

# مروری بر روش پرداخت کاری ارتعاشی با استفاده از مواد ساینده در تولید قطعات با دقت بالا

مهرداد وحدتی  
دانشیار مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
vahdati@kntu.ac.ir

سجاد بیگمردی\*  
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
s.beigmoradi@email.kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰

## چکیده

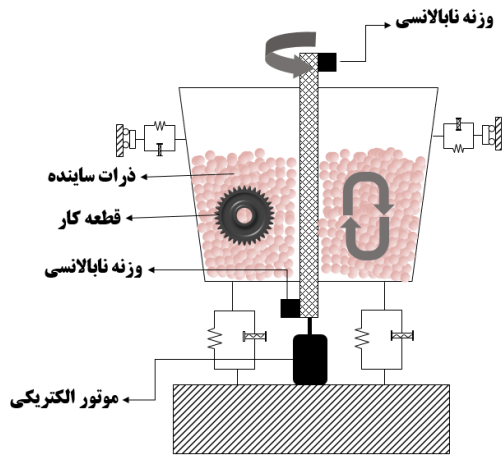
در دهه‌های اخیر با پیشرفت روزافزون فناوری و ساخت سیستم‌های پیچیده در صنایع مختلفی همچون الکترونیک، هوافضا، پزشکی، اپتیک و ...، ضرورت ساخت قطعات با صافی و کیفیت سطح بالا بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا روش‌های نوینی مانند روش ماشین کاری تخلیه الکتریکی، ماشین کاری الکتروشیمیایی، ماشین کاری پرتو لیزری و ... جهت ماشین کاری و پرداخت سطوح ابداع و به کار گرفته شده است. با توجه به مزایا و معایب هر کدام از روش‌های ماشین کاری قطعات، انتخاب گزینه مناسب جهت فرایند پرداخت کاری با چالش‌هایی مواجه است. یکی از روش‌های پرداخت کاری که امروزه مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران در حوزه تولید قطعات دقیق واقع شده است، پرداخت کاری سایشی با استفاده از پودرهای سرامیکی پیشرفته است. فراهم بودن طیف‌های وسیعی از انواع انرژی همچون انرژی‌های مغناطیسی، هیدرولیکی، پنوماتیکی و ... جهت به حرکت درآوردن ذرات ساینده، در کنار کمترین اثرات حرارتی و شیمیایی بر روی سطح قطعات منجر به جذابیت بیشتر این روش در میان پژوهشگران حوزه ساخت و تولید شده است. با توجه به گستردگی روش‌های پرداخت کاری با استفاده از پودرهای سرامیکی، در این مطالعه به بررسی روش پرداخت کاری قطعات مبتنی بر ارتعاشات بستر ذرات ساینده و پیشرفت‌های این حوزه پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** ماشین کاری مدرن، پرداخت دقیق، پرداخت کاری ارتعاشی، زبری سطح، نرخ براده‌برداری.

## ۱. مقدمه

روش پرداخت ارتعاشی<sup>۱</sup> در حدود ۵۰ سال است که جهت گرد کردن لبه‌های تیز، از بین بردن پلیسه‌ها و بهبود سطوح قطعه کار استفاده شده است [۱]. این روش جهت پرداخت قطعات کوچک و بزرگ با سطوح هندسی پیچیده مؤثر است. مکانیزم پرداخت به این صورت است که مخزن حاوی مواد ساینده و قطعه کار از طریق یک سیستم فنربندی به زمین متصل شده است. حرکت مرتعش این مخزن نیز از طریق یک محور نابالانس<sup>۲</sup> که در مرکز سیستم قرار گرفته است تأمین می‌شود. نابالانسی

محور نیز با افزودن وزنه‌های خارج از مرکزی که در بالا و پایین شفت قرار گرفته‌اند تأمین می‌شود. شکل ۱ مکانیزم دستگاه پرداخت ارتعاشی را برای دستگاه کاسه‌ای به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در اثر ارتعاش ظرف حاوی ذرات ساینده و برخورد این ذرات با قطعه کار، عمل براده‌برداری از قطعه کار انجام می‌شود. با توجه به راندمان بالا و هزینه پایین استفاده از این روش، به کارگیری از آن جهت بهبود کیفیت و ترمیم سطوح آسیب دیده قطعات کار، مخصوصاً قطعات کار فلزی مورد توجه بسیاری از تولیدکنندگان قرار گرفته است.

