مقاله

بررسی نیروی ماشینکاری در فرایند تراشکاری به‌کمک ارتعاشات اولتراسونیک

نوید جوام، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دهاقان
navid.javam@yahoo.com
جواد جانقربانیان، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
javad_janghorbanian@yahoo.com

چکیده
در این مقاله تأثیر پارامترهای ماشینکاری و دامنهٔ ارتعاشات ابزار بر نیروی ماشینکاری در فرایندهای تراشکاری اولتراسونیکی و سنتی، همچنین تأثیر زمان براده‌برداری بر نیرو بررسی شده است. در این رهگذر، ارتعاشات اولتراسونیک به‌صورت یک‌بعدی و در راستای سرعت خطی قطعه‌کار به ابزار تراشکاری اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در تراشکاری اولتراسونیکی، برخلاف تراشکاری سنتی، افزایش سرعت برشی سبب افزایش نیروهای ماشینکاری شده، با افزایش دامنهٔ ارتعاشات ابزار، نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد. همچنین در سرعت‌های برشی پایین، با افزودن ارتعاشات اولتراسونیک به فرایند تراشکاری، نیرو و نرخ افزایش آن کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: تراشکاری، ارتعاشات اولتراسونیک، تراشکاری سنتی، نیروی ماشینکاری

مقدمه

ماشینکاری به‌کمک ارتعاشات اولتراسونیک روشی است که در آن ارتعاشاتی با دامنهٔ کوچک و فرکانس بالا، در یک یا دو بعد، به حرکت ابزار برشی اضافه می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر، از این روش برای بهبود فرایندهای سنتی ماشینکاری از جمله سوراخکاری، تراشکاری و سنگ‌زنی، مخصوصاً براده‌برداری از مواد چسبنده مثل فولادهای آستنیتی، سوپرآلیاژهای کبالت و نیکل، آلیاژهای تیتانیوم و آلیاژهای آلومینیوم، استفاده شده است [۲]. با انتخاب مناسب سرعت برشی، دامنه و فرکانس ارتعاشات، تماس ابزار به‌صورت دوره‌ای با قطعه‌کار قطع می‌شود [۱]. در مطالعات نظری، نسبت تماس میان ابزار و قطعه‌کار نقش مهمی در فرایند دارد [۳]. در صورت افزایش دامنه و فرکانس ارتعاشات و کاهش سرعت برشی، این نسبت کاهش می‌یابد. در این حالت نیروی برشی و فرسایش ابزار کاهش یافته، کیفیت سطح بهبود می‌یابد و عمر ابزار طولانی‌تر می‌شود. در تراشکاری به‌کمک ارتعاشات یک‌بعدی، ماکزیمم نیروی لحظه‌ای برابر با مقدار نیرو در

ماشینکاری سنتی است، ولی میانگین نیروها کاهش می‌یابد؛ چون ابزار فقط کسری از سیکل ارتعاش را در برش شرکت می‌کند. در تراشکاری به‌کمک ارتعاشات دوبعدی، نیروهای ماکزیمم و میانگین کمتر از مقدار آنها در ماشینکاری سنتی هستند. به‌نظر می‌رسد این کاهش نیروها به‌دلائل گوناگونی از جمله اصلاح هندسهٔ براده و همچنین تعامل میان سطح برادهٔ ابزار و براده باشد [۱].

ژیائو و همکارانش تحلیلی روی نیروهای ماشینکاری در فرایند تراشکاری، در دو حالت تراشکاری معمولی و تراشکاری اولتراسونیکی انجام دادند. آنها نشان دادند که نیروهای ماشینکاری در حالت تراشکاری اولتراسونیکی کمتر است [۴]. شاموتو و موریواکی نیز توسط عمل‌کنندهٔ پیزوالکتریک، ابزار تراشکاری را در دو جهت مرتعش کردند و با تحلیل نظری و عملی نشان دادند که نیروهای ماشینکاری بسیار کمتر از حالتی است که ارتعاشات اولتراسونیک در یک جهت اعمال می‌گردد [۵].

