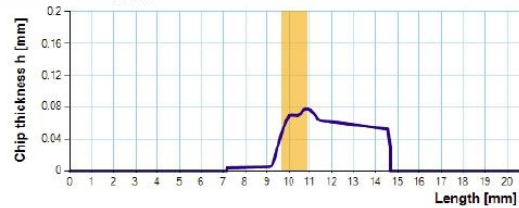
GP -158, h_{\max} : 0.0885 mm, Section area: 0.2147 mm²



GP -147, h_{\max} : 0.0829 mm, Section area: 0.2804 mm²



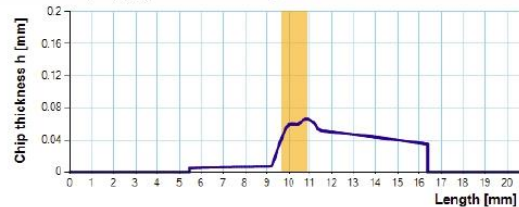
GP -136, h_{\max} : 0.0772 mm, Section area: 0.3245 mm²



GP -125, h_{\max} : 0.0721 mm, Section area: 0.3472 mm²



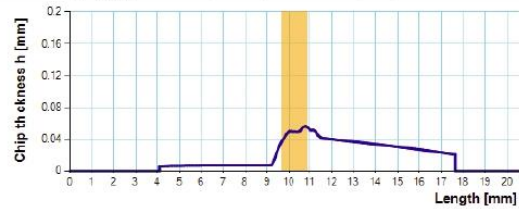
GP -114, h_{\max} : 0.0662 mm, Section area: 0.3534 mm²



GP -103, h_{\max} : 0.0595 mm, Section area: 0.3446 mm²



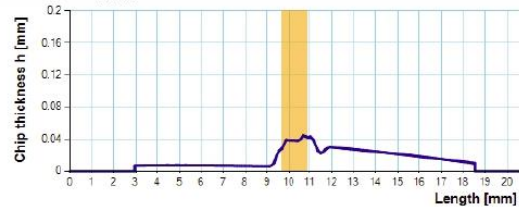
GP -92, h_{\max} : 0.0558 mm, Section area: 0.3277 mm²



GP -81, h_{\max} : 0.0499 mm, Section area: 0.2986 mm²



GP -70, h_{\max} : 0.0442 mm, Section area: 0.2665 mm²



GP -59, h_{\max} : 0.0389 mm, Section area: 0.2351 mm²



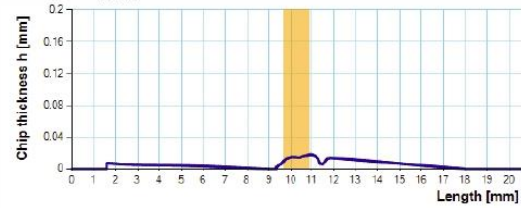
GP -48, h_{\max} : 0.0328 mm, Section area: 0.1992 mm²



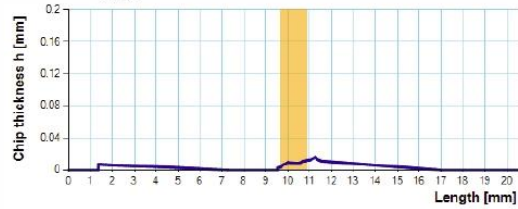
GP -37, h_{max} : 0.0271 mm, Section area: 0.1625 mm²



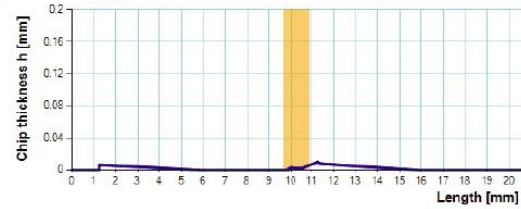
GP -26, h_{max} : 0.018 mm, Section area: 0.1038 mm²



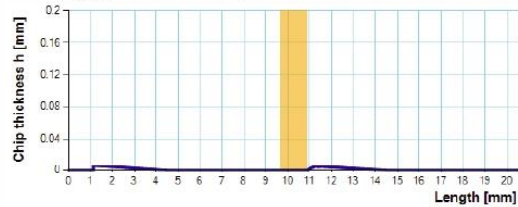
GP -15, h_{max} : 0.0162 mm, Section area: 0.0723 mm²



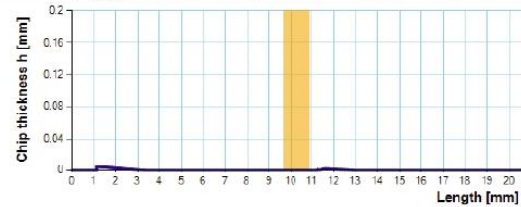
GP -4, h_{max} : 0.0101 mm, Section area: 0.0407 mm²



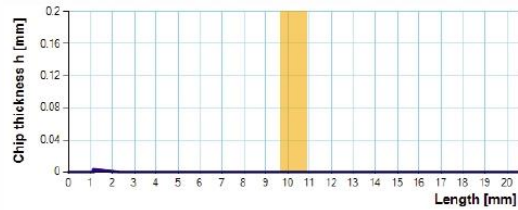
GP 7, h_{max} : 0.0058 mm, Section area: 0.0191 mm²



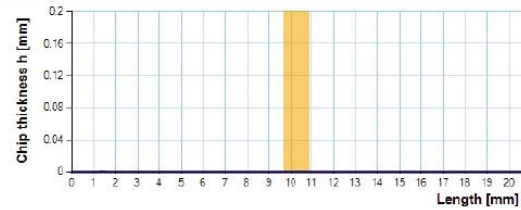
GP 18, h_{max} : 0.0046 mm, Section area: 0.0068 mm²



GP 29, h_{max} : 0.003 mm, Section area: 0.0018 mm²

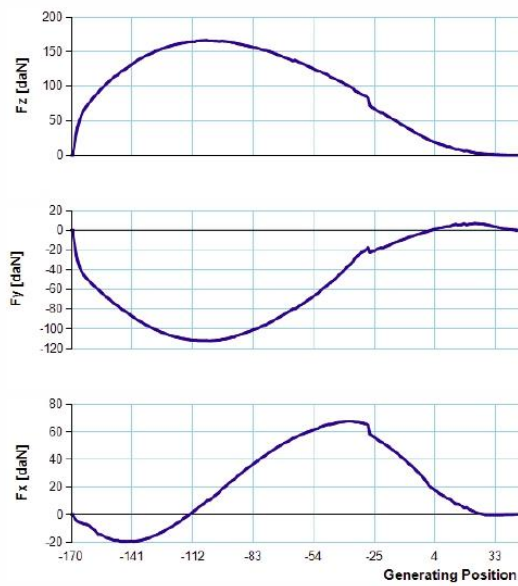


GP 40, h_{max} : 0.0005 mm, Section area: 0.0001 mm²

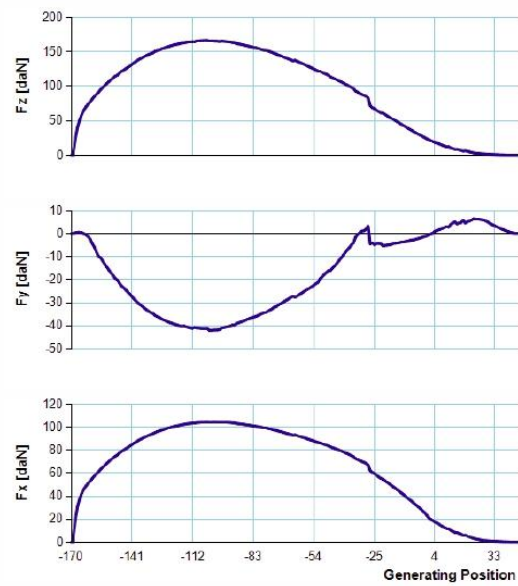


SINGLE GAP FORCES

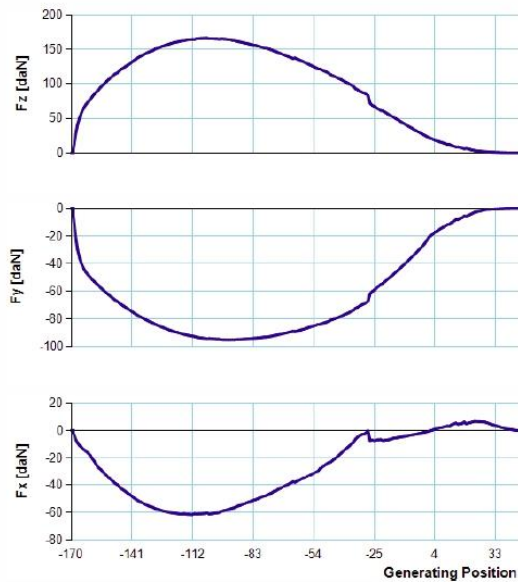
System 1



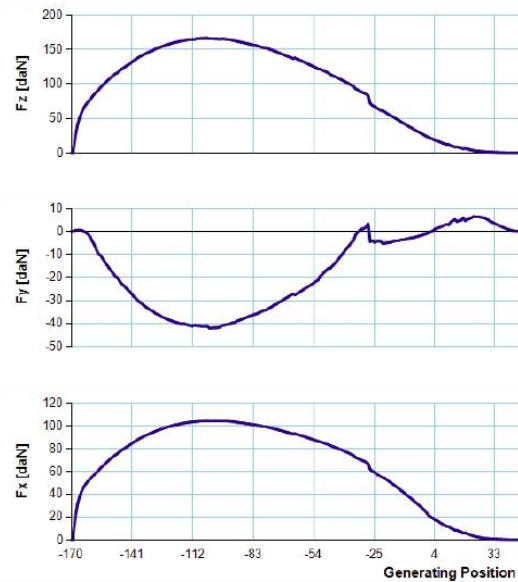
System 3

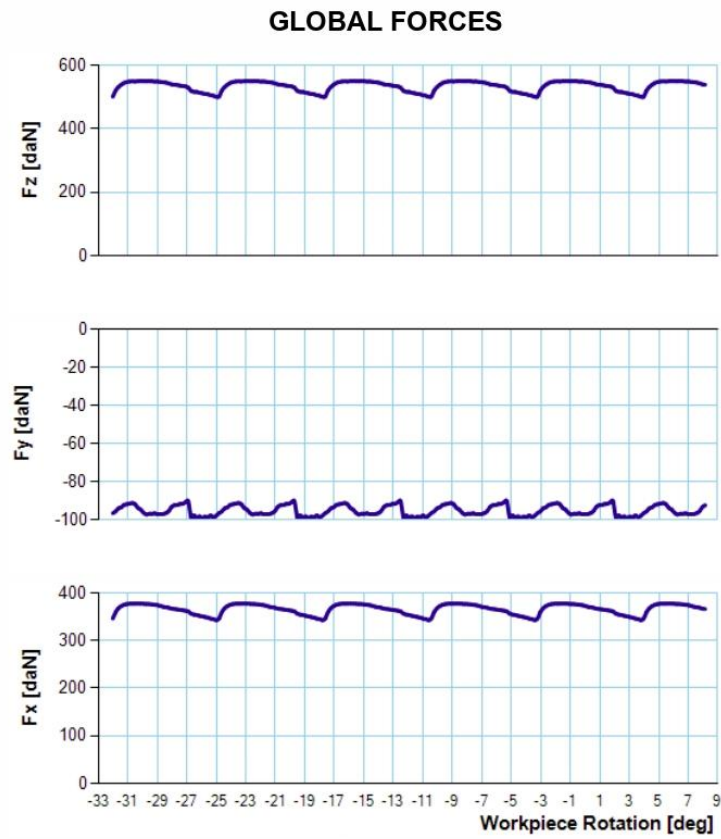


System 2

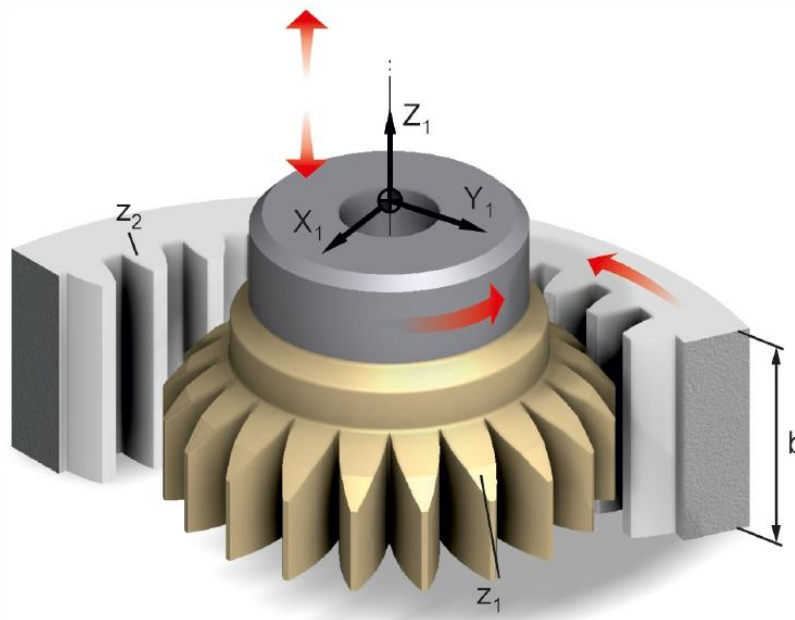


System 4





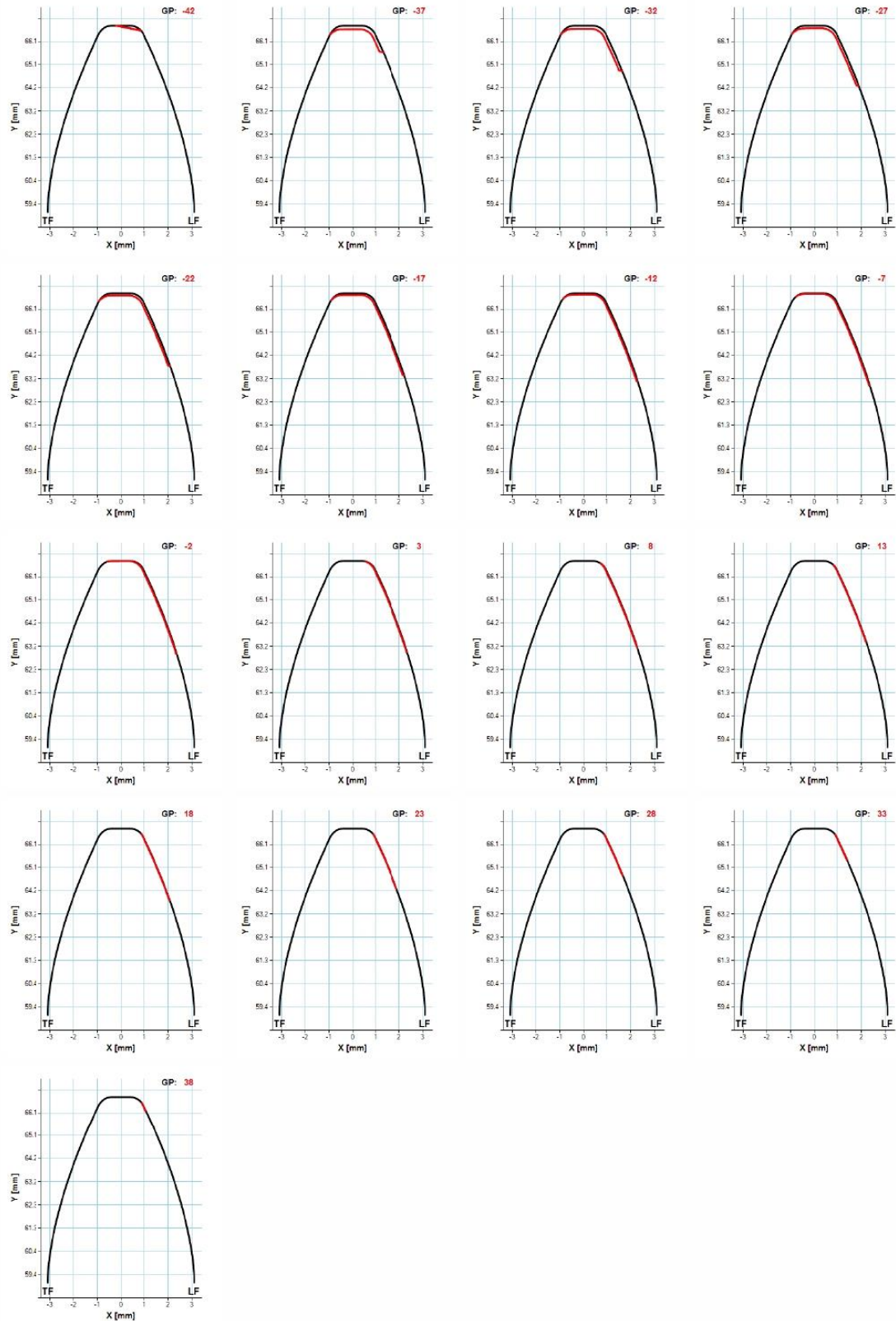
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

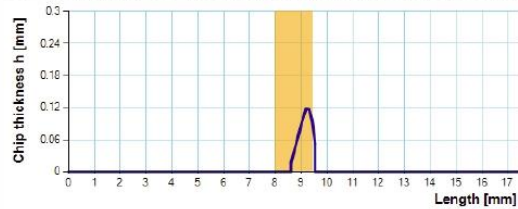
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	3.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

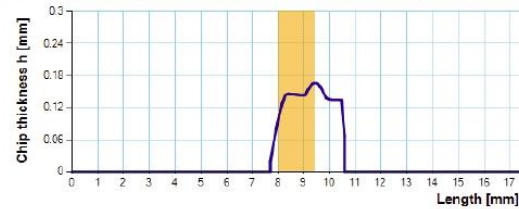


CHIP THICKNESS CHARTS

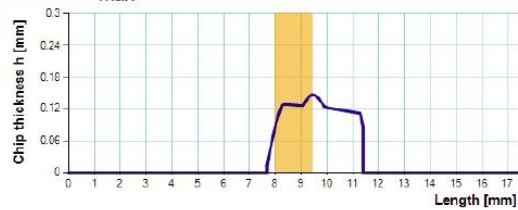
GP -42, h_{max} : 0.1178 mm, Section area: 0.0743 mm²



GP -37, h_{max} : 0.166 mm, Section area: 0.3697 mm²



GP -32, h_{max} : 0.1459 mm, Section area: 0.4221 mm²



GP -27, h_{max} : 0.1258 mm, Section area: 0.4224 mm²



GP -22, h_{max} : 0.1055 mm, Section area: 0.4003 mm²



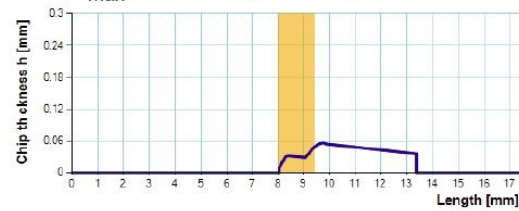
GP -17, h_{max} : 0.0868 mm, Section area: 0.3522 mm²



GP -12, h_{max} : 0.0695 mm, Section area: 0.292 mm²



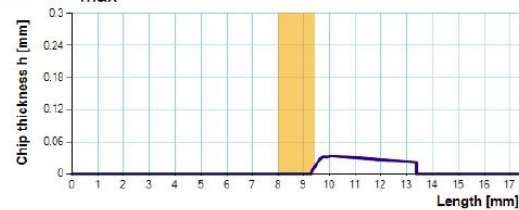
GP -7, h_{max} : 0.0557 mm, Section area: 0.2264 mm²



GP -2, h_{max} : 0.0447 mm, Section area: 0.1618 mm²



GP 3, h_{max} : 0.0335 mm, Section area: 0.1119 mm²



GP 8, h_{max} : 0.0269 mm, Section area: 0.0813 mm²



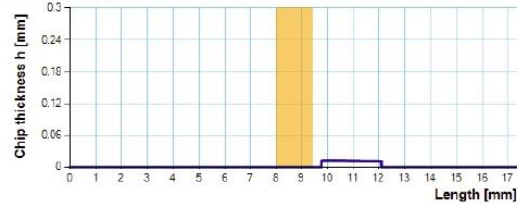
GP 13, h_{max} : 0.0183 mm, Section area: 0.0533 mm²



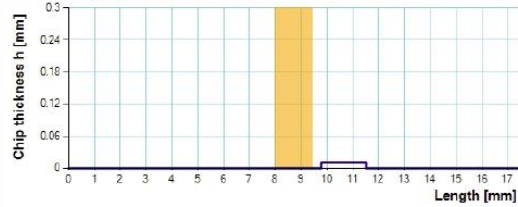
GP 18, h_{\max} : 0.0143 mm, Section area: 0.0374 mm²



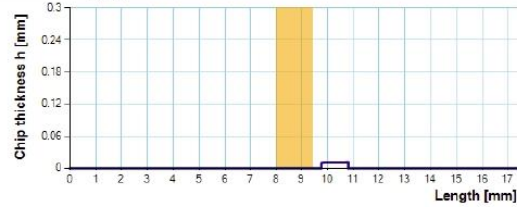
GP 23, h_{\max} : 0.0121 mm, Section area: 0.028 mm²



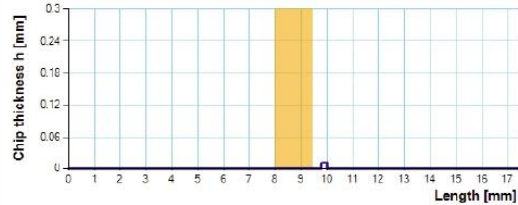
GP 28, h_{\max} : 0.0109 mm, Section area: 0.0194 mm²



GP 33, h_{\max} : 0.0111 mm, Section area: 0.0119 mm²

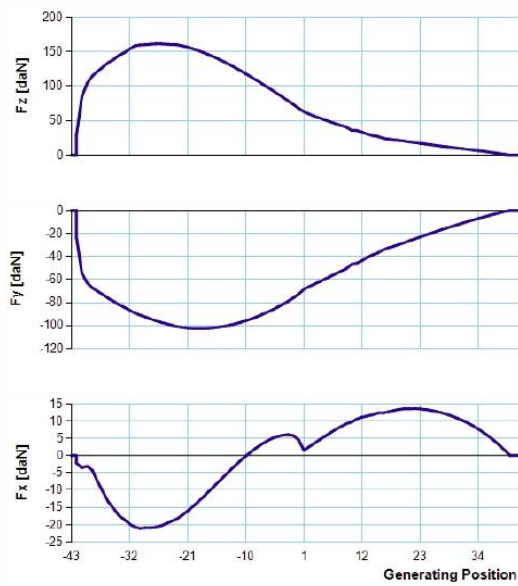


GP 38, h_{\max} : 0.012 mm, Section area: 0.0035 mm²

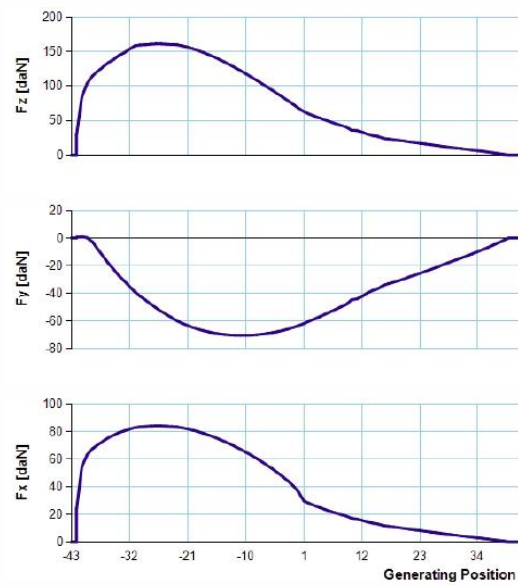


SINGLE GAP FORCES

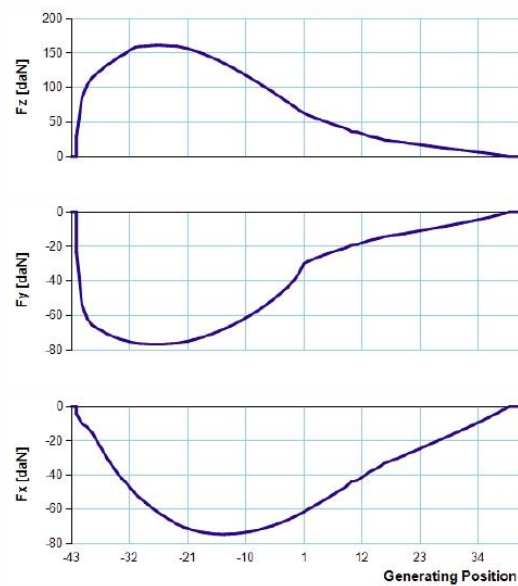
System 1



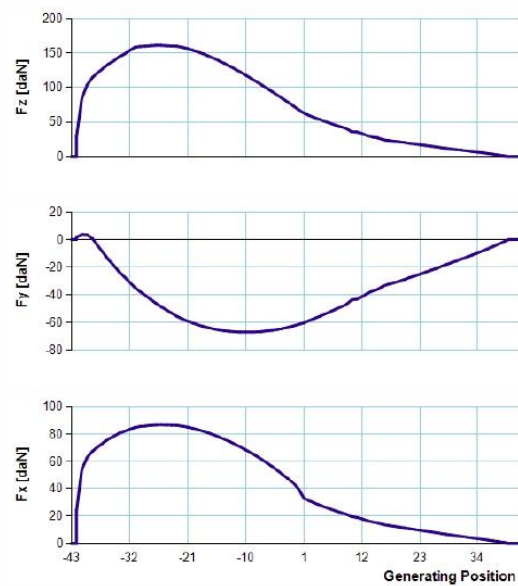
System 3

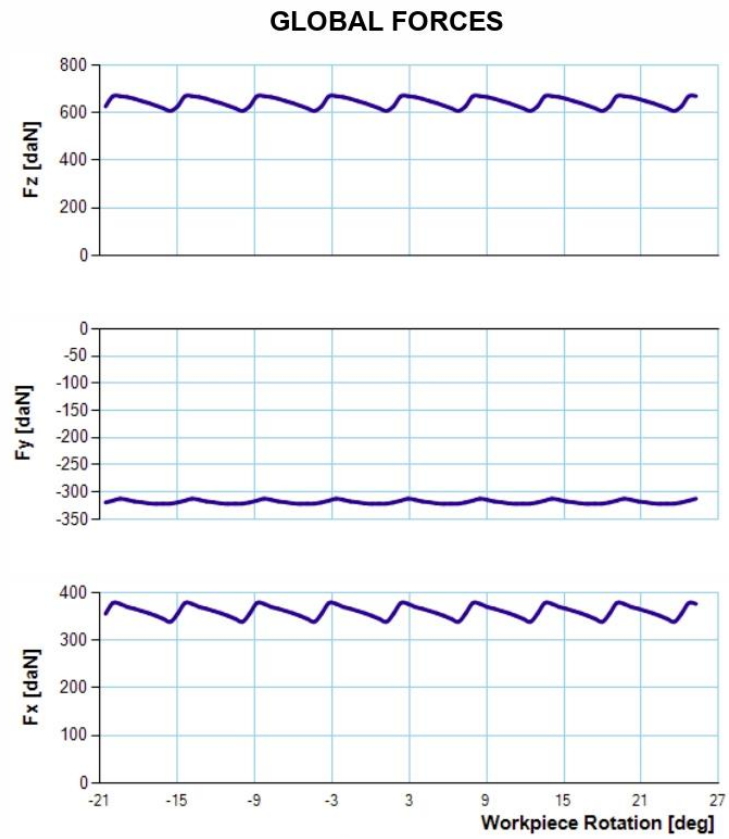


System 2

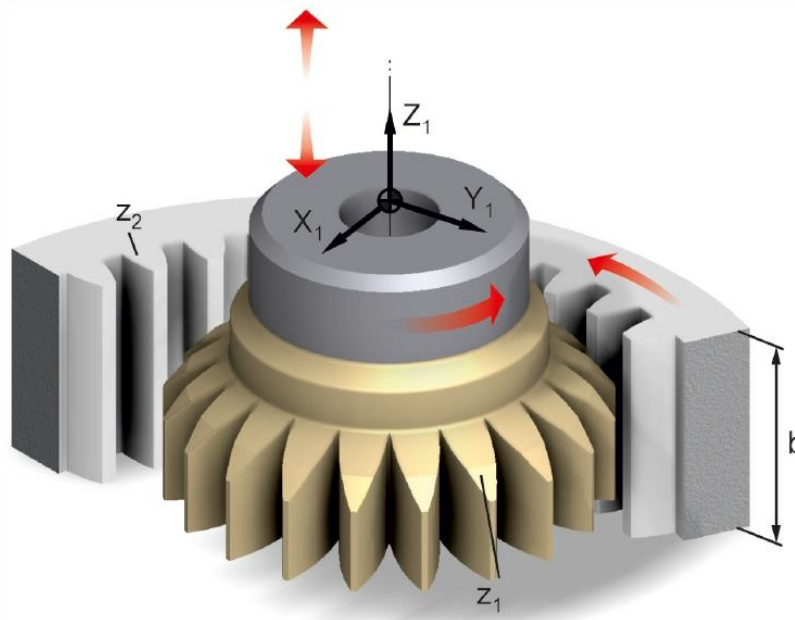


System 4





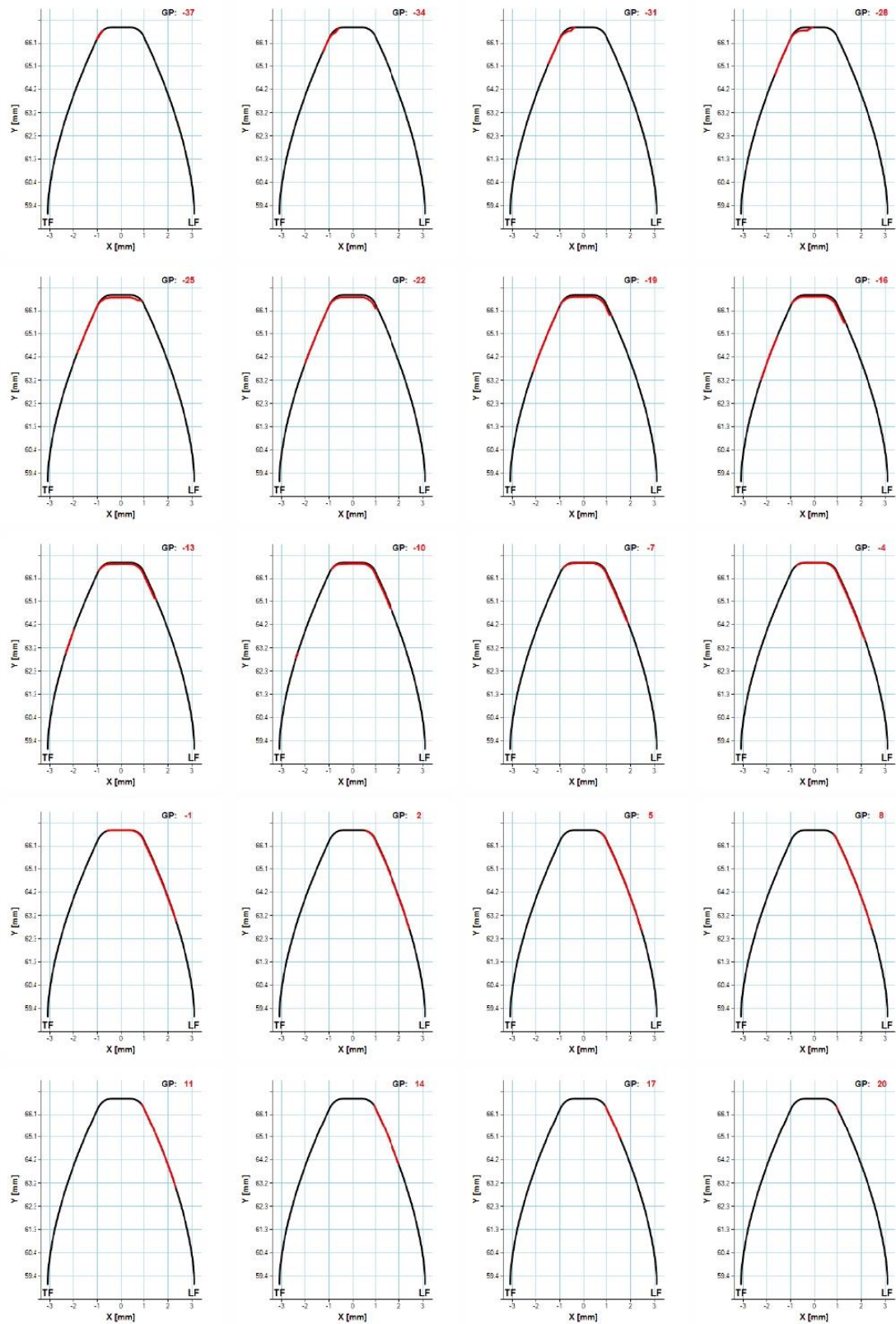
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

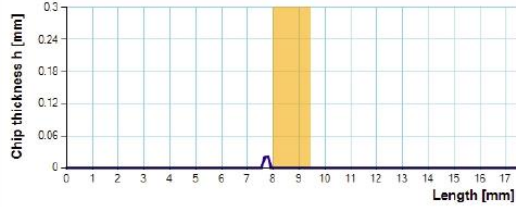
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	5.25 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

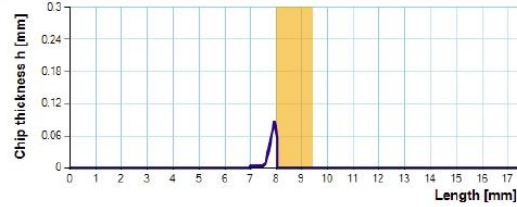


CHIP THICKNESS CHARTS

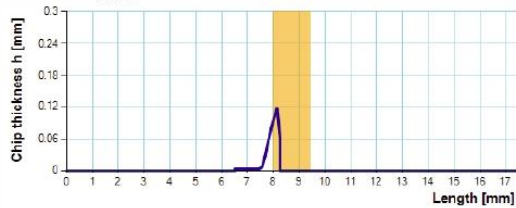
GP -37, h_{\max} : 0.0214 mm, Section area: 0.0053 mm²



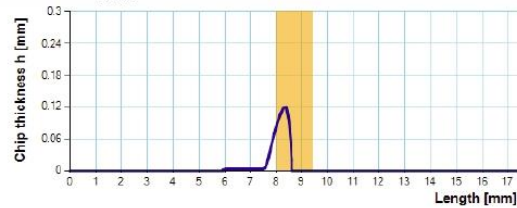
GP -34, h_{\max} : 0.086 mm, Section area: 0.0286 mm²



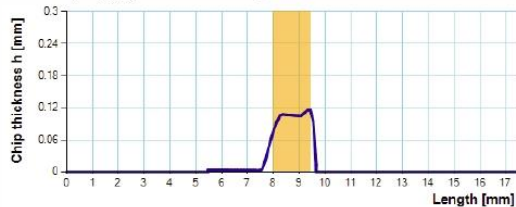
GP -31, h_{\max} : 0.1161 mm, Section area: 0.0514 mm²



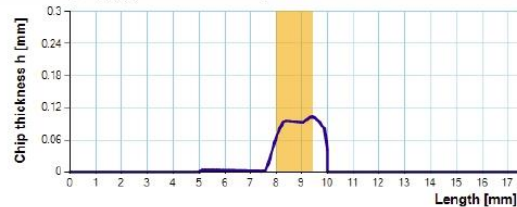
GP -28, h_{\max} : 0.1194 mm, Section area: 0.0816 mm²



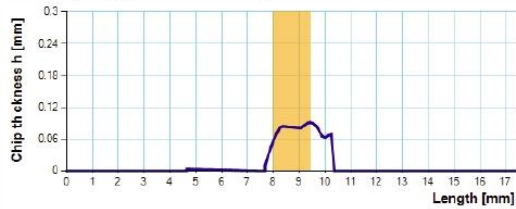
GP -25, h_{\max} : 0.1157 mm, Section area: 0.1853 mm²



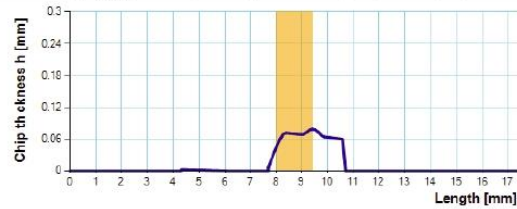
GP -22, h_{\max} : 0.1029 mm, Section area: 0.1975 mm²



GP -19, h_{\max} : 0.0904 mm, Section area: 0.1906 mm²



GP -16, h_{\max} : 0.078 mm, Section area: 0.1848 mm²



GP -13, h_{\max} : 0.0658 mm, Section area: 0.1731 mm²



GP -10, h_{\max} : 0.0544 mm, Section area: 0.159 mm²



GP -7, h_{\max} : 0.0437 mm, Section area: 0.1385 mm²



GP -4, h_{\max} : 0.0355 mm, Section area: 0.1209 mm²



GP -1, h_{\max} : 0.0298 mm, Section area: 0.0934 mm²



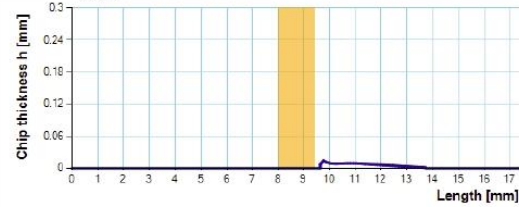
GP 2, h_{\max} : 0.0218 mm, Section area: 0.0657 mm²



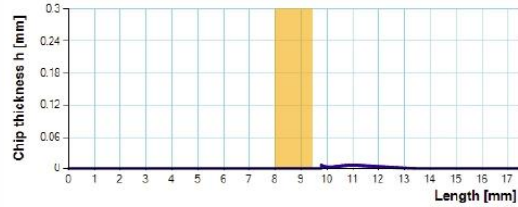
GP 5, h_{\max} : 0.018 mm, Section area: 0.0468 mm²



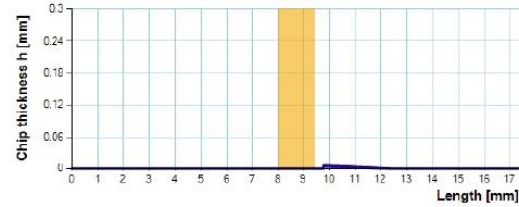
GP 8, h_{\max} : 0.0147 mm, Section area: 0.0283 mm²



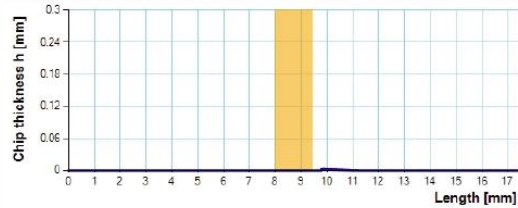
GP 11, h_{\max} : 0.0061 mm, Section area: 0.0122 mm²



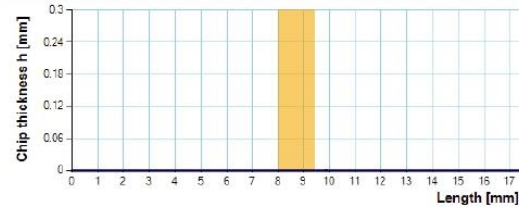
GP 14, h_{\max} : 0.0049 mm, Section area: 0.0071 mm²



GP 17, h_{\max} : 0.0025 mm, Section area: 0.002 mm²

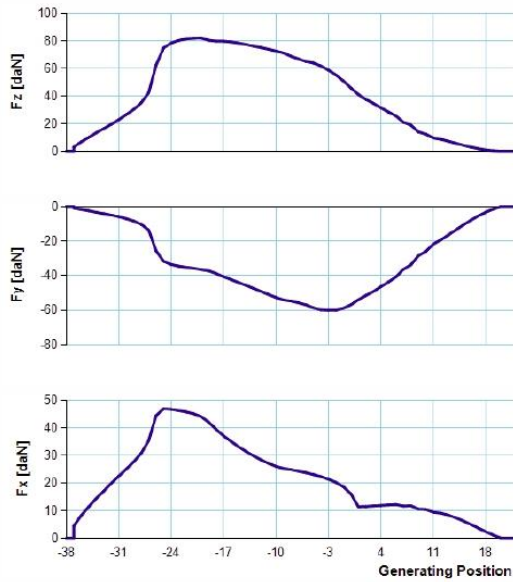


GP 20, h_{\max} : 0.0001 mm, Section area: 0 mm²

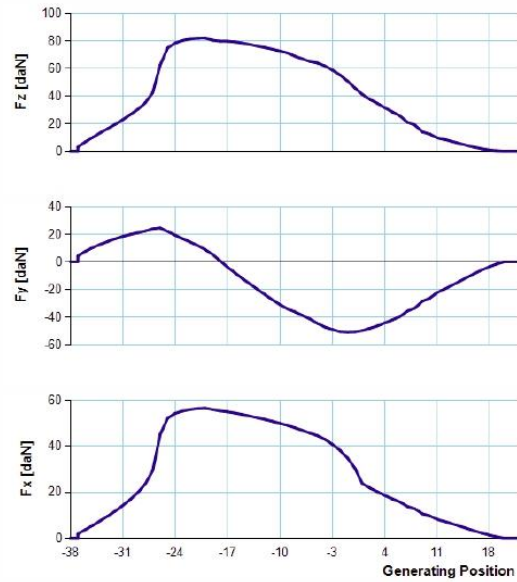


SINGLE GAP FORCES

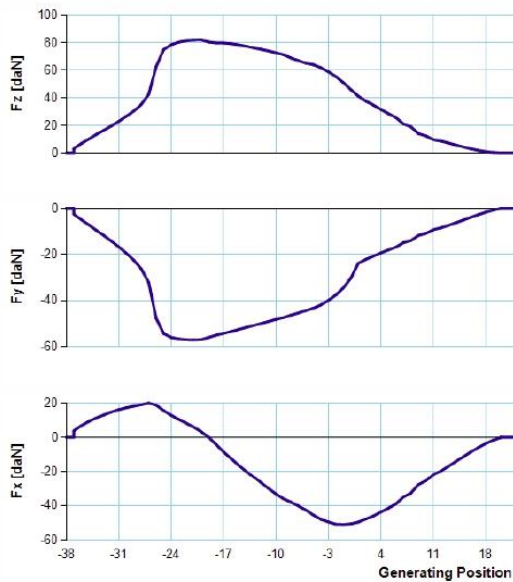
System 1



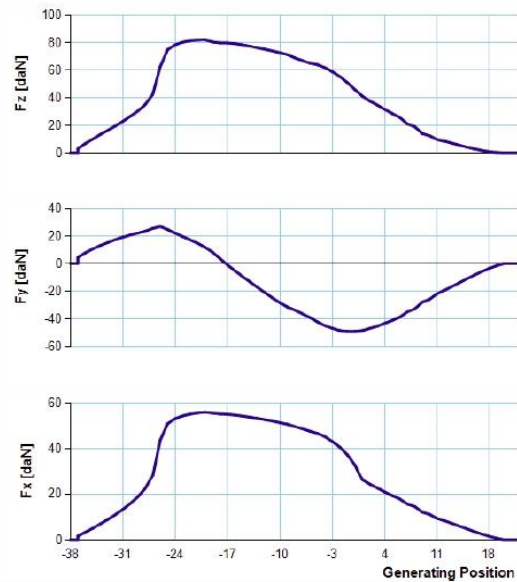
System 3

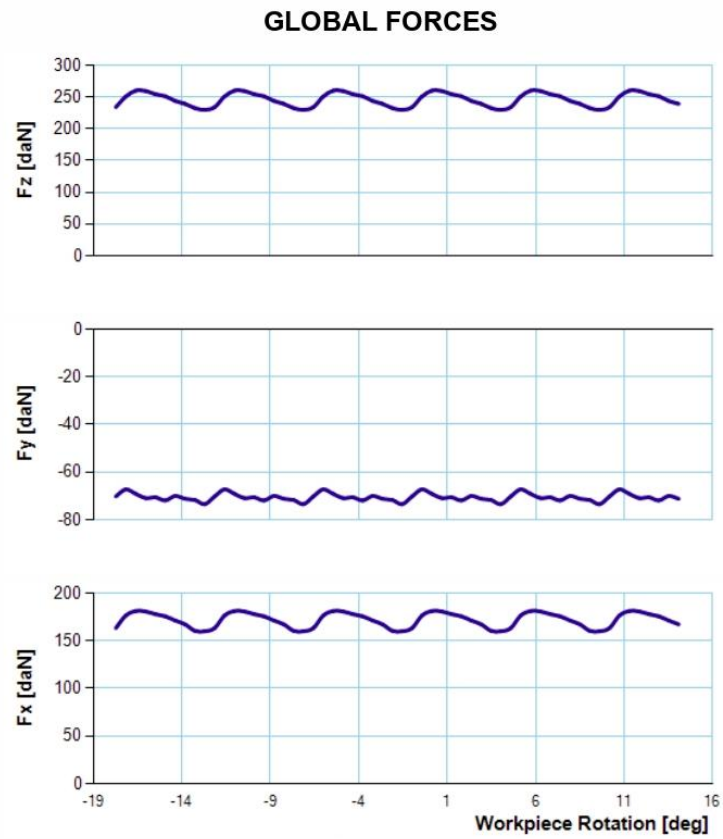


System 2

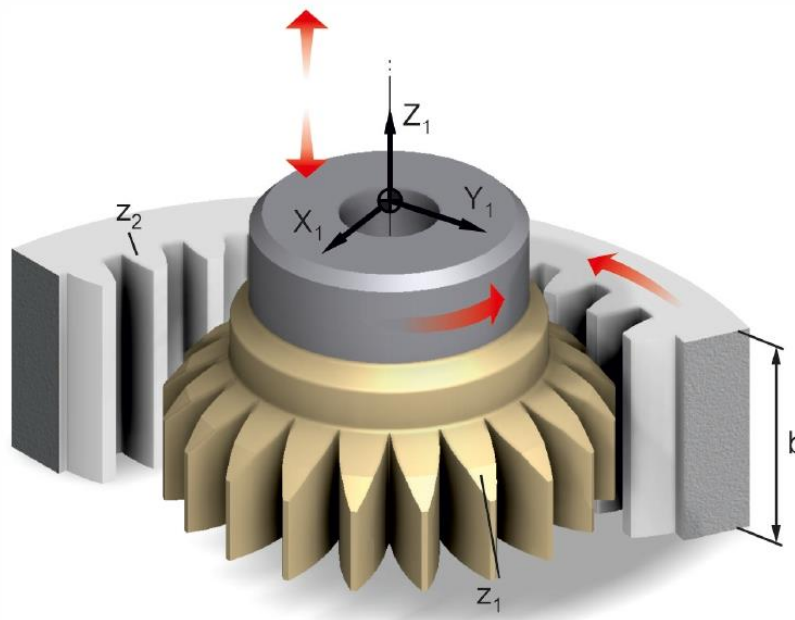


System 4





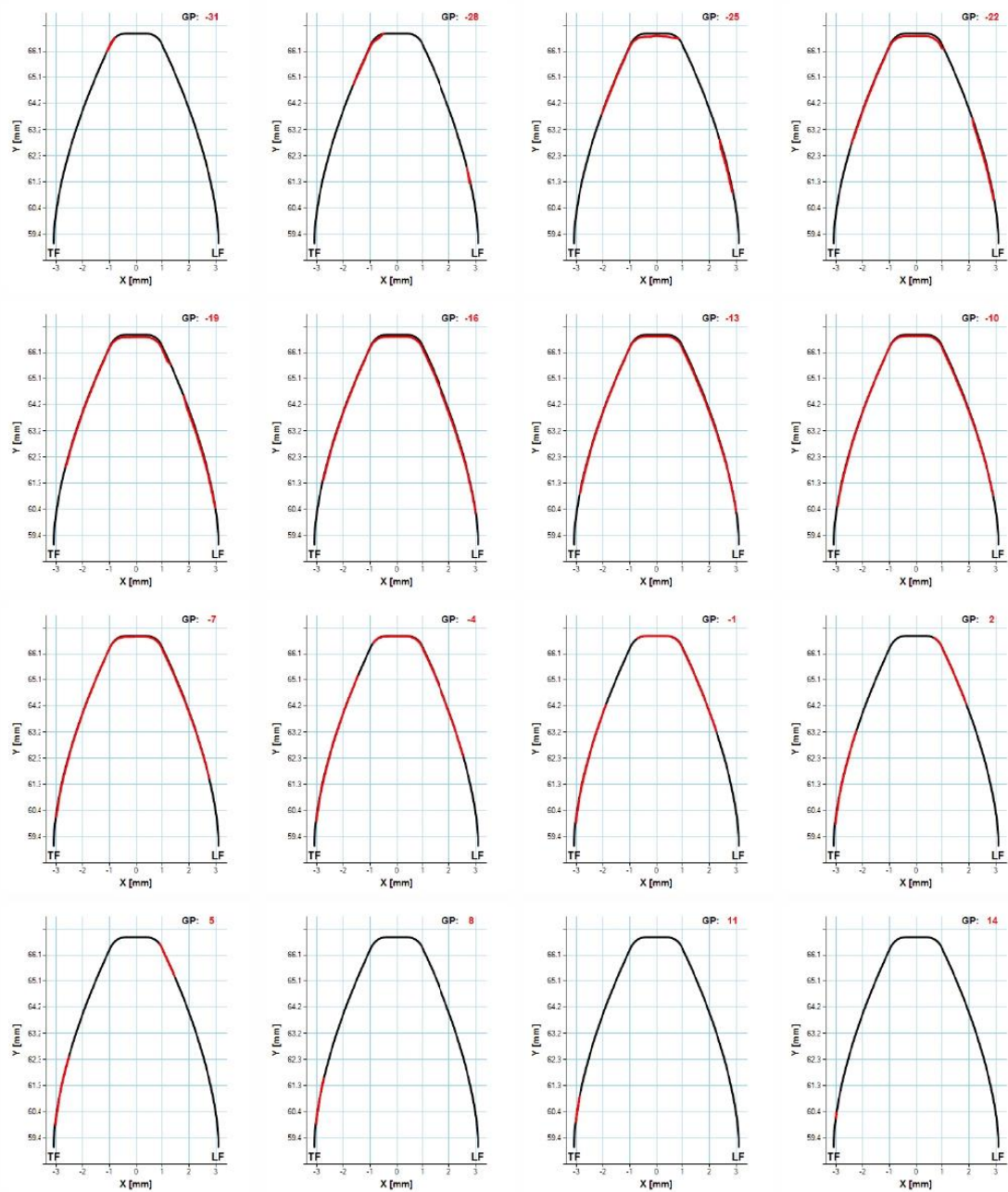
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	6.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

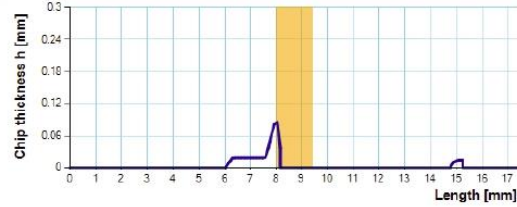


CHIP THICKNESS CHARTS

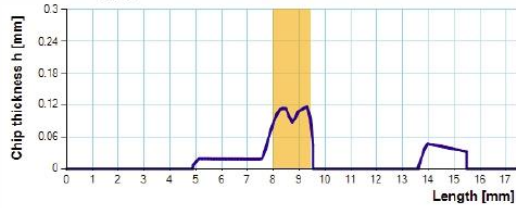
GP -31, h_{max} : 0.0227 mm, Section area: 0.0071 mm²



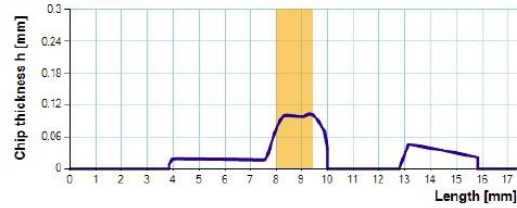
GP -28, h_{max} : 0.085 mm, Section area: 0.0659 mm²



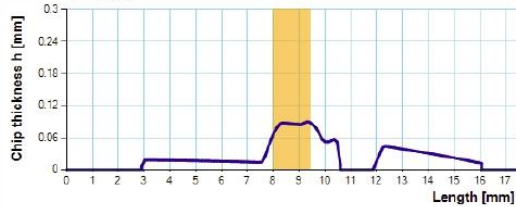
GP -25, h_{max} : 0.1158 mm, Section area: 0.2939 mm²



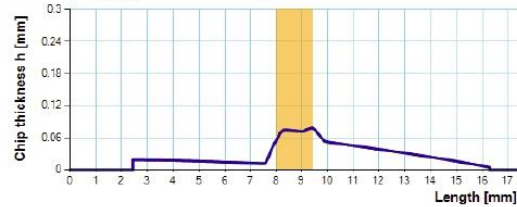
GP -22, h_{max} : 0.1026 mm, Section area: 0.3642 mm²



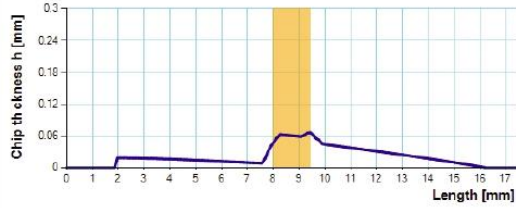
GP -19, h_{max} : 0.0898 mm, Section area: 0.4011 mm²



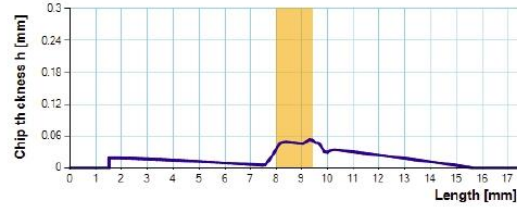
GP -16, h_{max} : 0.0781 mm, Section area: 0.4201 mm²



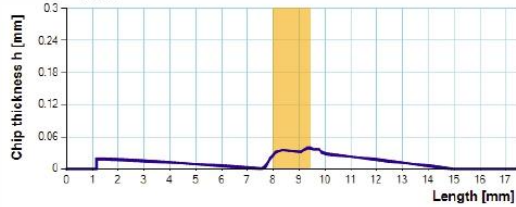
GP -13, h_{max} : 0.0655 mm, Section area: 0.3501 mm²



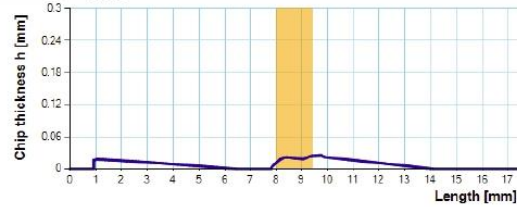
GP -10, h_{max} : 0.0527 mm, Section area: 0.2785 mm²



GP -7, h_{max} : 0.0393 mm, Section area: 0.2131 mm²



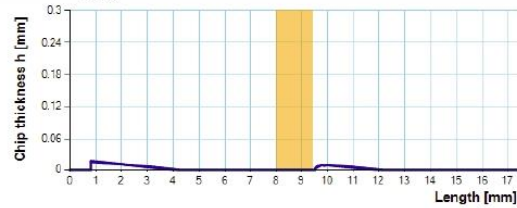
GP -4, h_{max} : 0.0254 mm, Section area: 0.1412 mm²



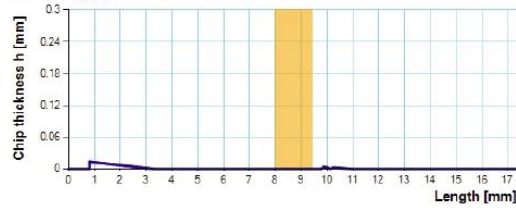
GP -1, h_{max} : 0.0168 mm, Section area: 0.0815 mm²



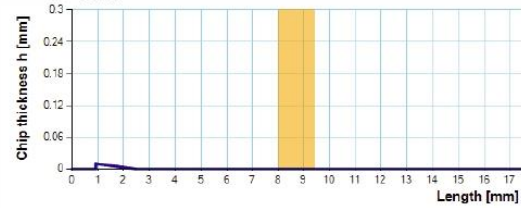
GP 2, h_{max} : 0.0157 mm, Section area: 0.0407 mm²



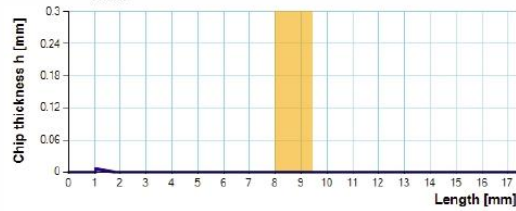
GP 5, h_{\max} : 0.0136 mm, Section area: 0.019 mm²



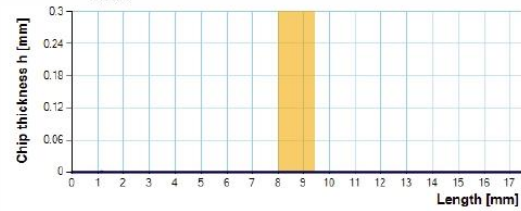
GP 8, h_{\max} : 0.0102 mm, Section area: 0.0088 mm²



GP 11, h_{\max} : 0.0059 mm, Section area: 0.003 mm²

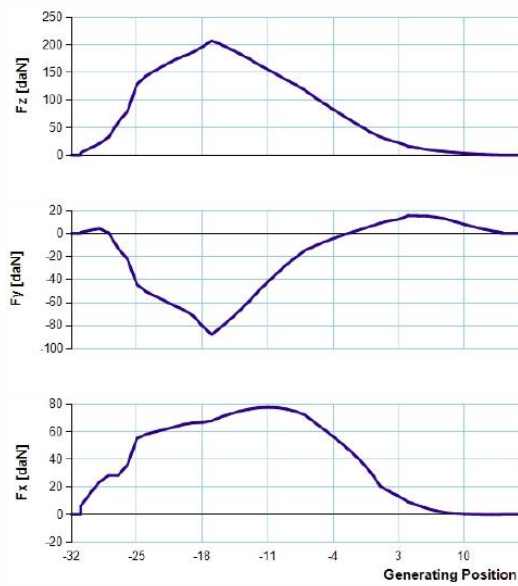


GP 14, h_{\max} : 0.0008 mm, Section area: 0.0002 mm²

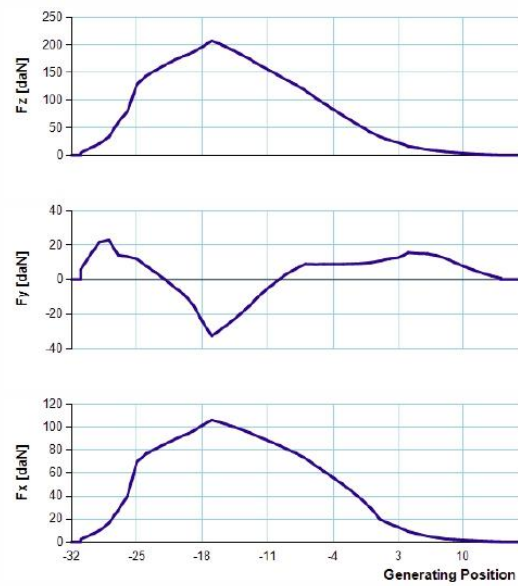


SINGLE GAP FORCES

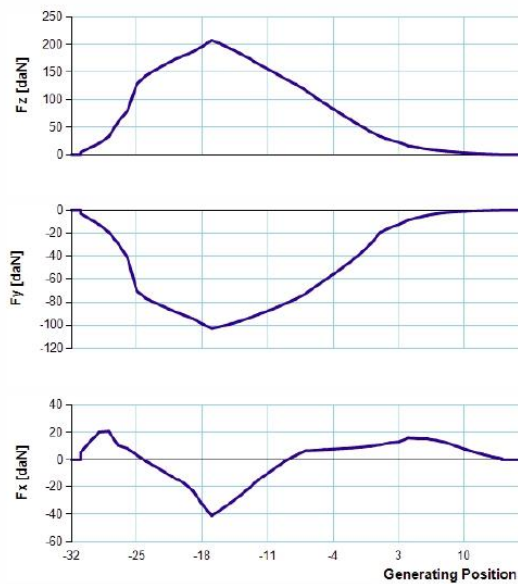
System 1



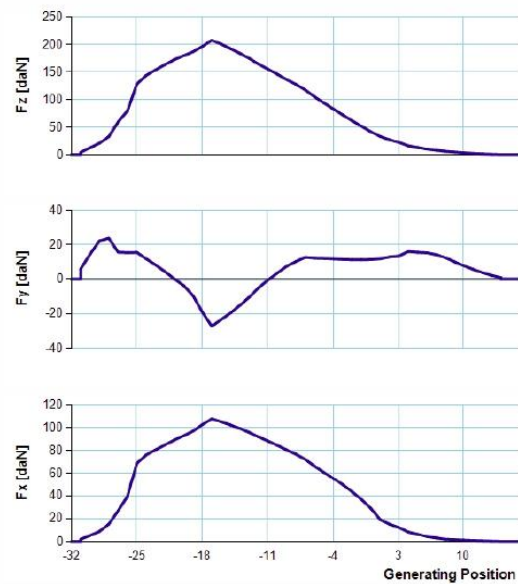
System 3

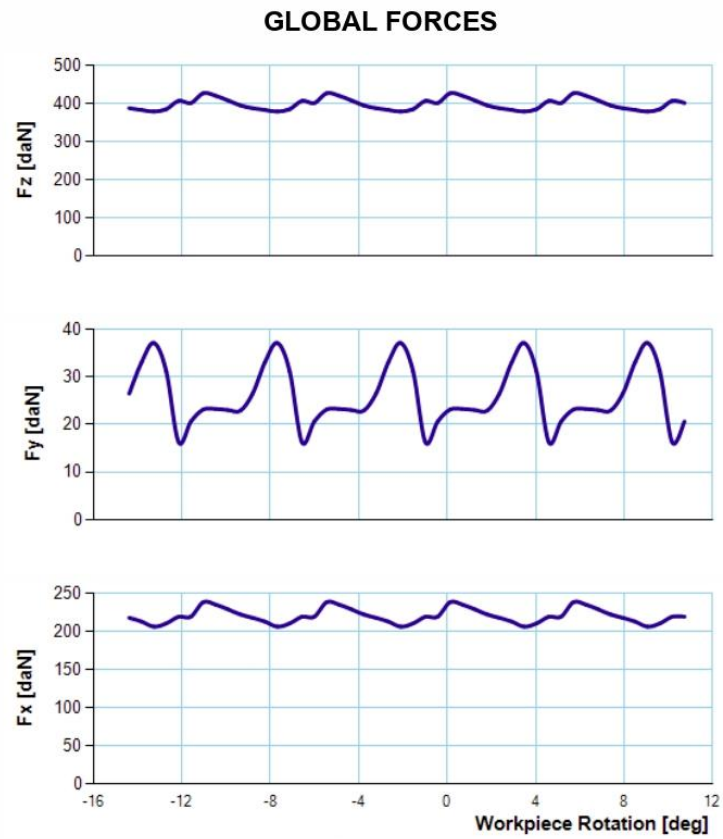


System 2

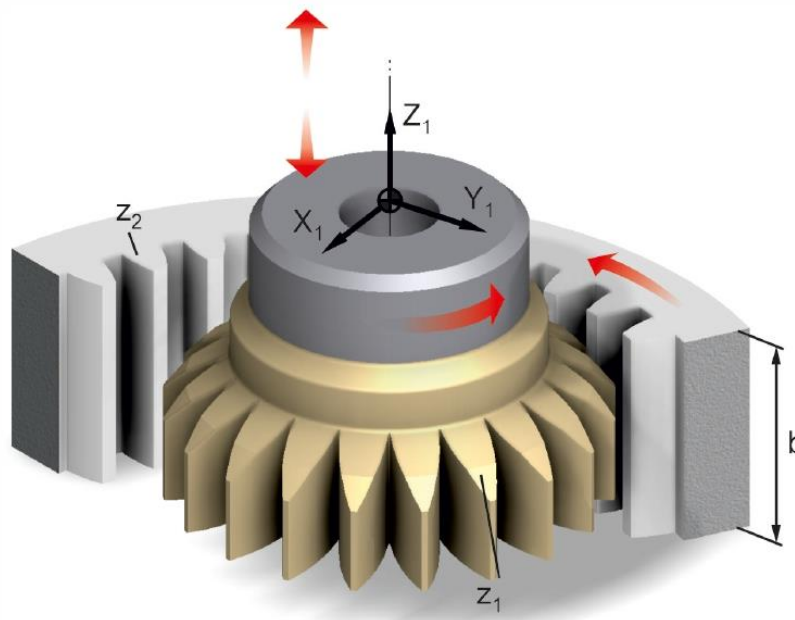


System 4





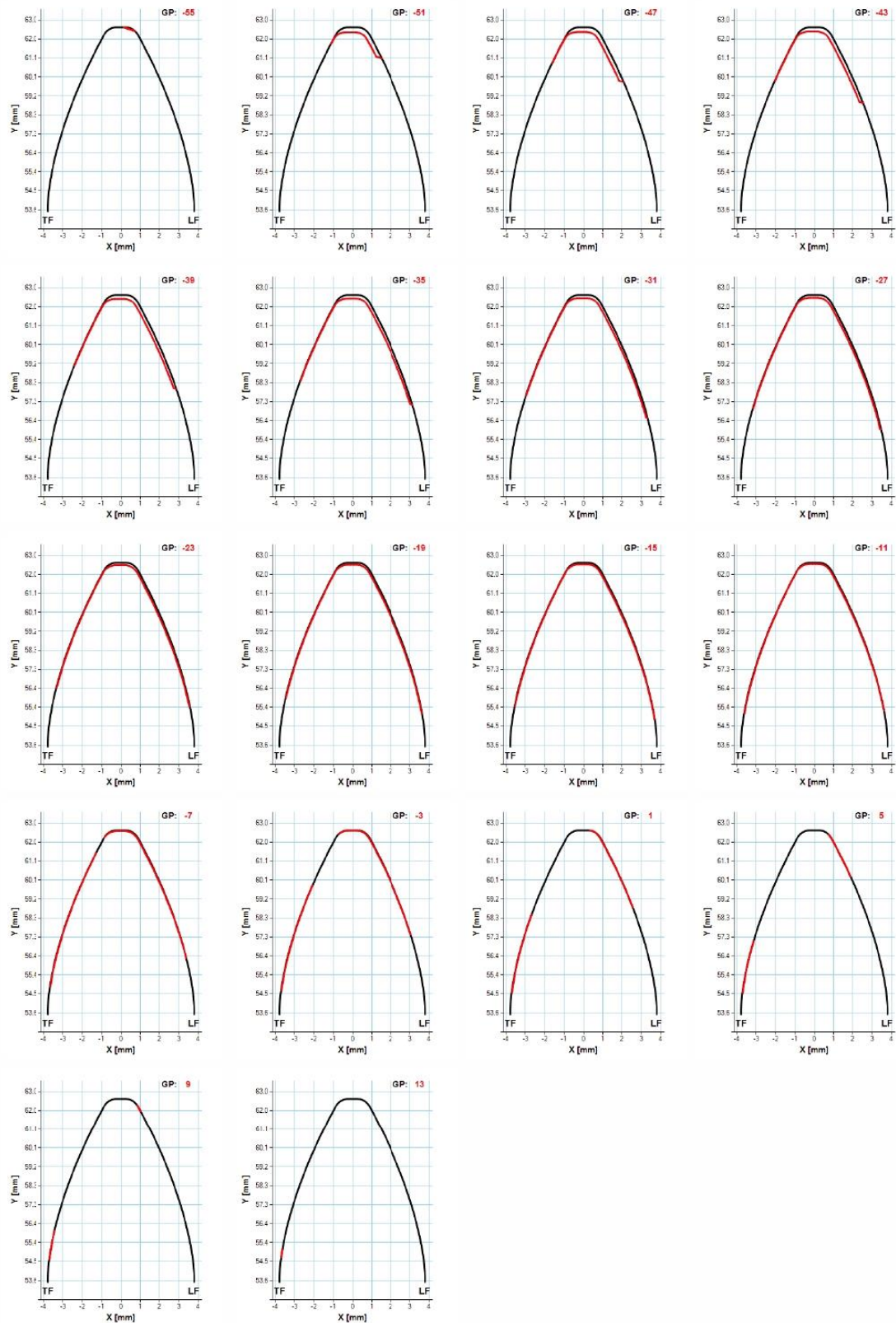
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