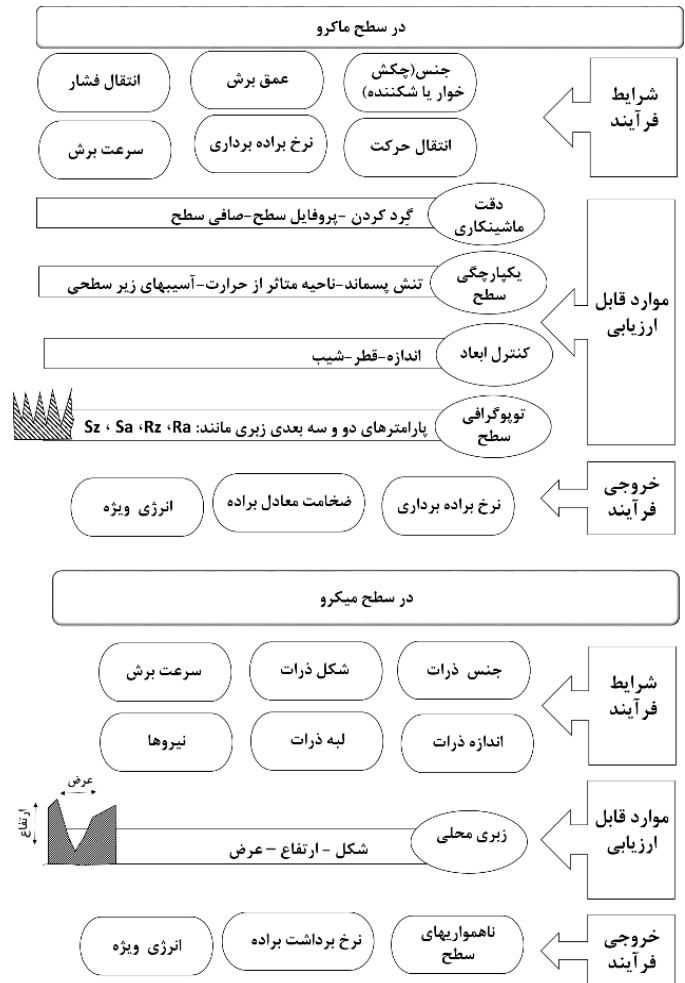


شکل ۱. نمای شماتیک دوبعدی ماشین کاسه‌ای پردها  
ارتعاشی

## ۲. مکانیزم پرداخت کاری مبتنی بر ذرات ساینده

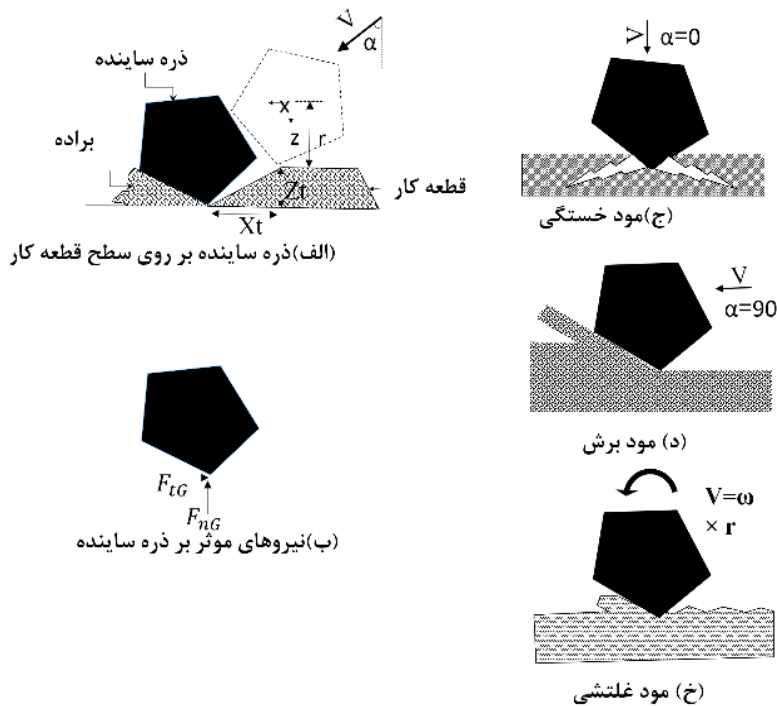
در تمامی فرایندهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین‌کاری، محاسبه نیروی برش هدف اصلی است. چهارچوب مدل‌سازی همانند شکل ۲ به دو بخش ماکروسکوپی و میکروسکوپی قابل دسته‌بندی است. شبیه‌سازی ماکروسکوپی شامل شرایط کاری، خروجی‌ها و پارامترهای ارزیابی (همچون کیفیت سطح، ابعاد و شکل قطعه کار) است.

در این حالت برهم‌کنش ابزار (نه پودر ساینده) و سطح قطعه کار مورد ارزیابی واقع می‌شود. در شبیه‌سازی میکروسکوپی تقابل بین ذرات ساینده و سطح قطعه کار مطالعه می‌شود. در این حالت، فرایند براده‌برداری برای هر ذره مورد بررسی قرار می‌گیرد که ناشی از نیروی برشی میکروسکوپی است.



شکل ۲. پارامترهای شبیه‌سازی فرایندهای پرداخت کاری

و سطح قطعه کار را در فرایند پرداخت کاری سایشی نشان می‌دهد. این مودها به زاویه برخورد ( $\alpha$ )، سرعت انتقالی ( $v$ ) و سرعت زاویه‌ای ( $\omega$ ) ذره ساینده بستگی دارد. در زوایای برخورد کوچک (شکل ۳-ج) ذره ساینده به‌طور قائم به سطح قطعه کار برخورد می‌کند و در نتیجه در اثر فشار ناشی از این برخورد بر روی مواد چکش‌خوار فرو رفتگی ایجاد می‌شود. ترک‌هایی که در زیر سطح برخورد شکل می‌گیرند در اثر بمباران ذرات ساینده باعث براده‌برداری از قطعه کار می‌شوند. درحالتی که زاویه برخورد ذره ساینده نسبتاً بزرگ باشد (شکل ۳-د) بیشتر مومنتوم ذره در جهت مماسی به سطح قطعه کار منتقل می‌شود و منجر به خراش و براده‌برداری از روی آن می‌گردد. در این حالت نیروهای برخورد نیز در صورت در نظر گرفتن صلیبیت ذره ساینده قابل محاسبه است.



شکل ۳. الف) سینماتیک ذره، ب) نیروهای ناشی از تقابل ذره-قطعه کار (ج-خ) مودهای مختلف تقابل ذره ساینده و سطح قطعه کار

پرداخت کاری با جت ذرات ساینده) یک نیروی غیرفعال ناشی از تغییر جهت مؤلفه عمودی مومنتوم به‌وجود می‌آید و مؤلفه مماسی مومنتوم در حین برخورد نیروی برشی را فراهم می‌کند. عمق برش که یک پارامتر مهم در تعیین مود برش است به خواص ماده و نیروی برخورد بستگی دارد. وقتی که عمق برش

فرایند پرداخت کاری سایشی با توجه به شرایط مرزی ذرات به سه دسته قابل تفکیک است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود: الف) دسته‌بندی مسیر حرکت ذرات: در این دسته‌بندی شرایط مرزی سینماتیکی ذرات با در نظر گرفتن مسیر حرکت آنها تعریف می‌شود که ناشی از سینماتیک ماشین پرداخت کاری است.

ب) دسته‌بندی نیروی ذرات: این نیروها با توجه به نوع ماشین پرداخت کاری معین می‌شوند.

ج) دسته‌بندی انرژی ذرات: ذرات ساینده با میزانی از انرژی با قطعه کار برخورد می‌نمایند که از طریق سرعت و نیروی ذرات مشخص می‌شود. در فرایندهای پرداخت کاری سایشی مبتنی بر ارتعاشات نیز از این دسته‌بندی بهره گرفته می‌شود.