شاموتو و همکارانش با ارائهٔ مدل‌های نظری اثبات کردند که در فرایند ماشینکاری ارتعاشی دوبعدی، پلیسه روی قطعه‌کار حذف می‌شود. آنها با انجام آزمایش‌های عملی تحلیل فوق را تأیید نمودند [۶]. بابیتسکی و همکارانش نیز توسط روش المان محدود اثر روانکار و پارامترهای برشی را بر نحوهٔ تشکیل براده بررسی کردند. آنها نشان دادند که در تراشکاری اولتراسونیکی شعاع انحنا و ضخامت براده کاهش می‌یابد [۷].

نات و همکارانش برای فولاد کم‌آلیاژ DF2، سایش ابزار، نیروهای برشی، نحوهٔ تشکیل براده و زبری سطح در دو حالت برش معمولی و برش به‌کمک ارتعاش اولتراسونیک را با هم مقایسه کردند. سایش سطح آزاد ابزار در هر دو روش با عکس‌برداری مقایسه و سازوکارهای سایش ابزار و تأثیر ارتعاش بر آنها نیز بررسی شد. روش اولتراسونیک دارای فرسایش سایشی کمتری است. نرخ سایش در برش اولتراسونیک کم است و بسیار آهسته افزایش می‌یابد که دلیل آن، سازوکار برش ناپیوسته است [۸]. امینی و همکارانش نیز به‌وسیلهٔ نرم‌افزارهای MSC-MARC و ANSYS، تراشکاری اینکونل ۷۳۸ به‌کمک ارتعاش را مطالعه کردند و جنس و شکل بهینهٔ ابزار مرتعش را به‌دست آوردند. با افزایش دامنهٔ ارتعاش یا سرعت برشی، نیروها و تنش‌های برشی در ماشینکاری اولتراسونیک افزایش یافتند. آنها نتیجه گرفتند که برخلاف زاویهٔ آزاد ابزار، که روی نیروی برشی اثری ندارد، زاویهٔ براده بر آن اثرگذار است [۹].

هدف این مقاله مقایسه نیروی ماشینکاری در فرایندهای تراشکاری اولتراسونیکی و تراشکاری سنتی است. برای انجام آزمایش‌ها، ارتعاشات اولتراسونیک به‌صورت یک‌بعدی و در راستای سرعت برشی قطعه‌کار به ابزار تراشکاری اعمال شد. در قسمت نخست آزمایش‌ها تأثیر پارامترهای ماشینکاری و دامنهٔ ارتعاشات ابزار بر نیروی ماشینکاری در هر دو روش ماشینکاری بررسی شد. در این قسمت برای طراحی و تحلیل آزمایش‌ها از روش تاگوچی استفاده شد. در قسمت دوم اما، تأثیر زمان براده‌برداری بر نیرو بررسی شد.

آماده‌سازی آزمایش‌ها

جنس قطعه‌کار مورد استفاده در آزمایش‌ها فولاد AISI1045 است. قطعه‌کارها، توسط مرغک و سه‌نظام، روی دستگاه تراش بسته شدند. دستگاه تراش مورد استفاده ساخت کارخانهٔ ماشین‌سازی تبریز است. کلیهٔ آزمایش‌ها توسط ابزار تنگستن کاربایدی انجام شده است. نیروی ماشینکاری نیز توسط دینامومتر KISTLER مدل 9257A ثبت شد. برای اعمال ارتعاشات اولتراسونیکی به ابزار از یک تراگذار با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز استفاده شد. ارتعاشات اولتراسونیک توسط هورن از تراگذار اولتراسونیک به ابزار تراشکاری منتقل می‌شود. بنابراین هورن و ابزار ماشینکاری توسط روش‌های المان محدود تحلیل ارتعاشی شدند، به‌طوری‌که فرکانس ارتعاشی آنها با فرکانس ارتعاشی تراگذار برابر گردد. قیدوبند لازم نیز، جهت اتصال مجموعه فوق به دستگاه تراش، ساخته شد. ارتعاشات در یک بعد و