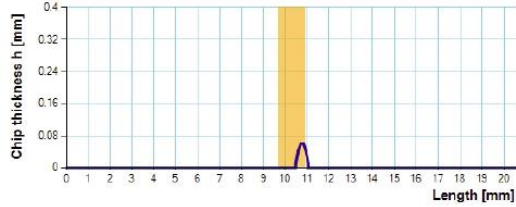
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	4 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

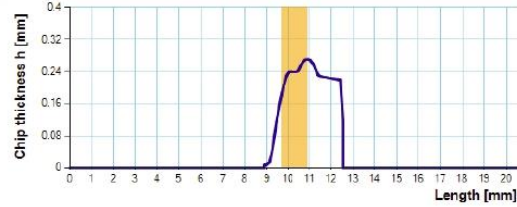


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -55, h_{\max} : 0.0608 mm, Section area: 0.0245 mm²



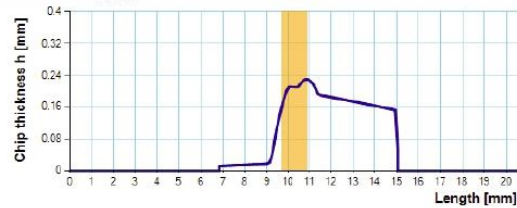
GP -51, h_{\max} : 0.2706 mm, Section area: 0.6767 mm²



GP -47, h_{\max} : 0.2508 mm, Section area: 0.8938 mm²



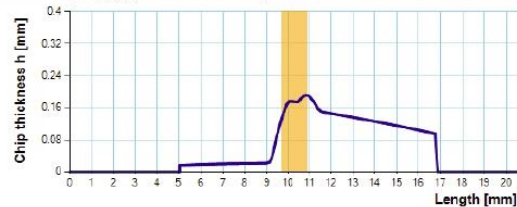
GP -43, h_{\max} : 0.2306 mm, Section area: 1.0198 mm²



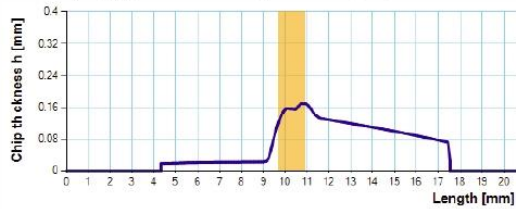
GP -39, h_{\max} : 0.2115 mm, Section area: 1.0751 mm²



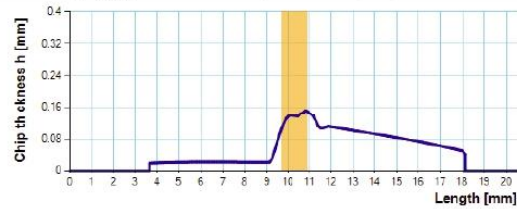
GP -35, h_{\max} : 0.1917 mm, Section area: 1.0687 mm²



GP -31, h_{\max} : 0.1703 mm, Section area: 1.0205 mm²



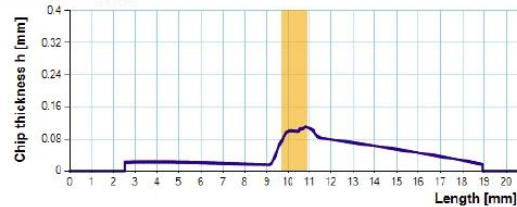
GP -27, h_{\max} : 0.1516 mm, Section area: 0.9379 mm²



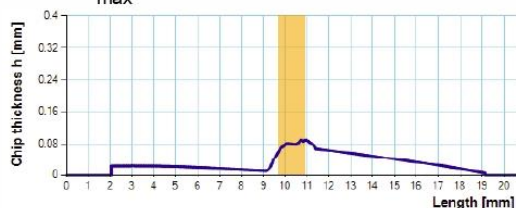
GP -23, h_{\max} : 0.1301 mm, Section area: 0.8317 mm²



GP -19, h_{\max} : 0.111 mm, Section area: 0.7135 mm²



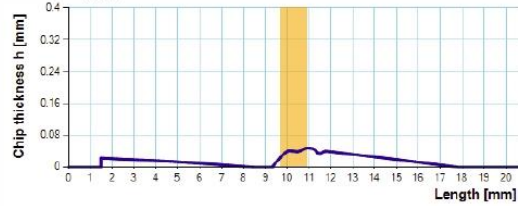
GP -15, h_{\max} : 0.0898 mm, Section area: 0.5819 mm²



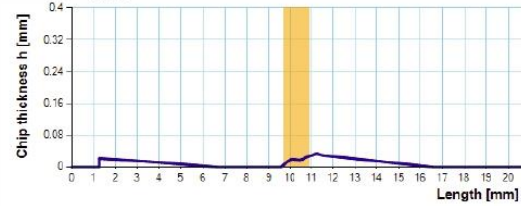
GP -11, h_{\max} : 0.0701 mm, Section area: 0.446 mm²



GP -7, h_{\max} : 0.0471 mm, Section area: 0.2914 mm²



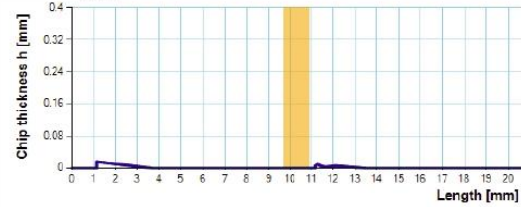
GP -3, h_{\max} : 0.0335 mm, Section area: 0.1759 mm²



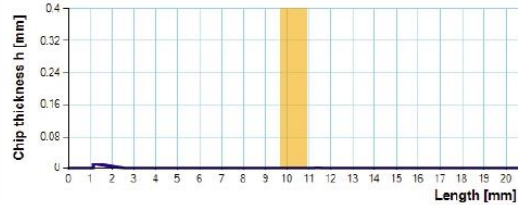
GP 1, h_{\max} : 0.0207 mm, Section area: 0.0833 mm²



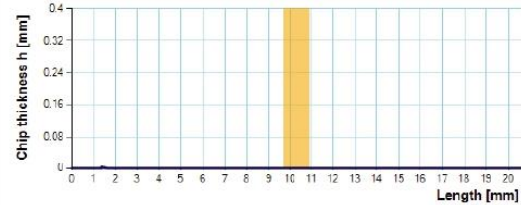
GP 5, h_{\max} : 0.0155 mm, Section area: 0.0305 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.0107 mm, Section area: 0.0078 mm²

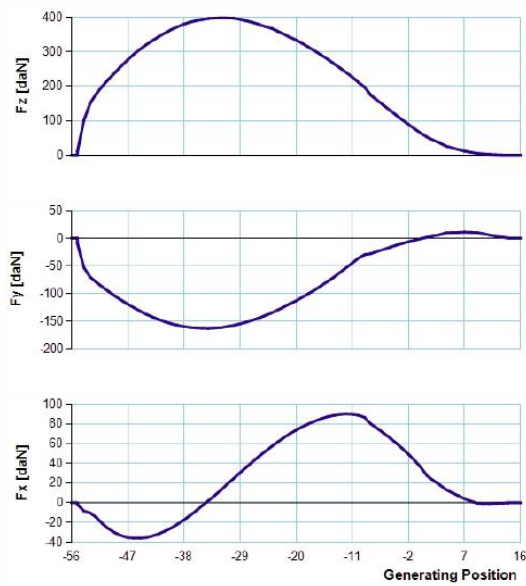


GP 13, h_{\max} : 0.0025 mm, Section area: 0.0006 mm²

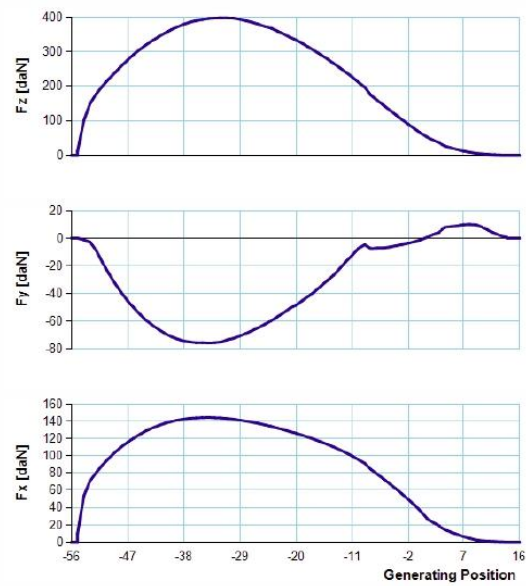


SINGLE GAP FORCES

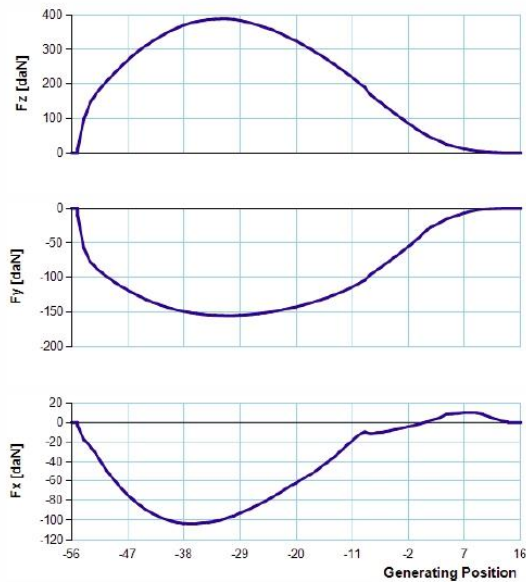
System 1



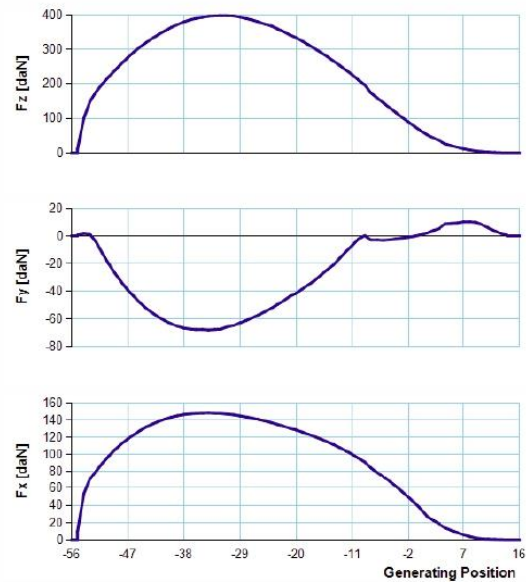
System 3

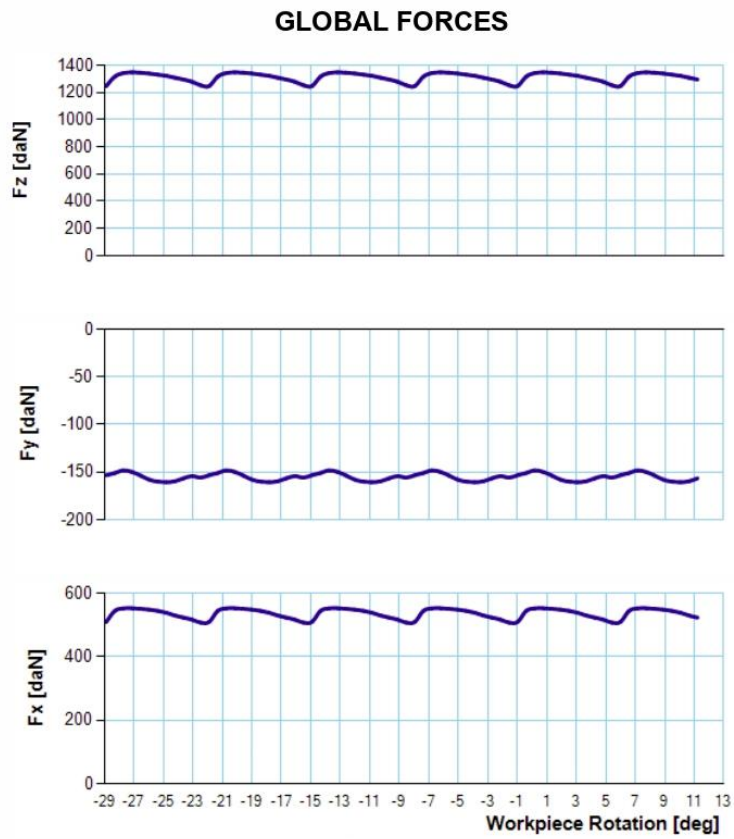


System 2

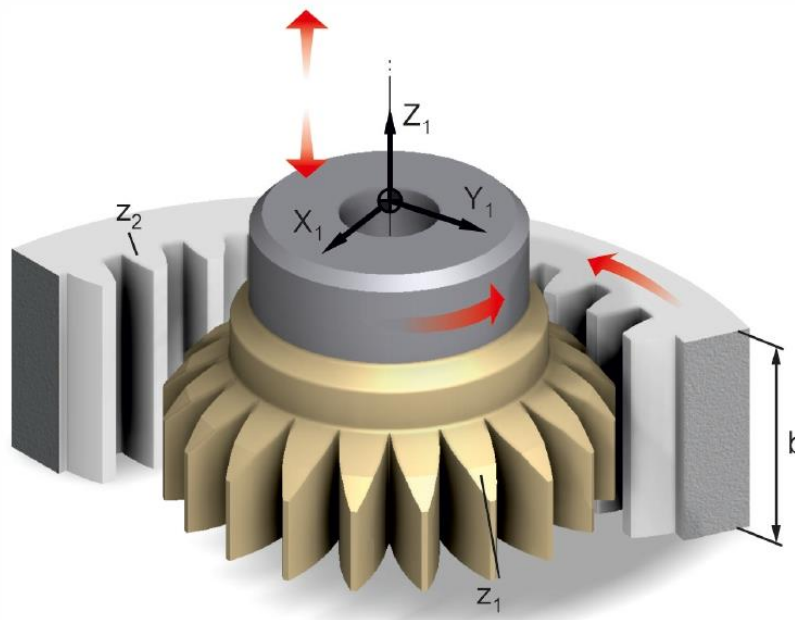


System 4





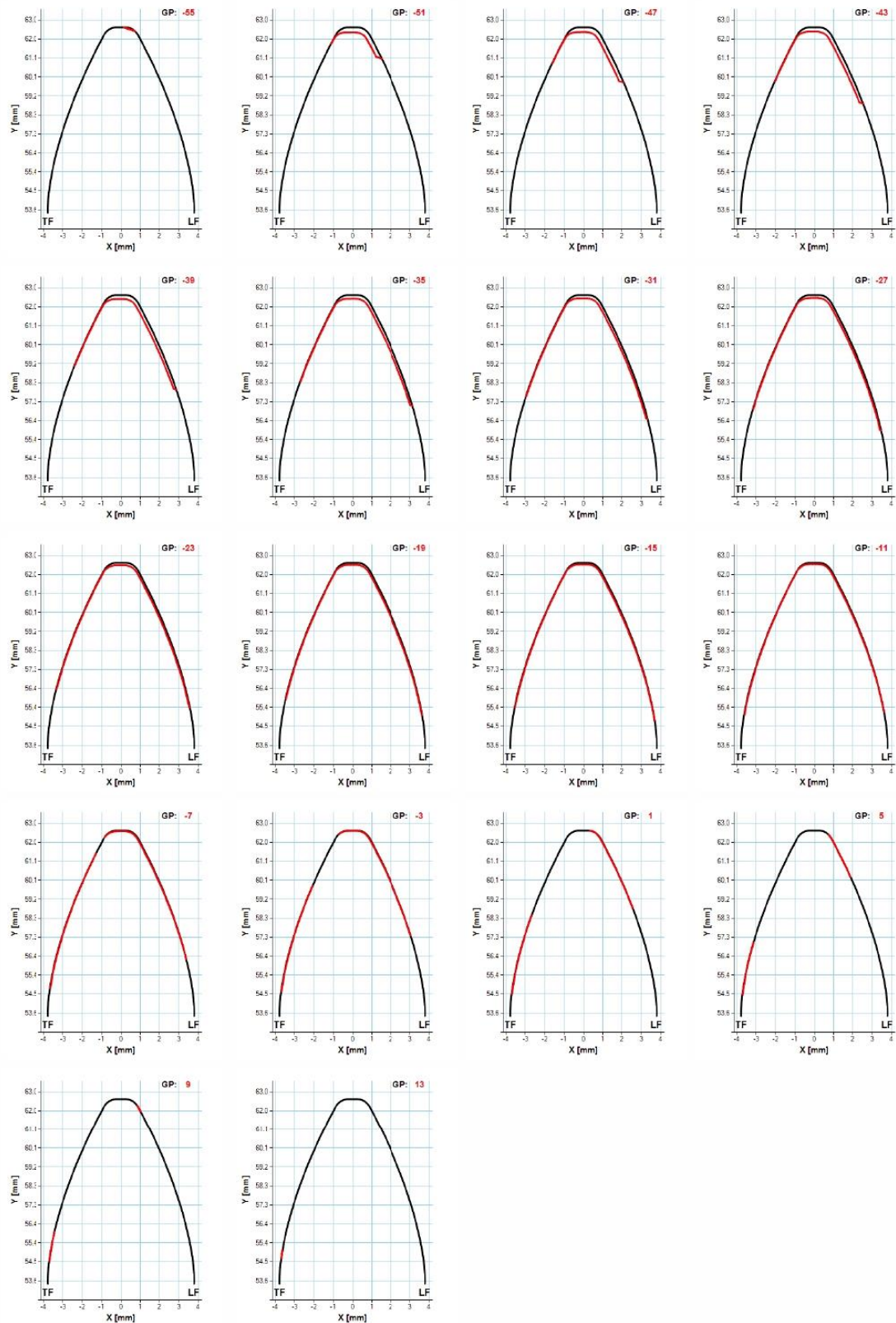
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

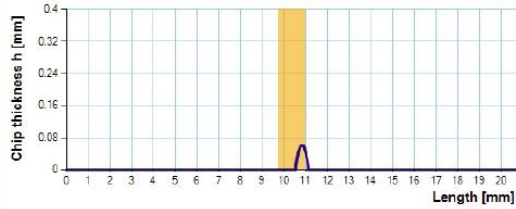
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	8 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

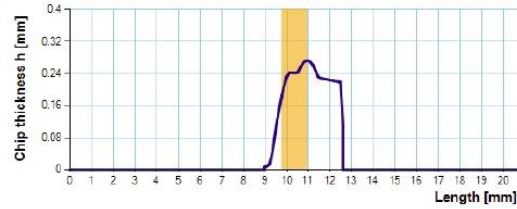


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -55, h_{max} : 0.0612 mm, Section area: 0.0247 mm²



GP -51, h_{max} : 0.2721 mm, Section area: 0.682 mm²



GP -47, h_{max} : 0.2522 mm, Section area: 0.8995 mm²



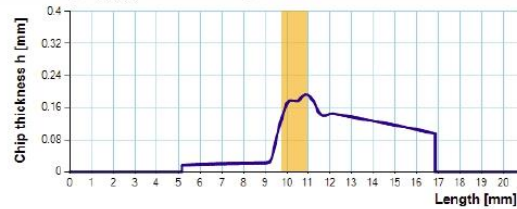
GP -43, h_{max} : 0.2321 mm, Section area: 1.0274 mm²



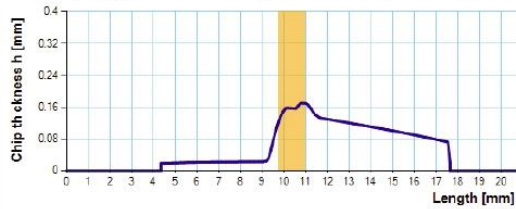
GP -39, h_{max} : 0.2128 mm, Section area: 1.083 mm²



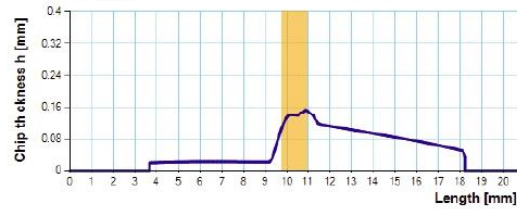
GP -35, h_{max} : 0.193 mm, Section area: 1.0748 mm²



GP -31, h_{max} : 0.1712 mm, Section area: 1.0278 mm²



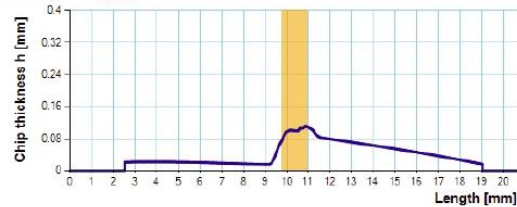
GP -27, h_{max} : 0.1526 mm, Section area: 0.9472 mm²



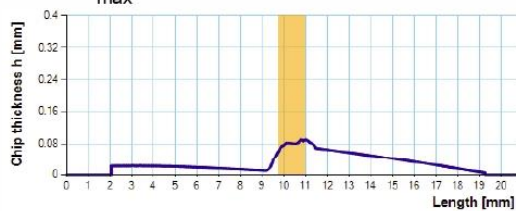
GP -23, h_{max} : 0.1311 mm, Section area: 0.8418 mm²



GP -19, h_{max} : 0.1118 mm, Section area: 0.7185 mm²



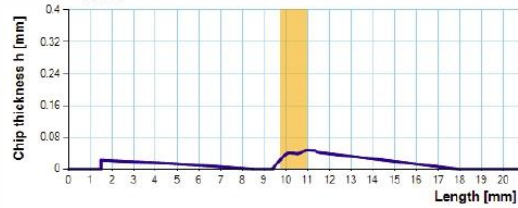
GP -15, h_{max} : 0.0904 mm, Section area: 0.5844 mm²



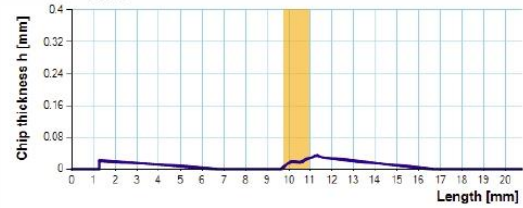
GP -11, h_{max} : 0.0706 mm, Section area: 0.4482 mm²



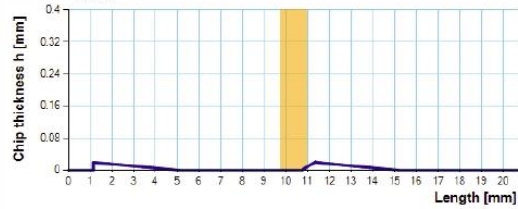
GP -7, h_{\max} : 0.0475 mm, Section area: 0.2964 mm²



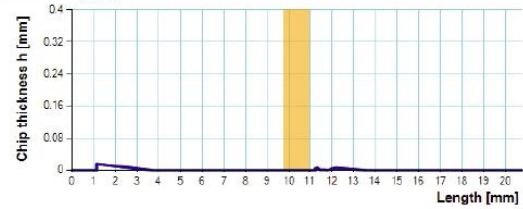
GP -3, h_{\max} : 0.0344 mm, Section area: 0.1772 mm²



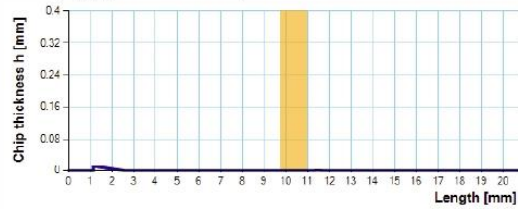
GP 1, h_{\max} : 0.0207 mm, Section area: 0.0839 mm²



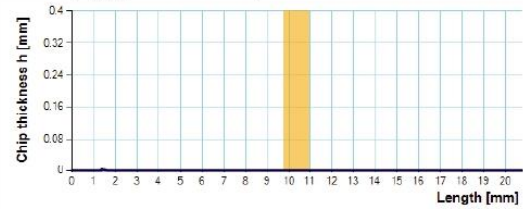
GP 5, h_{\max} : 0.0156 mm, Section area: 0.0279 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.0107 mm, Section area: 0.0079 mm²

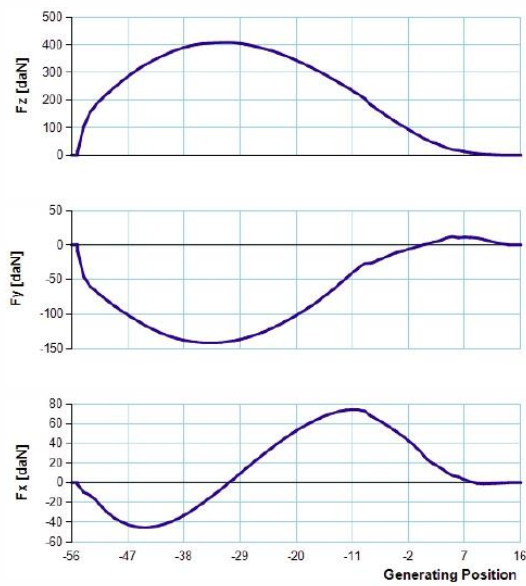


GP 13, h_{\max} : 0.0025 mm, Section area: 0.0006 mm²

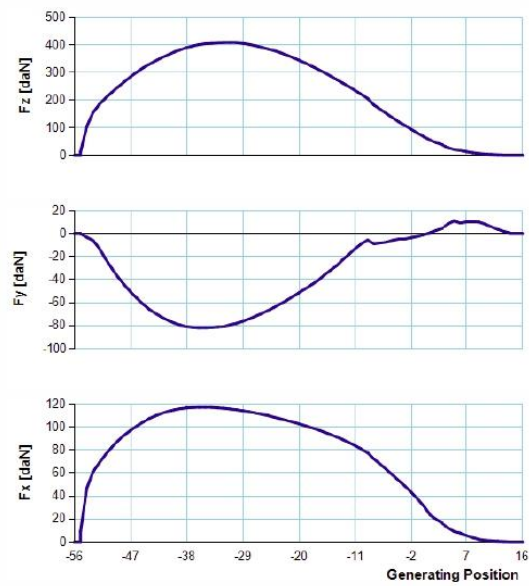


SINGLE GAP FORCES

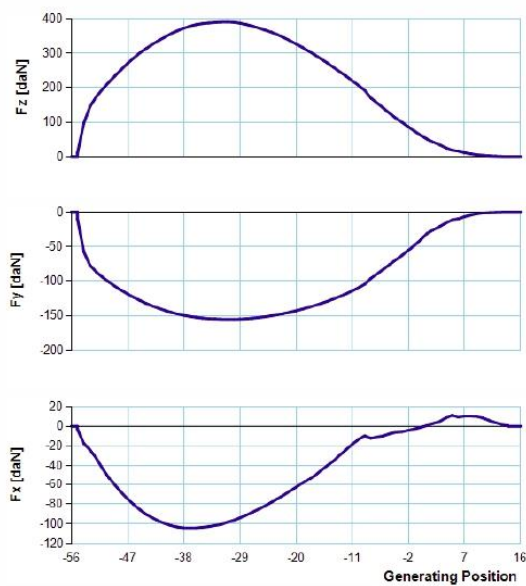
System 1



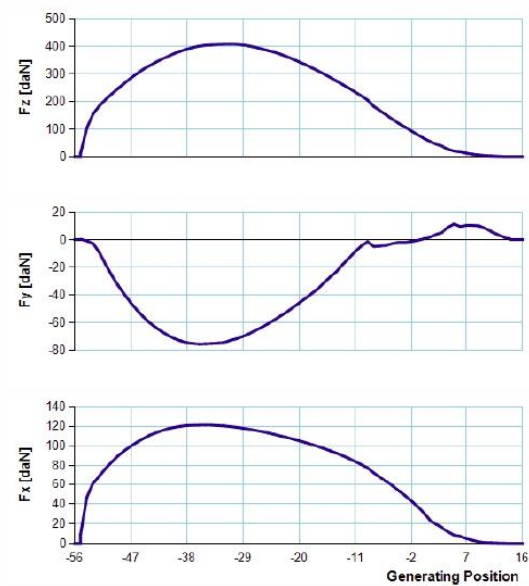
System 3

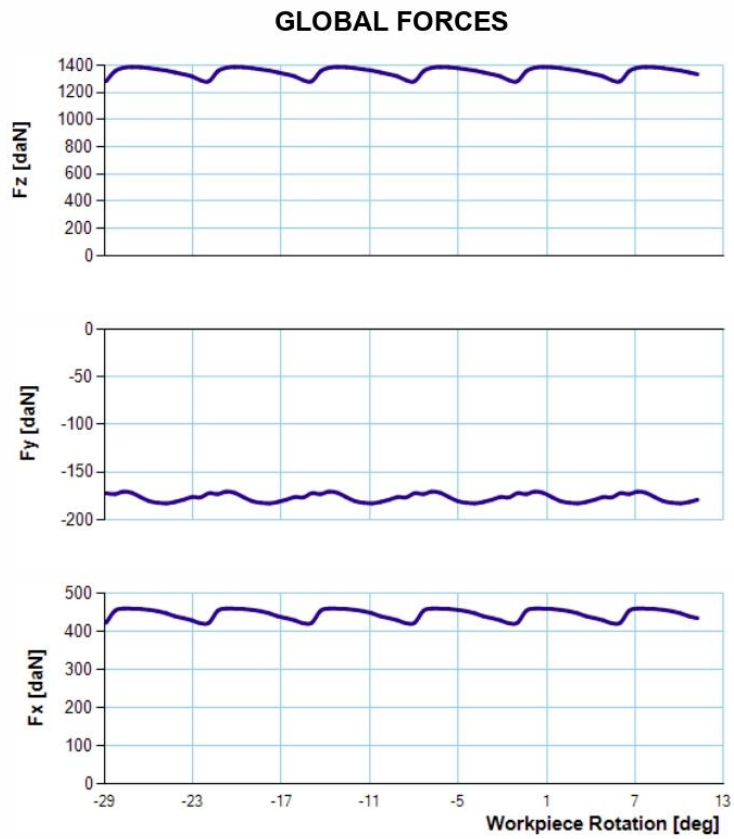


System 2

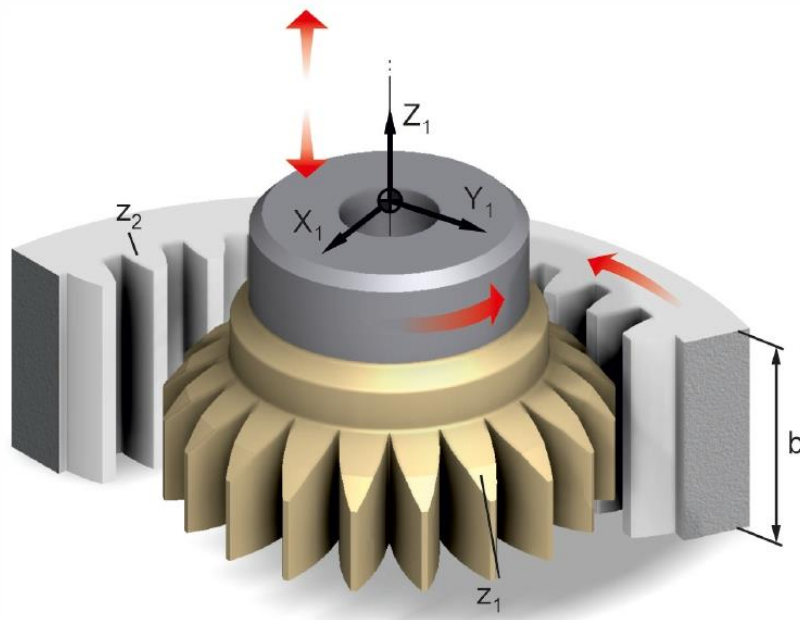


System 4





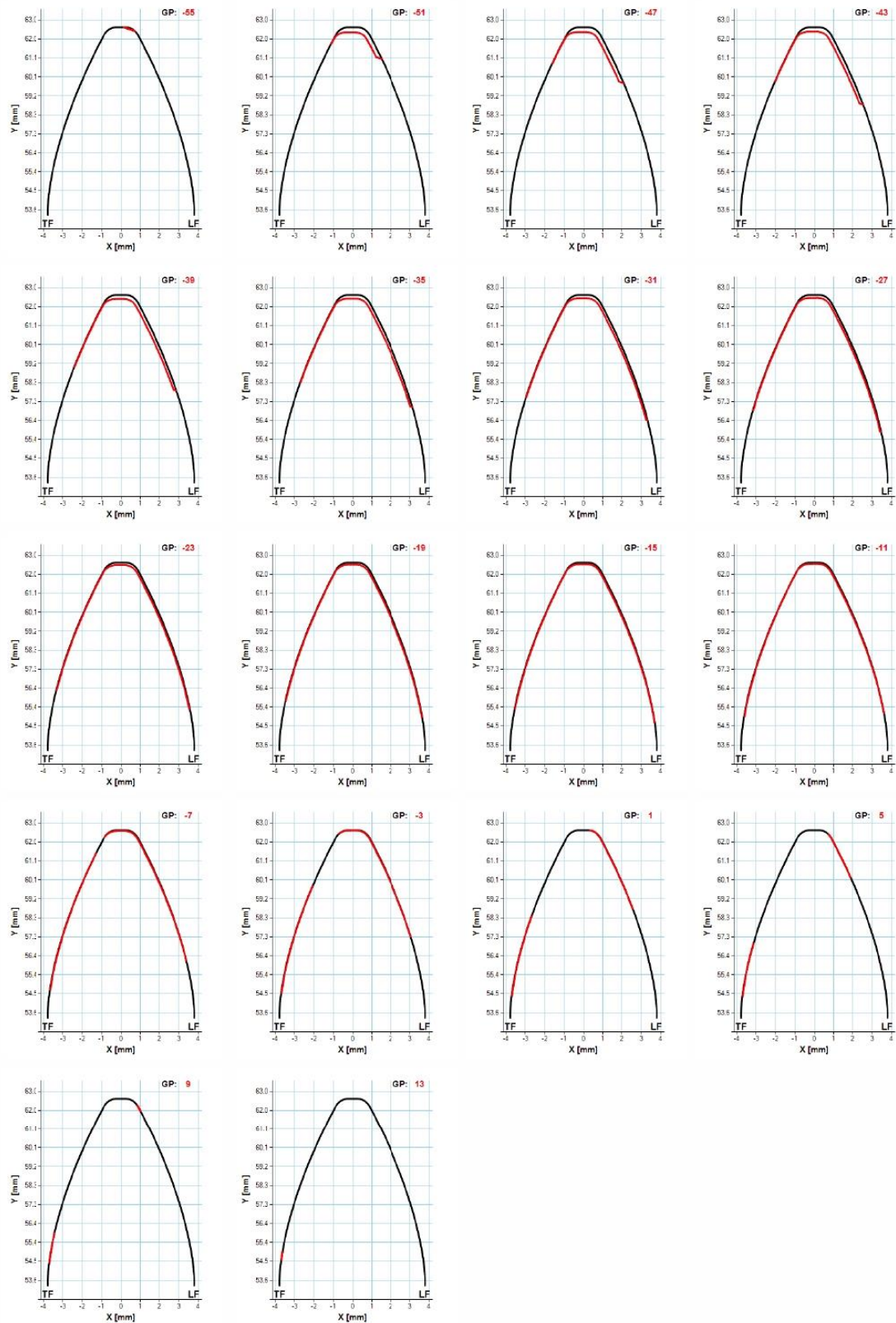
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

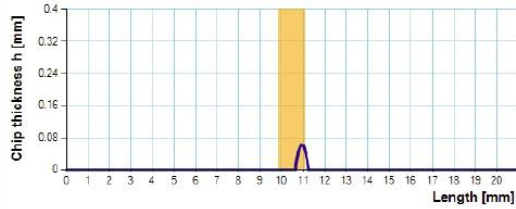
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	0 deg
Tool helix angle (β_1):	0 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	12 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS

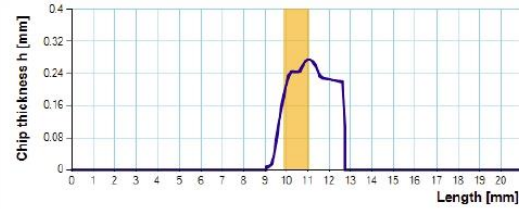


CHIP THICKNESS CHARTS

GP -55, h_{\max} : 0.0621 mm, Section area: 0.025 mm²



GP -51, h_{\max} : 0.2746 mm, Section area: 0.6909 mm²



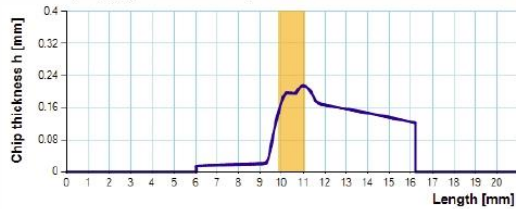
GP -47, h_{\max} : 0.2549 mm, Section area: 0.9134 mm²



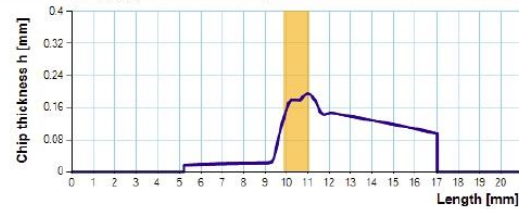
GP -43, h_{\max} : 0.2344 mm, Section area: 1.0407 mm²



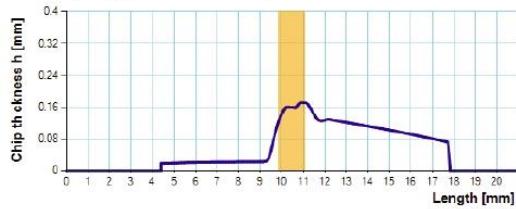
GP -39, h_{\max} : 0.215 mm, Section area: 1.0967 mm²



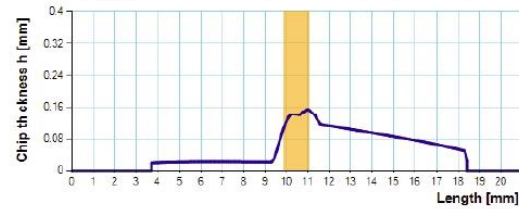
GP -35, h_{\max} : 0.1951 mm, Section area: 1.0893 mm²



GP -31, h_{\max} : 0.1733 mm, Section area: 1.0365 mm²



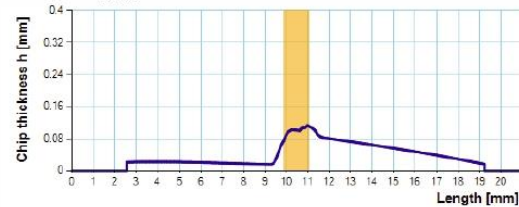
GP -27, h_{\max} : 0.1544 mm, Section area: 0.958 mm²



GP -23, h_{\max} : 0.1328 mm, Section area: 0.8519 mm²



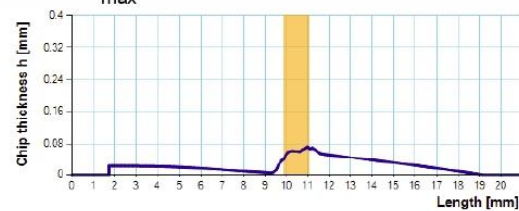
GP -19, h_{\max} : 0.1131 mm, Section area: 0.7279 mm²



GP -15, h_{\max} : 0.0913 mm, Section area: 0.5941 mm²



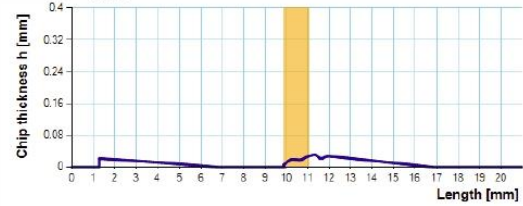
GP -11, h_{\max} : 0.0714 mm, Section area: 0.455 mm²



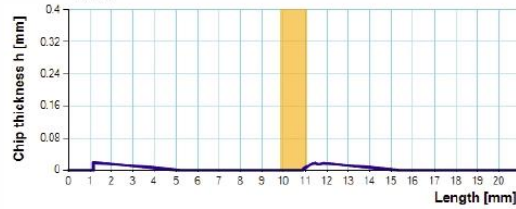
GP -7, h_{\max} : 0.048 mm, Section area: 0.299 mm²



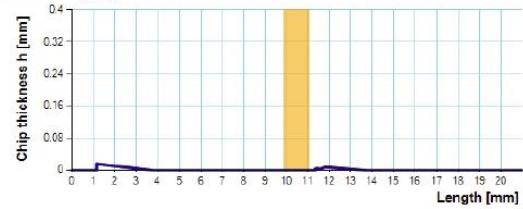
GP -3, h_{\max} : 0.0307 mm, Section area: 0.1762 mm²



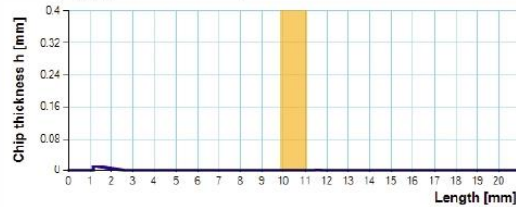
GP 1, h_{\max} : 0.0192 mm, Section area: 0.0838 mm²



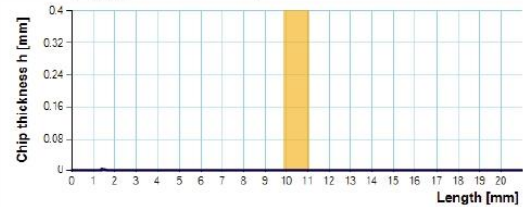
GP 5, h_{\max} : 0.0156 mm, Section area: 0.0316 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.0107 mm, Section area: 0.008 mm²

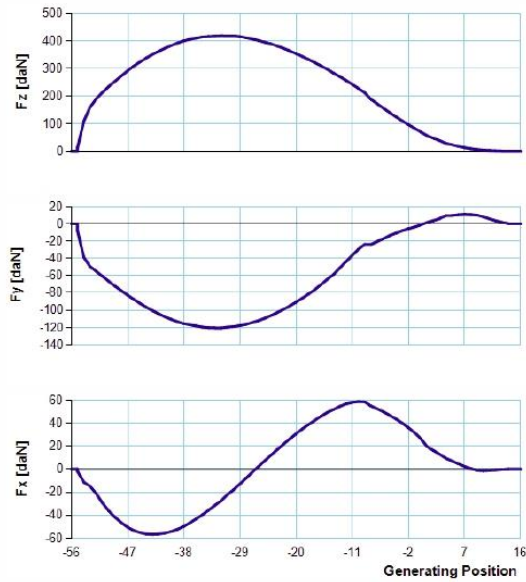


GP 13, h_{\max} : 0.0025 mm, Section area: 0.0006 mm²

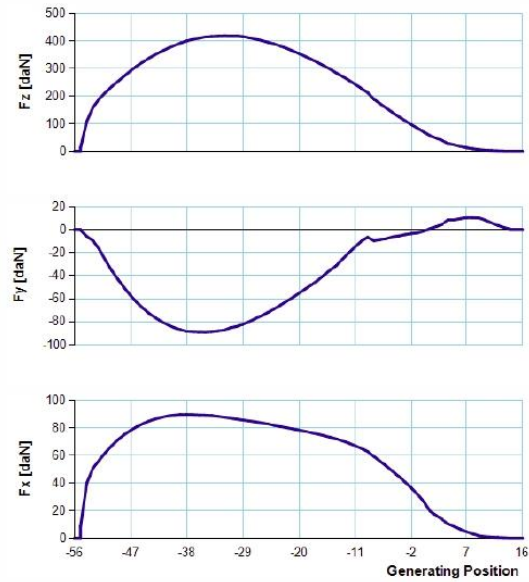


SINGLE GAP FORCES

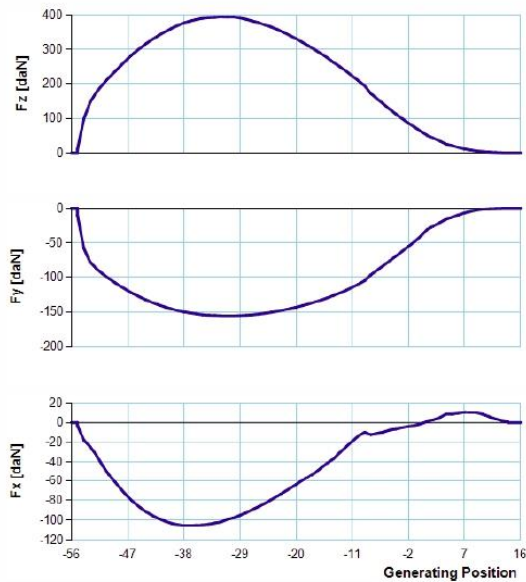
System 1



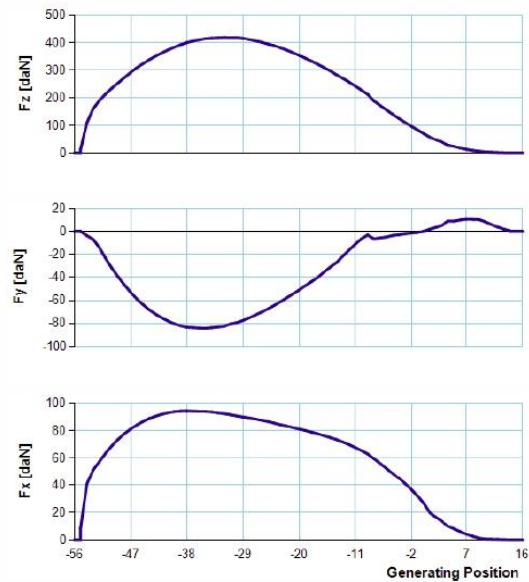
System 3



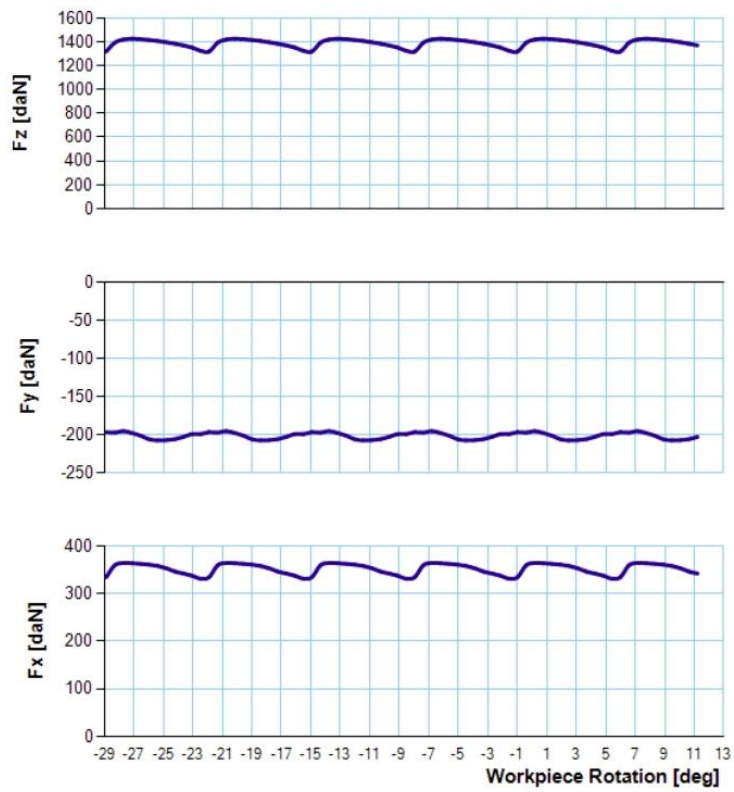
System 2



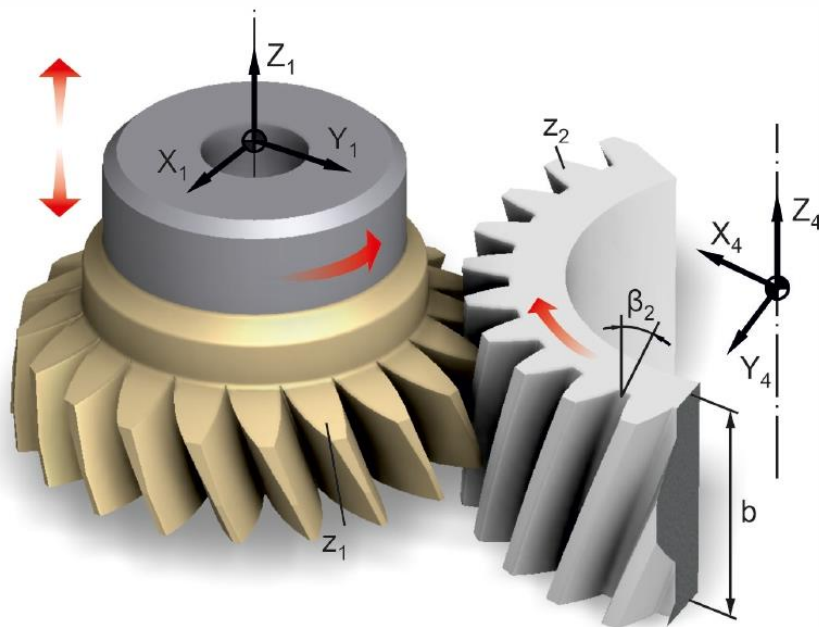
System 4



GLOBAL FORCES



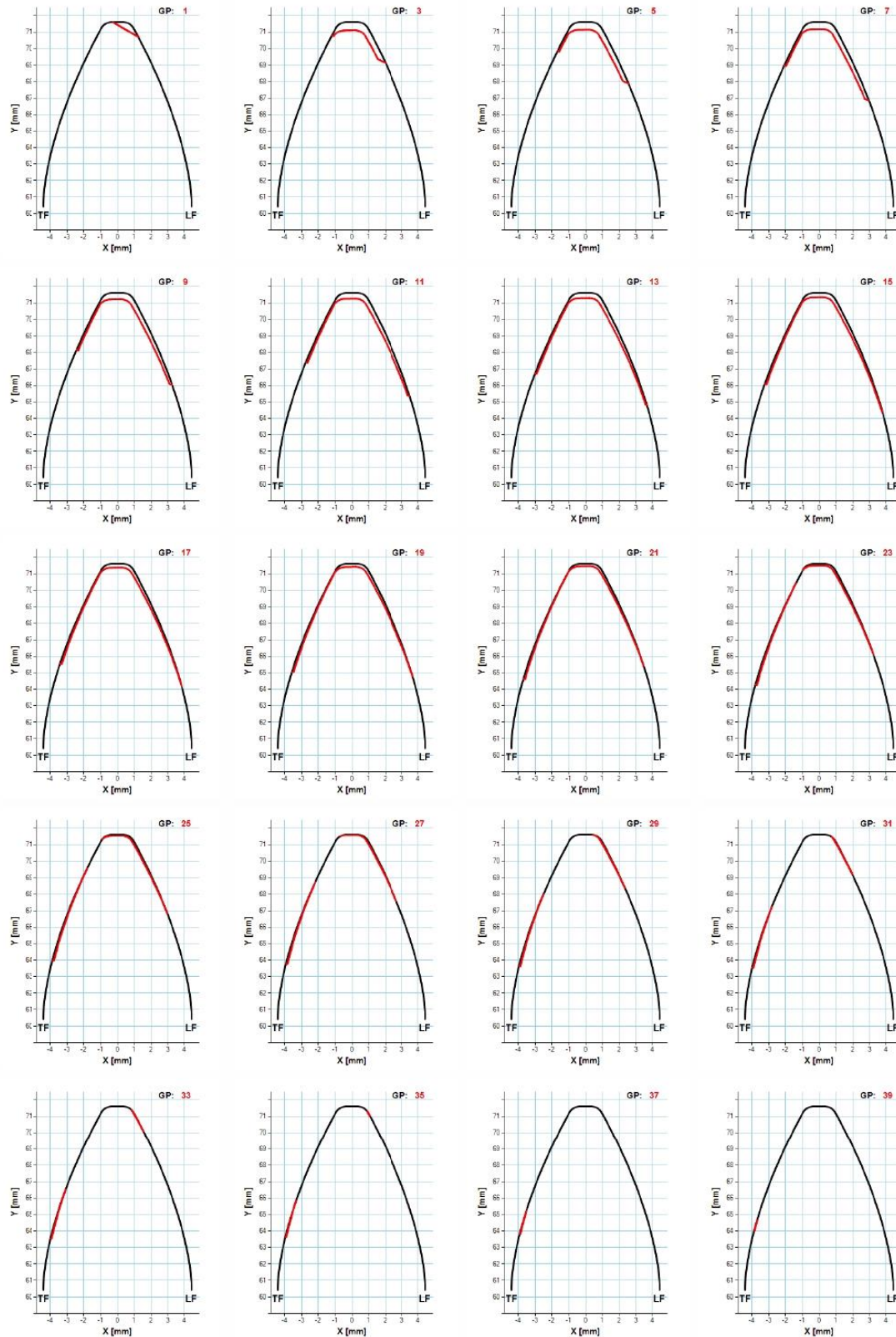
Gear Shaping Simulation



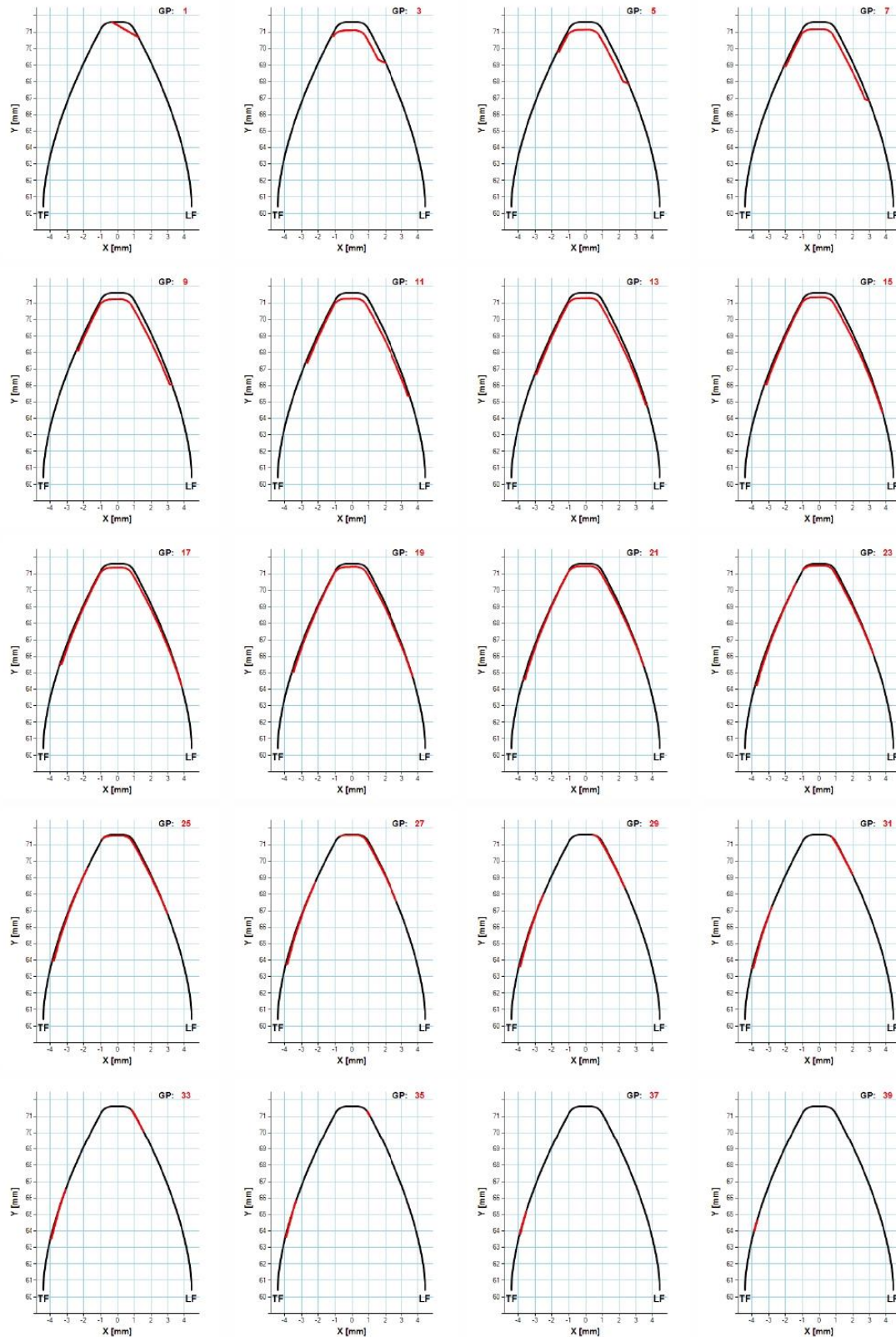
CASE DATA

Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

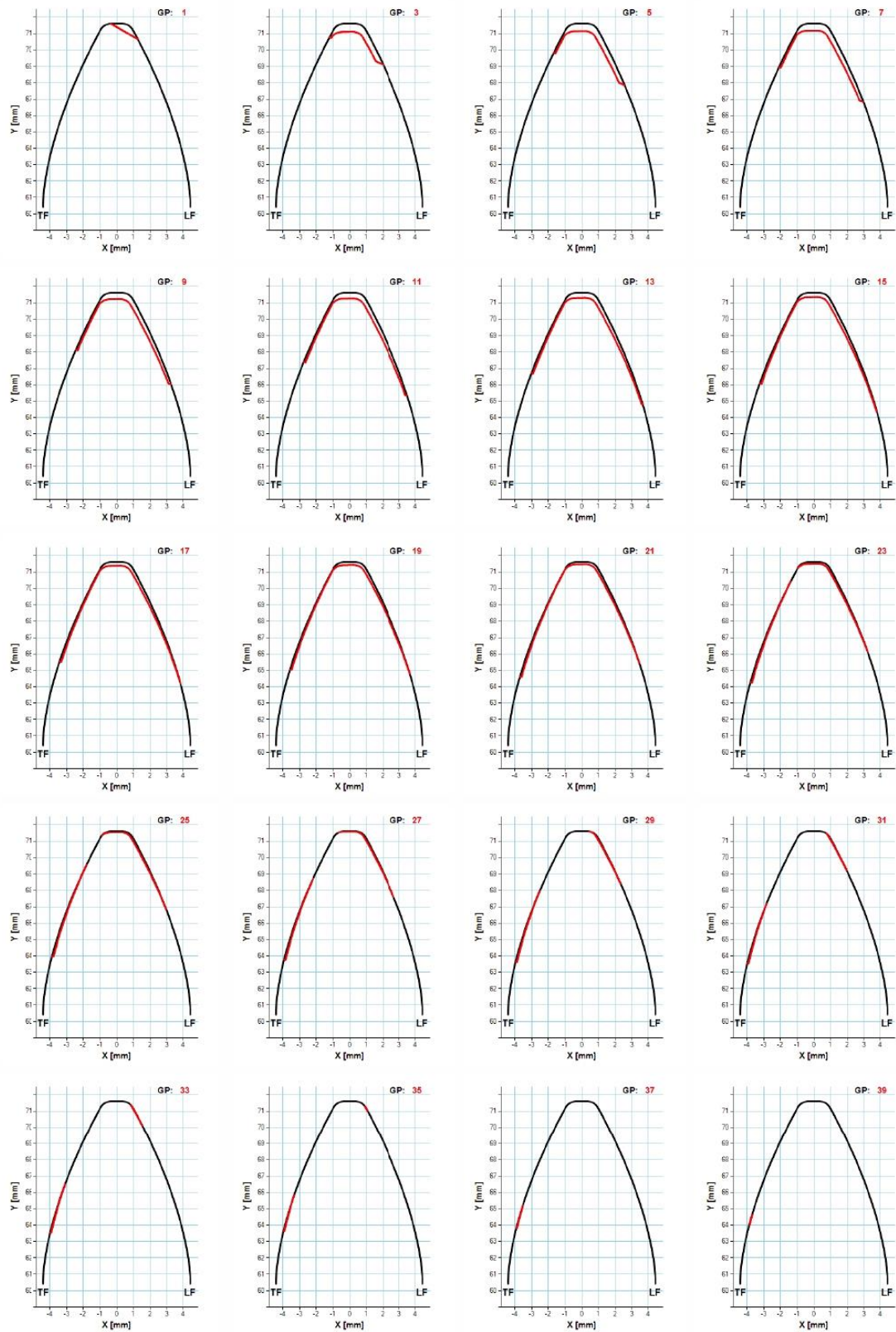
CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 1



CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

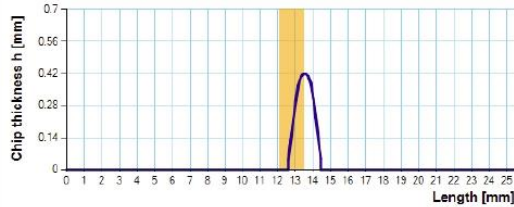


CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 3

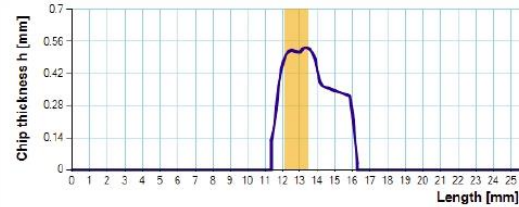


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 1

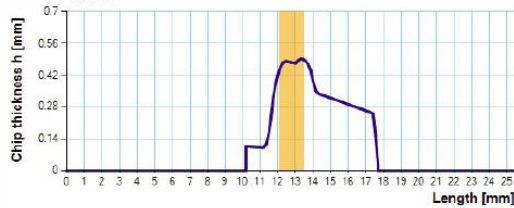
GP 1, h_{\max} : 0.4188 mm, Section area: 0.4494 mm²



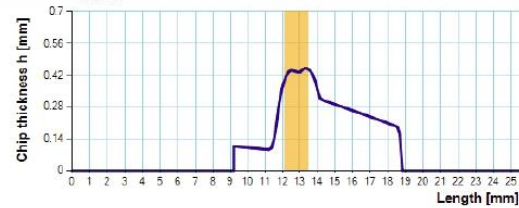
GP 3, h_{\max} : 0.5333 mm, Section area: 1.7008 mm²



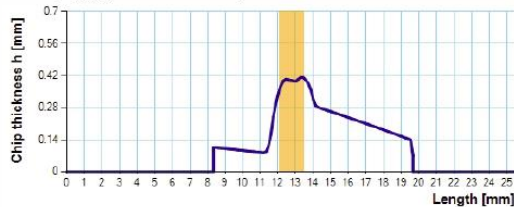
GP 5, h_{\max} : 0.493 mm, Section area: 2.0779 mm²



GP 7, h_{\max} : 0.4525 mm, Section area: 2.2442 mm²



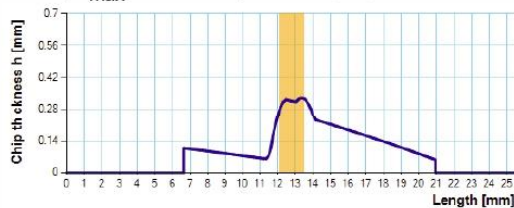
GP 9, h_{\max} : 0.4119 mm, Section area: 2.2685 mm²



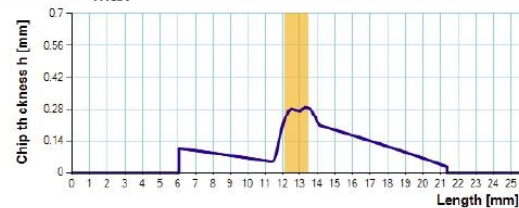
GP 11, h_{\max} : 0.3705 mm, Section area: 2.1993 mm²



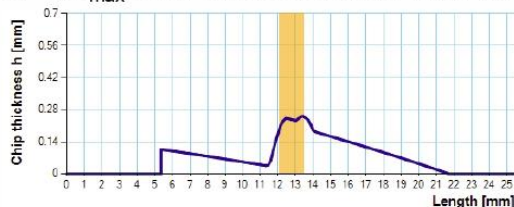
GP 13, h_{\max} : 0.331 mm, Section area: 2.0569 mm²



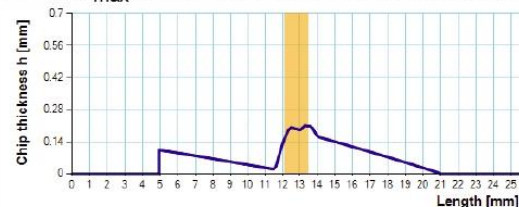
GP 15, h_{\max} : 0.291 mm, Section area: 1.8638 mm²



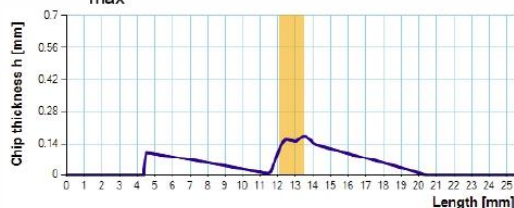
GP 17, h_{\max} : 0.2511 mm, Section area: 1.6361 mm²



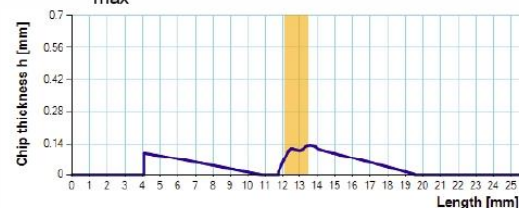
GP 19, h_{\max} : 0.2101 mm, Section area: 1.3945 mm²



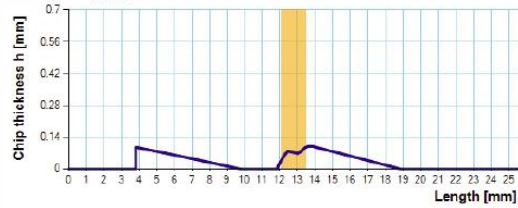
GP 21, h_{\max} : 0.1721 mm, Section area: 1.1458 mm²



GP 23, h_{\max} : 0.1332 mm, Section area: 0.9061 mm²



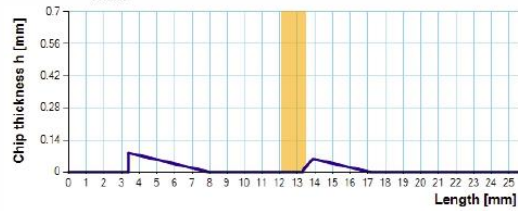
GP 25, h_{\max} : 0.0994 mm, Section area: 0.6818 mm²



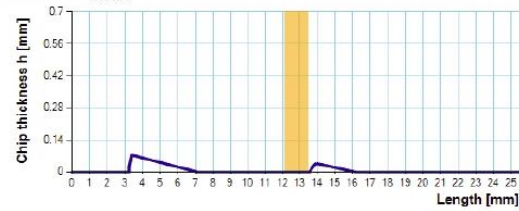
GP 27, h_{\max} : 0.0907 mm, Section area: 0.4788 mm²



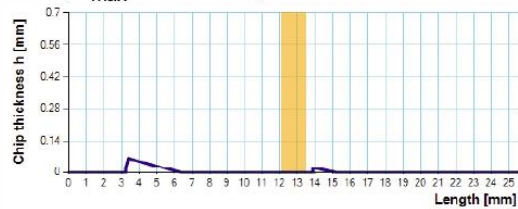
GP 29, h_{\max} : 0.084 mm, Section area: 0.3115 mm²



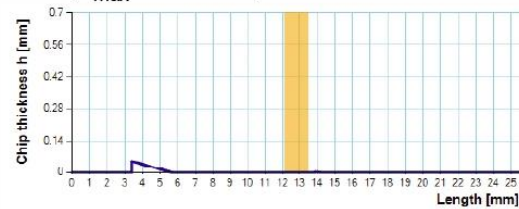
GP 31, h_{\max} : 0.0741 mm, Section area: 0.1977 mm²



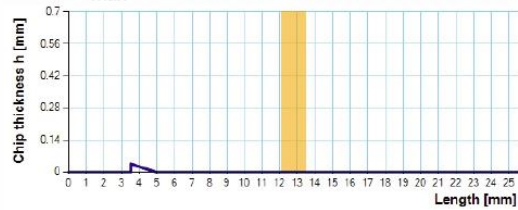
GP 33, h_{\max} : 0.0632 mm, Section area: 0.1159 mm²



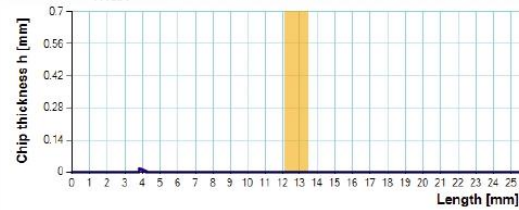
GP 35, h_{\max} : 0.0515 mm, Section area: 0.0618 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0354 mm, Section area: 0.0271 mm²

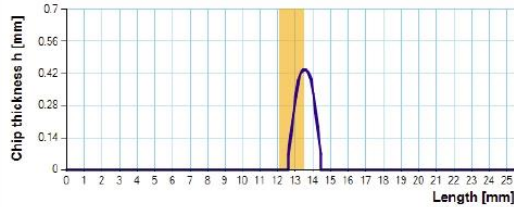


GP 39, h_{\max} : 0.0143 mm, Section area: 0.005 mm²

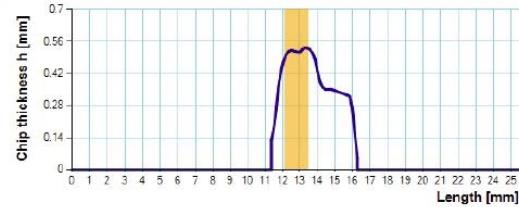


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.4363 mm, Section area: 0.4807 mm²



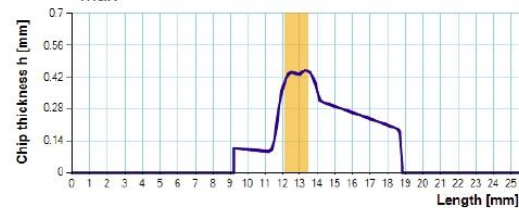
GP 3, h_{\max} : 0.5327 mm, Section area: 1.7055 mm²



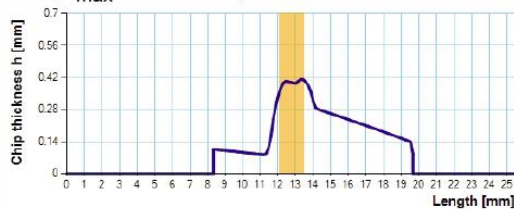
GP 5, h_{\max} : 0.4924 mm, Section area: 2.0811 mm²



GP 7, h_{\max} : 0.4519 mm, Section area: 2.2464 mm²



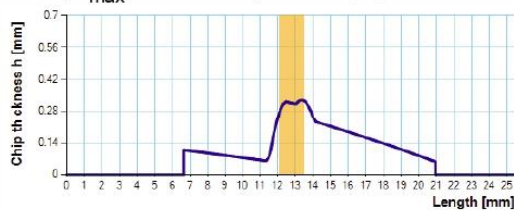
GP 9, h_{\max} : 0.4112 mm, Section area: 2.2684 mm²



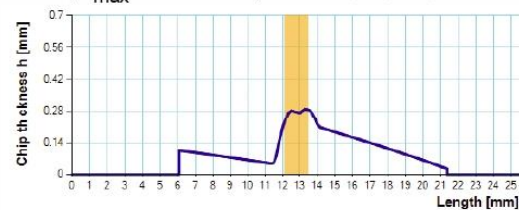
GP 11, h_{\max} : 0.3698 mm, Section area: 2.1976 mm²



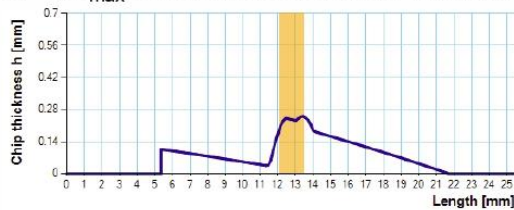
GP 13, h_{\max} : 0.3305 mm, Section area: 2.0543 mm²



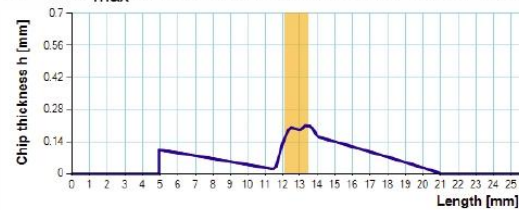
GP 15, h_{\max} : 0.2905 mm, Section area: 1.8605 mm²



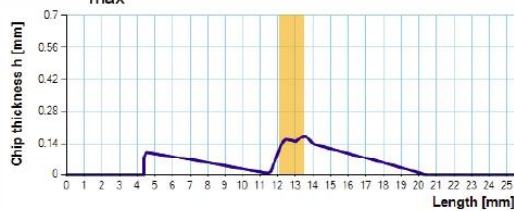
GP 17, h_{\max} : 0.2509 mm, Section area: 1.6323 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.2096 mm, Section area: 1.3907 mm²



GP 21, h_{\max} : 0.1716 mm, Section area: 1.1445 mm²



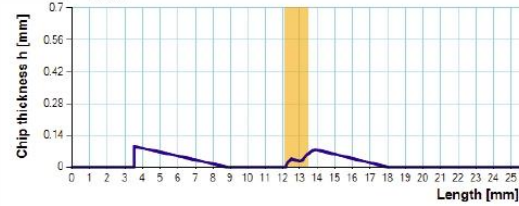
GP 23, h_{\max} : 0.1327 mm, Section area: 0.9015 mm²



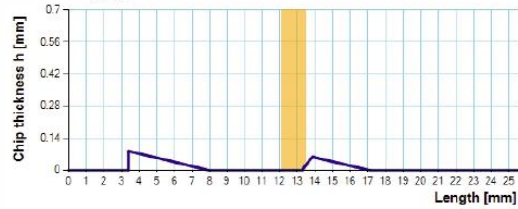
GP 25, h_{\max} : 0.0987 mm, Section area: 0.6783 mm²



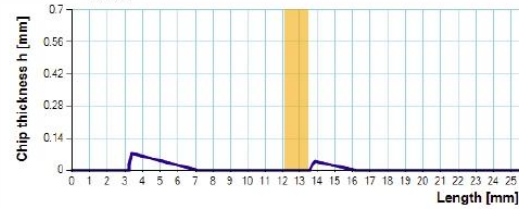
GP 27, h_{\max} : 0.0906 mm, Section area: 0.4758 mm²



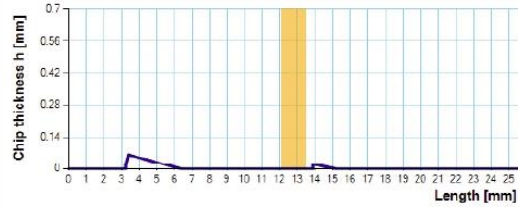
GP 29, h_{\max} : 0.0838 mm, Section area: 0.3106 mm²



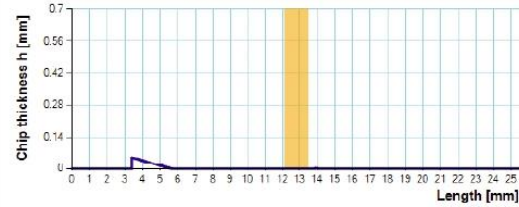
GP 31, h_{\max} : 0.0739 mm, Section area: 0.1976 mm²



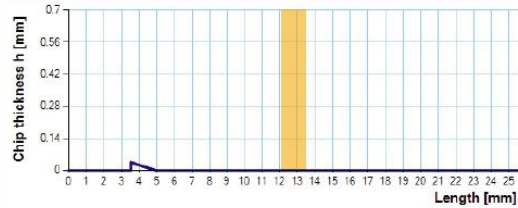
GP 33, h_{\max} : 0.0631 mm, Section area: 0.1147 mm²



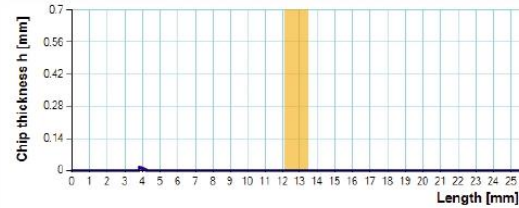
GP 35, h_{\max} : 0.0513 mm, Section area: 0.0612 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0352 mm, Section area: 0.0266 mm²

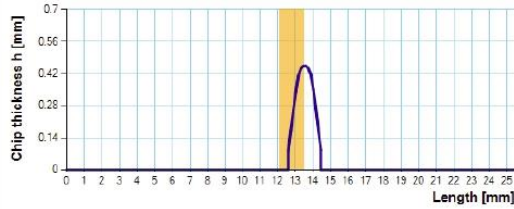


GP 39, h_{\max} : 0.0141 mm, Section area: 0.0048 mm²

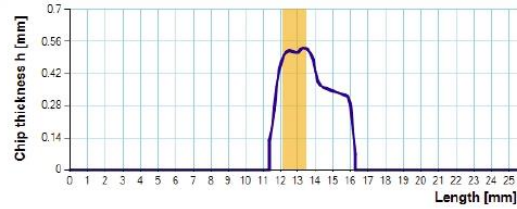


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 3

GP 1, h_{\max} : 0.4537 mm, Section area: 0.5128 mm²



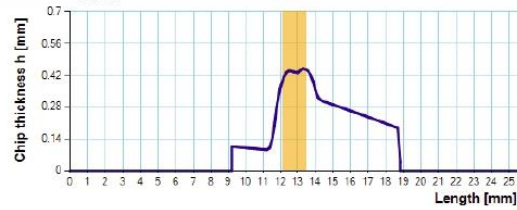
GP 3, h_{\max} : 0.5321 mm, Section area: 1.7177 mm²



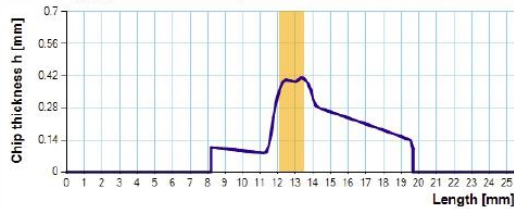
GP 5, h_{\max} : 0.4918 mm, Section area: 2.0849 mm²



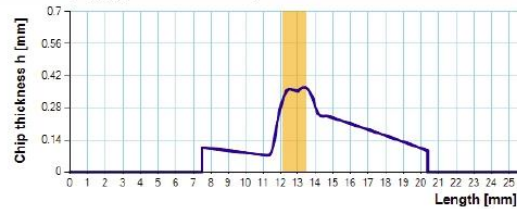
GP 7, h_{\max} : 0.4514 mm, Section area: 2.2489 mm²



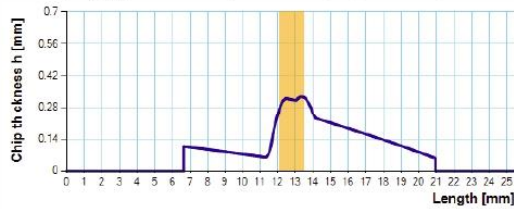
GP 9, h_{\max} : 0.4105 mm, Section area: 2.2696 mm²



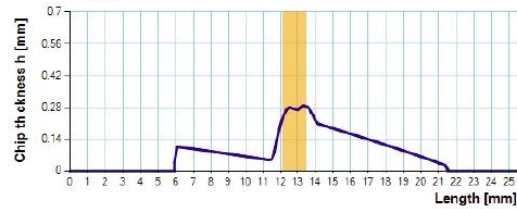
GP 11, h_{\max} : 0.3693 mm, Section area: 2.1929 mm²



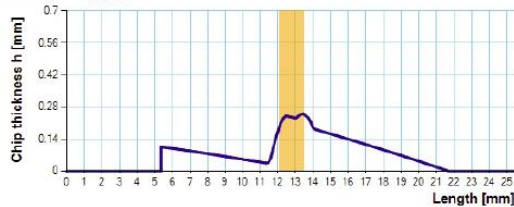
GP 13, h_{\max} : 0.33 mm, Section area: 2.0518 mm²



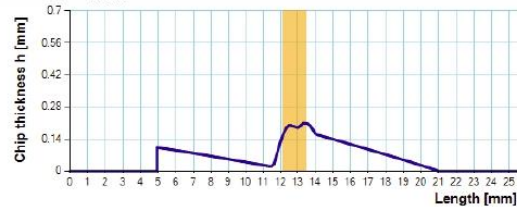
GP 15, h_{\max} : 0.2899 mm, Section area: 1.8517 mm²



GP 17, h_{\max} : 0.2505 mm, Section area: 1.6292 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.209 mm, Section area: 1.3879 mm²



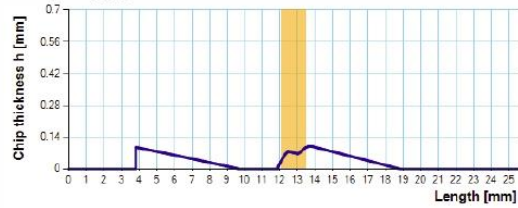
GP 21, h_{\max} : 0.171 mm, Section area: 1.1441 mm²



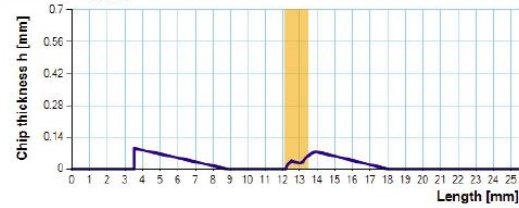
GP 23, h_{\max} : 0.1321 mm, Section area: 0.8996 mm²



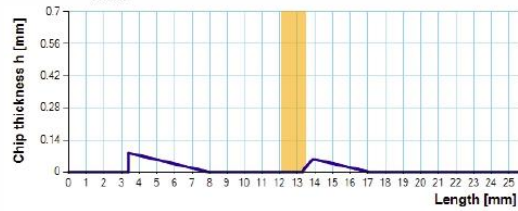
GP 25, h_{\max} : 0.0983 mm, Section area: 0.6751 mm²



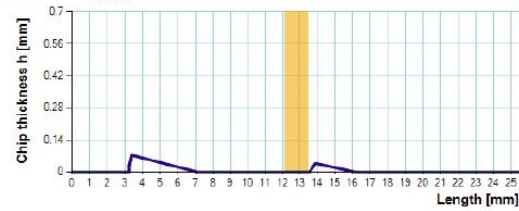
GP 27, h_{\max} : 0.0905 mm, Section area: 0.4728 mm²



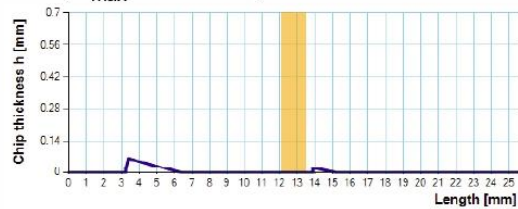
GP 29, h_{\max} : 0.0837 mm, Section area: 0.3076 mm²



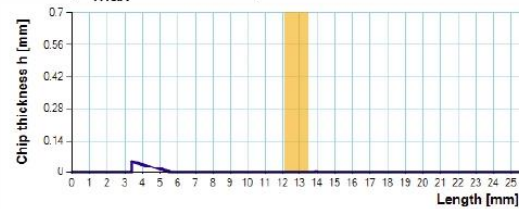
GP 31, h_{\max} : 0.0737 mm, Section area: 0.1953 mm²



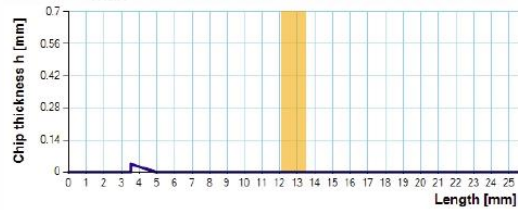
GP 33, h_{\max} : 0.0629 mm, Section area: 0.1136 mm²



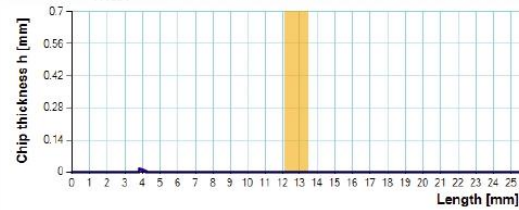
GP 35, h_{\max} : 0.0511 mm, Section area: 0.0605 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.035 mm, Section area: 0.0262 mm²

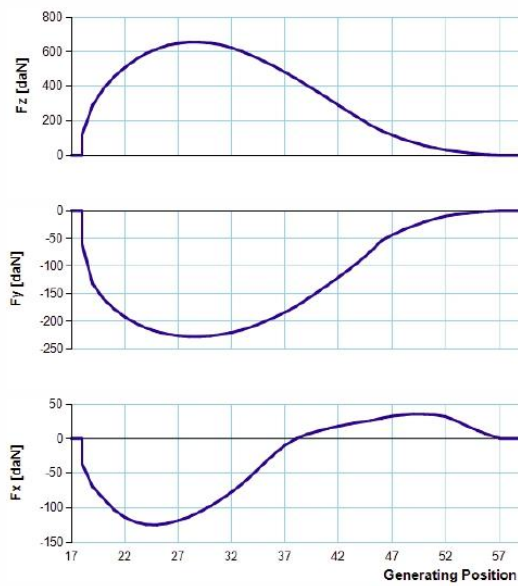


GP 39, h_{\max} : 0.0138 mm, Section area: 0.0046 mm²

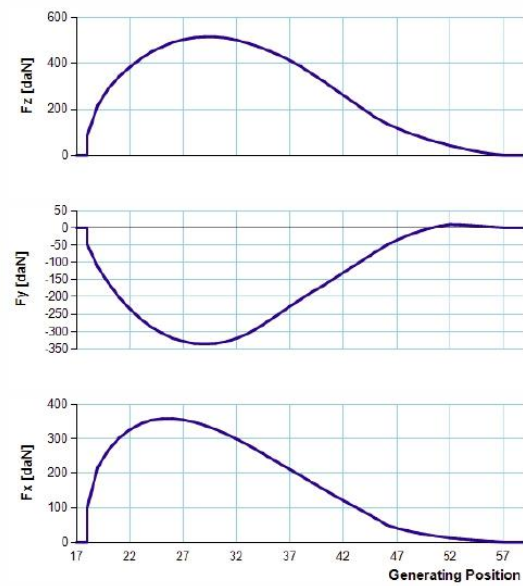


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 1

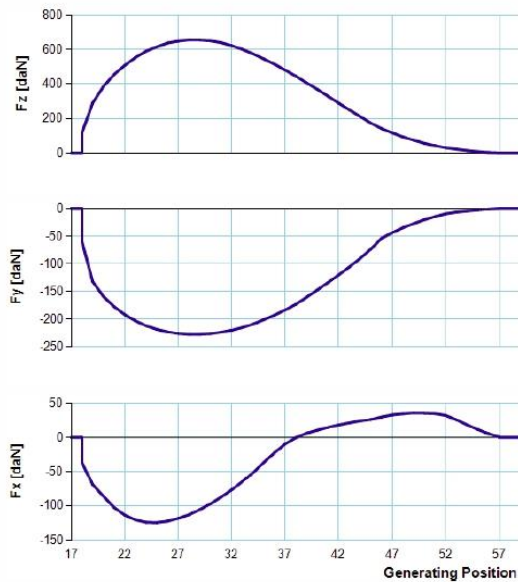
System 1



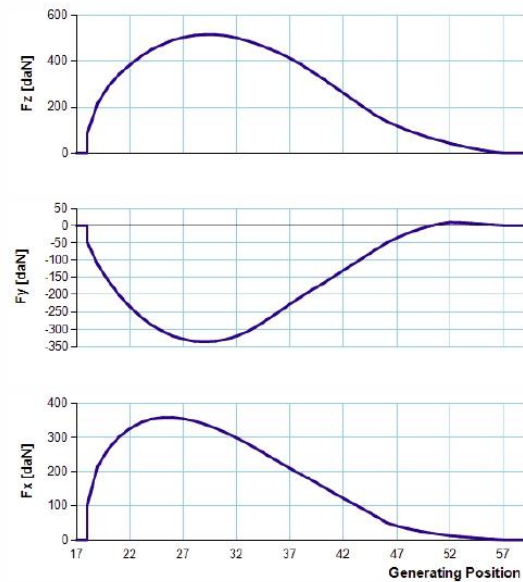
System 3



System 2

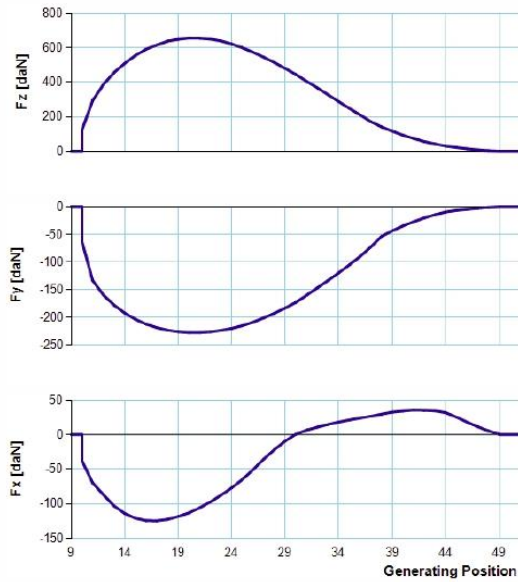


System 4

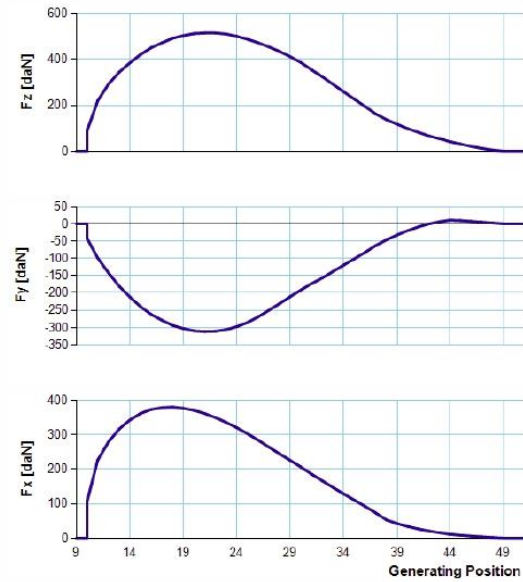


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

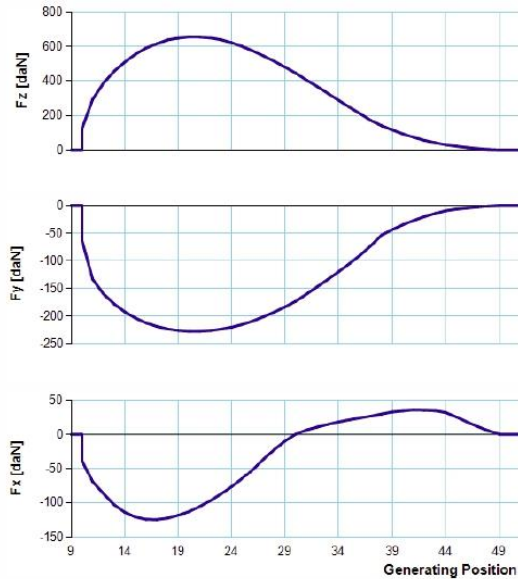
System 1



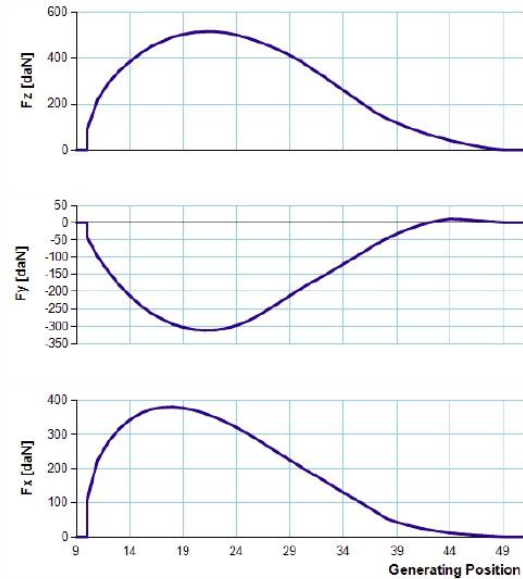
System 3



System 2

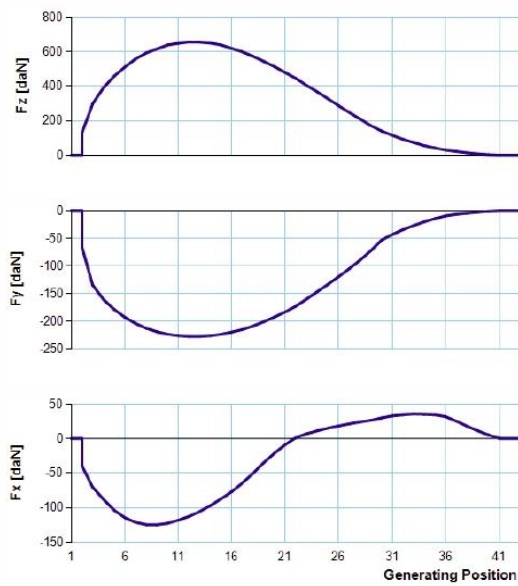


System 4

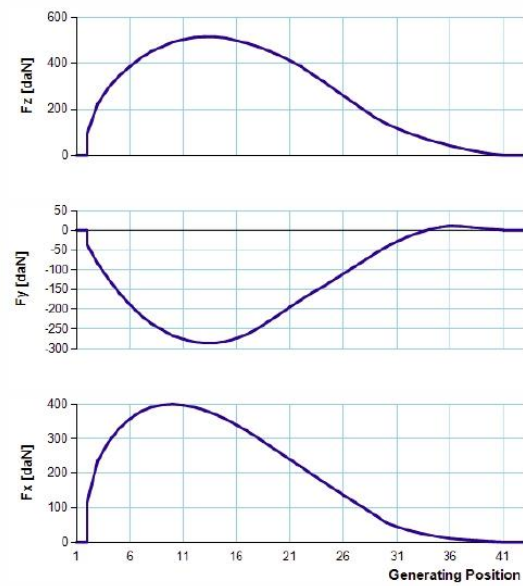


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 3

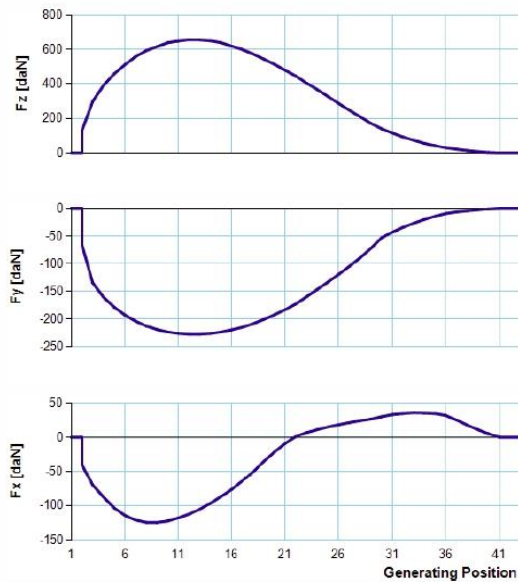
System 1



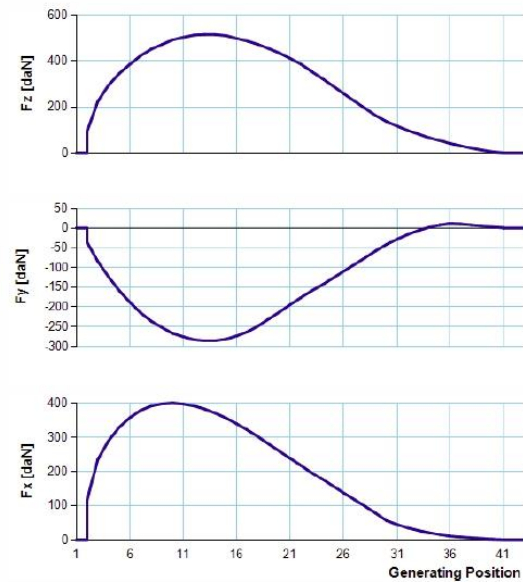
System 3



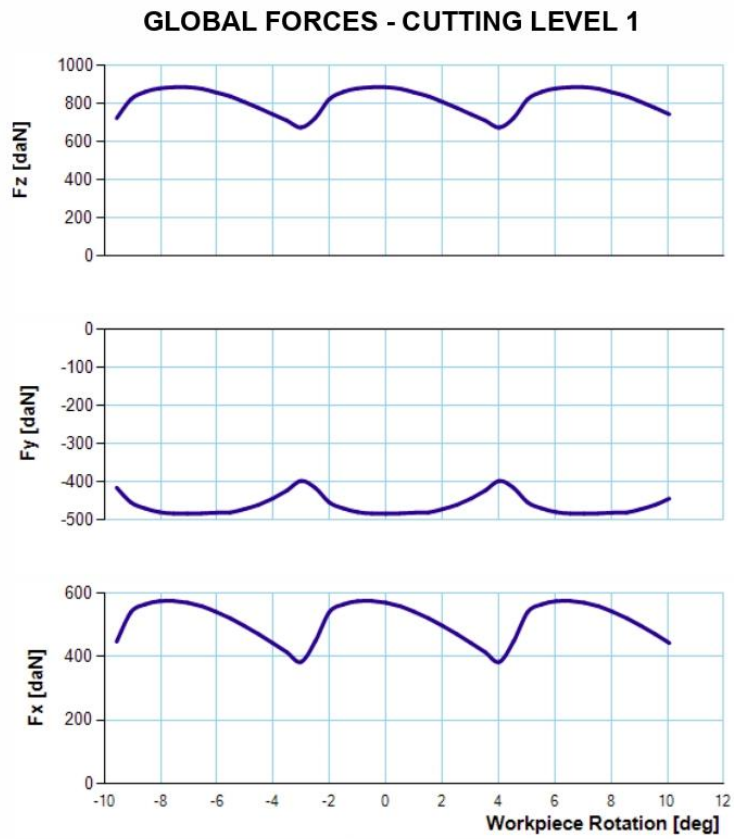
System 2



System 4

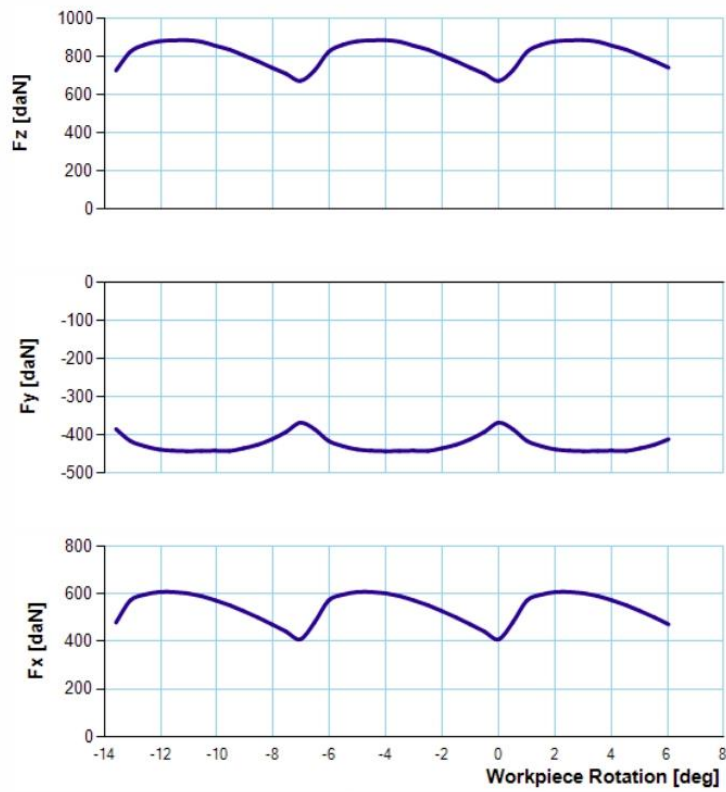


EX - HL Case 1



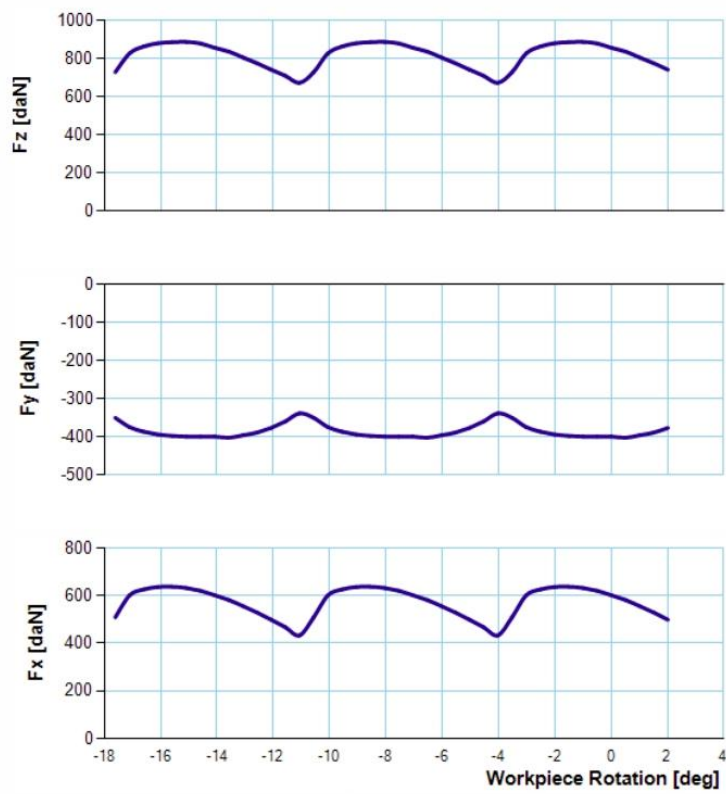
EX - HL Case 1

GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2

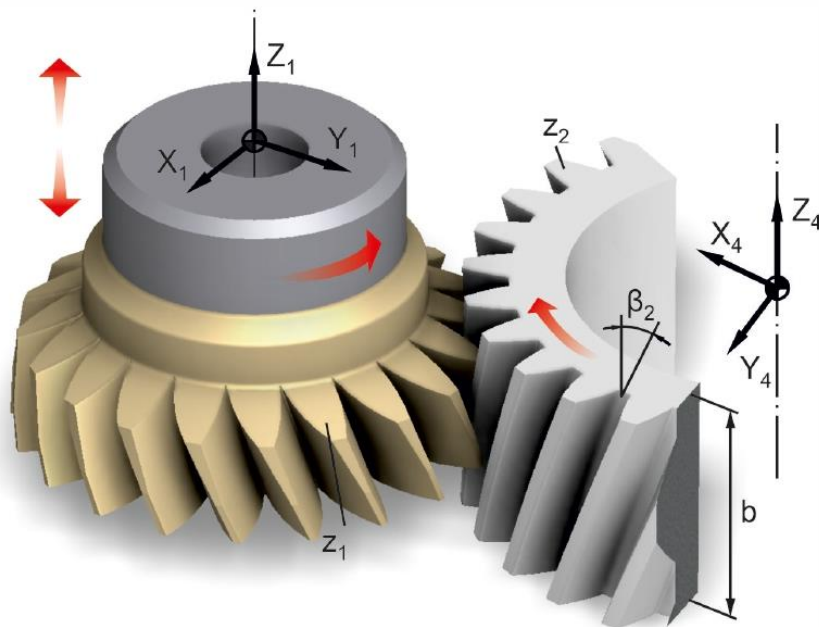


EX - HL Case 1

GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 3



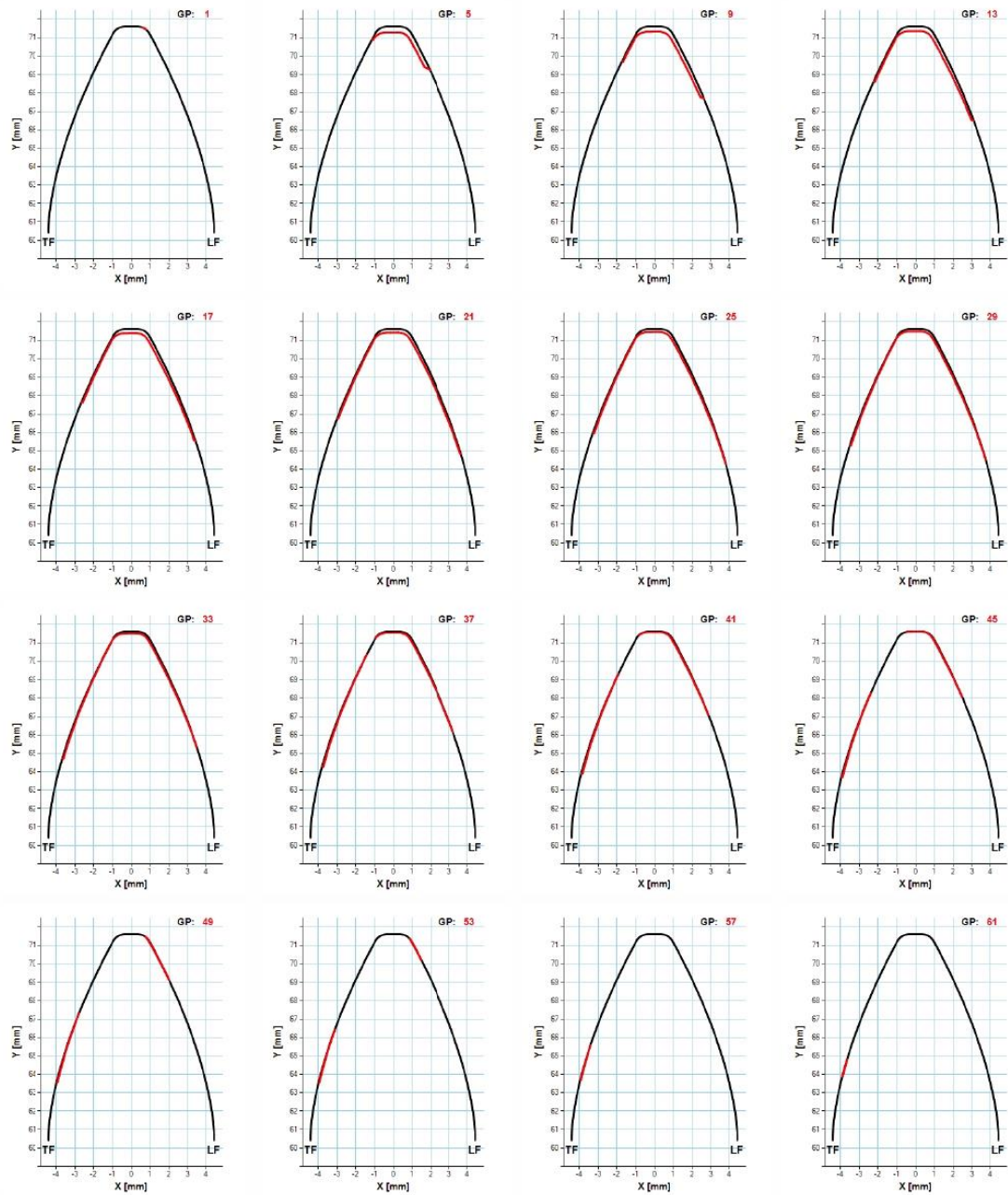
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

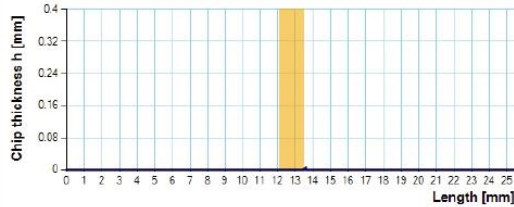
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.58 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

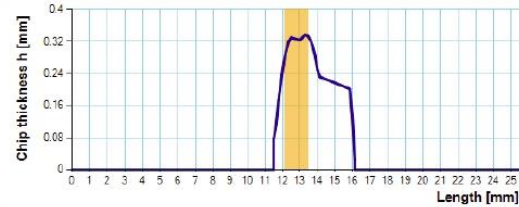


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.0044 mm, Section area: 0.0005 mm²



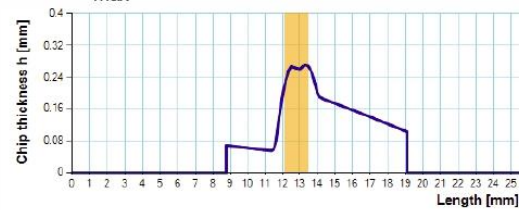
GP 5, h_{\max} : 0.3364 mm, Section area: 1.071 mm²



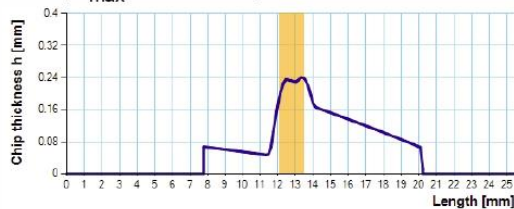
GP 9, h_{\max} : 0.3045 mm, Section area: 1.3474 mm²



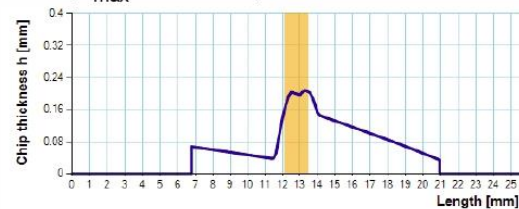
GP 13, h_{\max} : 0.2721 mm, Section area: 1.4347 mm²



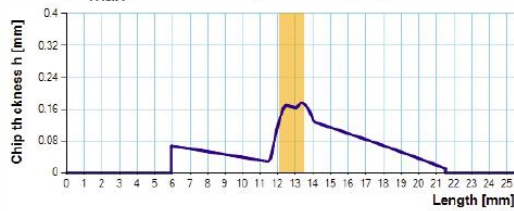
GP 17, h_{\max} : 0.2403 mm, Section area: 1.399 mm²



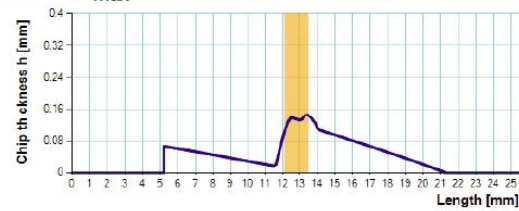
GP 21, h_{\max} : 0.2083 mm, Section area: 1.2948 mm²



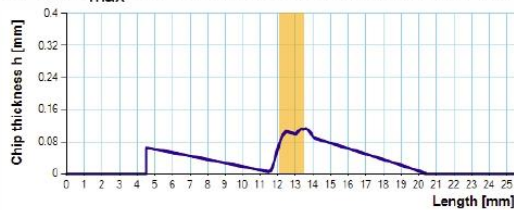
GP 25, h_{\max} : 0.1775 mm, Section area: 1.1369 mm²



GP 29, h_{\max} : 0.1461 mm, Section area: 0.9486 mm²



GP 33, h_{\max} : 0.1129 mm, Section area: 0.7547 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0818 mm, Section area: 0.5593 mm²



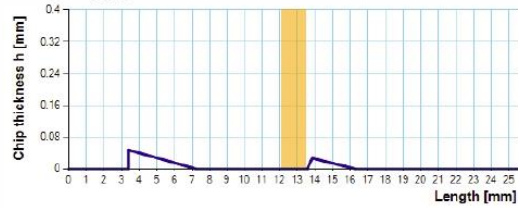
GP 41, h_{\max} : 0.0596 mm, Section area: 0.3845 mm²



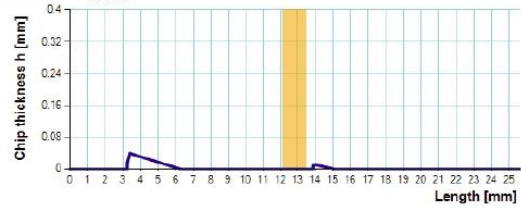
GP 45, h_{\max} : 0.0539 mm, Section area: 0.2283 mm²



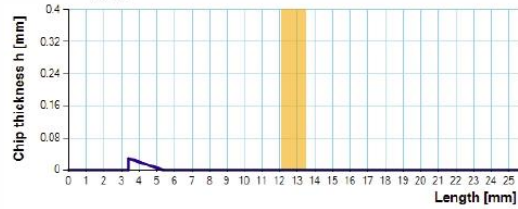
GP 49, h_{\max} : 0.0476 mm, Section area: 0.1362 mm²



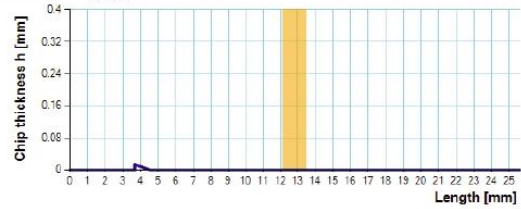
GP 53, h_{\max} : 0.0389 mm, Section area: 0.0678 mm²



GP 57, h_{\max} : 0.0292 mm, Section area: 0.0296 mm²

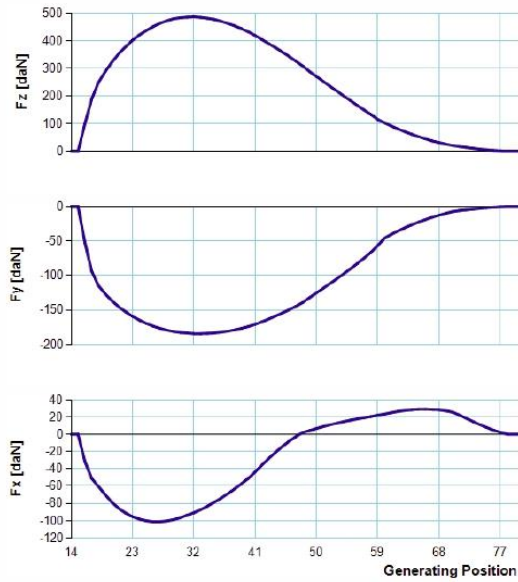


GP 61, h_{\max} : 0.0141 mm, Section area: 0.007 mm²

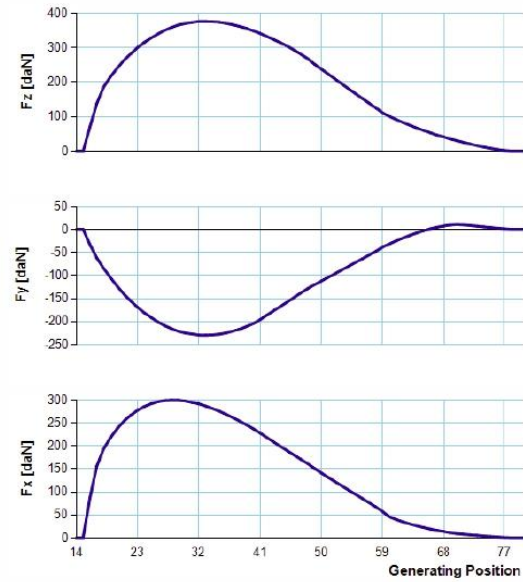


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

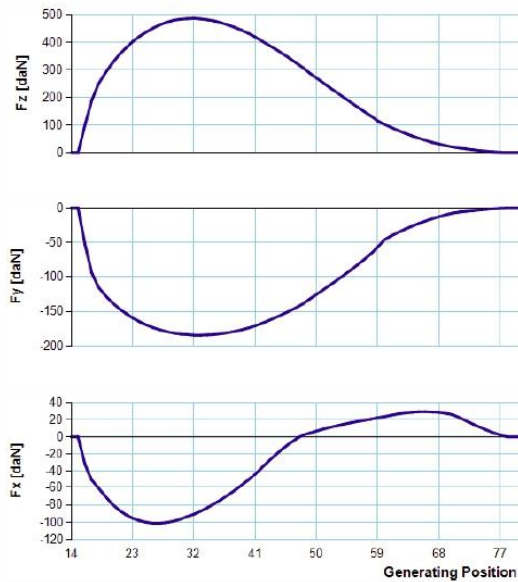
System 1



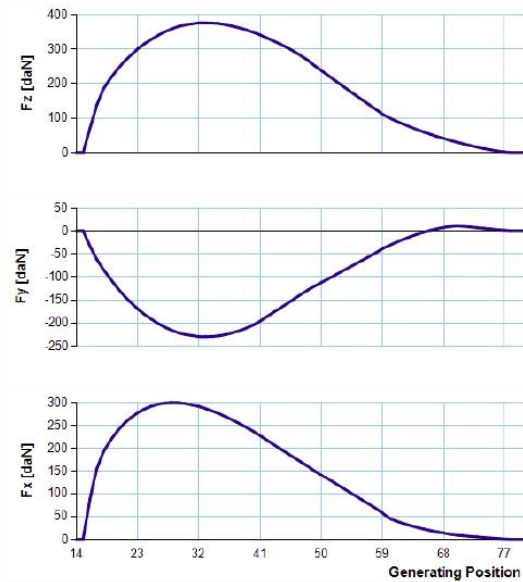
System 3



System 2

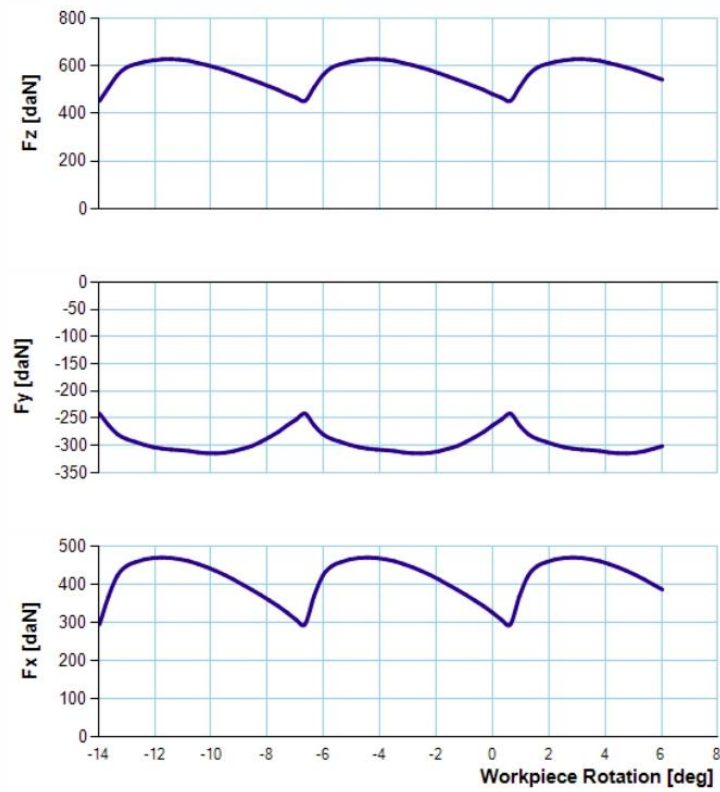


System 4

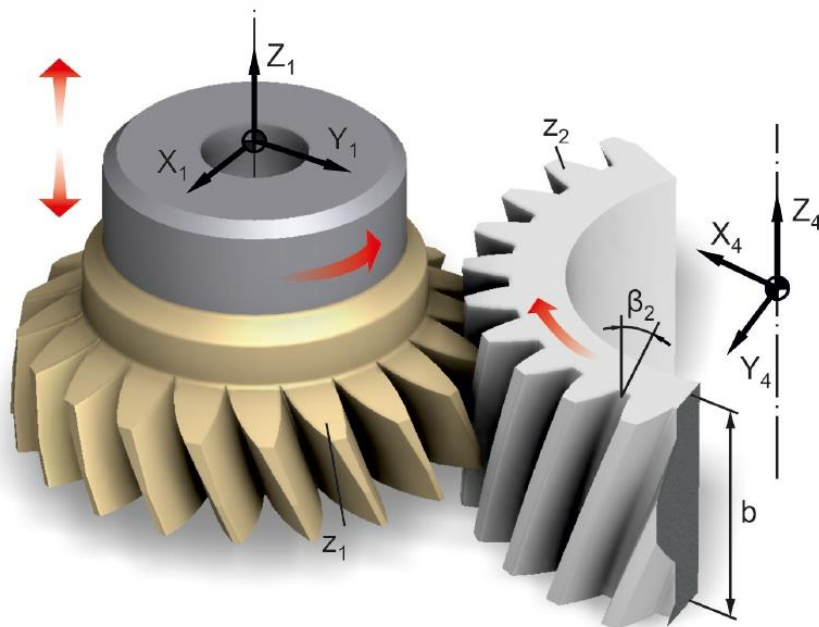


EX - HL Case 2

GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



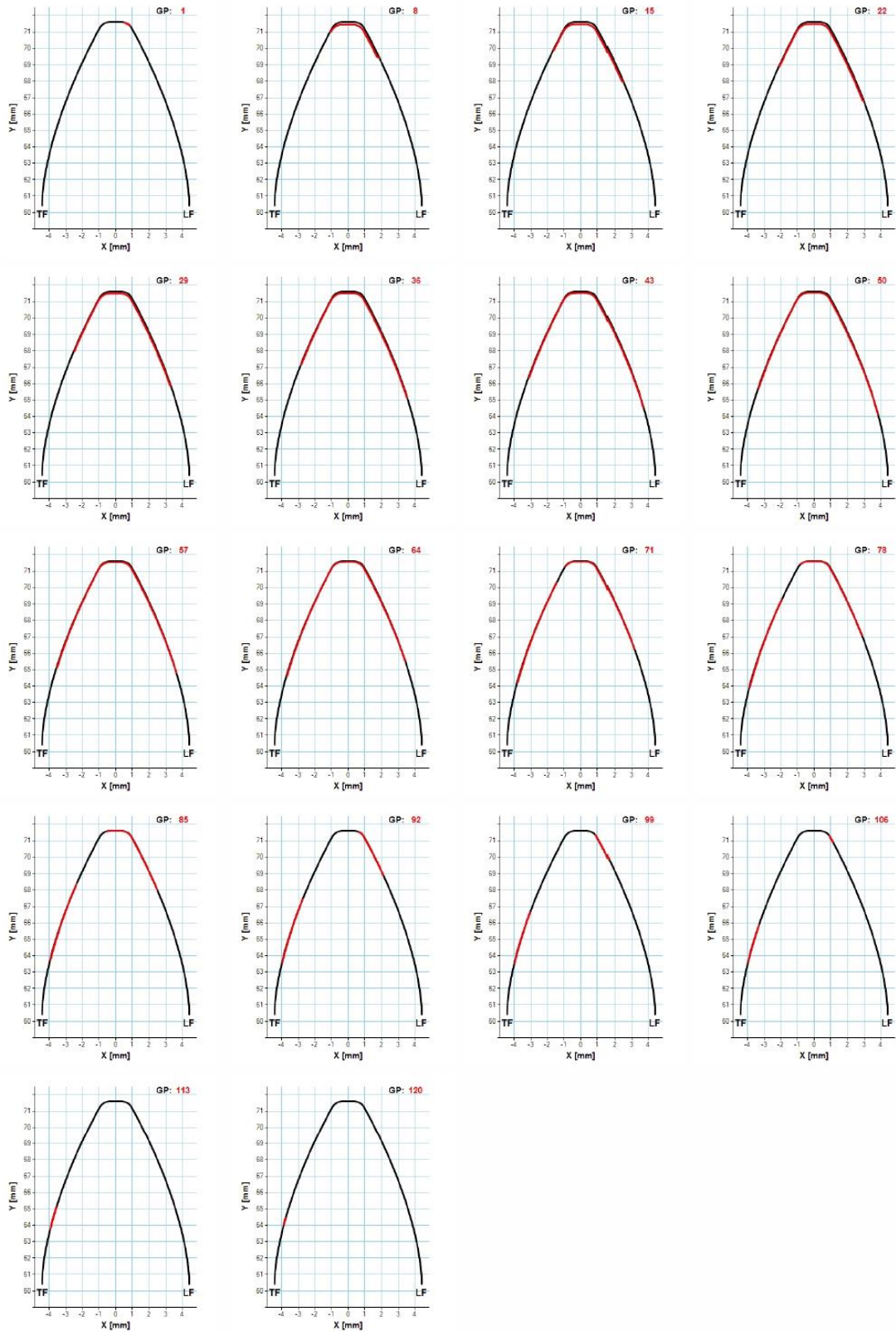
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

