بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٢١٢٢

دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک (ساخت و تولید)

عنوان:

تحلیل فرآیند براده برداری قائم به روش اجزای محدود

اساتید راهنما:

دکتر سید حجت هاشمی

دکتر سید یوسف احمدی بروغنی

نگارش:

احسان مسرور

۱۳۸۷ /۹/ ۲۳

شهریور ۱۳۸۵

۱۰۲۱۲۳

باسمه تعالی

تائیدیه اعضای هیئت داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

اعضای هیئت داوران نسخه نهایی پایان نامه **آقای احسان مسرور**

تحت عنوان: **تحلیل فرایند براده برداری قائم به روش اجزای محدود**

از نظر فرم و محتوی بررسی و درجه کارشناسی ارشد عالی را به ایشان اعطا نمود.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱-استاد راهنمای اول	دکتر سید حجت هاشمی	استادیار دانشگاه بیرجند	
۲-استاد راهنمای دوم	دکتر سید یوسف احمدی بروغنی	استادیار دانشگاه بیرجند	
۳-استاد مدعو	دکتر خلیل خلیلی	استادیار دانشگاه بیرجند	
۴-استاد مدعو	دکتر محمد رضا سلیمانی	استادیار دانشگاه امام حسین	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید علی میربزرگی	استادیار دانشگاه بیرجند	

کلیه مزایا اعم از چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و ... از پایان نامه کارشناسی ارشد برای دانشگاه بیرجند محفوظ می باشد.

نقل مطالب با ذکر منابع بلامانع است.

تقدیم به:

پدر و مادر بزرگوار

و همسر مهربانم

سپاسگزاری:

ضمن سپاس بیکران خداوند، از زحمات ارزشمند و بی دریغ اساتید راهنما آقایان دکتر هاشمی و دکتر احمدی که در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه همراه و پشتیبان من بودند، تشکر و قدردانی می‌کنم. از خانوادهٔ عزیزم که دلگرمی های آنان در به پایان رساندن این تحقیق بسیار ارزشمند بوده است، صمیمانه سپاسگزاری می کنم. همچنین از تمامی اساتید، دانشجویان و دیگر عزیزانی که در اتمام این دورهٔ تحصیلی مرا یاری رسانده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

فرآیند ماشینکاری با براده برداری بخش قابل توجهی از فرآیندهای تولیدی را در دنیا شامل می شود. به دلیل اهمیت اقتصادی و فنی بسیار زیاد براده برداری، تحقیقات وسیعی برای بهینه سازی این فرآیند از نظر بالا بردن کیفیت، افزایش میزان تولید و پایین آوردن هزینه ها انجام می گیرد. در تحقیقات انجام گرفته برای بهینه سازی این فرآیند نیاز به محاسبهٔ متغیرهایی نظیر توان مورد نیاز برای ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری، توزیع تنش، دما، کرنش، نرخ کرنش و ... می باشد. محاسبهٔ این متغیرها با روشهای تحلیلی ریاضی، با توجه به شرایط مرزی نا متعارف موجود در این فرآیند کاری دشوار است و امکان در نظر گرفتن همه عوامل موثر در تحلیل وجود ندارد. از سوی دیگر روشهای آزمایشگاهی موجود علاوه بر زمانبر و پر هزینه بودن در اندازه گیری برخی از این متغیرها نظیر توزیع تنش، دما، کرنش، نرخ کرنش و ... محدودیت زیادی دارند. در سال های اخیر به دلیل پیشرفت توانایی رایانه ها و کاربرد اجزای محدود، شبیه سازی فرآیند براده برداری به روشهای عددی گزینه‌ای است که برای مطالعهٔ این فرآیند مورد توجه قرار گرفته است. در این پایان نامه از روش اجزای محدود و تکنیک مش بندی انطباق پذیر در نرم افزار ABAQUS/Explicit که به روش ALE تعلق دارد، برای مدلسازی فرآیند براده برداری قائم با ابزار لبه گرد در سرعتهای m/min ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ و زوایای برادهٔ ۵+ ، صفر و ۵- درجه استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تجربی موجود مقایسه گردیده و تاثیر تغییر سرعت براده برداری و زاویهٔ براده در نیروهای ماشینکاری بررسی گردیده است. توزیع تنش، کرنش و درجه حرارت در شرایط مختلف ارائه شده است.