شکل ۳ سینماتیک نیروهای بین ذره ساینده - قطعه کار و همچنین سه مود تقابلی خستگی، برش و غلتش بین ذره ساینده

درحالتی که زاویه برخورد ذره ساینده نسبتاً بزرگ و همراه با دوران باشد (شکل ۳-خ) قطعه بر روی سطح قطعه کار می‌غلتد و علاوه بر به‌جای گذاشتن اثر خود بر روی آن، ناهمواری‌ها را نیز کمتر کرده و صافی سطح را بهبود می‌بخشد. درحالتی که ذرات به‌صورت آزادانه به سطح برخورد کنند (مانند فرایند

$$u = u_c + u_{sl} \quad (3)$$

در رابطه بالا  $u_c$  انرژی مخصوص تشکیل براده و  $u_{sl}$  انرژی مخصوص لغزشی است. در حالت کلی سنگ‌زنی فولاد، مقدار  $u$  در گستره  $20 \text{ j/mm}^3$  تا  $60 \text{ j/mm}^3$  و  $u_c$  در حدود  $138 \text{ j/mm}^3$  است [۸]. این مقدار نشان‌دهنده این مطلب است که ۳۰ تا ۷۷٪ انرژی فرایند از طریق خراشیدن و لغزش بر روی سطح مصرف می‌شود. در مقادیر کوچک  $h_{eq}$  مقدار انرژی کلی  $u$  به سرعت افزایش می‌یابد. در سنگ‌زنی نهایی، مقدار انرژی به دلیل افزایش انرژی‌های ناشی از لغزش و خراشیدگی بالغ بر  $80 \text{ j/mm}^3$  خواهد بود. در پرداخت کاری سایشی نهایی مقدار ضخامت براده کوچکتر از فرایند سنگ‌زنی نهایی، و میزان انرژی کلی بزرگتر از فرایند سنگ‌زنی نهایی است. مقدار انرژی مخصوص را می‌توان به صورت رابطه ۴ نیز تعریف نمود:

$$u = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_t v_s}{Q_w} \quad (4)$$

در رابطه بالا  $P$  توان ماشین کاری،  $Q_w$  نرخ براده‌برداری و  $F_t$  نیروی مماسی برخورد با سطح قطعه کار است. نرخ براده‌برداری مخصوص  $Q'_w$  نیز به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b} = h_{eq} v_s \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $b$  عرض برش است. در فرایندهای پرداخت کاری مبتنی بر انتقال فشار همچون لپینگ<sup>۴</sup>، معادله پرستون<sup>۵</sup> را جهت تخمین نرخ براده‌برداری می‌توان استفاده نمود [۱۳]:

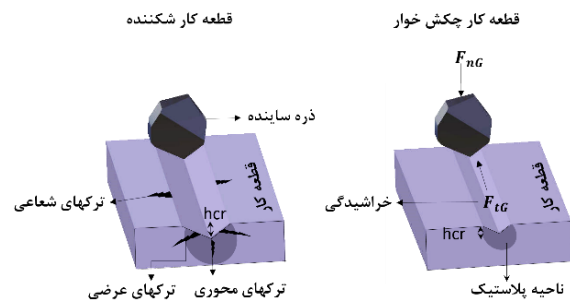
$$Q_w = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta h}{\Delta t} A = C_v p v_s \quad (6)$$

در رابطه ۶  $V$  حجم براده برداشته شده،  $h$  ضخامت لایه برداشته شده از سطح قطعه کار،  $A$  مساحت سطح تماس قطعه کار،  $C_v$  ثابت وابسته به جنس و  $p$  فشار به کار رفته در فرایند است. در مقیاس ماکروسکوپی نیروهای مماسی ( $F_t$ ) و نرمال ( $F_n$ ) در فرایند پرداخت کاری سایشی را با استفاده از روابط ۷ و ۸ می‌توان بیان نمود:

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl} \quad (7)$$

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} = \quad (8)$$

ذره ساینده خیلی کم باشد، براده‌برداری از سطح قطعه کار نمی‌تواند انجام شود و تنها خراش دادن یا اثرات لغزش ذره ساینده بر روی سطح قطعه کار قابل مشاهده است. در مواد ترد، برای ذره ساینده یک عمق برش بحرانی ( $h_{cr}$ ) تعریف می‌شود که در مقادیر کمتر از آن، حالت برش کماکان همانند مکانیزم مواد نرم است که در شکل ۴ دیده می‌شود.



شکل ۴. جوانه‌زنی و رشد ترک در تقابل ذره ساینده و

قطعه کار

عمق برش بحرانی ( $h_{cr}$ ) با رابطه بیفانو<sup>۳</sup> [۴] ارائه می‌شود.

$$h_{cr} = 0.15 \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_{IC}}{H} \right)^2 \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $H$  سختی ویکرز،  $E$  مدول یانگ (gpa) و  $K_{IC}$  چقرمگی شکست ( $\text{mpam}^{1/2}$ ) است. از نقطه نظر میکرومکانیکی، اندازه ذرات ساینده بر ساختار سطح و زبری آن تأثیرگذار است. برخی از پارامترهای بنیادی فرایند سنگ‌زنی را می‌توان جهت ارزیابی فرایند پرداخت کاری سایشی بسیار دقیق با استفاده از ذرات ساینده به کار برد [۵-۱۲]. ضخامت براده‌ای معادل ( $h_{eq}$ ) یک پارامتر فرضی است که نشان دهنده ضخامت براده‌ای با حجم  $Q/W$  است و با رابطه ۲ تعریف می‌شود [۱۱]:

$$h_{eq} = \left( \frac{Q'_w}{v_s} \right) \quad (2)$$

در اینجا  $Q'_w$  و  $v_s$  به ترتیب نرخ براده‌برداری ویژه و سرعت برش هستند. پارامتر اساسی دیگر مقدار انرژی مخصوص ( $u$ ) است که به عنوان میزان انرژی مورد نیاز جهت برداشتن حجم واحدی از براده از سطح پرداخت کاری شده تعریف می‌شود. در این فرایند انرژی دارای دو مؤلفه است:

در روابط بالا  $F_{n,c}$  و  $F_{t,c}$  به ترتیب مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروی برش هستند و  $F_{n,sl}$  و  $F_{t,sl}$  نیز به ترتیب مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروی لغزشی هستند.

نرخ  $\eta$  را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\eta = \frac{F_t}{F_n} \quad (9)$$

در مقادیر کوچک  $Q_w$ ،  $F_{n,c}$  و  $F_{t,c}$  به صفر نزدیک می‌شوند و  $\eta$  به ضریب اصطکاک  $\mu$  نزدیک می‌شود. مقادیر  $\eta$  و  $\mu$  را می‌توان جهت شناسایی مقدار برش و لغزش ذرات ساییده و انرژی مخصوص مرتبط با آن استفاده کرد.