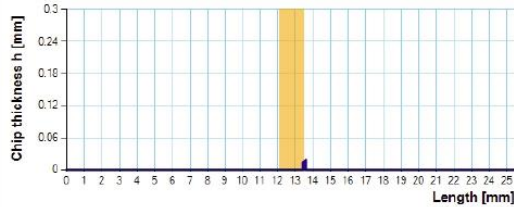
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.3 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

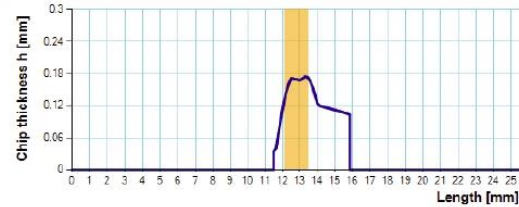


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.0173 mm, Section area: 0.0037 mm²



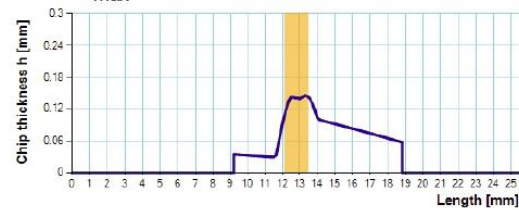
GP 8, h_{\max} : 0.1744 mm, Section area: 0.5493 mm²



GP 15, h_{\max} : 0.1599 mm, Section area: 0.6876 mm²



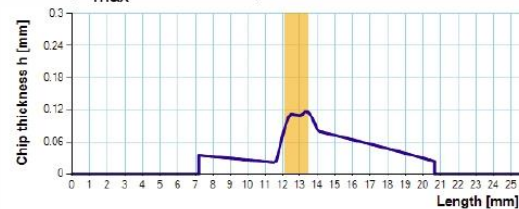
GP 22, h_{\max} : 0.1446 mm, Section area: 0.7399 mm²



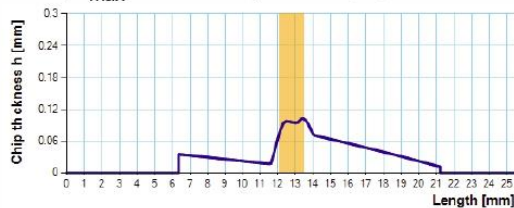
GP 29, h_{\max} : 0.1306 mm, Section area: 0.7373 mm²



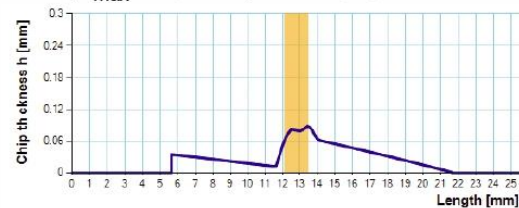
GP 36, h_{\max} : 0.1163 mm, Section area: 0.6983 mm²



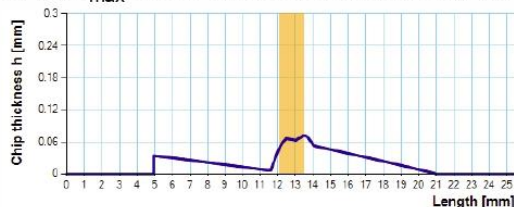
GP 43, h_{\max} : 0.1015 mm, Section area: 0.6333 mm²



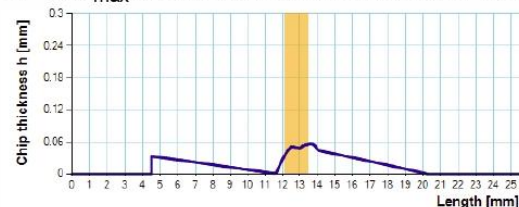
GP 50, h_{\max} : 0.087 mm, Section area: 0.5517 mm²



GP 57, h_{\max} : 0.0717 mm, Section area: 0.4619 mm²



GP 64, h_{\max} : 0.0568 mm, Section area: 0.3707 mm²



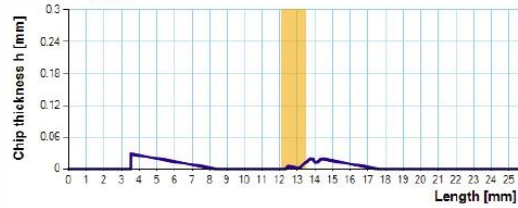
GP 71, h_{\max} : 0.0415 mm, Section area: 0.2782 mm²



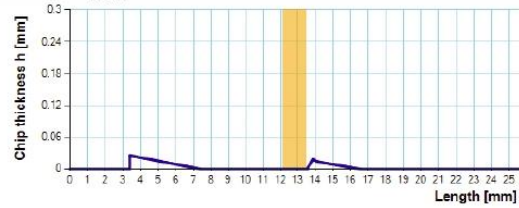
GP 78, h_{\max} : 0.0322 mm, Section area: 0.1974 mm²



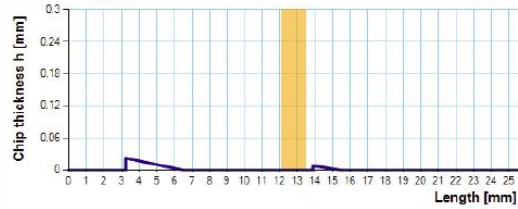
GP 85, h_{\max} : 0.0281 mm, Section area: 0.1224 mm²



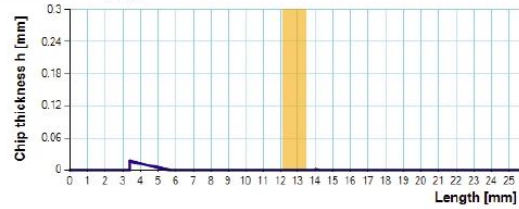
GP 92, h_{\max} : 0.0252 mm, Section area: 0.0777 mm²



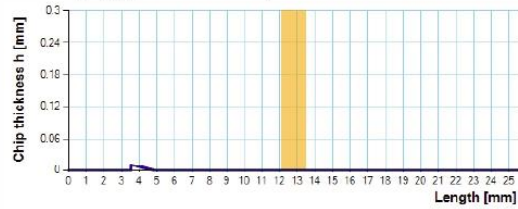
GP 99, h_{\max} : 0.0222 mm, Section area: 0.0434 mm²



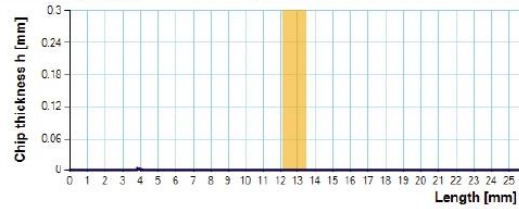
GP 106, h_{\max} : 0.0168 mm, Section area: 0.0208 mm²



GP 113, h_{\max} : 0.0108 mm, Section area: 0.0079 mm²

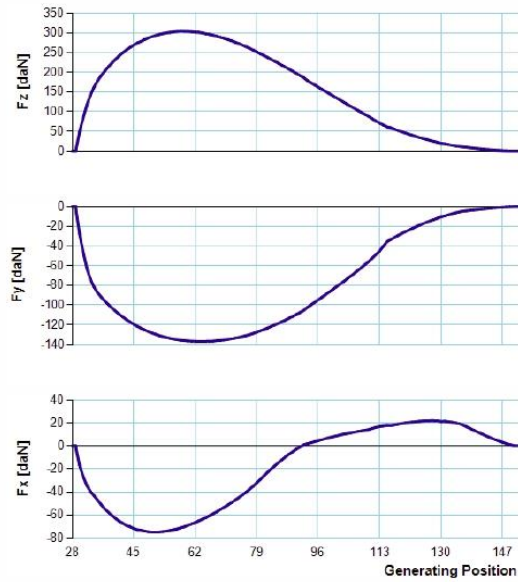


GP 120, h_{\max} : 0.003 mm, Section area: 0.0007 mm²

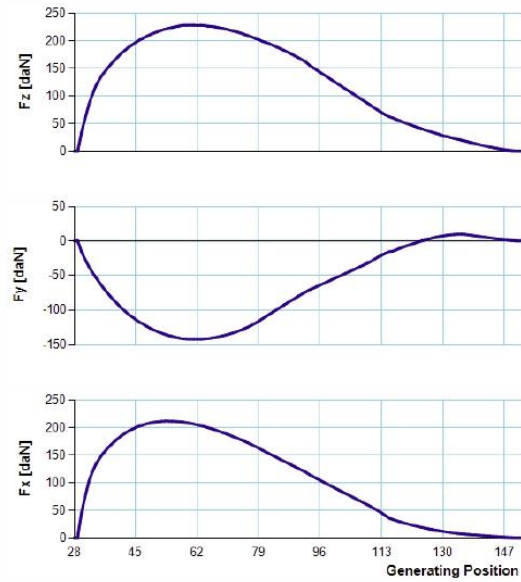


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

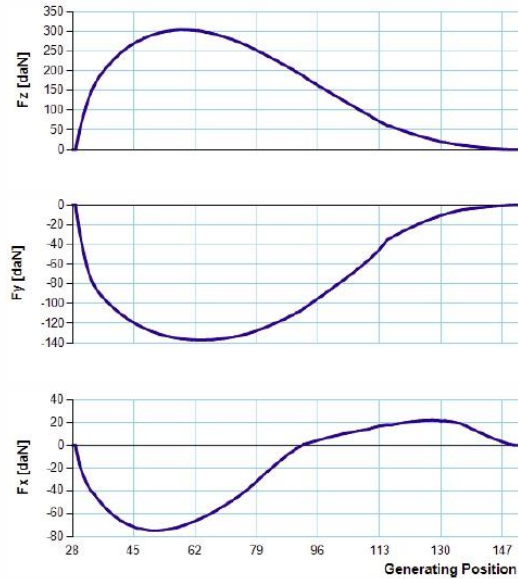
System 1



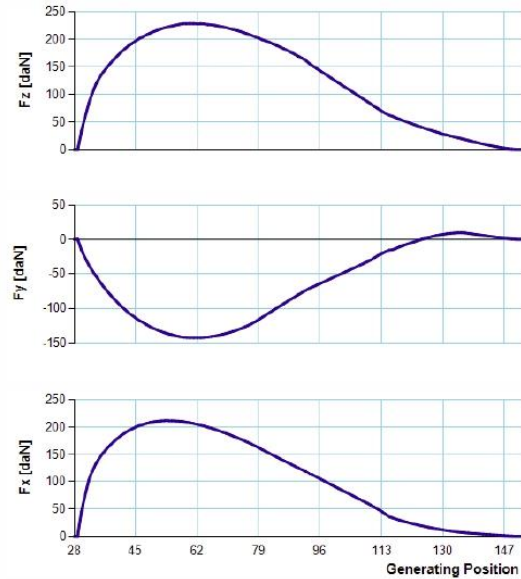
System 3



System 2

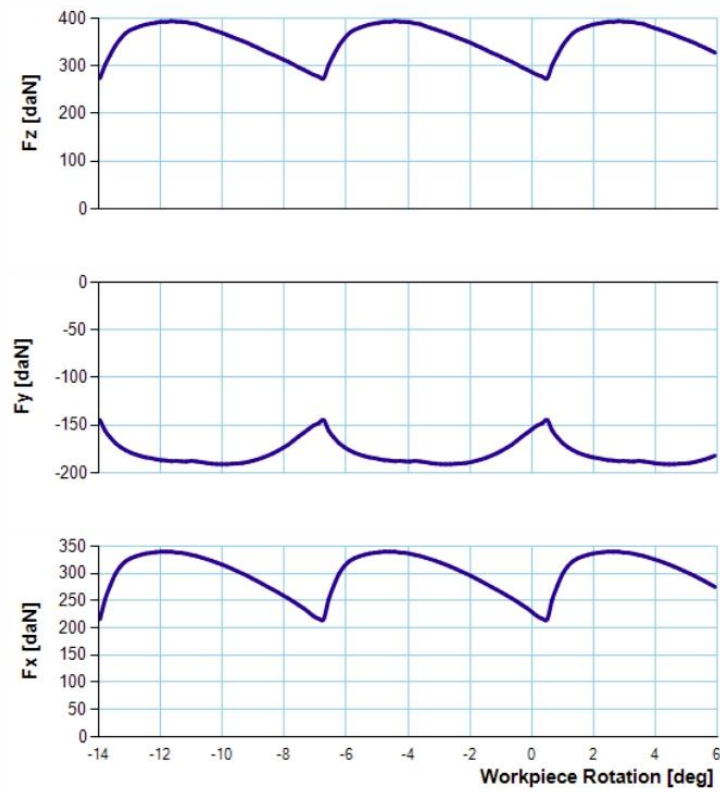


System 4

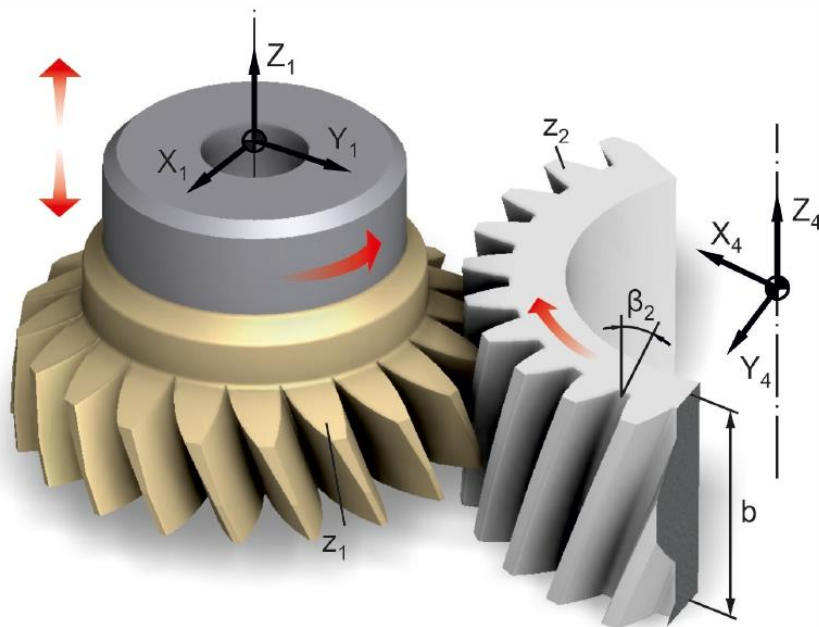


EX - HL Case 3

GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



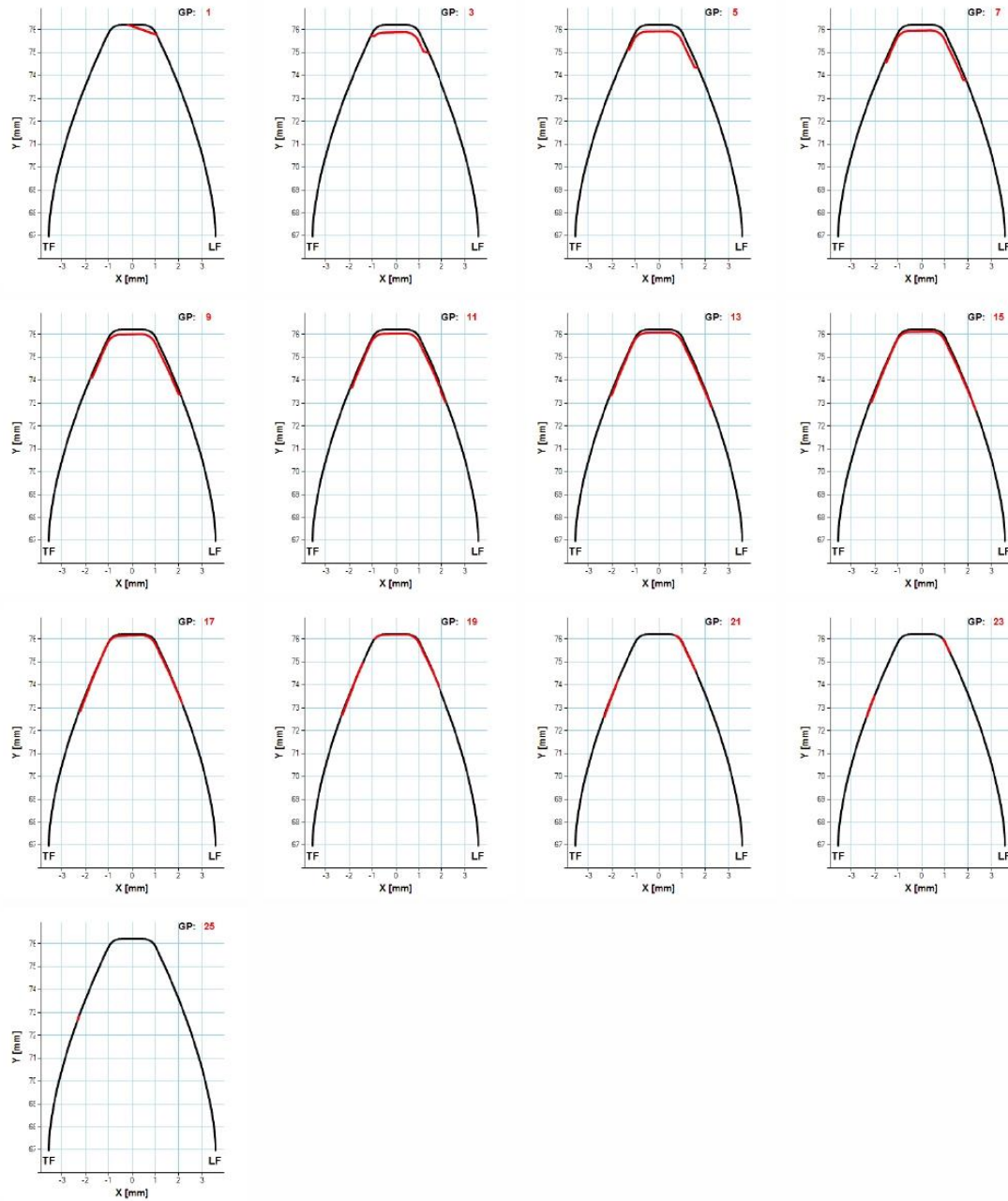
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

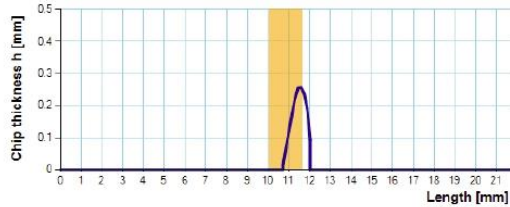
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	3.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

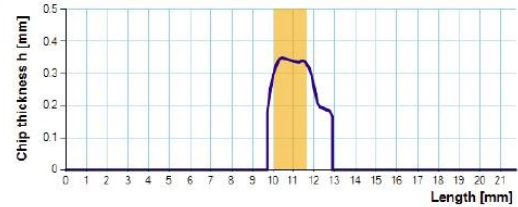


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

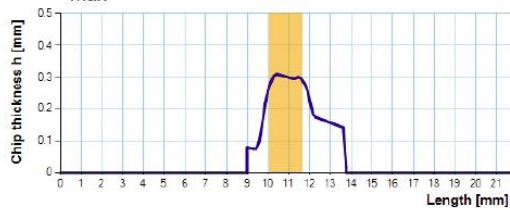
GP 1, h_{\max} : 0.2568 mm, Section area: 0.2057 mm²



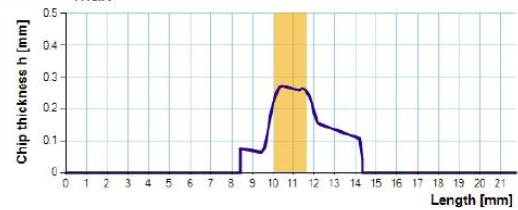
GP 3, h_{\max} : 0.3488 mm, Section area: 0.8314 mm²



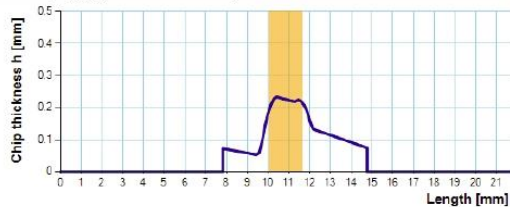
GP 5, h_{\max} : 0.3103 mm, Section area: 0.9074 mm²



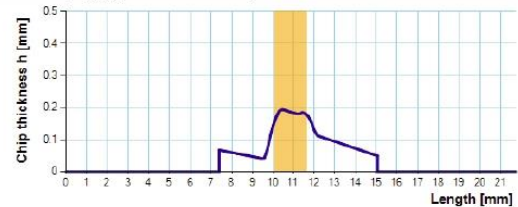
GP 7, h_{\max} : 0.2717 mm, Section area: 0.906 mm²



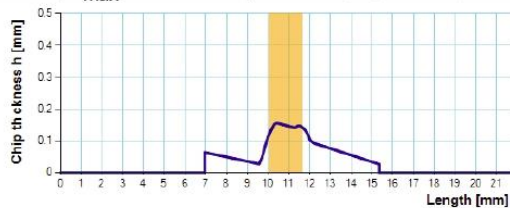
GP 9, h_{\max} : 0.2328 mm, Section area: 0.8514 mm²



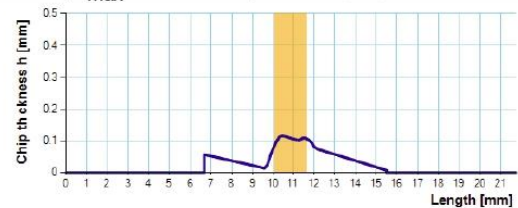
GP 11, h_{\max} : 0.1938 mm, Section area: 0.7531 mm²



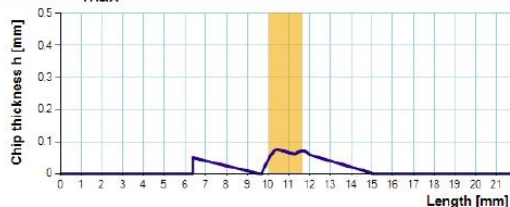
GP 13, h_{\max} : 0.1547 mm, Section area: 0.6238 mm²



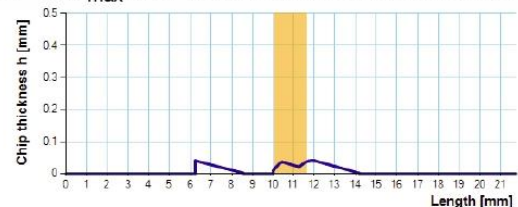
GP 15, h_{\max} : 0.1154 mm, Section area: 0.4734 mm²



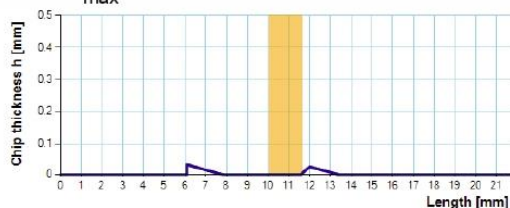
GP 17, h_{\max} : 0.0761 mm, Section area: 0.3103 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.0413 mm, Section area: 0.1604 mm²



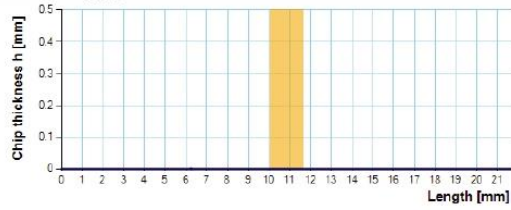
GP 21, h_{\max} : 0.0309 mm, Section area: 0.0505 mm²



GP 23, h_{\max} : 0.018 mm, Section area: 0.0119 mm²

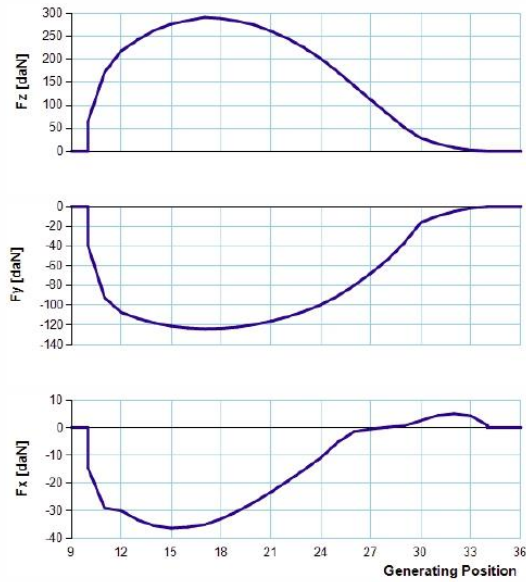


GP 25, h_{\max} : 0.0014 mm, Section area: 0.0003 mm²

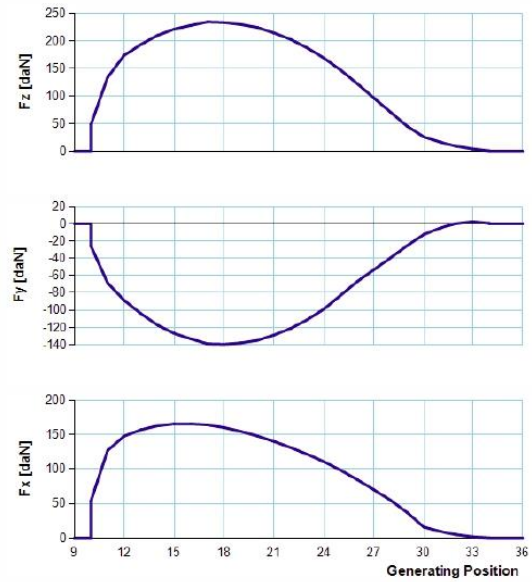


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

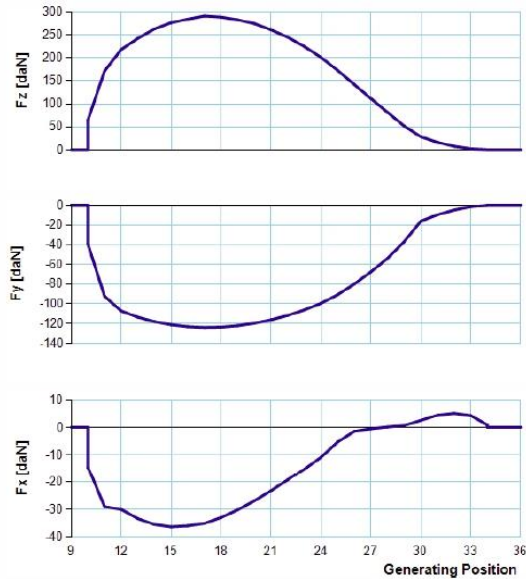
System 1



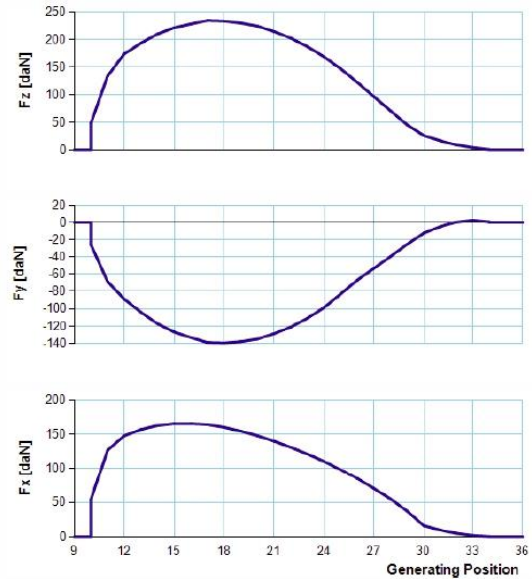
System 3



System 2

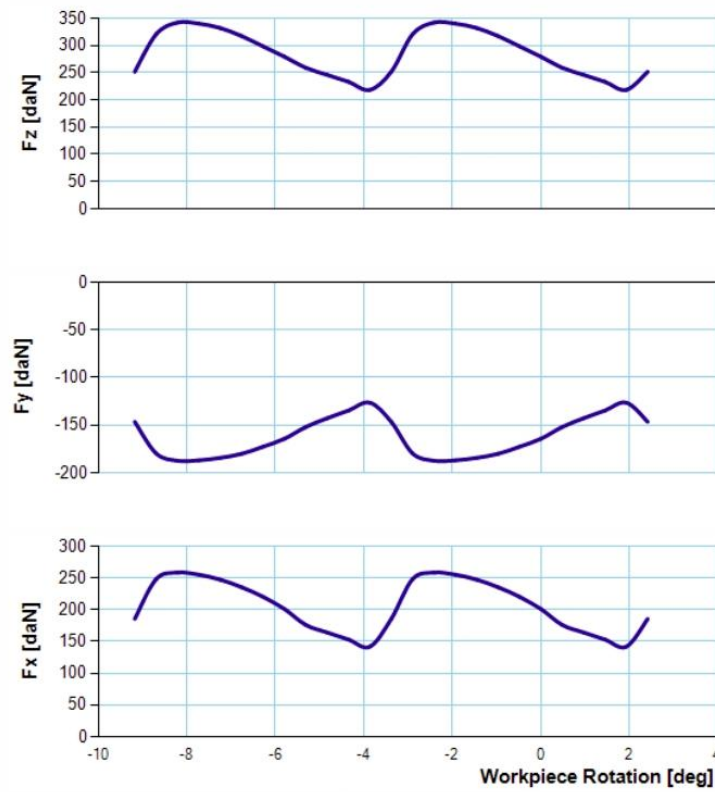


System 4

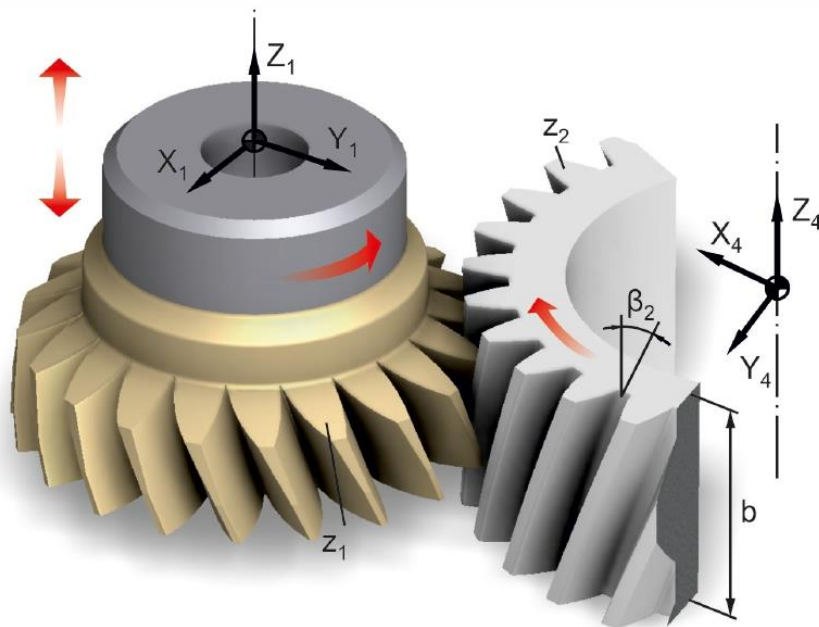


EX - HL Case 4

GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



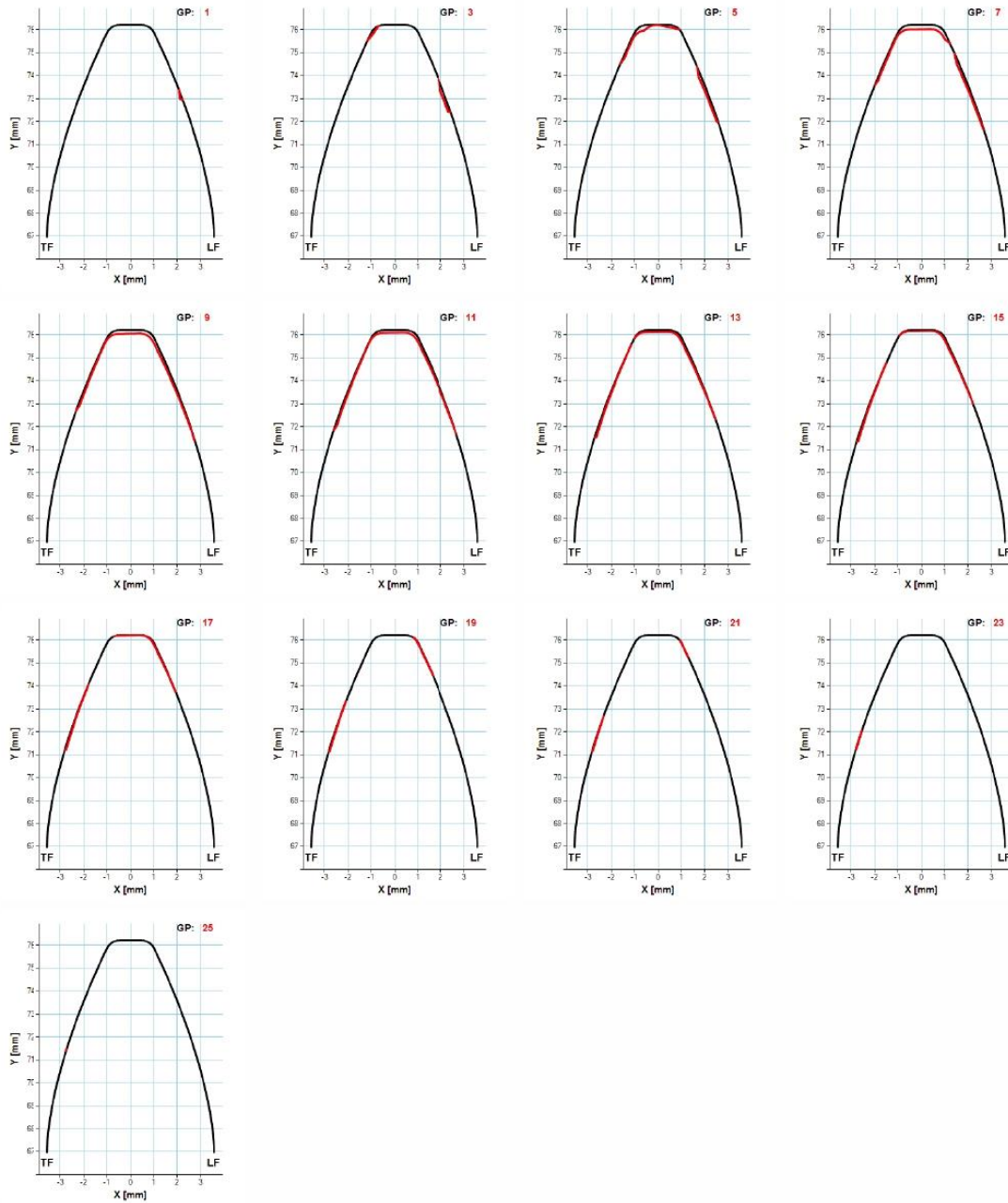
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

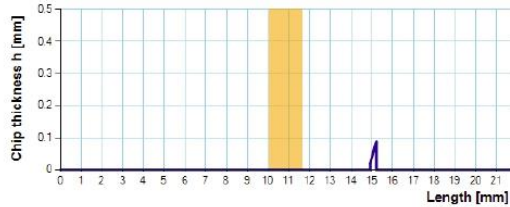
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	5.25 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

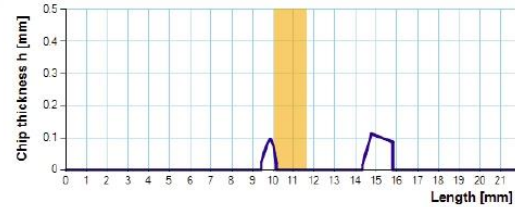


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

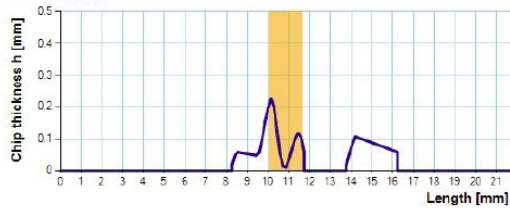
GP 1, h_{\max} : 0.0865 mm, Section area: 0.0226 mm²



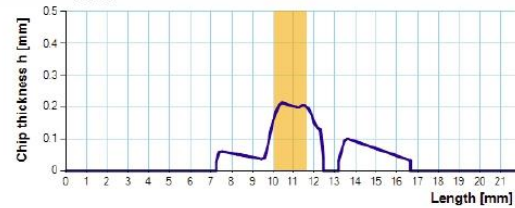
GP 3, h_{\max} : 0.1119 mm, Section area: 0.1846 mm²



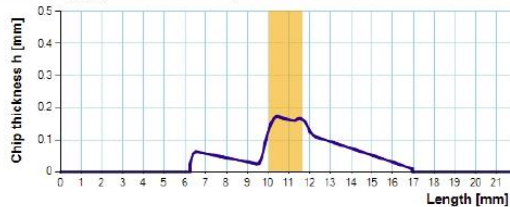
GP 5, h_{\max} : 0.2244 mm, Section area: 0.4762 mm²



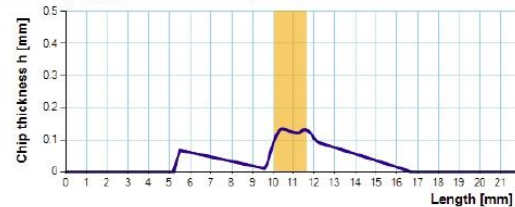
GP 7, h_{\max} : 0.2115 mm, Section area: 0.8057 mm²



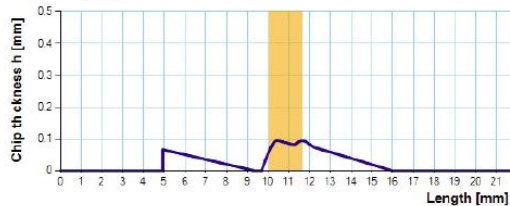
GP 9, h_{\max} : 0.1727 mm, Section area: 0.7863 mm²



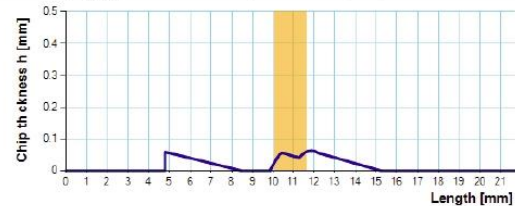
GP 11, h_{\max} : 0.1338 mm, Section area: 0.65 mm²



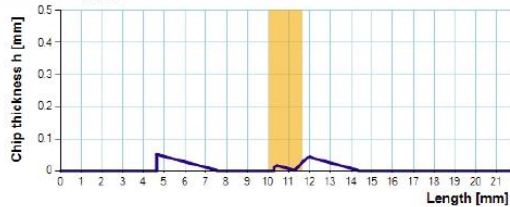
GP 13, h_{\max} : 0.0949 mm, Section area: 0.4788 mm²



GP 15, h_{\max} : 0.0629 mm, Section area: 0.3106 mm²



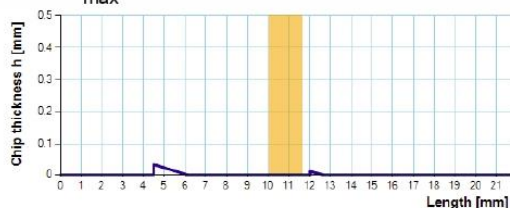
GP 17, h_{\max} : 0.0511 mm, Section area: 0.1626 mm²



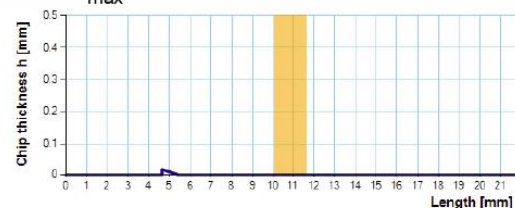
GP 19, h_{\max} : 0.043 mm, Section area: 0.0777 mm²



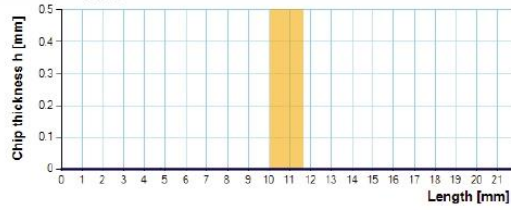
GP 21, h_{\max} : 0.0317 mm, Section area: 0.0308 mm²



GP 23, h_{\max} : 0.0167 mm, Section area: 0.008 mm²

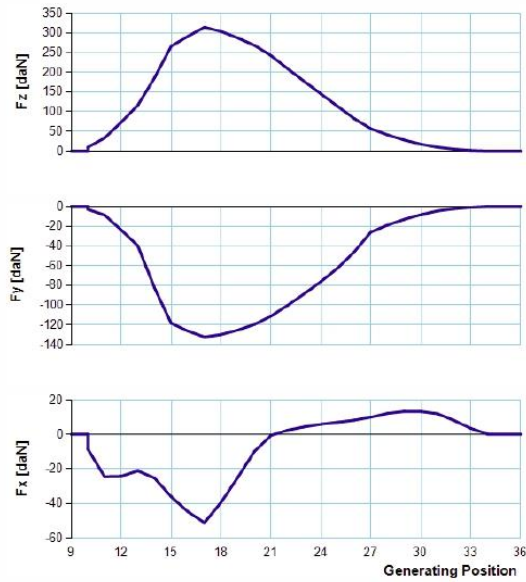


GP 25, h_{\max} : 0.0005 mm, Section area: 0 mm²

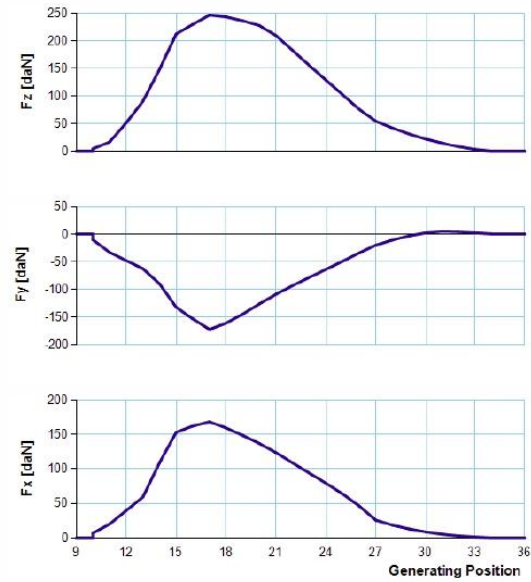


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

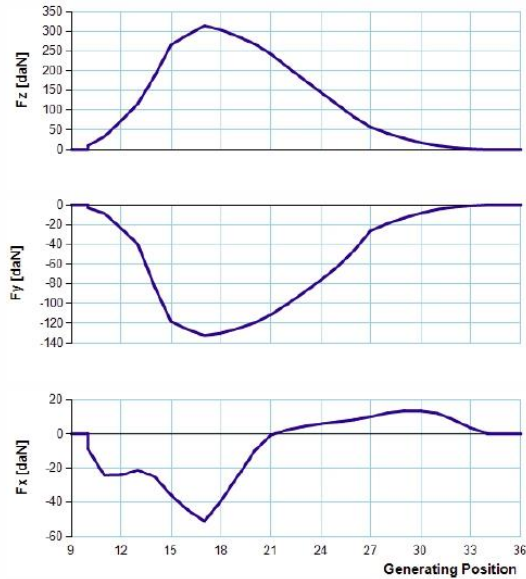
System 1



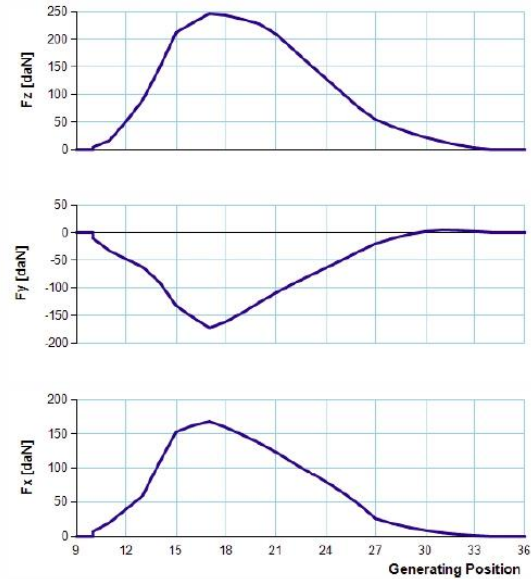
System 3

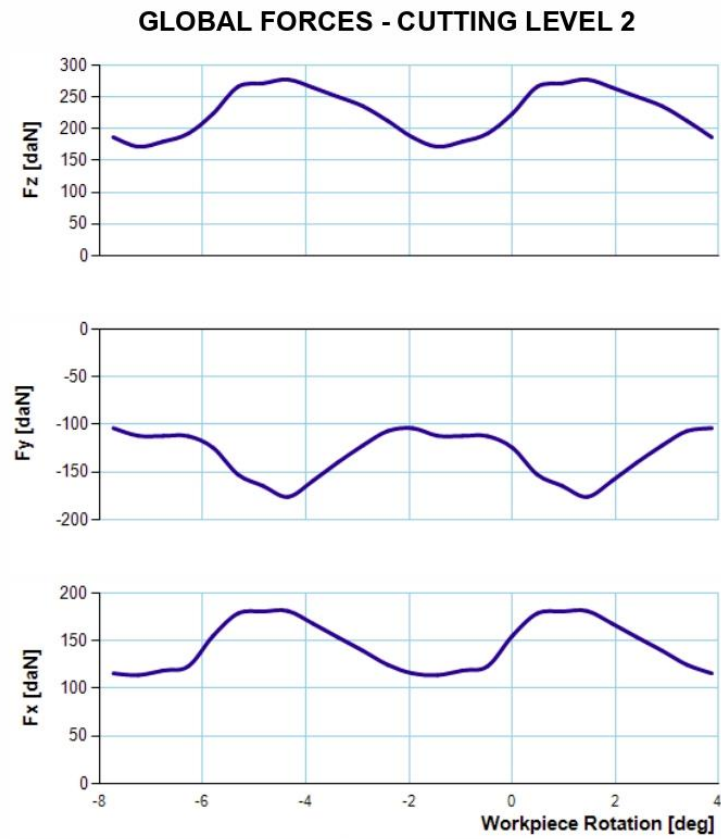


System 2

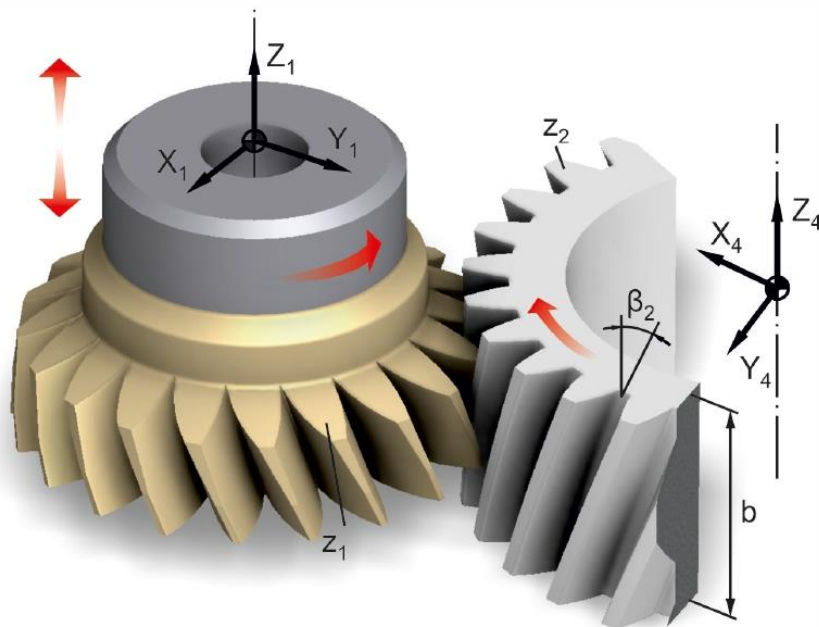


System 4





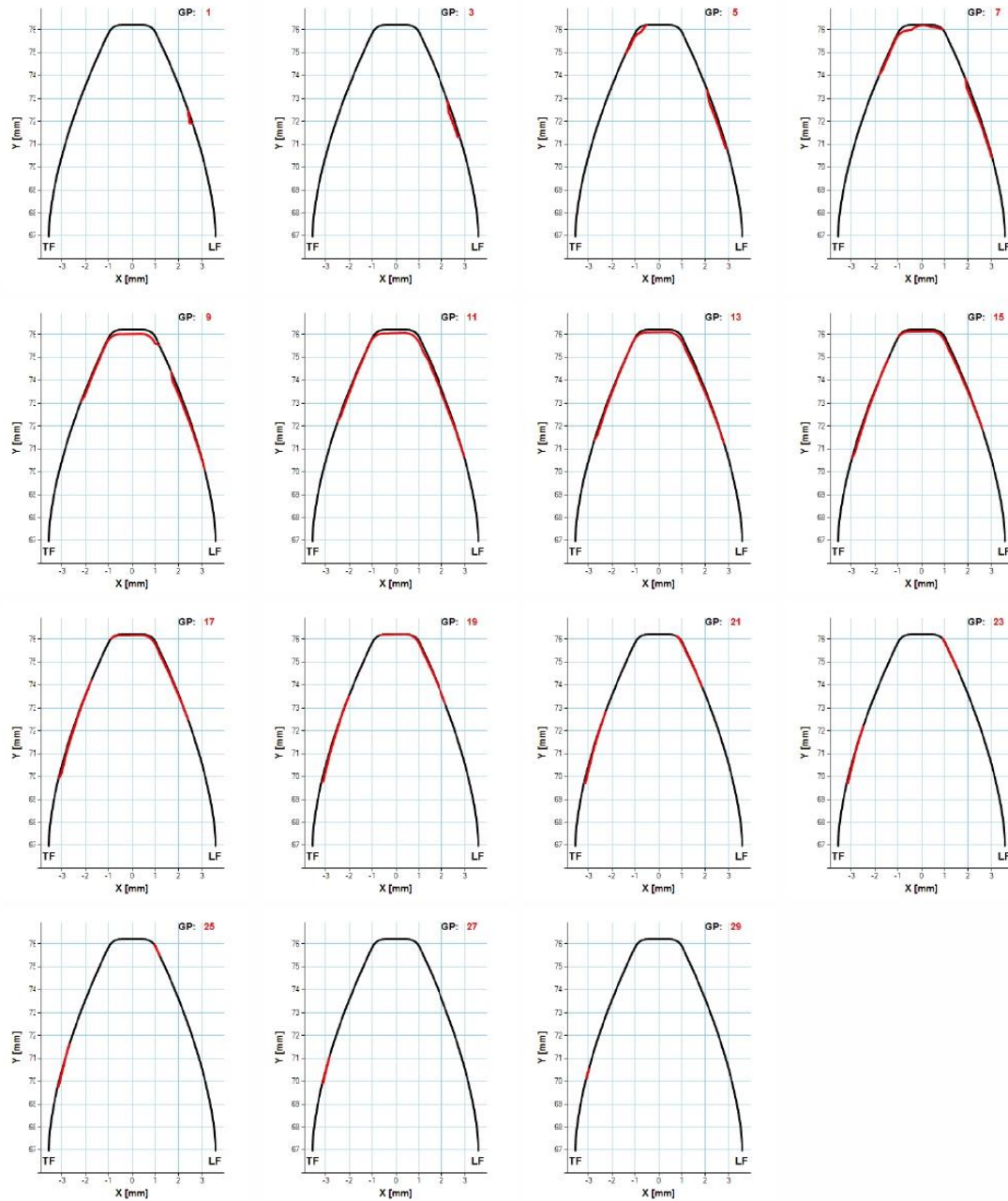
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

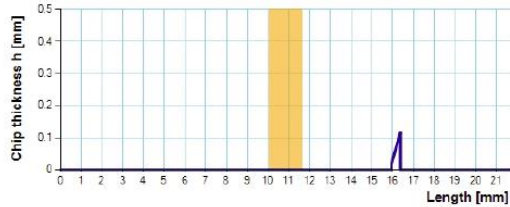
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	6.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

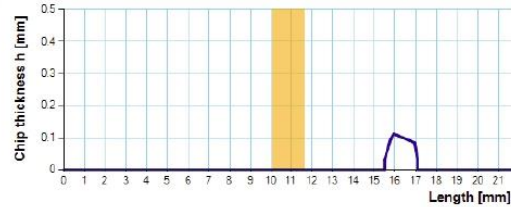


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.1167 mm, Section area: 0.0369 mm²



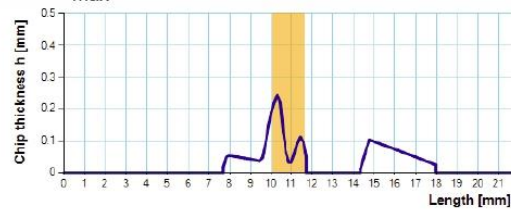
GP 3, h_{\max} : 0.1115 mm, Section area: 0.1437 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.188 mm, Section area: 0.3347 mm²



GP 7, h_{\max} : 0.2427 mm, Section area: 0.5524 mm²



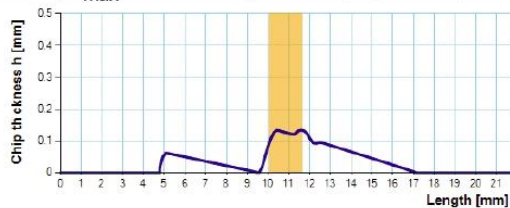
GP 9, h_{\max} : 0.2096 mm, Section area: 0.7943 mm²



GP 11, h_{\max} : 0.1712 mm, Section area: 0.8199 mm²



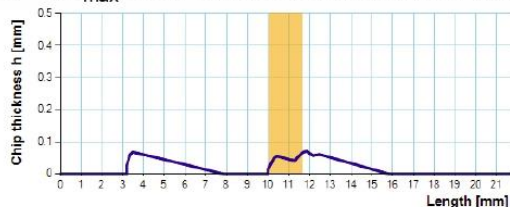
GP 13, h_{\max} : 0.1333 mm, Section area: 0.6748 mm²



GP 15, h_{\max} : 0.0991 mm, Section area: 0.5263 mm²



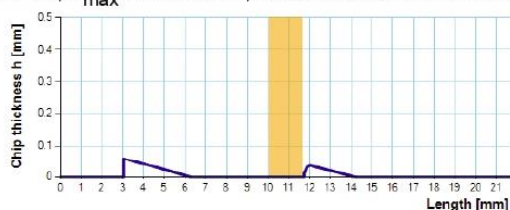
GP 17, h_{\max} : 0.0701 mm, Section area: 0.3934 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.0668 mm, Section area: 0.246 mm²



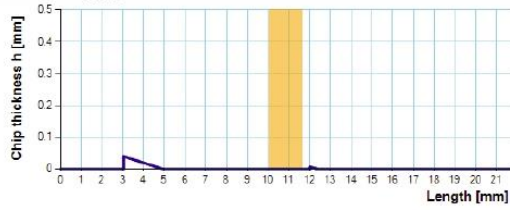
GP 21, h_{\max} : 0.0585 mm, Section area: 0.1508 mm²



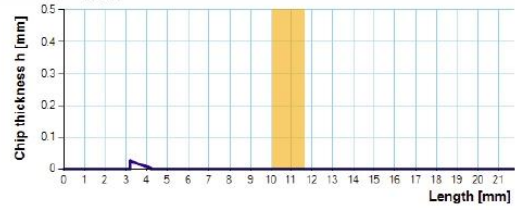
GP 23, h_{\max} : 0.0493 mm, Section area: 0.0857 mm²



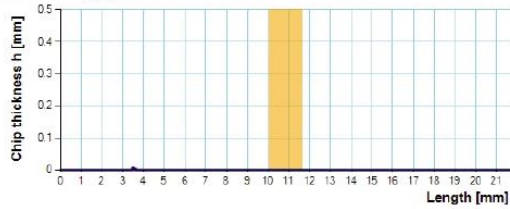
GP 25, h_{\max} : 0.0394 mm, Section area: 0.0415 mm²



GP 27, h_{\max} : 0.0255 mm, Section area: 0.0161 mm²

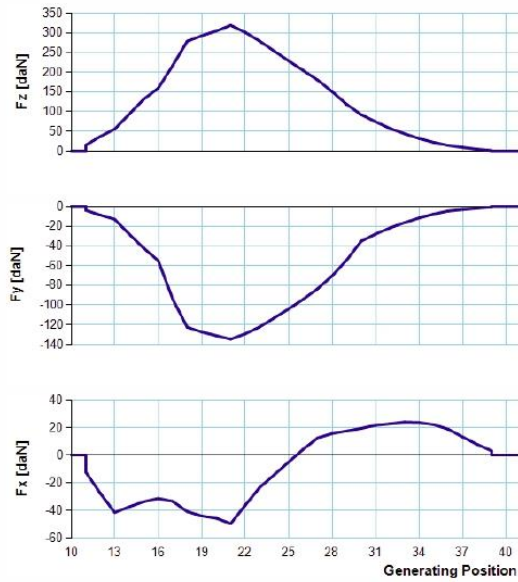


GP 29, h_{\max} : 0.0069 mm, Section area: 0.002 mm²

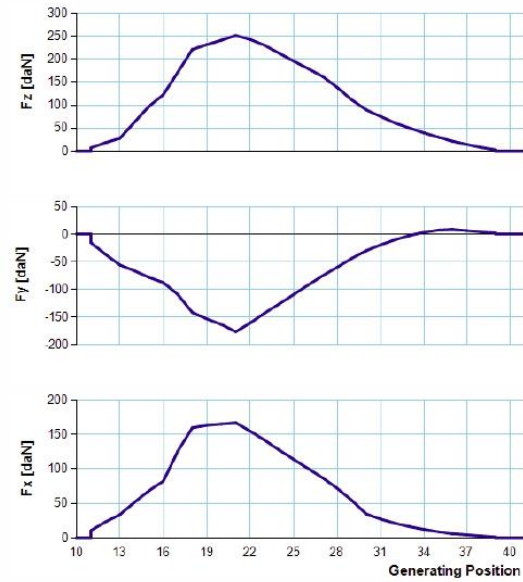


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

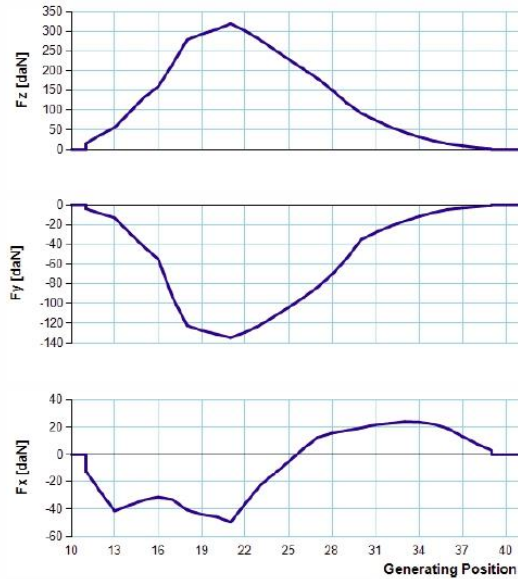
System 1



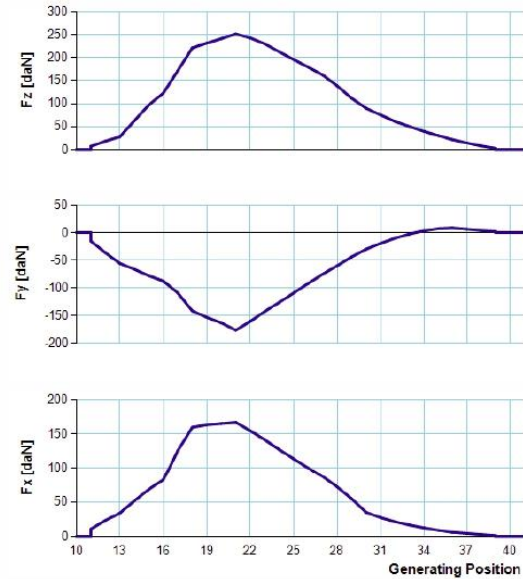
System 3



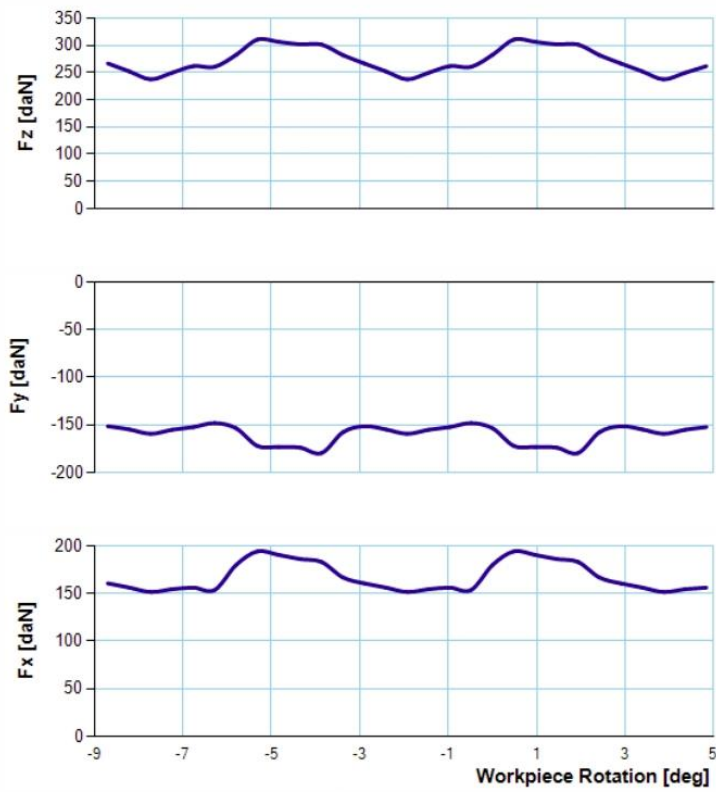
System 2



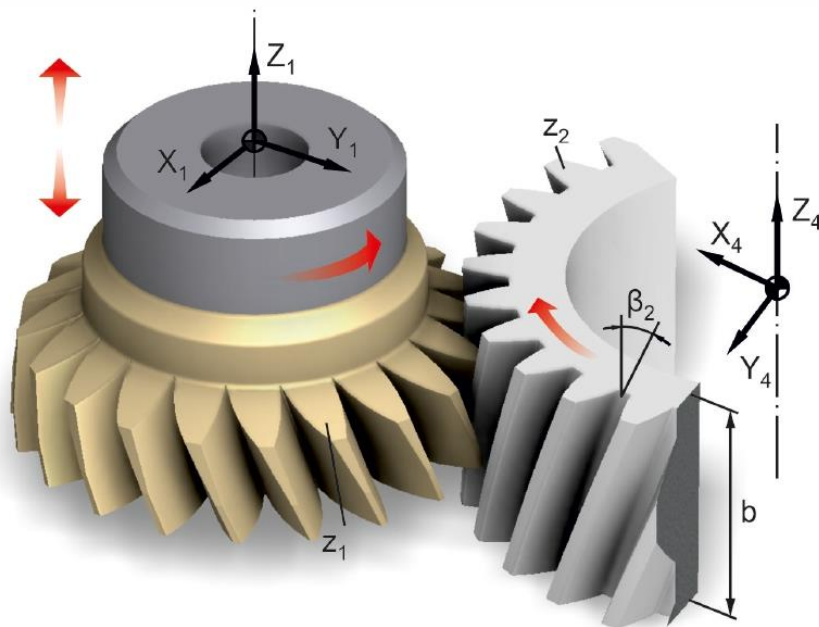
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