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری ۳

فصل دوم پیشینه تحقیق ۵

۱-۱ پیشینه تحقیق ٦

فصل سوم آشنایی با فرآیند براده برداری قائم ۱٤

۳-۱ مقدمه ۱۵

۳-۲ فرآیند براده برداری قائم ۱۵

۳-۳ نواحی تغییر شکل در فرآیند براده برداری ۱۷

۳-٤ نیروهای براده برداری ۱۹

۳-٤ نتیجه گیری ۲۰

فصل چهارم مدلسازی مکانیکی و عددی فرآیند براده برداری ۲۱

٤-۱ مقدمه ۲۲

٤-۲ مدلسازی مکانیکی فرآیند براده برداری ۲۲

٤-۲-۱ اصطکاک و تماس ۲۲

٤-۲-۱-۱ مدل های اصطکاک در برش فلزات ۲۳

٤-۲-۱-۲ مدل های اصطکاک به کار رفته در شبیه سازی فرآیند براده برداری ۲۵

٤-۲-۲ مدل ساختمانی مواد ۲۷

٤-۲-۲-۱ عوامل مؤثر در خصوصیات مواد ۲۷

٤-۲-۲-۲ مدل ساختمانی مواد برای فولاد کم کربن ۲۸

٤-۲-۳ جدایی براده ۲۹

٤-۲-۳-۱ معیار جدایی براده ۲۹

٤-۲-۳-۲ مدلسازی جدایی براده ۳۰

٤-۳ مدلسازی عددی فرآیند براده برداری ۳٤

٤-۳-۱ روش های عددی ۳٤

٤-٣-١-١ روش اولری ٣٤
٤-٣-١-٢ روش لاگرانژی ٣٥
٤-٣-١-٣ روش اولری-لاگرانژی اختیاری (ALE) ٣٥
٤-٣-٢ انطباق پذیری مش بندی ٣٦
فصل پنجم اصول شبیه سازی براده برداری به کمک ABAQUS ٣٨
٥-١ مقدمه ٣٩
٥-٢ الگوریتم صریح شبیه سازی شکل گیری براده ٣٩
٥-٢-١ تحلیل دینامیکی ٣٩
٥-٢-١-١ محاسبه در نقاط گرهی ٤٠
٥-٢-١-٢ محاسبات المان ها ٤٠
٥-٢-٢ تحلیل حرارتی ٤٠
٥-٣ مرز پایداری ٤١
٥-٤ شبیه سازی شکل گیری براده پیوسته ٤٢
٥-٤-١ محدودیت مدل های شکل گیری برادهٔ فعلی ٤٢
٥-٤-٢ مزایای مدل به کار رفته برای شکل گیری براده در این تحقیق ٤٥
٥-٤-٣ روش مش بندی انطباق پذیر در ABAQUS/Explicit ٤٦
٥-٤-٣-١ انواع نواحی مرزی ٤٦
٥-٤-٣-٢ خصوصیت هندسی ٤٧
٥-٤-٣-٣ اصلاح انحنا ٤٨
فصل ششم شبیه سازی فرآیند براده برداری ٥٠
٦-١ مقدمه ٥١
٦-٢ مدلسازی ٥٢
٦-٢-١ مدلسازی قطعه کار ٥٢
٦-٢-٢ مدلسازی ابزار ٥٥
٦-٢-٣ مدلسازی حرارتی ٥٦
٦-٢-٤ شرایط مرزی ٥٦
٦-٢-٥ مشخصات رایانهٔ به کار گرفته شده ٥٧
٦-٣ نتایج بدست آمده برای سرعت M/MIN ٥٠ و زوایای ٥+ ، صفر، ٥- درجه ٥٧