### ۳. تئوری پرداخت کاری ارتعاشی

علی‌رغم سابقه طولانی به کارگیری پرداخت کاری ارتعاشی، این پدیده تاکنون به خوبی شناخته نشده است. تلاش‌هایی جهت فرمولاسیون این فرایند و ارائه مدل‌های ریاضی آن انجام شده است و این تلاش‌ها تا به امروز نیز در جریان هستند. یکی از مدل‌های ریاضی معتبر در زمینه پرداخت کاری ارتعاشی توسط هاشیموتو<sup>۶</sup> و همکارانشان [۱۴] ارائه شده است. در این مدل نیروی نرمال بر سطح قطعه ( $F_n$ ) را می‌توان با رابطه ۱۰ نشان داد:

$$F_n = P_s + n \frac{W_m}{g} \alpha_r \cos \theta \quad (10)$$

$$P_s = [\{\eta_m W_m' (1 - R_v)\} + \{\eta_w W_w' R_v\}] H \quad (11)$$

در رابطه ۱۱ فشار هیدروستاتیک وارد بر سطح قطعه،  $H$  عمق قطعه کار درون ماده ساییده،  $n$  تعداد نقاط برخورد ناشی از ذرات ساییده بر سطح واحد قطعه کار،  $W_m$  وزن مجموع ذرات ساییده،  $\alpha_r$  شتاب نسبی بین محیط ذرات ساییده با قطعه کار و  $\theta$  زاویه برخورد ذرات ساییده با سطح نرمال به قطعه کار است. وزن مخصوص ذرات ساییده و قطعه کار به ترتیب با  $W_m'$  و  $W_w'$  نشان داده شده است. نسبت حجمی قطعه کار به ذرات ساییده درون ظرف، حجم اشغال شده توسط ذرات ساییده و

حجم اشغال شده توسط قطعه کار در واحد حجم به ترتیب  $R_v$ ،  $\eta_m$  و  $\eta_w$  هستند. متوسط سرعت برش  $v_c$  ذرات ساییده نسبت به قطعه کار را می‌توان با رابطه ۱۲ بیان کرد:

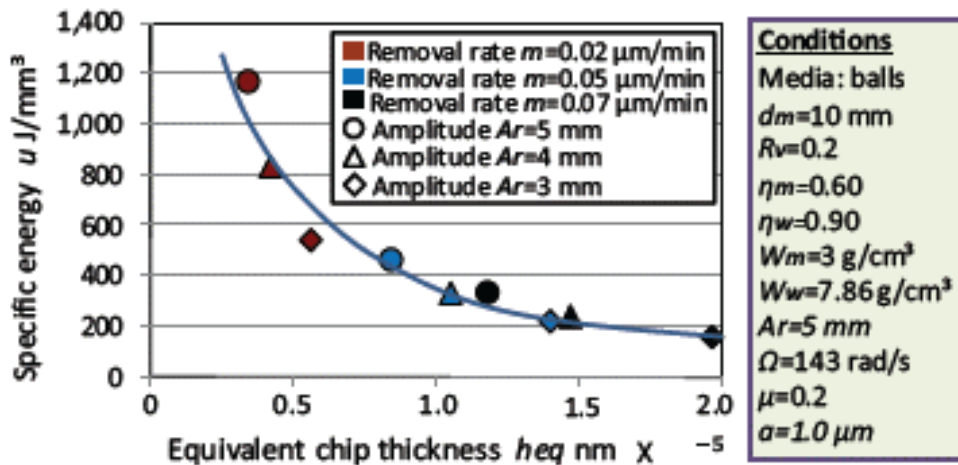
$$v_c \cong (\sqrt{2}/2) \alpha_r \omega \sin \theta \quad (12)$$

در رابطه ۱۲  $\alpha_r$  دامنه نسبی ذرات ساییده نسبت به قطعه کار و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای ارتعاش اجباری ناشی از سرعت اسپیندل ماشین پرداخت کاری ارتعاشی است. ضخامت براده‌ی معادل  $h_{eq}$  و انرژی مخصوص  $u$  در پرداخت کاری ارتعاشاتی را می‌توان با روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه نمود:

$$h_{eq} = \frac{Q_w a}{v_c} = \frac{m a}{v_c} \quad (13)$$

$$u = \frac{\mu \dot{F}_n v_s}{m} \quad (14)$$

در روابط بالا  $a$  عمق برش،  $m$  [mm/s] سرعت نفوذ ذره در سطح قطعه کار و  $Q_w$  [mm<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>s] نرخ براده‌برداری بر واحد سطح است. نرخ نیروی مماسی  $\dot{F}_t$  به نرخ نیروی نرمال  $\dot{F}_n$  برابر با  $\mu$  است. بنا به مطالعات انجام گرفته توسط یابوکی<sup>۷</sup> [۱۵] گستره  $\mu$  بین ۰/۱۵-۰/۲۵ در حالت ماشین کاری تر و ۰/۲۵-۰/۳۵ در حالت ماشین کاری خشک است. شکل ۵ ضخامت براده‌ی معادل  $h_{eq}$  و انرژی مخصوص  $u$  را برای یک فرایند پرداخت کاری ارتعاشی با لحاظ پارامترهای رایج در این فرایند نشان می‌دهد. گستره  $h_{eq}$  از  $0.3 \times 10^{-5}$  تا  $2 \times 10^{-5}$  نانومتر است که در حدود  $10^{-6}$  تا  $10^{-7}$  مرتبه کوچکتر از مقادیر فرایند سنگ‌زنی معمولی است. گستره انرژی مخصوص نیز بین  $200-1200$  J/mm<sup>3</sup> است که در حدود  $3-60$  مرتبه بزرگتر از مقادیر سنگ‌زنی معمولی است. بیشترین میزان انرژی برشی در فرایند پرداخت کاری برشی صرف لغزش و خراشیدن سطح قطعه کار می‌شود. تنها ۵-۱٪ انرژی مخصوص در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی صرف براده‌برداری می‌شود که این مقدار در فرایند سنگ‌زنی در حدود ۷۰-۲۰٪ است.