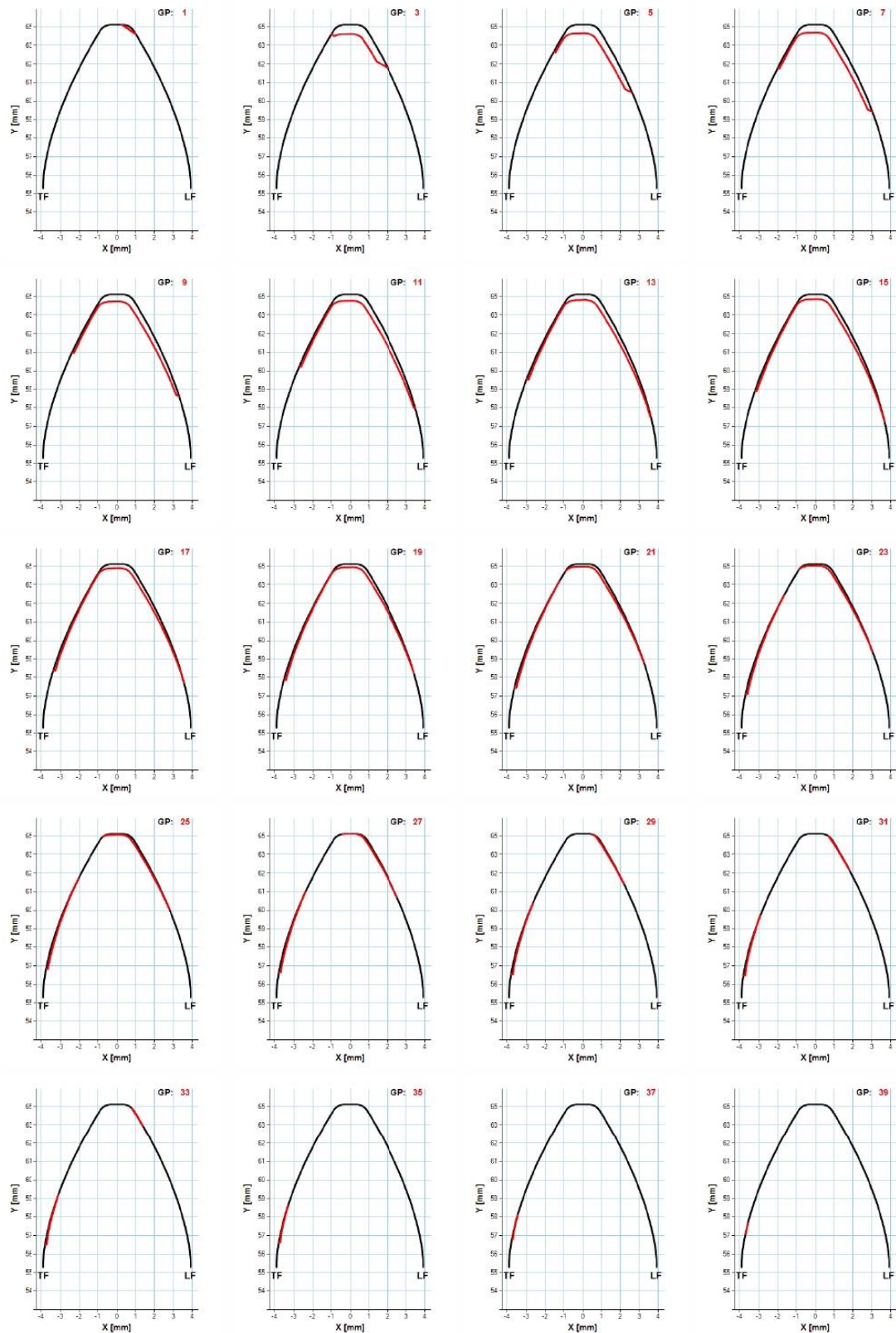
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

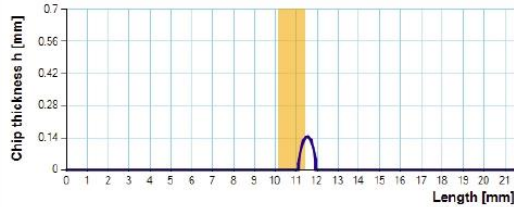
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	15 deg
Tool helix angle (β_1):	15 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

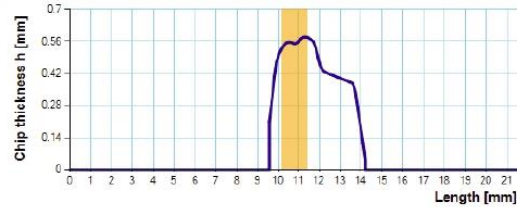


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

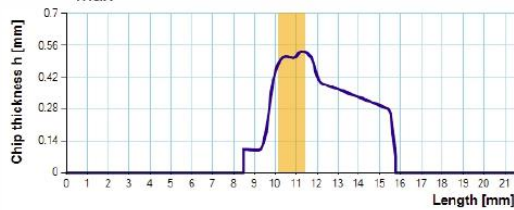
GP 1, h_{\max} : 0.1447 mm, Section area: 0.0866 mm²



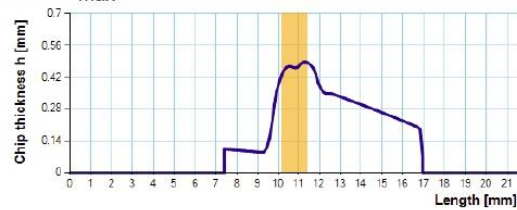
GP 3, h_{\max} : 0.5792 mm, Section area: 1.7482 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.5332 mm, Section area: 2.2452 mm²



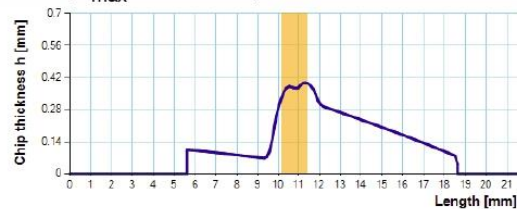
GP 7, h_{\max} : 0.4881 mm, Section area: 2.4177 mm²



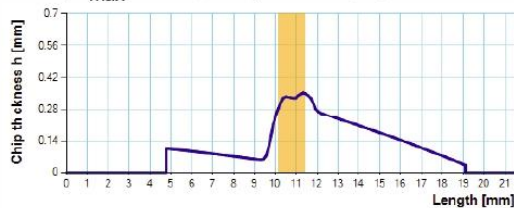
GP 9, h_{\max} : 0.4419 mm, Section area: 2.4147 mm²



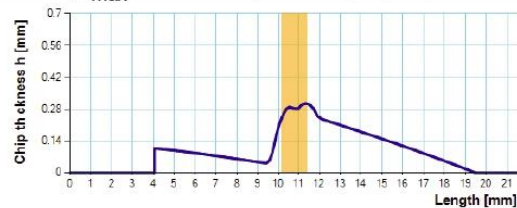
GP 11, h_{\max} : 0.3971 mm, Section area: 2.2995 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.3528 mm, Section area: 2.1116 mm²



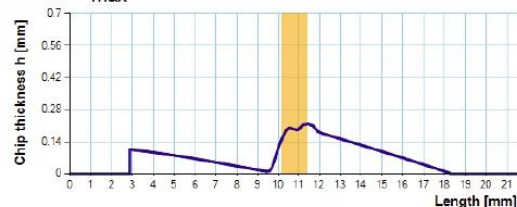
GP 15, h_{\max} : 0.3077 mm, Section area: 1.8753 mm²



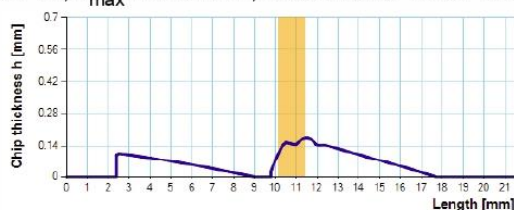
GP 17, h_{\max} : 0.2621 mm, Section area: 1.6237 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.2198 mm, Section area: 1.3696 mm²



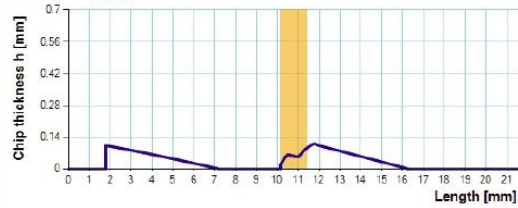
GP 21, h_{\max} : 0.1751 mm, Section area: 1.1091 mm²



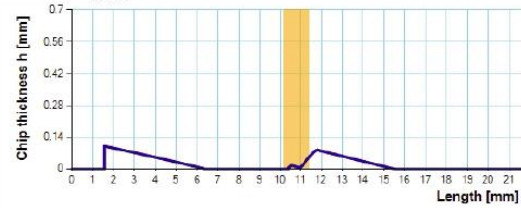
GP 23, h_{\max} : 0.1363 mm, Section area: 0.8729 mm²



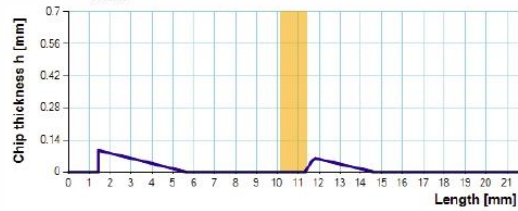
GP 25, h_{\max} : 0.1098 mm, Section area: 0.6492 mm²



GP 27, h_{\max} : 0.0998 mm, Section area: 0.4534 mm²



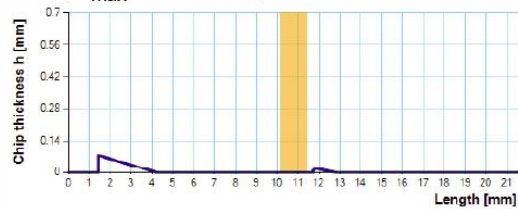
GP 29, h_{\max} : 0.0948 mm, Section area: 0.3112 mm²



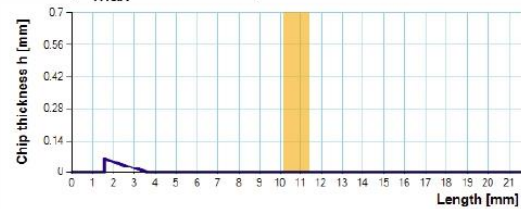
GP 31, h_{\max} : 0.0895 mm, Section area: 0.2068 mm²



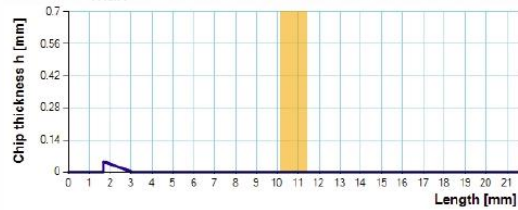
GP 33, h_{\max} : 0.0771 mm, Section area: 0.1269 mm²



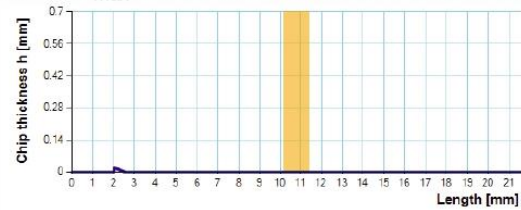
GP 35, h_{\max} : 0.0627 mm, Section area: 0.0713 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0435 mm, Section area: 0.0325 mm²

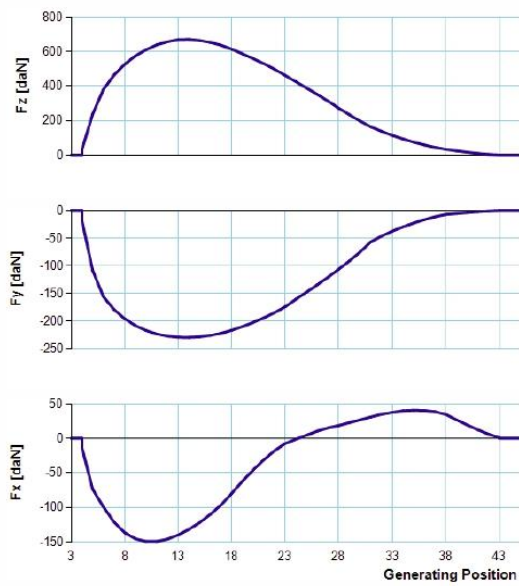


GP 39, h_{\max} : 0.0194 mm, Section area: 0.0064 mm²

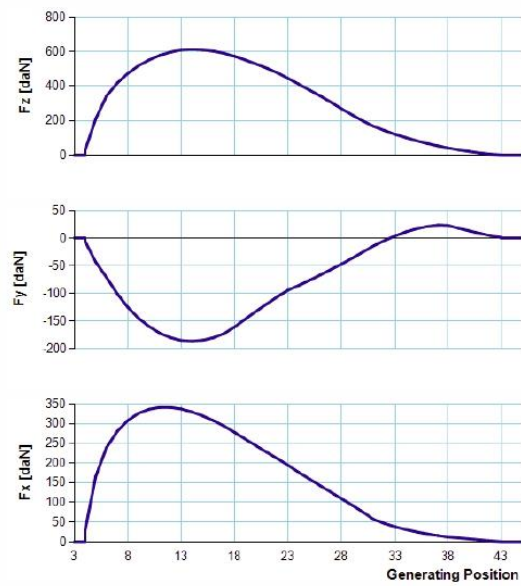


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

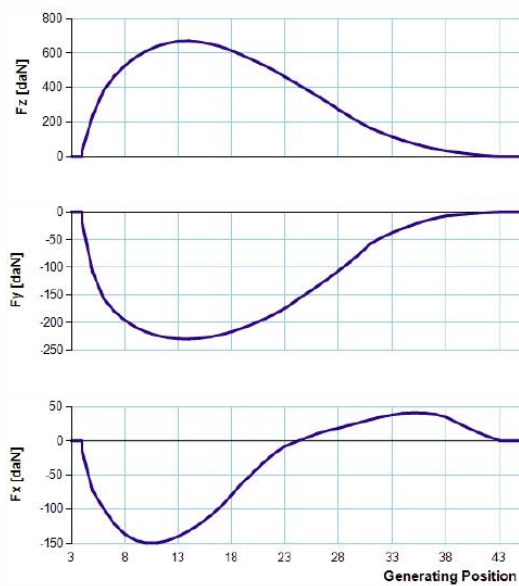
System 1



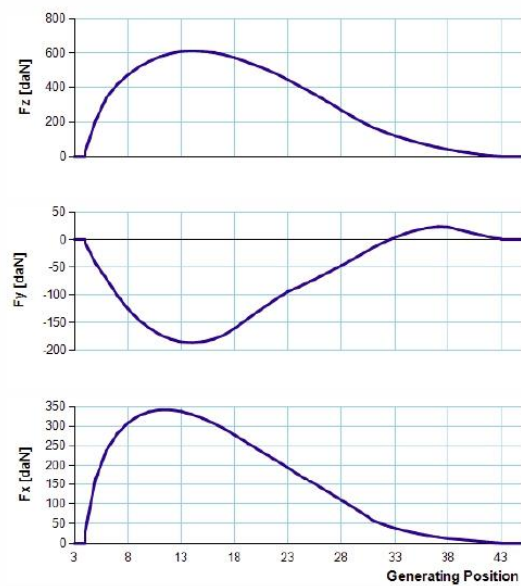
System 3

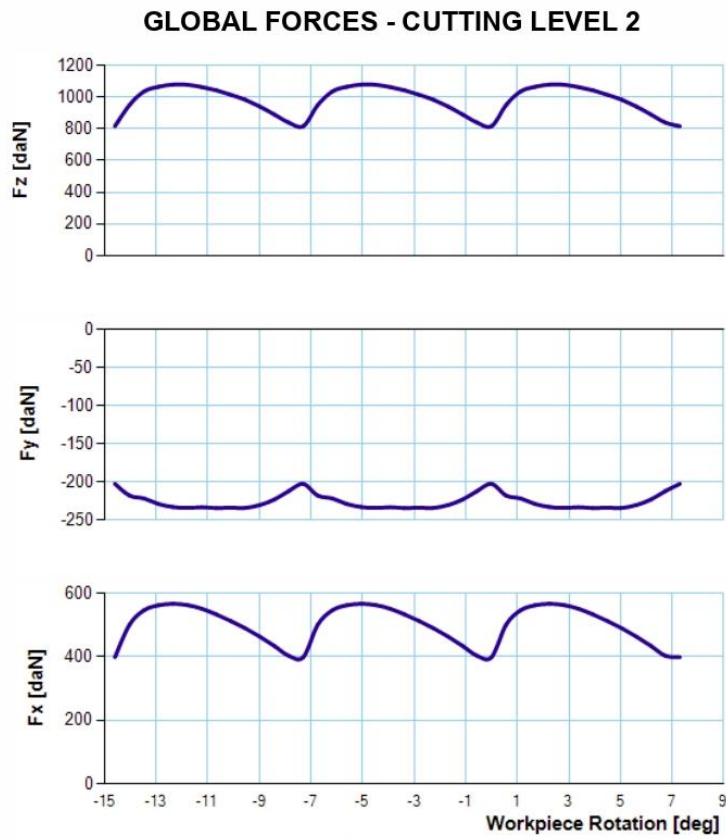


System 2

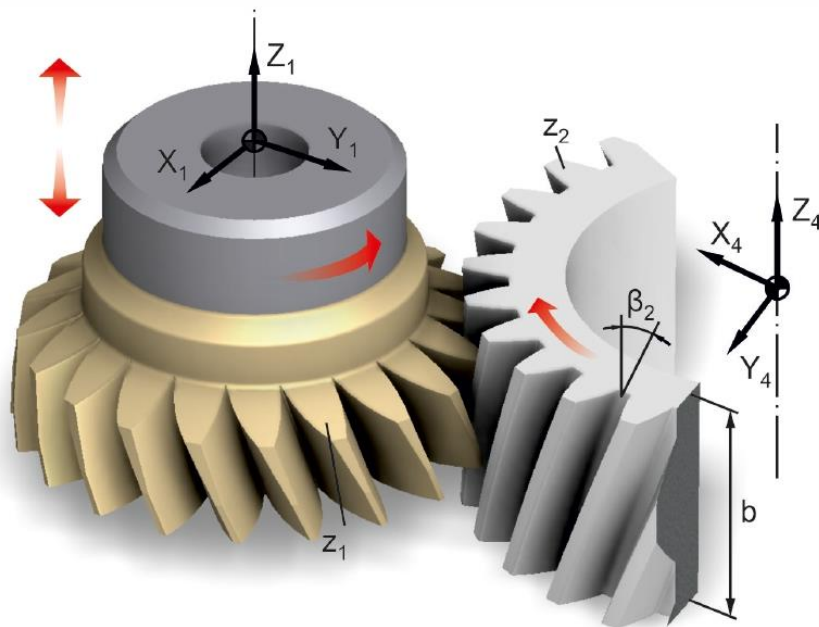


System 4





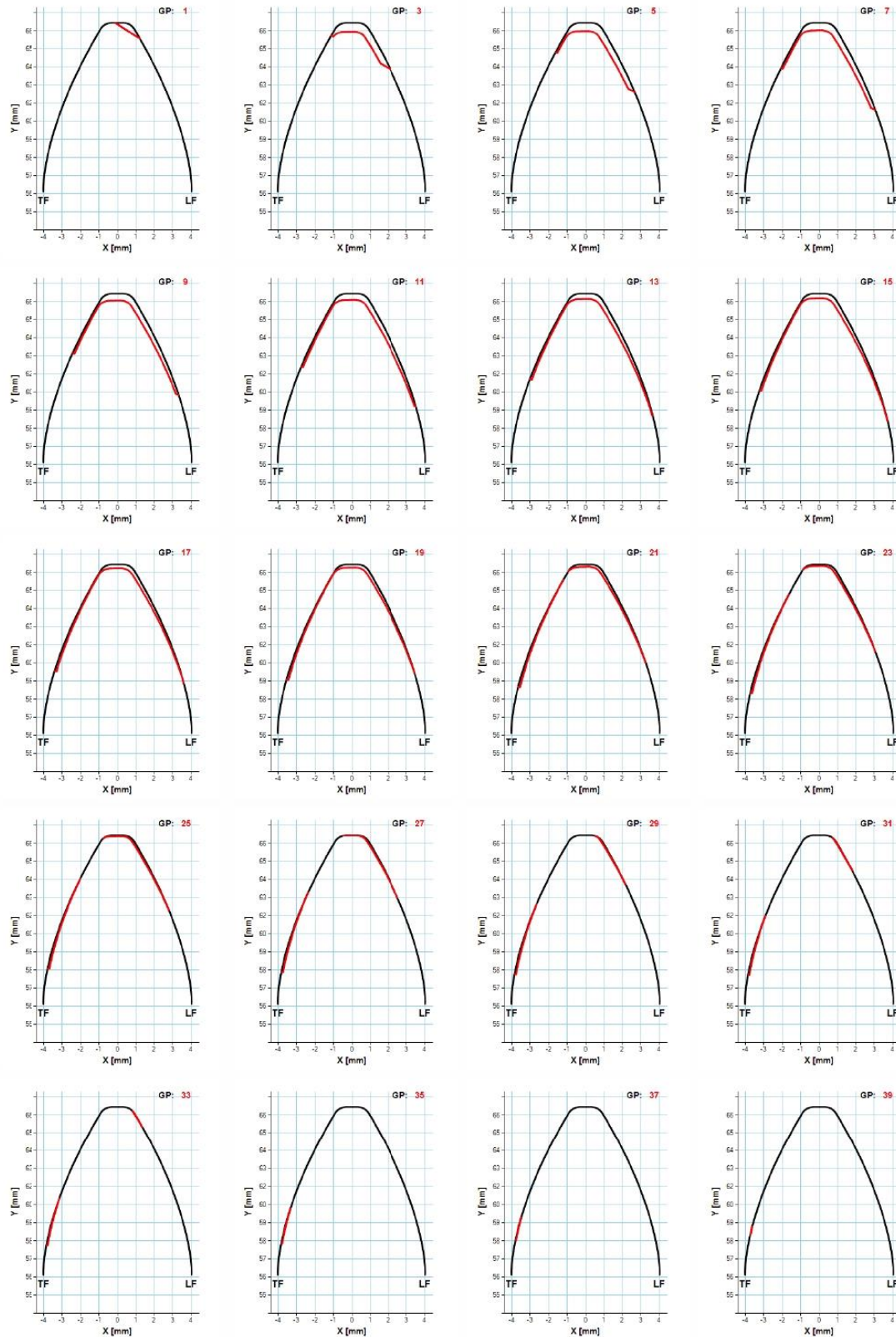
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

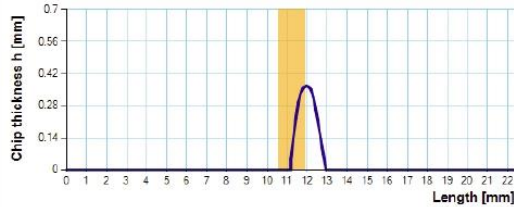
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	20 deg
Tool helix angle (β_1):	20 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

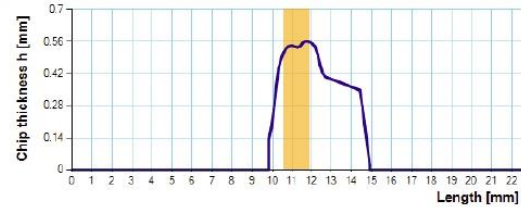


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.3665 mm, Section area: 0.366 mm²



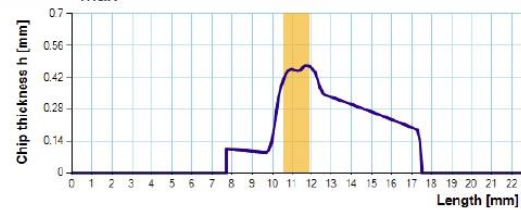
GP 3, h_{\max} : 0.561 mm, Section area: 1.826 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.5169 mm, Section area: 2.2348 mm²



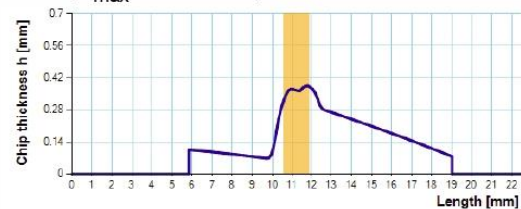
GP 7, h_{\max} : 0.4723 mm, Section area: 2.3831 mm²



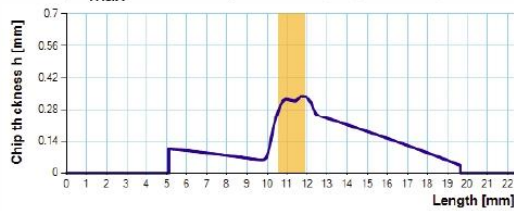
GP 9, h_{\max} : 0.4284 mm, Section area: 2.3703 mm²



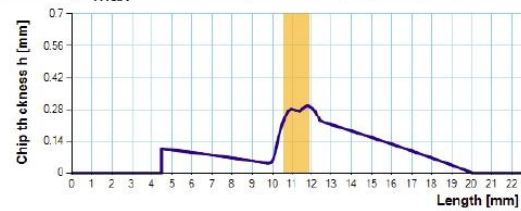
GP 11, h_{\max} : 0.3852 mm, Section area: 2.2575 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.34 mm, Section area: 2.0738 mm²



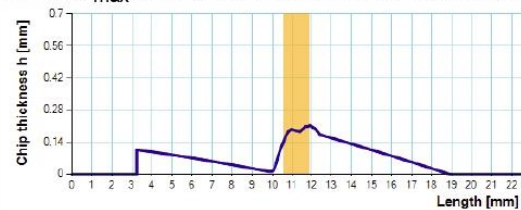
GP 15, h_{\max} : 0.298 mm, Section area: 1.8438 mm²



GP 17, h_{\max} : 0.2536 mm, Section area: 1.5952 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.2119 mm, Section area: 1.3428 mm²



GP 21, h_{\max} : 0.1677 mm, Section area: 1.0862 mm²



GP 23, h_{\max} : 0.1311 mm, Section area: 0.8479 mm²



GP 25, h_{\max} : 0.1007 mm, Section area: 0.6234 mm²



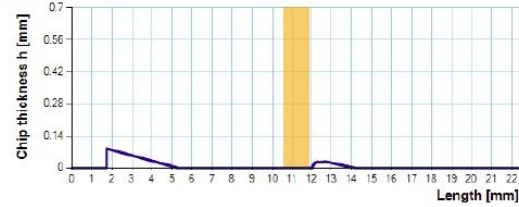
GP 27, h_{\max} : 0.0966 mm, Section area: 0.4353 mm²



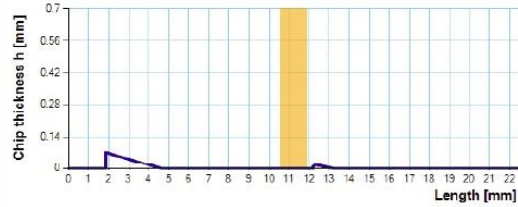
GP 29, h_{\max} : 0.0909 mm, Section area: 0.2951 mm²



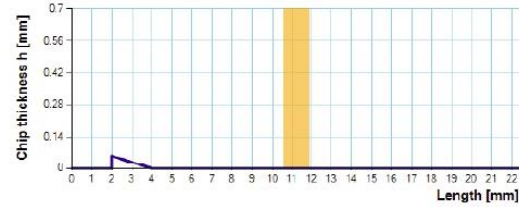
GP 31, h_{\max} : 0.0847 mm, Section area: 0.1897 mm²



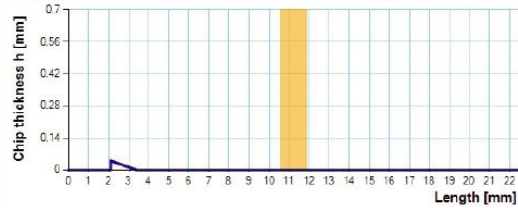
GP 33, h_{\max} : 0.0717 mm, Section area: 0.1156 mm²



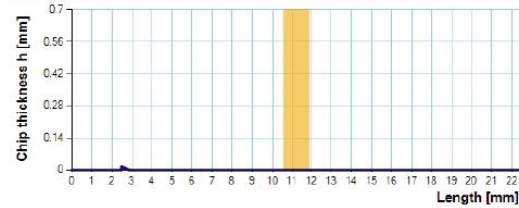
GP 35, h_{\max} : 0.0568 mm, Section area: 0.0629 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0402 mm, Section area: 0.0268 mm²

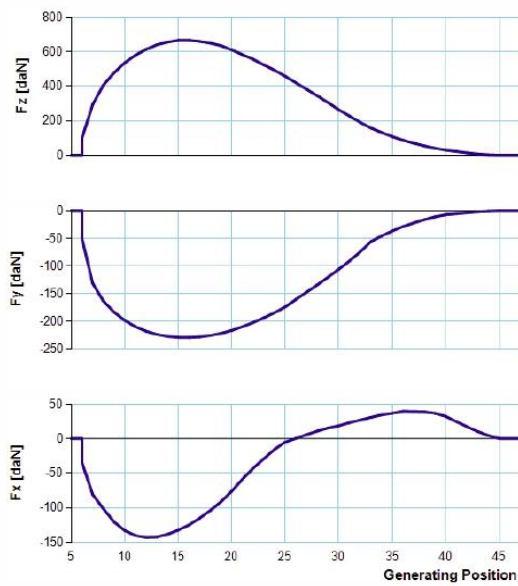


GP 39, h_{\max} : 0.0134 mm, Section area: 0.004 mm²

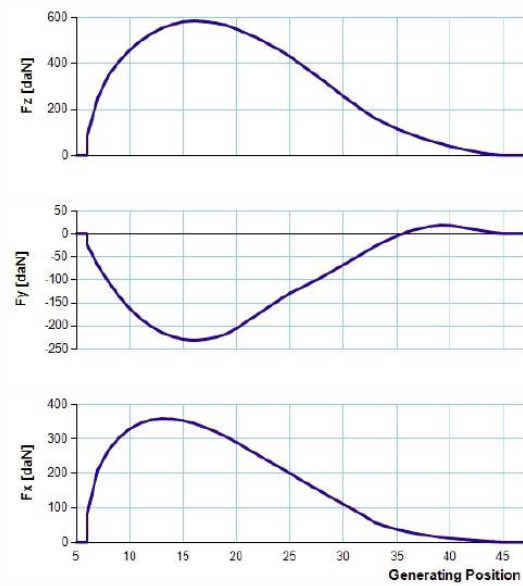


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

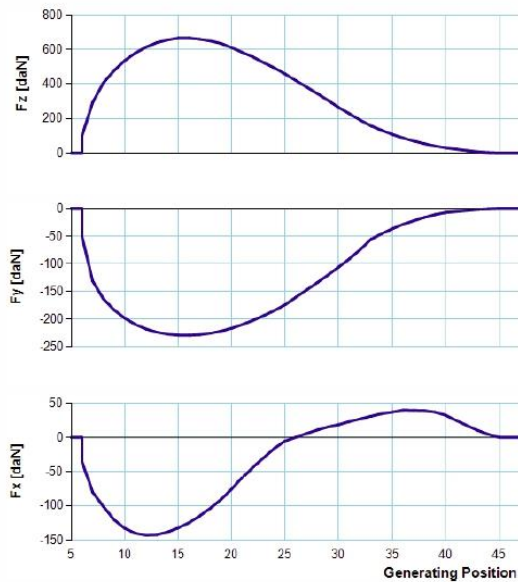
System 1



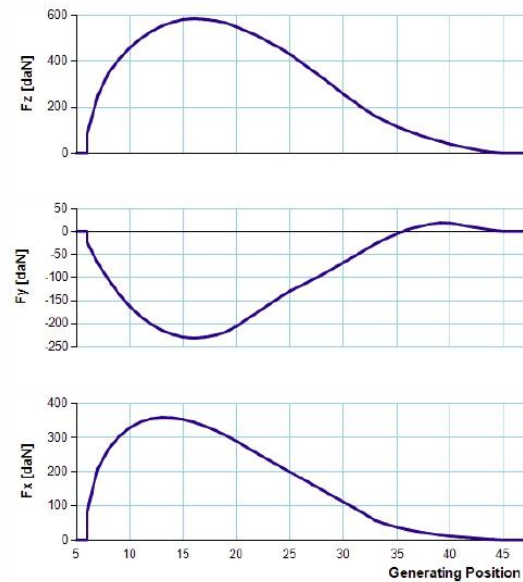
System 3



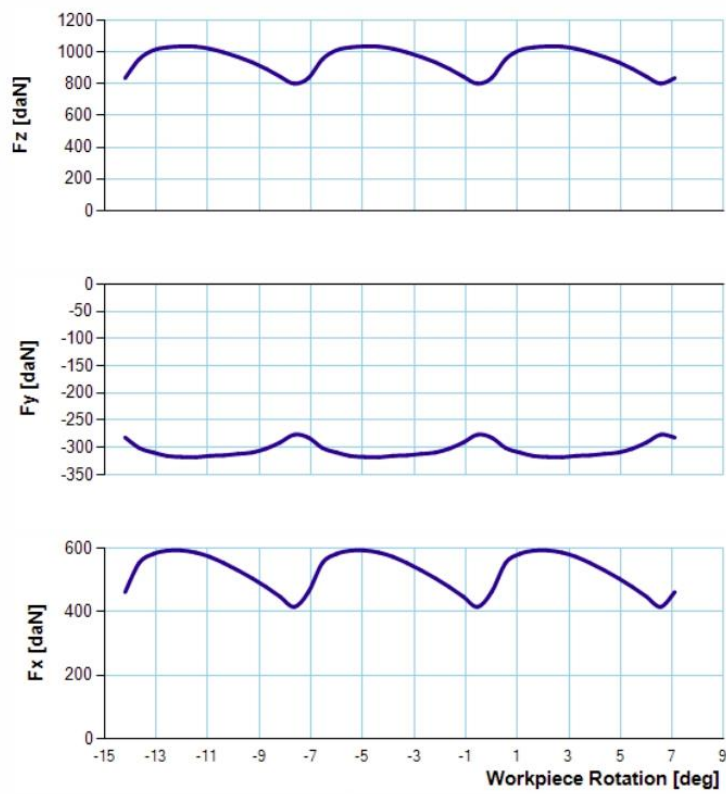
System 2



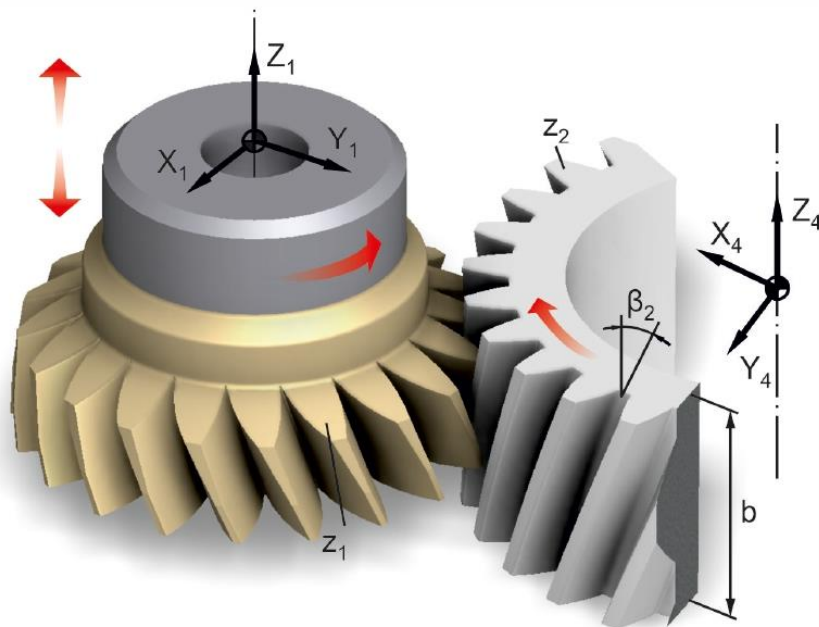
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



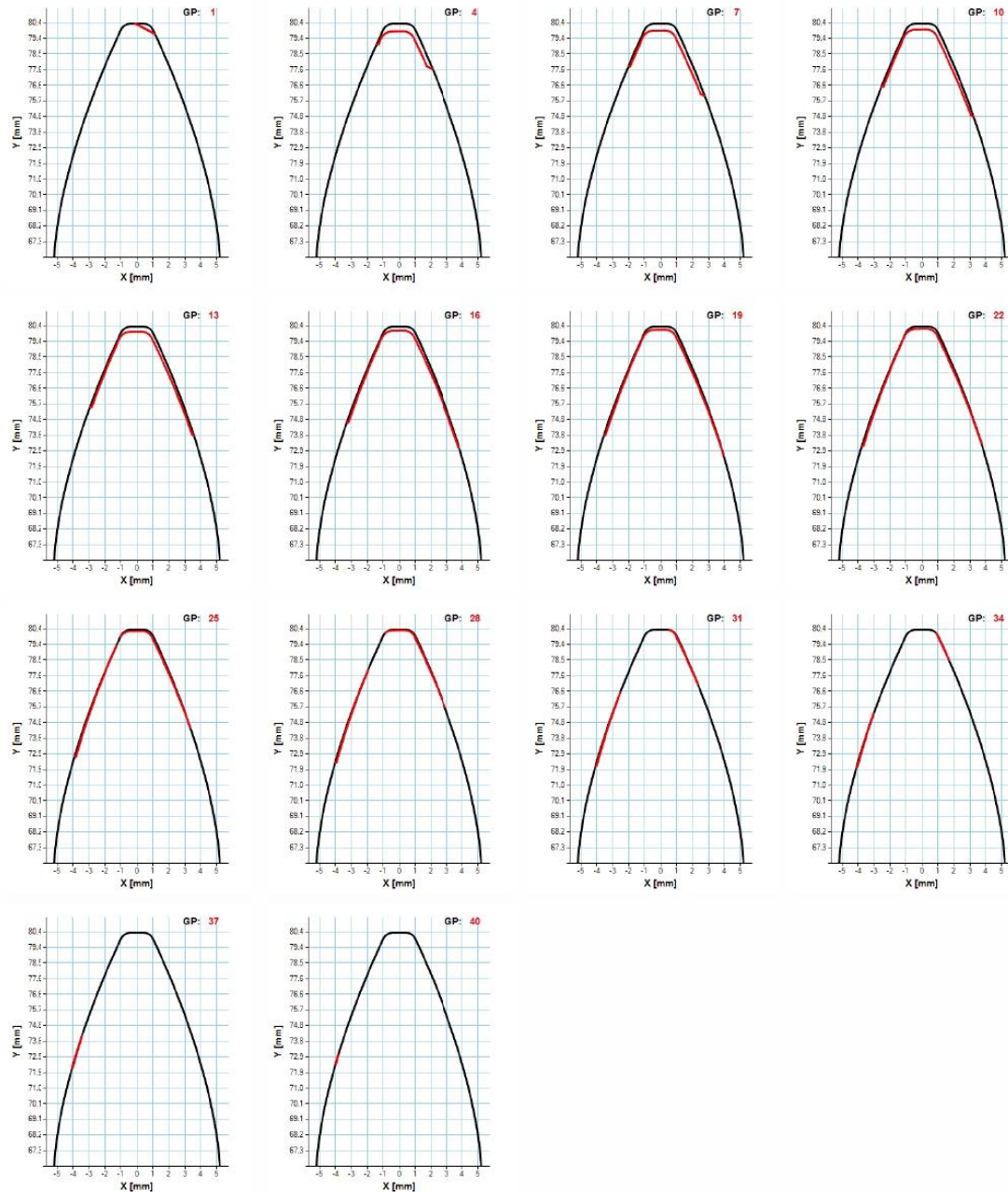
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

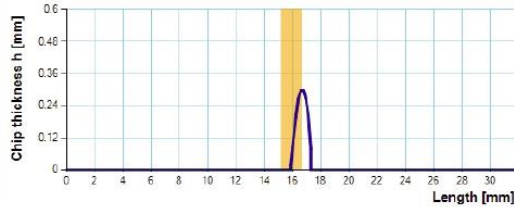
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	40 deg
Tool helix angle (β_1):	40 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	8.165 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2



CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

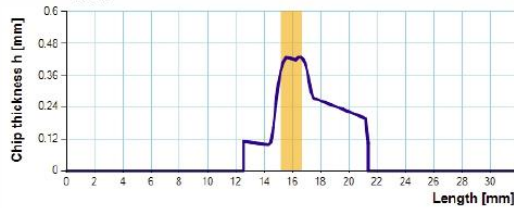
GP 1, h_{\max} : 0.297 mm, Section area: 0.2623 mm²



GP 4, h_{\max} : 0.4839 mm, Section area: 1.6813 mm²



GP 7, h_{\max} : 0.43 mm, Section area: 2.0313 mm²



GP 10, h_{\max} : 0.3777 mm, Section area: 2.1059 mm²



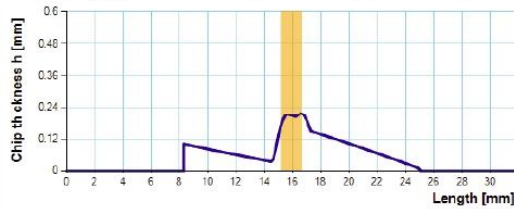
GP 13, h_{\max} : 0.3251 mm, Section area: 2.0197 mm²



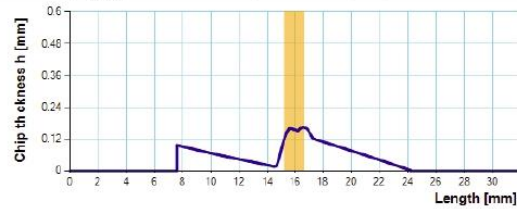
GP 16, h_{\max} : 0.2716 mm, Section area: 1.801 mm²



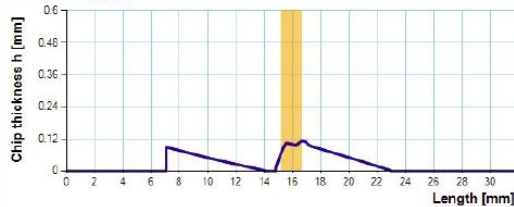
GP 19, h_{\max} : 0.2178 mm, Section area: 1.5018 mm²



GP 22, h_{\max} : 0.1632 mm, Section area: 1.1557 mm²



GP 25, h_{\max} : 0.1119 mm, Section area: 0.8011 mm²



GP 28, h_{\max} : 0.0802 mm, Section area: 0.4921 mm²

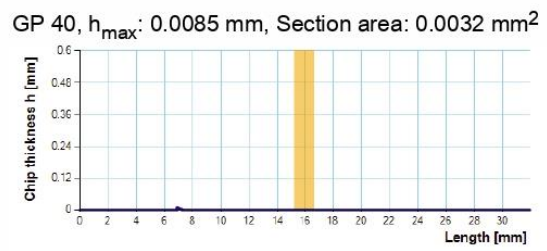
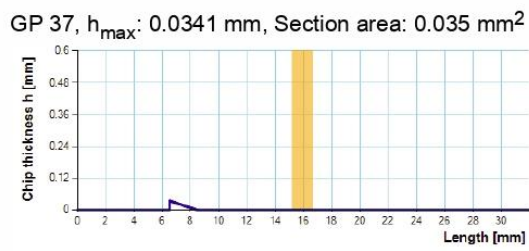


GP 31, h_{\max} : 0.0679 mm, Section area: 0.2449 mm²



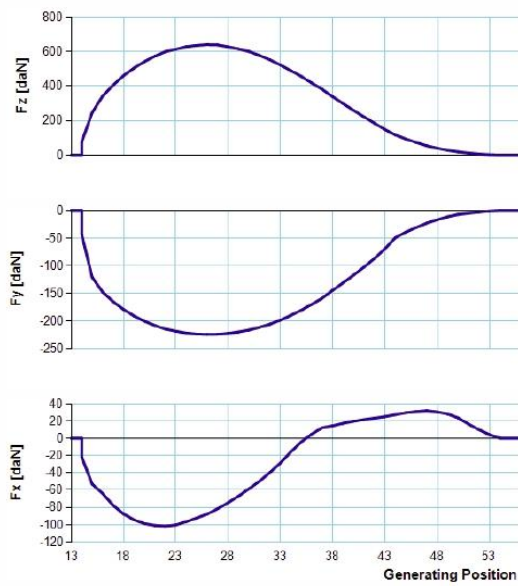
GP 34, h_{\max} : 0.0517 mm, Section area: 0.1068 mm²



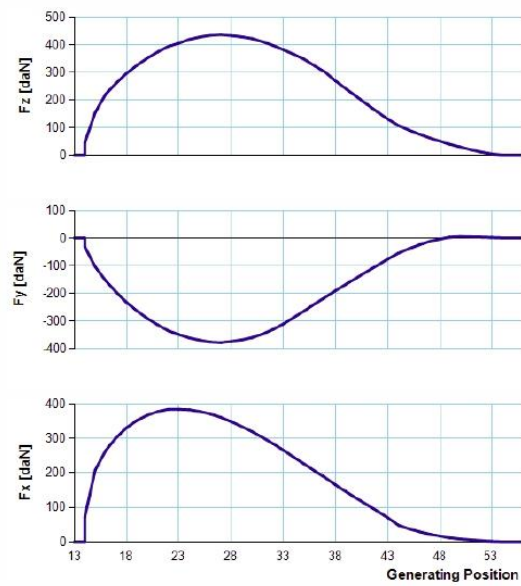


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

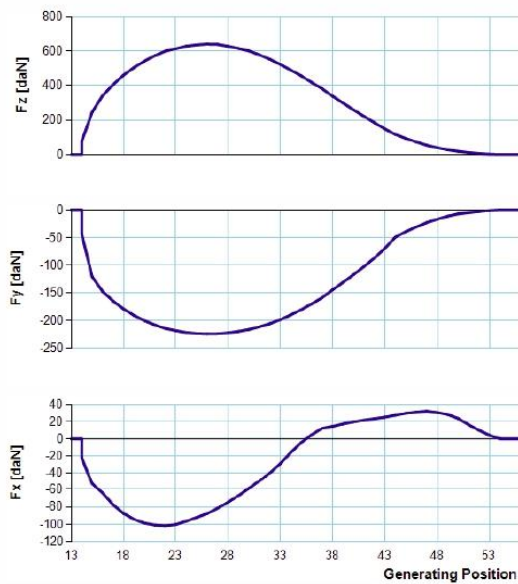
System 1



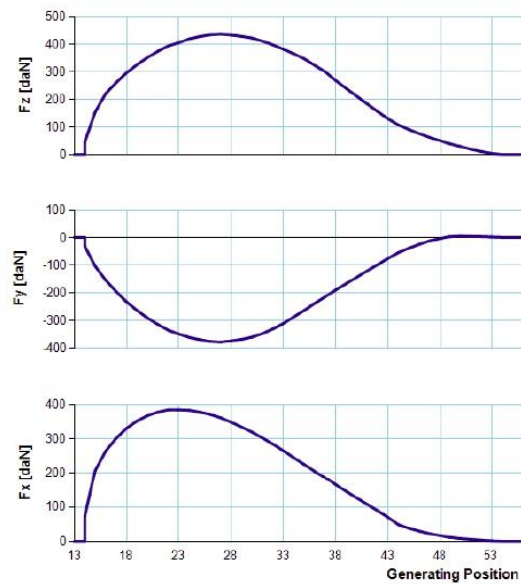
System 3

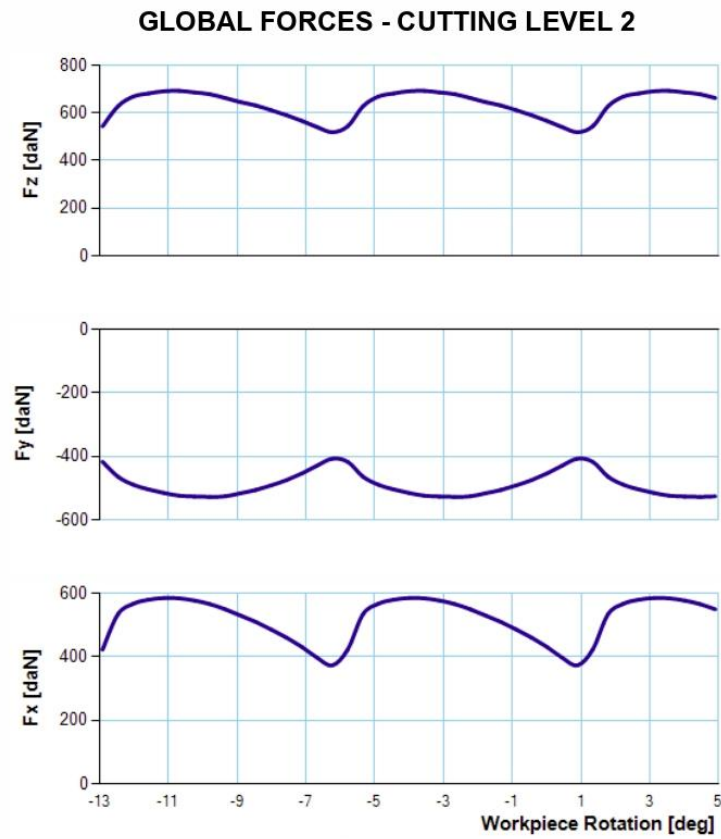


System 2

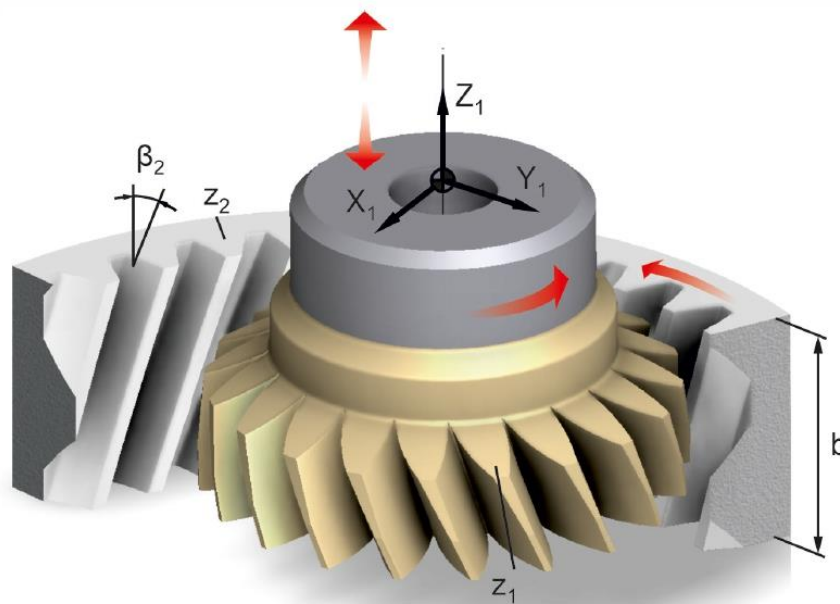


System 4





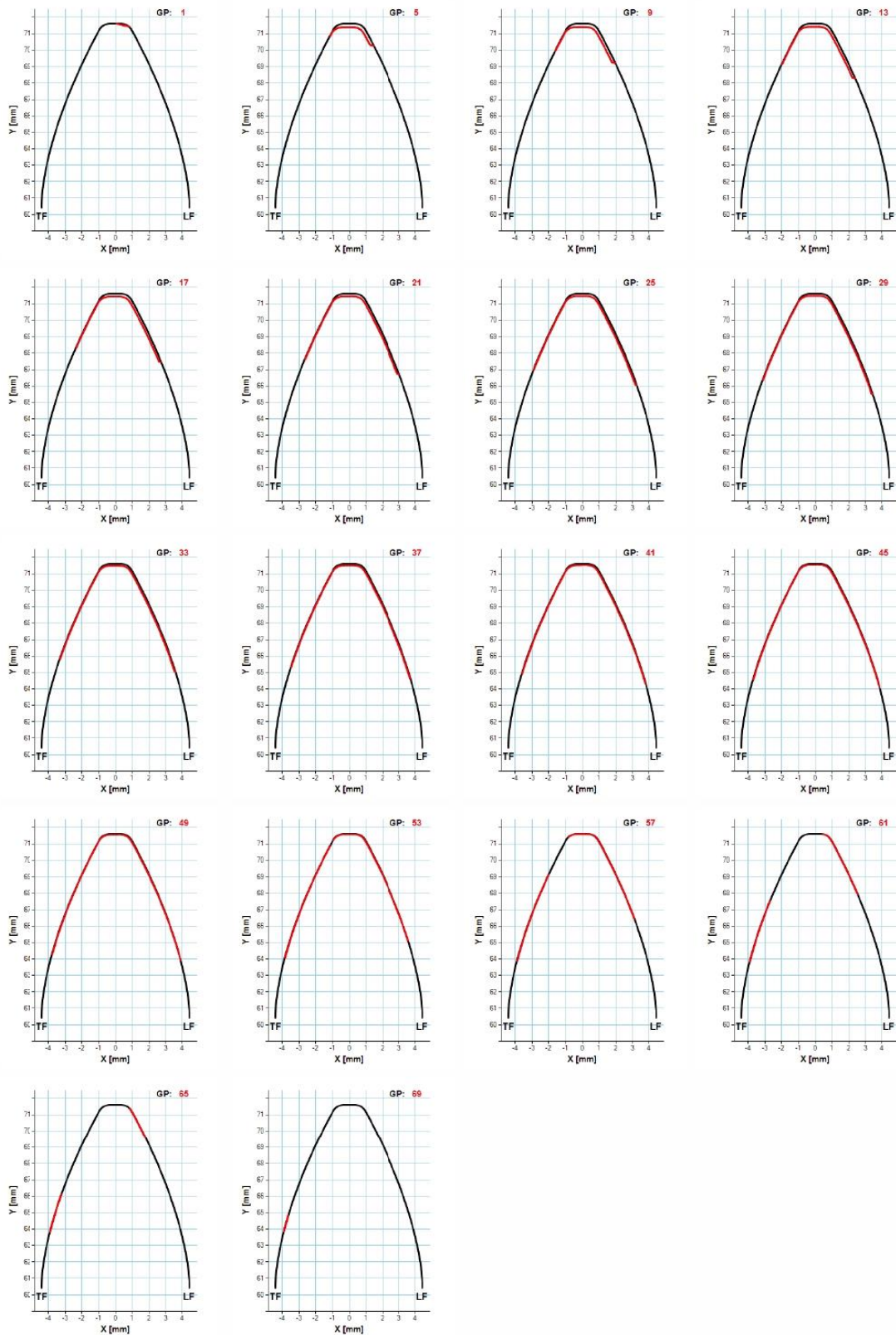
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

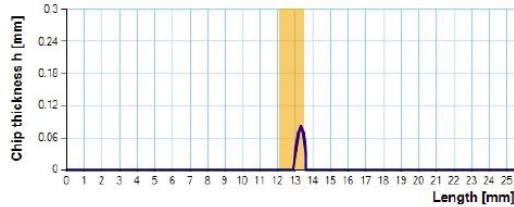
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

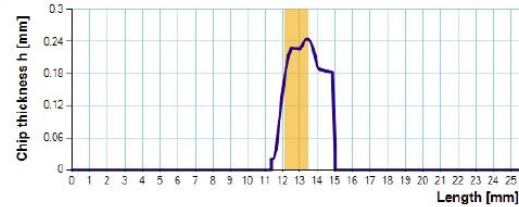


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

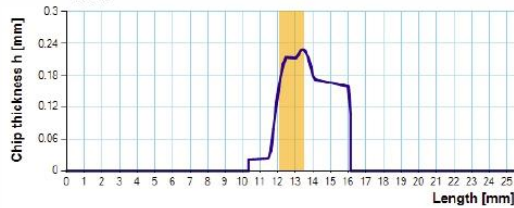
GP 1, h_{\max} : 0.0822 mm, Section area: 0.0385 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.2451 mm, Section area: 0.6195 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.229 mm, Section area: 0.7955 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.2122 mm, Section area: 0.9116 mm²



GP 17, h_{\max} : 0.1959 mm, Section area: 0.9716 mm²



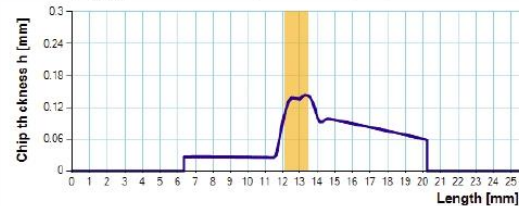
GP 21, h_{\max} : 0.1794 mm, Section area: 0.9813 mm²



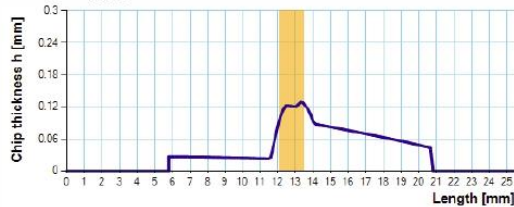
GP 25, h_{\max} : 0.1621 mm, Section area: 0.9641 mm²



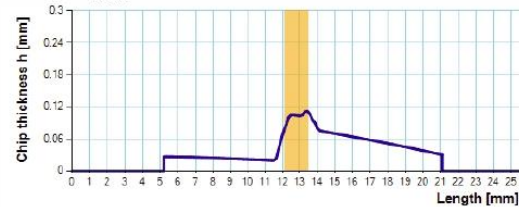
GP 29, h_{\max} : 0.1442 mm, Section area: 0.914 mm²



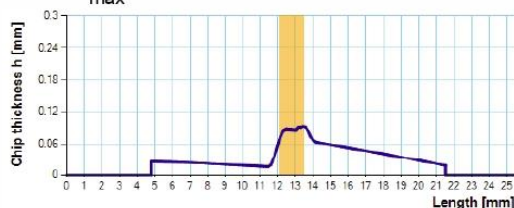
GP 33, h_{\max} : 0.1291 mm, Section area: 0.8417 mm²



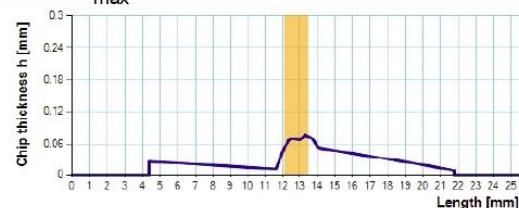
GP 37, h_{\max} : 0.1114 mm, Section area: 0.7512 mm²



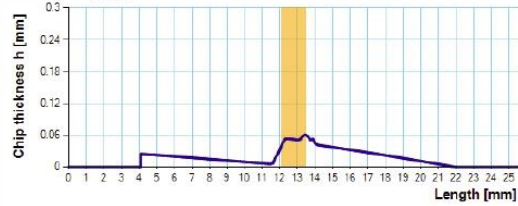
GP 41, h_{\max} : 0.0928 mm, Section area: 0.644 mm²



GP 45, h_{\max} : 0.0768 mm, Section area: 0.5241 mm²



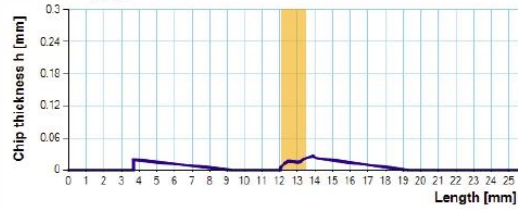
GP 49, h_{\max} : 0.0602 mm, Section area: 0.3968 mm²



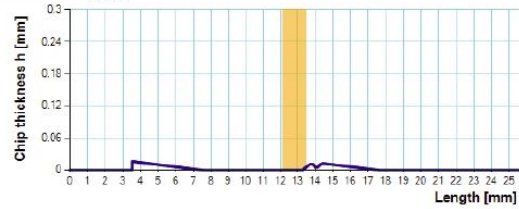
GP 53, h_{\max} : 0.0389 mm, Section area: 0.2636 mm²



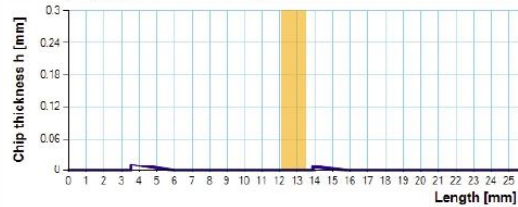
GP 57, h_{\max} : 0.0264 mm, Section area: 0.1511 mm²



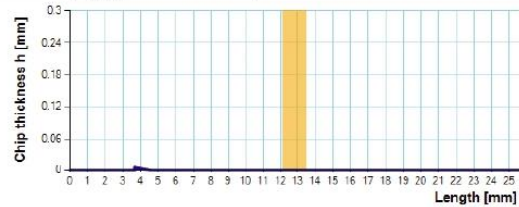
GP 61, h_{\max} : 0.0155 mm, Section area: 0.0606 mm²