٦-٣-١ نتایج بدست آمده برای زاویهٔ برادهٔ صفر درجه..... ٥٨
٦-٣-١-١ تغییر شکل المانها..... ٥٨
٦-٣-١-٢ توزیع تنشهای ون میزز..... ٥٨
٦-٣-١-٣ توزیع کرنشهای پلاستیک..... ٥٩
٦-٣-١-٤ توزیع دما..... ٥٩
٦-٣-١-٥ نیروی ماشینکاری..... ٦٤
٦-٣-٢ بررسی صحت مدل..... ٦٤
٦-٣-٣ نتایج بدست آمده برای زاویهٔ برادهٔ °٥+..... ٦٥
٦-٣-٣-١ تغییر شکل المانها..... ٦٦
٦-٣-٣-٢ توزیع تنشهای ون میزز..... ٦٦
٦-٣-٣-٣ توزیع کرنشهای پلاستیک..... ٦٧
٦-٣-٣-٤ توزیع دما..... ٦٧
٦-٣-٣-٥ نیروی ماشینکاری..... ٧٢
٦-٣-٤ نتایج بدست آمده برای زاویهٔ برادهٔ °٥-..... ٧٢
٦-٣-٤-١ تغییر شکل المانها..... ٧٣
٦-٣-٤-٢ توزیع تنشهای ون میزز..... ٧٣
٦-٣-٤-٣ توزیع کرنشهای پلاستیک..... ٧٤
٦-٣-٤-٤ توزیع دما..... ٧٤
٦-٣-٤-٥ نیروی ماشینکاری..... ٧٩
٦-٤ نتایج بدست آمده برای سرعتهای M/MIN ٥٠، ١٥٠و ٢٥٠ با زاویهٔ برادهٔ صفر درجه..... ٧٩
٦-٤-١ نتایج بدست آمده برای زاویهٔ برادهٔ °٠..... ٨٠
٦-٤-١-١ تغییر شکل المانها..... ٨٠
٦-٤-١-٢ توزیع تنشهای ون میزز..... ٨٠
٦-٤-١-٣ توزیع کرنشهای پلاستیک..... ٨١
٦-٤-١-٤ توزیع دما..... ٨١
٦-٤-١-٥ نیروی ماشینکاری..... ٨٦
٦-٥ مقایسهٔ نتایج بدست آمده برای زوایای ابزار ٥+ ، صفر و ٥- درجه..... ٨٨
٦-٥-١ تغییر شکل المانها..... ٨٨
٦-٥-٢ توزیع تنشهای ون میزز..... ٨٨

٦-٥-٣ توزیع کرنشهای پلاستیک ٨٩
٦-٥-٤ توزیع دما ٨٩
٦-٥-٥ نیروی ماشینکاری ٩٤
فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات ٩٦
٧-١ کلیات ٩٧
٧-٢ بررسی نتایج ١٠٠
٧-٣ پیشنهادات ١٠١
پیوست پلاستیسیته جانسون-کوک در ABAQUS ١٠٩

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

فرآیند ماشینکاری بخش قابل توجهی از فرآیندهای تولیدی را در دنیا شامل می شود. در حدود ۱۵ درصد کل اجزای مکانیکی در سراسر دنیا با این فرآیند تولید می شوند[۱]. به دلیل اهمیت اقتصادی و فنی بسیار زیاد براده برداری، تحقیقات وسیعی برای بهینه سازی این فرآیند از نظر بالا بردن کیفیت، افزایش میزان تولید و پایین آوردن هزینه ها انجام می گیرد.

در دهه های اخیر با افزایش سرعت محاسباتی رایانه ها و توسعه روشهای عددی، این روشها به طور وسیعی در صنعت ماشینکاری مورد استفاده قرار گرفته اند. از میان این روشها، روش اجزای محدود (FEM) به ابزار قدرتمندی برای شبیه سازی فرآیند براده برداری تبدیل شده است. به کمک شبیه سازی فرآیند براده برداری و تحلیل انتقال حرارت در برش فلزات می توان نیروهای ماشینکاری، دمای براده برداری، توزیع تنش، کرنش و نرخ کرنش را پیش بینی کرد. اندازه گیری برخی از این متغیرها با روش های آزمایشگاهی کاری دشوار، زمان بر، پر هزینه و گاهی غیر ممکن است. شبیه سازی فرآیند براده برداری به روش اجزای محدود، می تواند تا حد زیادی جایگزین آزمایشات زمانبر و پرهزینه شود. داده های بدست آمده از این شبیه سازی امکان بهینه سازی فرآیند براده برداری را فراهم می کند. با انتخاب پارامتر های ماشینکاری نظیر سرعت برش، عمق براده برداری، پهنای براده،