در راستای سرعت برشی قطعه‌کار به ابزار اعمال شد. از ابزار تراشکاری برای انجام عملیات روتراشی استفاده شد. جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در قسمت نخست آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. اگر برای آزمایش‌های تراشکاری سنتی از پارامترهای شمارهٔ ۱ تا ۳ جدول و برای آزمایش‌های تراشکاری ارتعاشی از پارامترهای ۱ تا ۴ استفاده کنیم، روش تاگوچی برای هر دو حالت آرایهٔ متعامد L16 را پیشنهاد می‌کند.

جدول ۱. سطوح مربوط به پارامترهای آزمایش

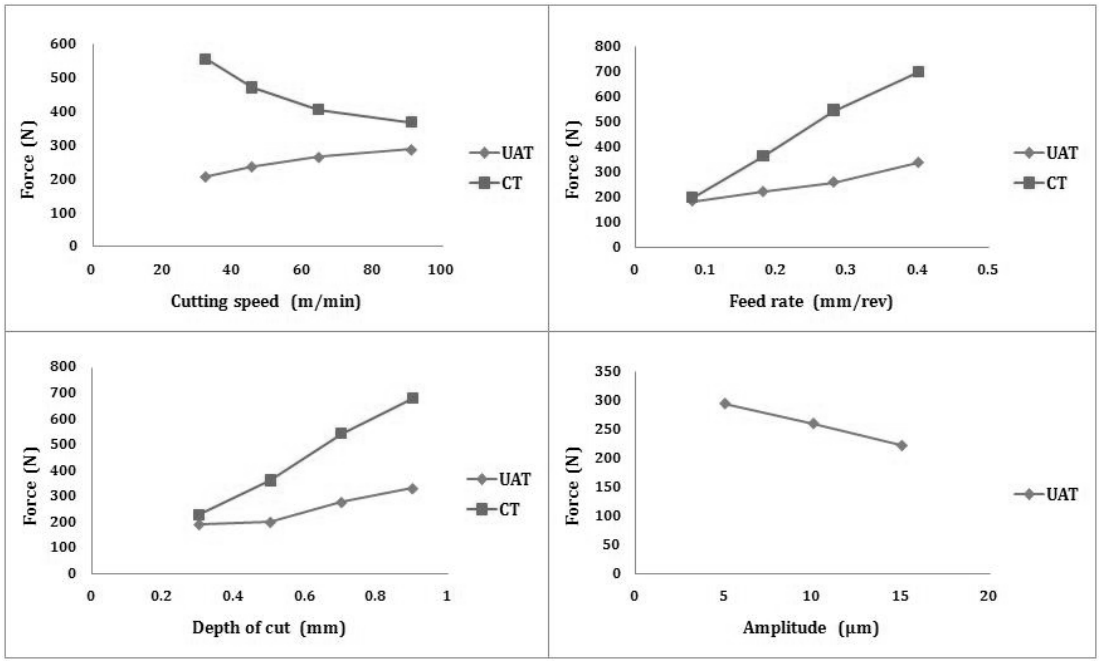
شماره	پارامترهای آزمایش	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ٤
۱	سرعت برشی	m/min	۳۲/۳۲	۴۵/۵۳	۶۴/۶۵	۹۱/۰۶
۲	نرخ پیشروی	mm/rev	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۴
۳	عمق برش	Mm	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹
۴	دامنهٔ ارتعاشات	µm	۵	۱۰	۱۵	-