GP 65, h_{\max} : 0.0112 mm, Section area: 0.0204 mm²

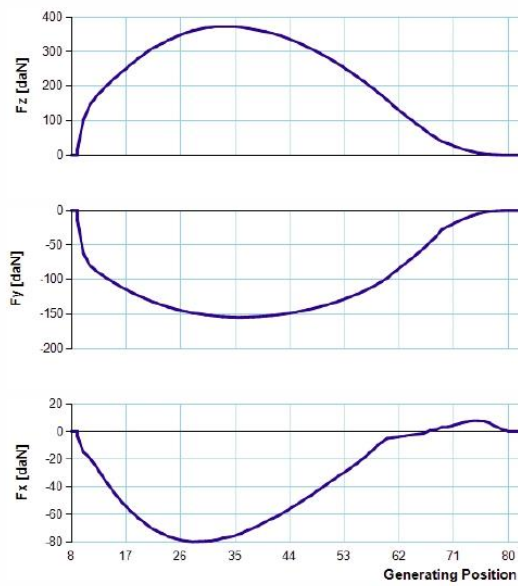


GP 69, h_{\max} : 0.0048 mm, Section area: 0.0027 mm²

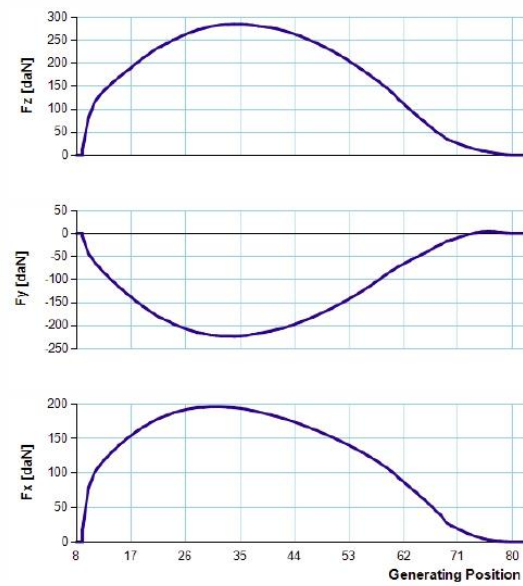


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

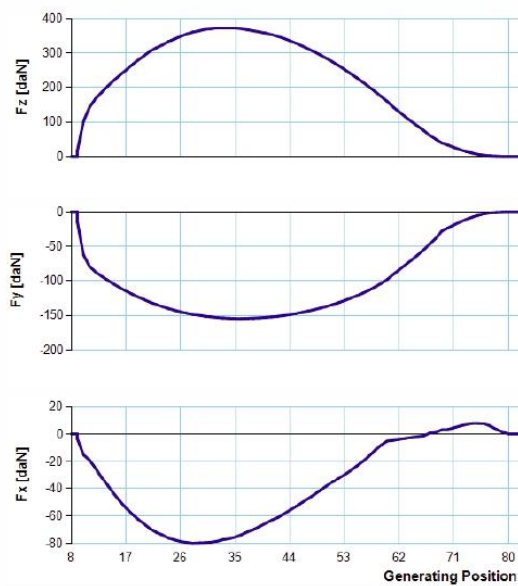
System 1



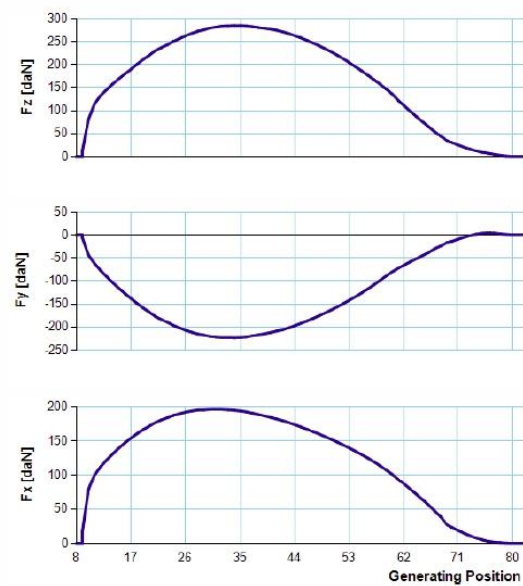
System 3



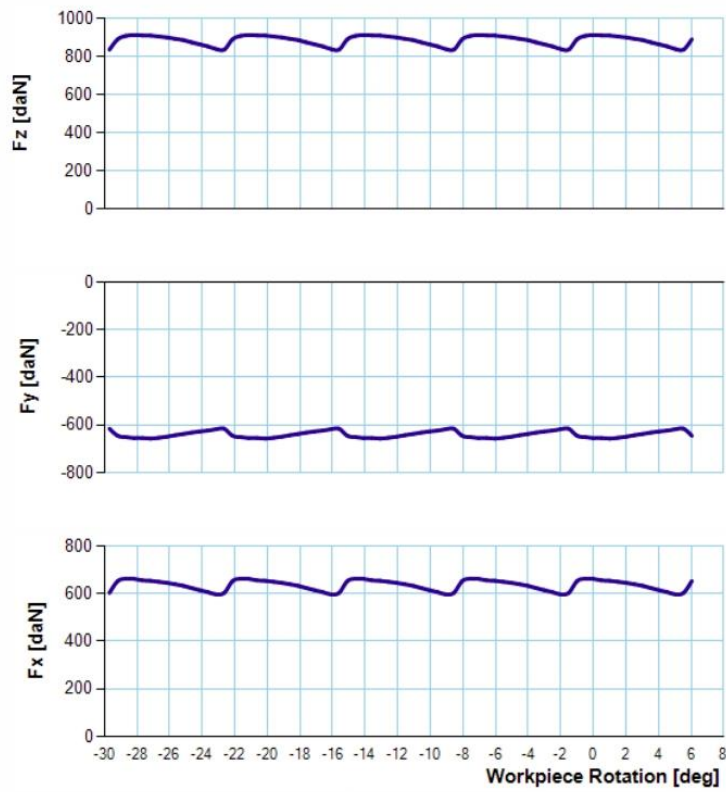
System 2



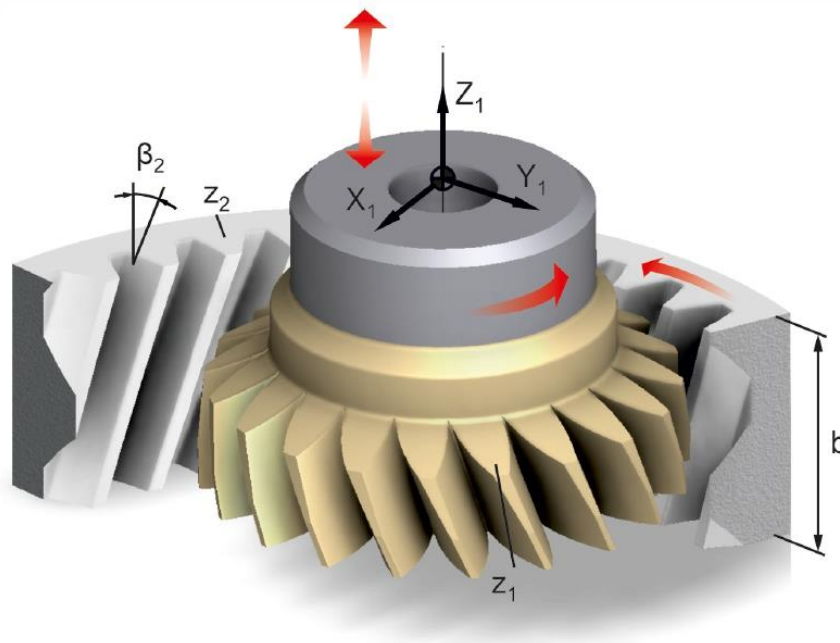
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



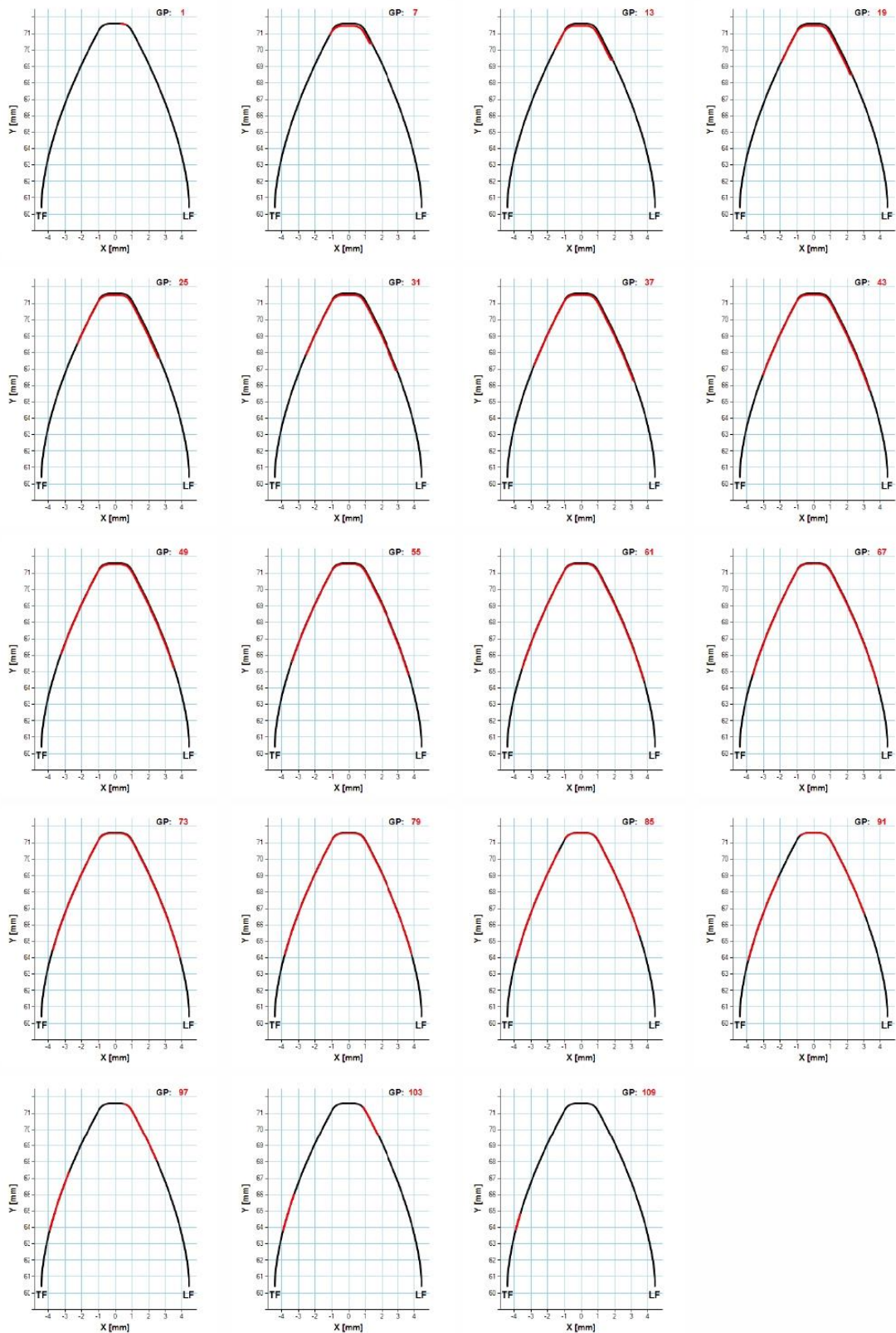
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

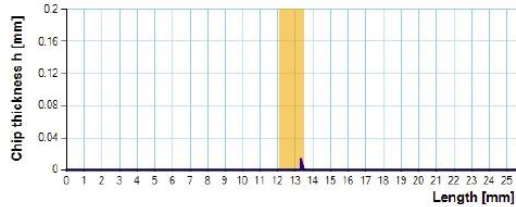
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.58 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2



CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.0132 mm, Section area: 0.0018 mm²



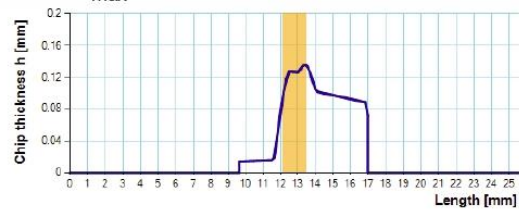
GP 7, h_{\max} : 0.1553 mm, Section area: 0.3785 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.1458 mm, Section area: 0.4886 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.1362 mm, Section area: 0.564 mm²



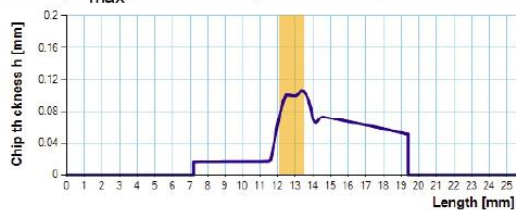
GP 25, h_{\max} : 0.1259 mm, Section area: 0.6076 mm²



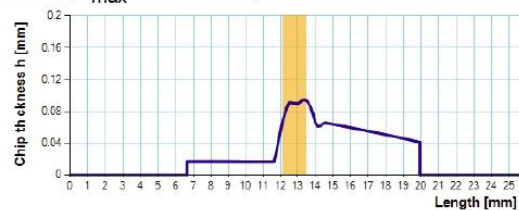
GP 31, h_{\max} : 0.1165 mm, Section area: 0.6236 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.1062 mm, Section area: 0.6132 mm²



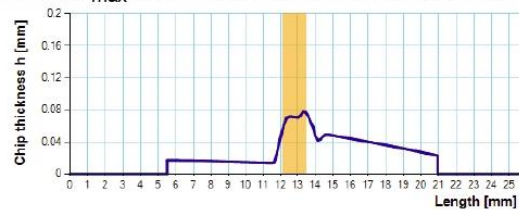
GP 43, h_{\max} : 0.0949 mm, Section area: 0.59 mm²



GP 49, h_{\max} : 0.0869 mm, Section area: 0.5515 mm²



GP 55, h_{\max} : 0.0776 mm, Section area: 0.5023 mm²



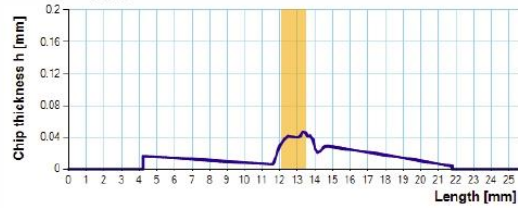
GP 61, h_{\max} : 0.0669 mm, Section area: 0.4428 mm²



GP 67, h_{\max} : 0.0548 mm, Section area: 0.3762 mm²



GP 73, h_{\max} : 0.0469 mm, Section area: 0.3021 mm²



GP 79, h_{\max} : 0.0364 mm, Section area: 0.2252 mm²



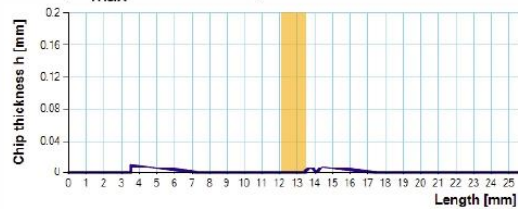
GP 85, h_{\max} : 0.0226 mm, Section area: 0.1456 mm²



GP 91, h_{\max} : 0.0141 mm, Section area: 0.0813 mm²



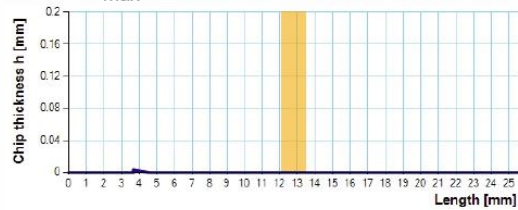
GP 97, h_{\max} : 0.0098 mm, Section area: 0.0335 mm²



GP 103, h_{\max} : 0.0069 mm, Section area: 0.0119 mm²

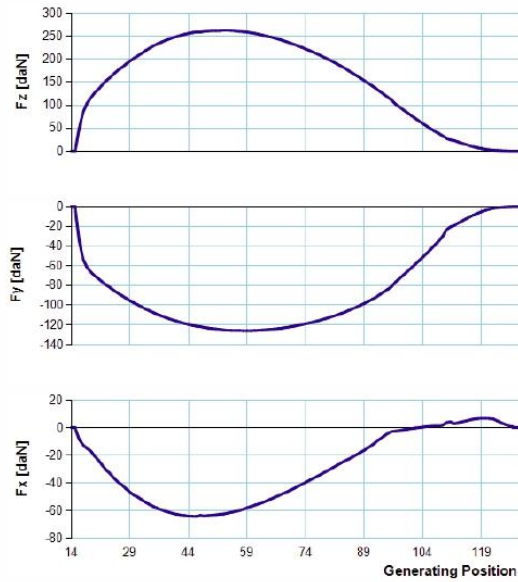


GP 109, h_{\max} : 0.0031 mm, Section area: 0.0018 mm²

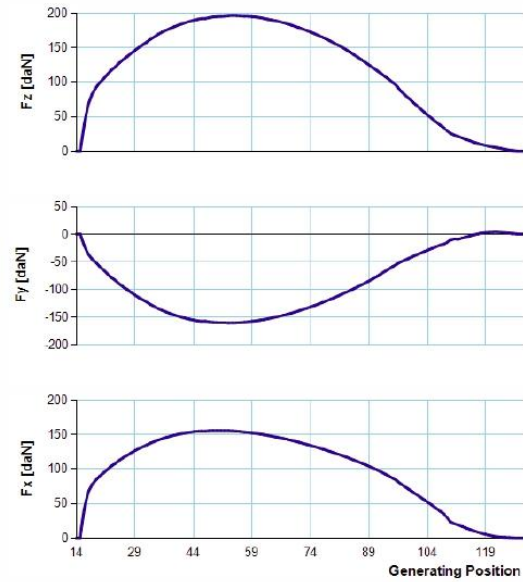


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

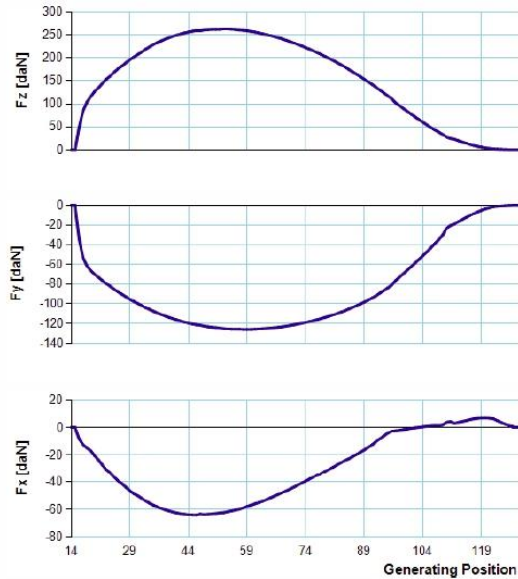
System 1



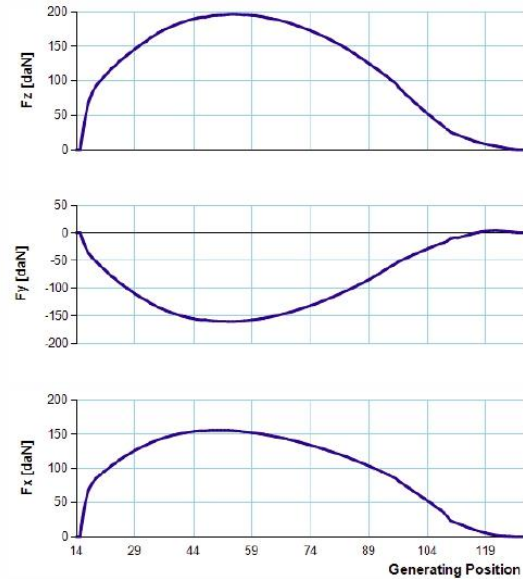
System 3



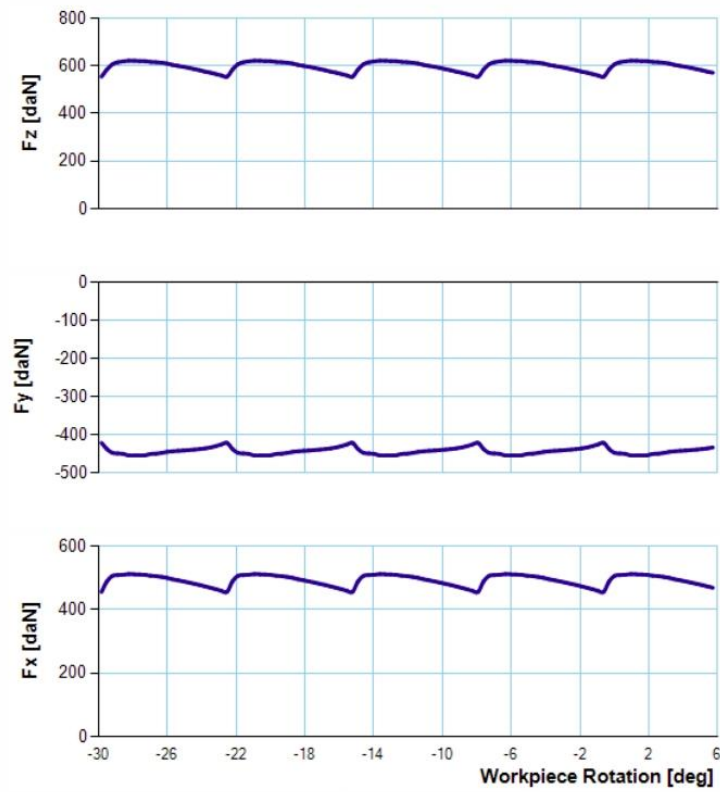
System 2



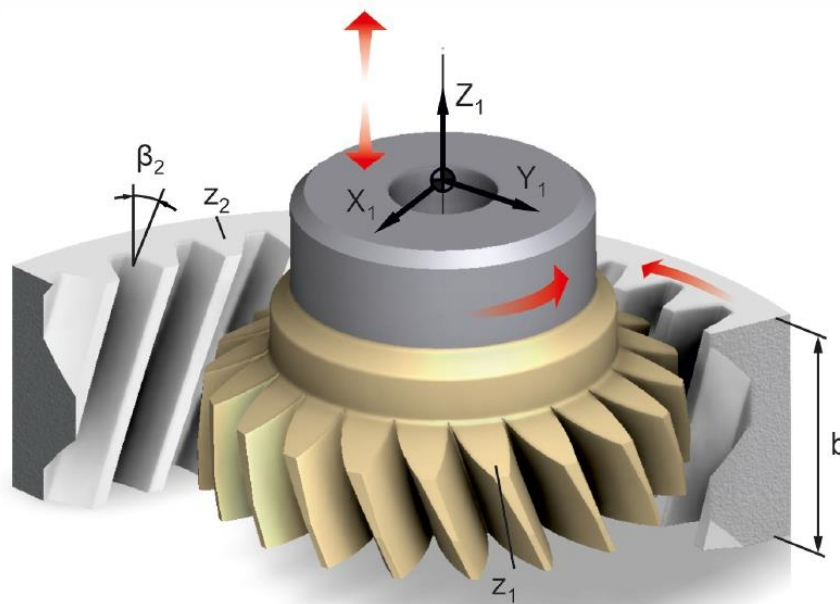
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



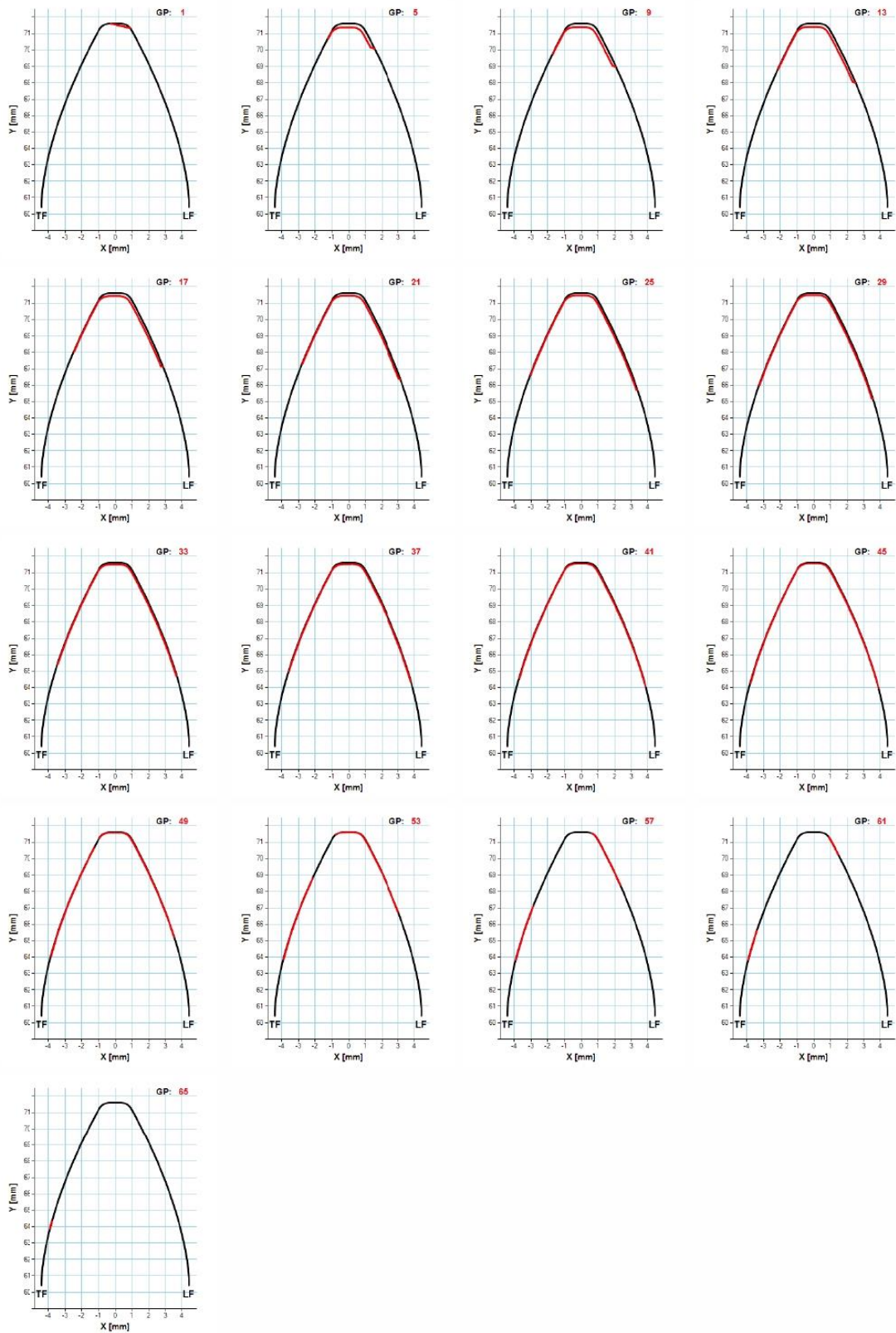
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

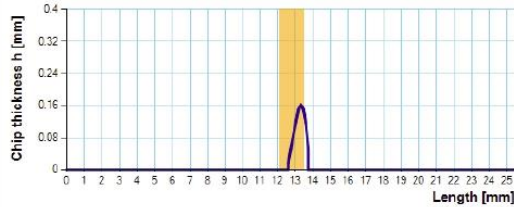
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	1 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

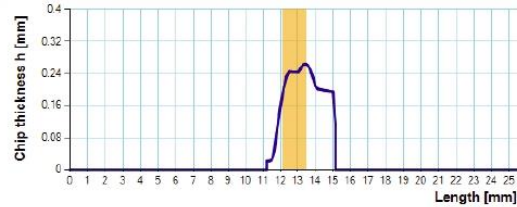


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.1624 mm, Section area: 0.1182 mm²



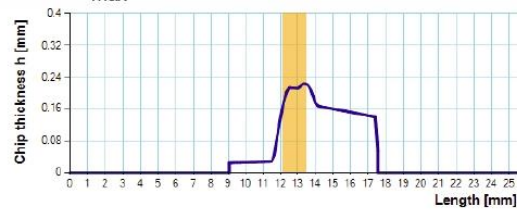
GP 5, h_{\max} : 0.2636 mm, Section area: 0.7065 mm²



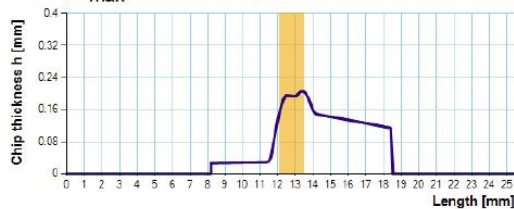
GP 9, h_{\max} : 0.2444 mm, Section area: 0.8998 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.2246 mm, Section area: 1.0146 mm²



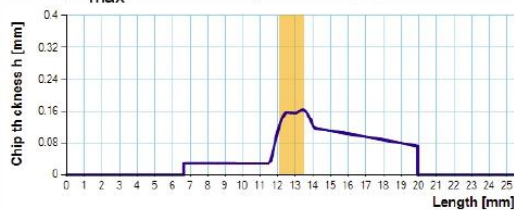
GP 17, h_{\max} : 0.2056 mm, Section area: 1.0653 mm²



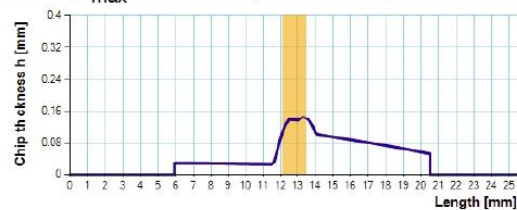
GP 21, h_{\max} : 0.1857 mm, Section area: 1.0631 mm²



GP 25, h_{\max} : 0.1646 mm, Section area: 1.0231 mm²



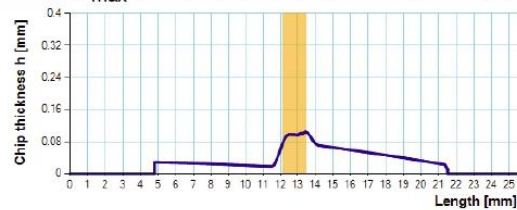
GP 29, h_{\max} : 0.1456 mm, Section area: 0.9459 mm²



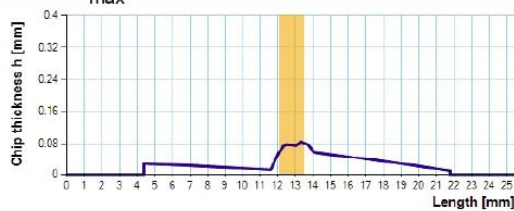
GP 33, h_{\max} : 0.1256 mm, Section area: 0.8421 mm²



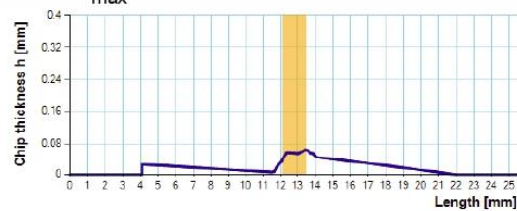
GP 37, h_{\max} : 0.104 mm, Section area: 0.7172 mm²



GP 41, h_{\max} : 0.0842 mm, Section area: 0.5791 mm²



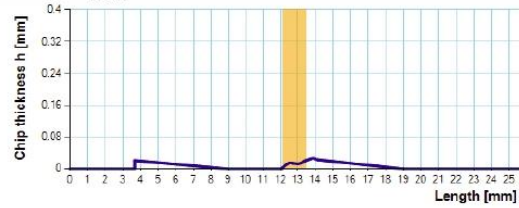
GP 45, h_{\max} : 0.0643 mm, Section area: 0.4278 mm²



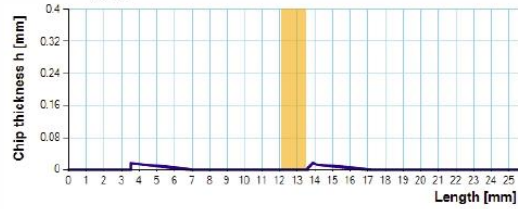
GP 49, h_{\max} : 0.0401 mm, Section area: 0.272 mm²



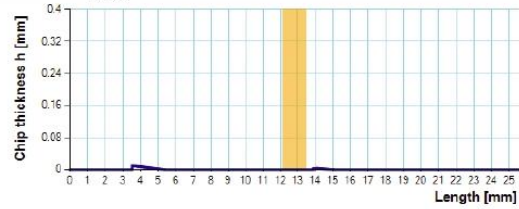
GP 53, h_{\max} : 0.0264 mm, Section area: 0.143 mm²



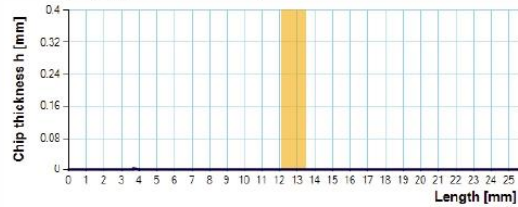
GP 57, h_{\max} : 0.0166 mm, Section area: 0.0536 mm²



GP 61, h_{\max} : 0.01 mm, Section area: 0.0118 mm²

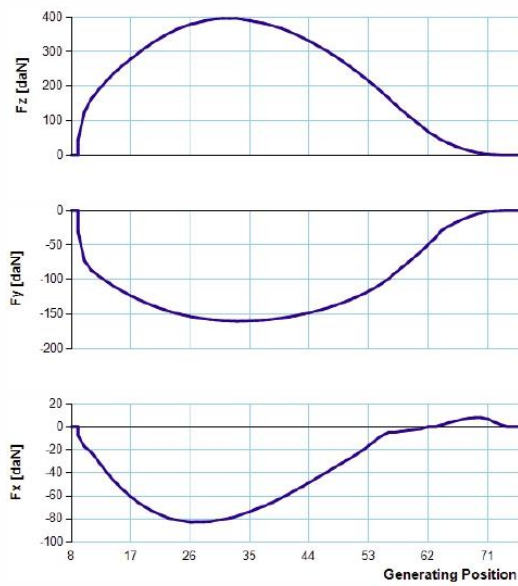


GP 65, h_{\max} : 0.0021 mm, Section area: 0.0005 mm²

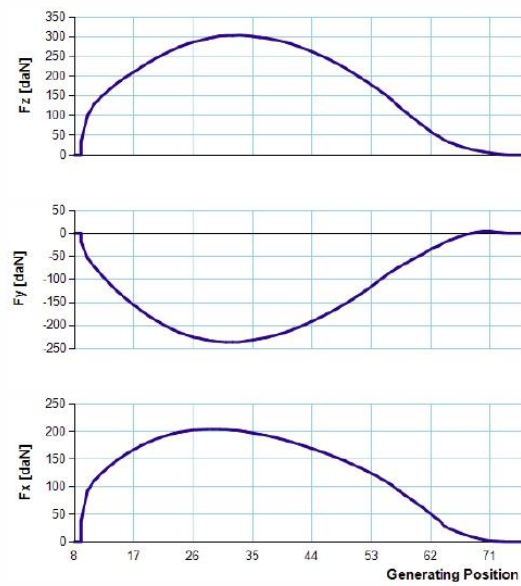


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

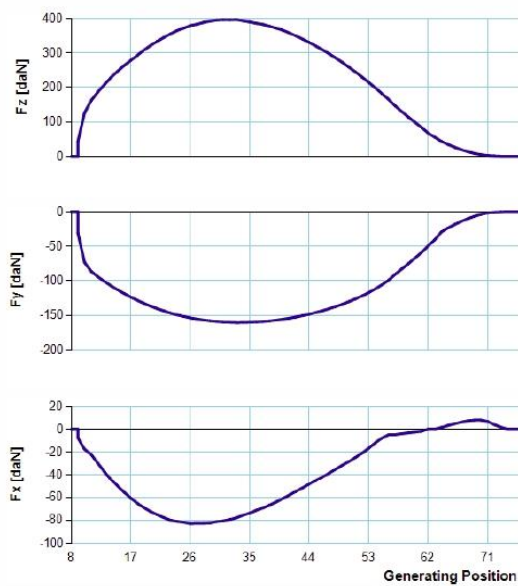
System 1



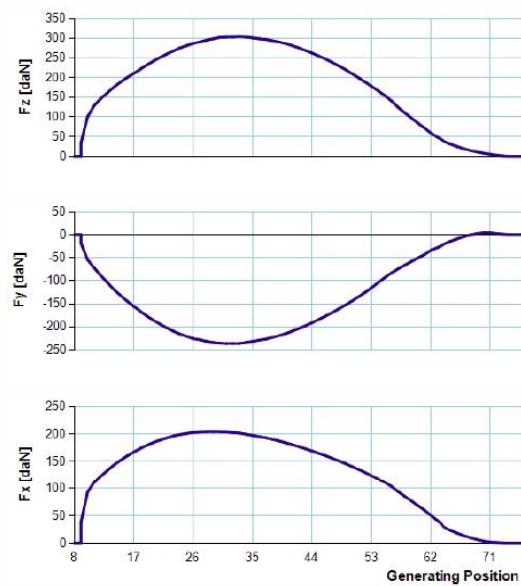
System 3



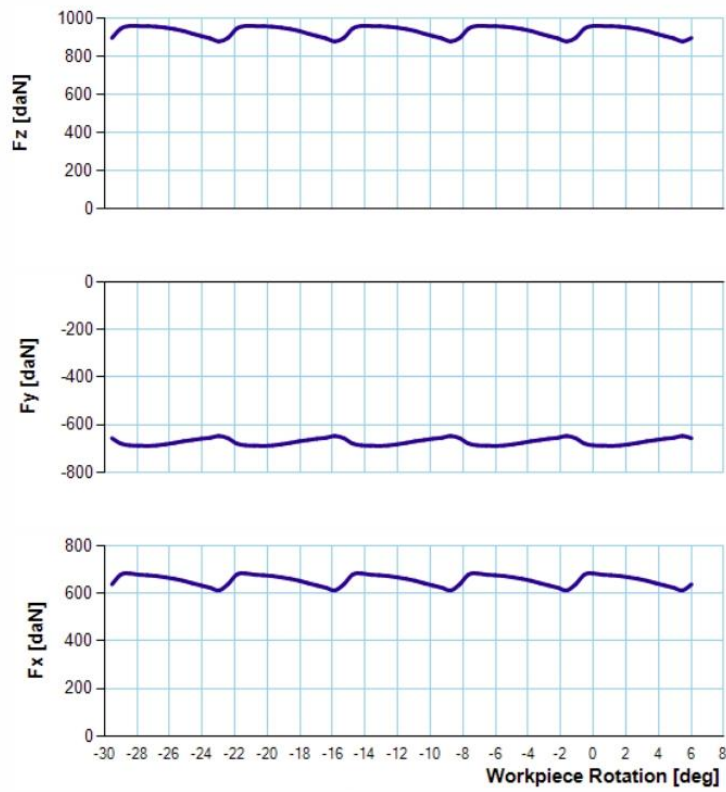
System 2



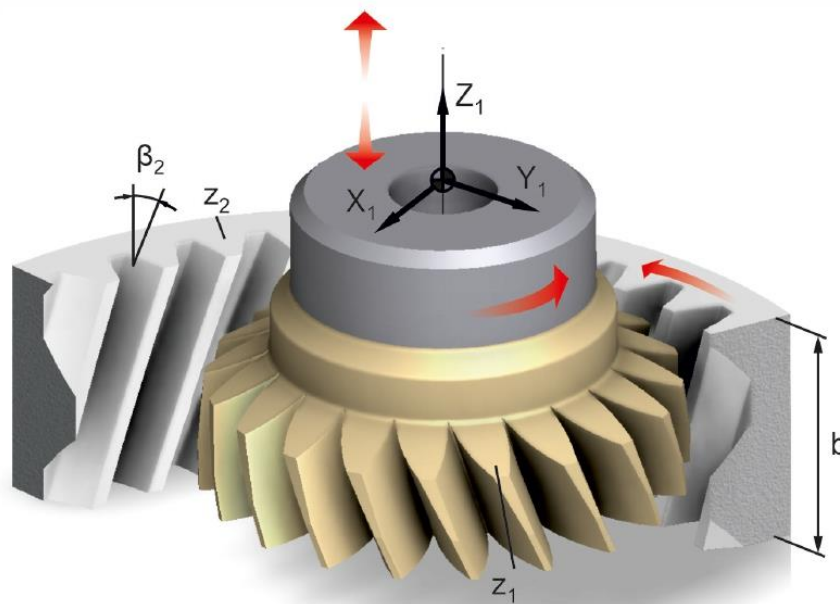
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



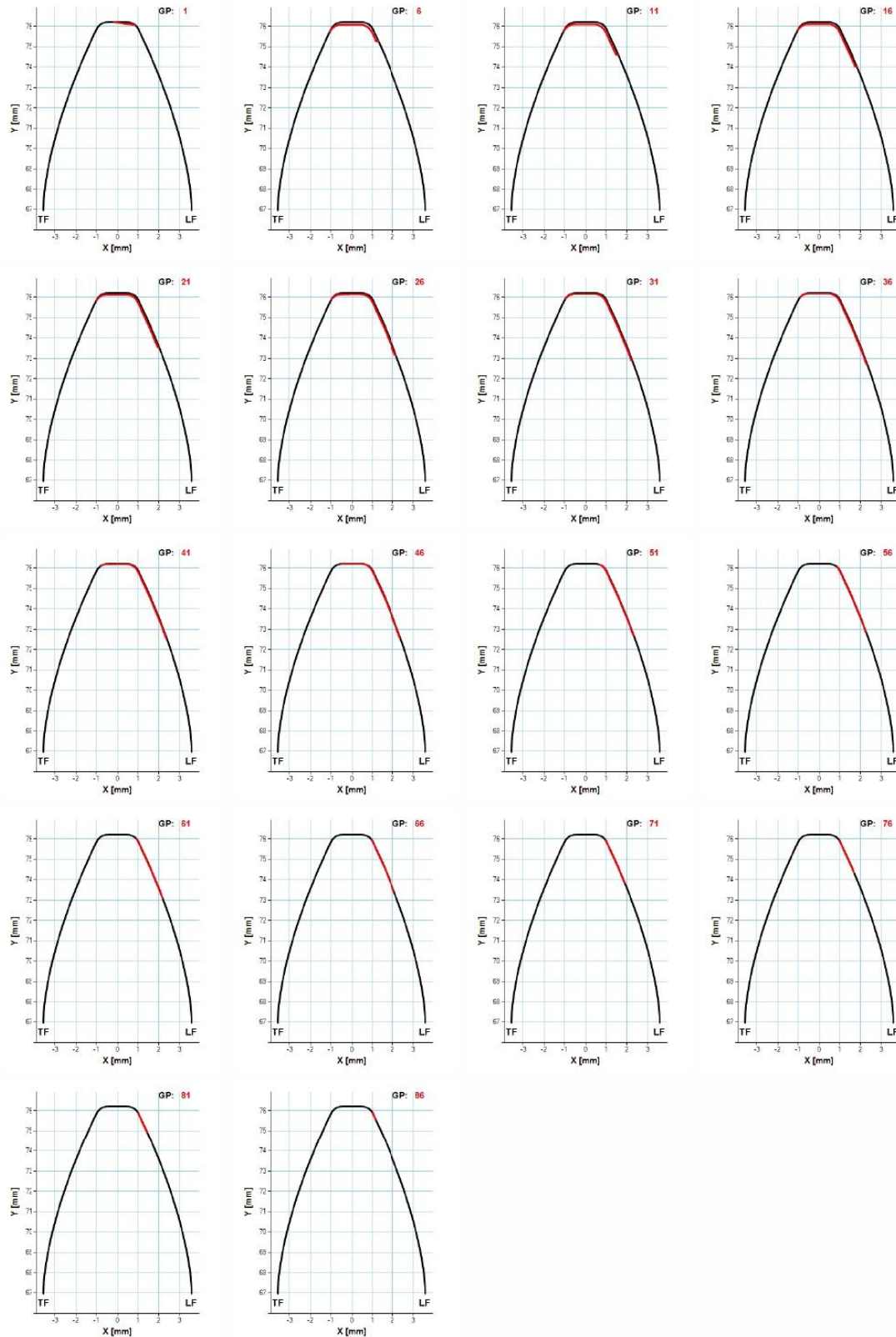
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

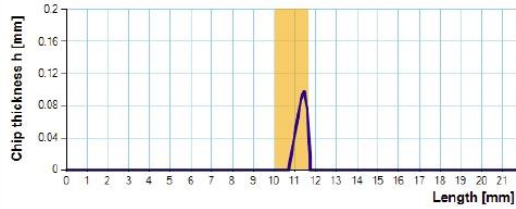
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	3.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

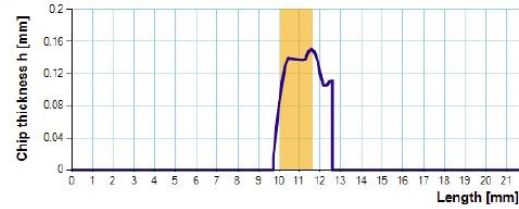


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

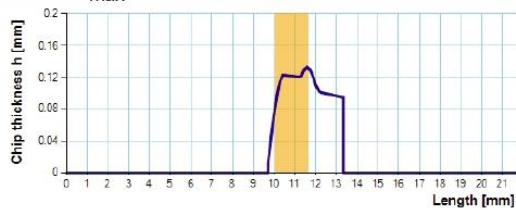
GP 1, h_{\max} : 0.0979 mm, Section area: 0.058 mm²



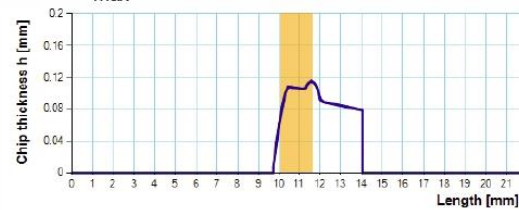
GP 6, h_{\max} : 0.1506 mm, Section area: 0.3416 mm²



GP 11, h_{\max} : 0.1334 mm, Section area: 0.3802 mm²



GP 16, h_{\max} : 0.1162 mm, Section area: 0.3828 mm²



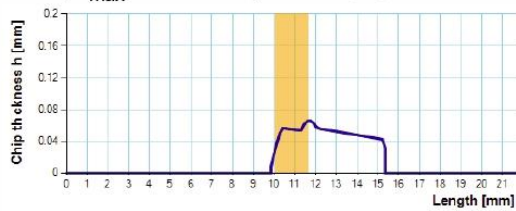
GP 21, h_{\max} : 0.099 mm, Section area: 0.3594 mm²



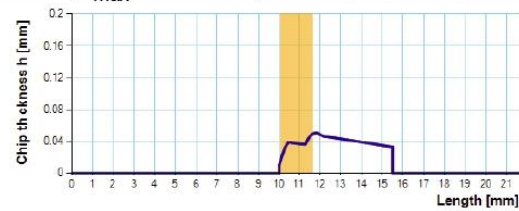
GP 26, h_{\max} : 0.0816 mm, Section area: 0.3234 mm²



GP 31, h_{\max} : 0.0652 mm, Section area: 0.2727 mm²



GP 36, h_{\max} : 0.0504 mm, Section area: 0.2168 mm²



GP 41, h_{\max} : 0.0388 mm, Section area: 0.1585 mm²



GP 46, h_{\max} : 0.0306 mm, Section area: 0.1031 mm²



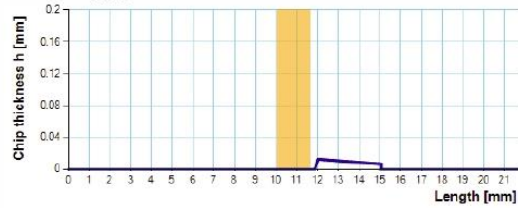
GP 51, h_{\max} : 0.0234 mm, Section area: 0.0706 mm²



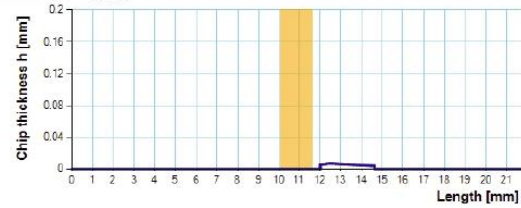
GP 56, h_{\max} : 0.0176 mm, Section area: 0.0472 mm²



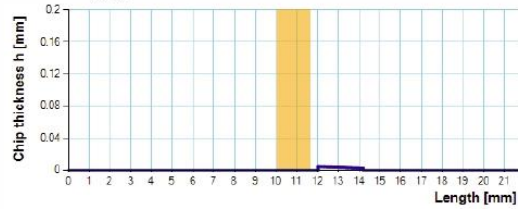
GP 61, h_{\max} : 0.0119 mm, Section area: 0.0291 mm²



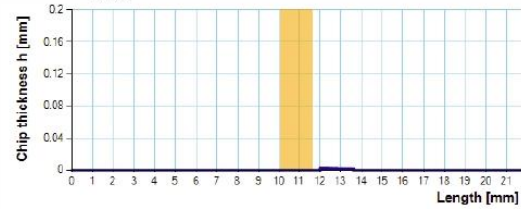
GP 66, h_{\max} : 0.0071 mm, Section area: 0.0158 mm²



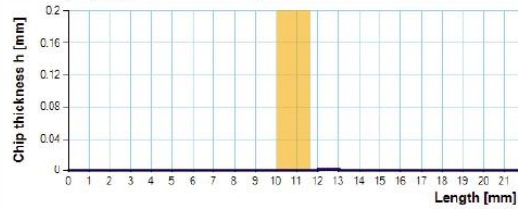
GP 71, h_{\max} : 0.0046 mm, Section area: 0.0081 mm²



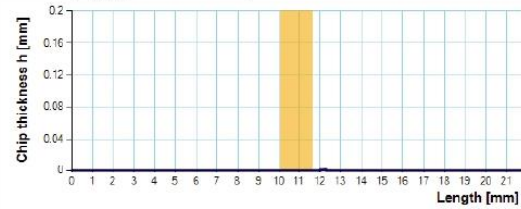
GP 76, h_{\max} : 0.0024 mm, Section area: 0.0034 mm²



GP 81, h_{\max} : 0.0011 mm, Section area: 0.0012 mm²

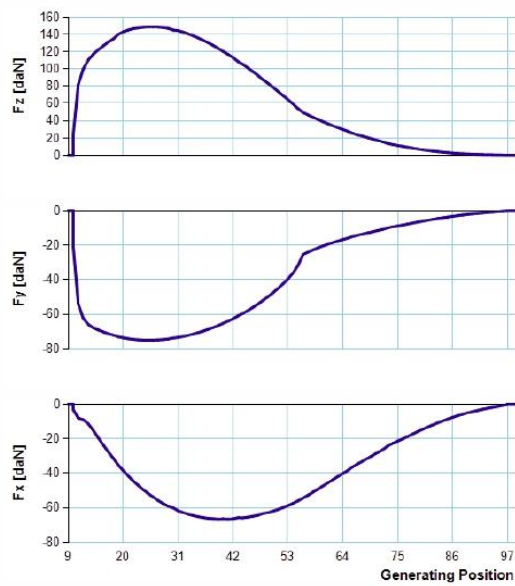


GP 86, h_{\max} : 0.001 mm, Section area: 0.0003 mm²

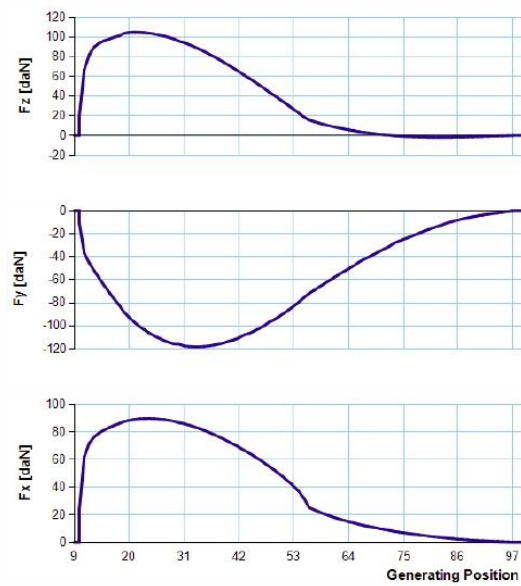


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

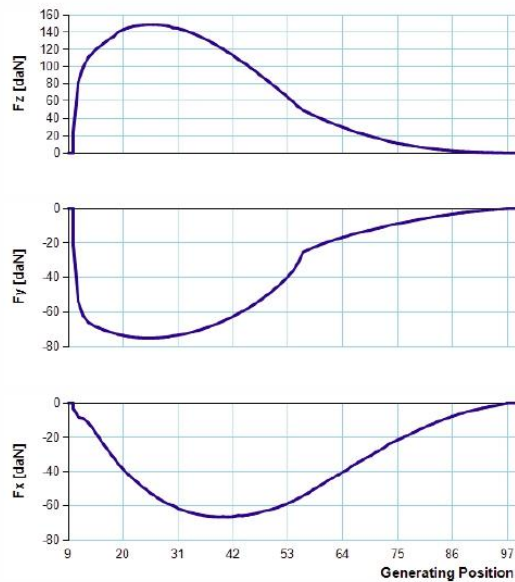
System 1



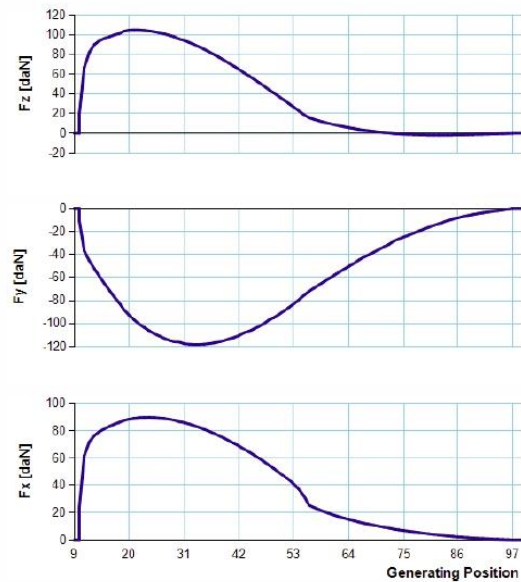
System 3



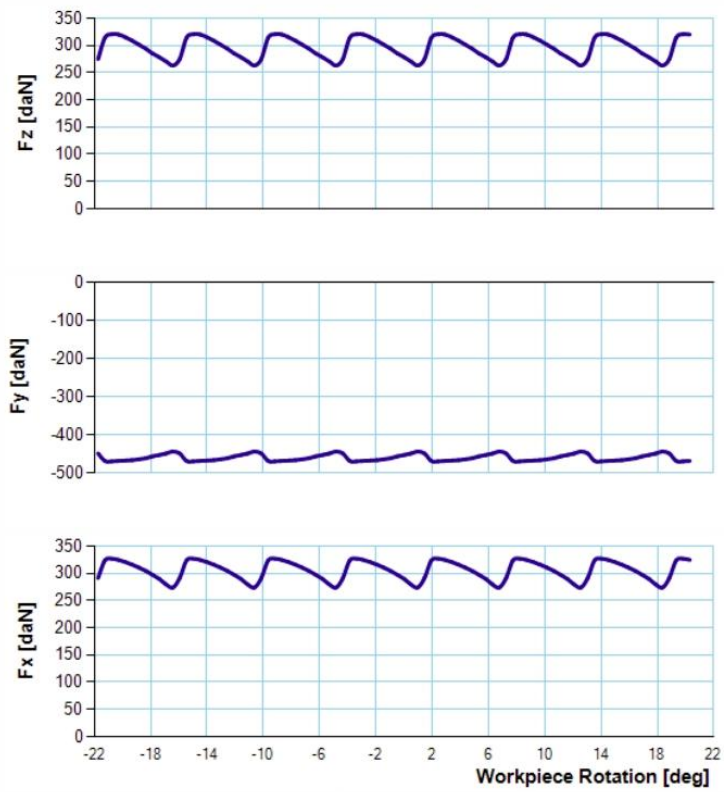
System 2



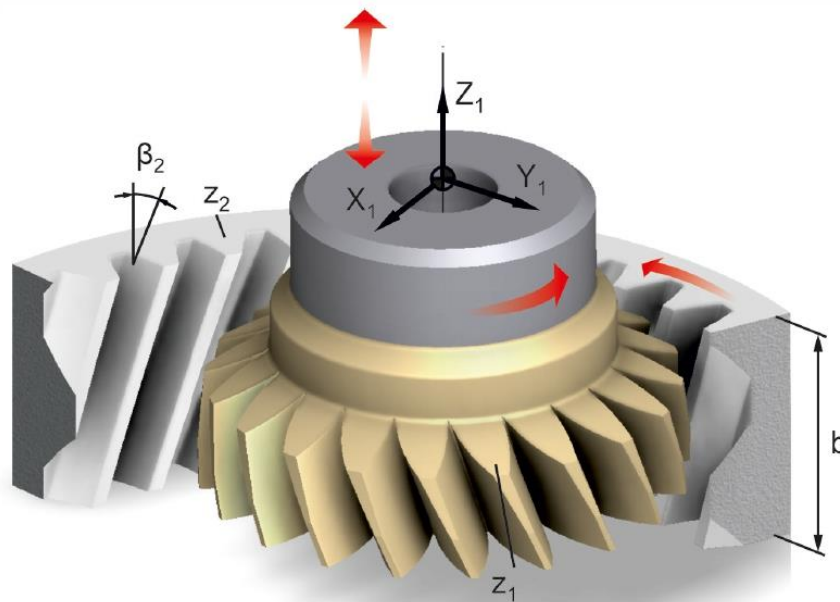
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



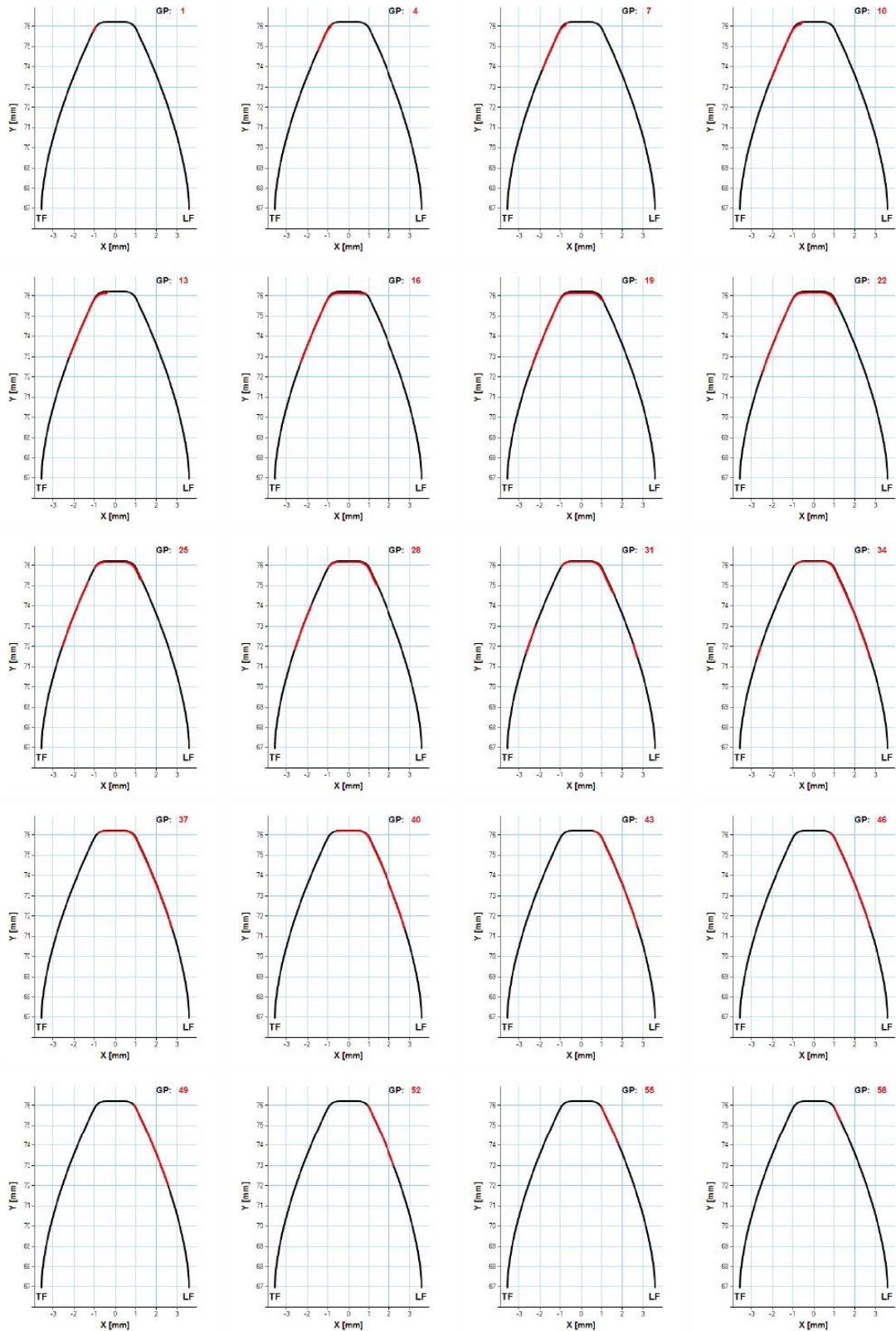
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

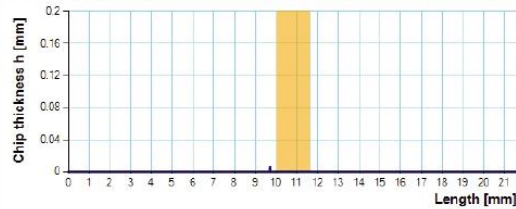
Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	5 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

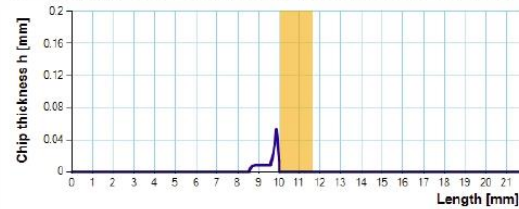


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

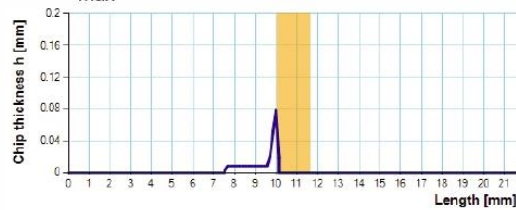
GP 1, h_{\max} : 0.0058 mm, Section area: 0.0008 mm²



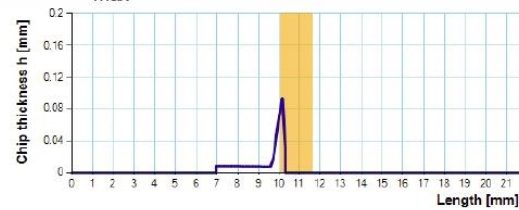
GP 4, h_{\max} : 0.0524 mm, Section area: 0.0204 mm²



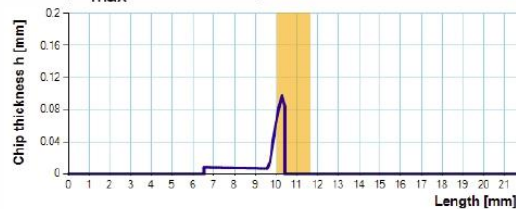
GP 7, h_{\max} : 0.0782 mm, Section area: 0.0394 mm²



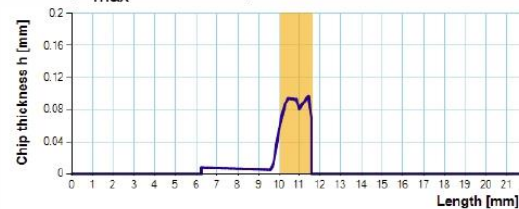
GP 10, h_{\max} : 0.0919 mm, Section area: 0.0557 mm²