زوایا و شکل هندسی ابزار، جنس قطعه کار و مدلسازی شرایط تماس، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و... به عنوان داده های ورودی در شبیه سازی اجزای محدود، بررسی مواردی نظیر سایش ابزار، اثر زوایای مختلف ابزار در نیروهای ماشینکاری، شکل براده، توزیع تنش های پسماند در قطعه کار، صافی سطح ماشینکاری شده، مصرف انرژی و... میسر می‌گردد.

۱-۲ شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری

شکل گیری براده پدیده ای طبیعی در تمام فرآیندهای براده برداری است. این پدیده محور اصلی تحقیقات در مورد نیروهای ماشینکاری، دمای ماشینکاری، سایش ابزار، ارتعاشات ماشین ابزار، شکل گیری لبه انباشته، شکل گیری براده حلقوی، شکست براده و... است.

بر اساس بررسی جامعی که بوسیله گروه CIRP[1] در زمینه مدلسازی فرآیندهای ماشینکاری طی سال های ۱۹۹٦ تا ۱۹۹۷ صورت گرفته[٤]، در بین ۵۵ گروه تحقیقاتی اصلی فعال در زمینه مدلسازی، ٤۳٪ در مدلسازی تجربی، ۳۹٪ در مدلسازی تحلیلی و ۱۸٪ در مدلسازی عددی فعالیت می کردند که در گروه آخر روش های مدلسازی اجزای محدود به عنوان ابزار اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال های اخیر کاربرد اجزای محدود در مدلسازی برش فلزات به دلیل مزایای آن و به دلیل پیشرفت توانایی رایانه ها به شدت افزایش یافته است.[۲۱،۲۰]

روش اجزای محدود به کار رفته در تحلیل شکل گیری براده در مقایسه با روش های تجربی و تحلیلی از مزایای مختلفی برخوردار است[۲۲]:

- خصوصیات مواد را می توان به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما به کار برد.
- تماس بین ابزار و براده را می توان در دو ناحیه چسبیدن و لغزیدن مدل سازی کرد.
- مرزهای هندسی غیرخطی مانند سطوح آزاد براده قابل مدلسازی و بررسی است.

---

[1] Cooperative Institutional Research Program

- علاوه بر متغیرهای کلی نظیر نیروی برش، نیروی پیشروی و شکل هندسی ابزار متغیرهای محلی نظیر تنش های محلی، توزیع دما و ... قابل پیش بینی است.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۱-۱ پیشینه تحقیق

روش اجزای محدود برای اولین بار بوسیله کلامکی[۱] [٦٥]، اکوشیما[۲] [٢٤] و تای[۳] [٢٥] در دهه ۱۹۷۰ برای شبیه سازی فرآیند براده برداری به کار برده شد. با پیشرفت سرعت پردازنده ها و افزایش حافظه های رایانه ای از مشکل محدودیت مدلسازی و پیچیدگی محاسباتی تا حد زیادی کاسته شد. علاوه بر این نرم افزارهای اجزای محدود بیشتری نظیر NIKE™[٢٦]، ABAQUS/Standard™[٢٧]، MARC™، DEFORM 2D™[٢٩]، FORGE 2D™[٣١،٣٠]، ALGOR™، FLUENT™، ABAQUS/Explicit™[٣٢] و ANSYS™/LS-DYNA™[٣٣] در شبیه سازی شکل گیری براده به کار رفت.