پس از تنظیم پارامترها و روشن‌کردن سیستم ارتعاشی، نیمی از طول قطعه‌کار به‌صورت اولتراسونیکی و با خاموش‌کردن سیستم ارتعاشی مابقی طول به‌صورت سنتی تراشکاری شد. به‌دلیل عدم امکان تغییر فرکانس ارتعاشات، آزمایش‌های ارتعاشی با فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز انجام شد. در قسمت دوم آزمایش‌ها، ماشینکاری با عمق ۰/۵ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور انجام شد. آزمایش‌های این قسمت به دو صورت ارتعاشی و سنتی با سرعت‌های برشی ۱۵ و ۱۱۰ متر بر دقیقه انجام گرفت. آزمایش‌های ارتعاشی تحت فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنهٔ ۱۵ میکرومتر انجام شد.

نتایج

در شکل ۱ عملکرد میانگین فاکتورها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش عمق برش و نرخ پیشروی در فرایندهای تراشکاری اولتراسونیکی و سنتی سبب افزایش نیرو می‌شود. البته بیان این نکته حائز اهمیت است که با تغییر عمق برش و نرخ پیشروی، تغییرات نیرو در تراشکاری سنتی بیشتر از تراشکاری اولتراسونیکی است. همچنین با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، اختلاف نیرو در تراشکاری اولتراسونیکی و سنتی افزایش می‌یابد. این موضوع بدین معناست که که با افزایش عمق برشی و نرخ پیشروی، ارتعاشات اولتراسونیک کارآمدتر خواهد بود و نیرو در تراشکاری اولتراسونیکی نسبت به تراشکاری سنتی کاهش بیشتری خواهد یافت.

در تراشکاری سنتی برای کاهش نیروی ماشینکاری باید سرعت برشی را افزایش داد و نرخ پیشروی و عمق برش را کاهش داد. در تراشکاری اولتراسونیکی، برخلاف تراشکاری سنتی، برای کاهش نیروی ماشینکاری باید سرعت برشی را کاهش داد. همچنین مثل تراشکاری سنتی باید نرخ پیشروی و عمق برش را نیز کاهش دهیم. پارامتر دیگری که در تراشکاری اولتراسونیکی بررسی می‌شود، دامنهٔ ارتعاشات است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که افزایش دامنهٔ ارتعاشات سبب کاهش نیروی برش می‌شود. جدول ۲ نتایج تراشکاری سنتی و ارتعاشی را نشان می‌دهد که در هر دو روش، نرخ پیشروی و عمق برش بیشترین تأثیر را بر نیروی ماشینکاری دارند. افزودن ارتعاشات به فرایند تراشکاری سبب شده است که تأثیر نرخ پیشروی بر نیرو کاهش یابد، اما درصد تأثیرگذاری عمق برش تقریباً ثابت مانده است.



شکل ۱. عملکرد میانگین فاکتورها بر نیروی ماشینکاری

نتایج به‌دست آمده از قسمت قبل نشان داد که در تراشکاری اولتراسونیکی افزایش سرعت برشی باعث افزایش نیرو و کاهش سرعت برشی باعث کاهش نیروی ماشینکاری می‌شود. بنابراین برای بررسی تأثیر مدت زمان براده‌برداری بر نیرو، از دو سرعت ۱۵ و ۱۱۰ متر بر دقیقه استفاده شد. شکل ۳ تأثیر مدت زمان براده‌برداری را بر نیرو نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زمان ماشینکاری نیرو در هر دو روش ماشینکاری افزایش می‌یابد؛ این به‌دلیل گسترش فرسایش ابزار نسبت به مدت زمان براده برداری است. در سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه، با افزایش زمان براده‌برداری، نیرو در تراشکاری سنتی با سرعت بیشتری نسبت به تراشکاری اولتراسونیکی افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که در تراشکاری اولتراسونیکی به‌دلیل کاهش فرسایش ابزار نسبت به تراشکاری سنتی، نیرو با نرخ بسیار کمتری افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی به‌دلیل نزدیک‌شدن سرعت خطی قطعه‌کار به ماکزیمم سرعت ارتعاشات ابزار، ماهیت نوسانی براده‌برداری در تراشکاری اولتراسونیکی کاهش یافته، و به‌دلیل تماس‌های ضربه‌ای ابزار با قطعه‌کار امکان افزایش فرسایش ابزار در تراشکاری اولتراسونیکی نسبت به تراشکاری سنتی وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، در سرعت برشی ۱۱۰ متر بر دقیقه به‌دلیل نزدیک‌شدن سرعت خطی قطعه‌کار به سرعت ارتعاشات ابزار و ماهیت ضربه‌ای تراشکاری اولتراسونیکی، نیرو در تراشکاری اولتراسونیکی با سرعت بیشتری نسبت به تراشکاری سنتی افزایش می‌یابد.