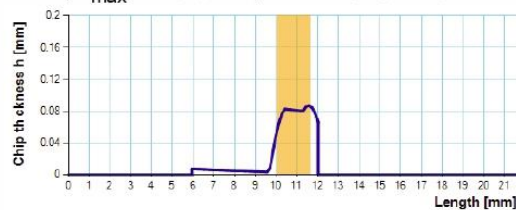
GP 13, h_{\max} : 0.0977 mm, Section area: 0.0739 mm²



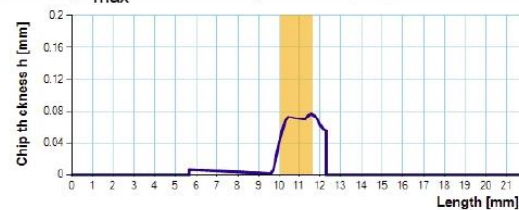
GP 16, h_{\max} : 0.097 mm, Section area: 0.1722 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.0878 mm, Section area: 0.1857 mm²



GP 22, h_{\max} : 0.0771 mm, Section area: 0.1767 mm²



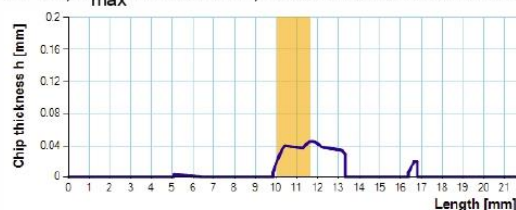
GP 25, h_{\max} : 0.0659 mm, Section area: 0.1615 mm²



GP 28, h_{\max} : 0.0554 mm, Section area: 0.1452 mm²



GP 31, h_{\max} : 0.0454 mm, Section area: 0.1382 mm²



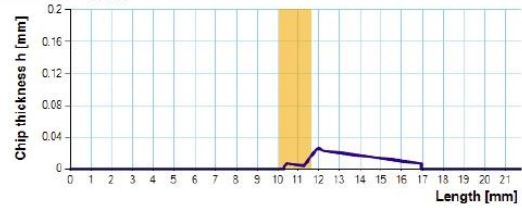
GP 34, h_{\max} : 0.0377 mm, Section area: 0.1608 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.0312 mm, Section area: 0.133 mm²



GP 40, h_{\max} : 0.0259 mm, Section area: 0.0924 mm²



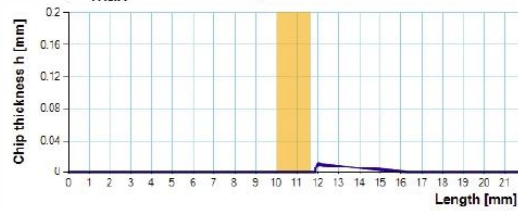
GP 43, h_{\max} : 0.0209 mm, Section area: 0.0617 mm²



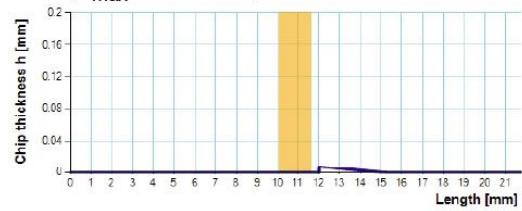
GP 46, h_{\max} : 0.0163 mm, Section area: 0.0412 mm²



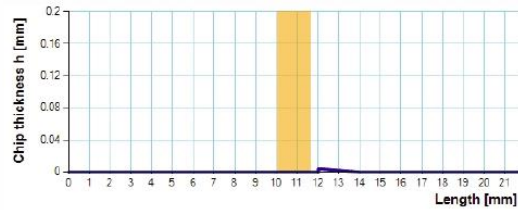
GP 49, h_{\max} : 0.0113 mm, Section area: 0.0241 mm²



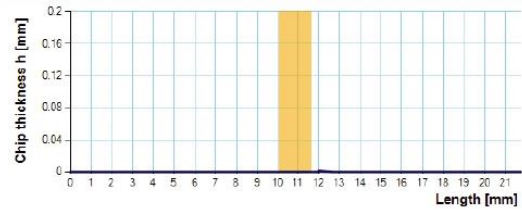
GP 52, h_{\max} : 0.0072 mm, Section area: 0.0118 mm²



GP 55, h_{\max} : 0.0037 mm, Section area: 0.0041 mm²

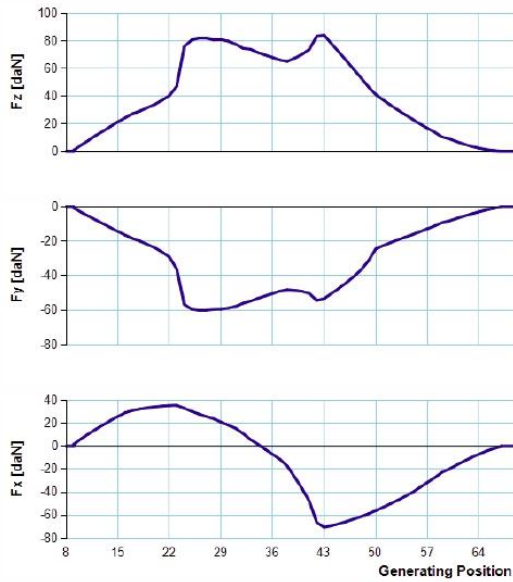


GP 58, h_{\max} : 0.0012 mm, Section area: 0.0004 mm²

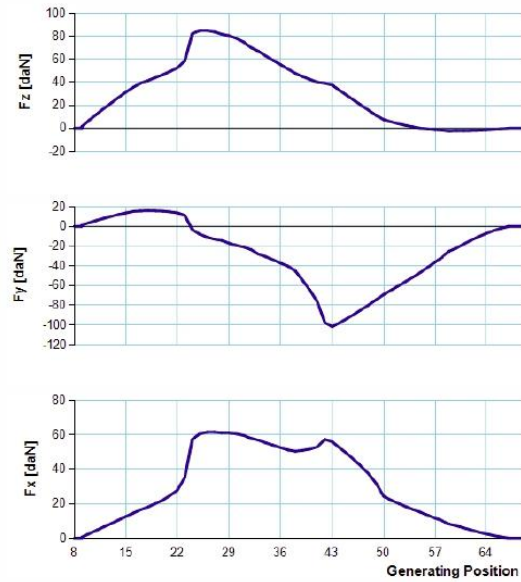


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

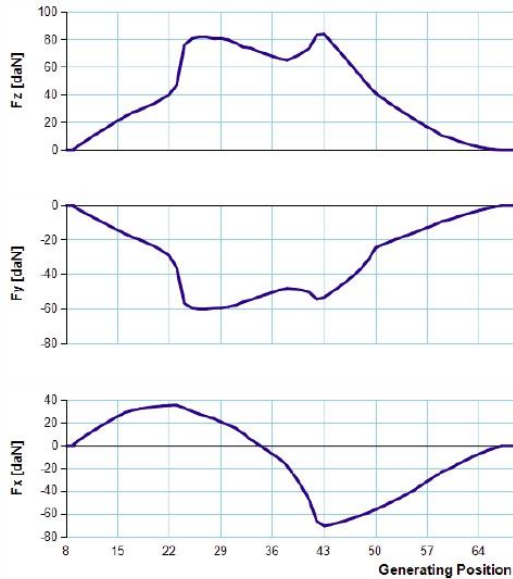
System 1



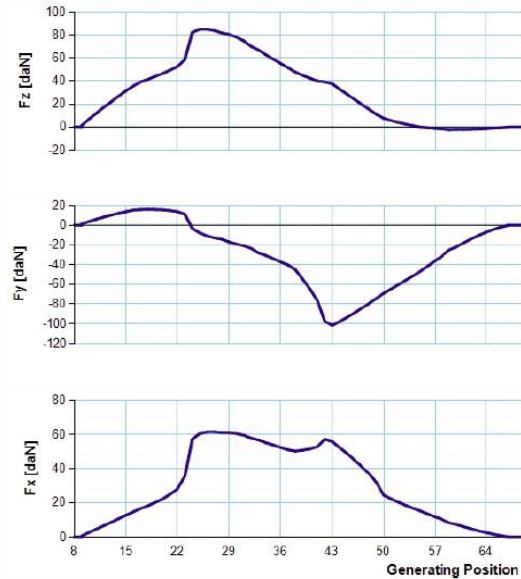
System 3



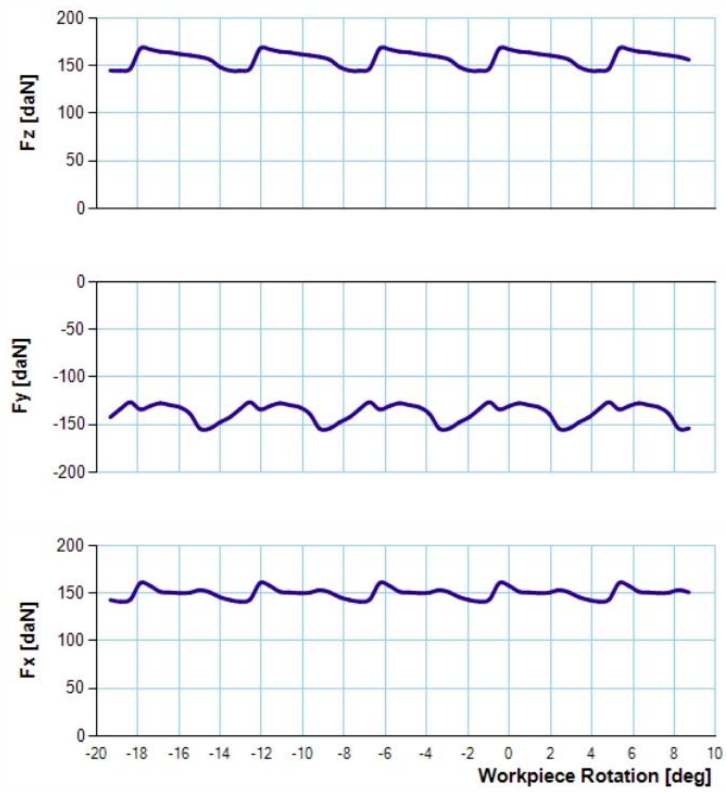
System 2



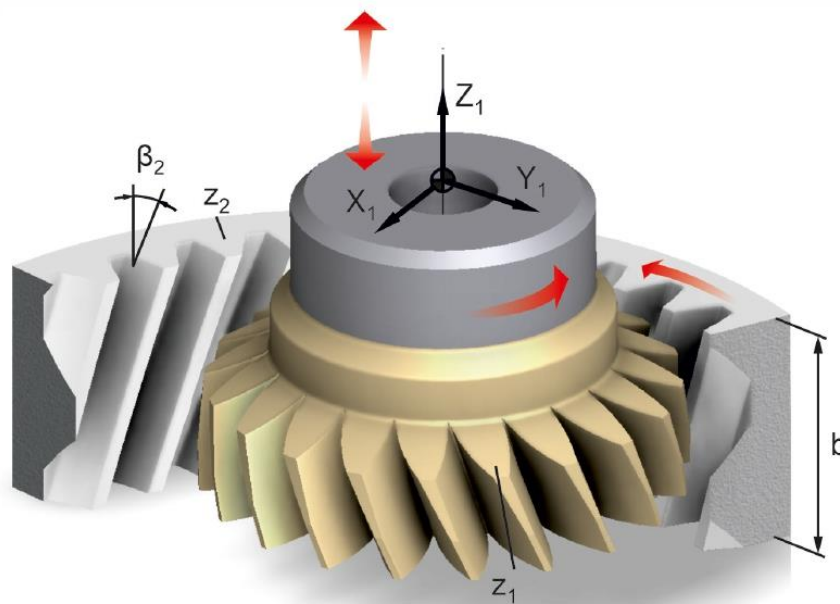
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



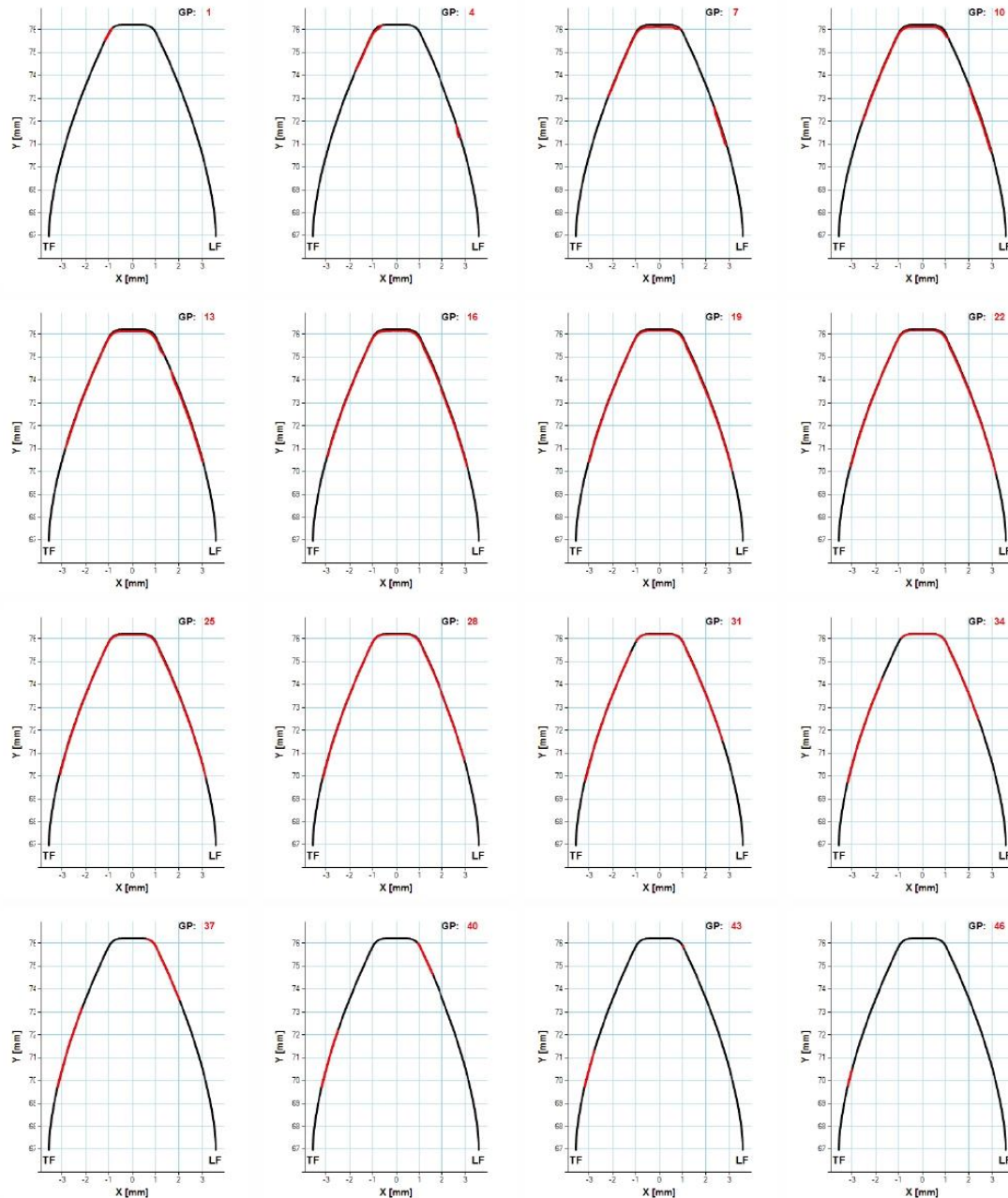
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

Normal module (m_n):	3 mm	Gear number of teeth (z_2):	63
Tool number of teeth (z_1):	42	Gear helix angle (β_2):	30 deg
Tool helix angle (β_1):	30 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	20 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	6.75 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

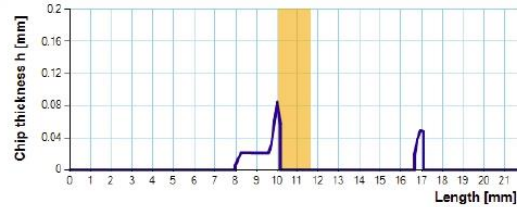


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

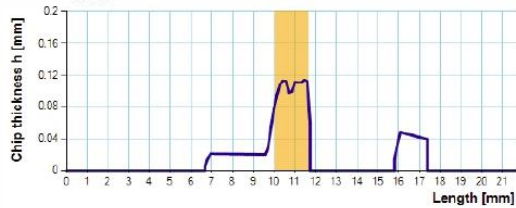
GP 1, h_{\max} : 0.0232 mm, Section area: 0.0084 mm²



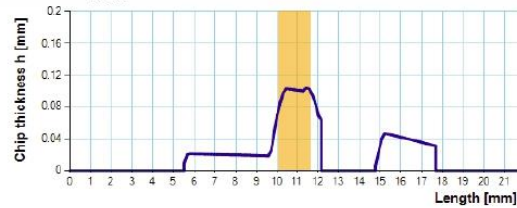
GP 4, h_{\max} : 0.0844 mm, Section area: 0.0841 mm²



GP 7, h_{\max} : 0.114 mm, Section area: 0.3227 mm²



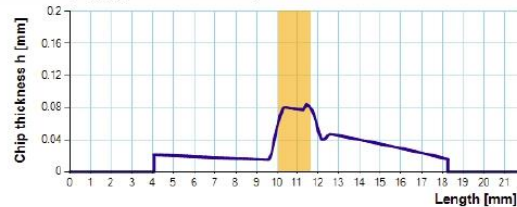
GP 10, h_{\max} : 0.1034 mm, Section area: 0.4079 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.0921 mm, Section area: 0.4668 mm²



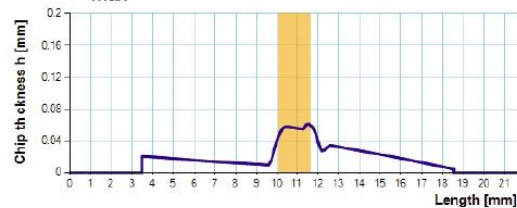
GP 16, h_{\max} : 0.0836 mm, Section area: 0.4701 mm²



GP 19, h_{\max} : 0.0723 mm, Section area: 0.406 mm²



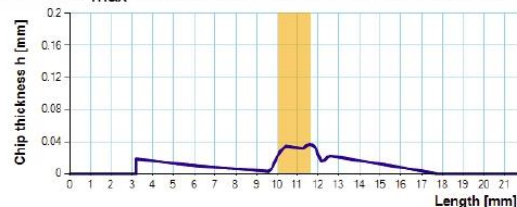
GP 22, h_{\max} : 0.0602 mm, Section area: 0.3432 mm²



GP 25, h_{\max} : 0.0492 mm, Section area: 0.2707 mm²



GP 28, h_{\max} : 0.0363 mm, Section area: 0.2026 mm²



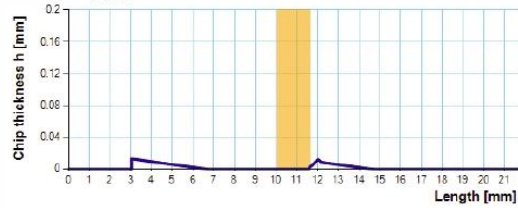
GP 31, h_{\max} : 0.0232 mm, Section area: 0.1349 mm²



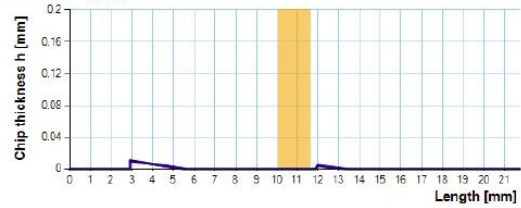
GP 34, h_{\max} : 0.015 mm, Section area: 0.0802 mm²



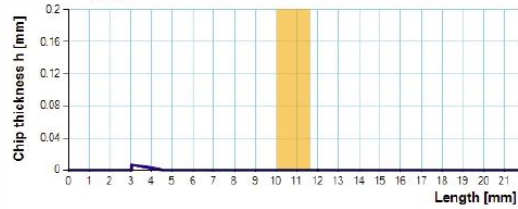
GP 37, h_{\max} : 0.0126 mm, Section area: 0.0391 mm²



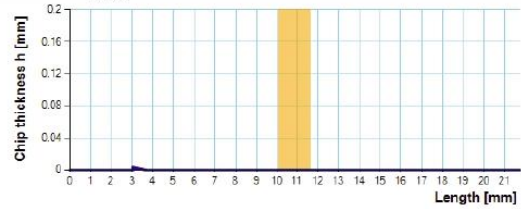
GP 40, h_{\max} : 0.0104 mm, Section area: 0.0173 mm²



GP 43, h_{\max} : 0.0067 mm, Section area: 0.0061 mm²

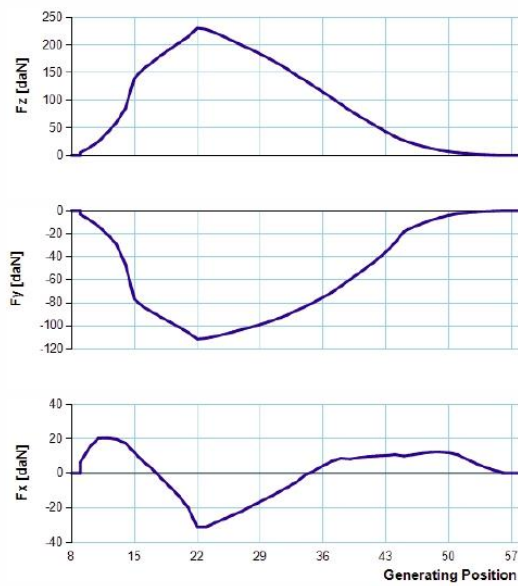


GP 46, h_{\max} : 0.0033 mm, Section area: 0.0013 mm²

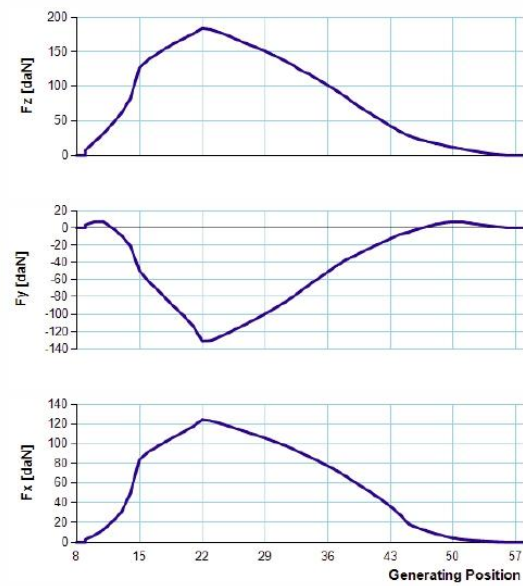


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

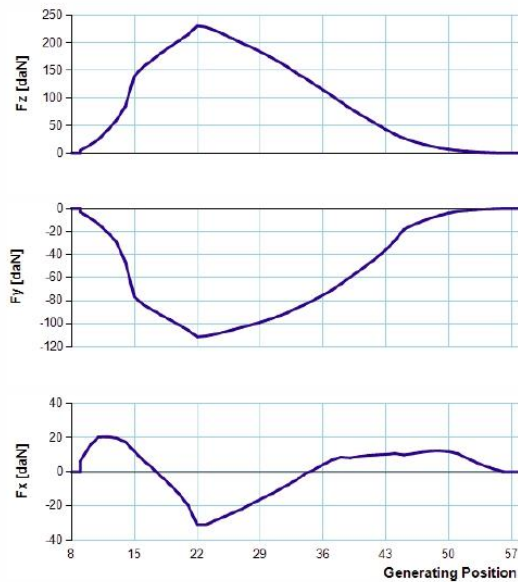
System 1



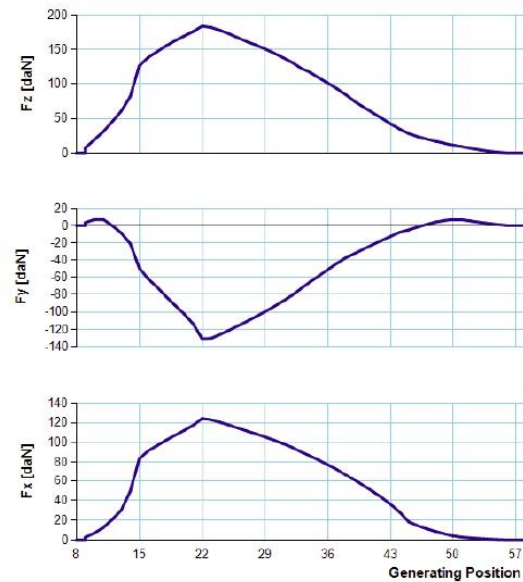
System 3



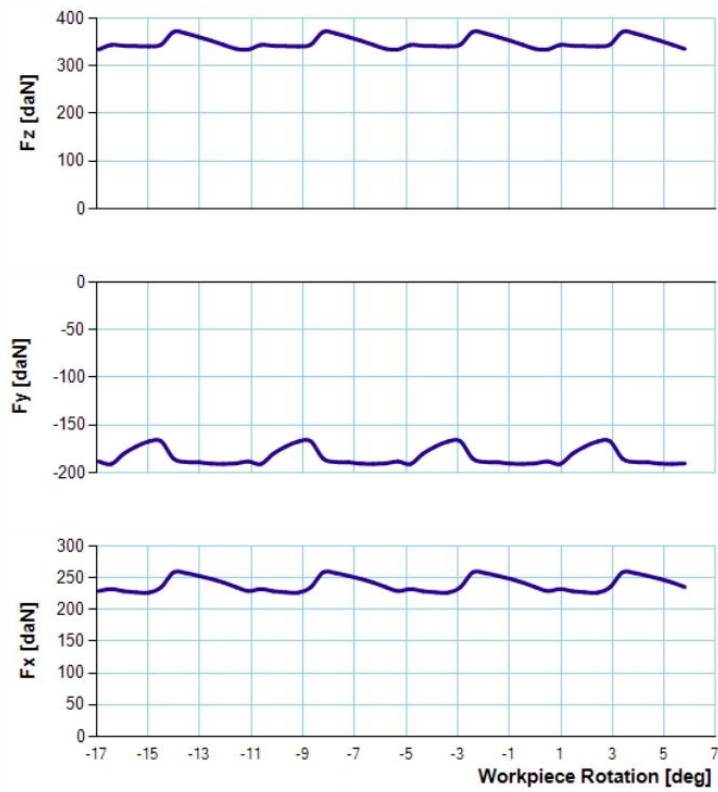
System 2



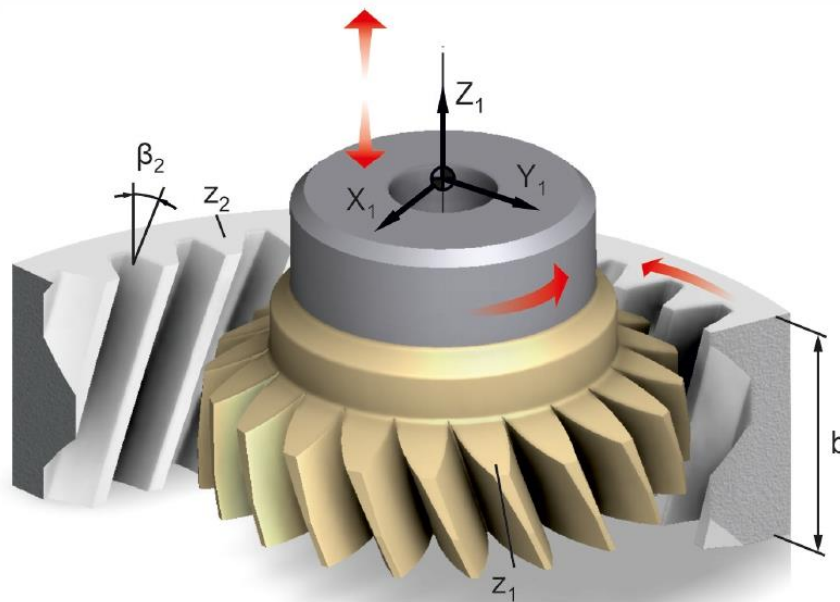
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



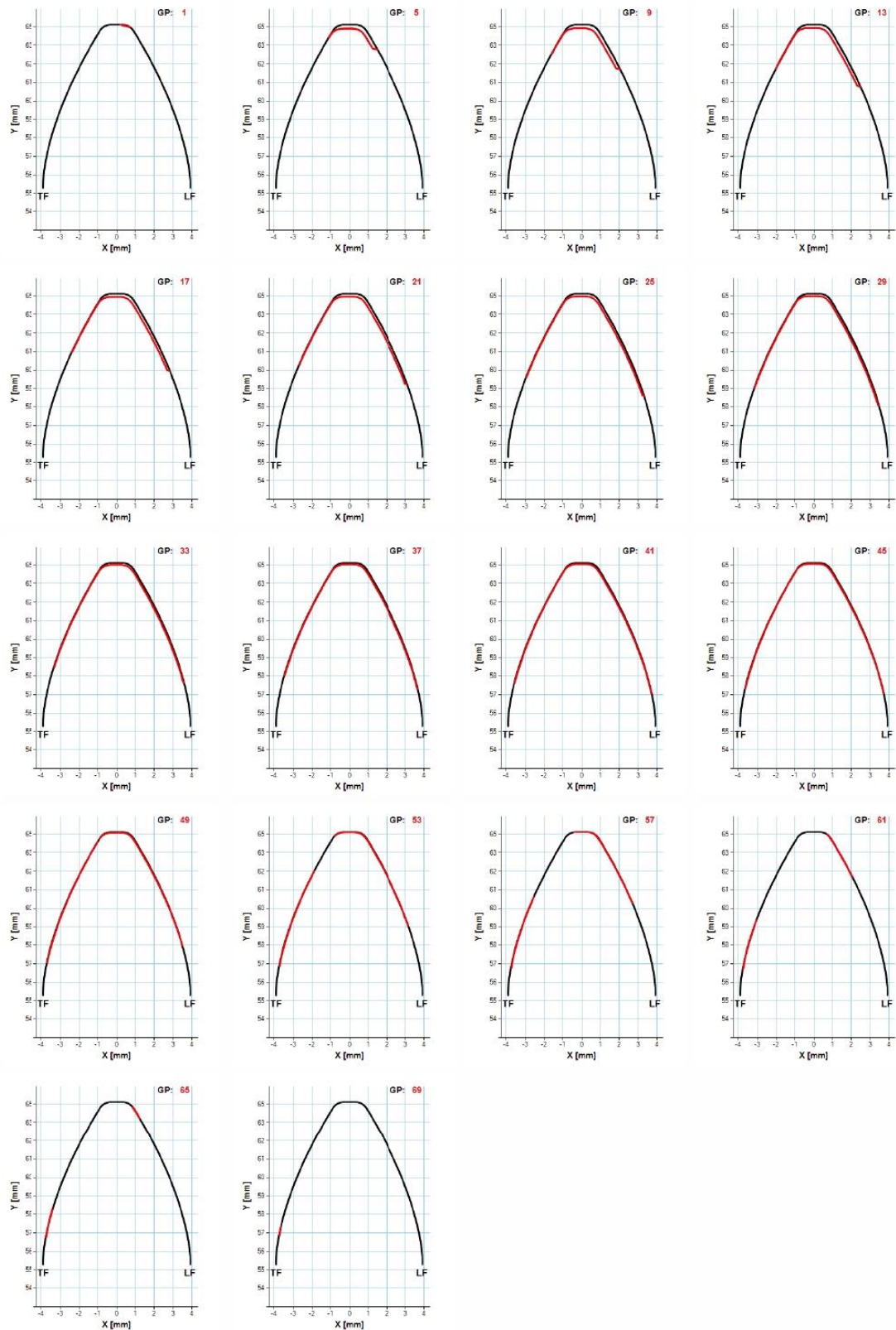
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

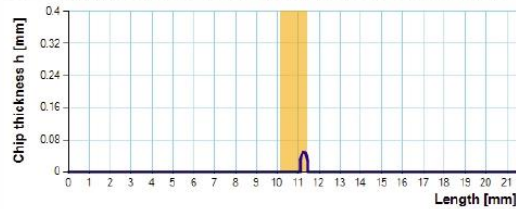
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	15 deg
Tool helix angle (β_1):	15 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

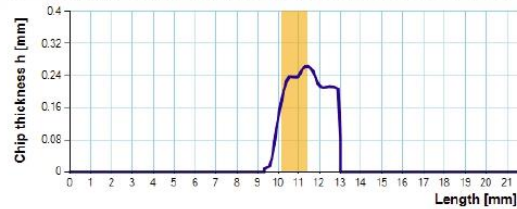


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

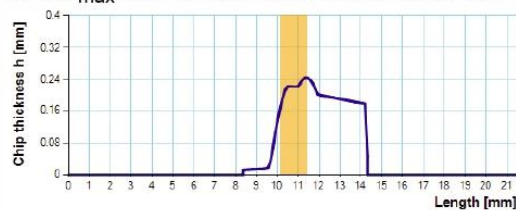
GP 1, h_{\max} : 0.0494 mm, Section area: 0.0178 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.2634 mm, Section area: 0.6554 mm²



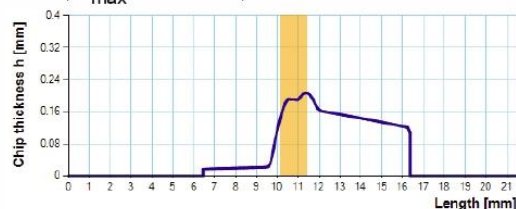
GP 9, h_{\max} : 0.2449 mm, Section area: 0.8657 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.226 mm, Section area: 0.9877 mm²



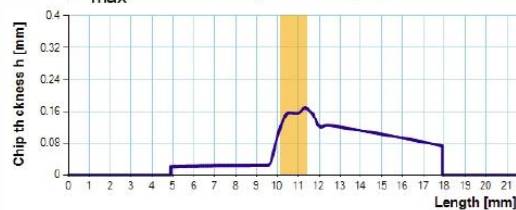
GP 17, h_{\max} : 0.207 mm, Section area: 1.0457 mm²



GP 21, h_{\max} : 0.1876 mm, Section area: 1.0484 mm²



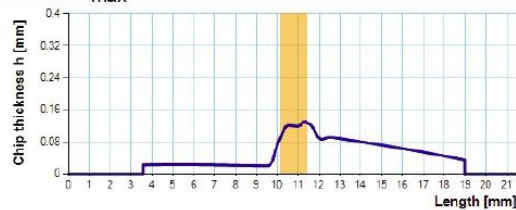
GP 25, h_{\max} : 0.1698 mm, Section area: 1.0061 mm²



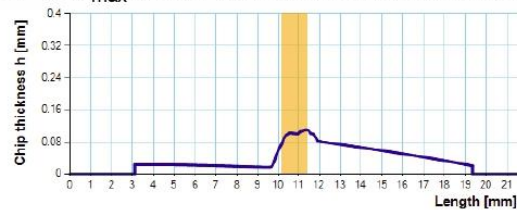
GP 29, h_{\max} : 0.1486 mm, Section area: 0.9346 mm²



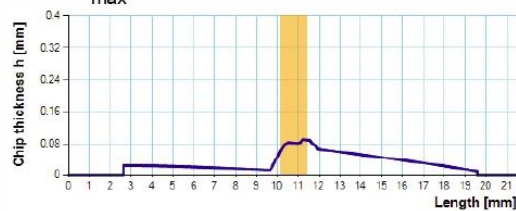
GP 33, h_{\max} : 0.1304 mm, Section area: 0.8367 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.1104 mm, Section area: 0.7263 mm²



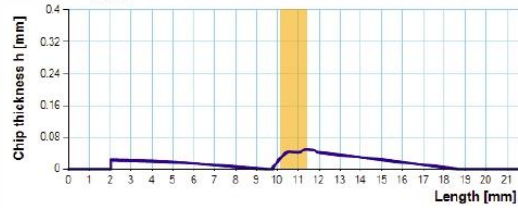
GP 41, h_{\max} : 0.0908 mm, Section area: 0.5988 mm²



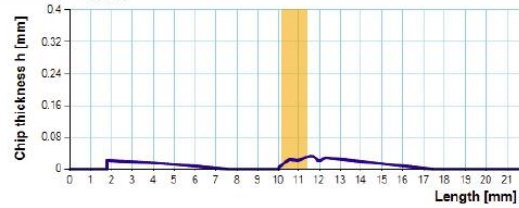
GP 45, h_{\max} : 0.0713 mm, Section area: 0.4663 mm²



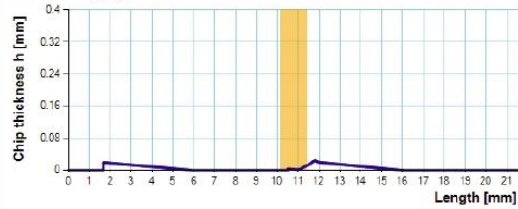
GP 49, h_{\max} : 0.0492 mm, Section area: 0.3293 mm²



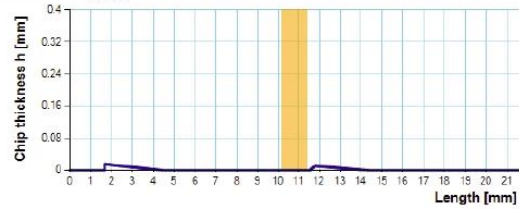
GP 53, h_{\max} : 0.0323 mm, Section area: 0.1982 mm²



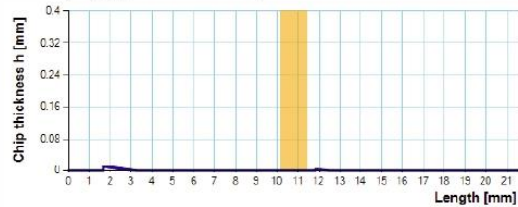
GP 57, h_{\max} : 0.0239 mm, Section area: 0.0972 mm²



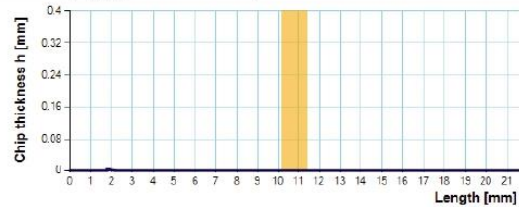
GP 61, h_{\max} : 0.0153 mm, Section area: 0.0388 mm²



GP 65, h_{\max} : 0.0103 mm, Section area: 0.0097 mm²

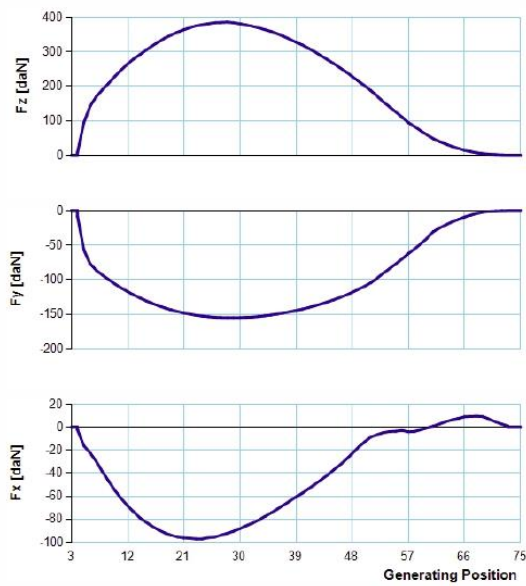


GP 69, h_{\max} : 0.0032 mm, Section area: 0.0009 mm²

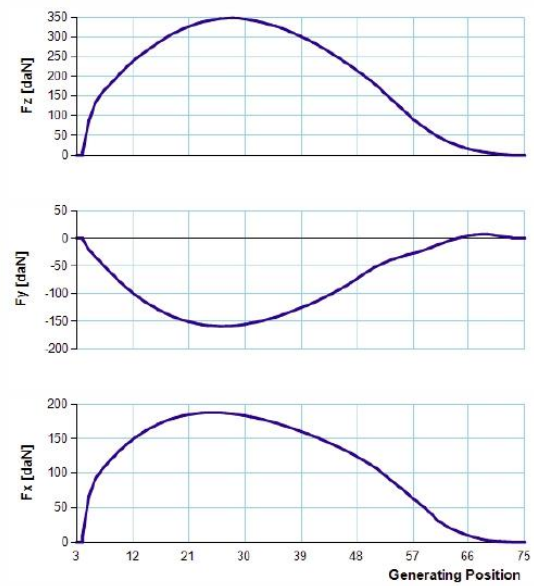


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

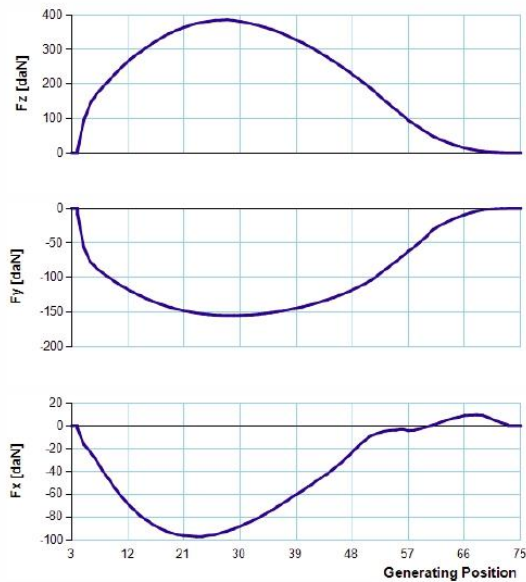
System 1



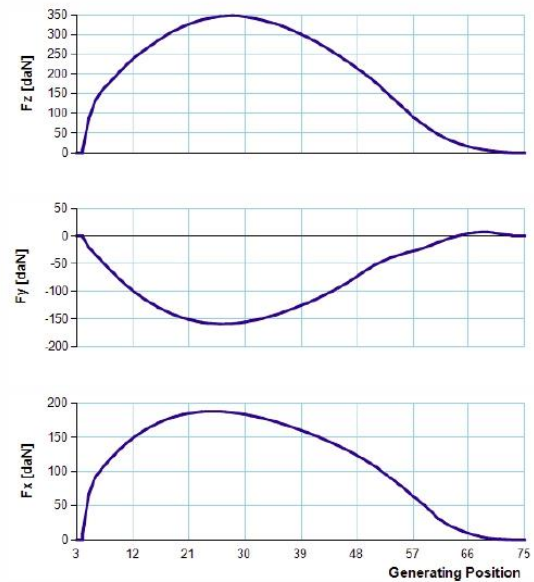
System 3



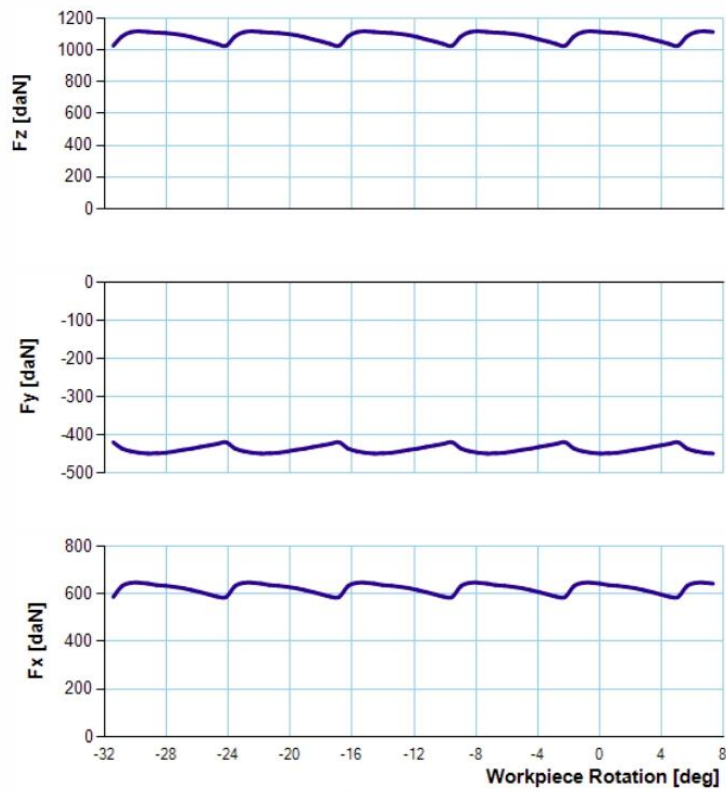
System 2



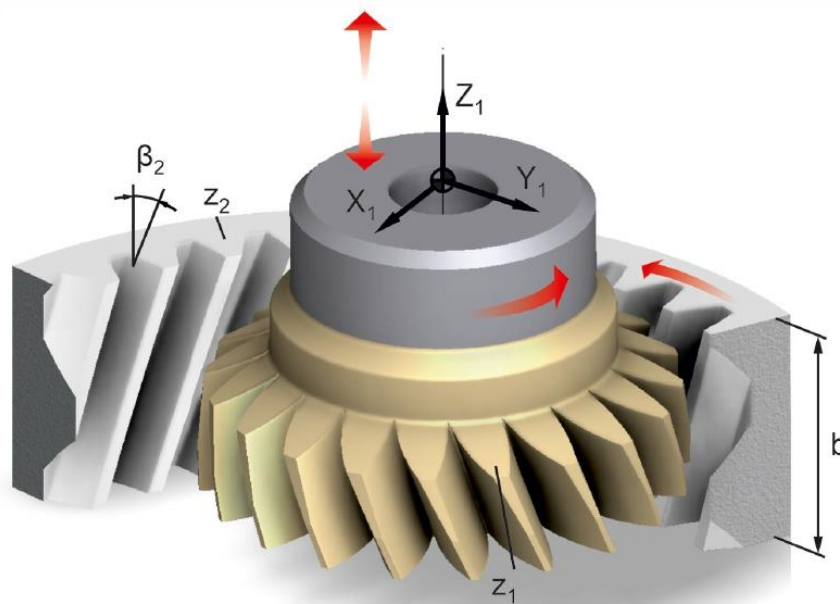
System 4



GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



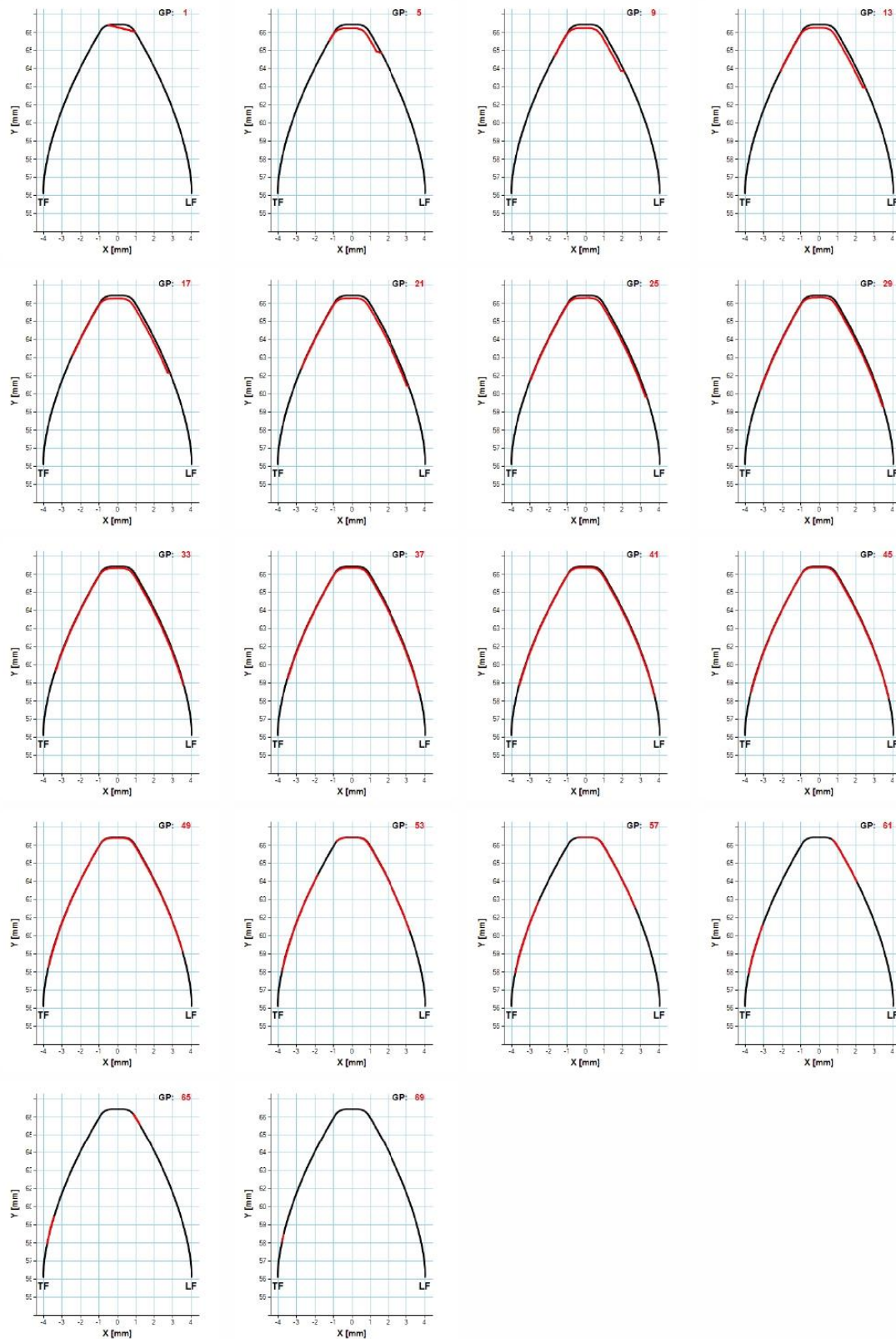
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

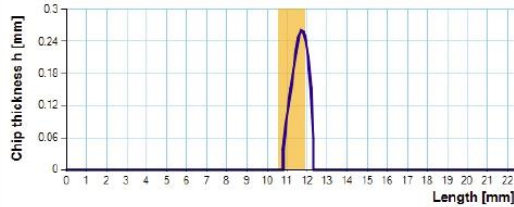
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	20 deg
Tool helix angle (β_1):	20 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2

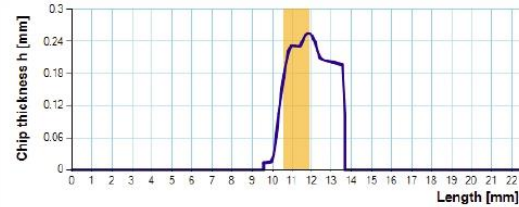


CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

GP 1, h_{\max} : 0.2605 mm, Section area: 0.2473 mm²



GP 5, h_{\max} : 0.2551 mm, Section area: 0.6906 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.2371 mm, Section area: 0.8712 mm²



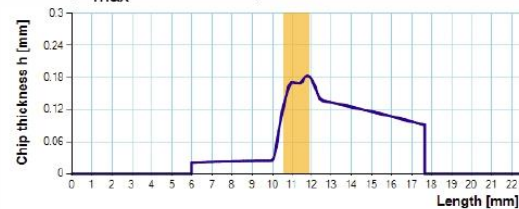
GP 13, h_{\max} : 0.2196 mm, Section area: 0.9826 mm²



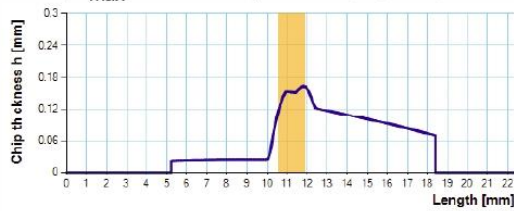
GP 17, h_{\max} : 0.2013 mm, Section area: 1.0314 mm²



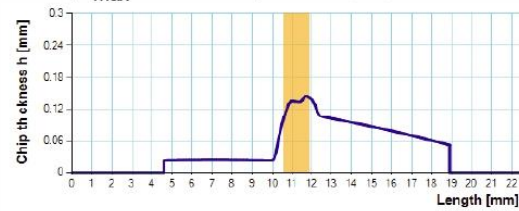
GP 21, h_{\max} : 0.1832 mm, Section area: 1.0299 mm²



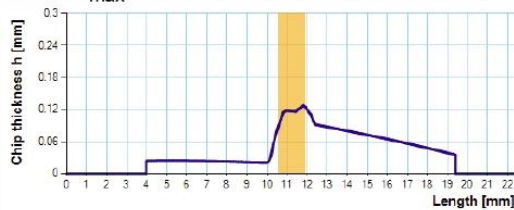
GP 25, h_{\max} : 0.1633 mm, Section area: 0.9892 mm²



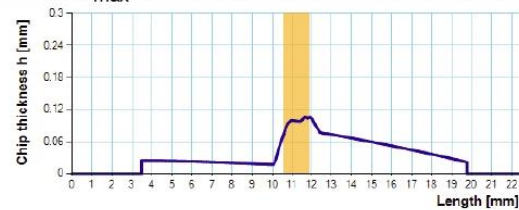
GP 29, h_{\max} : 0.1449 mm, Section area: 0.9176 mm²



GP 33, h_{\max} : 0.127 mm, Section area: 0.8239 mm²



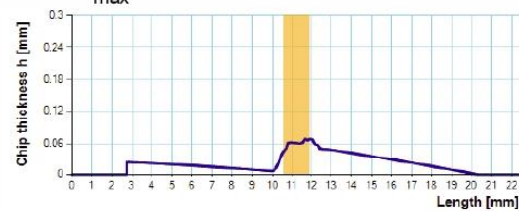
GP 37, h_{\max} : 0.1068 mm, Section area: 0.7115 mm²



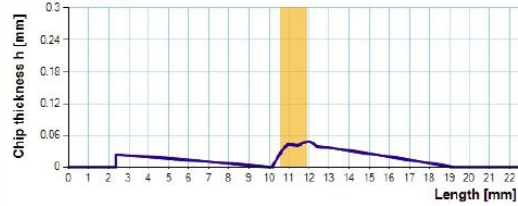
GP 41, h_{\max} : 0.089 mm, Section area: 0.5871 mm²



GP 45, h_{\max} : 0.069 mm, Section area: 0.4535 mm²



GP 49, h_{\max} : 0.0476 mm, Section area: 0.3132 mm²



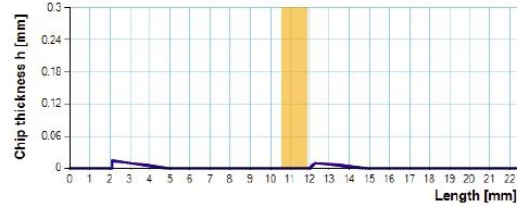
GP 53, h_{\max} : 0.0315 mm, Section area: 0.1911 mm²



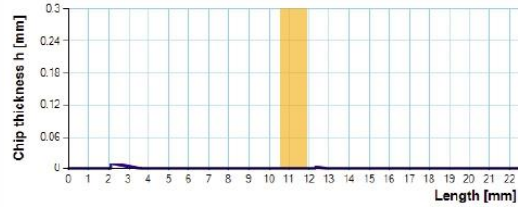
GP 57, h_{\max} : 0.0207 mm, Section area: 0.0927 mm²



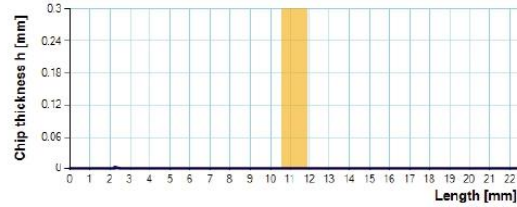
GP 61, h_{\max} : 0.0143 mm, Section area: 0.0356 mm²



GP 65, h_{\max} : 0.0091 mm, Section area: 0.0082 mm²

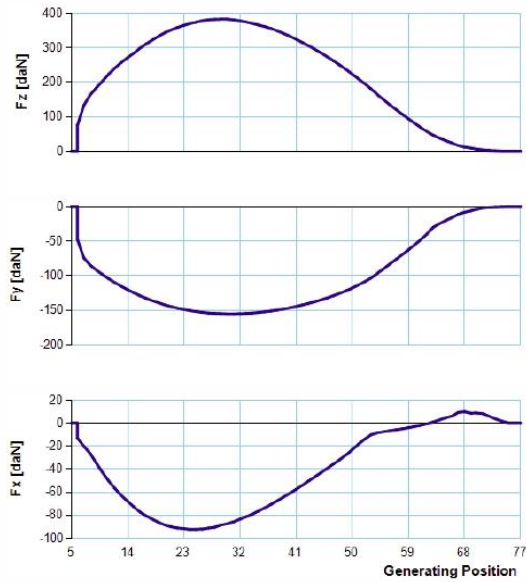


GP 69, h_{\max} : 0.002 mm, Section area: 0.0005 mm²

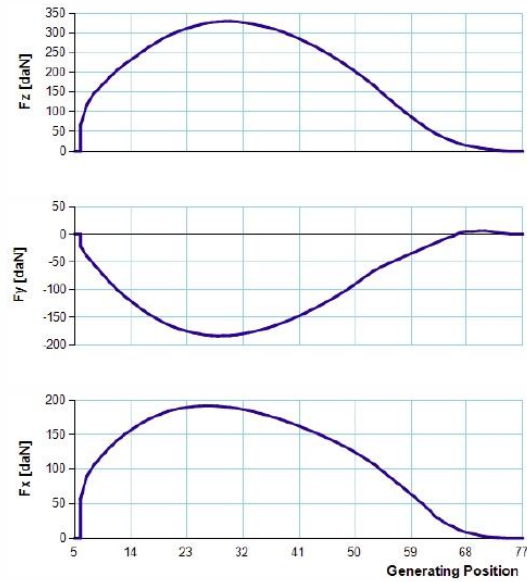


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

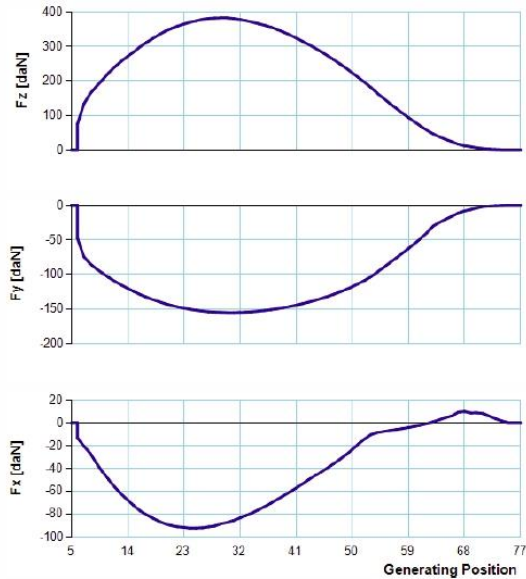
System 1



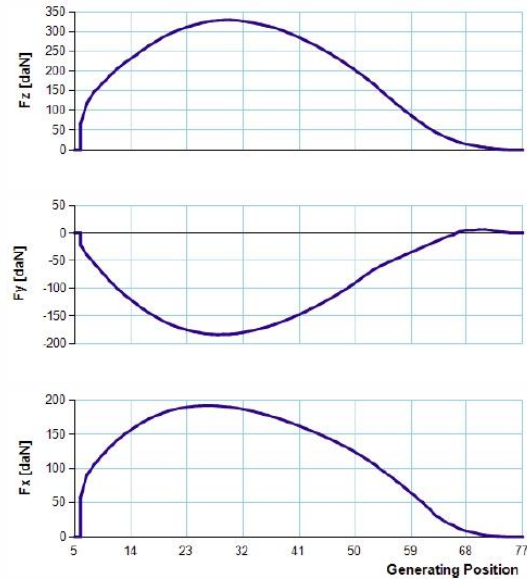
System 3

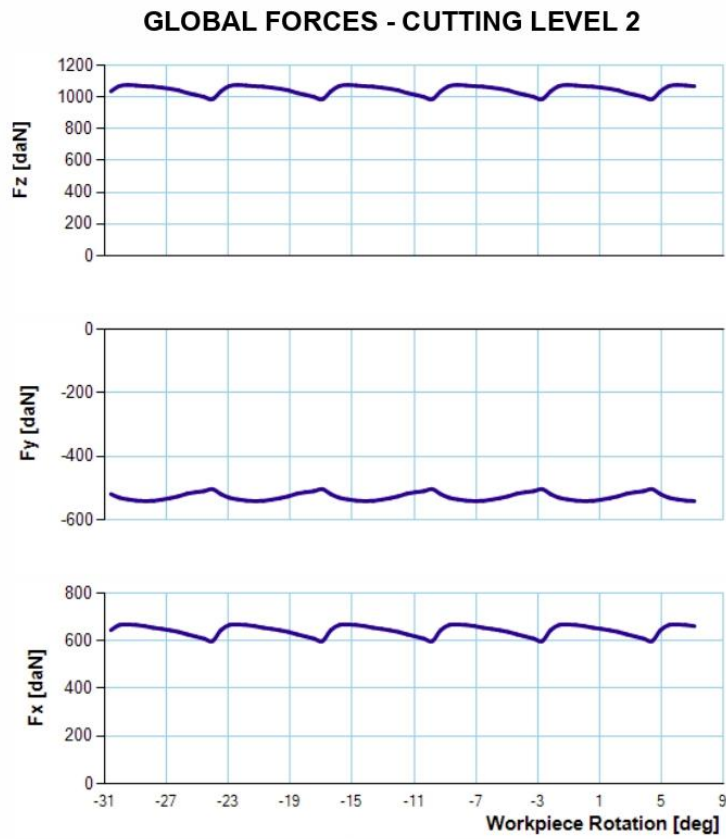


System 2

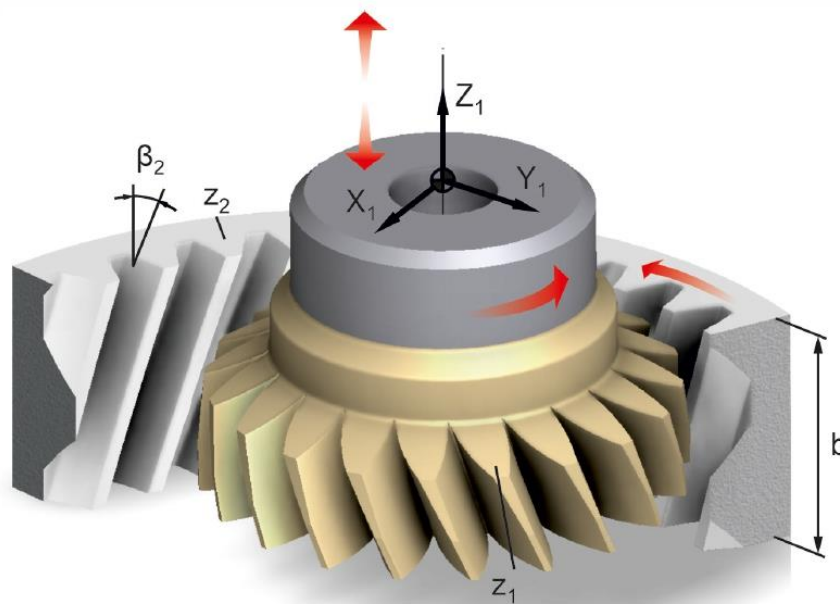


System 4





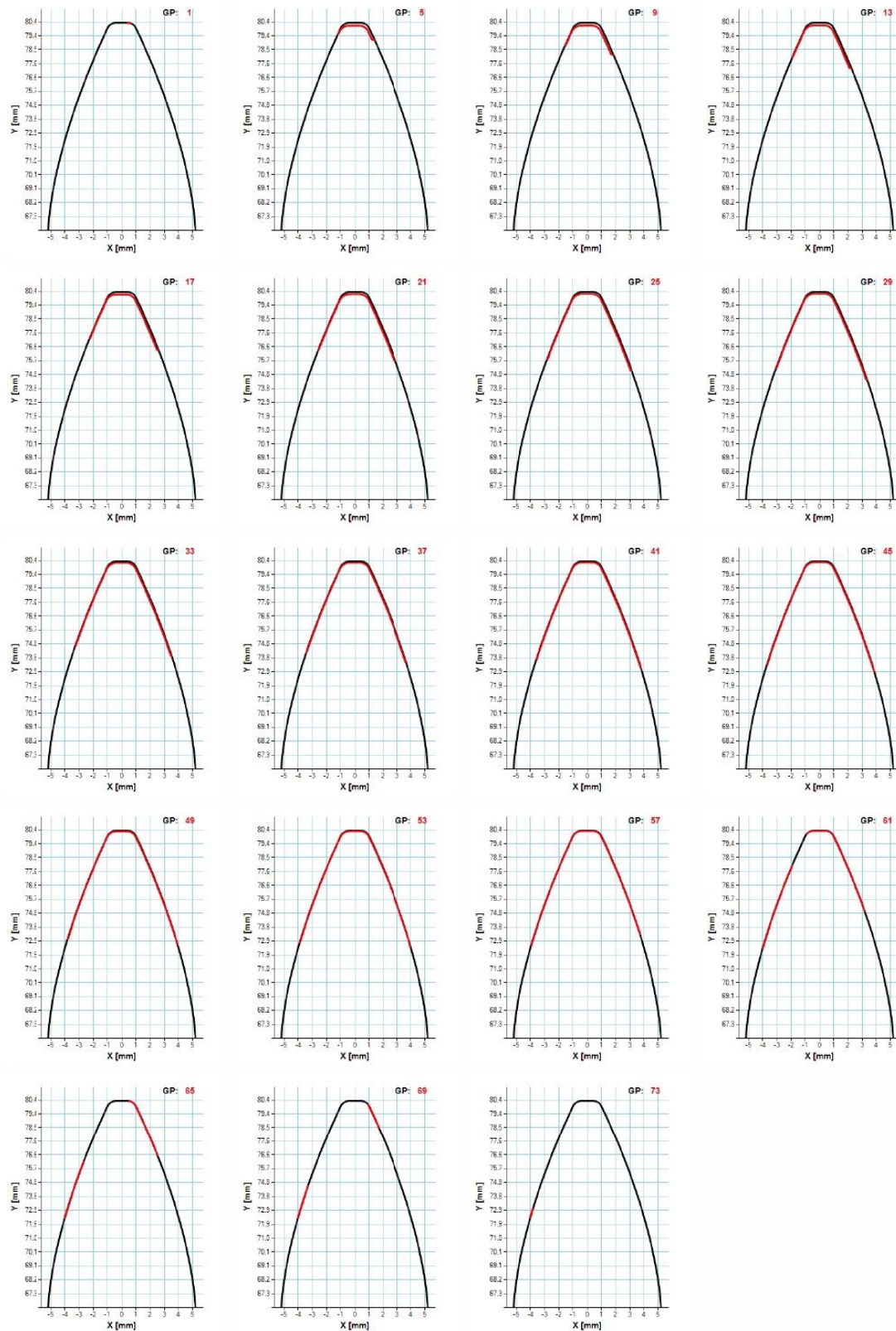
Gear Shaping Simulation



CASE DATA

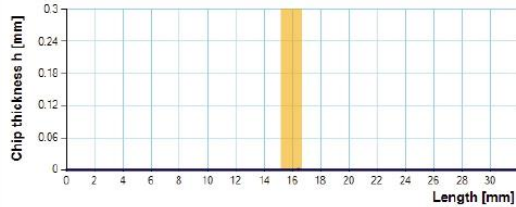
Normal module (m_n):	3.629 mm	Gear number of teeth (z_2):	50
Tool number of teeth (z_1):	32	Gear helix angle (β_2):	40 deg
Tool helix angle (β_1):	40 deg	Gear profile shift (x_2):	0
Normal pressure angle (α):	22.5 deg	Gear material:	Ck45N
Tool rake angle (γ):	0 deg	Gear width (b):	30 mm
Tool profile shift (x_1):	0	Cutting speed (v):	110 m/min
Tool material:	HMP50	Feed (s):	0.92 mm/DS
Cutting depth (T):	7.9 mm		