تا کنون پیشرفت های زیادی در زمینه شبیه سازی اجزای محدود فرآیند براده برداری بدست آمده است که در این باره می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. روش لاگرانژی برای شبیه سازی شکل گیری اولیهٔ براده به کار برده شده [٣٤]، شکل گیری برادهٔ منقطع[۴] برای شبیه سازی براده برداری با سرعت

---

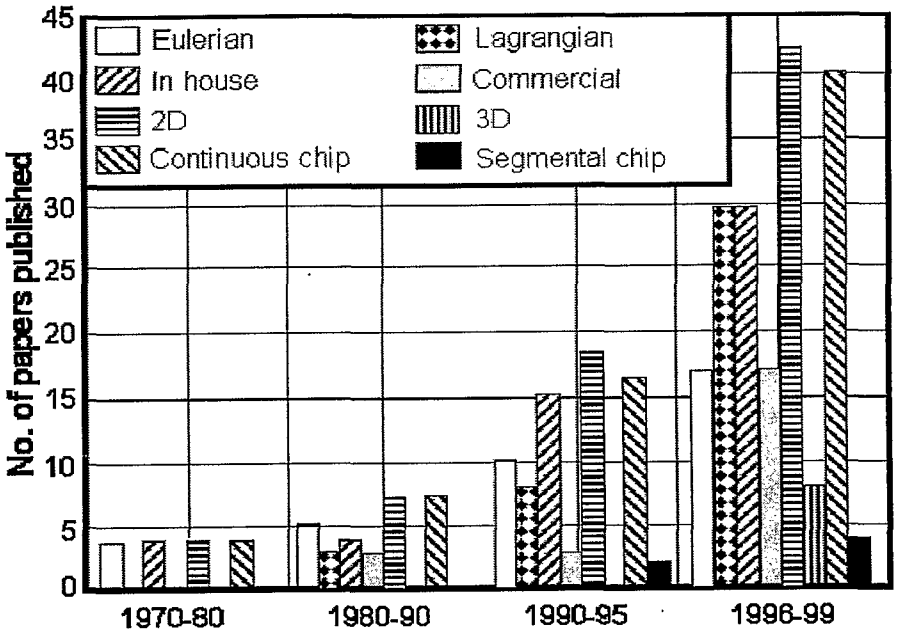
[۱] Klamecki

[۲] Okushima

[۳] Tay

[۴] Segmented chip formation

بالا [۱٤،۳۵،۸۵]، سخت تراشی[1] [۳٦،۳۷] و زوایای منفی براده [۳۸] به کار رفته و شبیه سازی سه بعدی برای تحلیل براده برداری مایل ارائه شده است [۳۹،٤۰،٤۱،٤۲،٦۵]. در شکل (۲-۱) روند انتشار مقالات تحقیقاتی در ارتباط با مدلسازی اجزای محدود فرآیند براده برداری در سه دهه اخیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ نمودار انتشار مقالات تحقیقاتی در سه دهه اخیر درباره مدلسازی [٤۳]

همانطور که در نمودار مشهود است تا قبل از سال ۱۹۹۵ روش اولری به دلیل زمان محاسباتی کمتر به روش لاگرانژی ترجیح داده می شد، ولی پس از آن به دلیل پیشرفت توانایی رایانه ها، کاربرد روش لاگرانژی بر روش اولری برتری یافت.

تا کنون ابزارهای برشی و قطعات کار با جنس های مختلفی در مدلسازی فرآیند براده برداری به کار برده شده است. ابزارهایی نظیر کاربیدهای بدون پوشش[٤٤]، کاربیدهای پوشش دار[۳۱]، ابزارهای

[1] Hard Turning

CBN [۴۵][1]، سرمت ها، ابزارهای سرامیکی و ابزارهای الماس [۳۸] در مدلسازی به کار رفته اند. قطعه کارهای مدل شده نیز شامل فولاد کربن دار[۳۷]، کامپوزیت[۴۶]، فولاد سخت کاری شده[۴۳]، چدن، چدن داکتیل[۴۸،۴۷] و... می باشد.