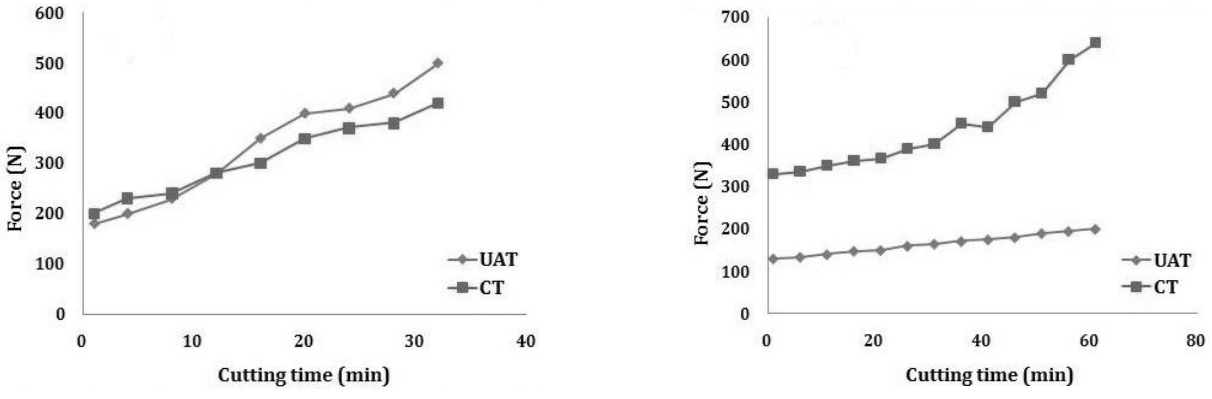
بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای ماشینکاری و دامنهٔ ارتعاشات ابزار بر نیروی ماشینکاری در تراشکاری اولتراسونیکی و سنتی بررسی شد. مشاهده شد که مؤثرترین پارامترها بر نیروی ماشینکاری در تراشکاری اولتراسونیکی و سنتی عبارت‌اند از عمق برش و نرخ پیشروی، که با افزودن ارتعاشات اولتراسونیک به فرایند تراشکاری سنتی، تأثیر نرخ پیشروی بر نیروی ماشینکاری کاهش می‌یابد. ارتعاشات اولتراسونیک در کمترین سرعت برشی و در بیشترین نرخ پیشروی، عمق برش و دامنهٔ ارتعاشات، بیشترین تأثیر را در

کاهش نیروی ماشینکاری داشته، به‌طوری‌که در بهترین شرایط نیرو در تراشکاری اولتراسونیکی نسبت به تراشکاری سنتی ۶۹ درصد کاهش می‌یابد. در ادامه، تأثیر مدت زمان براده‌برداری بر نیرو بررسی شد. مشاهده شد که در سرعت‌های برشی پایین به‌دلیل ماهیت نوسانی و منقطع براده‌برداری در تراشکاری اولتراسونیکی، نرخ افزایش نیروها در این روش ماشینکاری کمتر از تراشکاری سنتی است و با افزایش سرعت برشی، به‌دلیل براده‌برداری پیوسته و ماهیت ضربه‌ای تراشکاری اولتراسونیکی، نرخ افزایش نیروها در این روش نسبت به تراشکاری سنتی افزایش می‌یابد.