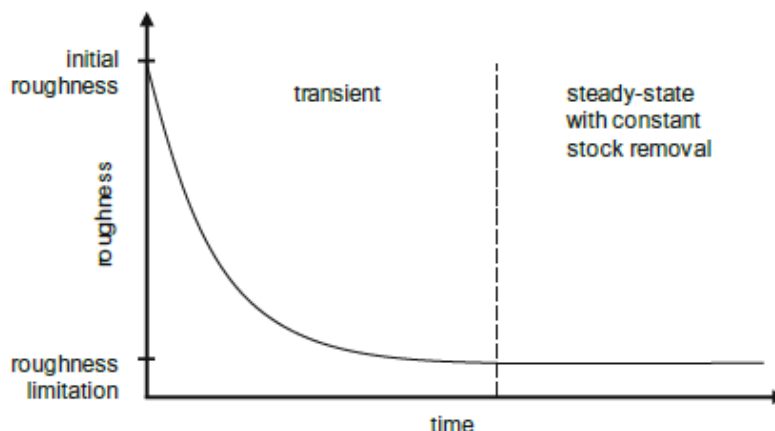


شکل ۵. نمودار انرژی مخصوص بر حسب ضخامت براده معادل در عمق  $H=300\text{nm}$  در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی [۳]

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرایند پرداخت کاری ارتعاشی زمان فرایند است که هم بر کیفیت سطح و هم بر نرخ براده‌برداری مؤثر است. بررسی‌های هاشیموتو [۱۶] نشان داد که زبری سطح قطعه‌کار پس از رسیدن به محدوده مشخصی با گذشت زمان دارای تغییرات محسوسی نیست و نرخ براده‌برداری نیز با گذشت زمان یکسان می‌شود که در شکل ۶ قابل مشاهده است.

#### ۴. پارامترهای پرداخت کاری ارتعاشی

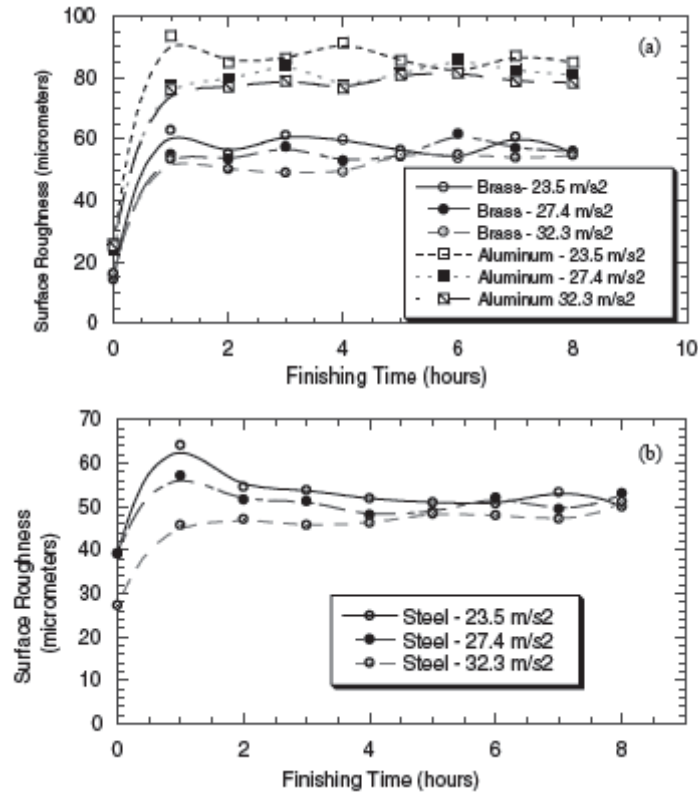
جهت دستیابی به بالاترین راندمان پرداخت کاری ارتعاشی، شناخت پارامترهای مؤثر در این فرایند و قرار دادن آنها در حالت بهینه خود ضروری است. در این راستا در هر کدام از پژوهش‌های انجام شده برخی از پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این بخش به دسته‌بندی این پارامترها و بررسی اثر هر کدام پرداخته شده است.



شکل ۶. روند تغییرات زبری سطح با زمان فرایند در پرداخت کاری ارتعاشی [۱۶]

اینکه کیفیت سطح پس از مدت زمان مشخصی تغییر قابل توجهی نخواهد داشت توسط محققان دیگری نیز اعلام شده است [۱۸]. همچنین در بررسی‌های انجام شده توسط اولمن<sup>۹</sup> و همکارانشان [۱۹] مشاهده گردید که در طی ۳۰ دقیقه، کیفیت سطح بهبود یافته و زبری سطح کاهش می‌یابد.

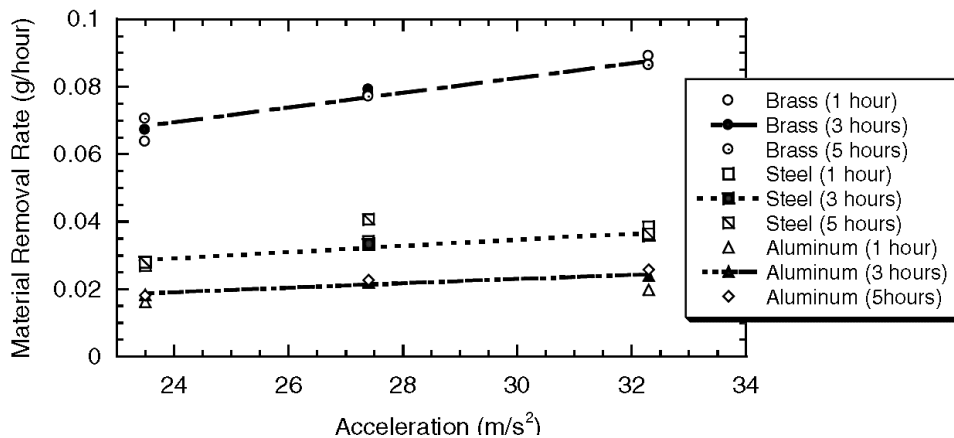
دامبلسکی<sup>۸</sup> و همکارانشان [۱۷] پس از بررسی‌هایی که بر روی سه قطعه‌کار با جنس‌های مختلف انجام دادند به این نتیجه رسیدند که پس از تقریباً ۲ ساعت در کیفیت سطح بهبود قابل توجهی مشاهده نمی‌شود در شکل ۷ نشان داده شده است. آنها همچنین مشاهده کردند که نرخ براده‌برداری در صورت ثابت بودن سایر پارامترهای ماشین‌کاری در گذر زمان ثابت است.



شکل ۷. زبری متوسط سه قطعه کار بر حسب زمان پرداخت کاری [۲۱]

می‌شود، با این حال آنها بیان داشتند که افزایش شتاب دستگاه برای یک قطعه کار، در افزایش کیفیت سطح تأثیر چندانی ندارد. اولمن و همکارانشان [۱۹] با بررسی سرعت نسبی بین قطعه کار و ذرات ساینده، اعلام داشتند این سرعت نسبی عامل اصلی در نرخ براده‌برداری در پرداخت کاری ارتعاشی با استفاده از ذرات ساینده کروی است.