اثرات هندسه ابزار بر شکل گیری براده نیز مورد بررسی قرار گرفته است که عمدتاً شامل زوایای براده مختلف[۴۹] و شکل هندسی ابزار است. شکل هندسی ابزارهای مورد مطالعه شامل ابزارهای لبه تیز، پخ خورده[۵۱،۵۰] و لبه گرد[۴۵،۵۲]، ابزار با براده شکن[۵۳]، و ابزارهای ساییده شده[۵۵،۵۴] می باشد.

فرآیندهایی که مدلسازی شده اند بیشتر شامل تراشکاری[۶۷]، فرز کاری[۸۴]، سوراخکاری و براده برداری میکروسکوپی یک دانه ساینده منفرد در سنگ زنی[۳۸] می باشد. براده برداری قائم متداول ترین روش براده برداری مدلسازی شده می باشد[۲۶]. علاوه بر اینها اثر براده برداری پیوسته [۶۰] و ساختار ریز دانه ای قطعه کار [۴۸،۴۷] در شکل گیری براده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

به جز متغیرهای معمولی بحث شده نظیر نیروهای ماشینکاری، دمای ماشینکاری و تنش ها در ابزار و قطعه کار، متغیرهایی نظیر تنش های پسماند[۵۶،۵۵،۱۶]، سایش ابزار[۵۷،۲] و بازدهی ابزار[۵۸] زبری سطح[۵۹]، شکست براده[۲۸] و زاویه جریان براده[۶۸] نیز مورد بررسی قرار گرفته اند.

در دهه گذشته پیشرفت های مداومی در مدل سازی فرآیند برداری قائم با تلاش تعدادی از پژوهشگران بدست آمد.ماکرله[2] [۶۳،۶۲] تاریخچه ای از این تلاشها را گرد آوری کرده است.

بعضی از مدلهایی که برای مدلسازی براده برداری قائم مورد استفاده قرار گرفته است، از روش اولری استفاده کرده اند. در بسیاری از این مطالعات از روش لاگرانژی استفاده شده است که امکان

---

[1] Cubic Boron Nitride

[2] Mackerle

مدل سازی فرآیند براده برداری قائم ، از زمان شکل گیری براده اولیه تا حالت پایدار شکل گیری براده را فراهم می‌کند. به دلیل اینکه استفاده از روش لاگرانژی نیازمند یک معیار برای جدایی براده از قطعه کار است، به کارگیری یک معیار مناسب و واقع گرایانه برای جدایی عامل مهمی در مدل سازی اجزای محدود براده برداری به این روش است. هوانگ[۱] و بلاک[۲] [٦٤] ارزیابی مفصلی از معیار جدایی براده ارائه داده اند.

کلامکی[۳] [٦٥] یکی از اولین مدل های اجزای محدود براده برداری را ارائه کرد. این مدل یک مدل شکل گیری براده اولیه بود که اثر نرخ کرنش و اصطکاک را در برنمی گرفت . مدتی بعد این مدل با افزودن تغییر شکل ترموالاستیک-پلاستیک کاملتر شد. اما با این فرض که اثر نرم شدن ماده قطعه کار با افزایش دما در مدلسازی بر اثر نرخ کرنش غلبه می کند، از اثر نرخ کرنش در شبیه سازی صرفنظر گردید. تای[۴] و همکارانش [۲٥] برای پیش بینی توزیع دما در براده برداری قائم حالت پایدار، از مدلسازی حالت پایدار استفاده کردند. اوسوی[٥] و شیراکاشی[٦] [٦٦] شبیه سازی براده برداری قائم در حالت پایدار را به شکل صلب-پلاستیک انجام دادند. مدل آنها قادر بود معادلات متنوعی نظیر تعادل تنش ها، روابط دیفرانسیلی تنش-کرنش ، انتقال حرارت ، تنش جریان مواد قطعه کار و خصوصیات تنش اصطکاکی در سطح تماس ابزار و براده را مدلسازی کند. آنها همچنین مدل اصطکاکی را پیشنهاد دادند که خصوصیات هر دو ناحیه چسبیدن و لغزیدن براده را در برمی گرفت. استرنکوفسکی[۷] و

---

[۱] Huang

[۲] Black

[۳] Klamecki

[۴] Tay

[٥] Usui

[٦] Shirakashi

[۷] Strenkowski