CHIP CROSS SECTIONS - CUTTING LEVEL 2



CHIP THICKNESS CHARTS - CUTTING LEVEL 2

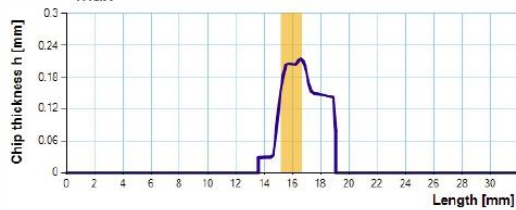
GP 1, h_{\max} : 0.0009 mm, Section area: 0.0001 mm²



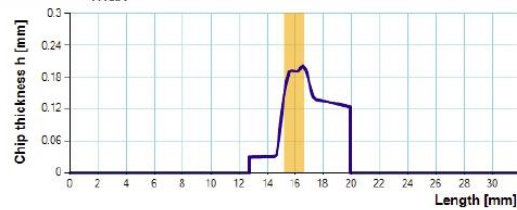
GP 5, h_{\max} : 0.2294 mm, Section area: 0.5603 mm²



GP 9, h_{\max} : 0.2153 mm, Section area: 0.7158 mm²



GP 13, h_{\max} : 0.2016 mm, Section area: 0.8268 mm²



GP 17, h_{\max} : 0.1871 mm, Section area: 0.8921 mm²



GP 21, h_{\max} : 0.173 mm, Section area: 0.9167 mm²



GP 25, h_{\max} : 0.1582 mm, Section area: 0.9157 mm²



GP 29, h_{\max} : 0.1435 mm, Section area: 0.8865 mm²



GP 33, h_{\max} : 0.1289 mm, Section area: 0.8297 mm²



GP 37, h_{\max} : 0.1136 mm, Section area: 0.7647 mm²



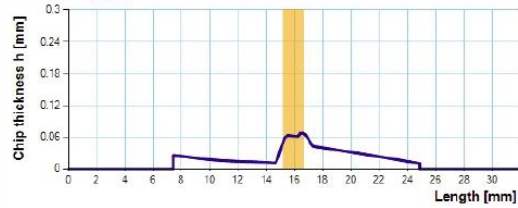
GP 41, h_{\max} : 0.0969 mm, Section area: 0.6792 mm²



GP 45, h_{\max} : 0.0797 mm, Section area: 0.576 mm²



GP 49, h_{\max} : 0.0674 mm, Section area: 0.4691 mm²



GP 53, h_{\max} : 0.053 mm, Section area: 0.3498 mm²



GP 57, h_{\max} : 0.0352 mm, Section area: 0.2269 mm²



GP 61, h_{\max} : 0.022 mm, Section area: 0.127 mm²



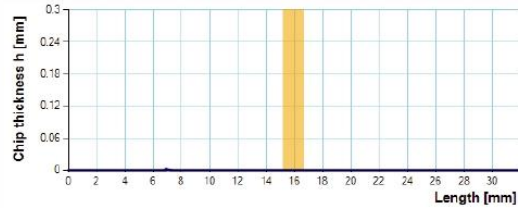
GP 65, h_{\max} : 0.0137 mm, Section area: 0.05 mm²



GP 69, h_{\max} : 0.0079 mm, Section area: 0.0114 mm²

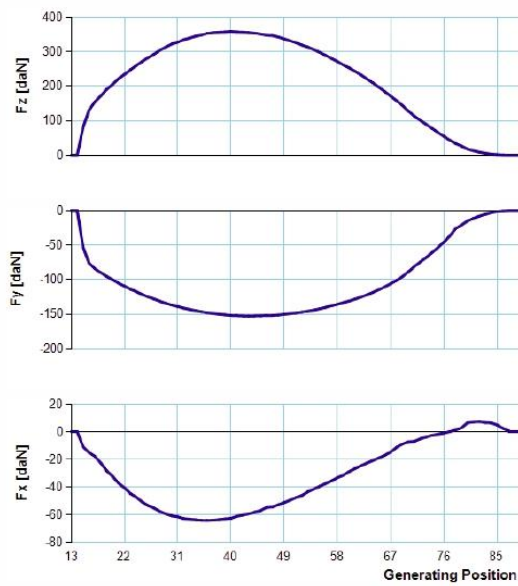


GP 73, h_{\max} : 0.0017 mm, Section area: 0.0007 mm²

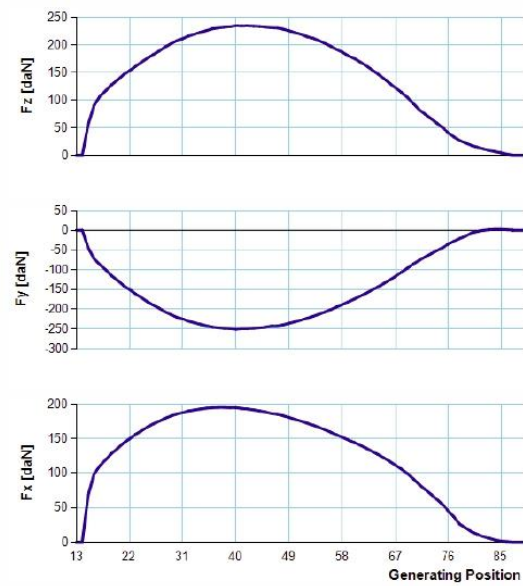


SINGLE GAP FORCES - CUTTING LEVEL 2

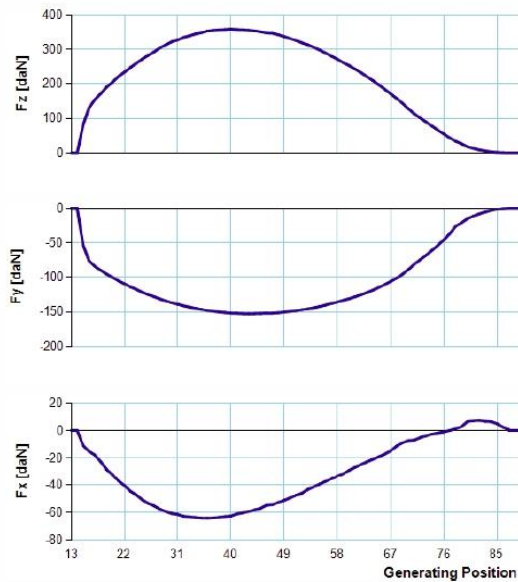
System 1



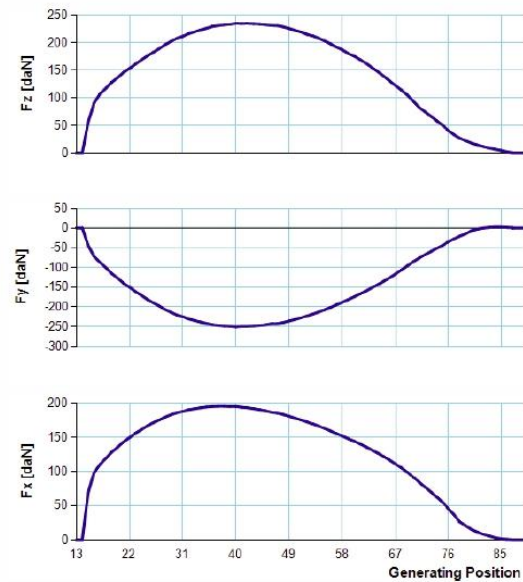
System 3



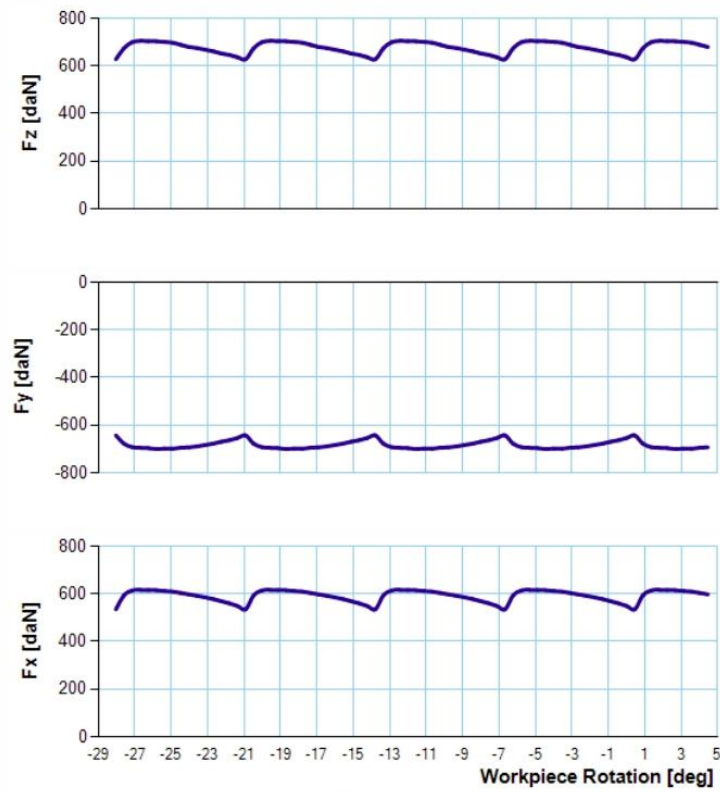
System 2



System 4



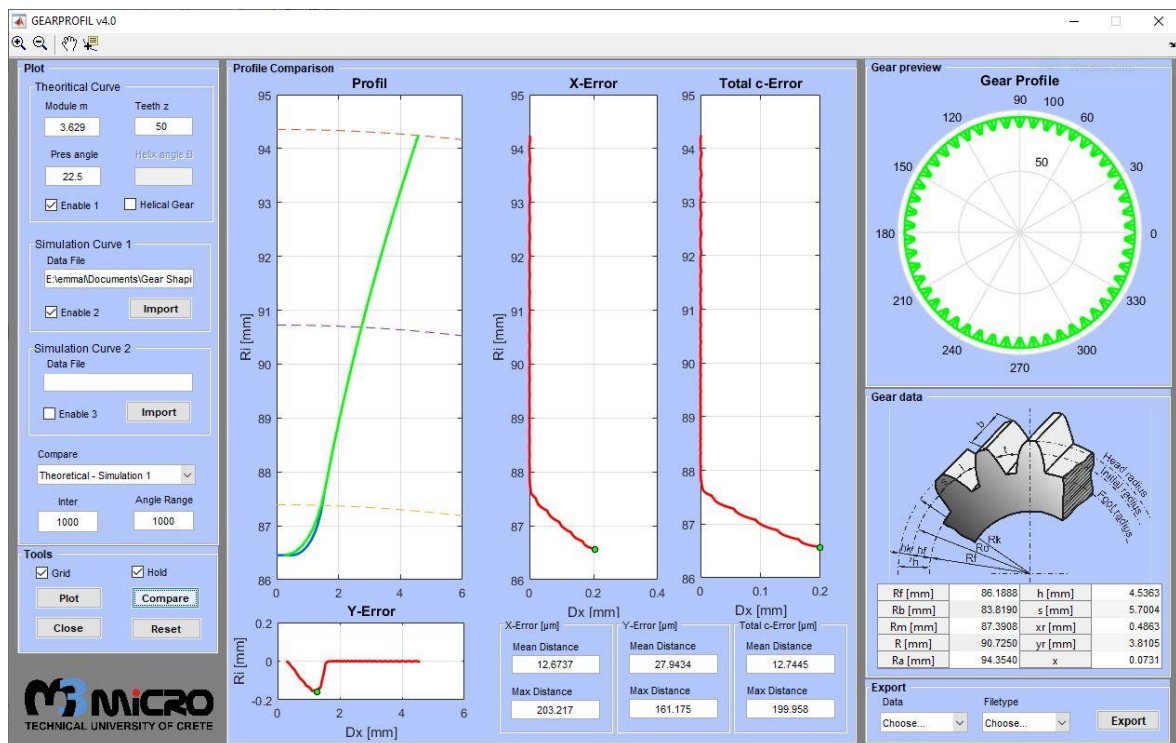
GLOBAL FORCES - CUTTING LEVEL 2



4.2 Επαλήθευση παραγόμενου αυλακιού

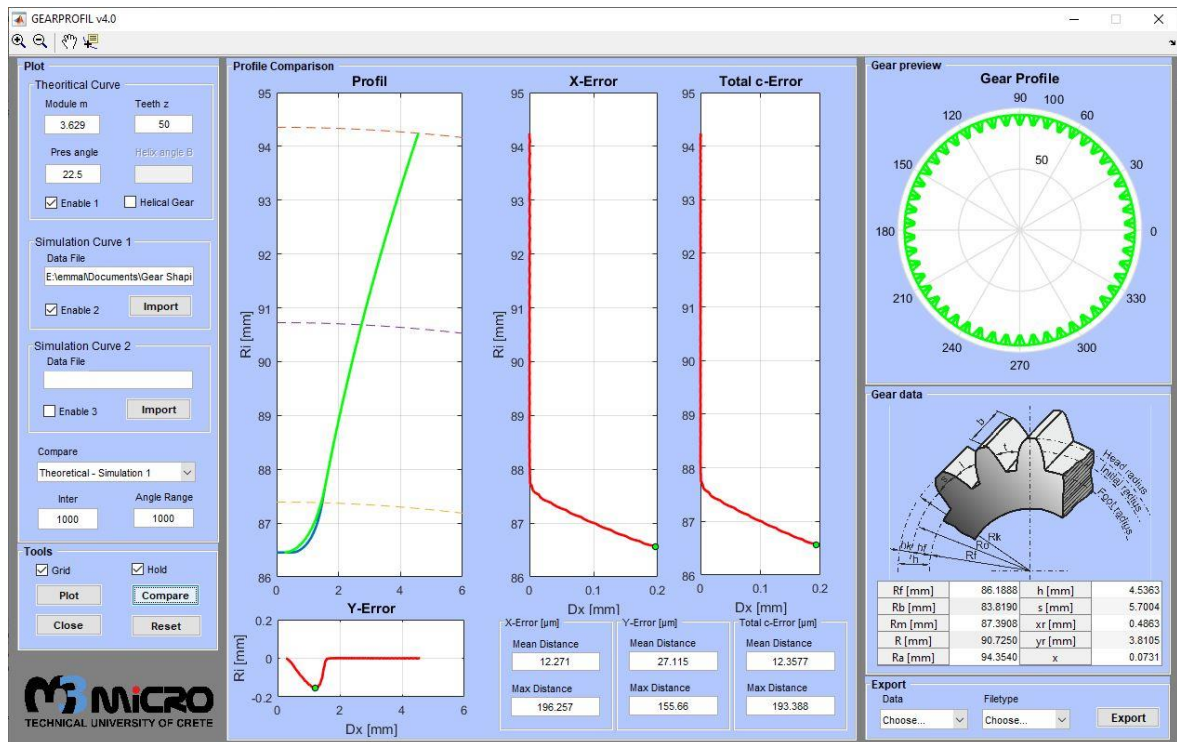
Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του προσομοιωτικού μοντέλου, είναι γίνεται έλεγχος των παραγόμενων παρειών εξελιγμένης που σχηματίζονται στο αυλάκι που προκύπτει από το προσομοιωτικό μοντέλο. Σε αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ της εξελιγμένης παρειάς που παράγεται από το μοντέλο με την αντίστοιχη θεωρητική παρειά. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει μετρήσεις της ποιότητας των οδοντωτών τροχών που δημιουργήθηκαν με το μοντέλο προσομοίωσης που δημιουργήθηκε όπως περιγράφεται στην Ενότητα 3.7. Στα αριστερά της φόρμας συμπλήρωσης, ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία του οδοντωτού τροχού που θα εξετασθεί. Το λογισμικό καλύπτει περιπτώσεις ευθείας και πλάγιας οδόντωσης μόνο για περιπτώσεις εξωτερικών οδοντωτών τροχών. Τα Case 4, 5, 6, αποτελούν μία περίπτωση κατεργασίας οδοντωτού τροχού, που εκτελείται σε τρία διαφορετικά βάθη κοπής. Επομένως το παραγόμενο αυλάκι ελέγχεται μόνο στο τρίτο στάδιο, δηλαδή για το Case 6. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά, καθώς η μέση διαφορά είναι ιδιαίτερα μικρή σε όλες τις περιπτώσεις.

4.2.1 Ευθεία οδόντωση [EX – SP]

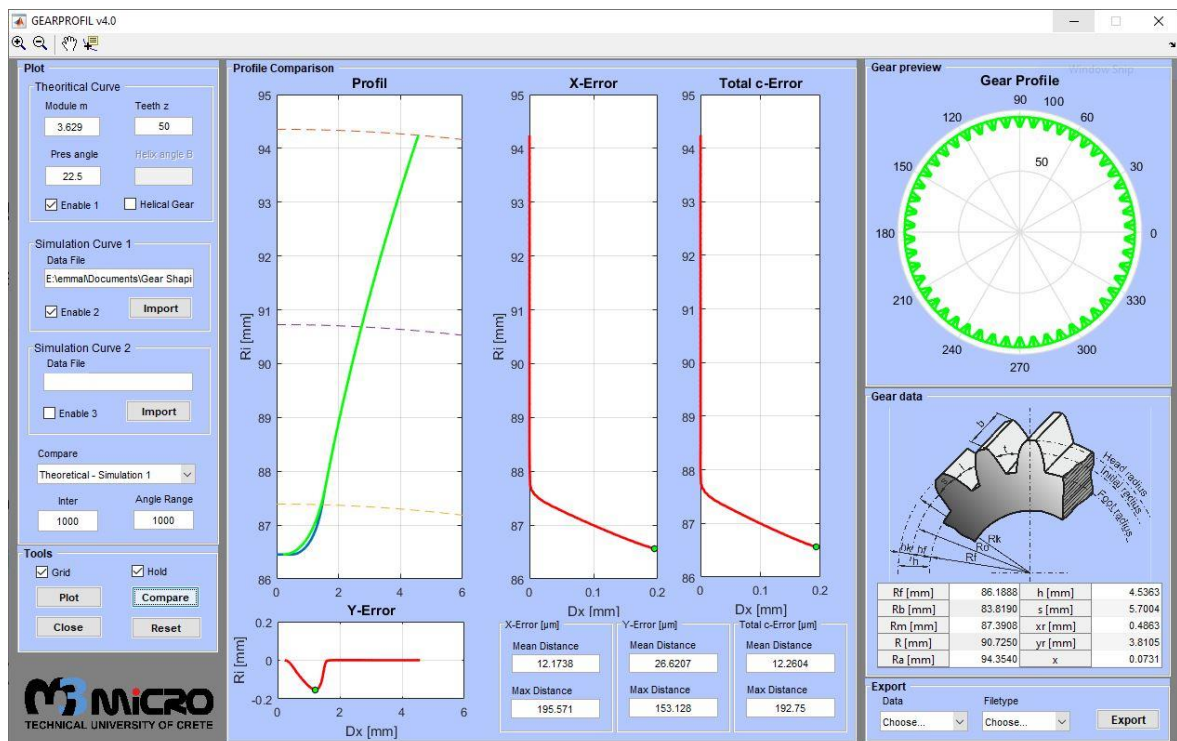


Σχήμα 4.1: EX – SP “Case 1”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

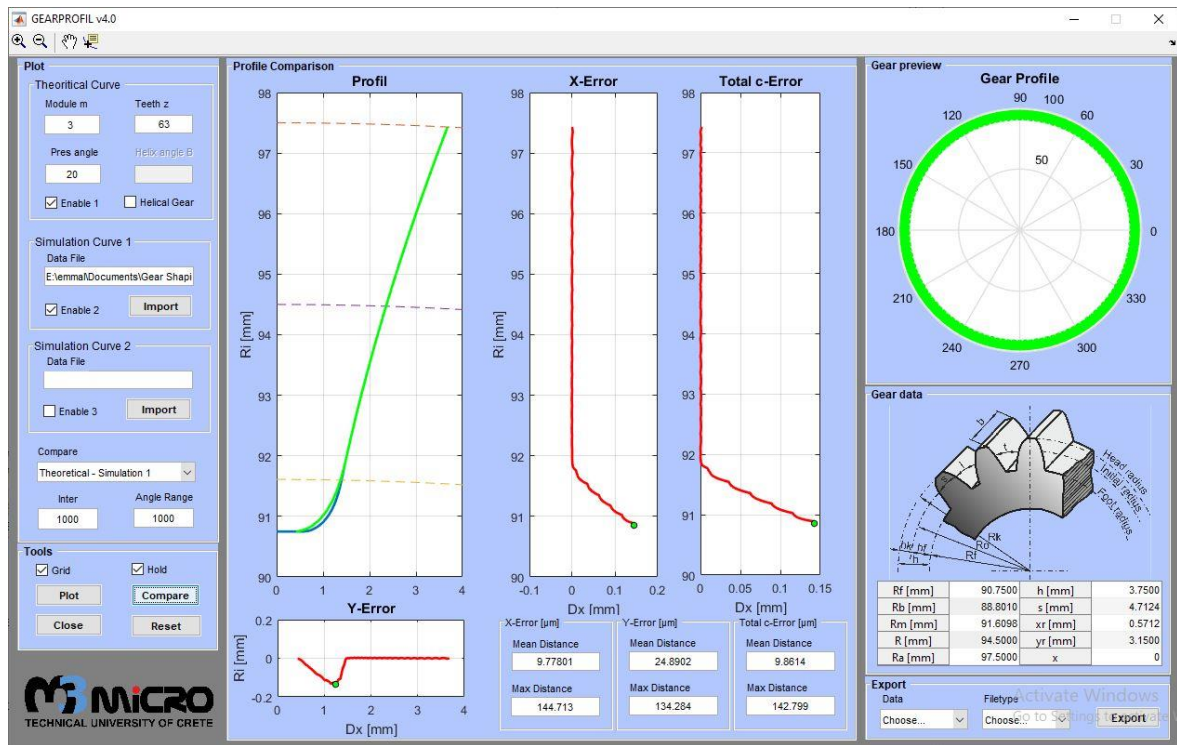


Σχήμα 4.2: EX – SP “Case 2”

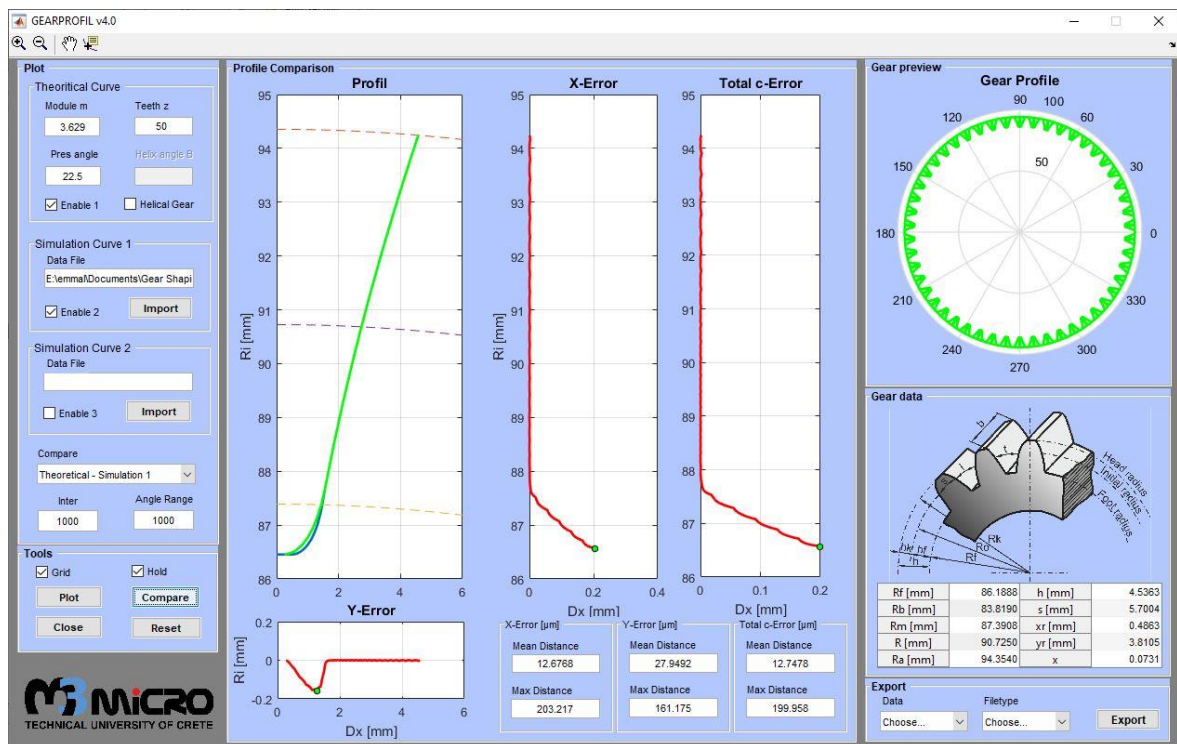


Σχήμα 4.3: EX – SP “Case 3”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

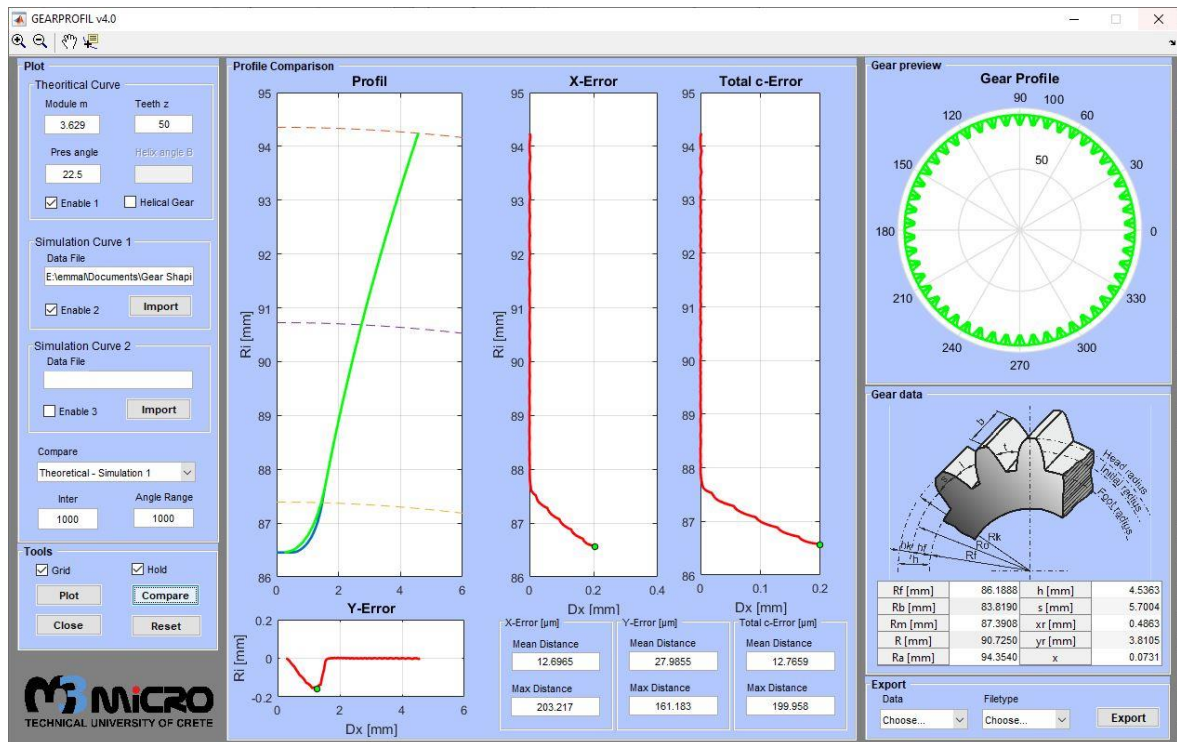


Σχήμα 4.4: EX – SP “Case 6”

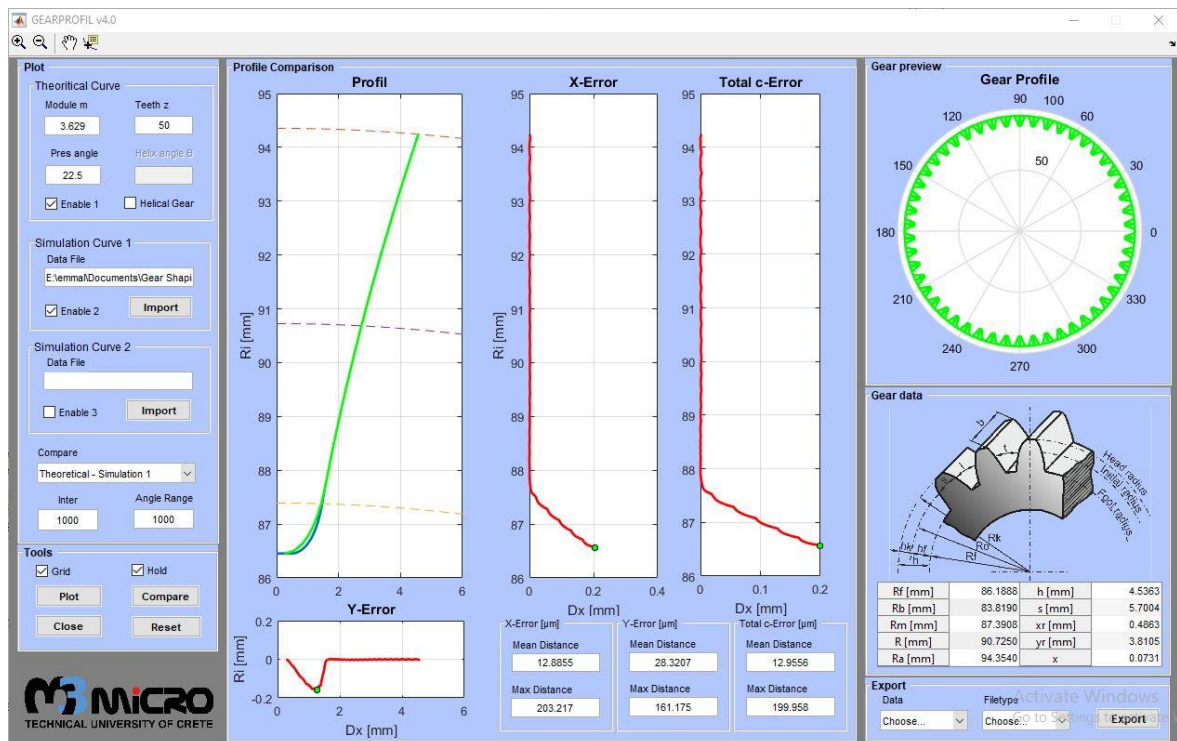


Σχήμα 4.5: EX – SP “Case 7”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



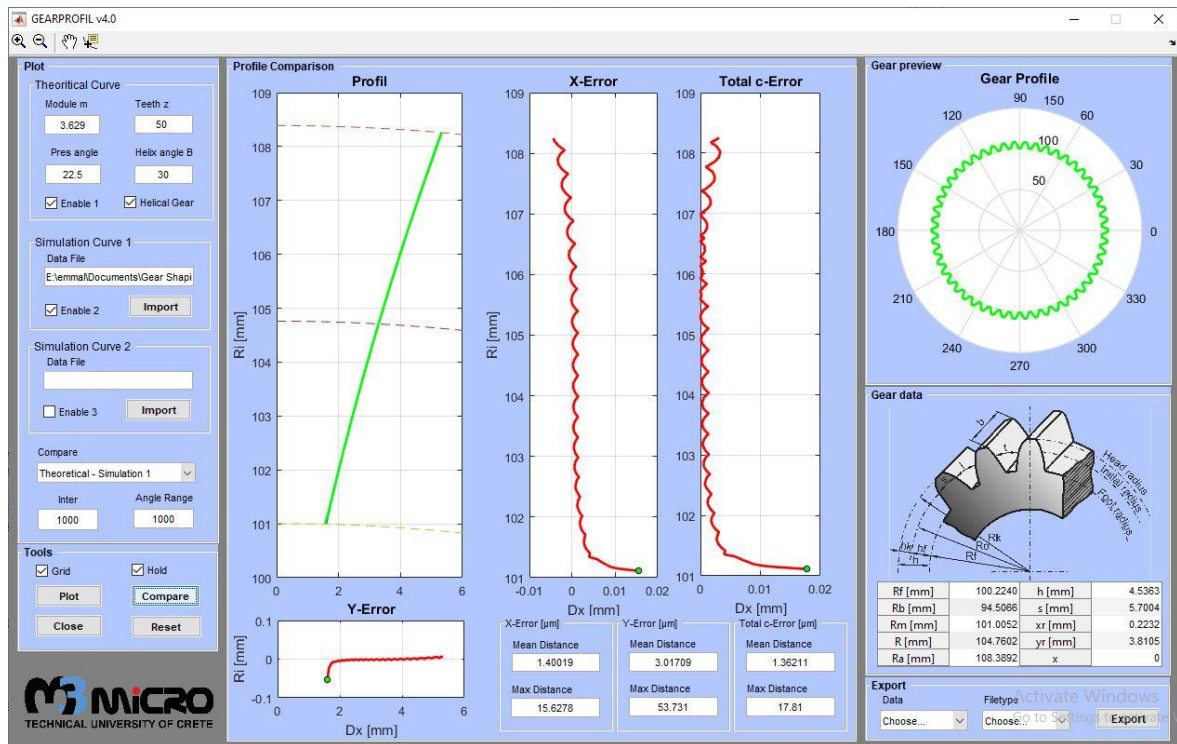
Σχήμα 4.6: EX – SP “Case 8”



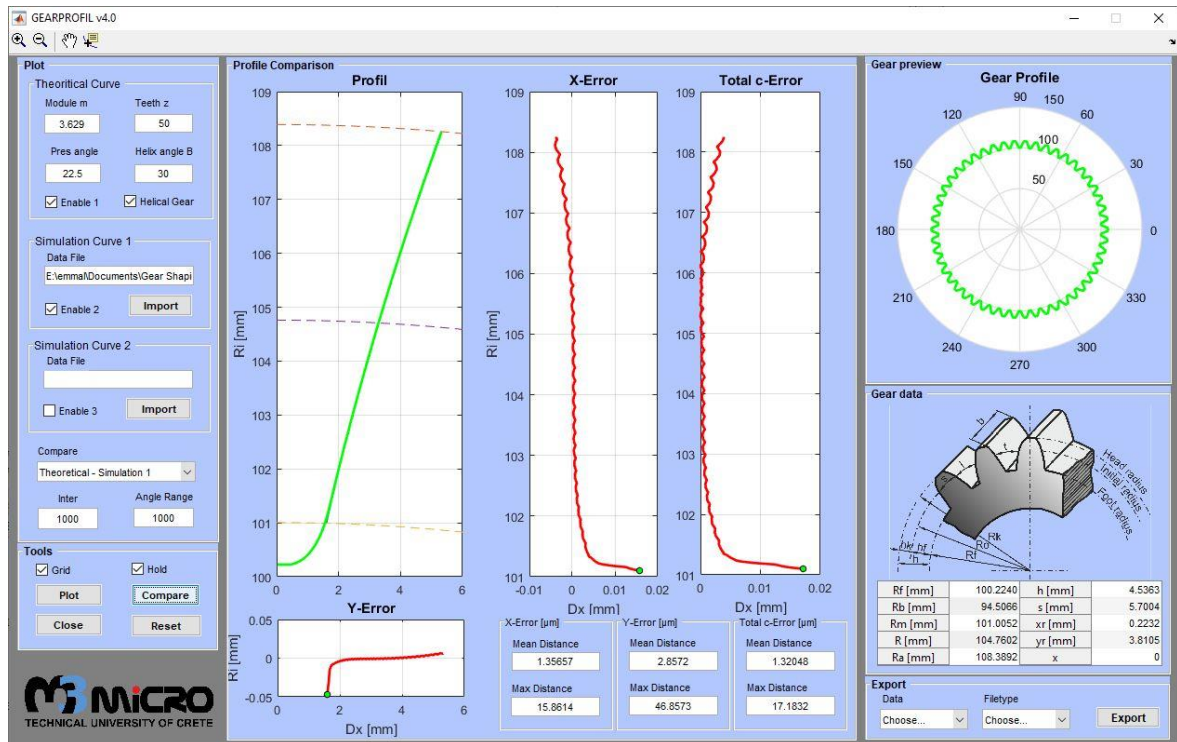
Σχήμα 4.7: EX – SP “Case 9”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

4.2.2 Πλάγια οδόντωση [EX – SP]

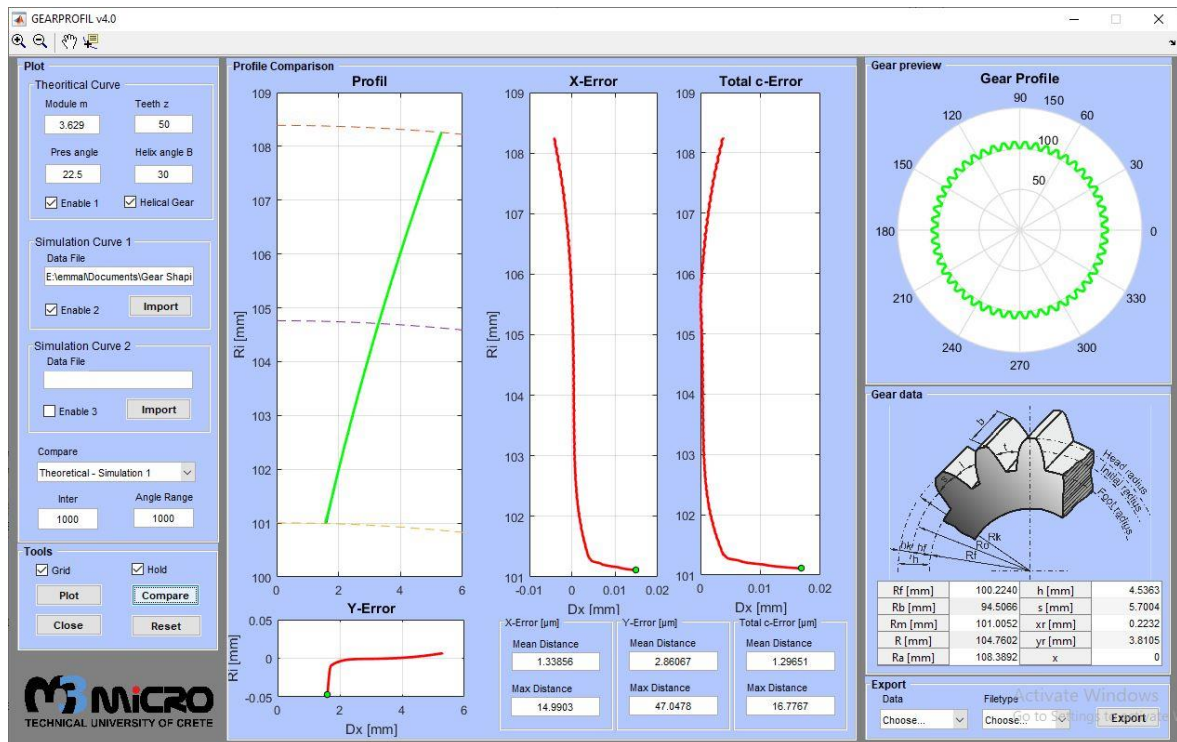


Σχήμα 4.8: EX – HL “Case 1”

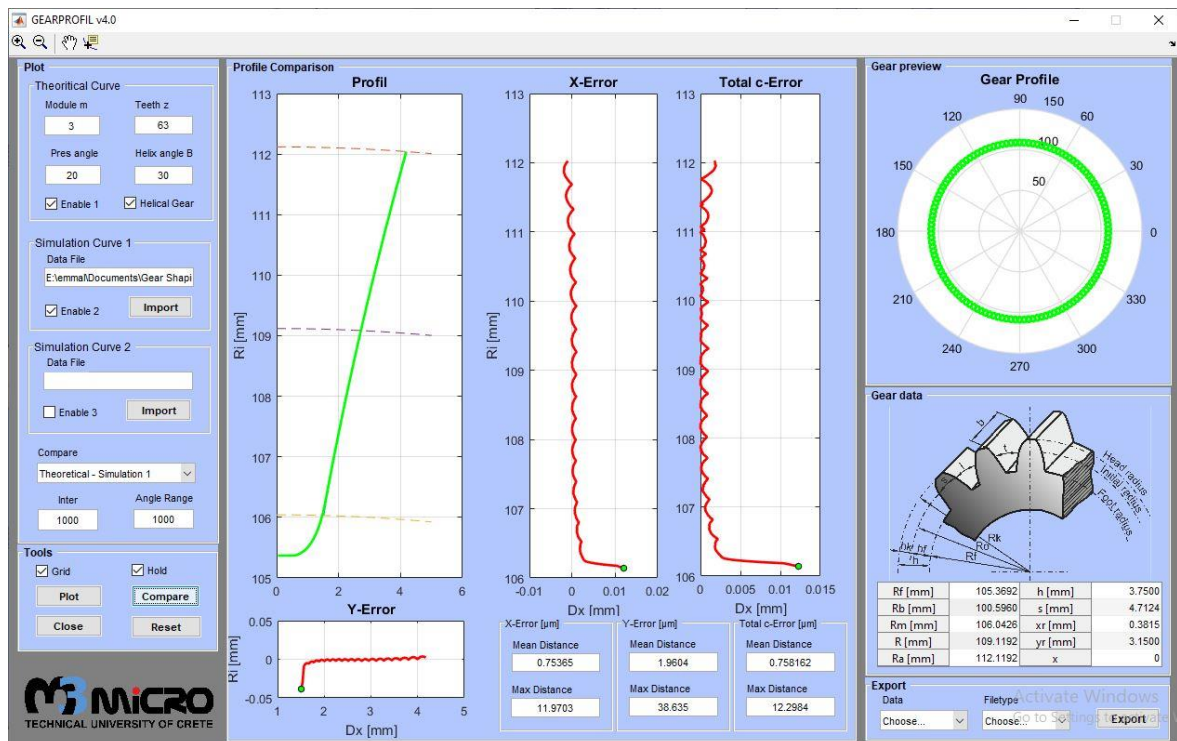


Σχήμα 4.9: EX – HL “Case 2”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

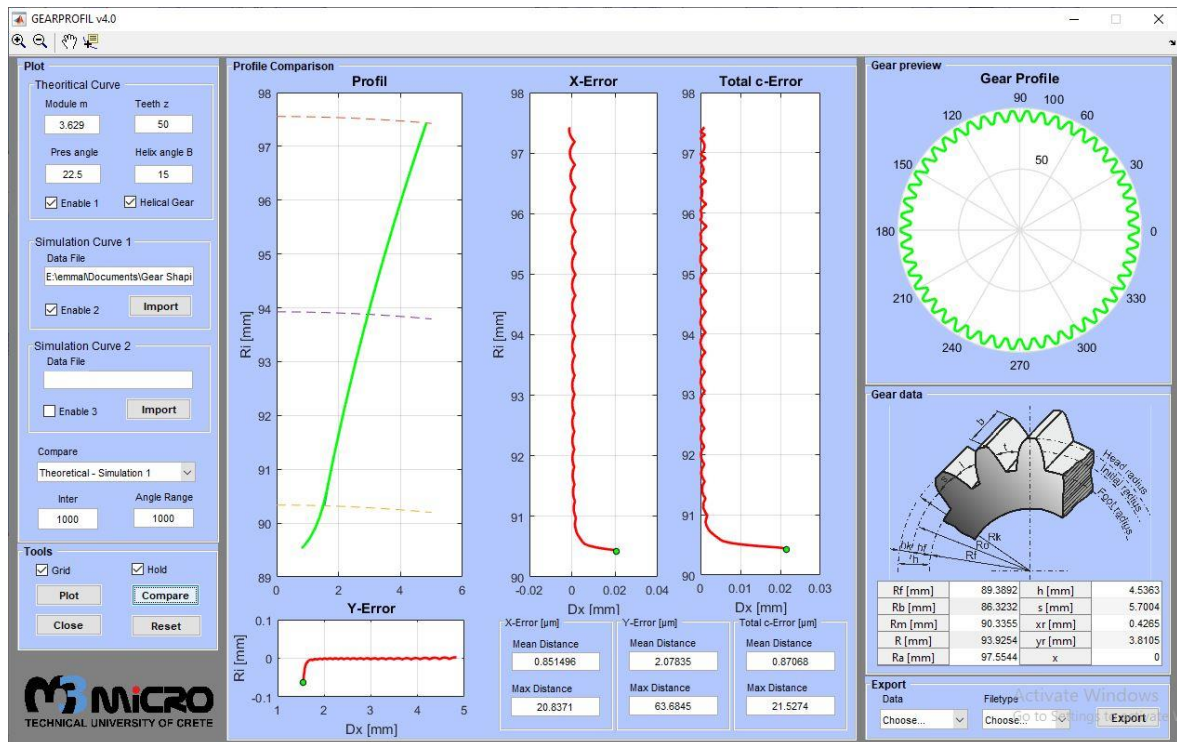


Σχήμα 4.10: EX – HL “Case 3”

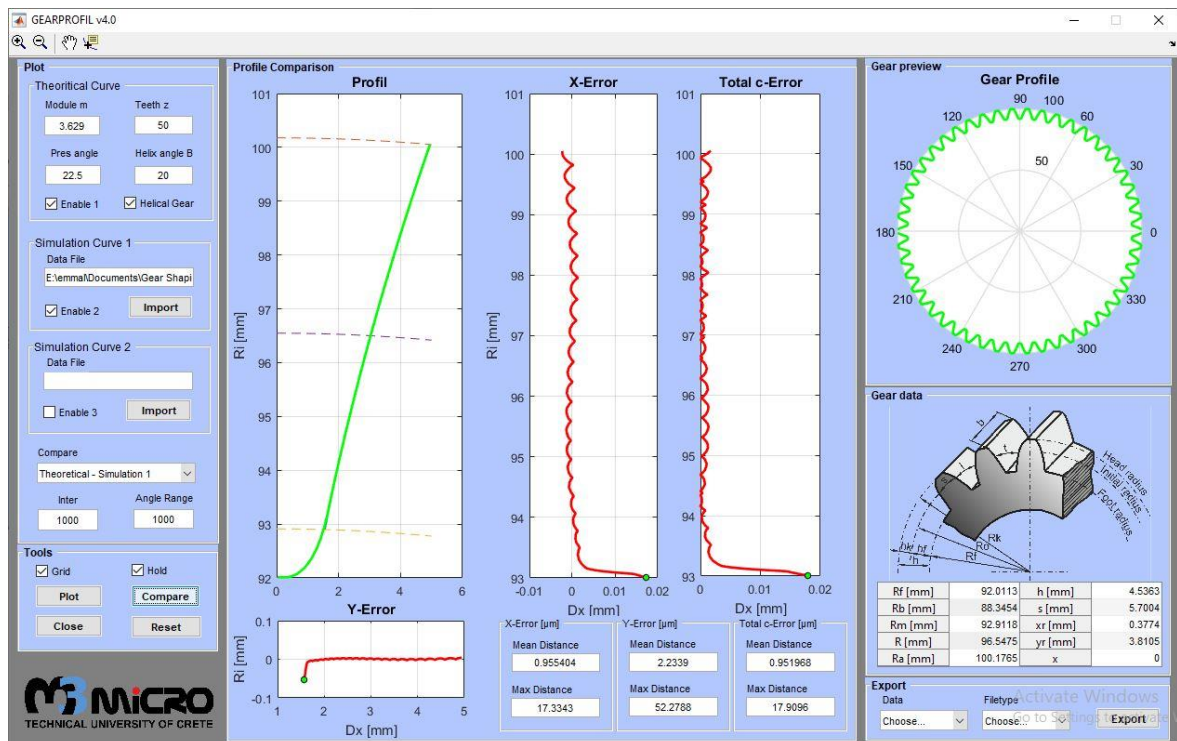


Σχήμα 4.11: EX – HL “Case 6”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

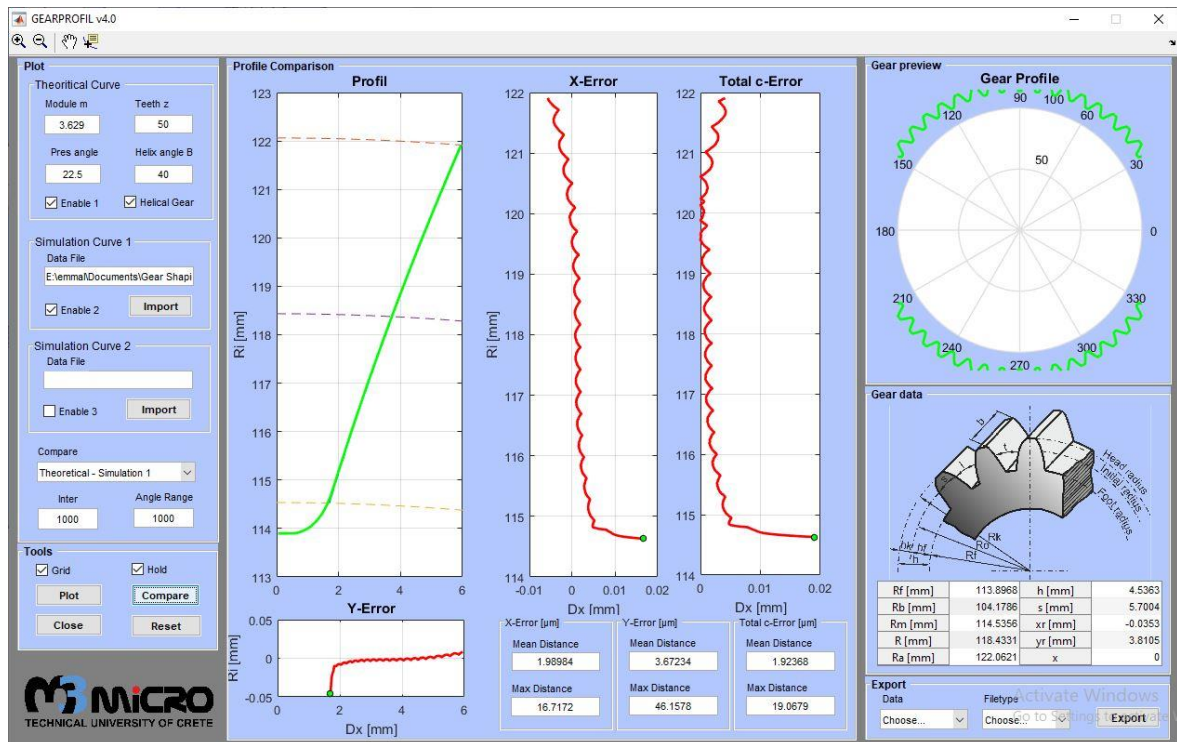


Σχήμα 4.12: EX – HL “Case 7”



Σχήμα 4.13: EX – HL “Case 8”

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων



Σχήμα 4.14: EX – HL “Case 9”

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η κατεργασία οδοντώσεων μέσω πλάνισης με κύλιση οδοντωτού τροχού. Η μελέτη αυτή αποτελεί τμήμα λογισμικού προσομοίωσης διάφορων κατεργασιών κοπής οδοντωτών τροχών που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, μεταξύ των οποίων και η πλάνιση με κύλιση οδοντωτού τροχού, με κύριο σκοπό τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής. Η μοντελοποίηση αυτή έγινε σε προγραμματιστικό περιβάλλον, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic .NET, μέσω του περιβάλλοντος API (Application Programming Interface) του λογισμικού Autodesk Inventor 2020.

Το συγκεκριμένο προσομοιωτικό μοντέλο ως κύριο στόχο είχε τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται κατά την πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων για περιπτώσεις ευθείας και πλάγιας οδόντωσης, εξωτερικών και εσωτερικών τροχών. Όσον αφορά την μοντελοποίηση κατεργασιών οδοντώσεων και λόγω της συμμετρίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου, κάθε αυλάκι έχει την ίδια γεωμετρία. Επομένως για την μοντελοποίηση μελετήθηκε ένα μόνο αυλάκι, το οποίο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας προκύπτει από ένα κοπτικό δόντι.

Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στο αποτέλεσμα, είναι εξίσου σημαντικό να μελετηθεί η κινηματική της κατεργασίας αλλά και η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Επομένως το πρώτο στάδιο για την υλοποίηση του προσομοιωτικού μοντέλου ήταν ο σχεδιασμός της κατατομής του κοπτικού εργαλείου και η μετέπειτα τοποθέτηση του σε διαδοχικά παράλληλα επίπεδα ώστε να σχηματιστεί η τρισδιάστατη απεικόνιση της τροχιάς του σε κάθε εμβολισμό. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη την περιστροφή εργαλείου και κατεργαζόμενου τεμαχίου μελετήθηκε το τόξο εργασίας του δοντιού που συμμετέχει στο σχηματισμό ενός αυλακιού. Η ακρίβεια της γεωμετρίας του αυλακιού που προκύπτει από την προσομοίωση ελέγχθηκε σύμφωνα με λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μελετήθηκαν οι τομές του κοπτικού εργαλείου με τον κατεργαζόμενο τροχό, ή αλλιώς η γεωμετρία των απαραμόρφωτων αποβλίπτων. Μέσα από την ανάλυση της γεωμετρίας τους, το λογισμικό υπολογίζει τις δυνάμεις κοπής που απαιτούνται για την κατεργασία του τεμαχίου. Η διαδικασία αυτή έγινε με τη χρήση των εξισώσεων Kienzle-Victor, σύμφωνα με τις οποίες η δύναμη κοπής σε μία τομή του αποβλίπτου προκύπτει ως συνάρτηση του πάχους και του πλάτους του. Τα αποτελέσματα του κώδικα περιλαμβάνουν τις δυνάμεις κοπής σε όλες τις θέσεις κύλισης, ενώ υπολογίζονται και οι συνολικές δυνάμεις κοπής σε όλο το κοπτικό εργαλείο. Για να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, σχετικά με τις δυνάμεις, έγινε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [10]. Τέλος στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η γεωμετρία αποβλίπτων και οι δυνάμεις κοπής για διάφορες περιπτώσεις ευθείας, πλάγιας οδόντωσης για εξωτερικούς και εσωτερικούς οδοντωτούς τροχούς.

Ως μελλοντική κατεύθυνση του προσομοιωτικού μοντέλου θα μπορούσε να αποτελέσει η μελέτη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου κατά τον εμβολισμό και η μελέτη των βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας σύμφωνα με την επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με τη γεωμετρία τροχού, εργαλείου και τις συνθήκες κοπής στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Τέλος, επιπλέον κατευθύνσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν και η προσομοίωση της κατεργασίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και η εφαρμογή της

Προσδιορισμός δυνάμεων κοπής στην πλάνιση με κύλιση οδοντώσεων

προτεινόμενης μεθοδολογίας για άλλες κατεργασίες διαμόρφωσης οδοντωτών τροχών, όπως η πλάνιση με κύλιση οδοντωτού κανόνα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αντωνιάδης Α: Μηχανουργική Τεχνολογία, 3^η έκδοση 2018, Εκδόσεις Τζιόλα
- [2] Αντωνιάδης Α: Μηχανολογικό Σχέδιο, 3^η έκδοση 2018, Εκδόσεις Τζιόλα
- [3] Βαλκάνος Δημήτριος, Γεωμετρική Ανάλυση Αποβλίπτων στο φραιζάρισμα με κύλιση οδοντώσεων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2011
- [4] Ζουρέλλης Ανδρέας, Προσομοιωτικό μοντέλο κοπής οδοντώσεων με πλάνιση με κύλιση, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013
- [5] Καμπάκης Μιλτιάδης, Σχεδιασμός και κατασκευή εργαλείου για την κοπή οδόντωσης με φραιζάρισμα με κύλιση με τη μέθοδο fly cutting, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019
- [6] Μπουζάκης Κωνσταντίνος Διονύσιος Ε., Μηχανική και τεχνολογία μηχανουργικών μορφοποιήσεων με αφαίρεση υλικού, 2^η έκδοση 2015, Εκδόσεις Ζήτη
- [7] Ταπόγλου Νικόλαος, Βελτιστοποίηση τεχνολογικών παραμέτρων κατεργασίας οδοντώσεων με φραιζάρισμα με κύλιση, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012
- [8] Sulzer G. Leistungssteigerung bei der Zylinderradherstellung durch genaue Erfassung der Zerspankinematik, Dissertation. TH (Aachen), 1974
- [9] Wilfried König, Konstantin Bouzakis, "Ermittlung der Zerspankraftkomponenten beim Wälzstoßen", Verein Deutscher Ingenieure, 1978
- [10] Konstantinos-Dionysios Bouzakis, Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Wälzstoßen durch Optimierung des Zerspanprozesses und der Werkzeugauslegung, Dissertation. TH (Aachen), 1976
- [11] Herwart Opitz, Wilfried König, Gerd Sulzer, Konstantin Bouzakis, Verschleißuntersuchungen beim Wälzstoßen von Geradverzahnungen, Westdeutscher Verlag, TH (Aachen), 1974
- [12] König, W. and K. Essel *Spezifische Schnittkraftewerte für die Zerspanung metallischer Werkstoffe* 1973: Verlag Stahl Eisen m.b.H. Düsseldorf
- [13] Kaan Erkorkmaz, Andrew Katz, Yasin Hosseinkhani, Fathy Ismail, "Chip geometry and cutting forces in gear shaping", CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2016
- [14] Andrew Katz, Kaan Erkorkmaz, Fathy Ismail, "Virtual Model of Gear Shaping Part I Kinematics", ASME, 2018
- [15] Linqing Li, Lianhong Zhang, Bing Yu, Kaifeng Wang, Fucong Liu, "An efficient spur gear shaping method based on homogenizing cutting area through variational circular feed rate", Journal of Engineering Manufacture, 2015
- [16] Man Xu, Xinghui Han, Lin Hua, Fangyan Zheng, "Modeling and methods for gear shaping process and cutting force prediction of variable transmission ratio rack", Elsevier, 2019
- [17] Fangyan Zheng, Lin Hua, Xinghui Han, Bo Li, Dingfang Che, "Linkage model and manufacturing process of shaping non-circular gears", Elsevier, 2015
- [18] Ognyan Alipiev, Svetlin Marinov, Toni Uzun, "Optimal tooth profile design of a gear shaper cutter when meshing with internal straight splines", Elsevier, 2018
- [19] R.M. Khusainov, R.R. Khazie, "Mathematical Model for Assessing the Accuracy of Processed Gears on Gear Shaping Machines", Elsevier, 2017
- [20] F. Klocke, B. Döbbeler, S. Goetz, T. Deeke Vieck, "Model-Based Online Tool Monitoring for Hobbing Processes", CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, 2017
- [21] KHK Gears, "Gear Technical Reference – The Role Gears are Playing": https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/

- [22] Autodesk University, Creating Add-Ins for Inventor:
<https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Creating-Add-Ins-Inventor-2018>
- [23] Autodesk University 2008, “How Deep is the Rabbit Hole? Examining the Matrix and other Inventor® Math and Geometry Objects”:
<https://modthemachine.typepad.com/files/mathgeometry.pdf>
- [24] <https://www.m3.tuc.gr/>
- [25] <https://www.tec-science.com/>
- [26] <https://www.arc.id.au/GearDrawing.html>