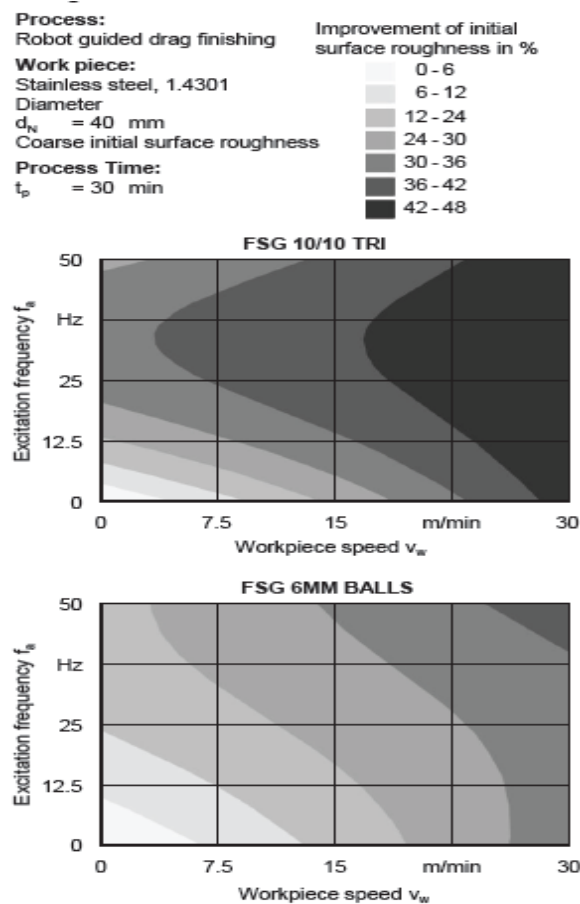
پارامتر دیگری که توجه پژوهشگران را به خود جلب نموده است، شتاب و سرعت دستگاه پرداخت کاری یا قطعه کار است. دامبلسکی و همکارانشان [۱۷] مشاهده نمودند که برای یک جنس قطعه کار با افزایش شتاب دستگاه (شتاب ذرات ساینده) نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد که در شکل ۸ مشاهده



شکل ۸. تأثیر شتاب دستگاه پرداخت کاری بر نرخ براده‌برداری برای مواد مختلف [۱۷]

بررسی‌های انجام شده توسط اولمن [۱۹] نشان داد که تغییر سرعت قطعه‌کار در ظرف حاوی ذرات ساینده بر کیفیت سطح قطعه‌کار و زبری آن مؤثر است که در شکل ۹ آمده است. با این حال میزان تأثیرگذاری این پارامتر به تقابل این پارامتر با سایر پارامترهای فرایند پرداخت کاری همچون فرکانس ارتعاش ظرف حاوی ذرات ساینده وابسته است. پارامتر دیگری که اثر آن در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفته است فرکانس تحریک ماشین کاری است. اولمن و همکارانشان، در بررسی‌های خود بر روی پرداخت کاری در شرایط مختلف ماشین کاری به این نتیجه رسیدند که تغییر

فرکانس به دلیل تغییر انرژی مجموع ذرات ساینده منجر به تغییر کیفیت سطح قطعه‌کار می‌شود که شکل ۹ قابل مشاهده است. البته تعیین مقدار بهینه فرکانس جهت حصول بهترین کیفیت سطح بدون در نظر گرفتن سایر پارامترهای فرایند ماشین کاری ممکن نیست. در شرایط مختلف ماشین کاری، حرکت ذرات ساینده و در نتیجه بارهای وارد بر قطعه‌کار تغییر می‌کنند. بررسی‌های پندیان و همکارانشان نشان داد که فرکانس‌های ظرف ساینده با شکل و اندازه ذرات ساینده تقابل دارد [۲۰].

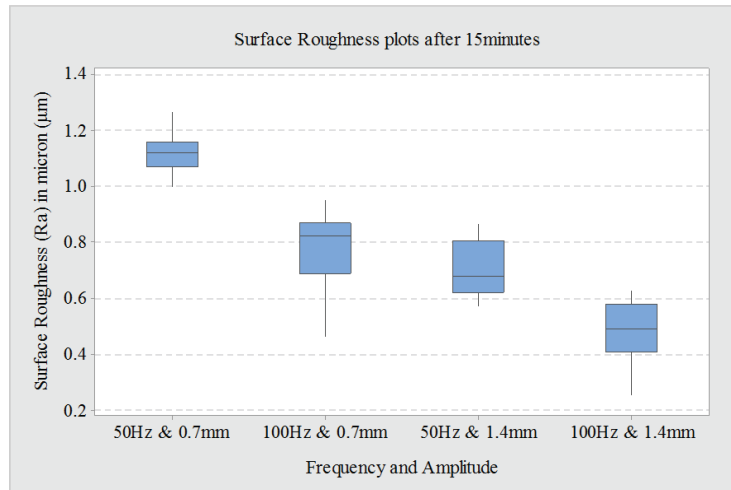


شکل ۹. تقابل فرکانس و سرعت قطعه‌کار در بهبود کیفیت سطح [۱۹]

مطالعات انجام شده بر روی دامنه ارتعاش ماشین، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، بیانگر این مطلب است که با افزایش دامنه، میزان کیفیت سطح قطعه‌کار بهبود یافته و زبری سطح کاهش می‌یابد [۲۰].

دامنه ارتعاش دستگاه پرداخت کاری یکی دیگر از پارامترهایی است که می‌تواند در کیفیت سطح قطعه‌کار در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی مؤثر باشد.



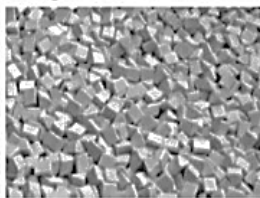


شکل ۱۰. تأثیر فرکانس و دامنه ارتعاش بر کیفیت سطح قطعه کار [۲۰]

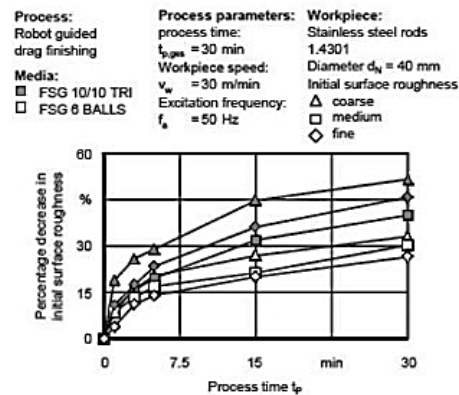
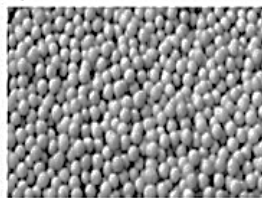
کمتر از ذرات هر می شکل با قاعده مثلثی باعث بهبود کیفیت سطح قطعه کار می شوند. در فرایند پرداخت کاری با استفاده از ذرات ساینده این اصل پذیرفته شده است که استفاده از ذرات با گوشه های تیز تأثیر بیشتری بر زبری سطح و نرخ براده برداری دارد [۲۶].