جدول ۲. جدول آنالیز واریانس در تراشکاری سنتی و اولتراسونیکی

تراشکاری سنتی						
پارامترهای آزمایش	درجهٔ آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت برشی	۳	۸۰۱۲۳/۲۵	۲۶۷۰۷/۷۵	۹/۲۶۴	۷۱۴۷۵/۲۵	۶/۳
نرخ پیشروی	۳	۵۶۷۷۴۵/۲۵	۱۸۹۲۴۸/۴۱۶	۶۵/۶۵	۵۵۹۰۹۷/۲۵	۴۹/۲۸
عمق برش	۳	۴۶۹۳۶۳/۲۵	۱۵۶۴۵۴/۴۱۶	۵۴/۲۷۴	۴۶۰۷۱۵/۲۵	۴۰/۶۰۸
تراشکاری اولتراسونیکی						
پارامترهای آزمایش	درجهٔ آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت واریانس	مجموع مربعات خالص	درصد مشارکت
سرعت برشی	۳	۱۳۰۰۹/۲۵	۴۳۳۶/۴۱۶	۸/۰۳۶	۱۱۳۹۰/۴۶۸	۸/۶۷
نرخ پیشروی	۳	۴۹۰۷۲/۲۵	۱۶۳۵۷/۴۱۶	۳۰/۳۱۴	۴۷۴۵۳/۴۶۸	۳۶/۱۲۲
عمق برش	۳	۵۴۶۰۲/۲۵	۱۸۲۰۰/۹۱۶	۳۳/۷۳	۵۲۹۸۳/۹۶۸	۴۰/۳۳۱
دامنهٔ ارتعاشات	۲	۱۲۵۲۷/۱۲۵	۶۲۶۳/۵۶۲	۱۱/۶۰۷	۱۱۴۴۷/۹۳۷	۸/۷۱۴



(الف) (ب)

شکل ۲. تأثیر مدت زمان ماشینکاری بر نیرو، عمق ۰/۵ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۰/۱۸ میلی‌متر بر دور و دامنهٔ ارتعاشات ۱۵ میکرومتر
الف) سرعت برشی ۱۵ متر بر دقیقه، ب) سرعت برشی ۱۱۰ متر بر دقیقه

مآخذ

[1] Brehl, D. E., T. A. Dow, “Review of vibration-assisted machining”, *Precision Engineering*, 32: pp. 153–172, 2008.

[2] Wit Grzesik, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, Elsevier, 2008.

[3] Nath, Chandra, M. Rahman, “Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48:pp. 965–974, 2008.

[4] Xiao, M., Q. Wang, S. Karube, T. Soutome, H. Xu," The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46:pp. 492–499, 2006.

[5] Chunxiang Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Lijiang Wang, “Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44:pp. 1305–1310, 2004.

[6] Chunxiang Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, Yonghong Zhang, Lijiang Wang, “Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45:pp. 1295-1300, 2005.

[7] A.V. Mitrofanov, N. Ahmed, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, " Effect of lubrication and cutting parameters on ultrasonically assisted turning of Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163:pp. 649–654, 2005.

[8] C. Nath, M. Rahman, S.S.K. Andrew, “A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel”, *J. Materials Processing Technology*, 192-193: pp. 159-165, 2007.

[9] Amini, S., H. Soleimanimehr, M.J. Nategh, A. Abudollah, M.H. Sadeghi, “FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool”, *J. Materials Processing Technology*, 201:pp. 43-87, 2008.

آدرس : خیابان حافظ ، روبروی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، کوچه آرژانتین ، پلاک ۲

فکس :۸۸۸۰۷۰۰۸ تلفن : ۸۸۸۹۲۱۴۴ ، ۸۸۸۹۵۹۶۹