بررسی های انجام شده بر روی اندازه و جنس ذرات ساینده نشان از تأثیر این پارامتر بر کیفیت سطوح پرداخت کاری شده دارد. اولمن و همکارانشان [۱۹] در مشاهدات خود اعلام نمودند که تأثیر اندازه و شکل ذرات ساینده بر پرداخت کاری قطعات اهمیت بالاتری از زمان پرداخت کاری دارد، به شکل ۱۱ نگاه کنید. آنها بیان داشتند که استفاده از ذرات کروی به اندازه ۳۴٪

Walther Trowal  
FSG 10x10 TRI  
Ceramic abrasive media  
Dimensions: 10 x 10 x 10 mm  
Triangular cross-section



Walther Trowal  
FSG 6 BALLS  
Ceramic abrasive media  
Diameter: 6.6 mm  
Spherical



شکل ۱۱. تأثیر شکل و اندازه ذرات ساینده بر میزان کاهش زبری سطح قطعات کار [۱۹]

می شود. آنها مشاهده کردند که موادی همچون آلومینیوم، که دانسیته کمتری نسبت به فولاد و برنج دارد، دارای براده برداری کمتر و زبری سطح بیشتری است.

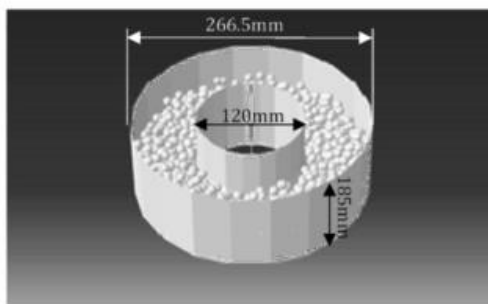
بررسی های انجام شده بر جنس قطعه کار نیز حکایت از تأثیر این پارامتر در پرداخت کاری دارد. این پارامتر به محققین جهت انتخاب روش پرداخت کاری مناسب با توجه به نوع قطعه کار کمک می نماید.

## ۵. شبیه سازی فرایند پرداخت کاری ارتعاشی

با توسعه سخت افزاری سیستم های محاسباتی و پدید آمدن نرم افزارهای تخصصی، به کارگیری روش های عددی جهت شبیه سازی های عددی فرایندهای صنعتی و تحقیقاتی به دلیل

در بررسی که توسط دامبلسکی و همکارانشان [۱۷] انجام شده است، مشاهده گردید که افزایش اختلاف بین دانسیته قطعه کار و ذرات ساینده منجر به افزایش نرخ براده برداری و افزایش راندمان پرداخت کاری می گردد که در شکل های ۷ و ۸ مشاهده

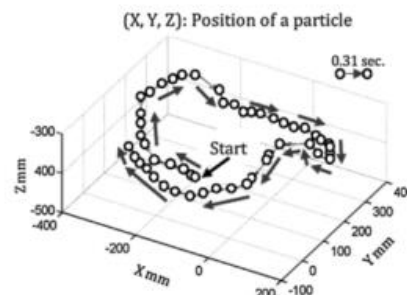
لانگستون<sup>۱۴</sup> ویسکوالاستیک هستند. با این حال برخی مدل‌های الاستوپلاستیک همچون هرتز-میندین<sup>۱۵</sup> به دلیل دقت آنها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲-۲۵]. بیشترین این مدل‌ها، از آنجایی که بر مبنای تئوری هرتز تعریف شده‌اند، غیرخطی هستند. در مدل هرتز-میندین تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک ناشی از برخوردها در جهت‌های نرمال و مماسی محاسبه می‌شوند و نیروی اصطکاک کولمب<sup>۱۶</sup> نیز در جهت مماس بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. کانگ و همکارانشان [۲] با استفاده از روش اجزای گسسته، نیروهای برخورد مماسی و نرمال بین ذرات را در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی شبیه‌سازی نمودند. شبیه‌سازی‌های آنها این امکان را داشت که با تقریب مناسبی مسیر حرکت ذرات ساینده درون ظرف را پیش‌بینی نماید که در شکل ۱۲ آمده است. با این حال استفاده از این روش در پرداخت کاری ارتعاشی در ابتدای راه قرار دارد و تحقیقات در این زمینه کماکان در حال انجام است.



شکل ۱۲. شبیه‌سازی اجزای گسسته فرایند پرداخت کاری ارتعاشی و پیش‌بینی مسیر حرکت یکی از ذرات ساینده [۲]

این پارامترها که بتوان در تمامی پرداخت کاری‌ها مورد استفاده قرار بگیرد، معرفی نشده است. تقابل این پارامترها گاهی منجر به چالش انتخاب صحیح پارامترهای بهینه جهت دستیابی به سطوحی با کیفیت بالا می‌شود. اگرچه در گذشته روش‌های تجربی مبتنی بر سعی و خطا به یافتن پارامترهای مناسب فرایند پرداخت کاری ارتعاشی می‌انجامید، امروزه محققان امیدوارند که روش‌های عددی بتواند به شناخت بیشتر این فرایند و تخمین بهینه پارامترها کمک شایانی نماید.

صرفه‌جویی چشمگیر در هزینه و زمان به‌طور گسترده‌ای مورد استقبال پژوهشگران و صنعتگران واقع شده است. روش اجزای گسسته<sup>۱۰</sup> یک روش عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مجموعه ذرات جدا از هم است. از آنجایی که بسیاری از فرایندهای صنعتی شامل جریان‌های ذره هستند، در اکثر صنایع مانند صنایع هسته‌ای، دارویی، نظامی، معدنی، شیمیایی و نیز ساخت تجهیزات عمرانی این روش عددی کاربرد گسترده‌ای یافته است. در سال‌های اخیر این روش جهت شناسایی سینماتیک و دینامیک ذرات ساینده در فرایند پرداخت کاری ارتعاشی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته و توانسته است تخمین‌های قابل قبولی در پیش‌بینی مقادیر بهینه پارامترهای فرایند فراهم آورد. در شبیه‌سازی‌های المان گسسته مدل‌های نیروی تماسی متفاوتی وجود دارد که مبنای آنها فرضیات متفاوت درباره الاستیسته ذرات برخوردکننده است. برخی از این مدل‌ها همچون فنر-خطی<sup>۱۱</sup> و هرتز<sup>۱۲</sup> الاستیک هستند درحالی‌که برخی دیگر همچون فنر/دمپر-خطی<sup>۱۳</sup> و



## ۶. نتیجه‌گیری

پرداخت کاری ارتعاشی اگرچه چندین دهه به‌عنوان راه‌کاری مناسب و مقرون به صرفه جهت پرداخت قطعات صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است ولی تاکنون ماهیت این پدیده از نظر سینماتیکی و دینامیکی به‌طور کامل شناخته نشده است. بررسی‌های انجام شده و در حال انجام توسط پژوهشگران این حوزه به شناختی نسبی از پارامترهای مؤثر در این پدیده انجامیده است. ولی مقدار و گستره دقیقی از

- [1] Domblesky, J., R. Evans, and Vikram Cariapa, "Material removal model for vibratory finishing", *International journal of production research*, 2004, Vol.42, no.5, pp.1029-1041.
- [2] Kang, Young Sup, Fukuo Hashimoto, Stephen P. Johnson, and Jerry P. Rhodes, "Discrete element modeling of 3D media motion in vibratory finishing process", *CIRP Annals*, 2017, Vol.66, no.1, pp.313-316.
- [3] Hashimoto, Fukuo, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans-Werner Hoffmeister, and Friedrich Kuster, "Abrasive fine-finishing technology", *CIRP Annals*, 2016, Vol.65, no.2, pp.597-620.
- [4] Bifano, Thomas G., Thomas A. Dow, and Ronald O. Scattergood, "Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials", 1991, pp.184-189.
- [5] Brecker, J. N., and M. C. Shaw, "Specific energy in single point grinding", *Annals of the CIRP*, 1974, Vol.23, no.1, pp.93-94.
- [6] Brinksmeier, E., Y. Mutlugünes, F. Klocke, J. C. Aurich, P. Shore, and H. Ohmori, "Ultra-precision grinding", *CIRP annals*, 2010, Vol.59, no.2, pp.652-671.
- [7] King, Robert I., and Robert S. Hahn., "*Handbook of modern grinding technology*", Chapman and Hall, New York, 1986.
- [8] Malkin, S., "Grinding wheel wear", *Grinding technology-theory and application of machining with abrasives*. 1989, pp.197-221.
- [9] Saljé, O. E., and R. Paulmann, "Relations between abrasive processes", *CIRP Annals*, 1988, Vol.37, no.2, pp.641-648.
- [10] Schlesinger, Georg, "*Die werkzeugmaschinen; grundlagen, berechnung und konstruktion*", J. Springer, 1936.
- [11] Snoeys R, Peters J., "The Significance of Chip Thickness in Grinding", *Annals of the CIRP*, 1974, Vol.23, no.2, pp.227-237.
- [12] Tönshoff, H. K., J. Peters, I. Inasaki, and T. Paul, "Modelling and simulation of grinding processes", *CIRP annals*, 1992, Vol.41, no.2, pp.677-688.
- [13] Preston, F. W., "The theory and design of plate glass polishing machines", *Journal of Glass Technology*, 1927, Vol.11, no.44, pp.214-256.
- [14] Hashimoto, Fukuo, Stephen P. Johnson, and Rahul G. Chaudhari, "Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process", *CIRP Annals*, 2016, Vol.65, no.1, pp.325-328.
- [15] Yabuki, A., M. R. Baghbanan, and J. K. Spelt, "Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher", *Wear*, 2002, Vol.252, no.7-8, pp.635-643.
- [16] Hashimoto, Fukuo, and Daniel B. DeBra, "Modelling and optimization of vibratory finishing process", *CIRP annals*, 1996, Vol.45, no.1, pp.303-306.
- [17] Domblesky, J., V. Cariapa, and R. Evans, "Investigation of vibratory bowl finishing", *International journal of production research*, 2003, Vol.41, no.16, pp.3943-3953.
- [18] Prakasam, Pradeep K., Sylvie Castagne, and Sathyan Subbiah, "Mechanism of surface evolution in vibratory media finishing", *Procedia Manufacturing*, 2015, Vol.1, pp.628-636.
- [19] Uhlmann, Eckart, Arne Dethlefs, and Alexander Eulitz, "Investigation of material removal and surface topography formation in vibratory finishing", *Procedia CIRP*, 2014, Vol.14, pp.25-30.
- [20] Pandiyan, Vigneashwara, Sylvie Castagne, and Sathyan Subbiah, "High frequency and amplitude effects in vibratory media finishing", *Procedia Manufacturing*, 2016, Vol.5 pp.546-557.
- [21] Sangid, Michael D., James A. Stori, and Placid M. Ferreira, "Process characterization of vibrostrengthening and application to fatigue enhancement of aluminum aerospace components—part II: Process visualization and modeling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, Vol.53, no.5-8, pp.561-575.
- [22] Norouzi, Hamid Reza, Reza Zarghami, Rahmat Sotudeh-Gharebagh, and Navid Mostoufi, "*Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows*", John Wiley & Sons, 2016.

- [23] Crowe, C., M. Sommerfeld, Y. Tsuji, and C. Crowe, "Multiphase Flows with Droplets and Particles CRC", *Boca Raton, FL*, 1998.
- [24] Di Renzo, Alberto, and Francesco Paolo Di Maio, "Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes", *Chemical engineering science*, 2004, Vol.59, no.3, pp.525-541.
- [25] Stevens, A. B<sup>†</sup>, and C. M. Hrenya, "Comparison of soft-sphere models to measurements of collision properties during normal impacts", *Powder Technology*, 2005, Vol.154, no.2-3, pp.99-109.

پی نوشت:

---

1. Vibratory Polishing
2. Unbalance
3. Bifano
4. lapping/polishing process
5. Preston
6. Hashimoto
7. Yabuki
8. Domblesky
9. Uhlmann
10. Discrete Element Method
11. linear-spring
12. Hertz
13. Linear-spring/dashpot(LSD)
14. Langston
15. Mindlin
16. coulomb